

### 目 次

|                                                        |                                                    |        |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------|
| 基于时间序列分解的京津冀区域PM <sub>2.5</sub> 和O <sub>3</sub> 空间分布特征 | 姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹                               | (2487) |
| 基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析                                     | 周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕                                    | (2497) |
| 基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测                                    | 杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪                              | (2507) |
| 海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估                                  | 符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利                                  | (2516) |
| 京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估                      | 高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬                           | (2525) |
| 2022年北京市城区PM <sub>2.5</sub> 水溶性离子含量及其变化特征              | 陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献                     | (2537) |
| 郑州市冬春季PM <sub>2.5</sub> 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估            | 陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛                                  | (2548) |
| 淄博市供暖前后PM <sub>2.5</sub> 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险        | 孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文                    | (2558) |
| 西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析                           | 李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元                 | (2571) |
| 天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析                            | 卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发                | (2581) |
| 基于空间尺度效应的山东省PM <sub>2.5</sub> 浓度时空变化及空间分异地理探测          | 徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫                              | (2596) |
| 我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势                              | 武婷, 崔焱文, 肖威德, 翟增秀, 韩萌                              | (2613) |
| 廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析                          | 张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮                | (2622) |
| 景观格局对河流水质影响的尺度效应Meta分析                                 | 王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏敏, 陈丁江                         | (2631) |
| 白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源                            | 孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升          | (2640) |
| 北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析                           | 胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹                             | (2651) |
| 庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价                         | 刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红                      | (2665) |
| 农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价                                | 王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红                         | (2678) |
| 黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征                               | 韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁                                   | (2686) |
| 基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析                               | 金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥                         | (2694) |
| 再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征                                  | 贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚                   | (2707) |
| 水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响                      | 梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯                                     | (2715) |
| 银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系                            | 蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟                                 | (2727) |
| 热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析                              | 张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然                     | (2741) |
| 市政污水中吗啡来源辨析                                            | 邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高                    | (2748) |
| 滦河流域生态环境动态遥感评价                                         | 李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪                                  | (2757) |
| 黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素                                  | 王奕洪, 孙学堂                                           | (2767) |
| 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例                 | 蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦                                   | (2780) |
| 贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因                               | 李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬                              | (2793) |
| 2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子                        | 周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛                                   | (2806) |
| 基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量                           | 崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻                                   | (2817) |
| 京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响                         | 武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平                        | (2828) |
| 西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响                             | 江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家                              | (2840) |
| 不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析                              | 黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤              | (2848) |
| 基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测                         | 胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏                             | (2859) |
| 不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响                                   | 孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟                | (2871) |
| 集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性                                    | 周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰                           | (2881) |
| 控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响                            | 高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵          | (2891) |
| 生物炭对黄绵土中NO <sub>3</sub> -N运移过程影响及模拟                    | 白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇                         | (2905) |
| 中国农田土壤重金属污染分析与评价                                       | 杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛                          | (2913) |
| 城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望                                  | 王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰                  | (2926) |
| 场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展                                 | 陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川                             | (2939) |
| 黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析                             | 戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明                | (2952) |
| 拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价                                | 韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成                              | (2962) |
| 银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析                           | 于路加, 马海军, 王翠平                                      | (2971) |
| 基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估                         | 陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨菡, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 | (2983) |
| 西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型                       | 唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧                     | (2995) |
| 贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划                                | 韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波                          | (3005) |
| 柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应                                | 刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒                    | (3016) |
| 改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响                               | 肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明                        | (3027) |
| 生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响                           | 郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅                  | (3037) |
| 基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应                            | 姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋                              | (3047) |
| 微塑料对土壤N <sub>2</sub> O排放及氮素转化的影响研究进展                   | 刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博                         | (3059) |
| 土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响                                | 戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌               | (3069) |
| 养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征                                    | 宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华                   | (3078) |
| 聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响                                   | 李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平                        | (3088) |
| 鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测                           | 俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽                  | (3098) |
| 粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径                                    | 徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡                   | (3107) |
| 电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析                                | 徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪                                  | (3119) |

# 郑州市冬春季PM<sub>2.5</sub>中金属元素污染特征、来源及健康风险评估

陶杰, 闫慧姣\*, 徐艺斐, 荆海涛

(河南省郑州生态环境监测中心, 郑州 450007)

**摘要:** 于2021年1月和4月利用在线金属分析仪对郑州市大气PM<sub>2.5</sub>中的18种金属元素进行连续测定, 分析了元素浓度变化特征; 采用富集因子、正定矩阵因子分解法(PMF)和特征雷达图对金属元素进行溯源; 采用美国EPA健康风险评估模型评估其健康风险, 并通过后向轨迹法和浓度权重轨迹法(CWT)分析了健康风险的潜在源区。结果表明, 春季元素浓度较高, Fe、Ca、Si和Al浓度之和分别占冬季和春季总元素浓度的89.8%和87.5%。Cd属于重度富集, 受人为污染影响严重。冬季Pb、Se、Zn、Ni、Sb和K以及春季Cr、Ni、Fe、Mn、V、Ba、Ca、K、Si和Al浓度随污染等级的提高而增加。PMF源解析和特征雷达图结果表明, 冬春两季金属元素主要来源为工业源、地壳源、机动车源和混合燃烧源, 冬季多发生工业源和混合燃烧源污染, 春季多发生地壳源污染。冬春两季均存在明显的非致癌风险, 冬季健康风险更严重, Mn造成明显的非致癌风险。冬季健康风险主要受郑州及周边城市传输影响和西北方向远距离输送影响, 春季健康风险主要受郑州及周边城市影响。

**关键词:** 郑州市; 正定矩阵因子分解法(PMF); 特征雷达图; 健康风险; 潜在源区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2548-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202304015

## Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM<sub>2.5</sub> Between Winter and Spring in Zhengzhou

TAO Jie, YAN Hui-jiao\*, XU Yi-fei, JING Hai-tao

(Henan Zhengzhou Ecological Environment Monitoring Center, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract:** A total of 18 metal elements in ambient PM<sub>2.5</sub> in Zhengzhou were continuously determined using an online heavy metal observation instrument in January and April, 2021, and the changes in element concentrations were analyzed. Metal elements were traced via enrichment factors, positive matrix factorization (PMF), and a characteristic radar chart. The US EPA health risk assessment model was used to assess the health risks of heavy metals, and the backward trajectory method and the concentration-weighted trajectory (CWT) method were used to evaluate the potential source regions of health risks. The results showed that the element concentrations were higher in spring, and the sum of Fe, Ca, Si, and Al concentrations accounted for 89.8% and 87.5% of the total element concentrations in winter and spring, respectively. Cd was enriched significantly, which was related to human activities. The concentrations of Pb, Se, Zn, Ni, Sb, and K in winter and Cr, Ni, Fe, Mn, V, Ba, Ca, K, Si, and Al in spring increased with the increasing pollution level. The results of PMF and the characteristic radar chart showed that the main sources of metal elements in winter and spring were industry, crust, motor vehicles, and mixed combustion, with industry and mixed combustion pollution occurring more often in winter and crust pollution occurring more often in spring. Significant non-carcinogenic risks existed in both winter and spring with more severe health risks in winter, and Mn caused significant non-carcinogenic risks. The health risks in winter were mainly influenced by Zhengzhou and surrounding cities and long-distance transport in the northwest, and the health risks in spring were mainly influenced by Zhengzhou and surrounding cities.

**Key words:** Zhengzhou City; positive matrix factorization (PMF); characteristic radar chart; health risk; potential source regions

颗粒物(PM)污染是大气环境治理中的一个重要问题, 对空气质量、能见度、气候变化、人体健康和大气辐射造成一定负影响<sup>[1-7]</sup>, 在大气环境领域引起广泛关注<sup>[8-12]</sup>。与粗颗粒物相比, 细颗粒物具有更大的比表面积, 可以更有效地积累重金属<sup>[13]</sup>, 尽管PM<sub>2.5</sub>组分中金属元素占比一般不超过10%, 但微量的重金属也会通过呼吸吸入、手口摄入和皮肤吸收给人体带来严重的健康风险<sup>[14]</sup>, 附着在细颗粒物上的重金属已成为一个重大问题<sup>[15]</sup>。重金属可通过食物链形成生物积累的趋势<sup>[16]</sup>, 长期暴露在高浓度的Pb、Cr(VI)、As、Ni和Cd等元素中可能导致心脏毒性、神经毒性<sup>[17]</sup>、免疫毒性<sup>[18]</sup>和癌症<sup>[19,20]</sup>等, 从而导致死亡率的增加, 因此分析细颗粒物中重金属元素污染特征及其对人体健康的影响至关重要。

