

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展 陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓(1201)

全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展 孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙(1214)

湖泊水质参数遥感监测研究进展 王思梦, 秦伯强(1228)

淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展 赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超(1244)

长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应 吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋(1258)

中国土地利用碳排放变化及协调分区 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯(1267)

基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析 刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛(1277)

基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势 佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧(1287)

浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 化学组分污染特征分析 周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳锋, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静(1297)

南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源 徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕(1310)

洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献 闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思(1319)

江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征 宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜(1328)

珠三角典型工业区挥发性有机物(VOCs)组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性 宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏(1336)

2000~2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变 孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧(1346)

港口自有移动源大气污染物排放清单 徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺(1357)

基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控 欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙(1368)

黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估 曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建(1378)

桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征 余悦, 邢新丽, 程敏, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华(1387)

广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析 陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成(1397)

宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价 徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军(1407)

典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析 王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫(1416)

牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁(1429)

石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析 丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞(1440)

北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞(1452)

拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价 单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文(1465)

南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素 高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔(1475)

调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素 丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文(1484)

典型城市内河细菌组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析 谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晚艳, 郑蕾(1497)

滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算 郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中(1508)

窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制 曾少毅, 李坤权(1519)

高比表面硫脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附 闵炳坤, 李坤权(1528)

不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征 刘晨旭, 白晓慧(1537)

水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析 杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕(1542)

增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响 邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章(1553)

三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化 李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源(1562)

鄱阳湖平原直播稻 CH₄ 通量及其与 CO₂ 通量的综合温室效应 时元智, 崔远来, 才硕, 洪大林, 程婕(1572)

不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析 周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君(1583)

石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估 李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建清(1593)

南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价 杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清(1602)

三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析 石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然(1611)

兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析 康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(1620)

粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价 王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨(1636)

三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳(1646)

某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价 王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东(1657)

化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制 马强, 卫泽斌, 吴启堂(1668)

再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制 林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞(1678)

长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评估 刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红(1686)

稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应 张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚(1698)

巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性 冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕(1706)

蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与翅果菊修复镉污染土壤的影响 陈敏妮, 袁小奇, 张李峰, 何川黔, 高波(1714)

地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议 王锐, 李瑜, 余京, 周皎, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(1727)

张家口市北新屯地区蔬菜种植区微量元素富集特征及成因分析 安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原(1735)

三峡库区消落带落羽杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化 谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓(1748)

黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响 张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平(1758)

化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响 王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明(1768)

鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化 张丹, 彭双, 王丹青, 王-明, 林先贵(1780)

牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响 张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林(1792)

《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)

某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价

王诗雨¹, 李淳², 赵洪伟², 陈希², 张慧君¹, 朱勇兵³, 赵三平³, 计超¹, 刘晓东^{1*}

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 极地环境与全球变化安徽省重点实验室, 合肥 230026; 2. 中国人民解放军63968部队, 白城 137001; 3. 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205)

摘要: 试验场重金属污染是广受关注的环境问题之一。选取吉林某试验场的静爆试验区、落弹区和生活保障区作为研究对象, 检测了112个表层土壤样品及两个土壤剖面中的重金属(As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn)含量, 分析了重金属分布特征并对其进行了源解析, 采用多个污染指数评价法对重金属的污染程度及潜在生态风险进行了研究。结果表明, 静爆试验区土壤中As、Cd、Cu、Ni和Zn含量的平均值高于吉林省背景值, 且Cu、Zn、As和Cd含量表现出较强的空间异质性; 落弹区土壤中As、Cd和Ni含量的平均值超出背景值; 生活保障区土壤中As和Cd含量的平均值高于背景值, 并且Pb、Cd、Zn和Cr变异系数较强, 表明其可能受到人类活动的影响。在不同的试验区, 土壤中As、Cr、Cu、Ni和Zn含量具有显著差异($P < 0.05$)。静爆试验区较落弹区受到试验活动影响更为强烈, 土壤剖面表层重金属含量明显偏高, 土壤剖面中重金属未发生明显垂向迁移。多元统计和APCS-MLR源解析分析表明, Zn、Pb和Cd主要受到试验活动相关的污染源影响, Cr和Ni主要受成土母质自然源影响, As和Cu来源较为复杂。地累积指数表明, 3个区域的Cd和落弹区的Ni均属于1级(无-中度污染), 内梅罗综合污染指数显示不同功能区之间的污染水平表现为: 生活保障区 > 静爆试验区 > 落弹区, 3个功能区土壤为轻度污染, 潜在生态风险指数显示研究区均处于中度生态风险水平, Cd为主要的土壤污染因子。

关键词: 试验场; 重金属; 污染特征; 源解析; 污染评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1657-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202201279

Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range

WANG Shi-yu¹, LI Chun², ZHAO Hong-wei², CHEN Xi², ZHANG Hui-jun¹, ZHU Yong-bing³, ZHAO San-ping³, JI Chao¹, LIU Xiao-dong^{1*}

(1. Anhui Province Key Laboratory of Polar Environment and Global Change, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. 63968 Unit of PLA, Baicheng 137001, China; 3. State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China)

