

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芸, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析

邓文博, 刘文娟*

(山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

摘要:为解析太原市冬季街道尘土中潜在有害元素(PHEs)的关键污染源,采集了40个街道尘土样本,使用电感耦合等离子体质谱和原子荧光光谱仪测定了尘土中As、Cd、Pb、Ni、Cr、Cu和Zn这7种元素的含量.使用内梅罗综合危害指数法(NIRI)、美国环境保护署推荐的健康风险评估模型分别评价了尘土中PHEs造成的生态和居民健康风险;使用正定矩阵因子分解模型结合主成分分析法分析了尘土中PHEs的来源,并基于此计算了不同来源对尘土PHEs的总含量和PHEs造成风险的贡献程度;使用多属性决策方法(MADM)识别了街道尘土中PHEs的关键来源.结果表明:①太原市冬季尘土中 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的平均值分别为17.92、0.32、69.10、30.06、107.74、73.37和268.49 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均超过了太原市土壤中相应元素的背景值,说明尘土中PHEs已经出现富集现象,尘土中PHEs的NIRI平均值为63.86,属于中度风险,处在可控状态;②尘土中PHEs造成的致癌和非致癌风险均低于阈值,表明其并未对太原市居民造成严重的健康风险,手口摄入是PHEs造成健康风险最重要的暴露途径,As和Cr是PHEs造成健康风险的主要元素;③街道尘土中PHEs的主要来源是自然来源、交通来源和工业排放,3个来源对街道尘土中总PHEs的贡献率依次为35.95%、40.25%和23.82%;④尽管工业来源对尘土中PHEs总含量的贡献率最小,但是工业来源排放的PHEs造成的危害较大,MADM的计算结果表明工业来源是太原市冬季街道尘土中PHEs的关键来源.结果表明PHEs关键来源的识别能够准确找出污染毒害最大的来源,为后续污染治理提供重要依据.

关键词:潜在有害元素;多属性决策方法(MADM);来源解析;街道尘土;太原市

中图分类号:X513 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2023)01-0038-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204141

Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method

DENG Wen-bo, LIU Wen-juan*

(Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to analyze the critical sources of potential harmful elements (PHEs) in road dust from Taiyuan during winter, 40 road dust samples were collected. The contents of PHEs, including As, Cd, Pb, Ni, Cr, Cu, and Zn, in the road dust samples were measured using inductively coupled plasma mass spectrometry and atomic fluorescence spectrometry. The ecological risks and human health risks posed by dust PHEs were assessed using NIRI and a health risk evaluation model recommended by USEPA, respectively. The sources of dust PHEs were identified by using the combination of principal component analysis and positive matrix factorization (PMF); the total PHE contents and the ecological risks and human health risks posed by PHEs in dust were apportioned to the PHE sources based on the PMF results; subsequently, the critical source of dust PHEs was determined using the multiple attribute decision making method (MADM). The results demonstrated that: ① the average concentrations of As, Cd, Pb, Ni, Cr, Cu, and Zn were 17.92, 0.32, 69.10, 30.06, 107.74, 73.37, and 268.49 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, which were higher than the corresponding background values of soil in Taiyuan, indicating that the PHEs had accumulated in road dust; the mean value of NIRI was 63.86, demonstrating that PHEs in dust posed moderate risks, and the dust PHEs pollution was controllable. ② Human health risk assessment indicated that exposure to PHEs in dust did not pose serious non-carcinogenic or carcinogenic risks. Ingestion was the most important pathway for exposure to PHEs in road dust that damages human health, and As and Cr have been found to pose the most risks among the seven PHEs. ③ The present study found three main sources of PHEs measured in the dust: natural, traffic, and industrial, which accounted for 35.95%, 40.25%, and 23.82% of the total concentrations of PHEs, respectively. ④ Industrial emissions contributed the least to the total PHEs contents in dust; however, the PHEs released from industrial sources caused relatively high risks, with the results of MADM indicating that industrial sources were the most critical source for dust PHEs. Our results indicated that the critical source identification of PHEs, which was determined to be the most pernicious source, could provide reference for subsequent pollution source control.

Key words: potential harmful elements; multiple attribute decision making method (MADM); source analysis; road dust; Taiyuan City

目前,全球超过一半的人口居住在城市中,人类活动排放的大量污染物对城市环境质量造成了负面影响,阻碍了城市生态系统的可持续发展^[1]. As、Pb和Cd等潜在有害元素(potential harmful elements, PHEs)进入环境很难被降解,PHEs通过不同途径进入人体并在人体内不断富集,引起急性或慢性疾病,甚至威胁到人类的生命^[2]. 街道尘土是指经自然搬

运,干湿沉降积聚于城市地表的颗粒物,它是城市环

收稿日期:2022-04-12;修订日期:2022-04-29

基金项目:国家自然科学基金项目(41907277);山西省自然科学基金项目(20210302123459);山西省高等学校科技创新项目(2019L0038,2019L0071);山西省第十一批百人计划项目

作者简介:邓文博(1987~),男,博士研究生,副教授,主要研究方向为污染物在环境中的溯源和健康风险评估,E-mail: dengwb@sxu.edu.cn

* 通信作者,E-mail: liuwenjuan@sxu.edu.cn

境系统的重要组成部分,也是城市环境质量的重要指示器^[3]. 由于具有大的比表面积,街道尘土极易吸附 PHEs,是城市中 PHEs 的重要载体^[4]. 此外,街道尘土吸附的 PHEs 可以频繁的在不同环境介质中迁移,如街道尘土中的 PHEs 随着尘土的再悬浮可以进入大气环境,或通过降水后的径流进入水体,最终影响城市环境质量并危害人体健康^[5]. 因此,对城市街道尘土中 PHEs 污染的研究可以为后续制定城市整体环境治理方案提供重要的理论依据和数据支撑.

国内外已对城市街道尘土中 PHEs 的来源和危害进行了许多研究^[3,6~8]. 有研究表明,城市街道尘土中 PHEs 的含量普遍高于当地土壤^[3,6,7],此外街道尘土中 PHEs 的来源较为复杂,如 Men 等^[8]发现北京市街道尘土中 PHEs 除来自工业和交通排放以外,建筑脱落物和城市绿化带所用杀虫剂和化肥都是尘土中 PHEs 的重要来源. 不同来源对 PHEs 含量的贡献率不同,这些来源排放的 PHEs 对生态环境以及人体健康造成的风险也是不同的^[9]. 目前的研究往往只关注来源对 PHEs 含量的贡献,而忽视不同来源释放的 PHEs 造成的危害,同时缺乏有效手段识别尘土中 PHEs 的关键来源,使后续的污染物防控事倍功半^[10]. 多属性决策方法 (multiple attribute decision making, MADM) 可以计算出不同因子的权重,并从所有选项 (污染来源) 中选出影响力最大的选项 (关键污染来源)^[11]. 目前 MADM 已经广泛使用在计算机科学^[12]和激光物理学^[13]等不同领域,使用 MADM 识别城市街道尘土中 PHEs 的关键来源可以有效提高污染管控的效率.

