

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

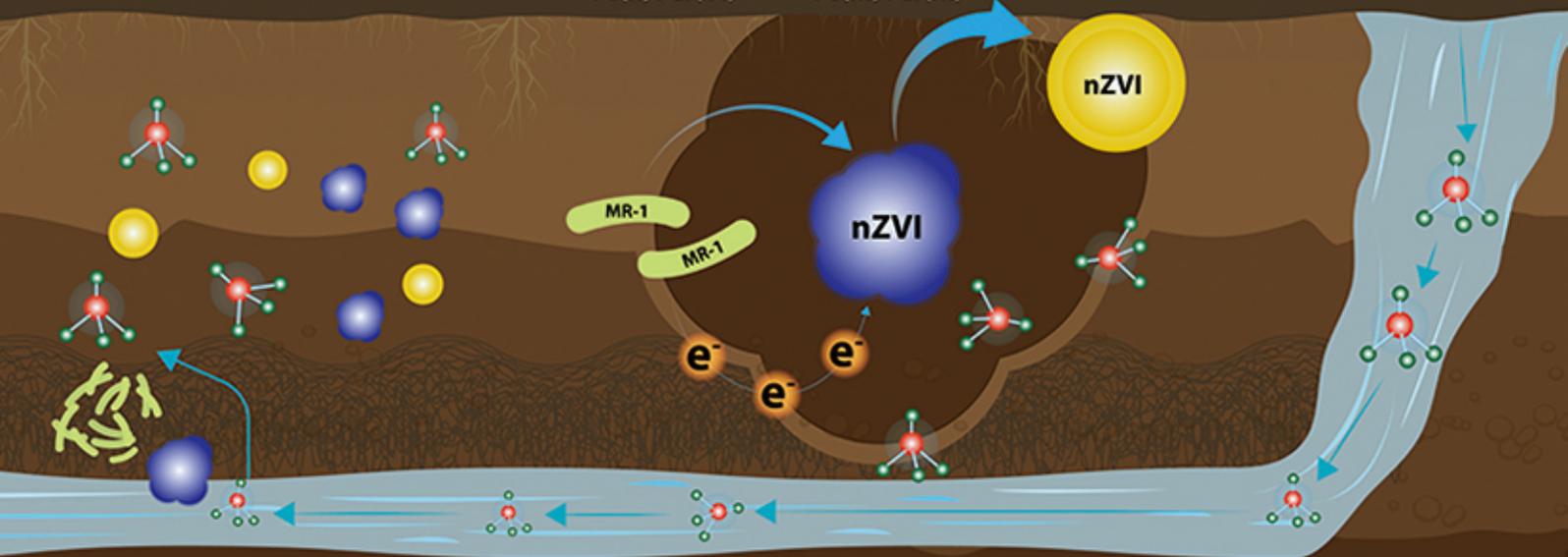
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJIANG KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM_{2.5} 和 O₃ 时空分布与健康效应评估 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)

京津冀地区高分辨率 PM_{2.5} 浓度时空变化模拟与分析 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)

京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM_{2.5} 污染影响 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 王瑞鹏 (4095)

太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)

嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏崢 (4116)

基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)

新乡市大气 PM_{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)

黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)

天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐逸 (4158)

中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)

乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)

珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)

永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)

汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)

环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)

柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价 张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)

雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)

龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)

硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)

包头南海湿地磷形态及污染源定量识别 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)

城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)

水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)

锰砂人工湿地对污染物的强化去除 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)

4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)

输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)

木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)

海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)

纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 生长的拮抗效应及其作用机制 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)

螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)

螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)

溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响 池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)

间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)

生物膜系统中部分反硝化实现特性 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)

厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)

不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)

中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)

青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)

电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)

改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)

组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)

不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)

1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响 鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)

不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)

高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征 刘晓华, 魏天兴 (4489)

餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何品晶 (4500)

秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系 马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)

氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N₂O 排放的影响 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)

负载 NH₄⁺-N 生物炭对土壤 N₂O-N 排放和 NH₃-N 挥发的影响 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)

微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)

1985~2019 年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)

《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)

天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源

李立伟¹, 肖致美¹, 杨宁¹, 蔡子颖², 闫斌峰³, 元洁¹, 白宇¹, 郑乃源¹, 唐邈^{1*}

(1. 天津市生态环境监测中心, 天津 300191; 2. 天津市环境气象中心, 天津 300074; 3. 天津市河东区生态环境监测中心, 天津 300170)

摘要: 为了解天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特征, 基于 2020 年 1~2 月高时间分辨率的在线监测数据, 对 1 月 16~18 日(重污染过程 I)、1 月 26~28 日(重污染过程 II)和 2 月 9~10 日(重污染过程 III)进行气溶胶消光特性及其来源分析。结果表明, 3 次重污染过程 PM_{2.5} 平均浓度分别为(229 ± 52)、(219 ± 48)和(161 ± 25) μg·m⁻³, NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺、OC、EC、Cl⁻ 和 K⁺ 为 PM_{2.5} 中主要组分。3 次重污染过程气溶胶散射系数(B_{sp550})和吸收系数(B_{ap550})分别为(1 055.65 ± 250.17)、(1 054.26 ± 263.22)、(704.44 ± 109.89) Mm⁻¹和(52.96 ± 13.15)、(39.72 ± 8.21)、(34.50 ± 8.53) Mm⁻¹, 散射效应高于吸收效应。重污染天气下硝酸盐(38.9%~48.8%)、硫酸盐(31.1%~40.7%)和 OM(9.9%~21.8%)为 PM_{2.5} 中最主要消光成分。3 次重污染过程 PM_{2.5} 组分对气溶胶消光的贡献发生明显变化, 重污染过程 I, 硝酸盐对消光系数的贡献最高; 重污染过程 II, 受春节期间烟花爆竹燃放影响, OM 对消光系数的贡献升高; 重污染过程 III, 交通出行减少但燃煤源排放相对稳定, 硝酸盐对消光系数的贡献降低, 硫酸盐的贡献升高。来源解析结果显示, 重污染天气气溶胶消光的主要来源为二次无机气溶胶(37.1%~42.0%)、燃煤和工业(22.9%~24.2%)、机动车(23.9%~27.2%)、扬尘源(5.0%~6.4%)和烟花爆竹及生物质燃烧排放(3.9%~6.2%)。与重污染过程 I 相比, 重污染过程 II 烟花爆竹及生物质燃烧排放对消光系数的贡献升高; 重污染过程 III 机动车对消光系数的贡献明显降低; 燃煤和工业对消光系数的贡献在 3 次重污染过程中较接近。后轨迹分析表明, 重污染天气期间天津市主要来自河北的小尺度、短距离以及内蒙古中部的中尺度、中短距离气团传输轨迹为主。

关键词: 天津; 重污染; PM_{2.5}; 消光系数; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4158-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202101201

Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin

LI Li-wei¹, XIAO Zhi-mei¹, YANG Ning¹, CAI Zi-ying², YAN Bin-feng³, YUAN Jie¹, BAI Yu, ZHENG Nai-yuan¹, TANG Miao^{1*}

(1. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China; 2. Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China; 3. Tianjin Hedong Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300170, China)