国内外学者对PM<sub>2.5</sub>中重金属元素已开展广泛研究, Kumari等<sup>[21]</sup>的研究分析了印度丹巴德PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>和道路粉尘中重金属元素的污染特征和污染来源并对其健康风险进行了评估; Choi等<sup>[22]</sup>的研究调查了韩国釜山萨桑工业园区有害重金属(As、Cr<sup>6+</sup>、Ni、Cd、Pb和Mn)的分布并对其造成的健康影响进行了危害性评价; 郑灿利等<sup>[23]</sup>的研究分析了贵阳市大气PM<sub>2.5</sub>中重金属的污染特征、潜在来源和健康危害; 杨毅红等<sup>[24]</sup>开展了对珠海市郊区大气PM<sub>2.5</sub>金属元素污染特征、来源和健康风险的研究。但以上研究主要基于约24 h分辨率的传统离线膜采样, 无法

收稿日期: 2023-04-03; 修订日期: 2023-08-16

作者简介: 陶杰(1976~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为大气污染研究与控制, E-mail: taojie197603@163.com

\* 通信作者, E-mail: 1061270125@qq.com

及时获得金属元素组分的小时变化,不利于受体模型对一些短时峰值的来源识别,使用较长采样期及高时间分辨率的数据更有利于改善受体模型的性能,从而获得更稳定的源解析结果<sup>[25]</sup>。

郑州作为中原经济区的核心城市,中国主要的交通和通信枢纽城市以及京津冀大气污染传输通道城市之一,多年来一直遭受频繁的空气污染。近年来对郑州市大气 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的研究<sup>[26-28]</sup>主要集中在金属元素的污染特征、来源解析和健康风险评估,缺乏多种来源解析手段联用和健康风险溯源的研究。因此本研究利用在线多金属监测仪对郑州市 2021 年冬季和春季大气 PM<sub>2.5</sub> 中 18 种金属元素小时浓度水平进行监测,分析其污染特征,使用富集因子、PMF 源解析法和污染特征雷达图多种来源解析手段联用的方法识别金属元素的污染源,使用健康风险评估模型评估金属元素的健康风险,并通过后向轨迹法和 CWT 模型解析了健康风险的潜在源区,以期对郑州市 PM<sub>2.5</sub> 重金属污染的精细化防治及改善居民健康提供科技支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样时间和地点

本研究于 2021 年 1 月 1~30 日和 4 月 1~30 日进行连续观测,采样地点位于郑州市环境监测站(113.31°E, 34.82°N),采样设备位于监测站站房楼顶,距地面约 15 m。周围较为开阔,无高大建筑物遮挡,适宜样品的采集。

### 1.2 采样仪器

采用美国 Cooper Environment Services 公司的 Xact-625 型环境空气金属在线分析仪检测 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素浓度。仪器可检测 30 余种元素,本研究根据采样点实际情况,选取 PM<sub>2.5</sub> 中 Pb、Se、Cr、Cd、Zn、Cu、Ni、Fe、Mn、Sb、V、Ba、As、Ca、K、Si、Al 和 Nb 共 18 种元素用于研究分析。

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 正定矩阵因子分解法

美国环保署推荐的正定矩阵因子分解法(positive matrix factorization, PMF)是大气颗粒物来源解析工作中广泛应用的受体模型<sup>[29-32]</sup>,该模型主要通过不同组分的时间变化差异识别和量化污染源,是一种多元因子分析方法。PMF 的分析原理可参考文献<sup>[33]</sup>,本研究通过 PMF 5.0 对郑州市冬季和春季大气 PM<sub>2.5</sub> 中 18 种元素进行来源解析,数据不确定度 Unc 的计算如下<sup>[26]</sup>:

$$\text{Unc} = (5/6) \times \text{MDL} \quad (c \leq \text{MDL}) \quad (1)$$

$$\text{Unc} = \sqrt{(\text{ef} \times c)^2 + (\text{MDL})^2} \quad (c > \text{MDL}) \quad (2)$$

式中,MDL 为所用方法检出限;ef 为测定结果不确定度的百分比,一般为 10%;c 为元素浓度。

#### 1.3.2 污染特征雷达图

特征雷达图是在观测数据的基础上利用数学算法推导出平均浓度和组成谱系等共性特征,能有效反映空气污染特征的时间或空间差异,直观、快速地判断出哪些污染源或机制影响了环境空气质量特征<sup>[34]</sup>。本研究将某一时刻金属元素的污染特征与当月平均污染特征进行对比,用以确定大气 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的污染类型。数据前处理及特征值算法如下<sup>[35]</sup>。

步骤一:归一化成分谱。

$$Z_{ij} = c_{ij} / \sum_{j=1}^n c_{ij} \quad (3)$$

式中, $Z_{ij}$  为  $i$  时间第  $j$  种污染物归一化成分谱; $c_{ij}$  为  $i$  时间第  $j$  种污染物原始浓度,  $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

步骤二:污染物特征值。

$$\text{CV}_j = Z_{ij} / \bar{Z}_j \quad (4)$$

式中, $\text{CV}_j$  为  $i$  时间第  $j$  种污染物的特征值, $\bar{Z}_j$  为一定时期第  $j$  种污染物的均一化值的平均值, $Z_{ij}$  为  $i$  时间第  $j$  种污染物归一化值。

步骤三:一定时期污染物特征标准值及上(下)限值。

标准值为一定时期平均污染特征成分谱与该平均污染特征成分谱的比值,数值为 1。

$$\text{Max}_j = (\bar{Z}_j + S_j) / \bar{Z}_j \quad (5)$$

$$\text{Min}_j = (\bar{Z}_j - S_j) / \bar{Z}_j \quad (6)$$

式中, $\text{Max}_j$  为第  $j$  种污染物的上限, $\text{Min}_j$  为第  $j$  种污染物的下限, $S_j$  为第  $j$  种污染物的标准偏差。

#### 1.3.3 富集因子

富集因子(enrichment factor, EF)是研究元素在沉积物、土壤和大气颗粒物中富集程度的重要指标,可用来判断颗粒物中元素的人为源和自然源<sup>[36]</sup>,富集因子的计算公式如下:

$$\text{EF} = \left( C_i / C_R \right)_{\text{气溶胶}} / \left( C_i / C_R \right)_{\text{地壳}} \quad (7)$$

式中, $C_i$  为元素  $i$  的含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_R$  为参比元素的含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本研究选取 Al 为参比元素,地壳中元素浓度背景值选择《中国土壤背景值》<sup>[37]</sup>中河南省 A 层土壤。

#### 1.3.4 健康风险评价

本研究通过美国环保署推荐的健康风险评价模型从呼吸途径对进入人体的金属元素进行健康风险评价,计算公式为:

$$ADD(LADD) = (c \times IR \times EF \times ED) / (BW \times AT) \quad (8)$$

式中,  $c$  为金属元素浓度,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $ADD(LADD)$  为非致癌(致癌)物质日均摄入剂量,  $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ; 暴露参数取值见表 1<sup>[26]</sup>.

金属元素的非致癌及致癌风险计算如下:

$$HQ = ADD/RfD \quad (9)$$

$$CR = LADD \times SF \quad (10)$$

$$HI = \sum HQ \quad (11)$$

式中,  $HQ$ (hazard quotient)为元素的非致癌风险, 无量纲;  $CR$ (carcinogenic risks)为致癌风险, 无量纲;  $RfD$ 为参考摄入剂量,  $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ;  $SF$ 为致癌倾斜系数,  $\text{kg}\cdot\text{d}\cdot\text{mg}^{-1}$ ; 其中  $Pb$ 、 $Cr(VI)$ 、 $Cd$ 、 $Zn$ 、 $Cu$ 、 $Ni$ 、 $Mn$ 、 $V$  和  $As$  的  $RfD$  分别取  $3.50 \times 10^{-3}$ 、 $2.86 \times 10^{-5}$ 、 $1.00 \times 10^{-3}$ 、 $3.00 \times 10^{-1}$ 、 $4.00 \times 10^{-2}$ 、 $2.00 \times 10^{-2}$ 、 $1.43 \times 10^{-5}$ 、 $7.00 \times 10^{-3}$  和  $3.00 \times 10^{-4} \text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ;  $Cr(VI)$ 、 $Cd$ 、 $Ni$  和  $As$  的  $SF$  分别取 84.00、6.30、0.84 和 15.10  $\text{kg}\cdot\text{d}\cdot\text{mg}^{-1}$ <sup>[15,26]</sup>;  $HI$ (hazard index)为所有金属元素非致癌风险值( $HQ$ )的总和, 无量纲.