Abstract: Heavy metal pollution in testing ranges is one of the most widely concerning environmental problems. The ammunition static detonation test area, the bomb falling area, and the living area of a testing range in Jilin were selected as the study objects. The contents of heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn) in 112 topsoil samples and two soil profiles were analyzed, and their distribution characteristics and sources were analyzed in detail. After that, the pollution degree and potential ecological risk of heavy metals were investigated using multiple pollution index assessment methods. The results showed that the average contents of As, Cd, Cu, Ni, and Zn in the soil of the ammunition static detonation test area were higher than the soil background values in Jilin province, and the contents of Cu, Zn, As, and Cd showed strong spatial heterogeneity. The average concentrations of As, Cd, and Ni in the soil of the bomb falling area exceeded their background values. The average contents of As and Cd in the soil of the living area were higher than the background values, and the variation coefficients of Pb, Cd, Zn, and Cr were relatively high, indicating that they may have been affected by human activities. In different test areas, the contents of As, Cr, Cu, Ni, and Zn in the soil samples were significantly different ($P < 0.05$). The ammunition static detonation test area was more strongly affected by the test activities than the bomb falling area, and the heavy metal contents in the surface layer of the soil profile were significantly higher. There was no obvious vertical migration of heavy metals in the soil profiles. The results of multivariate statistics and source identification analysis using absolute principal component score-multiple linear regression (APCS-MLR) showed that Zn, Pb, and Cd were mainly affected by pollution sources related to test activities; Cr and Ni were mainly affected by natural sources of soil forming materials; and the sources of As and Cu were more complicated. The geo-accumulation index showed that Cd in the three areas and Ni in the bomb falling area belonged to pollution level I (uncontaminated to moderately contaminated). The Nemerow comprehensive pollution index showed that the pollution levels among the different functional areas were: living area > ammunition static detonation test area > bomb falling area, and the three functional areas were slightly polluted. The potential ecological risk index showed that the study area was at moderate ecological risk level, and Cd was considered to be the main soil pollution factor.

Key words: testing range; heavy metals; pollution characteristics; source analysis; pollution assessment

场地污染是近年来最受关注的环境污染问题之一, 国内外针对矿区^[1]、工业区^[2]和农业用地^[3]等场地已开展了大量的调查、风险评估和修复研究。武器试验场是用于装备试验的场地, 占地规模较大^[4], 长期试验活动会导致场地受到严重的重金属^[5,6]和炸药^[7]等特征污染物的污染, 如轻武器靶场往往都会产生严重的重金属污染问题^[8~10]。含有

污染物的颗粒物会通过呼吸吸入、摄入和皮肤接触途径进入人体, 长期暴露将导致重金属在体内的累

收稿日期: 2022-01-27; 修订日期: 2022-06-14

基金项目: 中国科学院科技创新重点部署项目(KGFZD-135-19-09); 国家重点研发计划项目(2018YFC1801100)

作者简介: 王诗雨(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染与风险评估, E-mail: wangsy5@mail.ustc.edu.cn

* 通信作者, E-mail: ycx@ustc.edu.cn

积^[11],例如波多黎各的别克斯岛被用作美国海军训练场 60 余年,目前在岛上居民尿液中发现的 Pb、As、Cd、Al、Gd 和 U 含量要显著高于周围其他岛屿居民^[12]. 试验场和训练场已成为当地人群健康和生态环境的潜在风险源^[13,14],并引发复杂持久的公共卫生和环境责任纷争.

关于我国试验场环境状况的研究目前报道较少. 刘玉通等^[15~17]对我国华北和西南地区的训练场地土壤重金属污染特征开展了研究,认为土壤中残留的炮弹和弹头会带来持久性重金属污染;朱勇兵等^[18]对我国东北某试验场的轻武器靶场调查发现,靶场具有 Pb、Cu 和 Sb 组合污染特征,并存在一定程度的垂直和侧向迁移;Bai 等^[19]基于前人研究数据,评估了我国 5 个靶场的生态和人体健康风险,发现主要以 Pb 导致的风险为主. 试验和训练场土壤中重金属等的污染状况主要受到活动类型及强度和场地使用年限等因素影响^[20],装备种类和弹药类型等可导致不同试验和训练场地重金属污染水平差异很大. 如波兰某训练场土壤中 Cu、Ni、Cd、Pb、Zn 和 Cr 含量都超出了波兰最大允许值^[5],而 Sládková 等^[21]却发现捷克前训练场地土壤中重金属均未超过最大允许限值,不构成潜在的环境风险. 与此同时,除了受武器装备直接相关的输入,大型试验场环境状况还会受到场地交通运输、生活污水/废气和农副业生产等人类活动的影响,导致场地环境质量具有多因性和复杂性. 为此,从环境安全的角度,有必要对试验和训练场环境质量进行跟踪监测分析,评估其污染发展趋势并解析其风险来源,以采取针对性的污染防控措施.

本研究中某试验场地承担着武器装备的静爆测试和实弹发射试验功能. 在前期已对该场地轻武器靶场采样研究的基础上,进一步采集了该场地静爆试验区、落弹区和生活保障区的环境土壤样品. 本文通过对样品中多种重金属含量的检测和统计分析,对比试验场不同功能区重金属污染状况,解析重金属来源,并利用多个污染评价指数评估了试验场典型功能区的重金属污染程度,以期采取针对性的环境治理措施和确保试验场的可持续利用提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

某试验场位于吉林省西北部,科尔沁草原东部边缘,属寒温带大陆性气候,年平均气温 $< 6^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $< 400\text{ mm}$,土壤以栗钙土为主,呈碱性至弱碱性. 该试验场地主要包括静爆试验区、落弹区

和生活保障区等功能区. 静爆试验是对弹药冲击波进行测试,中心区域土壤表层有大量黑色爆炸残留物,周围区域的土壤裸露无植被生长,最外层土壤有零星的植被. 落弹区位于地势较低的草原,该区域作为火炮靶场,浅弹坑密布. 生活保障区有营房、食堂和车库等完善的生活保障设施,并种植果树和农作物.

