

目次

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

北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析

赵宇^{1,2}, 李贝贝², 黄玉虎^{2*}, 梁静³, 杨洪玲², 秦建平², 朱玲^{1*}

(1. 北京石油化工学院环境工程系, 北京 102617; 2. 北京市生态环境保护科学研究院, 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 3. 北京市西城区环境保护监测站, 北京 100055)

摘要: 近年来生态环境部和北京市不断加严降尘量控制指标, 为了掌握降尘量中离子沉降量特征及其来源, 采用过滤法和离子色谱法分别测定北京市核心区冬春季降尘量及离子沉降量, 采用 PMF 模型开展离子沉降量来源解析。结果表明: ① 离子沉降量及其在降尘量中占比平均值分别为 $0.87 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ 和 14.2%, 工作日降尘量和离子沉降量分别是休息日的 1.3 倍和 0.7 倍。② 离子沉降量与降水量、相对湿度、温度和平均风速的线性方程可决系数分别为 0.54、0.16、0.15 和 0.02, 离子沉降量与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和降尘量的线性方程可决系数分别为 0.26 和 0.17, 控制 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对控制离子沉降量非常重要。③ 离子沉降量中阴、阳离子分别占 61.6% 和 38.4%, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 合计占 60.6%; 阴阳离子电荷沉降量比值为 0.70, 降尘呈碱性; 离子沉降量中 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 为 0.66, 与 15 年前相比有所提高。④ 二次源、扬尘源、燃烧源、融雪剂源和其他源对离子沉降量的贡献率分别为 51.7%、17.7%、13.5%、13.5% 和 3.6%。

关键词: 离子沉降量; 来源解析; 降尘量; $\text{PM}_{2.5}$; 北京市核心区; 冬春季

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)04-1865-08 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202206051

Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing

ZHAO Yu^{1,2}, LI Bei-bei², HUANG Yu-hu^{2*}, LIANG Jing³, YANG Hong-ling², QIN Jian-ping², ZHU Ling^{1*}

(1. Department of Environmental Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Beijing 100037, China; 3. Beijing Xicheng District Environmental Protection Monitoring Station, Beijing 100055, China)

Abstract: In recent years, the Ministry of Ecology and Environment and the Beijing Municipal Government have continuously strengthened the control indicators of dustfall. In order to grasp the characteristics and sources of ion deposition in dustfall, the filtration method and ion chromatography were used to determine the dustfall and ion deposition during winter and spring in the core area of Beijing, and the PMF model was carried out to analyze the sources of ion deposition. The results indicated: ① the average values of ion deposition and its proportion in dustfall were $0.87 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ and 14.2%, respectively. The dustfall and ion deposition on working days were 1.3 times and 0.7 times that on rest days, respectively. ② The coefficient of determination in the linear equations between ion deposition and precipitation, relative humidity, temperature, and average wind speed were 0.54, 0.16, 0.15, and 0.02, respectively. In addition, the coefficient of determination in the linear equations between ion deposition and $\text{PM}_{2.5}$ concentration and dustfall were 0.26 and 0.17, respectively. Therefore, controlling the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ was crucial to treating ion deposition. ③ Anions and cations accounted for 61.6% and 38.4%, respectively, in the ion deposition, and SO_4^{2-} , NO_3^- , and NH_4^+ accounted for 60.6% in total. The ratio of anion and cation charge deposition was 0.70, and the dustfall was alkaline. The $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ in the ion deposition was 0.66, which was higher than that of 15 years ago. ④ The contribution rates of secondary sources, fugitive dust sources, combustion sources, snow-melting agent sources, and other sources were 51.7%, 17.7%, 13.5%, 13.5%, and 3.6%, respectively.

Key words: ion deposition; source apportionment; dustfall; $\text{PM}_{2.5}$; core area of Beijing; winter and spring

降尘指在空气环境条件下,靠重力自然沉降在集尘缸中的颗粒物^[1],它是环境空气颗粒物污染评价指标之一。虽然我国颗粒物污染评价指标由降尘不断升级增加总悬浮颗粒物、可吸入颗粒物和细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$),但是由于扬尘污染问题未得到有效解决,文献[2]首次提出“以平均降尘量 $9 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ 为降尘指标,纳入区县党政领导干部考核问责范围”^[2]。文献[3]首次加严提出“京津冀等城市的降尘量不高于 $7 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ ”^[3]。北京市 2013 年率先提出考核各区降尘量^[4],2019 年和 2020 年要求各区降尘量分别控制在 $6.5 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ 和 $6.0 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ 以内^[5,6],

2021 年和 2022 年要求降尘量(扣除沙尘影响)分别控制在 $5.1 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ 和 $5.0 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ 以内^[7,8]。北京市核心区东城区和西城区 2019 ~ 2020 年秋冬季(当年 10 月至次年 3 月)^[3]降尘量分别为 $4.2 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ 和 $5.0 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$,在北京市 16 个区中分别排名第 9 和第 16 名,值得在核心区开展降尘污染成因研究。

生态环境部 2019 ~ 2020 年每月发布京津冀及

收稿日期: 2022-06-05; 修订日期: 2022-07-14

基金项目: 北京市西城区财政科技专项(XCSTS-SD2020-02); 北京市西城区优秀人才培养项目(XCRC-202031)

作者简介: 赵宇(1998 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为降尘量测定及来源解析,E-mail: kaka2177@126.com