太原市作为中国北方重要的能源化工基地,长期被认为是全国环境污染最严重的城市之一^[14],特别是在冬季极易出现灰霾天气,携带大量 PHEs 的颗粒物随着干湿沉降到达地面形成尘土,危害城市居民健康^[15]. 目前,对太原市冬季街道尘土中 PHEs 的研究未见报道. 本研究对太原市冬季街道尘土中 7 种 PHEs (As、Cd、Pb、Ni、Cr、Cu 和 Zn) 的污染程度、危害和来源进行了分析,并使用 MADM 识别了尘土中 PHEs 的关键来源,旨在为太原市环境质量改善提供理论依据,同时本研究所用方法可为相关研究提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

太原市坐落于山西中部 (北纬 $37^{\circ}27' \sim 38^{\circ}25'$, 东经 $111^{\circ}30' \sim 113^{\circ}09'$), 总面积超过 $6\,900\text{ km}^2$, 全国第七次人口普查结果显示,太原市人口超过 530

万,其中 85% 的人口居住在城区^[16]. 太原市是全国重要的冶金和煤炭能源基地,大量的人口和特殊的工业结构使得污染对太原市区域环境造成很大压力,亟需重点关注^[17].

1.2 样品采集和实验处理

本研究以 1 km 为间隔沿着太原市市区中环路采集街道尘土样本,共采集 40 个样本 (图 1). 采集时间为 2020 年 12 月 31 日,所有样品在当天采集完成. 样品采集当天天气晴朗无风,样品采集前 14 d,太原市区未出现降水天气. 在每个采样点,使用塑料刷和簸箕在 $2 \sim 3\text{ m}^2$ 的区域内采集约 100 g 尘土样本,并准确记录采样点的土地利用类型,交通状况以及经纬度信息. 所有样本保存在密封的聚乙烯袋中带回实验室.

40 个尘土样本经 60°C 烘干 48 h. 使用石英杵和研钵研磨烘干后的样本,并过 200 目的尼龙筛. 尘土中 Cd、Pb、Cr、Ni、Cu 和 Zn 这 6 种 PHEs 的处理参照固体废弃物金属元素的测定国家标准 (HJ-766 2015) 进行^[18],使用电感耦合等离子体质谱仪 (NexION-2000, 美国) 测定 6 种 PHEs 的含量. 样本中 As 的处理参照土壤质量总汞、总砷和总铅的测定国家标准 (GB/T 22105. 2-2008) 进行^[19],使用原子荧光光谱仪 (AFS8520, 中国) 测定 As 的含量. 实验过程中每 10 个样本设置 1 个复制样本,同时采用标准物质 (GSS-28) 进行质量控制,结果显示标准物质元素回收率介于 $88\% \sim 112\%$,复制样本相对标准偏差 $< 5\%$. 本次实验 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的检出限分别为 0.01、0.03、0.4、0.6、0.3、2 和 $2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

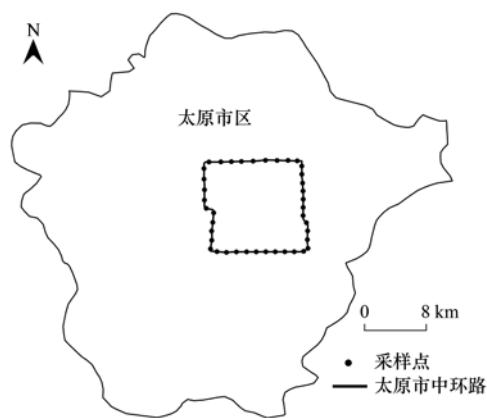


图 1 研究区域和采样点示意

Fig. 1 Study region and sampling locations

1.3 人体健康风险评估

本研究使用美国环境保护署 (USEPA) 推荐的方法评估尘土中 PHEs 对太原市居民造成的健康风险. 街道尘土中的 PHEs 可通过摄入 (手口)、皮肤

接触和呼吸吸入这 3 种暴露途径进入人体引发健康风险^[20]. 对于非致癌风险, 摄入、皮肤接触和呼吸的日均暴露量 (average daily dose, ADD) 分别用以下公式计算^[21]:

$$ADD_{ing} = \left(\frac{C \times IR_s \times EF \times ED}{BW \times AT} \right) \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$ADD_{skin} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

$$ADD_{inh} = \frac{C \times IR_i \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (3)$$

式中, C 为 PHEs 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), IR_s 和 IR_i 分别为尘土摄入量 ($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$) 和尘土颗粒吸入率 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); EF 和 ED 分别为暴露频率 ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$) 和暴露年限 (a); BW 和 AT 分别为受体体重 (kg) 和平均作用时间 (d); SA 、 AF 和 ABS 分别为可能接触尘土的皮肤面积 (cm^2)、皮肤对尘土的吸附系数 [$\text{kg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 和皮肤吸附系数; PEF 为尘土颗粒分散系数 ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$).

对于致癌风险, 需要将人体在儿童期和成人期的总暴露量分摊到全部生命周期中. 人体终生日均暴露量 (life average daily dose, LADD) 计算公式如下^[21]:

$$LADD = \frac{C \times EF}{AT} \times \left(\frac{AR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{AR_{adult} \times EF_{adult}}{BW_{adult}} \right) \quad (4)$$

式中, AR 为摄入、皮肤接触或吸入强度, 对于摄入和呼吸途径, 分别表示为 $AR = IR_s$ 和 $AR = IR_i$, 对于皮肤接触, $AR = SA \times AF \times ABS$.

非致癌风险 (hazard quotient, HQ) 是用人体对 PHEs 的暴露量与参考剂量 (reference dose, RfD) 的比值确定的, 即 $HQ = ADD/RfD$. 多种 PHEs 多途径造成的总的人体非致癌风险 (total hazard index, THI) 表示为:

$$THI = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m HQ_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{ADD}{RfD} \right)_{ij} \quad (5)$$

式中, m 和 n 分别为暴露途径和污染物种类, i 和 j 分别为 i 种 PHEs 和 j 种暴露途径.

致癌风险 (carcinogenic risk, CR) 是用 PHEs 的终生日均暴露量与致癌斜率因子 (slope factor, SF) 的乘积确定的, 即 $CR = LADD \times SF$. 多种 PHEs 多途径造成的总的人体致癌风险 (total cancer risk, TCR) 表示为:

$$TCR = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m CR_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (LADD \times SF)_{ij} \quad (6)$$

式中, m 、 n 、 i 和 j 的含义和式 (5) 相同.

当 HQ 和 $THI < 1$ 时, 认为污染物造成的非致癌风险可以忽略不计, 当 HQ 和 $THI > 1$ 时, 则认为污染物对人体造成了非致癌风险, 必须引起重视^[21]. 当 $TCR < 10^{-4}$ 时, 认为污染物对人体造成的致癌风险在可以接受的程度^[22]. 本节公式 (1) ~ (6) 中各个参数的解释和数值见文献 [9, 23].