1.2 样品采集和分析

在 2019 年 6 月和 2020 年 10 月采集了静爆试验区、落弹区和生活保障区共 112 个表层土壤样品,并在静爆试验区、落弹区中心分别采集了 0~50 cm 的土壤剖面样品(图 1). 野外采集样品时,用不锈钢铲采集 0~5 cm 表层土壤,每个样品由 5 个点样品混合均匀得到. 静爆试验区中心的剖面自

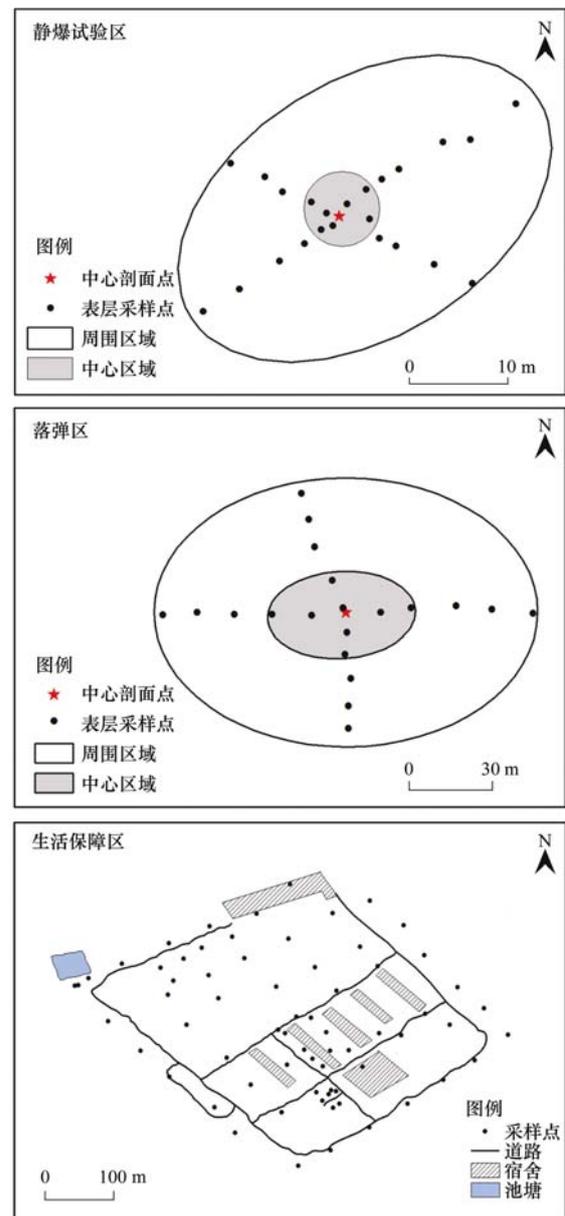


图 1 研究区采样点位置分布示意

Fig. 1 Location and distribution of sampling sites in the study area

下而上按照 42 ~ 52、32 ~ 42、22 ~ 32、12 ~ 22、2 ~ 12 和 0 ~ 2 cm 采集土壤样品,落弹区中心的土壤剖面自下而上按照 35 ~ 45、25 ~ 35、15 ~ 25、5 ~ 15 和 0 ~ 5 cm 采集样品. 在每个样点采集土壤样品的同时详细记录了周围生态环境信息. 土壤样品冷冻干燥后过 10 目筛,除去样品中碎石颗粒和植物残体等,然后用玛瑙研钵研磨至粉末,并全部过 200 目筛.

土壤重金属含量的分析采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 混合消解的方法^[22],使用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, PerkinElmer 2000) 测定 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 这 7 种重金属的含量. As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的检出限分别为 0.4、0.09、2、0.6、1、2 和 1 mg·kg⁻¹. 当某重金属的含量低于检出限,按照检出限的一半进行计算^[23]. 在分析过程中,每批样品设置两个空白样和两个平行双样,空白样的测定结果远低于检出限,平行样的测定结果相对偏差 < 10%. 采用土壤成分分析标准物质 GBW 08303 和 GBW 07405 进行质量控制,回收率范围为 85% ~ 110%. 土壤 pH 值采用电位法 (HJ 962-2018) 测定,有机质含量采用重铬酸钾容量法 (NY-T 1121.6-2006) 测定.

1.3 土壤环境质量评价方法

地累积指数由德国科学家 Müller^[24] 于 1969 年提出,用于定量评价沉积物中重金属的污染程度,目前也被广泛应用于土壤环境质量的污染评价^[25-27],计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (k \times B_i)] \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数, C_i 为重金属元素 i 在土壤中的含量 (mg·kg⁻¹), B_i 为土壤中元素 i 的地球化学背景值 (mg·kg⁻¹), 本研究地累积指数评价所用背景值为吉林省土壤背景值, k 为成岩作用引起的

背景值变动系数,一般 k 值取 1.5.

单因子污染指数评价法常用来评价一种污染物的污染程度,而内梅罗指数法以单因子指数法为基础,克服其仅适用于单一因子的缺点,突出了高含量污染物对环境质量的影响,同时兼顾单因子污染指数的平均值^[28],计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (2)$$

$$P_N = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (3)$$

式中, P_i 为第 i 种重金属单因子污染指数; C_i 为 i 种重金属元素在土壤中的含量 (mg·kg⁻¹); S_i 为第 i 种重金属污染物的标准值 (mg·kg⁻¹),在此选用的标准为吉林省土壤背景值; P_N 为内梅罗综合污染指数,其中 $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 为单因子污染值的最大值, $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为土壤单因子污染值的均值.