表 1 暴露参数取值

Table 1 Exposure factors

| 参数      | 参数意义   | 单位                             | 儿童取值            | 成人取值            |
|---------|--------|--------------------------------|-----------------|-----------------|
| IR      | 呼吸速率   | $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ | 8.6             | 15.0            |
| EF      | 暴露频率   | $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$   | 350             | 350             |
| ED      | 暴露年限   | a                              | 6               | 30              |
| BW      | 平均体重   | kg                             | 15              | 61.9            |
| AT(致癌)  | 终身暴露时间 | d                              | $365 \times 70$ | $365 \times 70$ |
| AT(非致癌) | 平均暴露时间 | d                              | $365 \times ED$ | $365 \times ED$ |

## 2 结果与讨论

### 2.1 金属元素污染特征

#### 2.1.1 元素浓度特征

由表 2 可见冬季和春季 18 种元素的浓度平均值及其富集因子, 地壳元素浓度明显高于痕量金属元素,  $Fe$ 、 $Ca$ 、 $Si$  和  $Al$  浓度较高, 浓度之和分别占冬季和春季总元素浓度的 89.8% 和 87.5%. 冬季总元素浓度 ( $9\,177.6 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 低于春季 ( $9\,530.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 冬季浓度低于春季的元素为  $V$ 、 $Ba$ 、 $Ca$ 、 $Si$  和  $Al$ , 其中  $V$  的  $EF$  小于 1,  $Ba$ 、 $Ca$ 、 $Si$  和  $Al$  为典型的地壳元素, 说明  $V$ 、 $Ba$ 、 $Ca$ 、 $Si$  和  $Al$  均主要受自然源影响, 因此春季总元素浓度较高可能与春季多风且外来传输容易带来大量沙尘有关. 除  $V$ 、 $Ba$ 、 $Ca$ 、 $Si$  和  $Al$  外, 冬季其余元素浓度均高于春季, 这可能是由于冬季多静稳天气, 便于污染物积累. 此外,  $As$  往往给人体带来一定的致癌风险, 冬季和春季  $\rho(As)$  均值分别为 11.4 和 9.2  $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ , 达世界卫生组织标准

( $6.6 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和《环境空气质量标准》(GB 3095-2012,  $6 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 的 1.7(1.4)倍和 1.9(1.5)倍.

表 2 还列出了各元素在冬季和春季的富集因子计算结果, 以反映来源特征.  $Pb$ 、 $Cd$ 、 $Zn$ 、 $Cu$ 、 $Sb$ 、 $As$  和冬季  $Mn$  的  $EF$  均大于 10, 说明主要受人为源影响<sup>[27]</sup>, 其中  $Cd$  的  $EF$  最高, 最高值在冬季为 1 716.4, 属于重度富集.  $V$ 、 $Ba$  和春季  $K$  的  $EF$  均小于 1, 未富集, 说明主要受自然源影响. 其余元素的  $EF$  处于 1 ~ 10 之间, 表明同时受人为源和自然源影响. 此外,  $V$  和  $Ba$  两季  $EF$  差距较小, 其余元素  $EF$  均呈现冬季明显高于春季的特征, 这可能与冬季大气扩散能力弱, 不利于污染物去除有关.

表 2 郑州市冬季和春季  $PM_{2.5}$  中元素浓度对比<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison of element concentration in  $PM_{2.5}$  in winter and spring in Zhengzhou

| 元素 | 冬季                                      |         | 春季                                      |         |
|----|-----------------------------------------|---------|-----------------------------------------|---------|
|    | 浓度均值<br>/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ | EF      | 浓度均值<br>/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ | EF      |
| Pb | 46.7                                    | 93.4    | 23.5                                    | 37.4    |
| Se | 5.6                                     | —       | 2.8                                     | —       |
| Cr | 7.3                                     | 4.5     | 5.2                                     | 2.5     |
| Cd | 3.2                                     | 1 716.4 | 2.8                                     | 1 187.3 |
| Zn | 129.5                                   | 84.4    | 69.2                                    | 35.9    |
| Cu | 20.8                                    | 41.3    | 9.2                                     | 14.6    |
| Ni | 2.9                                     | 4.3     | 2.9                                     | 3.4     |
| Fe | 2 486.4                                 | 3.5     | 1 618.3                                 | 1.8     |
| Mn | 263.3                                   | 17.8    | 116.0                                   | 6.2     |
| Sb | 6.8                                     | 194.9   | 6.7                                     | 151.4   |
| V  | 1.3                                     | 0.5     | 2.0                                     | 0.7     |
| Ba | 7.4                                     | 0.6     | 10.1                                    | 0.7     |
| As | 11.4                                    | 39.1    | 9.2                                     | 25.3    |
| Ca | 1 418.7                                 | 2.3     | 1 717.7                                 | 2.2     |
| K  | 798.2                                   | 1.8     | 506.7                                   | 0.9     |
| Si | 1 922.1                                 | —       | 2 970.3                                 | —       |
| Al | 1 619.1                                 | 1.0     | 2 034.6                                 | 1.0     |
| Nb | 426.9                                   | —       | 422.8                                   | —       |

1) “—”为缺失值

#### 2.1.2 不同污染等级金属元素浓度特征

根据日均  $PM_{2.5}$  浓度和《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(试行)(HJ 633-2012)中空气质量的分级, 将观测期间的空气质量分为: 优[0, 35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]、良(35, 75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]、轻度污染(75, 115  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]、中度污染(115, 150  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]、重度污染(150, 250  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]和严重污染(250, 500  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ], 图 1 为不同空气质量下冬季和春季各元素浓度.

冬季随着污染水平的变化,  $Pb$ 、 $Se$ 、 $Zn$ 、 $Ni$ 、 $Sb$  和  $K$  浓度总体上呈现随污染等级的提高而增加的特征, 这些元素主要来自于燃煤排放和生物质燃烧, 此现象可能与冬季重度污染天大气扩散条件

弱, 污染物大量积累, 燃煤量和附近村落秸秆焚烧增加有关. Cr、Cd、Cu、Fe、Mn、V、Ba、As、Ca、Si和Al浓度最高值基本集中在轻度或中度污染天, 其中Fe、Mn、Ca、Si和Al浓度最高值与严重污染天差距较大, 浓度最高值可达严重污染天的3.6~13.1倍, 有研究表明Fe、Mn、Ca、Si和Al均为地壳元素, 冬季地壳元素浓度高值集中在轻中度污染天可能是由于冬季轻中度污染天大气扩散能力相对较强, 有利于大气颗粒物的扩散, 但同时也容易受到外来传输的影响带来大量沙尘, 导致地壳元

素浓度升高.

春季各污染等级下Cd和Nb浓度的差距不大, Cr、Ni、Fe、Mn、V、Ba、Ca、K、Si、Al浓度呈现随污染等级的提高而增加的特征, 这可能是由于重度污染天气气象条件稳定, 大气扩散能力弱, 造成金属元素积累. Pb、Se、Zn、Cu、Sb和As浓度最高值主要集中在轻度污染天, 这可能与本地重污染天进行交通管控、有色金属冶炼停产等应急管控措施有关<sup>[38]</sup>, 导致重度污染天Pb、Se、Zn、Cu、Sb和As等重金属浓度降低.