1.4 生态风险评估

内梅罗综合污染指数 (nemerow integrated pollution index, NIPI) 和潜在生态危害指数 (potential ecological risk index, RI) 是最常用的两种评估 PHEs 污染和生态危害的方法. NIPI 的计算公式如下^[24]:

$$P_i = \frac{C_i}{D_i} \quad (7)$$

$$NIPI = \sqrt{(P_{i\max}^2 + P_{i\text{ave}}^2)/2} \quad (8)$$

式中, C_i 和 D_i 分别为元素 i 的检测值和标准值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), P_i 为单个元素的污染指数. 本研究使用太原市土壤中元素背景值^[25]作为标准值. RI 的计算公式如下^[14]:

$$E_r^i = T_i \times C_i/D_i \quad (9)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (10)$$

式中, C_i 和 D_i 的含义与公式 (7) 相同, T_i 为元素的毒性响应系数, E_r^i 为元素 i 的潜在生态危害指数. 尽管 NIPI 和 RI 在环境科学研究中应用甚广, 可是二者都存在缺陷. 不同元素之间毒性响应系数可能差距数十倍, NIPI 忽视了这种差距, 造成结果无法反映元素造成实际危害^[26]. 尽管 RI 考虑到了毒性响应系数, 可是考察元素数量的多少会对 RI 的结果造成很大影响^[8]. 为了克服两种方法的缺陷, Men 等^[8]结合 NIPI 和 RI 创建了一种新的方法内梅罗综合危害指数法 (nemerow integrated risk index, NIRI), 该方法既考虑了毒性响应系数, 结果也不会随着考察的元素数量变化而波动. NIRI 的计算公式如下:

$$NIRI = \sqrt{(E_{r\max}^i)^2 + E_{r\text{ave}}^i^2}/2 \quad (11)$$

式中, $E_{r\max}^i$ 和 $E_{r\text{ave}}^i$ 分别为 E_r^i 的最大值和平均值. As、Cd、Pb、Ni、Cr、Cu 和 Zn 的毒性响应系数分别是 10、30、5、5、2、5 和 1^[27]. 本研究使用 NIPI 和 NIRI 两种方法评估 PHEs 的污染程度, NIPI 和 NIRI 的分级标准如表 1 所示.

1.5 PMF 和尘土 PHEs 造成风险的来源分配

本研究中使用 USEPA 推荐的正定矩阵因子分解模型 (positive matrix factorization, PMF) 对街道尘土中 PHEs 的来源进行解析. PMF 是一个基于最小迭代二乘法的多变量因素分析工具, 在环境污染源

表 1 NIPI 和 NIRI 的分级标准
Table 1 Classification of NIPI and NIRI

指数	分级	风险程度	文献
NIPI	NIPI ≤ 1	无污染	[24]
	1 < NIPI ≤ 2	轻度污染	
	2 < NIPI ≤ 3	中度污染	
	3 < NIPI	重度污染	
NIRI	NIRI ≤ 40	低风险	[8]
	40 < NIRI ≤ 80	中风险	
	80 < NIRI ≤ 160	较高风险	
	160 < NIRI ≤ 320	高风险	
	320 < NIRI	极端风险	

解析的研究中有广泛的应用^[28]. PMF 的公式如下^[29]:

$$\mathbf{x}_{ij} = \sum_{k=1}^p \mathbf{g}_{ik} \mathbf{f}_{kj} + \mathbf{e}_{ij} \quad (12)$$

式中, $\mathbf{x}$ 为样本的污染物含量数据, $\mathbf{g}$ 为来源贡献率矩阵, $\mathbf{f}$ 为来源成分矩阵, $\mathbf{e}$ 为残差矩阵. i, j 和 k 分别为第 i 个样本, 第 j 种污染物和第 k 种污染来源. PMF 分解原始含量矩阵, 得到最优的结果矩阵使得目标函数 Q 达到最低. Q 的定义为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{\mathbf{e}_{ij}}{\mathbf{u}_{ij}} \right] \quad (13)$$

式中, m 和 n 分别为 n 个样本和 m 种污染物, $\mathbf{u}$ 为不确定度, 计算方式如下:

当 $x_{ij} < \text{MDL}$: $\mathbf{u}_{ij} = (5/6) \times \text{MDL}$

当 $x_{ij} > \text{MDL}$: $\mathbf{u}_{ij} = \sqrt{(\delta \times x_{ij})^2 + \text{MDL}^2}$

式中, MDL 为检出限, δ 为相对标准偏差.

本研究基于 PMF 的结果, 计算了不同来源对尘土中 PHEs 的总含量, PHEs 造成的生态风险, 非致癌风险 (成人和儿童) 以及致癌风险 5 种因子的贡献率. PHEs 总含量和造成健康风险的来源分配方法可见文献 [9]. PHEs 生态风险的来源分配方法如下^[8]:

$$\text{RA}_{ij} = \sqrt{(\text{RA}_{ij \max}^2 + \text{RA}_{ij \text{ave}}^2)/2} \quad (14)$$

$$\text{RA}_{ij} = T_i \times \frac{C_{ij}}{D_i} \quad (15)$$

式中, i 和 j 分别为第 i 种元素和第 j 种来源, RA_{ij} 为第 j 种来源释放的 PHEs 造成的生态风险, C_{ij} 和 RA_{ij} 分别为第 j 种来源释放的元素 i 的含量和第 j 种来源释放的元素 i 造成的生态风险. C_{ij} 由 PMF 计算得出, D_i 的含义和公式 (7) 相同.

1.6 识别尘土中 PHEs 的关键来源

本研究中综合总 PHEs 含量、生态风险、非致癌风险 (成人和儿童) 和致癌风险 5 种因子选出尘土中 PHEs 的关键来源. MADM 法结合了信息熵法 (information entropy method, IEM) 和简单加权法

(simple additively weighted, SAW), 用于识别尘土中 PHEs 的关键来源^[30]. IEM 用于给多属性决策问题中的不同属性 (因子) 进行加权, 它的计算方法如下^[30]:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} A_1 [\alpha_{11} & \cdots & \alpha_{1f}] \\ \vdots & & \vdots \\ A_i [\alpha_{i1} & \cdots & \alpha_{if}] \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$P_{bc} = \frac{\alpha_{bc}}{\sum_{b=1}^i \alpha_{bc}} \quad (17)$$

$$B_c = -k \sum_{b=1}^i P_{bc} \ln(P_{bc}) \quad (18)$$

$$W_c = \frac{1 - B_c}{\sum_{c=1}^f (1 - B_c)} \quad (19)$$

式中, $\mathbf{N}$ 为不同来源的多因子决策矩阵, α_{ij} 为来源 i 释放的 PHEs 造成的因子 f 的值, 本研究中 $f=1$ 表示来源对尘土中总 PHEs 含量的贡献值, f 为 2、3、4 和 5 时分别代表来源对生态风险、成人的非致癌风险、儿童的非致癌风险和致癌风险的贡献值; P_{bc} 为来源 b 对于因子 c 的贡献率; k 为常数, $k = \ln(i)$, 其中 i 为尘土中 PHEs 的来源数量; B_c 为因子 c 的熵值; W_c 为最终各因子的权重值, $0 \leq W_c \leq 1$, 并且 5 个因子的 W_c 值相加等于 1.

根据 IEM 计算的各因子的权重值, 通过 SAW 计算得出最终不同来源的 Z_p 值:

$$Z_p = \sum_{c=1}^f P_{bc} \times W_c \quad (20)$$

通过比较不同来源的 Z_p 值识别尘土中 PHEs 的关键来源, 拥有最大 Z_p 值的来源为 PHEs 的关键来源.