* 通信作者,E-mail: huangyuhu@sina.com; zhuling75@bjpt.edu.cn

周边地区、长三角和汾渭平原这 3 个大气污染防治重点区域的降尘量监测结果^[9],并于 2021 年 12 月首次修订发布《环境空气 降尘的测定 重量法》(HJ 1221-2021)^[10],但其对重点区域降尘污染成因研究的指导明显不如 PM_{2.5}^[3]. 首先,因为降尘污染成因比 PM_{2.5}简单,降尘的主要污染源为扬尘源,其主要化学组分为地壳元素^[11];其次,因为降尘对人体健康的危害远不及 PM_{2.5},降尘粒径比较大,较难被吸入人体. 虽然降尘污染成因及其危害都远不及 PM_{2.5},但其对城市清洁度^[12]、植物^[13]和人体健康^[14]有一定影响. 国内外学者围绕降尘开展了大量类似 PM_{2.5}化学组分和来源解析的研究^[15~36],其中以降尘中重金属及其危害的研究居多^[15~26]. 不过有学者的研究对象并不是 HJ 1221-2021 规定的降尘,而是用毛刷在窗台或屋顶等位置收集的积尘^[24~28]. 离子也是降尘的重要化学组分^[11],近年来降尘中离子污染特征及来源解析的文献时有发表^[27~33],多以大气干沉降离子研究为主^[29~31],以 100 mL 去离子水冲洗定容干沉降样品,分析其中离子电荷浓度.

本文以北京市核心区为研究区域,以 HJ 1221-2021 规定的降尘为研究对象,以生态环境部关注的秋冬季中 2020 年 12 月至 2021 年 3 月为研究时段(该时段在北京称为冬春季),按工作日和休息日收集降尘样品. 采用过滤法分别得到不溶性和水溶性降尘^[37,38],测定水溶性降尘的阴阳离子. 降尘量中水溶性降尘量占比较高^[32],本文用离子沉降量代表水溶性降尘量,用不溶性降尘量与离子沉降量之和来估算降尘量. 本文测定北京市核心区冬春季降尘量及离子沉降量,分析工作日和休息日、气象参数和 PM_{2.5}质量浓度对离子沉降量的影响,硝酸根和硫酸根沉降量比值 $[\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})]$,以及离子沉降量的来源解析,以期为北京市冬春季开展降尘污染防治工作提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域

北京市地处我国北部、华北平原北部,为暖温带半湿润半干旱季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,春、秋短促. 北京市核心区包括东城区和西城区,总面积 92.5 km²,本文在西城区某科研单位(116.355°E,39.929°N)一层车库楼顶设置集尘缸,监测点符合 GB/T 15265-94 的点位设置要求,南侧 60 m 为主干路,东侧 30 m 为次干路. 研究时段为 2020 年 12 月至 2021 年 3 月,属于北京市冬春季时段.

1.2 材料与仪器

降尘样品收集采用 GB/T 15265-94 规定的集

尘缸和乙二醇水溶液,降尘样品过滤采用 1 mm 孔径的金属筛^[37]、无齿扁嘴镊子、砂芯过滤装置和混合纤维素滤膜^[38],不溶性降尘量测定采用蒸发皿、烘箱、干燥器和 0.1 mg 分度值的电子天平,降尘中离子浓度测定采用离子色谱仪及相关试剂和材料.

1.3 研究方法

为获取更多数据且对比工作日和休息日的差别,将每周分为工作日(周一至周四)和休息日(周五至周日)共两个阶段,周一和周五上午 10:00 取样,所以休息日包括 1 个工作日. 按照 GB/T 15265-94 设置 2 个集尘缸(增加样品收集量)进行降尘采样. 采用美国降尘测定标准的过滤法对降尘样品进行不溶性降尘量测定^[37],首先,用 1 mm 孔径的金属筛过滤降尘水溶液去除异物;然后,用砂芯过滤装置和混合纤维素滤膜过滤降尘水溶液得到不溶性降尘滤膜;最后,将滤膜转移至蒸发皿,在 105℃ 烘箱中烘干,再转移至干燥器中冷却至室温,之后再用 0.1 mg 分度值的电子天平直接称量滤膜直至恒重(两次重量差 < 0.4 mg),得到不溶性降尘量. 按照 HJ 799-2016 和 HJ 800-2016,采用离子色谱仪对水溶性降尘进行阴阳离子测定^[39,40]. 同步收集监测期间北京市 54511 号气象站的气象数据和西城区官园国控站的 PM_{2.5}浓度数据,分析时间、气象参数和 PM_{2.5}浓度对离子沉降量的影响,研究降尘中阴阳离子电荷平衡状况,利用 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 分析移动源和固定源的贡献强弱.

本文尝试采用正定矩阵因子分解(PMF)模型^[34,35]开展离子沉降量来源解析,PMF 模型计算最小化目标函数,然后得到源贡献矩阵和源成分谱矩阵. PMF 模型基本方程见公式(1).

$$\mathbf{X}_{ij} = \sum_{k=1}^p \mathbf{G}_{ik} \mathbf{F}_{kj} + \mathbf{E}_{ij} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{X}_{ij}$ 为第 i 个降尘样品中的第 j 种组分对应的降尘量, $\text{t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$; $\mathbf{G}_{ik}$ 为第 k 个因子对第 i 个降尘样品的贡献, $\text{t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$; $\mathbf{F}_{kj}$ 为第 k 个因子中第 j 种组分的占比; $\mathbf{E}_{ij}$ 为 i 个降尘样品中第 j 种组分的残差.

2 结果与讨论

2.1 降尘量及其离子沉降量

图 1 是冬春季降尘量和离子沉降量. 2020 年 12 月至 2021 年 3 月降尘量平均值为 $8.7 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$,监测期间共测得 32 个降尘量数据,排名前两位的分别为 $35.6 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ 和 $26.7 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$,参照 GB 3095-2012 规定颗粒

物的日均浓度限值约为年均浓度限值 2 倍,所以 3 d ~4 d 降尘量不应超过月降尘量的 2 倍,但较大值分别是生态环境部 $[9 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}]$ 和北京市 $[5.1 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}]$,扣除沙尘影响]要求的 2 ~4 倍和 4 ~7 倍,可见冬春季降尘存在短时污染. 研究时段离子沉降量平均值为 $0.87 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$,大于太

原市 2013 年的平均值 $[0.64 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}]^{[29]}$,排名前两位的分别为 $3.22 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ 和 $2.84 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$; 离子沉降量占比平均值为 14.2%,排名前两位的分别为 51.8%和 28.9%,是平均值的 2 ~4 倍,说明离子沉降量是降尘量中不可忽视的组分.