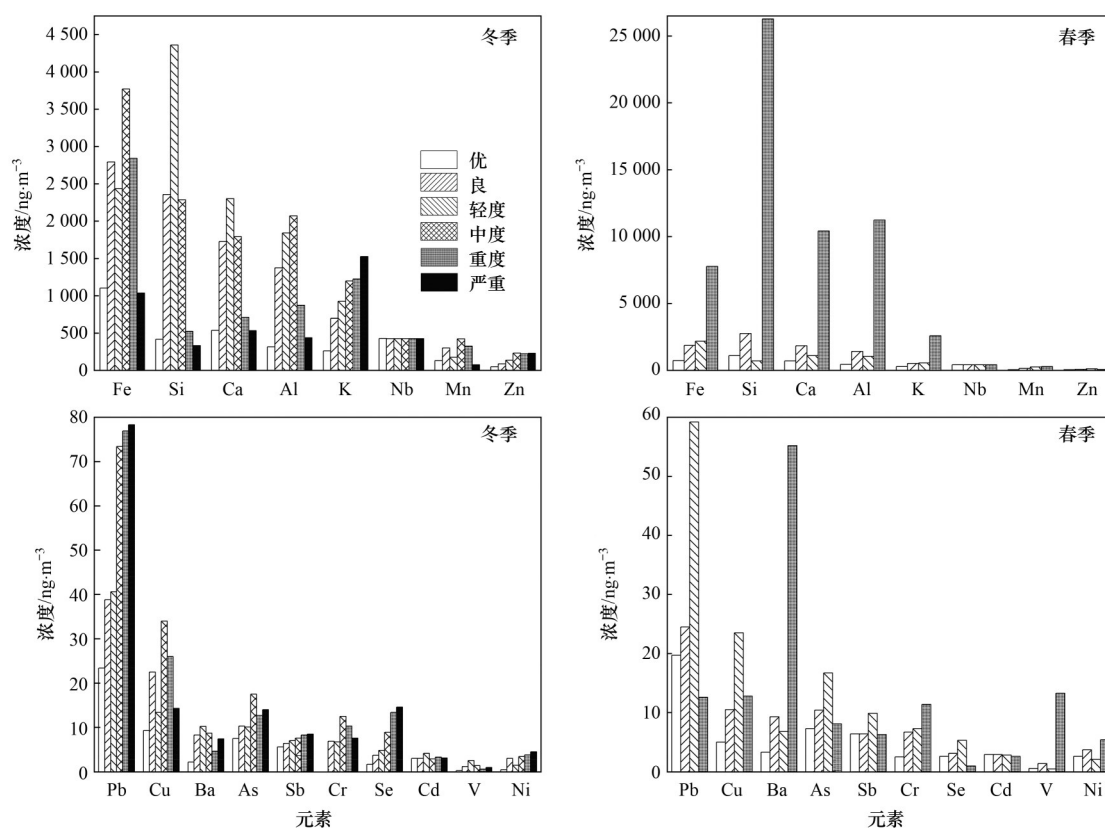


图1 不同污染等级下元素浓度

Fig. 1 Concentrations of elements at different pollution levels

## 2.2 金属元素来源解析

### 2.2.1 金属元素PMF源解析

通过PMF5.0对冬季和春季PM<sub>2.5</sub>中18种元素进行了来源解析, 选取3~7个因子进行多次迭代运行, 最终确定4个因子分析郑州市冬季和春季PM<sub>2.5</sub>中元素的来源及贡献.

冬季元素PMF解析结果如图2(a)所示. 因子1中Cr、Cu、Fe和Mn载荷较高, Cr可能来自工业生产中的高温熔炼过程<sup>[39]</sup>, Cu可能来自工业排放<sup>[40]</sup>, Fe和Mn除地壳来源外, 还可能来自钢铁工业排放, 采样点附近无钢铁厂, Fe和Mn的累积可能主要受大气传输影响, 因此因子1为工业源; 因子2中V、Ba、Ca、Si和Al载荷较高, 由2.1.1节可知V的EF

小于1, 说明V主要受自然源影响, 而Ba、Ca、Si和Al均为典型的地壳源示踪元素, 因此因子2代表地壳源; 因子3中Cd和Sb载荷较高, Cd可能来自机动车排放<sup>[40]</sup>, Sb主要来自汽车刹车片磨损<sup>[41]</sup>, 且Cd和Sb的EF均大于100, 因此因子3代表机动车源; 因子4中Pb、Se、Zn、Ni和As等载荷较高, Pb、Se和As是燃煤排放的典型元素<sup>[42, 43]</sup>, Zn来自垃圾焚烧<sup>[44]</sup>, Ni主要来自工业燃油, 因此将因子4归为混合燃烧源.

春季元素PMF解析结果如图2(b)所示, 各因子中载荷较高的元素与冬季结果相近, 因子1中V、Ba、Ca、K、Si和Al载荷较高, V和K在春季的EF均小于1, 说明主要受自然源影响, 因此将因子1归

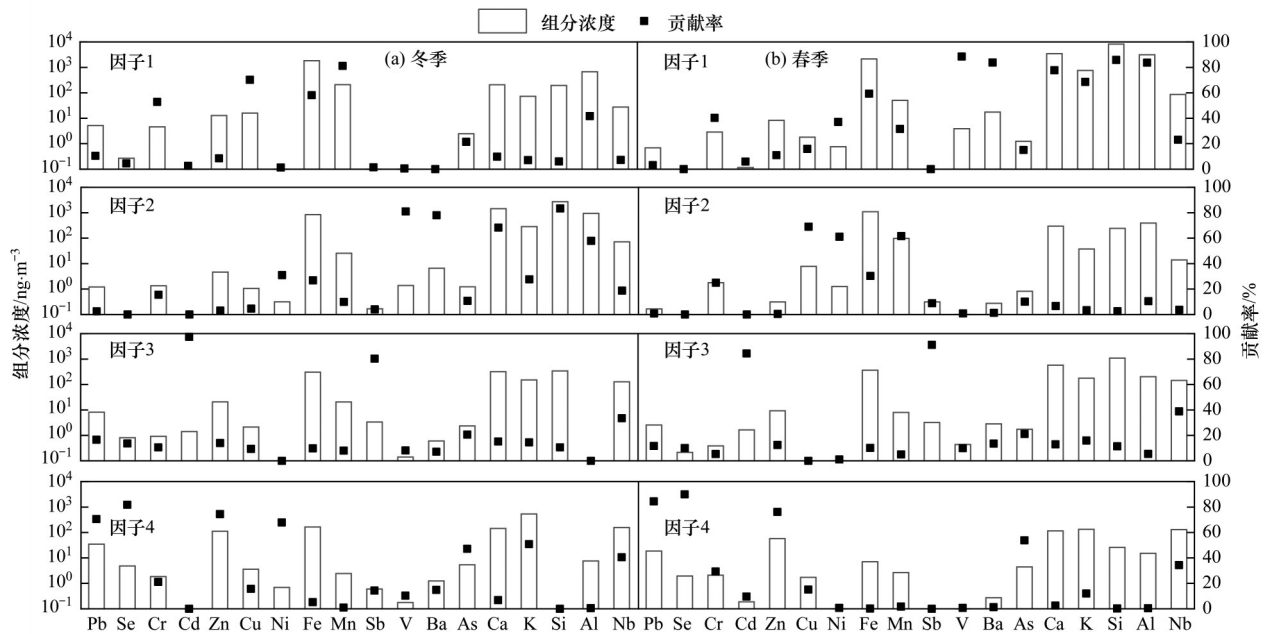


图2 金属元素PMF源解析因子贡献

Fig. 2 Factor contribution of metal elements calculated using the PMF model

为地壳源；因子2中Cu、Ni和Mn载荷较高，Cu可能来自金属冶炼过程，Ni来自工业燃油，Mn可能来自外来传输的钢铁工业排放，因此因子2代表工业源；因子3和因子4载荷较高的元素与冬季因子3和因子4相近，同理分别归为机动车源和混合燃烧源。

### 2.2.2 特征雷达图源解析

本研究通过特征雷达图对PM<sub>2.5</sub>中18种元素进行进一步来源分析，以探究污染类型，其中金属元素污染类型如下。

综合污染：如图3(a)所示，各元素特征值均未超过上限，说明该时刻污染特征与当月平均污染特征相比没有明显变化，故此类型为综合污染。

地壳源：如图3(b)所示，Ba和Ca特征值明显

超过上限，Ba和Ca为典型的地壳源示踪元素，故此类型为地壳源污染。

工业源：如图3(c)所示，Cu、Fe和Mn特征值明显超过上限，Cu可能来自工业排放，Fe和Mn除地壳源还可能来自钢铁工业排放，故此类型为工业源污染。

混合燃烧源：如图3(d)所示，Pb、Se、As和K等特征值明显超过上限，Pb、Se和As均为燃煤的示踪元素，K来自生物质燃烧<sup>[45]</sup>，故此类型为混合燃烧源污染。

机动车源：如图3(e)所示，Cd和Sb特征值明显超过上限，Cd可能来自机动车排放，Sb主要来自汽车刹车片磨损，故此类型为机动车源污染。

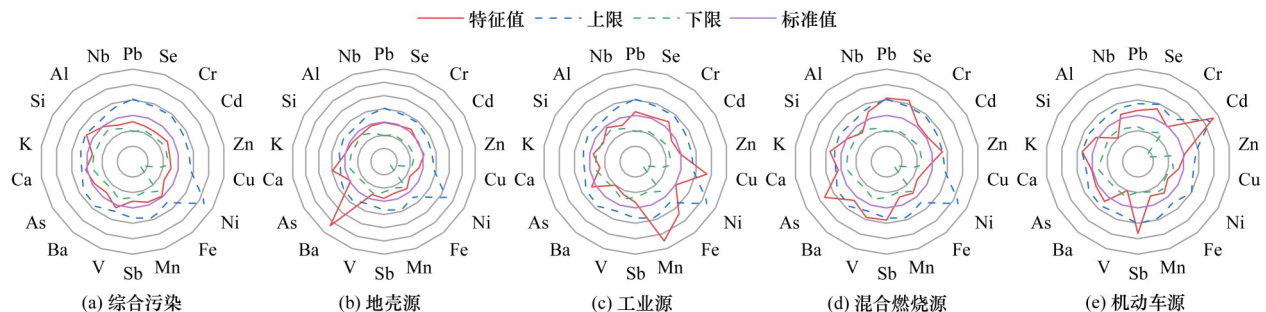


图3 金属元素污染类型

Fig. 3 Type of metal element pollution

本研究通过特征雷达图对PM<sub>2.5</sub>中18种元素进行进一步来源分析，以探究污染类型，观测期间的各元素污染类型时间占比情况如图4所示，冬季各类型污染时间占比从大到小依次为：工业源(33.3%)、