Abstract: This study examined high-resolution online monitoring data from January to February 2020 to study the extinction characteristics and sources of heavy pollution episodes during winter in Tianjin. Heavy pollution episodes occurred during this period from January 16 to 18 (episode I), from January 24 to 26 (episode II), and from February 9 to 10 (episode III). The results showed that the concentrations of PM_{2.5} during the three heavy pollution episodes were (229 ± 52), (219 ± 48), and (161 ± 25) μg·m⁻³, respectively, with NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, OC, EC, Cl⁻, and K⁺ comprising the main species. The values of the scattering coefficient(B_{sp550}) during the three heavy pollution episodes were (1 055.65 ± 250.17), (1 054.26 ± 263.22), and (704.44 ± 109.89) Mm⁻¹, respectively, while the absorption coefficient(B_{ap550}) showed much lower values of (52.96 ± 13.15), (39.72 ± 8.21), and (34.50 ± 8.53) Mm⁻¹, respectively. PM_{2.5} played a major role in atmospheric extinction during heavy pollution episodes. Specifically, nitrate (38.9%-48.8%), sulfate (31.1%-40.7%), and OM (9.9%-21.8%) were the most important extinction components. The contribution of PM_{2.5} chemical components to the extinction coefficient varied significantly between the three episodes; the percentage of nitrate was higher in episode I than in the other two episodes; in episode II, the percentage of OM was highest, significantly affected by the discharge of fireworks; in episode III, as traffic decreased but coal combustion emissions remained constant, the contribution of nitrate to the extinction coefficient decreased, while that of sulfate increased. Source apportionment of extinction coefficients was performed using PMF model combined with IMPROVE. Various pollution sources contributed to the extinction coefficient, namely: secondary sources (37.1%-42.0%), industrial and coal combustion (22.9%-24.2%), vehicle exhaust (23.9%-27.2%), crustal dust (5.0%-6.4%), and fireworks and biomass burning (3.9%-6.2%). Compared with

收稿日期: 2021-01-22; 修订日期: 2021-03-12

基金项目: 天津市科技计划项目(18ZXSZSF00160)

作者简介: 李立伟(1990~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气污染与防治, E-mail: llwabc2010@163.com

* 通信作者, E-mail: tangmiao32@163.com

episode I, the contribution of fireworks and biomass burning increased significantly during episode II, while the contribution of vehicle exhaust decreased significantly during episode III. The contribution of industrial and coal combustion was similar during all three heavy pollution episodes. According to backward analysis, the small-scale and short-distance transmissions from Hebei provinces, as well as the medium and short-distance transmissions from central Inner Mongolia, were the major sources during heavy pollution episodes in the winter in Tianjin City.

Key words: Tianjin; heavy pollution; $PM_{2.5}$; extinction coefficient; source apportionment

重污染是影响城市环境空气质量达标的主要因素,严重影响了人们正常的生产生活,引起社会各界的广泛关注.当重污染天气发生时,细颗粒物浓度呈增长态势^[1~3],除对人体健康具有很大影响外^[4~6],还会造成能见度的降低^[7,8].近年来,重污染天气成因^[9~14]、重污染天气下 $PM_{2.5}$ 的化学组分特征^[15~18]和来源^[19~24]、春节假期期间烟花爆竹燃放对重污染天气的影响^[25~30]、重污染天气下大气气溶胶消光特性^[31~41]等得到了广泛研究.以上研究表明本地污染源排放、静稳高湿的不利气象条件和区域传输等是造成冬季重污染过程的重要因素;重污染天气发生时, NO_3^- (13.8% ~ 36.7%)、OM (9.4% ~ 26.8%)、 SO_4^{2-} (9.7% ~ 23.0%)、 NH_4^+ (10.3% ~ 20.8%) 和 EC (1.6% ~ 5.9%) 是 $PM_{2.5}$ 中的主要组分,二次粒子 (36.0% ~ 58.0%)、机动车 (6.9% ~ 26.0%) 和燃煤及工业 (8.0% ~ 48.1%) 等为 $PM_{2.5}$ 的主要来源; $PM_{2.5}$ 中主要组分对大气消光也有重要影响.以往对重污染天气下大气气溶胶消光特性的研究通常只针对单次重污染过程,且忽略了污染源排放与气溶胶光学特性之间的关系,而了解冬季多次重污染过程气溶胶消光特性及其来源的共性和差异,对于有针对性地改善大气能见度和减少大气光学污染具有十分重要的意义.

天津是京津冀区域核心城市之一,位于京津冀区域的中北部,是环渤海地区的经济中心,是京津冀区域典型工业城市, $PM_{2.5}$ 污染较重^[42],选取天津市为研究城市开展分析,对进一步了解我国北方城市重污染天气气溶胶消光特性具有典型意义.本文通过对 2020 年 1~2 月天津市 3 次重污染天气展开系统观测(为便于分析比较,将 1 月 16~18 日重污染天气称为重污染过程 I,1 月 26~28 日称为重污染过程 II,2 月 9~10 日重度污染天气称为重污染过程 III),从颗粒物的散射与吸收对消光的贡献等分析了大气气溶胶的消光特性,给出了重污染天气下大气气溶胶消光的来源,探讨了多次重污染过程气溶胶消光特性及其来源的共性和差异,以期为解决城市大气环境问题提供依据.

1 材料与方法

1.1 观测场地

观测场地位于天津市南开区天津市生态环境监

测中心 4 楼楼顶,距地面约 15 m,为天津市生态环境监测中心超级站.采样点周边为居住区和学校,北面 300 m 左右为主要交通线复兴路,监测时间为 2020 年 1 月 1 日至 2 月 15 日.监测点位分布见图 1.

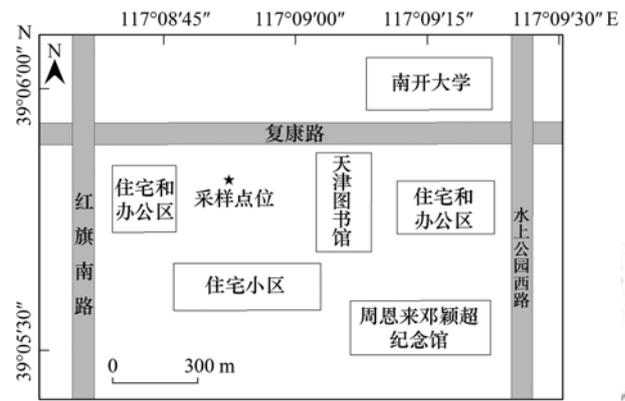


图 1 观测点位示意

Fig. 1 Location of the sampling station

1.2 采样及分析方法

超级站监测的各项指标、仪器型号及方法原理如表 1 所示,详细介绍见文献[43~46].为保证数据的可靠性与连续性,在观测期间定期对各仪器设备进行检查维护.颗粒物监测仪每月更换采样滤膜,对采样流量进行校准;每季度进行压力传感器和温度传感器校验;每半年进行比例系数(K_0)校验,质量控制均严格按照文献[47]要求进行.离子分析仪定期检查采样主流量($3 L \cdot min^{-1}$),每月配制标准溶液(标准溶液均为优级纯),绘制标准曲线,相关系数除 NH_4^+ 外,均大于 99.9% (NH_4^+ 相关系数大于 99.5%).碳分析仪每天用定量的甲烷作为内标物自动进行内标检查,每月用标准蔗糖溶液进行外标校正,并定期检查系统采样流量($8 L \cdot min^{-1}$).浊度计每日定时自动进行零点检查,每周进行人工全校准或跨校准检测,跨校准采用厂家推荐的 R-134 标准气体,测量时相对湿度保持在 60% 以下,由加热进气管控制.黑碳仪定期更换纸带并检查系统采样流量($5 L \cdot min^{-1}$).