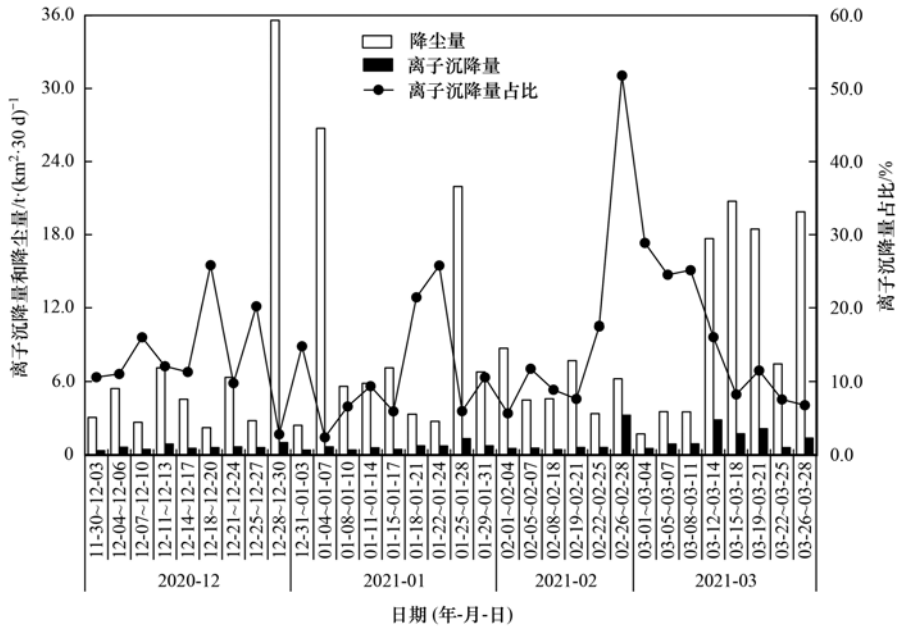


图 1 冬春季降尘量和离子沉降量
Fig. 1 Dustfall and ion deposition during winter and spring

图 2 是按月和时段统计的降尘量及离子沉降量.2020 年 12 月至 2021 年 3 月逐月降尘量分别为 $7.7、9.2、5.8$ 和 $11.6 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$,12 月和 1 月都有异常高值,3 月降尘量(月度最大)是 2 月(月

度最小)的 2.0 倍,且数据最分散,因为 2 月包括春节假期,人为活动减弱,而 3 月进入施工期,加上环境风速相比 2 月有所增加,降尘量中来自施工扬尘和风蚀扬尘排放的绝对贡献会增加. 监测期间逐月

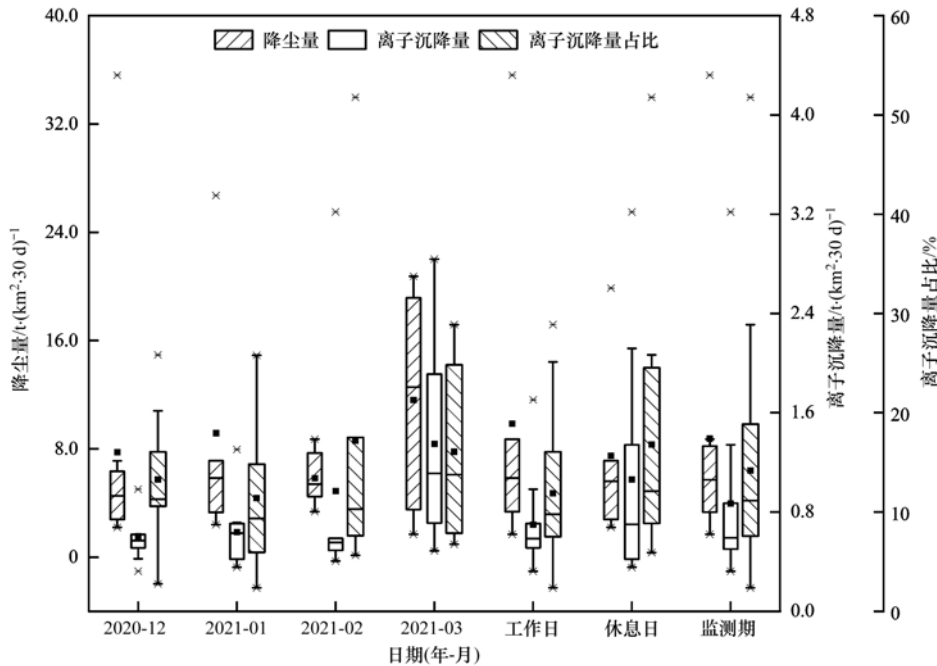


图 2 按月和时段统计的降尘量及离子沉降量
Fig. 2 Dustfall precipitation and ion deposition by month and time period

离子沉降量分别为 0.61 、 0.64 、 0.97 和 $1.35 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$, 2 月有异常高值, 3 月离子沉降量(月度最大)是 12 月(月度最小)的 2.2 倍, 可能也和春季施工活动增加有关. 逐月离子沉降量占比分别为 13.3%、11.4%、17.2% 和 16.1%, 最大值是最小值的 1.5 倍.

工作日降尘量为 $9.9 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$, 是休息日的 1.3 倍, 这可能与工作日施工活动比休息日繁忙有关. 工作日离子沉降量及占比分别为 $0.70 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ 和 11.9%, 两项指标同时是休息日的 0.7 倍, 这与北京市休息日相比工作日未采取机动车限行措施有关^[41], 休息日更多机动车出行排放了更多 NO_x 和 NH_3 等离子前体物.