2 结果与讨论

2.1 太原市街道尘土 PHEs 含量

太原市街道灰尘中 7 种 PHEs 含量全部超过太原市土壤中相应元素的背景值, 特别是 Cd、Pb 和 Cu 均超过各自土壤背景值的两倍, Zn 超过了其土壤背景值的 3 倍 (表 2), 以上结果一方面表明尘土中 PHEs 的含量受到人类活动的影响已经出现明显的富集现象, 另一方面也是因为太原市东西北三面环山, 中间为盆地, 造成正常的大气流动受阻, 冬季寒冷天气和逆温现象加剧了颗粒物的聚集, 附着在颗粒物上的污染物随着颗粒物干湿沉降到达地面, 富集在尘土中, 使得冬季尘土中包括 PHEs 在内的污染物含量增加^[15]. Liu 等^[17] 和黄浩等^[14] 分别调查了太原市土壤和室内尘土中 PHEs 的污染情况.

除 Ni 元素以外,街道尘土中 PHEs 的含量均远高于土壤中相应元素的含量值,但是比室内尘土中相应元素的含量值小,这和 Cheng 等^[1]对成都市区室内和街道尘土中 PHEs 对比的结果一致。

表 2 太原市道路尘土 PHEs 含量统计/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Summary statistics of PHEs content in urban dust of Taiyuan City/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

元素	As	Cd	Pb	Ni	Cr	Cu	Zn
范围	11.89 ~ 33.54	0.15 ~ 0.97	27.70 ~ 166.75	11.48 ~ 30.06	38.83 ~ 275.39	32.24 ~ 234.70	130.88 ~ 631.54
平均值	17.92	0.32	69.10	30.06	107.74	73.37	268.49
标准差	5.22	0.16	33.50	12.20	59.19	37.96	97.99
背景值 ^[25]	10.65	0.11	23.83	28.79	73.26	26.15	71.86
太原市土壤 ^[17]	10.70	0.25	27.87	29.74	74.10	32.11	90.76
太原市室内尘土 ^[14]	18.20	0.61	49.26	56.54	224.91	97.61	321.72

国内其它城市与太原市街道尘土中 PHEs 含量的对比情况如表 3 所示. 太原市街道尘土中 As、Pb、Cr 和 Cu 的含量处于中等水平,Cd、Ni 和 Zn 的含量处在较低水平,整体来看太原市尘土中 PHEs 的含量处于中低水平. 需要指出的是,尽管对比不同地区环境介质中 PHEs 的含量在相关研

究中较为常见,但是不同城市具有不同的影响 PHEs 分布的特点,所以对比的结果并不能准确体现不同城市人类活动对 PHEs 含量的影响程度. 此外,到目前为止针对环境介质中 PHEs 的研究没有统一的采样和实验处理规范,这也是亟待解决的问题.

表 3 国内其它城市道路尘土中 PHEs 含量¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Concentrations of PHEs in road dust of selected cities from China/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

城市	As	Cd	Pb	Ni	Cr	Cu	Zn	文献
太原	17.92	0.32	69.10	30.06	107.74	73.37	268.49	本研究
西安	13.80	—	158.60	35.80	145.10	93.50	665.90	[3]
邢台	6.50	—	65.50	29.20	98.00	52.30	355.20	[6]
宣威	25.09	16.04	253.64	136.51	1444.82	341.98	777.93	[20]
南京	17.3	1.92	119	115	133	141	585	[23]
西宁	6.00	—	62.82	23.47	507.77	30.32	104.84	[31]
天津	101.4	0.45	61.11	—	71.8	55.47	—	[32]

1) “—”表示文献中没有相关数据

2.2 生态风险评估

太原市街道尘土中 PHEs 的 NIRI 平均值、25 分位数、中位值和 75 分位数分别为: 63.86、43.78、55.34 和 71.64 [图 2(a)], 均属于中度风险. 如图 2(b) 所示, 10% 的街道尘土样本中 PHEs 处于低风险, 67.5% 的样本处于中度风险, 20% 的样本处于较高风险, 只有 1 个样本 (2.5%) 中 PHEs 处于高风险, 表明太原市尘土中 PHEs 的污染整体处于可控状态. 不同元素的值差别很大, Cd 的平均值为 87.85, 属于较高风险, 而其它 6 种元素的平均值均小于 20; 在 40 个街道尘土样本 PHEs 的值最大的全部是 Cd, 说明 Cd 是影响尘土中 PHEs 生态风险的主要元素, 原因是 Cd 的毒性响应系数远远高于其它 6 种元素.

太原市街道尘土中 PHEs 的 NIPI 平均值和中位值分别是 3.46 和 3.12, 均属于重度污染. 如图 2(d) 所示, 7.5% 的样本处于轻度污染, 35% 的样本处于中度污染, 57.5% 的样本处于重度污染. Zn 的 P_i 平均值为 3.74, 属于重度污染, Cu、Pb 和 Cd 的 P_i 平均值分别 2.81、2.90 和 2.93, 均属于中度污染. 有

24 个样本 Zn 的 P_i 值最高, 6 个样本 Cd 的 P_i 值最高, 有 5 个样本中 Cu 的 P_i 值最高, 4 个样本中 Pb 的 P_i 值最高, 1 个样本中 As 的 P_i 值最高. 对比 NIPI 和 NIRI 的结果发现: NIPI 的评估结果显示的污染情况比 NIRI 严重; 元素方面, 在 NIRI 评估起主导作用的是 Cd, 而在 NIPI 评估中 Zn 起主要作用. 造成这些差异原因是在 NIRI 评估中加入了元素的毒性响应系数. 不同元素的毒性差异很大, NIRI 的评估结果突出了毒性最强的 Cd 的作用, 而在 NIPI 评估结果中起最大作用的元素是毒性响应系数最低的 Zn. Men 等^[8]认为 NIPI 的评估结果会夸大污染的情况, 这与本研究的结果一致. 总体来看, NIRI 考虑到了不同元素的毒性差异, 突出了毒性强的元素的作用, 并消除了考察元素的多少对最终结果的影响, 其在污染和生态风险评估方面有很强应用前景.

2.3 健康风险评估

太原市街道尘土中 PHEs 通过不同途径造成的健康风险如图 3 所示. 街道尘土中 7 种 PHEs 都参与到非致癌风险的计算当中, 结果表明 THI-成年人和 THI-儿童的平均值分别是 0.22 和 0.99, 二者都