气象观测数据来自中国气象局天津大气边界层观测站(台站编号为 54517).污染物浓度与气象观测数据分析时均以小时为时间分辨率.

表 1 监测项目及仪器¹⁾

Table 1 Online observation factors and instruments

监测项目	设备名称	型号规格	品牌	方法原理
PM _{2.5}	颗粒物监测仪	TEOM 1405F	美国/Thermo	振荡天平法 ^[43]
PM ₁₀	颗粒物监测仪	TEOM 1405	美国/Thermo	振荡天平法 ^[43]
水溶性离子	离子分析仪	URG 9000D	美国/Thermo	离子色谱法 ^[44]
碳组分	碳分析仪	RT-4	美国/Sunset	热光透射法 ^[44]
散射系数	三波段积分浊度计	Aurora-3000	澳大利亚/Ecotech	光散射法 ^[45]
吸收系数	黑碳仪	AE-31	美国/Magee	光吸收法 ^[46]

1) 水溶性离子和碳组分等参数均为空气动力学直径小于 2.5 μm 的颗粒物组分

1.3 研究方法

1.3.1 气溶胶消光系数计算

消光系数的获取有直接观测和 IMPROVE 法则计算两种方法^[48]. 前者主要基于观测仪器, 后者则综合大气中各种参与消光的组分的作用, 计算消光系数, 可直观反映各组分与消光系数之间的关系.

1.3.1.1 基于观测的消光系数

气溶胶对太阳辐射的作用主要包括吸收和散射. 因人类视觉最敏感的波长为 550 nm, 故将散射系数和黑炭 (black carbon, BC) 浓度均转化至 550 nm 波长处的相应值. 消光系数可以通过式 (1) 得到^[49]:

$$Bext_{550} = Bsp_{550} + Bap_{550} \quad (1)$$

式中, $Bext_{550}$ 为 550 nm 处气溶胶的消光系数 (Mm^{-1}), Bsp_{550} 为 550 nm 处的散射系数 (Mm^{-1}), Bap_{550} 为 550 nm 处的吸收系数 (Mm^{-1}).

其中, Bsp_{550} 可由 525 nm 的散射系数进行转换, 表达式为:

$$Bsp_{550} = Bsp_{525} \times (550/525)^{-\alpha} \quad (2)$$

式中, Bsp_{525} 为 525 nm 处的散射系数 (Mm^{-1}), α 为散射转化的 Angstrom 波长指数, 为 1.3.

Bap_{550} 可由 880 nm 处 BC 浓度进行转换, 首先, 将 880 nm 处的 BC 浓度转化为 532 nm 处的气溶胶

吸收系数^[50] (Mm^{-1}), 再做波长订正到 550 nm^[51], 表达式为:

$$Bap_{550} = Bsp_{532} \times (550/532)^{-\beta} \\ = (8.28 \times [BC] + 2.23) \times (550/532)^{-\beta} \quad (3)$$

式中, $[BC]$ 为 880 nm 处的 BC 浓度 ($\mu g \cdot m^{-3}$), 8.28 为 532 nm 处通过色谱和光谱对比得到的换算因子^[52], β 为吸收转化的 Angstrom 波长指数, 为 1.

1.3.1.2 基于气溶胶组分的消光系数

美国 IMPROVE 法则^[53]的经验公式 [式 (4)] 常被用来计算大气气溶胶的消光系数, 表达式为:

$$Bext_{IM} = \sum \text{干消光效率} \times \text{吸湿增长因子} \times \text{组分浓度} \\ = 3 \times f(RH) \times ([(NH_4)_2SO_4] + [NH_4NO_3]) + \\ 4 \times [OM] + 10 \times [EC] + [FS] + \\ 0.6 \times [CM] + 10 \quad (4)$$

式中, $[(NH_4)_2SO_4] = 1.375 \times [SO_4^{2-}]$; $[NH_4NO_3] = 1.29 \times [NO_3^-]$; $[OM] = 1.4 \times [OC]$; $[CM] = [PM_{10}] - [PM_{2.5}]$; $[FS] = 2.2 [Al] + 2.49 [Si] + 1.94 [Ti] + 1.63 [Ca] + 2.42 [Fe]$, $f(RH)$ 为吸湿增长因子, 不同湿度吸湿增长因子不同, 见表 2. $[SO_4^{2-}]$ 、 $[NO_3^-]$ 、 $[OC]$ 、 $[EC]$ 、 $[PM_{2.5}]$ 和 $[PM_{10}]$ 分别表示各自质量浓度 ($\mu g \cdot m^{-3}$); 10 表示瑞利散射系数; 因重金属元素的监测数据缺乏, 本文气溶胶消光系数计算中, 没有包括 $[FS]$ 项.

表 2 不同相对湿度条件下 $f(RH)$ 值^[49]Table 2 Statistical summary of mean $f(RH)$ values in selected relative humidity ranges

项目	RH/%														
	20~25	25~30	30~35	35~40	40~45	45~50	50~55	55~60	60~65	65~70	70~75	75~80	80~85	85~90	>90
$f(RH)$	1.06	1.11	1.16	1.21	1.22	1.27	1.33	1.38	1.45	1.55	1.65	1.83	2.10	2.46	3.17

1.3.2 消光系数的解析方法

基于 PMF 和 IMPROVE 法则相结合的方法对气溶胶消光系数的来源进行解析, 该方法已经用于相关研究中^[54,55]. 首先, 利用 PMF 模型对 $PM_{2.5}$ 的来源进行解析, 以最小二乘法的方式来确定主要污染源及其贡献^[56,57]. PMF 模型为:

$$X = G \times F + E \quad (5)$$

式中, X 为受体点位样品的各组分质量浓度矩阵, G

为源贡献矩阵, F 为源成分谱矩阵, E 为残差.

然后, 基于 $PM_{2.5}$ 组分监测数据和上式得到因子谱, 计算各源类对各化学组分的贡献, 如式 (6):

$$a_{i,j} = F_{i,j} \times S_i \quad (6)$$

式中, $a_{i,j}$ 表示 j 源对 i 组分的贡献浓度 ($\mu g \cdot m^{-3}$), $F_{i,j}$ 表示 j 源对 i 组分的贡献比 (%), S_i 表示组分 i 的浓度.

最后, 结合 (4) 式计算各源类贡献的消光系数

$Bext_j$, 则 j 源对消光系数的贡献比为:

$$\eta_j = Bext_j / \sum_{j=1}^n Bext_j \quad (7)$$

式中, η_j 表示源对消光系数的相对贡献, $Bext_j$ 表示根据 j 源的消光系数.

1.3.3 后轨迹模拟

利用基于 GIS 的 TrajStat 软件^[58] (www.meteothinker.com) 对观测期间天津市 (39.10°N, 117.16°E) 的气团传输轨迹进行 48 h 后轨迹模拟, 同时将空间相似度高的轨迹进行聚类分析. 用于轨迹计算的气象场资料为美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的全球同化系统 (GDAS, Global Data Assimilation System) 数据, 空间分辨率为 1°, 数据资料获取网址为 ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/archives/gdas1. 模拟高度为 500 m, 开始时间为每日 00:00 (UTC 时间为前日 16:00), 轨迹间隔 2 h.