2.2 离子沉降量影响因素分析

图 3 是冬春季离子沉降量与气象参数及颗粒物评价指标的时间变化, 可以看出离子沉降量受到气象参数和颗粒物评价指标影响. 下文分别分析气象参数(降水量、相对湿度、温度和平均风速)和颗粒

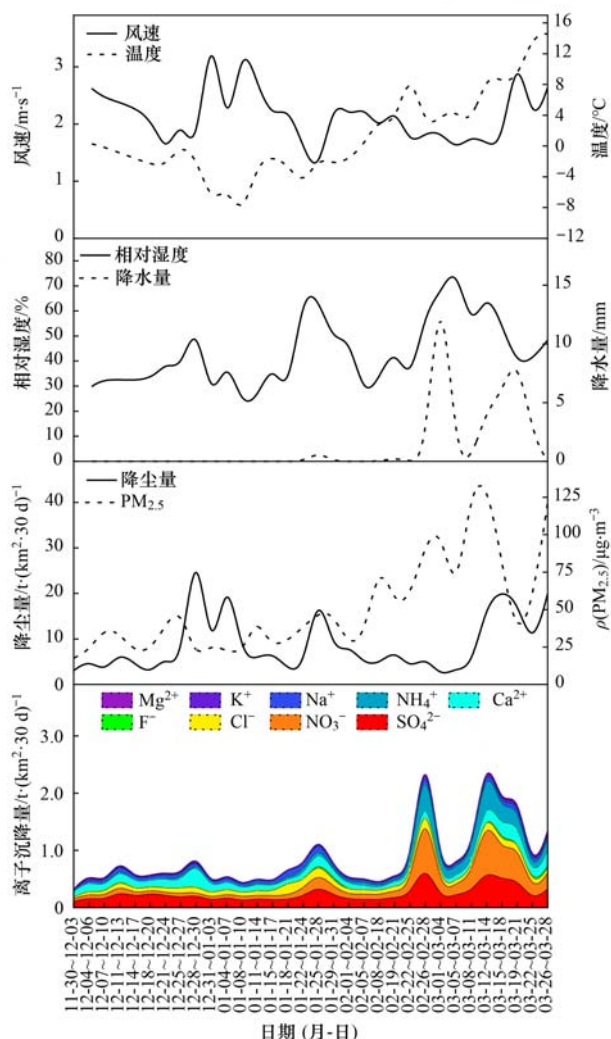


图 3 离子沉降量与气象参数及颗粒物评价指标的时间变化

Fig. 3 Temporal variation in ion deposition, meteorological parameters, and particulate matter evaluation indicators

物评价指标(降尘量和 $\text{PM}_{2.5}$)对离子沉降量的影响规律.

2.2.1 气象参数对离子沉降量的影响

图 4 是离子沉降量和气象参数的线性关系, 可以看出离子沉降量与降水量、相对湿度、温度和平均风速这四类气象参数的线性回归方程可决系数 (R^2) 在逐个减弱, 分别为 0.54、0.16、0.15 和 0.02. 其中, 离子沉降量与降水量为强正相关, 因为降水过程对气溶胶有湿沉降作用, 气溶胶中的离子含量远高于扬尘, 因此增加了离子沉降量; 与相对湿度和温度为中等正相关, 可能源于气溶胶与相对湿度和温度的正相关性; 与平均风速为极弱正相关性或无相关, 而扬尘排放与平均风速相关性极大^[42], 说明降尘中离子的主要来源不是扬尘.

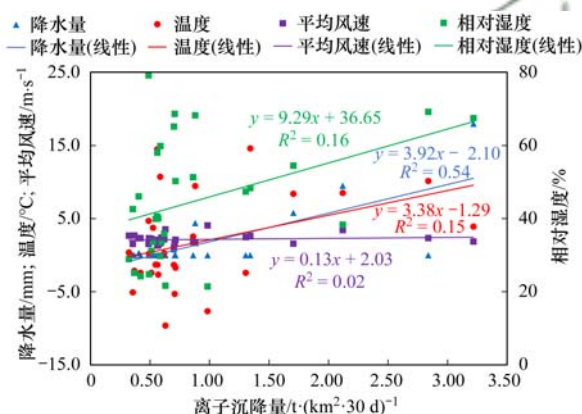


图 4 离子沉降量与气象因素的线性关系

Fig. 4 Linear relationship between ion deposition and meteorological factors

2.2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 对离子沉降量的影响

图 5 是离子沉降量和颗粒物评价指标的线性关系, 可以看出离子沉降量与 $\text{PM}_{2.5}$ 和降尘量的线性回归方程可决系数 (R^2) 分别为 0.26 和 0.17, 均为中等相关. 虽然离子沉降量是降尘量的一部分, 但是其与降尘量的相关系数却小于 $\text{PM}_{2.5}$, 说明离子沉降量和不溶性降尘量的来源不同, 控制 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度对控制离子沉降量非常重要.

2.3 离子沉降量离子组分特征

2.3.1 离子沉降量离子组分构成

图 6 是离子沉降量离子组分构成. 可以看出, 冬春季阴、阳离子沉降量占比分别为 61.6% 和 38.4%, 9 种离子沉降量占比由高到低排序为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- \approx \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{F}^-$. 阴离子沉降量以 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 为主, 平均沉降量分别为 $0.24 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ 和 $0.19 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$, 占离子沉降量的比例分别为 27.4% 和 22.2%. 阳离子以 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 为

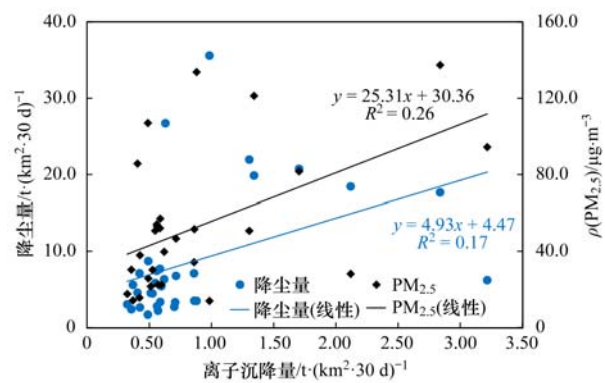


图5 离子沉降量与颗粒物评价指标的线性关系
Fig. 5 Linear relationship between ion deposition and particulate matter evaluation index

主,平均沉降量分别为 $0.14\text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot30\text{ d})^{-1}$ 和 $0.10\text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot30\text{ d})^{-1}$,占离子沉降量的比例分别为16.3%和11.0%.