地壳源(30.0%)、混合燃烧源(20.0%)、机动车源(10.0%)和综合污染(6.7%)。春季各类型占比从大到小依次为：地壳源(43.4%)、工业源(20.0%)、混合燃烧源(13.3%)、机动车源(13.3%)和综合污染

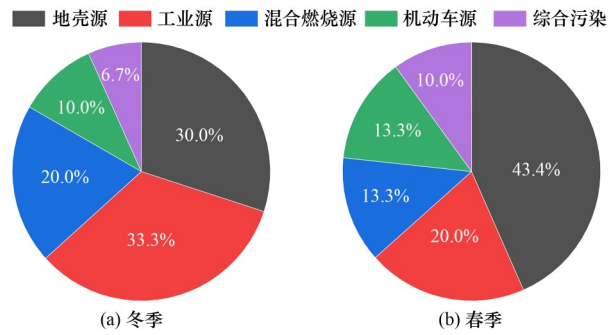


图4 金属元素污染类型季节占比  
Fig. 4 Proportion of metal elements pollution types

(10.0%). 冬季与春季相比, 工业源和混合燃烧源时间占比较高, 地壳源、机动车源和综合污染相对时间占比较低, 这可能是由于冬季气象条件稳定, 大气边界层较低, 污染物扩散受到抑制, 便于来自人为排放的金属元素大量积累, 而春季多风, 大气扩散条件较好, 容易受到外来沙尘传输的影响, 常发生沙尘和扬尘等污染.

2.3 健康风险评估与溯源

2.3.1 健康风险评估

本研究应用美国环保署推荐的健康风险评价模型对具有非致癌或致癌风险的Pb、Cr(VI)、Cd、Zn、Cu、Ni、Mn、V和As共9种元素进行计算, 以探究冬春两季PM<sub>2.5</sub>中重金属对成人及儿童的健康影响. 当致癌风险CR小于10<sup>-6</sup>、处于10<sup>-6</sup>~10<sup>-4</sup>范围内或大于10<sup>-4</sup>时分别表示无致癌风险、处于人体可接受范围或存在致癌风险. 当非致癌风险HQ<1或>1时

表示非致癌风险在人体可接受范围或存在致癌风险.

由表3可知, 冬季所受总致癌风险(儿童1.40×10<sup>-5</sup>, 成人2.95×10<sup>-5</sup>)均大于春季(儿童1.10×10<sup>-5</sup>, 成人2.32×10<sup>-5</sup>), 且冬季和春季总致癌风险值均在10<sup>-6</sup>~10<sup>-4</sup>范围内, 说明冬春两季致癌风险均处在人体可接受范围内; 冬春两季成人所受总致癌风险均高于儿童, 均可达儿童的2.1倍; Ni对儿童和成人的CR值以及Cd对儿童的CR值均小于预防标准(10<sup>-6</sup>), 而Cr(VI)和As对儿童和成人的CR值以及Cd对成人的CR值均在10<sup>-6</sup>~10<sup>-4</sup>范围内, 存在潜在的致癌风险, 其中As造成的潜在致癌风险最大(冬季: 儿童8.09×10<sup>-6</sup>, 成人1.71×10<sup>-5</sup>; 春季: 儿童6.58×10<sup>-6</sup>, 成人1.39×10<sup>-5</sup>), 大气中As主要来自燃煤, 有效管控燃煤排放可降低As对人体的健康危害.

此外, 表3还列出了冬季和春季的非致癌风险计算结果. 冬季总非致癌风险(儿童10.20, 成人4.30)均大于春季(儿童4.49, 成人1.90), 约为春季的2.3倍, 且冬春两季总非致癌风险均大于1, 存在明显的非致癌风险; 冬春两季儿童所受总非致癌风险均高于成人, 均约为成人的2.4倍; 元素中Mn的HQ值(冬季: 儿童10.10, 成人4.28; 春季: 儿童4.46, 成人1.88)大于1, 存在明显的非致癌风险, Mn主要来自工业排放, 重污染天限工限产可有效降低Mn对人体的健康危害, 其余元素HQ值均小于1, 不存在非致癌风险.

表3 冬季和春季PM<sub>2.5</sub>中重金属的致癌和非致癌风险<sup>1)</sup>  
Table 3 Carcinogenic and non-carcinogenic risks of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> in winter and spring

| 项目     | 冬季致癌风险                |                       | 冬季非致癌风险               |                       | 春季致癌风险                |                       | 春季非致癌风险               |                       |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|        | 儿童                    | 成人                    | 儿童                    | 成人                    | 儿童                    | 成人                    | 儿童                    | 成人                    |
| Pb     | —                     | —                     | 7.34×10 <sup>-3</sup> | 3.10×10 <sup>-3</sup> | —                     | —                     | 3.69×10 <sup>-3</sup> | 1.56×10 <sup>-3</sup> |
| Cr(VI) | 4.81×10 <sup>-6</sup> | 1.02×10 <sup>-5</sup> | 2.33×10 <sup>-2</sup> | 9.86×10 <sup>-3</sup> | 3.43×10 <sup>-6</sup> | 7.25×10 <sup>-6</sup> | 1.67×10 <sup>-2</sup> | 7.04×10 <sup>-3</sup> |
| Cd     | 9.63×10 <sup>-7</sup> | 2.03×10 <sup>-6</sup> | 1.78×10 <sup>-3</sup> | 7.54×10 <sup>-4</sup> | 8.37×10 <sup>-7</sup> | 1.77×10 <sup>-6</sup> | 1.55×10 <sup>-3</sup> | 6.55×10 <sup>-4</sup> |
| Zn     | —                     | —                     | 2.37×10 <sup>-4</sup> | 1.00×10 <sup>-4</sup> | —                     | —                     | 1.27×10 <sup>-4</sup> | 5.36×10 <sup>-5</sup> |
| Cu     | —                     | —                     | 2.85×10 <sup>-4</sup> | 1.21×10 <sup>-4</sup> | —                     | —                     | 1.27×10 <sup>-4</sup> | 5.37×10 <sup>-5</sup> |
| Ni     | 1.16×10 <sup>-7</sup> | 2.44×10 <sup>-7</sup> | 8.03×10 <sup>-5</sup> | 3.39×10 <sup>-5</sup> | 1.15×10 <sup>-7</sup> | 2.44×10 <sup>-7</sup> | 8.01×10 <sup>-5</sup> | 3.38×10 <sup>-5</sup> |
| Mn     | —                     | —                     | 1.01×10 <sup>1</sup>  | 4.28×10 <sup>0</sup>  | —                     | —                     | 4.46×10 <sup>0</sup>  | 1.88×10 <sup>0</sup>  |
| V      | —                     | —                     | 1.03×10 <sup>-4</sup> | 4.33×10 <sup>-5</sup> | —                     | —                     | 1.56×10 <sup>-4</sup> | 6.61×10 <sup>-5</sup> |
| As     | 8.09×10 <sup>-6</sup> | 1.71×10 <sup>-5</sup> | 2.08×10 <sup>-2</sup> | 8.81×10 <sup>-3</sup> | 6.58×10 <sup>-6</sup> | 1.39×10 <sup>-5</sup> | 1.69×10 <sup>-2</sup> | 7.16×10 <sup>-3</sup> |
| 总和     | 1.40×10 <sup>-5</sup> | 2.95×10 <sup>-5</sup> | 1.02×10 <sup>1</sup>  | 4.30×10 <sup>0</sup>  | 1.10×10 <sup>-5</sup> | 2.32×10 <sup>-5</sup> | 4.49×10 <sup>0</sup>  | 1.90×10 <sup>0</sup>  |