2 结果与讨论

2.1 气溶胶的光学特性

3 次重污染过程 $PM_{2.5}$ 平均浓度分别为 (229 ± 52)、(219 ± 48) 和 (161 ± 25) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与重污染过程 I 和重污染过程 II 相比, 重污染过程 III 污染物浓度和污染程度均明显降低, 分别下降 29.7% 和 26.5%, 这可能与重污染过程 III 期间工厂延迟复工、疫情防控下交通出行减少导致的污染物排放强度降低有关. 3 次重污染过程 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、OC、EC、 Cl^- 和 K^+ 均为 $PM_{2.5}$ 中主要组分, 但呈现不同的特征 (图 2): 重污染过程 I, 二次无机离子 (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+) 平均浓度为 133.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 远高于重污染过程 II 的 96.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和重污染过程 III 的 87.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 特别是 NO_3^- 平均浓度, 分别是重污染过程 II 和重污染过程 III 的 1.4 倍和 1.9 倍, 这主要是因为重污染过程 I 期间移动源、工业企业排放正常, 污

染排放强度较大; 重污染过程 II 中 OC、 K^+ 和 Cl^- 的浓度明显升高, 平均浓度分别为 22.5、9.5 和 8.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 为重污染过程 I 的 1.7、4.0 和 1.6 倍, 为重污染过程 III 的 1.7、2.1 和 1.6 倍, 主要受春节期间烟花爆竹燃放影响; 重污染过程 III 中各组分浓度均低于重污染过程 I 和重污染过程 II.

从 $PM_{2.5}$ 中化学组分占比看 (图 2), 重污染过程 I 和重污染过程 III 中二次无机离子在 $PM_{2.5}$ 中占比较高, 分别为 53.8% 和 51.9%, 远高于重污染过程 II 的 41.3%; 重污染过程 I 中 NO_3^- 在 $PM_{2.5}$ 中的占比为 25.0%, 远高于重污染过程 II 和重污染过程 III 的 18.6% 和 19.3%; 重污染过程 II 中 OC、 K^+ 和 Cl^- 在 $PM_{2.5}$ 中占比分别为 9.7%、4.1% 和 3.8%, 为重污染过程 I 的 1.8、4.1 和 1.7 倍, 为重污染过程 III 的 1.2、1.5 和 1.2 倍; 重污染过程 III 中 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 在 $PM_{2.5}$ 中的占比升高, 分别为 18.8% 和 13.8%, 为重污染过程 I 的 1.2 和 1.1 倍, 为重污染过程 II 的 1.4 倍和 1.4 倍.

观测期间, 3 次重污染过程散射系数 ($B_{sp_{550}}$) 和吸收系数 ($B_{ap_{550}}$) 与 $PM_{2.5}$ 的变化趋势较一致, 相关系数分别为 0.896、0.763、0.865 和 0.662、0.679、0.557, $B_{sp_{550}}$ 与 $PM_{2.5}$ 的相关性更高. 3 次重污染过程的 $B_{sp_{550}}$ 和 $B_{ap_{550}}$ 分别为 (1 055.65 ± 250.17)、(1 054.26 ± 263.22)、(704.44 ± 109.89) Mm^{-1} 和 (52.96 ± 13.15)、(39.72 ± 8.21)、(34.50 ± 8.53) Mm^{-1} (图 3), 气溶胶的散射效应大于吸收效应, 这与文献 [31 ~ 33, 37, 40] 的结果相一致. 重污染过程 I 和重污染过程 II 的 $B_{sp_{550}}$ 和 $B_{ap_{550}}$ 较高, 这主要与该两次重污染过程 $PM_{2.5}$ 浓度较高有关, 大气颗粒物浓度升高使光的散射和吸收增强. 与国内其他城市相比, 天津市冬季重污染过程散射系数高于广州市^[32]、南京市^[33] 以及天津市秋季重污染过程^[34], 低于杭州市^[35] 和西安市^[37]; 吸收系数高于南

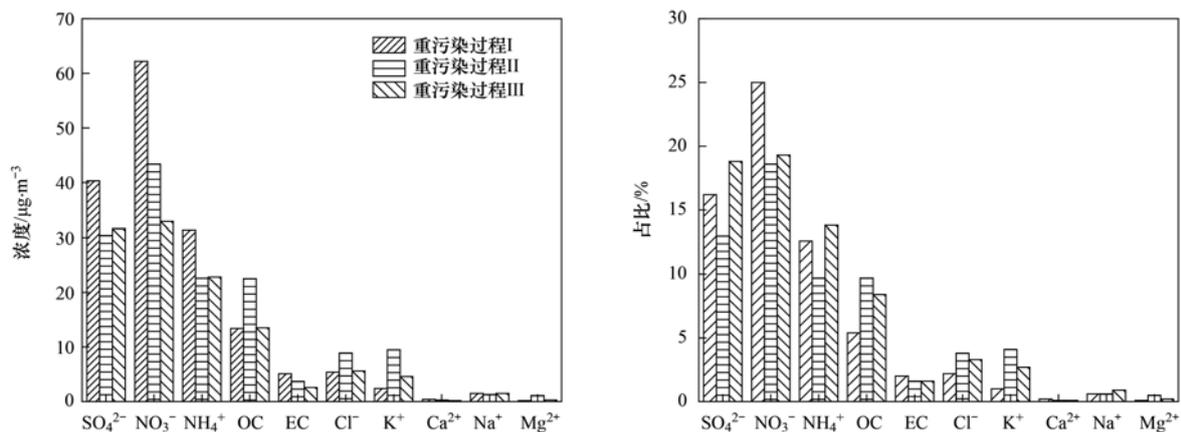


图 2 3 次重污染过程 $PM_{2.5}$ 中化学组分浓度及占比

Fig. 2 Chemical component concentrations and their mass ratios to $PM_{2.5}$ during three heavy pollution episodes

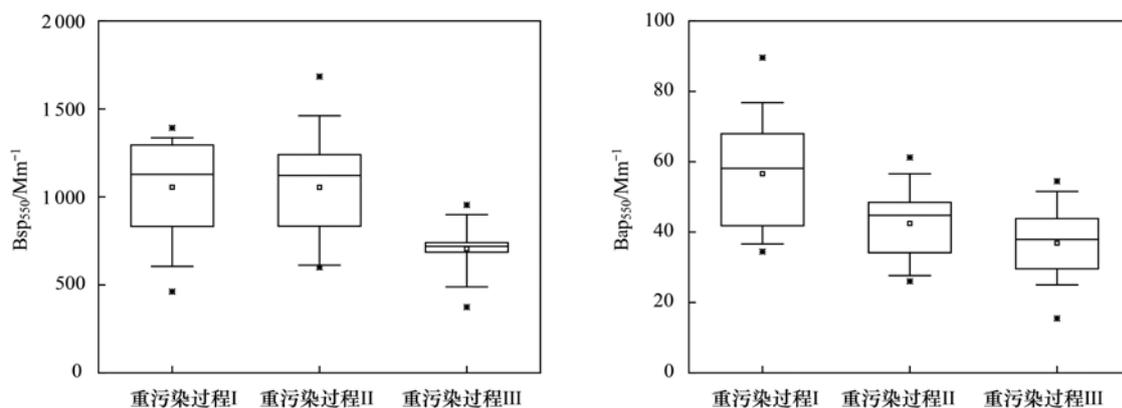


图3 3次重污染过程气溶胶散射系数和吸收系数

Fig. 3 Aerosol scattering and absorption coefficients during three heavy pollution episodes

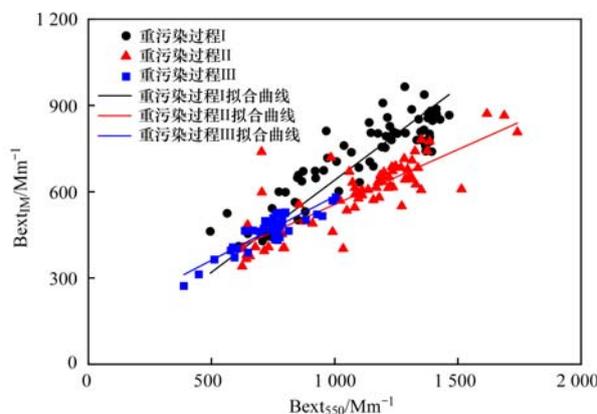
京市和天津市秋季重污染过程, 低于广州市和西安市. 散射系数和吸收系数的地区差异性可能归因于各地污染源排放类型不同, 颗粒物化学组成也不同.