阴离子沉降量中 $\rho(\text{F}^-)$ 占比较小,监测期内 $\rho(\text{F}^-)$ 和 $\rho(\text{Cl}^-)$ 保持平稳,而 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 保持逐月上升趋势.阳离子沉降量中 $\rho(\text{K}^+)$ 和 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 占比较小,监测期内 $\rho(\text{K}^+)$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 和 $\rho(\text{Na}^+)$ 保持平稳,而 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 保持逐月上升趋势, $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 出现先降后升的趋势与冬春季施工活动规律保持一致.其中, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 是二次生成离子,监测期内占比高达60.6%,三者都保持逐月上升趋势,这与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势一致.此外,休息日离子沉降量比工作日高是因为休息日 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 增加明显,其占比也在增加.

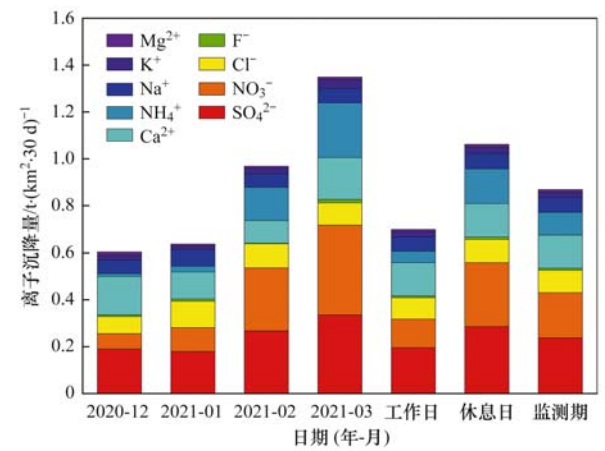


图6 离子沉降量离子组分构成
Fig. 6 Ion component composition in ion deposition

2.3.2 阴阳离子电荷平衡状况

通过计算降尘量中阴、阳离子电荷沉降量AE和CE及其比值(AE/CE),可以评估降尘的酸碱性,当 $\text{AE/CE} < 1$,降尘呈碱性,反之呈酸性^[27].离子电荷沉降量单位 $[\text{eq}\cdot(\text{km}^2\cdot30\text{ d})^{-1}]$ 是由离子沉降量

单位 $[\text{t}\cdot(\text{km}^2\cdot30\text{ d})^{-1}]$ 转化而来,即每月每平方公里面积上沉降的阴离子或阳离子电荷数之和.阴、阳离子电荷沉降量计算公式,见公式(2):

$$\text{AE} = \frac{\rho(\text{SO}_4^{2-})}{48} + \frac{\rho(\text{Cl}^-)}{35.5} + \frac{\rho(\text{NO}_3^-)}{62}$$
$$\text{CE} = \frac{\rho(\text{Na}^+)}{23} + \frac{\rho(\text{NH}_4^+)}{18} + \frac{\rho(\text{K}^+)}{39} + \frac{\rho(\text{Ca}^{2+})}{20} + \frac{\rho(\text{Mg}^{2+})}{12}$$

(2)

式中,AE为阴离子电荷沉降量, $\text{eq}\cdot(\text{km}^2\cdot30\text{ d})^{-1}$;CE为阳离子电荷沉降量, $\text{eq}\cdot(\text{km}^2\cdot30\text{ d})^{-1}$;ρ为相应离子的沉降量, $\text{t}\cdot(\text{km}^2\cdot30\text{ d})^{-1}$.

图7是降尘中阴、阳离子电荷沉降量相关性,本文采集的降尘包括干沉降和湿沉降,可以看出干湿沉降降尘样品AE与CE线性回归方程可决系数(R^2)为0.93,二者为极强正相关, $\text{AE/CE} = 0.70$,降尘总体呈碱性.而湿沉降降尘样品 $\text{AE/CE} = 0.77$,明显大于干沉降降尘样品 $\text{AE/CE} = 0.54$,这是因为湿沉降会将还没有发生化学反应的 SO_2 和 NO_x 直接溶解成 SO_4^{2-} 和 NO_3^- .国内评估降尘酸碱性的样品多为干沉降,北京市2001~2005年^[30]和南京市2014年夏秋季^[31]AE/CE分别为0.64和0.57,而本文大气干沉降降尘样品AE/CE(0.54)相对略小,这与北京市持续开展 SO_2 和 NO_x 治理及效果保持一致.

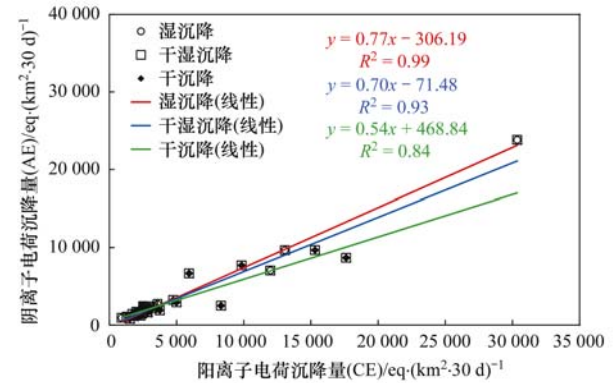


图7 降尘中阴阳离子电荷沉降量相关性
Fig. 7 Correlation of anion charge deposition in dust

2.3.3 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$

$\text{PM}_{2.5}$ 中离子特征的研究经常采用 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 来分析移动源和固定源贡献强弱,比值大于1以移动源为主,小于1则以固定源为主^[43,44].降尘中离子特征的研究也借鉴 $\text{PM}_{2.5}$ 的分析方法,但实际上降尘中 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 通常都小于 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ ^[29~31],而且大多数都 ≤ 1 ,加之北京市2013年实施清洁空气行动计划^[4]以来,大力推广天然气替换燃煤,导致 NO_x 排放量增加, SO_2