1) “—”为缺失值

2.3.2 健康风险溯源

本研究通过后向轨迹方法和浓度权重轨迹分析法分别对郑州气团轨迹聚类 and 元素健康风险潜在源区进行分析. 从图5和表4可看出, 冬季郑州市气团主要受5条轨迹贡献, 轨迹1和3为西北轨迹, 传输距离较远, 由新疆经由内蒙、宁夏、陕西和山西

等地; 轨迹2为西北中距离传输, 由陕西北部经由山西南部 and 河南西北部进入郑州; 轨迹4为北偏西远距离传输, 途经内蒙和山西等地; 轨迹5为东向短距离传输, 由安徽北部经由河南东部. 轨迹1、2、3和5带来的污染物对成人均具有潜在致癌风险, 轨迹1至5带来的污染物对人群均具有明显的非致癌

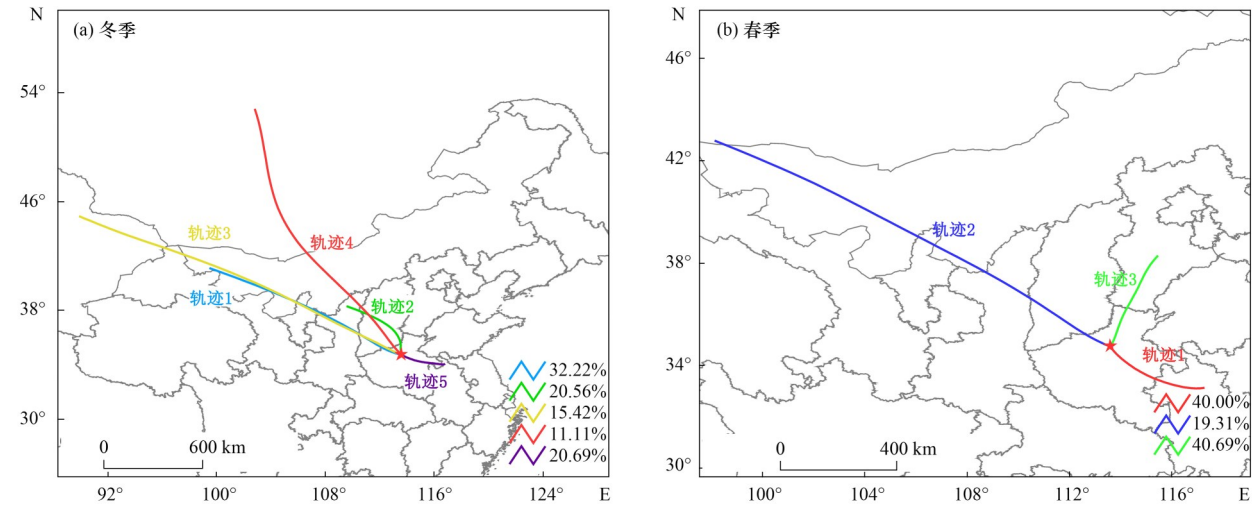


图5 气流后向轨迹聚类  
Fig. 5 Clustering of backward trajectory of airflow

表4 各轨迹相应致癌和非致癌风险  
Table 4 Carcinogenic and non-carcinogenic risks associated with trajectory

| 健康风险类型    | 冬季                   |                      |                      |                      |                      | 春季                   |                      |                      |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|           | 轨迹 1                 | 轨迹 2                 | 轨迹 3                 | 轨迹 4                 | 轨迹 5                 | 轨迹 1                 | 轨迹 2                 | 轨迹 3                 |
| 致癌风险(成人)  | $1.8 \times 10^{-6}$ | $2.0 \times 10^{-6}$ | $1.3 \times 10^{-6}$ | $9.3 \times 10^{-7}$ | $1.7 \times 10^{-6}$ | $1.2 \times 10^{-6}$ | $1.2 \times 10^{-6}$ | $1.1 \times 10^{-6}$ |
| 致癌风险(儿童)  | $8.3 \times 10^{-7}$ | $9.5 \times 10^{-7}$ | $6.1 \times 10^{-7}$ | $4.4 \times 10^{-7}$ | $8.2 \times 10^{-7}$ | $5.7 \times 10^{-7}$ | $5.7 \times 10^{-7}$ | $5.0 \times 10^{-7}$ |
| 非致癌风险(成人) | $5.2 \times 10^0$    | $4.3 \times 10^0$    | $5.2 \times 10^0$    | $2.9 \times 10^0$    | $2.3 \times 10^0$    | $1.8 \times 10^0$    | $2.4 \times 10^0$    | $9.9 \times 10^{-1}$ |
| 非致癌风险(儿童) | $1.2 \times 10^1$    | $1.0 \times 10^1$    | $1.2 \times 10^1$    | $6.9 \times 10^0$    | $5.5 \times 10^0$    | $4.4 \times 10^0$    | $5.6 \times 10^0$    | $2.3 \times 10^0$    |

风险，其中轨迹2对人群的致癌风险贡献最高，轨迹1对人群的非致癌风险贡献最高，说明郑州冬季致癌风险主要受周边地区局部传输影响，非致癌风险主要受西北远距离传输影响。

春季气团主要受3条轨迹贡献，轨迹1为东南中距离传输，由安徽东北部经由安徽西北部和河南中部地区；轨迹3为东北中距离传输，由河北南部经由河南北部；轨迹2为西北远距离传输，由内蒙经由宁夏、陕西和山西。轨迹1、2和3带来的污染物对成人具有潜在致癌风险，轨迹1和2携带污染物对人群均具有明显的非致癌风险，其中轨迹2对人群贡献的致癌风险和非致癌风险均最高，说明春季健康风险主要受西北远距离传输贡献。

由图6可知，冬季对成人和儿童致癌风险贡献最大的地区是郑州及河南西部地区、山东西南部和山西中部等地，贡献值均在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 范围内，具有潜在致癌风险。对成人非致癌风险贡献最大的地区是郑州及河南西部地区、山西中部和新疆东南部等地，对儿童非致癌风险贡献最大的地区是河南西部地区、陕西东南部、陕西北部和新疆东南部等地，贡献值均大于10，具有明显的非致癌风险。春季对成人和儿童致癌风险最高的地区是河南西部地区，贡献值均在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 范围内，具有潜在致癌

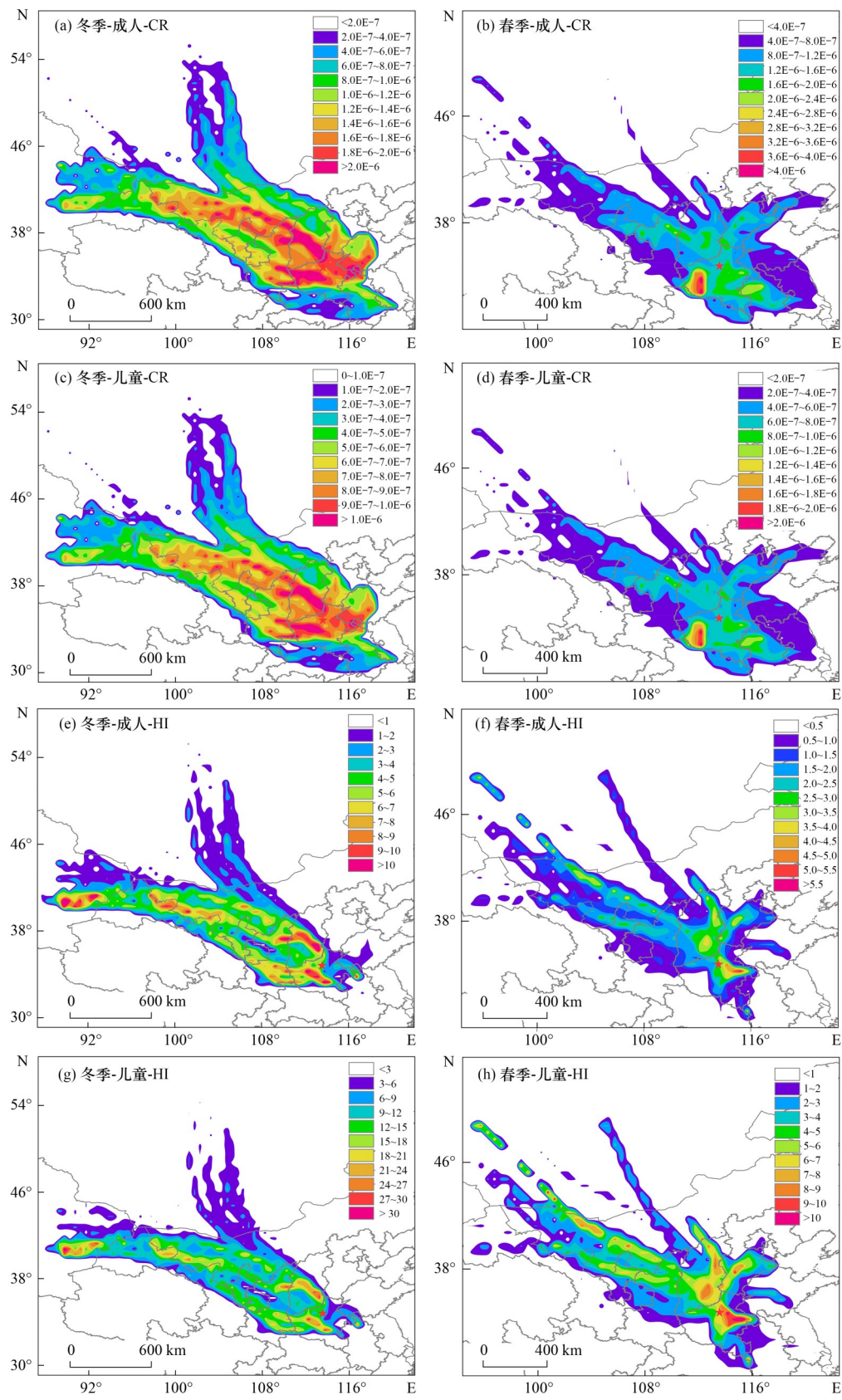
风险。对成人和儿童非致癌风险贡献最大的地区是河南东部地区，贡献值均大于1，具有明显的非致癌风险。综上说明郑州健康风险主要受到本地及周边城市贡献，与翟诗婷等<sup>[36]</sup>的研究发现相一致，其中冬季存在更严重的健康风险，贡献高值地区分布范围较广，贡献最高的地区主要为郑州及周边城市，以及西北方向的山西中部和新疆东南部等地；春季健康风险较冬季明显降低，贡献高值地区分布范围明显缩小，贡献最高的地区主要为郑州及周边城市。