3次重污染过程平均消光系数 $Bext_{550}$ 和 $Bext_{1M}$ 分别为 (1108.61 ± 261.17) 、 (1093.99 ± 270.73) 、 (739.95 ± 116.81) Mm^{-1} 和 (722.90 ± 141.87) 、 (591.61 ± 123.32) 、 (468.21 ± 58.40) Mm^{-1} (图4). 两种方法得到的消光系数相关性较高, 3次重污染过程相关系数 R^2 分别为 0.989、0.698 和 0.785 (图4), 表明这两种方法均较为可靠. 通过 IMPROVE 法则计算得到的消光系数小于观测得到的消光系数, 但两者随时间变化的趋势一致. 造成结果偏低的原因可能为 IMPROVE 计算消光系数时土壤粒子数据的缺乏 [式(4)中 [FS] 项], 此部分对消光系数的贡献未计算.

由式(4)可知, 颗粒物组分浓度和相对湿度是影响气溶胶消光系数的两个重要因素. 3次重污染过程的平均相对湿度分别为 65%、70% 和 68%, 差异较小. 因此, 通过 IMPROVE 法计算的消光系数差异主要与 $PM_{2.5}$ 组分浓度有关, 各组分中, 起散射作用的主要组分是二次无机离子 (secondary inorganic aerosol, SNA, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 的统称) 和 OC 等, 起吸收作用的主要组分是 EC 等^[59]. 重污染过程 I 中, SNA 的浓度分别为重污染过程 II 和重污染过程 III 的 1.4 和 1.5 倍; 重污染过程 II 中, OC 的浓度为重污染过程 III 的 1.7 倍; 高 $PM_{2.5}$ 组分浓度导致了较高的消光系数.

2.2 颗粒物组分对消光系数的贡献和气溶胶消光的来源解析

颗粒物组分构成的不同将导致其对消光系数的贡献不同. 通过式(4)计算 3次重污染过程 $PM_{2.5}$ 各组分对消光系数的相对贡献, 占比见图 5. 重污染过程 I 和重污染过程 II 按顺序为硝酸盐 (Nit, 48.8%

图4 $Bext_{1M}$ 与 $Bext_{550}$ 的线性关系Fig. 4 Linear relationship between $Bext_{1M}$ and $Bext_{550}$

和 41.4%) > 硫酸盐 (Sul, 35.3% 和 31.1%) > OM (9.9% 和 21.8%) > EC (5.9% 和 5.6%) > 粗粒子 (CM, 0.0% 和 0.1%), 重污染过程 III 按顺序为 Sul (40.7%) > Nit (38.9%) > OM (15.6%) > EC (4.8%) > CM (0.0%). CM 对消光系数贡献占比仅为 0.0%~0.1%, 这表明气溶胶消光中 $PM_{2.5}$ 起主要作用. $PM_{2.5}$ 中, Nit、Sul 和 OM 为最主要消光成分, 3次重污染过程三者总占比均超过 90%. 3次重污染过程 $PM_{2.5}$ 组分对消光系数的贡献发生明显变化, 重污染过程 I, Nit 对消光系数的贡献最高, 较重污染过程 II 和重污染过程 III 分别高 17.9% 和 25.4%, 彼时移动源和工业企业排放正常, 这些源排放了较多的硝酸盐; 重污染过程 II 中, OM 对消光系数的贡献明显较高, 较重污染过程 I 上升 57.6%, 这主要受春节期间烟花爆竹燃放影响, 排放了较多的 OC; 重污染过程 III 中, Nit 对消光系数的贡献降低, 较重污染过程 I 和重污染过程 II 分别下降 20.3% 和 6.0%, Sul 对消光系数的贡献升高, 较重污染过程 I 和重污染过程 II 分别上升 15.3% 和 30.9%, 这可能与疫情防控下交通出行大量减少, 而燃煤源的排放相对较稳定有关.

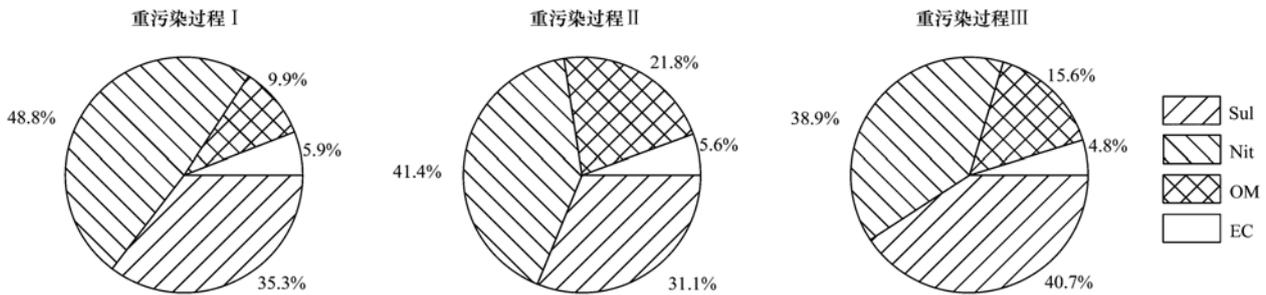


图 5 3 次重污染过程颗粒物组分对消光系数的贡献

Fig. 5 Contribution of components to the extinction coefficient during three heavy pollution episodes

采用 PMF 模型解析得到的 3 次重污染过程各污染源因子谱见文献[19~20]. 根据式(6)和式(7)计算各类源对 $PM_{2.5}$ 消光系数的贡献, 占比见图 6. 二次离子是大气消光的主要来源, 占比为 37.1%~42.0%; 燃煤和工业及机动车对消光系数贡献较接近, 分别为 22.9%~24.2% 和 23.9%~27.2%; 扬尘源对消光系数的贡献为 5.0%~6.4%; 烟花爆竹及生物质燃烧排放的贡献为 3.9%~6.2%. 3 次重污染过程 $PM_{2.5}$ 消光系数的来源发生明显变化, 与重污染过程 I 相比, 重污染过程 II 烟花爆竹及生物质燃烧排放对消光系数的贡献明显较高, 上升 59.0%,

这可能与春节期间较多的烟花爆竹燃放有关; 重污染过程 III 机动车对消光系数的贡献明显降低, 较重污染过程 I 和重污染过程 II 分别下降 9.1% 和 12.1%, 这可能与疫情防控下交通出行大量减少有关. 燃煤和工业对消光系数的贡献在 3 次重污染过程中较接近, 这主要是因为天津市本地高污染行业(包括钢铁、炼焦、玻璃、石化和制药等)存在大量不可中断工序, 在春节假期和疫情防控期间仍需要持续生产, 工业污染排放差异较小, 产业结构和能源结构的调整仍需作为天津市大气污染防治工作的主要方向.