排放量减少, NO_x 的来源不仅包括移动源也包括固定源, 因此采用 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 来分析移动源和固定源贡献强弱的方法已经不太适合 $\text{PM}_{2.5}$, 可能更不适用于降尘离子分析. 图 8 是离子沉降量中 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$, 可以看出监测期 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 为 0.66, 而太原市 2013 年^[29] 和北京市 2001~2005 年^[30] 的 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 均为 0.16, 均小于本研究的结果, 这与北京市 2013 年以来天然气替换燃煤有关, 而且北京市天然气使用比例在北方城市居首. 监测期 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 保持逐月增加的趋势, $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 和离子沉降量的线性回归方程为 $y = 0.36x + 0.35$, 可决系数 (R^2) 为 0.57 (强相关), 表明 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 随离子沉降量增加而增加. 此外, 休息日的 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 大于工作日, 说明休息日移动源的贡献大于工作日, 这也印证了上文提出的可能与北京市休息日相比工作日未采取机动车限行措施有关的说法.

2.4 离子沉降量来源解析

将监测期获得的降尘中 9 种离子沉降量及其不确定度输入 PMF 模型^[34], 在 PMF 模型计算过程中尝试 5~7 个因子的分析, 结果显示当模拟输出 6 个因子时, 各因子特征值和源谱都具有显著的源指示性且完整和独立. 图 9 是离子沉降量污染来源成分谱. 可以看出因子 1 中以 NO_3^- 和 NH_4^+ 为主, 贡献率分别为 53.7% 和 86.3%, 该因子可识别为二次硝酸盐源; 因子 2 中以 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 为主, 贡献

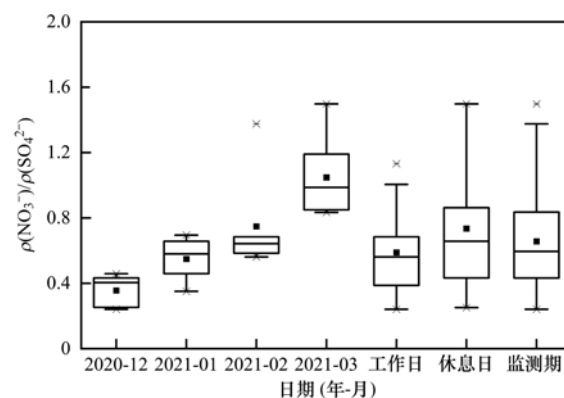


图 8 离子沉降量的氮硫比 [$\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$]

Fig. 8 Nitrogen-to-sulfur ratio of ion deposition: $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$

率分别为 25.3%、13.9% 和 8.7%, 该因子可识别为二次硫酸盐源; 因子 3 中以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 贡献率较高, 贡献率分别为 32.8% 和 47.1%, 该因子可识别为扬尘源; 因子 4 中 K^+ 和 NO_3^- 特征值较高, 贡献率分别为 72.8% 和 13.2%, 该因子可识别为燃烧源; 因子 5 中 Na^+ 和 Cl^- 含量较高, 贡献率分别为 46.7% 和 41.9%, 结合北京市冬季降雪时会施洒融雪剂, 该因子可识别为融雪剂源; 因子 6 中 F^- 贡献率虽为 80.7%, 但没有明显对应的识别源, 该因子可识别为其它源.

图 10 是基于 PMF 模型的离子沉降量污染来源贡献, 可以看出北京市核心区冬春季离子沉降量污染来源包括: 二次硝酸盐、二次硫酸盐、扬尘源、燃烧源、融雪剂源和其它源, 主要来源于二次源, 贡献

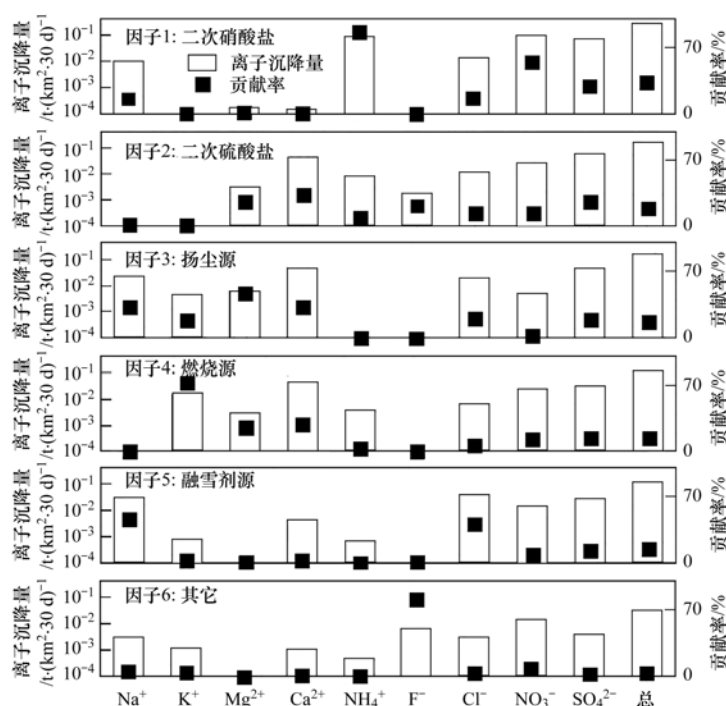


图 9 离子沉降量污染来源成分谱

Fig. 9 Composition profile of ion deposition sources

率为 51.7% ; 其次为扬尘源, 其贡献率为 17.7% ; 燃烧源和融雪剂源均贡献 13.5% ; 其它源贡献率为 3.6% .