3 结论

(1)郑州市冬季元素浓度低于春季，Fe、Ca、Si和Al分别占冬季和春季总元素浓度的89.8%和87.5%。Cd属于重度富集，受人为污染影响严重。冬季Pb、Se、Zn、Ni、Sb和K以及春季Cr、Ni、Fe、Mn、V、Ba、Ca、K、Si和Al浓度随污染等级的提高而增加。

(2)PMF源解析结果显示，郑州冬季和春季PM<sub>2.5</sub>中金属元素主要来源有：工业源、地壳源、机动车源和混合燃烧源；由特征雷达图源解析结果得工业源和混合燃烧源主导的污染主要发生在冬季，地壳源主导的污染主要发生在春季。

(3)冬春两季均存在明显的非致癌风险，其中



冬季健康风险更严重, Mn对人群存在明显的非致癌风险. 冬季健康风险主要受郑州及周边地区局部传

输和西北方向远距离输送影响, 春季健康风险主要受郑州及周边地区影响.

## 参考文献:

- [1] Qi M, Zhu X, Du W, *et al.* Exposure and health impact evaluation based on simultaneous measurement of indoor and ambient PM<sub>2.5</sub> in Haidian, Beijing [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 704-712.
- [2] Song S K, Shon Z H, Park Y H. Diurnal and seasonal characteristics of the optical properties and direct radiative forcing of different aerosol components in Seoul megacity[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 400-412.
- [3] Zhang H Y, Cheng S Y, Li J B, *et al.* Investigating the aerosol mass and chemical components characteristics and feedback effects on the meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **244**: 495-502.
- [4] Choi D Y, Jung S H, Song D K, *et al.* Al-coated conductive fibrous filter with low pressure drop for efficient electrostatic capture of ultrafine particulate pollutants [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, **9**(19): 16495-16504.
- [5] Li L L, Tan Q W, Zhang Y H, *et al.* Characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> during persistent extreme haze events in Chengdu, southwest China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **230**: 718-729.
- [6] Zhong J T, Zhang X Y, Wang Y Q, *et al.* The two-way feedback mechanism between unfavorable meteorological conditions and cumulative aerosol pollution in various haze regions of China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(5): 3287-3306.
- [7] Cheng M T, Tang G Q, Lv B, *et al.* Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> and visibility in Jinan, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **102**: 207-215.
- [8] 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 等. 扬州市 PM<sub>2.5</sub> 中重金属来源及潜在健康风险评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 540-547.
- [8] Dong S H, Xie Y, HUANGFU Y Q, *et al.* Source apportionment and health risk quantification of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> in Yangzhou, China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 540-547.
- [9] 白斐宇, 徐勃, 郭丽瑶, 等. 淄博市冬季 PM<sub>2.5</sub> 载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2336-2342.
- [9] Bai W Y, Xu B, Guo L Y, *et al.* Characteristics, ecological risk assessment, and sources of the polluted metallic elements in PM<sub>2.5</sub> during winter in Zibo City[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2336-2342.
- [10] Goudarzi G, Alavi N, Geravandi S, *et al.* Health risk assessment on human exposed to heavy metals in the ambient air PM<sub>10</sub> in Ahvaz, southwest Iran[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2018, **62**(6): 1075-1083.
- [11] Yu W Y, Liu S Y, Jiang J F, *et al.* Burden of ischemic heart disease and stroke attributable to exposure to atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Hubei Province, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **221**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117079.
- [12] Saini P, Sharma M. Cause and age-specific premature mortality attributable to PM<sub>2.5</sub> exposure: an analysis for million-plus Indian cities[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **710**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135230.
- [13] Najmeddin A, Keshavarzi B, Moore F, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of potentially toxic elements in road dust from urban industrial areas of Ahvaz megacity, Iran [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, **40**(4): 1187-1208.
- [14] 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 等. 郑州市大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1706-1715.
- [15] 崔阳, 郭利利, 李宏艳, 等. 基于在线观测的太原市冬季 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素污染水平及来源解析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2441-2449.
- [15] Cui Y, Guo L L, Li H Y, *et al.* On-line measurement of trace elements in PM<sub>2.5</sub> in winter in urban Taiyuan, China: levels and source apportionment [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2441-2449.
- [16] Hu B F, Xue J, Zhou Y, *et al.* Modelling bioaccumulation of heavy metals in soil-crop ecosystems and identifying its controlling factors using machine learning [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114308.
- [17] Zhang Y, Feng J F, Gao Y F, *et al.* Physiologically based toxicokinetic and toxicodynamic (PBTK-TD) modelling of Cd and Pb exposure in adult zebrafish *Danio rerio*: accumulation and toxicity [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **249**: 959-968.
- [18] 李倩, 周志俊, 张玉彬. 铅对机体免疫系统的毒作用及其机制的研究进展[J]. *环境与职业医学*, 2016, **33**(5): 523-527.
- [18] Li Q, Zhou Z J, Zhang Y B. Research advances on toxic effects and mechanism of lead on immune system [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2016, **33**(5): 523-527.
- [19] Ma Z Z, Duan L, Jiang J K, *et al.* Characteristics and threats of particulate matter from zinc electrolysis manufacturing facilities [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **259**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120874.
- [20] 安玉琴, 王磊, 金红, 等. 保定市 2014-2018 年采暖季 PM<sub>2.5</sub> 中金属与类金属元素的健康风险评估[J]. *环境与职业医学*, 2020, **37**(11): 1083-1088.
- [20] An Y Q, Wang L, Jin H, *et al.* Health risk assessment of metals and metalloids in PM<sub>2.5</sub> during heating season from 2014 to 2018 in Baoding [J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2020, **37**(11): 1083-1088.
- [21] Kumari S, Jain M K, Elumalai S P. Assessment of pollution and health risks of heavy metals in particulate matter and road dust along the road network of Dhanbad, India [J]. *Journal of Health & Pollution*, 2021, **11**(29), doi: 10.5696/2156-9614-11.29.210305.
- [22] Choi S H, Choi S W, Kim D Y, *et al.* Evaluation of health risk from concentrations of heavy metal in PM-10 and PM-2.5 particles at Sasang industrial complex of Busan, Korea [J]. *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 2021, **24**(3): 133-148.
- [23] 郑灿利, 范雪璐, 董娴, 等. 贵阳市秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征、来源解析及健康风险评估[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(6): 1376-1383.
- [23] Zheng C L, Fan X L, Dong X, *et al.* Characteristics, sources and health risk assessment of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> collected between autumn and winter in Guiyang City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(6): 1376-1383.
- [24] 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 等. 珠海市郊区大气 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属健康风险评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1553-1561.
- [24] Yang Y H, Jia Y, Bian G J, *et al.* Elemental characteristics and health risk assessment of heavy metals in atmospheric PM<sub>2.5</sub> in a suburb of Zhuhai City [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1553-1561.