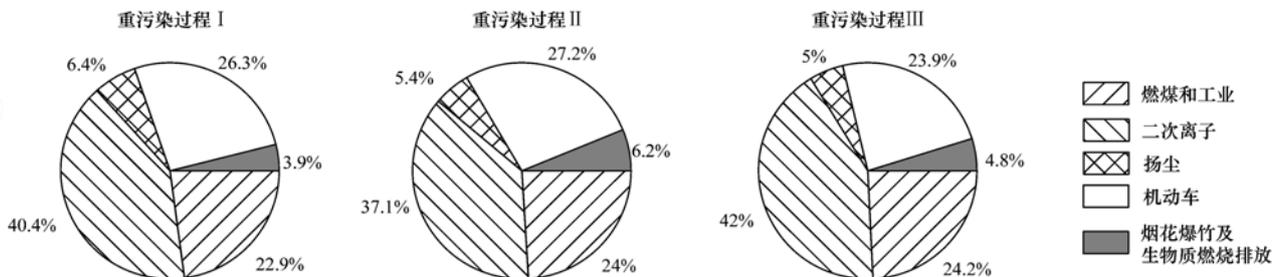


图 6 3 次重污染过程各源类对消光系数的贡献

Fig. 6 Contribution of various sources to the extinction coefficient during three heavy pollution episodes

2.3 后向轨迹

本研究利用 48 h 后轨迹模拟分析实验观测期间 500 m 高度处气团运输轨迹, 如图 7. 将气团运输轨迹通过聚类分析得到 3~4 组主要传输轨迹. 小尺度和短距离气团传输为主要传输类型[图 7 中重污染过程 I (1) 和重污染过程 II (1)、(2)], 来自河北, 因其移动速度慢, 不利于污染物扩散, 是造成重污染现象的原因之一; 重污染过程 I (2)、(3)、重污染过程 II (3)、(4) 和重污染过程 III (1) 等轨迹反映了中小尺度以及中短距离气团传输, 主要从内蒙古中部经山西、河北移动至天津; 重污染过程 III (2)、(3) 代表大尺度、长距离的气团传输轨迹, 来自外蒙古经内蒙古、山西、河北移动至天津, 其前期移动较快, 进入山西后移动减慢. 从 3 次污染过程的差异看, 重污染过程 I 的气团经过天津西北部和西部

的河北省部分区域和北京, 彼时交通出行正常, 其会携带较多的硝酸盐, 同时传输的 NO_x 在天津本地进行二次转化, 也是加剧天津本地硝酸盐污染的原因之一; 重污染过程 II 的(1)、(2)和(4)均经过天津东北部河北省部分区域, 一方面, 春节期间部分农村地区仍存在燃放烟花爆竹问题, 另一方面, 辽东半岛除夕到初一燃放的烟花爆竹污染气团经河北省东北部输送至天津, 加剧了天津本地污染; 重污染过程 III 的气团均经过天津西南部的河北省部分区域, 受疫情延迟复工影响, 区域污染物排放强度相对较轻. 总之, 重污染过程期间天津市的气团传输轨迹主要以短距离和中短距离为主, 这种气团传输类型风速较低, 不利于扩散, 污染物浓度增加^[60], 气团运输经过区域的污染排放对观测城市的气溶胶消光特性及来源产生重要影响.

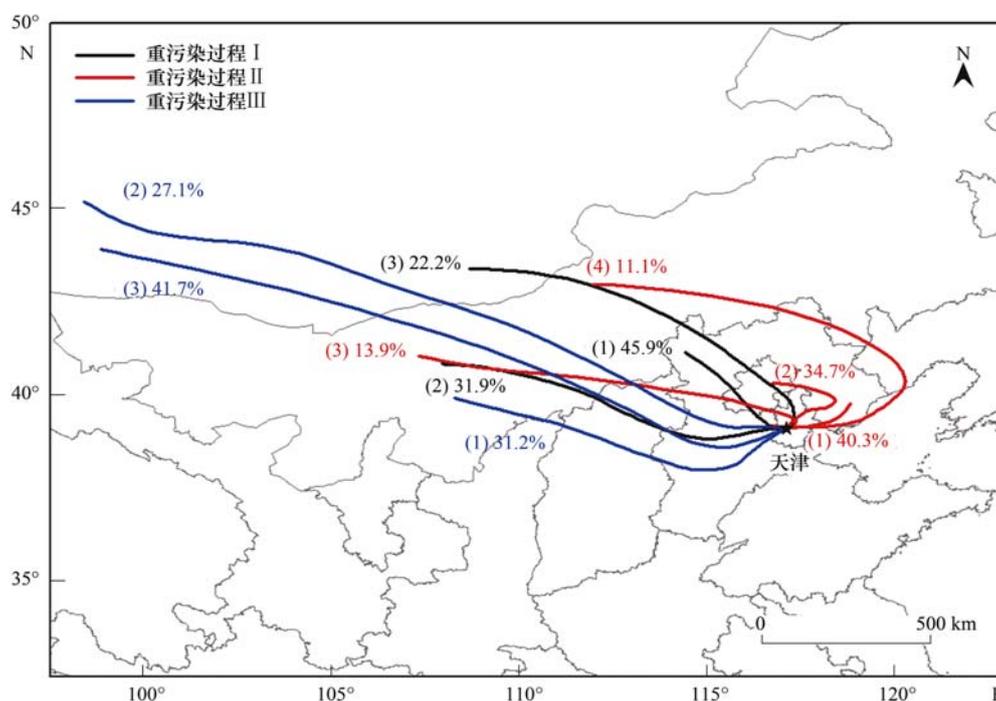


图7 3次重污染过程500 m处48 h后向轨迹

Fig. 7 The 48 h backward trajectory map during three heavy pollution episodes at 500 m heights

3 结论

(1) 3次重污染过程 $PM_{2.5}$ 平均浓度分别为 (229 ± 52) 、 (219 ± 48) 和 $(161 \pm 25) \mu g \cdot m^{-3}$, NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、OC、EC、 Cl^- 和 K^+ 为 $PM_{2.5}$ 中主要组分. 3次重污染过程平均散射系数 ($B_{sp_{550}}$) 和吸收系数 ($B_{ap_{550}}$) 分别为 (1055.65 ± 250.17) 、 (1054.26 ± 263.22) 、 $(704.44 \pm 109.89) Mm^{-1}$ 和 (52.96 ± 13.15) 、 (39.72 ± 8.21) 、 $(34.50 \pm 8.53) Mm^{-1}$, 散射效应明显高于吸收效应, 高 $B_{sp_{550}}$ 和 $B_{ap_{550}}$ 值主要与 $PM_{2.5}$ 浓度较高有关.

(2) 重污染天气下 $PM_{2.5}$ 中硝酸盐 (Nit, 38.9% ~ 48.8%)、硫酸盐 (Sul, 31.1% ~ 40.7%) 和 OM (9.9% ~ 21.8%) 为最主要消光成分. $PM_{2.5}$ 组分对消光系数的贡献与污染源排放密切相关, 重污染过程 I, 移动源和工业企业正常排放, Nit 对消光系数的贡献最高, 较重污染过程 II 和重污染过程 III 分别高 17.9% 和 25.4%; 重污染过程 II, 受春节期间烟花爆竹燃放影响, OM 对消光系数的贡献较重污染过程 I 上升 57.6%; 重污染过程 III, 受交通出行减少但燃煤源排放相对稳定影响, Nit 对消光系数的贡献降低, Sul 对消光系数的贡献升高.