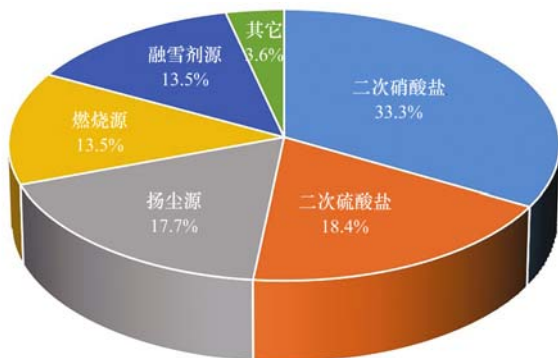


图 10 基于 PMF 模型的离子沉降量污染来源贡献率

Fig. 10 Contribution to ion deposition pollution sources based on PMF models

3 结论

(1) 离子沉降量及其在降尘量中占比的平均值分别为 $0.87 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1}$ 和 14.2%, 工作日降尘量和离子沉降量分别是休息日的 1.3 倍和 0.7 倍, 这与施工活动规律及北京市机动车限行措施有密切关系。

(2) 离子沉降量与降水量、相对湿度、温度和平均风速的线性方程可决系数分别为 0.54、0.16、0.15 和 0.02, 离子沉降量与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和降尘量的线性方程可决系数分别为 0.26 和 0.17, 控制 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对控制离子沉降量非常重要。

(3) 离子沉降量中阴、阳离子分别占 61.6% 和 38.4%, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 合计占 60.6% ; 阴、阳离子电荷沉降量比值为 0.63, 降尘呈碱性; 离子沉降量中 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 为 0.66, 与 15 年前相比有所提高; 氮硫比与离子沉降量呈强正相关, 移动源的贡献随离子沉降量增加而增加。

(4) 采用 PMF 模型开展离子沉降量来源解析, 可得二次源、扬尘源、燃烧源、融雪剂源和其他源的贡献率分别为 51.7%、17.7%、13.5%、13.5% 和 3.6% .

参考文献:

[1] GB/T 15265-1994, 环境空气 降尘的测定 重量法[S].
 [2] 环境保护部. 京津冀大气污染防治强化措施(2016-2017)(环大气[2016]80号)[R]. 北京: 环境保护部, 2016.
 [3] 生态环境部, 发展改革委, 工业和信息化部, 等. 2021-2022 年秋冬季大气污染综合治理攻坚方案(环大气[2021]104号)[R]. 北京: 生态环境部, 2021.
 [4] 北京市人民政府办公厅. 北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划(京政发[2013]27号)[R]. 北京: 北京市人民政府办公厅, 2013.
 [5] 北京市人民政府办公厅. 北京市污染防治攻坚战 2019 年行动计划(京政办发[2019]5号)[R]. 北京: 北京市人民政府

办公厅, 2019.

[6] 北京市人民政府办公厅. 北京市污染防治攻坚战 2020 年行动计划(京政办发[2020]8号)[R]. 北京: 北京市人民政府办公厅, 2020.
 [7] 北京市人民政府办公厅. 北京市深入打好污染防治攻坚战 2021 年行动计划(京政办发[2021]3号)[R]. 北京: 北京市人民政府办公厅, 2021.
 [8] 北京市人民政府办公厅. 北京市深入打好污染防治攻坚战 2022 年行动计划(京政办发[2022]6号)[R]. 北京: 北京市人民政府办公厅, 2022.
 [9] 生态环境部. 生态环境部公布 2019 年 12 月京津冀大气污染传输通道“2+26”城市和汾渭平原 11 城市降尘监测结果[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/202002/t20200221_765074.html, 2022-05-01.
 [10] HJ 1221-2021, 环境空气 降尘的测定 重量法[S].
 [11] 张忠诚, 谢宇琪, 张智杰, 等. 基于两种受体模型的太原市大气降尘来源解析及季节变化特征[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6): 2577-2586.
 Zhang Z C, Xie Y Q, Zhang Z J, et al. Source apportionment and seasonal variation characteristics of atmospheric dustfall in Taiyuan by two receptor models[J]. China Environmental Science, 2022, 42(6): 2577-2586.
 [12] 刘李阳, 黄玉虎, 李贝贝, 等. 环境空气降尘采样及测定方法研究进展[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(S2): 104-112.
 Liu L Y, Huang Y H, Li B B, et al. Research progress on sampling and determination methods of ambient air dustfall[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(S2): 104-112.
 [13] Lequy E, Calvaruso C, Conil S, et al. Atmospheric particulate deposition in temperate deciduous forest ecosystems: Interactions with the canopy and nutrient inputs in two beech stands of Northeastern France[J]. Science of the Total Environment, 2014, 487: 206-215.
 [14] Rani N, Sastry B S, Dey K. Assessment of metal contamination and the associated human health risk from dustfall deposition: a study in a mid-sized town in India[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(22): 23173-23191.
 [15] Alahmr F O M, Othman M, Wahid N B A, et al. Compositions of dust fall around semi-urban areas in Malaysia[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2012, 12(4): 629-642.
 [16] Al-Awadhi J M, AlShuaibi A A. Dust fallout in Kuwait city: deposition and characterization[J]. Science of the Total Environment, 2013, 461-462: 139-148.
 [17] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(2): 951-972.
 [18] Wang J H, Zhang X, Yang Q, et al. Pollution characteristics of atmospheric dustfall and heavy metals in a typical inland heavy industry city in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 71: 83-291.
 [19] Eivazzadeh M, Yadeghari A, Gholampour A. Temporal and spatial variations of deposition and elemental composition of dust fall and its source identification around Tabriz, Iran[J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2019, 17(1): 29-40.
 [20] 熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 等. 北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2735-2742.
 Xiong Q L, Zhao W J, Guo X Y, et al. Distribution characteristics and source analysis of dustfall trace elements during winter in Beijing[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2735-2742.