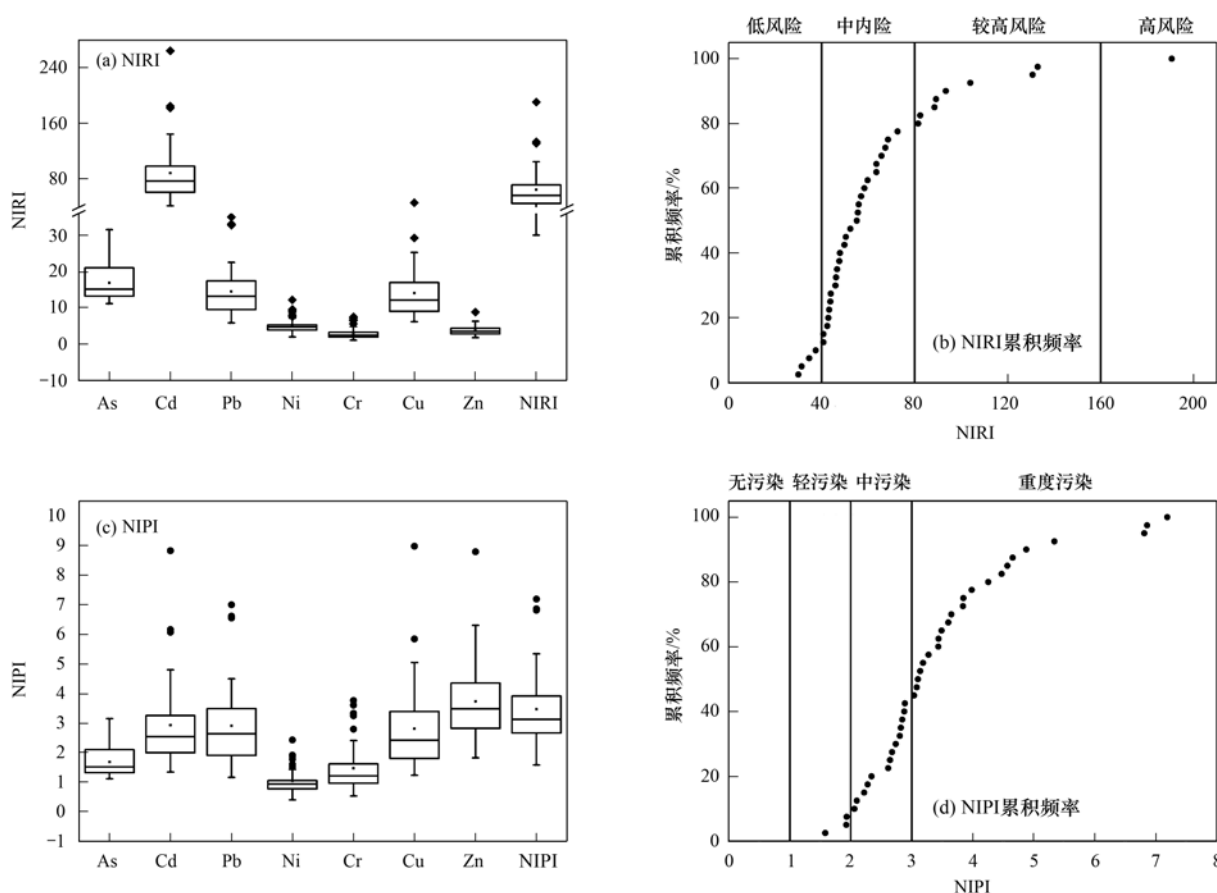


图2 尘土中PHEs的生态危害评估结果

Fig. 2 Results of ecological risk assessment for PHEs in dust

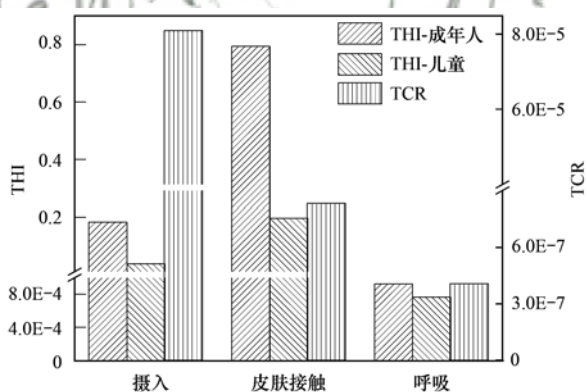


图3 街道尘土中PHEs造成的非致癌风险(THI)和致癌风险(TCR)

Fig. 3 Non-carcinogenic (THI) and carcinogenic (TCR) risks imposed by road dust PHEs

小于1,表明太原市尘土中PHEs没有造成严重的非致癌风险,但是对儿童造成的风险已经接近临界值,必须要特别注意.不同暴露途径造成的非致癌风险差别很大,手口摄入造成的非致癌风险分别占到THI-成人和THI-儿童的82.87%和80.09%,皮肤接触分别占到THI-成人和THI-儿童的16.71%和19.83%,表明摄入途径和皮肤接触分别是尘土中PHEs引发居民非致癌风险的最重要途径和次要途径,而摄入途径也是造成THI-儿童数值偏高的主要

原因.因为Cu和Zn不是致癌物,所以二者未参与致癌风险的计算.TCR的平均值为 8.22×10^{-5} ,在可接受的范围之内.手口摄入造成的致癌风险占到TCR的98.49%,皮肤接触分别占到TCR的1.01%,呼吸吸收仅占TCR的0.5%.总体来看,手口摄入是街道尘土中PHEs引发居民健康风险的主要途径,并且作用远远大于其余两种途径.儿童的生活习惯(如舔手指等),会增加污染物经手口摄入途径进入身体的机会,对儿童良好习惯的培养有利于降低其受到污染物的危害^[33].

不同元素的HQ值(成人和儿童)和CR值如图4所示.As造成的健康风险分别占到THI-成人,THI-儿童和TCR的42.42%,41.25%和33.60%,Cr造成的健康风险分别占到THI-成人,THI-儿童和TCR的39.33%,40.83%和65.69%,二者是尘土中PHEs引发居民健康风险的最重要的元素.对不同环境介质中PHEs污染的研究都指出As和Cr是造成健康风险最大的两个元素,如对关中地区^[9]、德国易北河周边土壤^[34]、诺维萨德市(塞尔维亚)^[33]和西安市街道尘土^[31]的研究都有相同的结论.因此需要明晰两种元素的来源,以制定后续的治理方案.Pb造成的健康风险分别占到THI-成人、THI-儿童

和 TCR 的 14.68%、14.41% 和 0.71%, 是 7 种 PHEs 中造成健康风险第三大的元素, 不过相比较 Cr 和 As, Pb 对健康风险的作用小得多. 健康分析评估的整体结果表明, 太原市尘土中 PHEs 并未对居民造成严重的健康风险, 处在可控状态, 这和 NIRI 评估的生态风险结果一致.

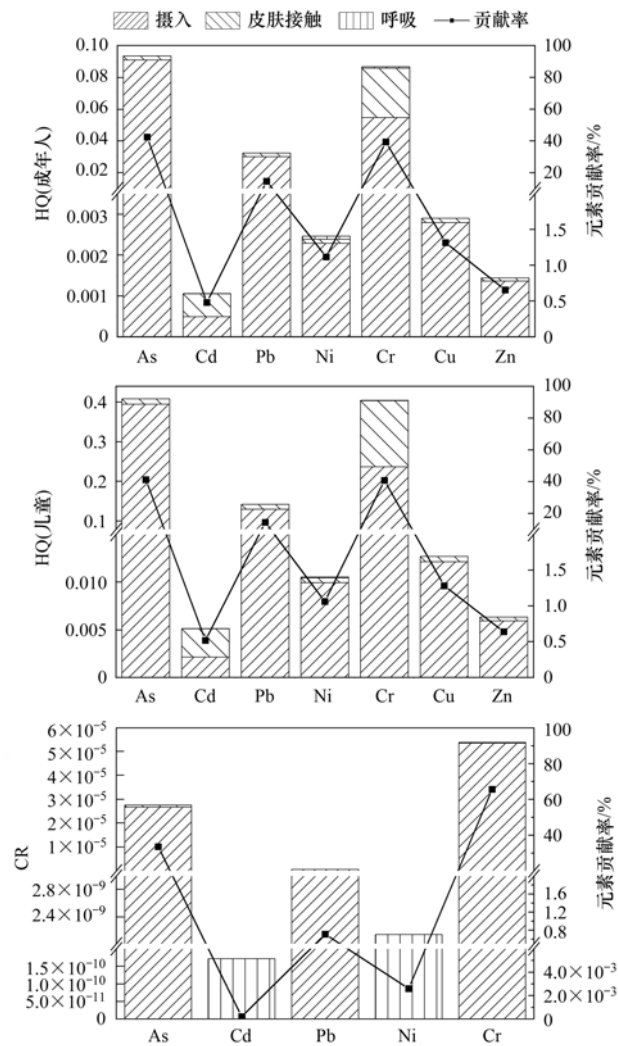


图 4 不同元素造成的 HQ (成人和儿童)、CR 值及其相应的贡献率

Fig. 4 HQ (for adults and children), CR values, and the corresponding contribution rate of various elements