(3) 重污染天气 $PM_{2.5}$ 的消光系数主要来源为二次离子 (37.1% ~ 42.0%)、燃煤和工业 (22.9% ~ 24.2%)、机动车 (23.9% ~ 27.2%)、扬尘源 (5.0% ~ 6.4%) 和烟花爆竹及生物质燃烧排放 (3.9% ~

6.2%). 与重污染过程 I 相比, 重污染过程 II 烟花爆竹及生物质燃烧排放对消光系数的贡献上升 59.0%; 重污染过程 III 机动车对消光系数的贡献较重污染过程 I 和重污染过程 II 分别下降 9.1% 和 12.1%; 燃煤和工业对消光系数的贡献在 3 次重污染过程中较接近 (22.9%、24.0% 和 24.2%), 产业结构和能源结构的调整仍需作为天津市大气污染防治工作的主要方向.

(4) 后轨迹分析表明重污染期间天津市主要来自河北的小尺度、短距离以及内蒙古中部的中尺度、中短距离气团传输轨迹为主, 这类气团风速较低, 不利于扩散, 加重了污染, 气团传输经过区域的污染排放对观测城市的气溶胶消光特性及来源产生重要影响.

参考文献:

- [1] Xie Y Y, Ye X N, Ma Z, *et al.* Insight into winter haze formation mechanisms based on aerosol hygroscopicity and effective density measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(11): 7277-7290.
- [2] Zhong J T, Zhang X Y, Dong Y S, *et al.* Feedback effects of boundary-layer meteorological factors on cumulative explosive growth of $PM_{2.5}$ during winter heavy pollution episodes in Beijing from 2013 to 2016 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(1): 247-258.
- [3] Sun W W, Wang D F, Yao L, *et al.* Chemistry-triggered events of $PM_{2.5}$ explosive growth during late autumn and winter in Shanghai, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.07.032.
- [4] Pope III C A, Dockert D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [J]. *Journal of the Air & Waste*

- Management Association, 2006, **56**(6): 709-742.
- [5] Guo T J, Wang Y Y, Zhang H G, *et al.* The association between ambient PM_{2.5} exposure and the risk of preterm birth in China: a retrospective cohort study[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 1453-1459.
- [6] Fan F Y, Lei Y L, Li L. Health damage assessment of particulate matter pollution in Jing-Jin-Ji region of China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(8): 7883-7895.
- [7] Wang X Y, Zhang R H, Yu W. The effects of PM_{2.5} concentrations and relative humidity on atmospheric visibility in Beijing[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(4): 2235-2259.
- [8] 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J]. *热带气象学报*, 2007, **23**(1): 1-6.
- [9] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(2): 163-170.
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Analysis about the characteristics and formation mechanisms of serious pollution events in October 2014 in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(2): 163-170.
- [10] 吕喆, 魏巍, 周颖, 等. 2015~2016 年北京市 3 次空气重污染红色预警 PM_{2.5} 成因分析及效果评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 1-10.
Lü Z, Wei W, Zhou Y, *et al.* Cause and effect evaluation of PM_{2.5} during three red alerts in Beijing from 2015 to 2016[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 1-10.
- [11] 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 等. 聊城冬季一重污染过程 PM_{2.5} 污染特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4026-4033.
Zhang J Q, Wu Y J, Zhang M, *et al.* PM_{2.5} pollution characterization and cause analysis of a winter heavy pollution event, Liaocheng city[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4026-4033.
- [12] 刘可可, 张红, 刘桂建. 合肥市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3415-3420.
Liu K K, Zhang H, Liu G J. Elemental composition characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀, and heavy pollution analysis in Hefei [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3415-3420.
- [13] 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 等. 新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM_{2.5} 的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3099-3106.
Lu S Z, Shi X R, Xue W B, *et al.* Impacts of meteorology and emission variations on PM_{2.5} concentration throughout the country during the 2020 epidemic period [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3099-3106.
- [14] Lv Z F, Wang X T, Deng F Y, *et al.* Source-receptor relationship revealed by the halted traffic and aggravated haze in Beijing during the COVID-19 lockdown [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(24): 15660-15670.
- [15] 徐虹, 肖致美, 陈魁, 等. 天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2519-2525.
Xu H, Xiao Z M, Chen K, *et al.* Secondary inorganic pollution characteristics during heavy pollution episodes of 2017 in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2519-2525.
- [16] 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 等. 天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 4958-4967.
Yao Q, Liu Z R, Han S Q, *et al.* Characteristics of the size distribution of water-soluble ions during a heavy pollution episode in the winter in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4958-4967.
- [17] 王申博, 范相阁, 和兵, 等. 河南省春节和疫情影响情景下 PM_{2.5} 组分特征[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(12): 5115-5123.
Wang S B, Fan X G, He B, *et al.* Chemical composition characteristics of PM_{2.5} in Henan Province during the Spring Festival and COVID-19 outbreak [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(12): 5115-5123.
- [18] Chang Y H, Huang R J, Ge X L, *et al.* Puzzling haze events in China during the coronavirus (COVID-19) shutdown [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(12), doi: 10.1029/2020GL088533.
- [19] 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 等. 2020 年天津市两次重污染天气污染特征分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3879-3888.
Xiao Z M, Xu H, Cai Z Y, *et al.* Characterization of two heavy pollution episodes in Tianjin in 2020 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3879-3888.
- [20] 肖致美, 蔡子颖, 李鹏, 等. 2020 年春节期间天津市重污染天气污染特征分析[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(12): 4442-4452.
Xiao Z M, Cai Z Y, Li P, *et al.* Characterization of heavy air pollution events during the 2020 Spring Festival in Tianjin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(12): 4442-4452.
- [21] 周静博, 段菁春, 王建国, 等. 2019 年元旦前后石家庄市重污染过程 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 39-49.
Zhou J B, Duan J C, Wang J G, *et al.* Analysis of pollution characteristics and sources of PM_{2.5} during heavy pollution in Shijiazhuang city around New Year's Day 2019 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 39-49.
- [22] 刘倬诚, 牛月圆, 吴婧, 等. 山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1036-1314.
Liu Z C, Niu Y Y, Wu J, *et al.* Characteristics and cause analysis of heavy air pollution in a mountainous city during winter [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1036-1314.
- [23] 王彤, 华阳, 许庆成, 等. 京津冀郊区站点秋冬季大气 PM_{2.5} 来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
Wang T, Hua Y, Xu Q C, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in suburban area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in autumn and winter [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
- [24] Dai Q L, Liu B S, Bi X H, *et al.* Dispersion normalized PMF provides insights into the significant changes in source contributions to PM_{2.5} after the COVID-19 outbreak [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(16): 9917-9927.
- [25] 杨志文, 吴琳, 元洁, 等. 2015 年春节期间天津烟花爆竹燃放对空气质量的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(1): 69-75.
Yang Z W, Wu L, Yuan J, *et al.* Effect of fireworks on the air quality during the Spring Festival of 2015 in Tianjin City [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(1): 69-75.
- [26] 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山. 烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM_{2.5})成分图谱[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1484-1492.
Xie R J, Hou H X, Chen Y S. Analysis of the composition of