潜在生态风险指数法是由瑞典学者 Hakanson^[29] 建立的一套评价重金属污染及其生态风险的方法,能综合反映重金属对生态环境的影响潜力,计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \times \frac{C_r^i}{C_n^i} \quad (4)$$

式中, RI 为潜在生态风险指数; E_r^i 为单项重金属潜在生态风险指数; T_r^i 为污染物毒性响应系数, As、Cd、Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 的毒性响应系数分别为 10、30、2、5、5、5 和 1^[30]; C_r^i 为 i 污染物的实测含量 (mg·kg⁻¹); C_n^i 为 i 污染物的参比值 (mg·kg⁻¹), 本研究以吉林省土壤背景值为参比值. 其中 E_r^i 和 RI 的分级标准根据所研究重金属的毒性参数进行了相应调整^[31].

利用地累积指数法、单因子指数法、内梅罗指数法和潜在生态风险指数法划分的土壤重金属污染评价标准见表 1.

表 1 土壤重金属污染等级划分标准

Table 1 Criteria for pollution grade of soil heavy metals

地累积指数评价			单因子污染指数评价		内梅罗综合污染指数评价		潜在生态风险指数评价		
I_{geo}	级数	污染程度	P_i	污染程度	P_N	污染程度	E_r^i	RI	风险等级
$I_{\text{geo}} \leq 0$	0	无	$P_i \leq 1$	无	$P_N \leq 0.7$	清洁	$E_r^i < 30$	$RI < 70$	轻度
$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	1	无-中度	$1 < P_i \leq 2$	轻微	$0.7 < P_N \leq 1$	警戒级	$30 \leq E_r^i < 60$	$70 \leq RI < 140$	中度
$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	2	中度	$2 < P_i \leq 3$	轻度	$1 < P_N \leq 2$	轻度	$60 \leq E_r^i < 120$	$140 \leq RI < 280$	较强
$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	3	中-强度	$3 < P_i \leq 5$	中度	$2 < P_N \leq 3$	中度	$120 \leq E_r^i < 240$	$RI \geq 280$	很强
$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	4	强度	$P_i > 5$	重度	$P_N > 3$	重度	$E_r^i \geq 240$		极强
$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	5	强-极强							
$I_{\text{geo}} > 5$	6	极强							

1.4 数据处理与分析

用 Microsoft Excel 软件对数据进行描述性统计,采用 SPSS Statistics 24 软件对数据进行 Duncan's test 多组样本间差异显著性分析、相关性分析、主

成分分析和绝对主成分分数-多元线性回归受体模型 (APCS-MLR) 分析,有关 APCS-MLR 的详细介绍和计算见文献^[32]. 采样点分布图和数据分析图分别使用 ArcGIS 10.2 和 Origin 2021 软件绘制.

2 结果与分析

2.1 表层土壤理化性质和重金属含量

土壤基本理化性质如表 2 所示. 静爆试验区、落弹区和生活保障区土壤 pH 值分别为 5.42 ~ 8.06、7.96 ~ 10.00 和 7.54 ~ 8.64, 大部分土壤为弱碱性, 与前人分析的结果一致^[33,34]. 在静爆试验区、落弹区和生活保障区的土壤 TOC 分别为 0.68% ~ 4.89%、0.75% ~ 6.85% 和 0.95% ~ 12.75%.

表层土壤重金属含量结果见表 3. 静爆试验区土壤中重金属 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的平均值分别为 10.4、0.20、17.6、24 和 92 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过吉林省土壤背景值, 是背景值的 1.30、2.02、1.03、1.12 和 1.14 倍, 其他重金属含量的平均值均低于吉林省土壤背景水平. 变异系数反映了土壤重金属含量标准差与含量平均值的变化程度, 较大的变异系数表明重金属在空间上的分布差异大, 指示了外部干扰程度较高. 根据 Wilding^[35] 的研究, 将变异系数由低到高依次划分为低等变异 ($\text{CV} < 16\%$)、中等变异 ($16\% \leq \text{CV} < 36\%$) 和高等变异 ($\text{CV} \geq 36\%$). 静爆试验区重金属元素 Cu、Zn、As 和 Cd 的变异系数均超过 36%, 分别为 70.76%、48.57%、44.79% 和 38.87%, 为高等变异, 表现出较强的空间异质性, $\omega(\text{Cu})$ 的平均值要略高于背景值, 其最大值可达 71.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 为背景值的 4.16 倍, 其原因可能是试验过程中爆炸产生的弹壳碎片残留

于土壤, 从而导致周围土壤中重金属含量有所增加. 落弹区土壤中重金属 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 和 $\omega(\text{Ni})$ 的平均值为 9.4、0.17 和 40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 为背景值的 1.18、1.72 和 1.87 倍, 其余重金属含量的平均值都要低于土壤背景值, 说明这些土壤总体上没有受到重金属明显污染, 反映周围土壤的背景值水平. 另外, 落弹区土壤中所有重金属均属于中等变异, 表明不同样品之间差异相对较小. 生活保障区土壤中重金属 $\omega(\text{As})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 的平均值为 8.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是背景值的 1.01 和 2.22 倍, 其余重金属含量的平均值均未超过背景值. Pb、Cd、Zn 和 Cr 属于高等变异, 变异系数分别为 125.21%、98.62%、69.82% 和 41.23%, 空间分布差异显著, 并且 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 和 $\omega(\text{Cr})$ 的最大值可达 243、1.23、378 和 74 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是背景值的 8.44、12.42、4.70 和 1.58 倍, 这可能与人类活动的影响有关.