2.4 尘土中 PHEs 的来源解析

主成分分析(principal component analysis, PCA)在识别污染物来源的研究中有广泛应用, 并且可以为后续 PMF 的污染物来源分配提供重要信息(来源数量)^[9]. 根据特征值大于 1 的原则, 从尘土 PHEs 含量数据提取出 2 个因子, 累积方差贡献率为 70.72%. 因子 1 的方差贡献率为 48.09%, Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 在因子 1 的载荷较高(>0.4), 因子 2 的方差贡献率为 22.63%, As、Cd、Pb、Zn 和 Cu 在因子 2 的载荷较高. 因子载荷图可以直观地展示不同元素的关系, 两个元素的直线距离越近表明两个

元素相关关系越强(图 5)^[9]. 由图 5 可知 7 种元素可以分成 3 组: 第一组 Cr 和 Ni; 第二组 Pb、Cu 和 Zn; 第三组 As 和 Cd.

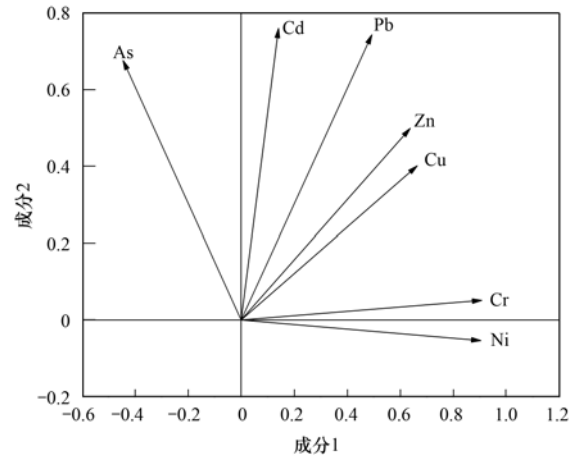


图 5 PCA 的因子载荷图

Fig. 5 Biplot of PC loadings based on PCA

聚类分析(cluster analysis, CA)得出的树状图可以明确地反映不同元素之间的联系, 能够验证 PCA 的结果^[3]. 本研究使用 Z-score 对 PHEs 的含量数据进行标准化, 计算不同元素相似性的欧氏距离, 并使用 Ward 法对数据进行分层聚类. CA 结果如图 6 所示, As 和 Cd 为第一类, Cr 和 Ni 为第二类, Zn、Pb 和 Cu 为第三类, CA 结果和 PCA 结果一致.

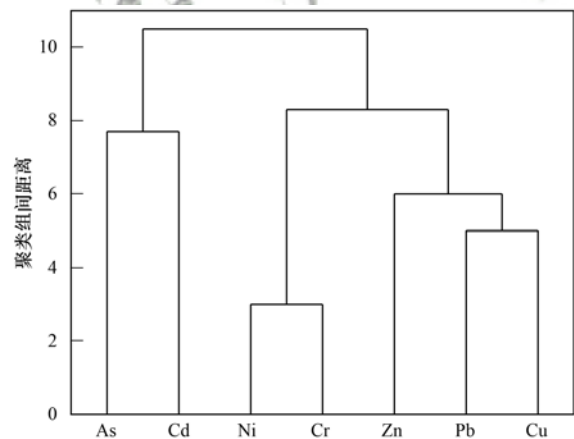


图 6 街道尘土中 PHEs 聚类分析

Fig. 6 Cluster analysis of PHEs in road dust

使用 PMF 软件进一步明确尘土中 PHEs 的来源, 并计算不同来源对 PHEs 含量的贡献率. 为了确保找到准确和合理的污染来源, PMF 的成分数设定为 2、3 和 4, 运算次数设定为 20 次. PMF 运行的结果表明, 当成分数是 3 时, 其 Q 值小于成分数为 2 时的 Q 值, 尽管成分数设定为 4 时 Q 值更小, 但是此时 As 的自然来源贡献率为 0. Zhi 等^[35]认为当 PMF 计算出元素的自然来源贡献率为 0 时, PMF 的结果是不合理的. 此外, 当成分数为 3 时, 模型计算得出的大部分残差在 -3 ~ 3 之间, As、Cd、Pb、Ni、Cr、Cu 和

Zn 的拟合曲线 R^2 分别为 0.69、0.42、0.85、0.92、0.93、0.71 和 0.58, 这些都表明 PMF 得出了合理的结果. PMF 的计算结果如图 7 所示, 成分 1 对 Cr 和 Ni 的贡献较高, 分别为 55.40% 和 58.30%. 尘土中 Cr 和 Ni 的平均值接近太原市土壤中两个元素的背景值, 相关研究表明环境介质中 Cr 和 Ni 主要来自土壤母质, 如对陕西省关中地区农业土壤^[9] 和福建九龙江地区农业土壤^[28] 等的研究. 因此, 成分 1 确定为自然来源. 成分 2 对 Pb 和 Zn 的贡献较高, 分别为 58.90% 和 51.40%, 对 Cu 和 Cd 也有一定贡献率, 分别为 36.00% 和 30.70%. Pb 广泛应用于汽车部件的生产过程中, 此外 Pb 也曾经作为抗爆剂被加入汽油中, 因此 Pb 在不同环境介质中都被认为是交通排放的标志性污染物, 尽管含铅汽油已经被禁用, 但是由于具有较长的半衰期, Pb 仍然残留在不同的环境介质中^[9]. 汽车部件和轮胎磨损分别是城市环境中 Cu 和 Zn 的主要来源, 这两个来源也会释放 Cd 进入环境^[24]. 近些年来, 太原市的汽车保有量呈现逐年增长的趋势, 截止到 2019 年末, 太原市居民汽车保有量超过 168 万辆, 大量的污染物随着交通出行被排放到城市环境中^[15]. 因此, 成分 2 确定为交通来源. 成分 3 对 As 和 Cd 的贡献较高, 分别为 67.40% 和 44.10%. As 是煤炭燃烧的标志性元素, 其在煤炭中的含量为 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 随着煤炭燃烧 As 会被排放到环境中^[36]. Cd 在城市环境中主要来源是金属冶炼等工业行为^[7]. 尽管政府不断推进能源和工业结构转型, 可是现阶段金属冶炼, 机械制造和煤炭产业仍然是太原市支柱型产业^[14]. 因此, 成分

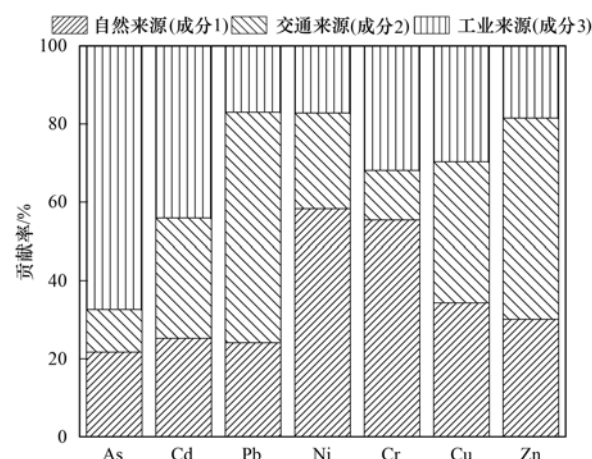


图7 3种来源对街道尘土中PHEs的贡献率

Fig. 7 Contributions of three sources to road dust PHEs

3 确定为工业排放.