- [21] 王永晓, 曹红英, 邓雅佳, 等. 大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3575-3584.
Wang Y X, Cao H Y, Deng Y J, *et al.* Distribution and health risk assessment of heavy metals in atmospheric particulate matter and dust[J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3575-3584.
- [22] 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 等. 北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4051-4059.
Xiong Q L, Zhao W J, Li D J, *et al.* Enrichment levels and comprehensive pollution assessment of dust heavy metals in winter in Beijing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4051-4059.
- [23] 张夏, 刘斌, 肖柏林, 等. 重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5288-5294.
Zhang X, Liu B, Xiao B L, *et al.* Pollution characteristics and assessment of heavy metals in atmospheric deposition in core urban areas, Chongqing[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5288-5294.
- [24] 王呈, 钱新, 李慧明, 等. 南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1662-1669.
Wang C, Qian X, Li H M, *et al.* Pollution evaluation and risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in the parks of Nanjing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1662-1669.
- [25] 田春晖, 杨舒舒, 古丽扎尔·依力哈木, 等. 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3118-3125.
Tian C H, Yang R Z, Yilihamu G, *et al.* Pollution levels and risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Nanjing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3118-3125.
- [26] 黄文, 王胜利. 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 597-607.
Huang W, Wang S L. Distribution characteristics and sources of heavy metals in atmospheric deposition during heating and non-heating period in Lanzhou[J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 597-607.
- [27] 钟萍, 汪昂绿, 张慧迪, 等. 武汉市高校大气降尘中水溶性离子污染特征及来源解析[J]. 环境工程, 2021, **39**(2): 98-104.
Zhong P, Wang A L, Zhang H D, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ion pollution in atmospheric dustfall in Wuhan Universities[J]. Environmental Engineering, 2021, **39**(2): 98-104.
- [28] 韩琨, 刘汝海, 徐红霞, 等. 青岛市降尘中水溶性离子的特征及来源分析[J]. 环境工程, 2022, **40**(3): 111-117, 193.
Han K, Liu R H, Xu H X, *et al.* Characteristics and sources apportionment of water-soluble ions in dustfall in Qingdao[J]. Environmental Engineering, 2022, **40**(3): 111-117, 193.
- [29] 王开扬, 郭文帝, 闫雨龙, 等. 太原市干沉降中水溶性离子特征[J]. 环境化学, 2016, **35**(7): 1354-1360.
Wang K Y, Guo W D, Yan Y L, *et al.* Characteristics of water-soluble ions in dry deposition in Taiyuan[J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(7): 1354-1360.
- [30] 蔡阳阳, 杨复沫, 贺克斌, 等. 北京城区大气干沉降的水溶性离子特征[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(7): 1071-1076.
Cai Y Y, Yang F M, He K B, *et al.* Characteristics of water-soluble ions in dry deposition in urban Beijing[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(7): 1071-1076.
- [31] 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 等. 南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2025-2033.
Qin Y, Zhu B, Zou J N, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble ions in dry deposition in the summer and autumn of Nanjing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2025-2033.
- [32] Bisquert D S, Castejón J M P, Fernández G G. The impact of atmospheric dust deposition and trace elements levels on the villages surrounding the former mining areas in a semi-arid environment (SE Spain)[J]. Atmospheric Environment, 2017, **152**: 256-269.
- [33] Fu Y H, Desboeufs K, Vincent J, *et al.* Estimating chemical composition of atmospheric deposition fluxes from mineral insoluble particles deposition collected in the western Mediterranean region [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017, **10**(11): 4389-4401.
- [34] Nicolás J, Chiari M, Crespo J, *et al.* Quantification of Saharan and local dust impact in an arid Mediterranean area by the positive matrix factorization (PMF) technique[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(39): 8872-8882.
- [35] Xing Z Y, Xiong Y, Du K. Source apportionment of airborne particulate matters over the Athabasca oil sands region: Inter-comparison between PMF modeling and ground-based remote sensing[J]. Atmospheric Environment, 2020, **221**, doi:10.1016/j.atmosenv.2019.117103.
- [36] Santos J M, Reis Jr N C, Galvão E S, *et al.* Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(27): 22026-22039.
- [37] ASTM D1739-98(2017), Standard test method for collection and measurement of dustfall[S].
- [38] GB 11901-1989, 水质悬浮物的测定 重量法[S].
- [39] HJ 799-2016, 环境空气颗粒物中水溶性阴离子(F^- 、 Cl^- 、 Br^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-})的测定 离子色谱法[S].
- [40] HJ 800-2016, 环境空气颗粒物中水溶性阳离子(Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})的测定 离子色谱法[S].
- [41] 董欢欢, 刘兴荣. 北京市机动车限行对空气质量的影响[J]. 中国资源综合利用, 2022, **40**(1): 146-148, 175.
Dong H H, Liu X R. Influence of motor vehicles limitation on air quality in Beijing [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2022, **40**(1): 146-148, 175.
- [42] 李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 等. 北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2609-2616.
Li B B, Huang Y H, Bi X H, *et al.* Localization of soil wind erosion dust emission factor in Beijing [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2609-2616.
- [43] 黄玉虎, 李媚, 曲松, 等. 北京城区 $PM_{2.5}$ 不同组分构成特征及其对大气消光系数的贡献[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(8): 1193-1199.
Huang Y H, Li M, Qu S, *et al.* Characteristics of different components of $PM_{2.5}$ and contribution to ambient light extinction coefficient in Beijing[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(8): 1193-1199.
- [44] 李欢, 唐贵谦, 张军科, 等. 2017~2018年北京大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4364-4373.
Li H, Tang G Q, Zhang J K, *et al.* Characteristics of water-soluble inorganic ions in $PM_{2.5}$ in Beijing during 2017-2018[J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4364-4373.

CONTENTS

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