与该试验场的轻武器靶场^[18]相比(表 3), 本研究区土壤中 Pb 和 Cu 含量的平均值显著偏低. 轻武器靶场主要污染来源于残留在土壤中含铅弹头, 大量的 Pb 和 Cu 重金属在土壤中累积, 导致靶场土壤往往存在严重的 Pb 和 Cu 污染. 为进一步探究土壤重金属含量是否受人类活动的影响, 将 3 个功能区与周围区域土壤重金属含量进行了比较, 发现本研究土壤中 As、Cd、Ni、Pb 和 Zn 含量的平均值大部分高于白城-松原地区的草原土壤重金属含量^[34], 表明表层土壤受到一定程度的人为影响.

表 2 土壤 pH 和 TOC 含量

Table 2 Soil pH and TOC content

理化性质	特征值	静爆试验区 ($n=23$)	落弹区 ($n=20$)	生活保障区 ($n=69$)
pH	范围	5.42 ~ 8.06	7.96 ~ 10.00	7.54 ~ 8.64
	平均值 \pm 标准偏差	7.17 \pm 0.72	8.42 \pm 0.57	8.04 \pm 0.21
TOC	含量范围/%	0.68 ~ 4.89	0.75 ~ 6.85	0.95 ~ 12.75
	平均值 \pm 标准偏差/%	2.90 \pm 1.18	2.49 \pm 1.35	3.52 \pm 1.80

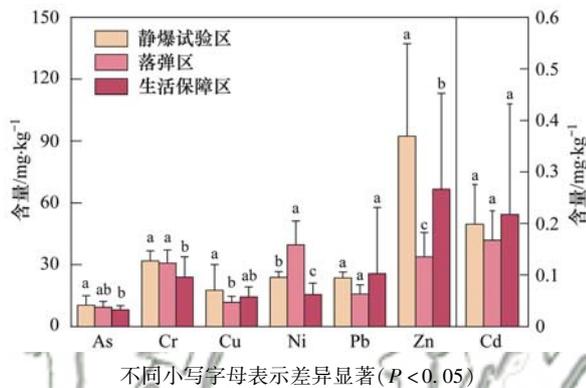
表 3 不同功能区土壤重金属含量描述性统计分析结果

Table 3 Descriptive statistical analysis of heavy metal contents in soil samples from different functional areas

区域	特征值	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
静爆试验区 ($n=23$)	含量范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.3 ~ 18.4	0.05 ~ 0.36	23 ~ 41	8.8 ~ 71.1	18 ~ 29	20 ~ 30	42 ~ 223
	平均值 \pm 标准偏差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	10.4 \pm 4.6	0.20 \pm 0.08	32 \pm 5	17.6 \pm 12.5	24 \pm 3	24 \pm 3	92 \pm 45
	变异系数/%	44.79	38.87	15.44	70.76	11.98	12.17	48.57
落弹区 ($n=20$)	含量范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4.2 ~ 15.7	0.05 ~ 0.32	20 ~ 40	7.8 ~ 18.9	26 ~ 63	11 ~ 28	17 ~ 65
	平均值 \pm 标准偏差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	9.4 \pm 2.8	0.17 \pm 0.06	31 \pm 6	11.8 \pm 2.9	40 \pm 12	16 \pm 5	34 \pm 12
	变异系数/%	30.05	33.99	20.83	24.59	29.18	28.76	34.82
生活保障区 ($n=69$)	含量范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.3 ~ 13.4	0.05 ~ 1.23	11 ~ 74	7.5 ~ 38.3	8 ~ 41	9 ~ 243	19 ~ 378
	平均值 \pm 标准偏差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	8.1 \pm 2	0.22 \pm 0.21	24 \pm 9.9	14.4 \pm 4.9	16 \pm 6	26 \pm 32	67 \pm 47
	变异系数/%	25.10	98.62	41.23	33.79	35.49	125.21	69.82
	吉林省土壤背景值 ^[36] / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	8.0	0.099	46.7	17.1	21.4	28.8	80.4
	轻武器靶场土壤 ^[18] / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	9.54	— ¹⁾	—	88.4	—	936.4	40.2
	白城-松原地区草原土壤 ^[34] / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.20	0.07	35.00	16.70	15.20	18.30	35.00

1) “—”表示无相关数据

不同功能区土壤重金属含量存在一定差异(图2). 采用 Duncan's test 方法对差异的显著性水平进行了检验, 结果显示不同功能区 As、Cr、Cu、Ni 和 Zn 含量的差异具有统计学上的显著性($P < 0.05$), 而 Cd 和 Pb 含量在不同功能区没有显著性差异. 具体来说, 静爆试验区土壤中 As 含量显著高于生活保障区($P < 0.05$), 静爆试验区和落弹区土壤中 Cr 含量显著高于生活保障区($P < 0.05$), 静爆试验区土壤中 Cu 含量显著高于落弹区($P < 0.05$), 而与生活保障区不存在显著性差异, 落弹区土壤中 Ni 含量显著高于静爆试验区和生活保障区($P < 0.05$), 静爆试验区土壤中 Zn 含量显著高于落弹区和生活保障区($P < 0.05$).