- atmospheric fine particles ($PM_{2.5}$) produced by burning fireworks[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1484-1492.
- [27] 徐文帅, 吴晓晨, 陈蕊, 等. 春节期间烟花爆竹燃放对海口市空气质量的影响[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(5): 104-111.
- Xu W S, Wu X C, Chen R, *et al.* Influence of burning fireworks on air quality during the Spring Festival in Haikou city [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(5): 104-111.
- [28] 吕文丽, 张凯, 曹晴, 等. 烟花爆竹燃放对大气污染物及 $PM_{2.5}$ 组分影响[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(8): 3303-3311.
- Lü W L, Zhang K, Cao Q, *et al.* Impacts of fireworks burning on atmospheric pollutants and water-soluble inorganic ions in $PM_{2.5}$ [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(8): 3303-3311.
- [29] 曹馨元, 何月欣, 陈卫卫, 等. 烟花爆竹禁燃对春节期间东北地区空气质量影响评估[J]. *中国环境监测*, 2018, **34**(4): 77-84.
- Cao X Y, He Y X, Chen W W, *et al.* Effects of fireworks forbidden on air quality during the Spring Festival in northeast China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(4): 77-84.
- [30] Sun Y L, Lei L, Zhou W, *et al.* A chemical cocktail during the COVID-19 outbreak in Beijing, China: insights from six-year aerosol particle composition measurements during the Chinese New Year holiday[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **742**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140739.
- [31] Wang Y H, Liu Z R, Zhang J K, *et al.* Aerosol physicochemical properties and implications for visibility during an intense haze episode during winter in Beijing[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(6): 3205-3215.
- [32] 刘文彬, 王宇骏, 黄祖照, 等. 广州市冬季灰霾天气过程消光特性研究[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(11): 1755-1759.
- Liu W B, Wang Y J, Huang Z Z, *et al.* Research of extinction characteristics during haze events in winter of Guangzhou [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(11): 1755-1759.
- [33] 何稼祺, 于兴娜, 朱彬, 等. 南京冬季气溶胶消光特性及霾天气低能见度特征[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(6): 1645-1653.
- He J Q, Yu X N, Zhu B, *et al.* Characteristics of aerosol extinction and low visibility in haze weather in winter of Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(6): 1645-1653.
- [34] 张文辉, 丁净, 李立伟, 等. 基于气溶胶光学特性的颗粒物来源分析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(11): 1826-1833.
- Zhang W H, Ding J, Li L W, *et al.* Source analysis of particulate matter based on aerosol optical properties [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(11): 1826-1833.
- [35] 徐昶, 叶辉, 沈建东, 等. 杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4422-4430.
- Xu C, Ye H, Shen J D, *et al.* Light scattering extinction properties of atmospheric particle and pollution characteristics in hazy weather in Hangzhou[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4422-4430.
- [36] 刘召策, 袁琦, 胡伟, 等. 邯郸市冬季一次霾过程中细颗粒物化学组分的污染特征及消光贡献[J]. *地球化学*, 2020, **49**(3): 298-305.
- Liu Z C, Yuan Q, Hu W, *et al.* Pollution characteristics and extinction contribution of chemical composition in fine particulate matter during a winter haze episode in Handan[J]. *Geochimica*, 2020, **49**(3): 298-305.
- [37] Zhou Y Q, Wang Q Y, Zhang X, *et al.* Exploring the impact of chemical composition on aerosol light extinction during winter in a heavily polluted urban area of China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **247**: 766-775.
- [38] Liu A K, Wang H L, Cui Y, *et al.* Characteristics of aerosol during a severe haze-fog episode in the Yangtze River Delta: particle size distribution, chemical composition, and optical properties [J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(1), doi: 10.3390/atmos11010056.
- [39] Cheng Z, Wang S X, Qiao L P, *et al.* Insights into extinction evolution during extreme low visibility events: case study of Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **618**: 793-803.
- [40] Lan Z J, Zhang B, Huang X F, *et al.* Source apportionment of $PM_{2.5}$ light extinction in an urban atmosphere in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **63**: 277-284.
- [41] 周变红, 曹夏, 张容端, 等. 宝鸡高新区冬季大气消光系数及其组成特征[J]. *大气与环境光学学报*, 2020, **15**(3): 196-206.
- Zhou B H, Cao X, Zhang R D, *et al.* Characteristics of atmospheric extinction coefficient and its components in Baoji High-Tech Zone in winter [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2020, **15**(3): 196-206.
- [42] 中华人民共和国生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/201805/P020180531534645032372.pdf>, 2021-01-22.
- [43] Liu B S, Yang J M, Yuan J, *et al.* Source apportionment of atmospheric pollutants based on the online data by using PMF and ME2 models at a megacity, China[J]. *Atmospheric Research*, 2017, **185**: 22-31.
- [44] 元洁, 刘保双, 程渊, 等. 2017 年 1 月天津市 $PM_{2.5}$ 化学组分特征及高时间分辨率来源解析研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 1090-1101.
- Yuan J, Liu B S, Cheng Y, *et al.* Study on characteristics of $PM_{2.5}$ and chemical components and source apportionment of high temporal resolution in January 2017 in Tianjin urban area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 1090-1101.
- [45] 丁净. 大气重污染过程中空气湿度对气溶胶理化性质及辐射效应的影响[D]. 天津: 南开大学, 2020.
- Ding J. Impact of air humidity on aerosol physicochemical properties and radiative effects in atmospheric haze episodes [D]. Tianjin: Nankai University, 2020.
- [46] Liu B S, Bi X H, Feng Y C, *et al.* Fine carbonaceous aerosol characteristics at a megacity during the Chinese Spring Festival as given by OC/EC online measurements [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **181**: 20-28.
- [47] HJ 817-2018, 环境空气颗粒物($PM_{2.5}$ 和 PM_{10})连续自动监测系统运行和质控技术规范[S].
- [48] 刘敬乐, 姚青, 蔡子颖, 等. 基于太阳光度计的天津城区气溶胶光学特性[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4013-4021.
- Liu J L, Yao Q, Cai Z Y, *et al.* Analysis on aerosol optical characteristics with sun photometer in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4013-4021.
- [49] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998. 1128-1133.
- [50] 吴兑, 毛节泰, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, **39**(11): 1542-1553.

- Wu D, Mao J T, Deng X J, *et al.* Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, **52**(8): 1152-1163.
- [51] Bergstrom R W, Russell P B, Hignett P. Wavelength dependence of the absorption of black carbon particles: predictions and results from the TARFOX experiment and implications for the aerosol single scattering albedo [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, **59**(3): 567-577.
- [52] Yan P, Tang J, Huang J, *et al.* The measurement of aerosol optical properties at a rural site in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(8): 2229-2242.
- [53] Pitchford M, Maim W, Schichtel B, *et al.* Revised algorithm for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(11): 1326-1336.
- [54] 李倩, 吴琳, 张进生, 等. 廊坊市夏季大气气溶胶消光特性及其来源 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(6): 2249-2257.
Li Q, Wu L, Zhang J S, *et al.* Extinction characteristics of aerosol and the contribution of pollution source to light extinction in Langfang [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2249-2257.
- [55] 李宽. 武汉城区灰霾污染特征及大气消光性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- Li K. Study on the characteristics of haze pollution and atmospheric extinction in urban Wuhan [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [56] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2014.
- [57] Paatero P. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1997, **37**(1): 23-35.
- [58] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**(8): 938-939.
- [59] 黄广寒. 上海近地面大气颗粒物的化学组成与光学特性 [D]. 上海: 复旦大学, 2013.
Huang G H. Chemical composition and optical properties of surface atmospheric particles in Shanghai [D]. Shanghai: Fudan University, 2013.
- [60] Liu B S, Cheng Y, Zhou M, *et al.* Effectiveness evaluation of temporary emission control action in 2016 in winter in Shijiazhuang, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(10): 7019-7039.



CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)