- [25] Tian Y Z, Xiao Z M, Wang H T, *et al.* Influence of the sampling period and time resolution on the PM source apportionment: study based on the high time-resolution data and long-term daily data[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **165**: 301-309.
- [26] 姚森, 王乾恒, 薛妍, 等. 郑州市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 金属元素来源及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2329-2335.
- Yao S, Wang Q H, Xue Y, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of metal elements in ambient PM<sub>2.5</sub> in the winter of Zhengzhou[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2329-2335.
- [27] 闫广轩, 张朴真, 王晨, 等. 郑州市采暖期与非采暖期 PM<sub>2.5</sub> 中重金属来源及潜在健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(8): 2811-2820.
- Yan G X, Zhang P Z, Wang C, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of heavy metals of PM<sub>2.5</sub> in heating and non-heating period in Zhengzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(8): 2811-2820.
- [28] 闫广轩, 张朴真, 黄海燕, 等. 郑州-新乡冬季 PM<sub>2.5</sub> 中元素浓度特征及其源分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2027-2035.
- Yan G X, Zhang P Z, Huang H Y, *et al.* Concentration characteristics and source analysis of PM<sub>2.5</sub> during wintertime in Zhengzhou-Xinxiang[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2027-2035.
- [29] Gao J, Peng X, Chen G, *et al.* Insights into the chemical characterization and sources of PM<sub>2.5</sub> in Beijing at a 1-h time resolution [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 162-171.
- [30] Liu B S, Wu J H, Zhang J Y, *et al.* Characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> based on error estimation from EPA PMF 5.0 model at a medium city in China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **222**: 10-22.
- [31] Hao Y F, Meng X P, Yu X P, *et al.* Characteristics of trace elements in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> of Chifeng, Northeast China: insights into spatiotemporal variations and sources [J]. *Atmospheric Research*, 2018, **213**: 550-561.
- [32] 缪青, 杨倩, 吴也正, 等. COVID-19 管控期间苏州市 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素浓度变化及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 2851-2857.
- Miao Q, Yang Q, Wu Y Z, *et al.* Concentration variation and source analysis of metal elements in PM<sub>2.5</sub> during COVID-19 control in Suzhou [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 2851-2857.
- [33] Zong Z, Wang X P, Tian C G, *et al.* Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> at a regional background site in North China using PMF linked with radiocarbon analysis: insight into the contribution of biomass burning[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(17): 11249-11265.
- [34] 张咪, 段青春, 殷丽娜, 等. 北京市 2018 年春季一次沙尘回流过程的污染特征[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(11): 4990-4998.
- Zhang M, Duan J C, Yin L N, *et al.* Pollution characteristics of a dust backflow process in Beijing in the spring of 2018[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(11): 4990-4998.
- [35] 段青春, 胡京南, 谭吉华, 等. 特征雷达图的设计及其在大气污染成因分析中的应用[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(8): 1329-1336.
- Duan J C, Hu J N, Tan J H, *et al.* Design of characteristic radar chart and its application in air pollution analysis [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(8): 1329-1336.
- [36] 翟诗婷, 王申博, 张栋, 等. 郑州市典型污染过程 PM<sub>1</sub> 中重金属浓度、来源及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1180-1189.
- Zhai S T, Wang S B, Zhang D, *et al.* Concentration, source, and health risk assessment of PM<sub>1</sub> heavy metals in typical pollution processes in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1180-1189.
- [37] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [38] 郑州市人民政府. 郑州市人民政府关于印发郑州市重污染天气应急预案(2018 年修订)的通知[EB/OL]. <http://public.zhengzhou.gov.cn/10EBT/217654.jhtml>, 2018-10-23.
- [39] Pan Y P, Wang Y S, Sun Y, *et al.* Size-resolved aerosol trace elements at a rural mountainous site in Northern China: importance of regional transport [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **461-462**: 761-771.
- [40] Duan J C, Tan J H. Atmospheric heavy metals and Arsenic in China: situation, sources and control policies [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **74**: 93-101.
- [41] Fabretti J F, Sauret N, Gal J F, *et al.* Elemental characterization and source identification of PM<sub>2.5</sub> using positive matrix factorization: the Malraux Road tunnel, Nice, France [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(2): 320-329.
- [42] Li Q, Cheng H G, Zhou T, *et al.* The estimated atmospheric lead emissions in China, 1990-2009 [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **60**: 1-8.
- [43] 杨婧, 郭晓爽, 滕曼, 等. 我国大气细颗粒物中金属污染特征及来源解析研究进展[J]. *环境化学*, 2014, **33**(9): 1514-1521.
- Yang J, Guo X S, Teng M, *et al.* A review of atmospheric fine particulate matter associated trace metal pollutants in China [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(9): 1514-1521.
- [44] 陈江, 费勇, 马鑫雨, 等. 燃煤与垃圾焚烧飞灰中细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 的重金属元素风险评价[J]. *中国粉体技术*, 2016, **22**(2): 104-107.
- Chen J, Fei Y, Ma X Y, *et al.* Risk assessment on heavy metal elements of fine particulate matter PM<sub>2.5</sub> in fly ash origin from coal and waste incineration [J]. *China Powder Science and Technology*, 2016, **22**(2): 104-107.
- [45] Duan F K, Liu X D, Yu T, *et al.* Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(9): 1275-1282.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                       |                                                                |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|
| Spatial Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition                       | YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>                    | (2487) |
| Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest                                                                                                    | ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>             | (2497) |
| Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model                                                                                           | YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>           | (2507) |
| Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model                                                                     | FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>      | (2516) |
| Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020          | GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>                        | (2525) |
| Water-soluble Inorganic Ion Content of PM <sub>2.5</sub> and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022                                              | CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>              | (2537) |
| Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> Between Winter and Spring in Zhengzhou                           | TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>                | (2548) |
| Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City                 | SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>                  | (2558) |
| Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution               | LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>             | (2571) |
| Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin                                    | LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>            | (2581) |
| Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect | XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>                  | (2596) |
| Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China                                                       | WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>             | (2613) |
| Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang                       | ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>        | (2622) |
| Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis                                                                                 | WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>            | (2631) |
| Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season                                    | MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>               | (2640) |
| Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing                                                        | HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>              | (2651) |
| Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)                           | LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>                     | (2665) |
| Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)                                                        | WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>          | (2678) |
| Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River                                     | WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>            | (2686) |
| Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets                                     | JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>          | (2694) |
| Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water                                      | HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>                | (2707) |
| Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir   | MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>                   | (2715) |
| Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals                                                             | MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>      | (2727) |
| Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System                                                  | ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>              | (2741) |
| Source Apportionment of Morphine in Wastewater                                                                                                                        | SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>        | (2748) |
| Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing                                                                                 | LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>            | (2757) |
| Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin                                                                 | WANG Yi-qi, SUN Xue-ying                                       | (2767) |
| Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin                        | CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>              | (2780) |
| Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau                                               | LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>                     | (2793) |
| Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021                                                  | ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>               | (2806) |
| Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios                                                                   | CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>                 | (2817) |
| Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration                      | WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>            | (2828) |
| Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China                                             | JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>                  | (2840) |
| Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses                                                                    | HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>          | (2848) |
| Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm                                    | HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>          | (2859) |
| Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields                                               | SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>                | (2871) |
| Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity                                                                                    | ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i> | (2881) |
| Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System                                            | GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>             | (2891) |
| Effect of Biochar on NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation                                                                    | BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>                 | (2905) |
| Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis                                                                           | YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>                | (2913) |
| Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust                                                                                           | WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>      | (2926) |
| Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site                                                                    | CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>         | (2939) |
| Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong                                                 | DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>                 | (2952) |
| Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin                                                                                | HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>         | (2962) |
| Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City                            | YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping                           | (2971) |
| Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models                                       | CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>          | (2983) |
| Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China | TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>               | (2995) |
| Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province                                                                        | WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>          | (3005) |
| Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China                                                   | LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>          | (3016) |
| Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice                                                             | XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>       | (3027) |
| Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper                                               | ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>     | (3037) |
| Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis                                                                                       | JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>             | (3047) |
| Advances in the Effects of Microplastics on Soil N <sub>2</sub> O Emissions and Nitrogen Transformation                                                               | LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>             | (3059) |
| Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin                                                      | DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>                  | (3069) |
| Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay                                                                                   | SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>         | (3078) |
| Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils                                                                                       | WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>              | (3088) |
| Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China                                        | YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>              | (3098) |
| Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang                                                    | XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>               | (3107) |
| Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck                                                                  | XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>   | (3119) |