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

图2 不同功能区土壤重金属含量分布

Fig. 2 Distribution of heavy metal contents in the soils from different functional areas

2.2 土壤剖面的重金属含量

静爆试验区和落弹区土壤中 7 种重金属、pH 和 TOC 的含量随深度变化如图 3 所示. 对于弹药静爆区土壤剖面, pH 在表层 0~5 cm 最高, 5 cm 深度以下基本保持不变; TOC 在 0~20 cm 深度含量较高, 表层土壤 TOC 含量的升高主要源于弹药静爆时使用木柴进行燃烧, 燃烧后土壤表层受到有机酸改性、碱性灰分渗入土壤、有机物氧化和阳离子释放等因素的影响, 最终导致表层土壤 pH 升高^[37]. 静爆试验区重金属含量在剖面上的变化和 pH 变化趋势相似, 主要积累在表层 0~2 cm 的土壤中, 含量先随深度呈现急剧下降, 之后趋于稳定. 有研究表明碱性土壤 ($pH > 8.0$) 对 Cu 和 Pb 等阳离子的迁移会产生限制^[38], 而 As 主要以含氧阴离子形态存在, 相对于低 pH 而言, 较高的 pH 不利于其吸附^[39]; 另一方面土壤有机质会限制 As 的迁移性^[40]. 因此, As 含量在静爆试验区土壤剖面中间层略有增加, 这有可能与 pH 和 TOC 等理化性质变化有关. 落弹区土壤剖面重金属含量总体上偏低, 随深度自上而下变化趋势不明显.

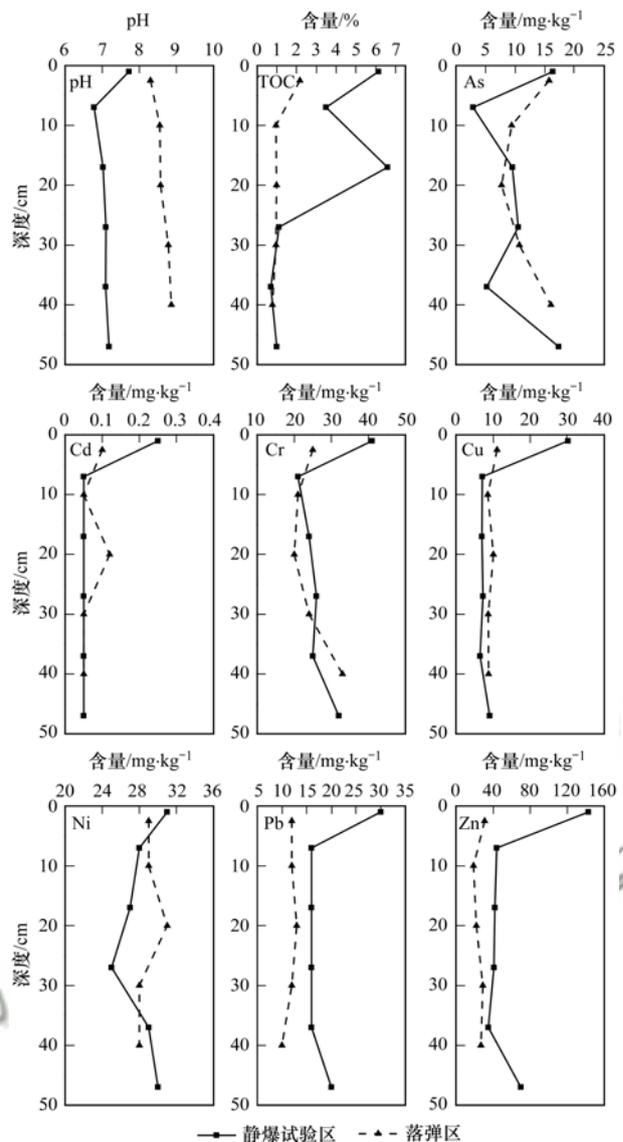


图3 静爆试验区和落弹区 pH、TOC 和重金属含量随深度变化

Fig. 3 Vertical distributions of pH, TOC, and heavy metal contents in the soil profiles versus depth

通常而言, 弹药爆炸会产生巨大的冲击力, 弹药残片随之进入表层土壤中^[15], 后期在雨水渗流作用下, 表层土壤中重金属可能向下层土壤发生迁移. Laporte-Saumure 等^[41]对轻型武器靶场的土壤剖面研究发现, 从表层到 40 cm 土壤层中, 重金属 Cu、Pb、Sb 和 Zn 含量随深度增加而减小, 但在 40~70 cm 土壤层发现 Pb、Cu、Sb 和 Zn 含量有明显增加, 这可能是由于重金属受雨水淋滤影响发生了垂直迁移, 在土壤剖面下层出现了一定的积累. 总体上看, 静爆试验区表层重金属含量最高, 大部分在中间层位并未发生明显的积聚. 瑞士的某靶场土壤剖面也有相似的研究结果^[42], 表层土壤受到 Pb、Sb、Cu 和 Ni 的高度污染, 但是随着深度的增加, 其含量急剧减少. 与静爆试验区相比, 落弹区表层土壤重金属含量偏低, 并且随深度自上而下变化趋势不明显, 这