2.5 尘土中PHEs总含量和造成的风险的来源分配以及识别关键来源

根据 PMF 的结果, 计算了 3 个来源对街道尘土中 7 种 PHEs 的总含量, 造成的生态风险, 非致癌风险 (成人和儿童) 和致癌风险 5 种因子的贡献率, 结果如图 8 所示. 交通排放对尘土中总 PHEs 的贡献率最高, 达到 40.25%, 自然来源对 PHEs 的总含量贡献率为 35.95%, 工业来源对 PHEs 的总含量贡献率最小, 为 23.80%. 3 个来源对 PHEs 造成的生态风险和健康风险的贡献率和三者对 PHEs 总含量的贡献率差别很大. 工业来源对 NIRI、THI-成人和 THI-儿童的贡献程度都是最高的, 分别为 43.93%、44.57% 和 44.23%, 自然来源对 TCR 的贡献率最

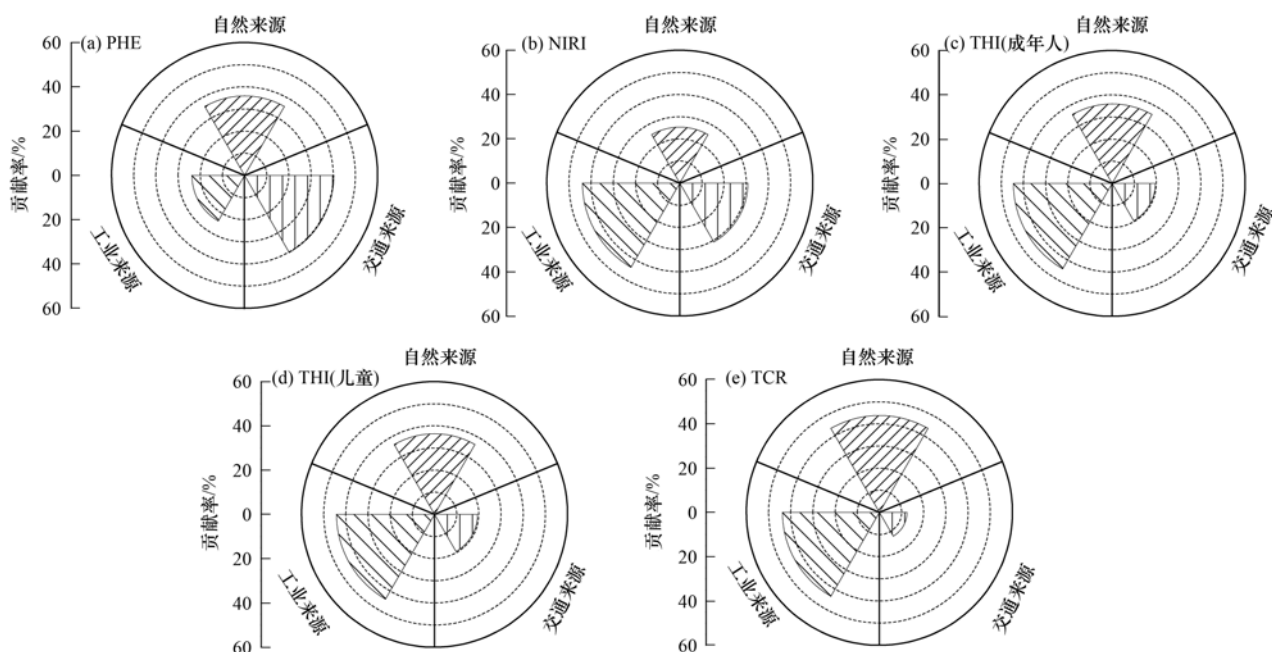


图8 不同来源对尘土中PHEs总含量和造成风险的贡献率

Fig. 8 Contributions of various sources to total contents of and risks for dust PHEs

高,达到 43.83%。尽管交通排放释放了更多含量的 PHEs,但是交通排放对另外 4 个因子的贡献程度相对较低,造成这种现象的原因是不同因子有不同的主导元素,如对于 NIRI 值,Cd 是其主导元素,而对于人体健康风险评估,As 和 Cr 是最重要的两个主导元素,这也是自然来源贡献 TCR 较高的原因。

基于 5 种因子的来源分配结果,MADM 计算了 3 种来源的 Z_p 值,结果显示工业来源的 Z_p 值为 0.39,在 3 种来源中最高,自然来源和交通排放的 Z_p 值分别为 0.34 和 0.27。尽管工业来源对太原市街道尘土中 PHEs 的总含量贡献最小,但是由于其释放的 PHEs 能够造成更严重的生态和居民健康风险,工业来源被认为是太原市冬季尘土中 PHEs 的关键来源。该结论也表明在污染源管控中,如果只关注污染来源对污染物含量的贡献率,排放出毒性更强污染物的来源可能会被忽视,让污染源管控不能达到最好的效果。

3 结论

(1)太原市冬季街道尘土中 PHEs 平均含量高于土壤中相应元素的背景值,NIRI 的评价结果表明,太原市街道尘土中 PHEs 造成的生态风险属于中度风险,处在可控的状态。

(2)太原市冬季街道尘土中 PHEs 对成人和儿童造成的非致癌风险分别为 0.22 和 0.99,均小于 1;PHEs 造成的致癌风险为 8.22×10^{-5} ,小于 1×10^{-4} 。健康风险评估的结果表明街道尘土中 PHEs 并未对居民造成严重的健康风险,但是儿童非致癌风险已经接近阈值。由手口摄入的风险是造成儿童非致癌风险较高的主要原因,需要重点关注。

(3)太原市冬季街道尘土中 PHEs 的来源有 3 个,分别是自然来源,交通来源和工业来源,其中 Cr 和 Ni 主要来自自然来源,Pb、Cu 和 Zn 主要来自交通来源,As 和 Cd 主要来自工业来源。

(4)不同因子来源分配的结果表明,虽然交通来源是贡献尘土中 PHEs 含量最大的来源(40.25%),但是交通来源排放出的 PHEs 造成的生态和健康风险都较小。而工业来源的情况恰恰相反,虽然它是贡献尘土中 PHEs 含量最小的来源(23.82%),但是工业来源排放出的 PHEs 造成的风险较大。MADM 计算结果表明,工业排放是太原市街道尘土中 PHEs 的关键来源,需要重点控制。

参考文献:

[1] Cheng Z, Chen L J, Li H H, *et al.* Characteristics and health risk assessment of heavy metals exposure via household dust from urban area in Chengdu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 621-629.