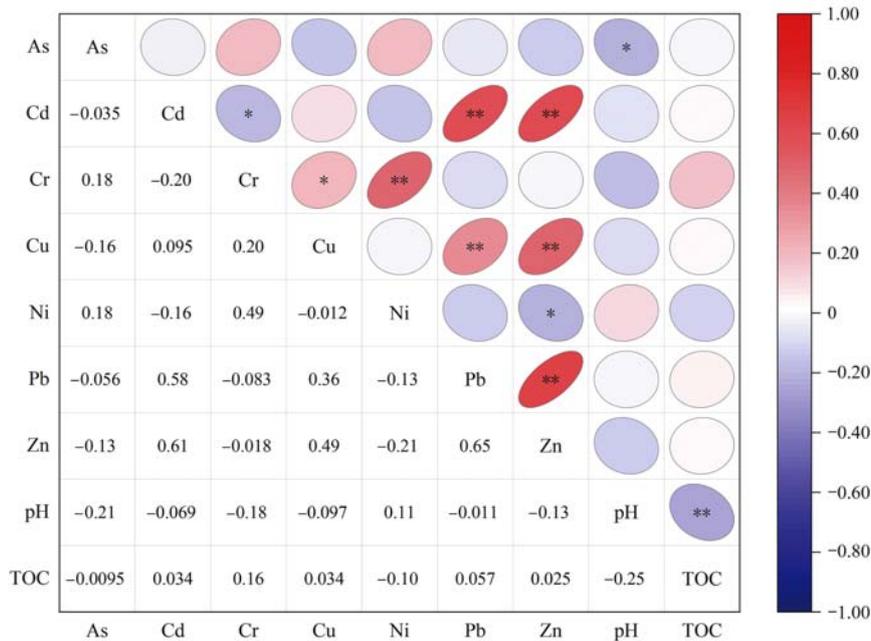
表明弹片重金属输入对落弹区土壤重金属含量未造成明显影响。

3 讨论

3.1 土壤重金属来源解析

相关性分析是解释重金属与土壤理化性质之间关系的重要手段,也是识别重金属来源及主要控制因素的有效途径.土壤重金属含量与理化性质之间的相关性如图4所示.结果表明,pH和TOC之间存

在极显著负相关($P < 0.01$),pH和As之间显著负相关($P < 0.05$).除此之外,pH和TOC与其他重金属含量的相关性并不显著,说明表层土壤中重金属含量差异与土壤理化性质关系不大.各个重金属含量之间相关性分析结果发现,Cd-Pb-Zn和Cu-Pb-Zn两两之间呈极显著正相关($P < 0.01$),说明这几种重金属可能具有相同或相似的来源.Cr和Ni之间存在极显著正相关($P < 0.01$),表明这两种重金属的来源可能相同.



**表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$; 椭圆的大小和方向分别表示相关性系数数值的大小和正负,色柱表示对应的相关性系数

图4 土壤理化性质和重金属含量间的相关性分析

Fig. 4 Correlation between physicochemical properties and heavy metal contents in the soil samples

采用主成分分析可以有效识别重金属元素的污染来源,KMO检验系数为0.641,且Bartlett's检验结果为 $P < 0.01$,说明变量可以进行主成分提取.研究区土壤主成分分析结果见表4,经过最大正交旋转后,根据特征值的结果,提取了3个特征值大于1的成分,这3个主成分的总方差贡献率为74.222%,因而可以解释重金属的绝大部分信息.

主成分PC1的方差贡献率为33.682%,Zn、Pb、Cd和Cu具有较高的正载荷值,分别为0.860、0.856、0.820和0.429,这与相关性分析结果一致,表明这4种重金属具有一定同源性.静爆试验区和生活保障区的土壤重金属含量变异系数表现为高等变异,说明受到了人为污染源的影响.有研究表明,Zn、Pb、Cd和Cu是试验场地常见的重金属污染物^[43,44],Pb是弹头核心的主要组成成分,Zn和Cu是弹壳合金的主要成分^[6],主要用来增加硬度,Cd被用于一些军用设备的涂料^[45].静爆试验过程会导致炸裂开弹药碎片残留在土壤中,其碎片中重金属

会释放进入周围土壤中,从而导致土壤发生重金属污染.另外,在生活保障区发现采自路边的土壤样品中Pb、Zn和Cd含量偏高,这可能与试验车辆行驶过程中发生的轮胎磨损和尾气排放有关^[46,47].因此,第一主成分可解释为与试验活动相关的污染源.

主成分PC2的方差贡献率为23.280%,Cr、Ni和Cu具有较高的正载荷值,分别为0.874、0.766和0.352,其中Cu在PC1和PC2上均有一定的载荷,说明Cu可能存在多重来源.图4显示Cr-Cu和Cr-Ni之间具有显著相关性,说明它们可能有共同来源.有研究认为土壤中Cr、Ni主要与成土母质或自然成土过程相关^[48],通常二者之间表现出高度相关性.Chai等^[34]对与研究区相近的白城-松原草原土壤中重金属源解析发现,Cr、Ni和Cu主要来源于土壤母质的自然输入.结合前文研究结果,大部分土壤样点中Ni、Cr和Cu的含量接近背景值,符合自然源输入特征,因此,第二主成分可理解为土壤母质自然源输入.

主成分 PC3 的方差贡献率为 17.260%, As 具有最大的正载荷 0.794. 相关研究表明, 农药和化肥的使用是土壤 As 的重要来源^[49]. 结合现场调查可知, 生活保障区种植有果树、蔬菜等农作物, 并且会使用农药化肥, 这有可能导致 As 在土壤中积累. 另外

北方冬天供暖以煤等化石作为主要燃料, 土壤中 As 含量变化也可能与化石燃料燃烧有关, 燃烧排放的 As 以烟尘的形式进入大气中, 再通过大气沉降到周围土壤中^[50]. 因此第三主成分可认为与农业活动和煤燃烧等生活源有关.

表 4 研究区域土壤重金属含量主成分分析成分矩阵

Table 4 Component matrix of principal component analysis on heavy metal concentrations in soil of the study area

重金属	初始因子载荷			旋转后因子载荷		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
Zn	0.879	0.202	0.000	0.860	-0.011	-0.273
Pb	0.823	0.174	0.181	0.856	-0.031	-0.083
Cd	0.761	-0.038	0.416	0.820	-0.231	0.168
Cu	0.512	0.467	-0.508	0.429	0.352	-0.656
Cr	-0.234	0.839	-0.097	-0.048	0.874	-0.053
Ni	-0.372	0.703	0.108	-0.146	0.766	0.189
As	-0.246	0.297	0.767	0.074	0.318	0.794
特征值	2.545	1.577	1.074	2.358	1.630	1.208
方差贡献/%	36.362	22.525	15.336	33.682	23.280	17.260
累积贡献率/%	36.362	58.886	74.222	33.682	56.962	74.222

在基于上述定性识别土壤重金属来源的基础上, 进一步采用 APCS-MLR 模型建立了各污染源与重金属含量的函数关系, 根据多元线性回归方程的回归系数分别计算各重金属来源的贡献率, 结果如图 5 所示. 同时 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 回归方程的相关系数 R^2 在 0.634 ~ 0.808 之间, 表明 7 种重金属拟合效果良好.