[2] 孙宗斌,周俊,胡蓓蓓,等. 天津城市道路灰尘重金属污染特征[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(1): 157-163.
Sun Z B, Zhou J, Hu B B, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in urban street dust of Tianjin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(1): 157-163.

[3] Fan X Y, Lu X W, Yu B, *et al.* Risk and sources of heavy metals and metalloids in dust from university campuses: a case study of Xi'an, China [J]. *Environmental Research*, 2021, **202**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111703.

[4] Tang R L, Ma K M, Zhang Y X, *et al.* The spatial characteristics and pollution levels of metals in urban street dust of Beijing, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, **35**: 88-98.

[5] 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.

[6] 宋怡,卢新卫,周潇,等. 邢台市道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3130-3135.
Song Y, Lu X W, Zhou X, *et al.* Source identification and pollution characteristics of heavy metals in suspended particles of urban road dust from Xingtai City [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3130-3135.

[7] Shi G T, Chen Z L, Xu S Y, *et al.* Potentially toxic metal contamination of urban soils and roadside dust in Shanghai, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156**(2): 251-260.

[8] Men C, Liu R M, Xu L B, *et al.* Source-specific ecological risk analysis and critical source identification of heavy metals in road dust in Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121763.

[9] Deng W B, Liu W J, Li X X, *et al.* Source apportionment of and potential health risks posed by trace elements in agricultural soils: a case study of the Guanzhong Plain, northwest China [J]. *Chemosphere*, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127317.

[10] Chao S H, Liu J W, Chen Y J, *et al.* Implications of seasonal control of PM_{2.5}-bound PAHs: an integrated approach for source apportionment, source region identification and health risk assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **247**: 685-695.

[11] Escobar S, Villanueva F J, Santofimia M J, *et al.* A multiple-attribute decision making-based approach for smart city rankings design [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, **142**: 42-55.

[12] Li J R, Li X Y, Zhang R. Cross-layer collaboration handoff mechanism based on multi-attribute decision in mobile computation offloading [J]. *Soft Computing*, 2019, **23**(1): 323-341.

[13] Garnaeva G I, Nefediev L A, Akhmedshina E N. Information entropy method and the description of echo hologram formation in gaseous media [J]. *Laser Physics*, 2018, **28**(2), doi: 10.1088/1555-6611/aa9815.

[14] 黄浩,徐子琪,严俊霞,等. 太原市城乡居民区采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2143-2152.
Huang H, Xu Z Q, Yan J X, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution and ecological risk evaluation of indoor dust from urban and rural areas in Taiyuan city during the heating season [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2143-2152.

[15] 李常青,吕茜,王莉. 2018~2020 年太原市 PM_{2.5} 中重金属元素污染分析[J]. *预防医学论坛*, 2021, **27**(11): 842-844.
Li C Q, Lv Q, Wang L. Analysis on pollution characteristics of

- heavy metals in PM_{2.5}, Taiyuan City, 2018- 2020 [J]. Preventive Medicine Tribune, 2021, **27**(11): 842-844.
- [16] 太原市统计局. 太原统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [17] Liu Y, Wang H F, Li X T, *et al.* Heavy metal contamination of agricultural soils in Taiyuan, China[J]. Pedosphere, 2015, **25**(6): 901-909.
- [18] HJ 766-2015, 固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法[S].
HJ 766-2015, Solid waste-determination of metals-inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)[S].
- [19] GB/T 22105.2-2008, 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第2部分: 土壤中总砷的测定[S].
GB/T 22105.2-2008, Soil quality-analysis of total mercury, arsenic and lead contents in soils-atomic fluorescence spectrometry part 2: analysis of total arsenic contents in soils [S].
- [20] 张文超, 吕森林, 刘丁彧, 等. 宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1810-1817.
Zhang W C, Lü S L, Liu D Y, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in the street dusts in Xuanwei and their health risk assessment [J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1810-1817.
- [21] USEPA. Exposure factors handbook: 2011 edition[R]. EPA/600/R-09/052F, Washington: U. S. Environmental Protection Agency, 2011.
- [22] Fryer M, Collins C D, Ferrier H, *et al.* Human exposure modelling for chemical risk assessment: a review of current approaches and research and policy implications [J]. Environmental Science & Policy, 2006, **9**(3): 261-274.
- [23] Wang J H, Li S W, Cui X Y, *et al.* Bioaccessibility, sources and health risk assessment of trace metals in urban park dust in Nanjing, Southeast China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **128**: 161-170.
- [24] Deng W B, Li X X, An Z S, *et al.* Identification of sources of metal in the agricultural soils of the Guanzhong Plain, northwest China[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2017, **36**(6): 1510-1516.
- [25] 陈慧选, 吴家华, 白增森, 等. 太原市南郊区土壤 8 种重金属元素背景值的研究[J]. 山西农业科学, 1994, **22**(2): 32-35.
Chen H X, Wu J H, Bai Z S, *et al.* Environmental background data for agricultural soil in Taiyuan south-suburban[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 1994, **22**(2): 32-35.
- [26] Liu W J, Chai G L, Deng W B. A combination of finite mixture distribution model with geo-statistical models to study spatial patterns and hazardous areas of heavy metals in cropland soils of the Guanzhong Plain, Northwest China [J]. Chemosphere, 2021, **283**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131222.
- [27] Fang X H, Peng B, Wang X, *et al.* Distribution, contamination and source identification of heavy metals in bed sediments from the lower reaches of the Xiangjiang River in Hunan province, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **689**: 557-570.
- [28] 黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 等. 基于 PMF 模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 430-437.
Huang H B, Lin C Q, Hu G R, *et al.* Source appointment of heavy metals in agricultural soils of the Jiulong river basin based on positive matrix factorization [J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 430-437.
- [29] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* Epa positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2014.
- [30] Li L X, Li Y N, Ye F, *et al.* Carbon dioxide emissions quotas allocation in the Pearl River Delta region: evidence from the maximum deviation method[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **177**: 207-217.
- [31] Li X P, Zhang M, Gao Y, *et al.* Urban street dust bound 24 potentially toxic metal/metalloids (PTMs) from Xining valley-city, NW China: spatial occurrences, sources and health risks [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **162**: 474-487.
- [32] Yu B B, Wang Y, Zhou Q X. Human health risk assessment based on toxicity characteristic leaching procedure and simple bioaccessibility extraction test of toxic metals in urban street dust of Tianjin, China[J]. PLoS One, 2014, **9**(3), doi: 10.1371/journal.pone.0092459.
- [33] Škrbić B D, Buljović M, Jovanović G, *et al.* Seasonal, spatial variations and risk assessment of heavy elements in street dust from Novi Sad, Serbia [J]. Chemosphere, 2018, **205**: 452-462.
- [34] Rinklebe J, Antoniadis V, Shaheen S M, *et al.* Health risk assessment of potentially toxic elements in soils along the Central Elbe River, Germany [J]. Environment International, 2019, **126**: 76-88.
- [35] Zhi Y Y, Li P, Shi J C, *et al.* Source identification and apportionment of soil cadmium in cropland of Eastern China: a combined approach of models and geographic information system [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, **16**(2): 467-475.
- [36] 王祖泽. 土壤砷污染的价态问题[J]. 农业环境科学学报, 1982, (3): 1-4.

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)