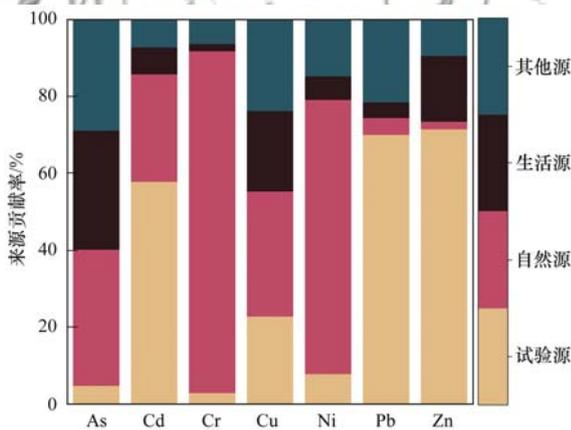


图 5 土壤重金属来源贡献率

Fig. 5 Source contribution ratios of heavy metals in the soils

结合主成分分析结果, 确定了试验污染源、自然源和生活源这 3 个重金属主要来源途径. 试验污染源对 Cd、Pb、Zn 的贡献率较高, 分别为 58%、70% 和 71%; 自然源对 Cr 和 Ni 贡献率最高, 分别为 89% 和 71%; As 和 Cu 来源较为复杂, As 以自然源和生活源的贡献为主, 贡献率分别为 35% 和 31%. 有研究表明土壤 As 的来源既受到成土母质影响, 也与人类活动有关^[51,52]. Cu 以试验污染源、自然源和生活源的贡献为主, 贡献率分别为 23%、

32% 和 21%, 除了上述试验活动和自然输入对 Cu 的影响, 一些农业活动也很容易造成土壤 Cu 的污染^[53,54]. 另外, 存在未知的其他源对 As、Cu 和 Pb 的影响, 分别占 29%、24% 和 22%, 该来源对研究区域土壤中污染物的贡献相对较少.

3.2 不同功能区重金属土壤环境质量评价

不同功能区土壤中各重金属的地累积指数计算结果见图 6. 静爆试验区土壤重金属地累积指数平均值大小为: Cd (0.31) > As (-0.38) > Ni (-0.44) > Zn (-0.52) > Cu (-0.71) > Pb (-0.88) > Cr (-1.16), 落弹区土壤重金属地累积指数平均值大小为: Ni (0.25) > Cd (0.09) > As (-0.43) > Cu (-1.16) > Cr (-1.22) > Pb (-1.50) > Zn (-1.91), 生活保障区土壤重金属地累积指数平均值大小为: Cd (0.06) > As (-0.62) > Cu (-0.89) > Zn (-1.04) > Pb (-1.11) > Ni

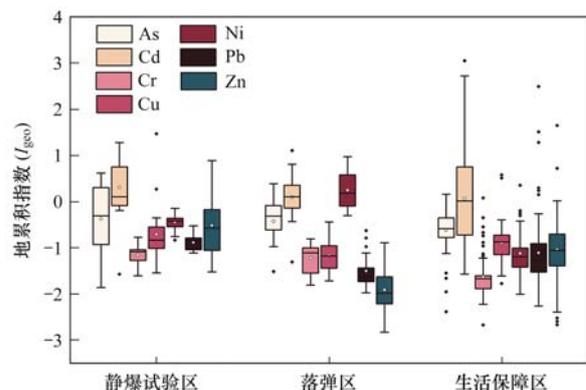


图 6 不同功能区土壤重金属地累积指数评价结果

Fig. 6 Results of geo-accumulation index for heavy metals in the soils of different functional areas

(-1.12) > Cr (-1.63). Cd 的 I_{geo} 均值在 3 个功能区均属于 1 级(无-中度污染), Ni 的 I_{geo} 均值在落弹区处于 1 级(无-中度污染), 其他重金属的 I_{geo} 均值处于无污染水平.

使用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对不同功能区土壤重金属污染情况进行评价, 结果如图 7 所示. 静爆试验区单因子污染指数平均值大小为: Cd (2.01) > As (1.30) > Zn (1.15) > Ni (1.11) > Cu (1.03) > Pb (0.82) > Cr (0.68), 落弹区单因子污染指数平均值大小为: Ni (1.85) > Cd (1.69) > As (1.17) > Cu (0.69) > Cr (0.66) > Pb (0.55) > Zn (0.42), 生活保障区单因子污染指数平均值大小为: Cd (2.20) > As (1.02) > Pb (0.89) > Cu (0.84) > Zn (0.83) > Ni (0.73) > Cr (0.51). 其中, 土壤重金属 Cd 在静爆试验区和生活保障区属于轻度污染, 在落弹区处于轻微污染, As 在 3 个功能区均处于轻微污染, Zn 和 Cu 在静爆试验区处于轻微污染, Ni 在静爆试验区和落弹区处于轻微污染, 其他重金属在 3 个功能区单因子污染指数平均值均小于 1, 属于无污染. 不同功能区土壤重金属内梅罗综合污染指数计算结果为: 生活保障区 (1.85) > 静爆试验区 (1.81) > 落弹区 (1.65), 3 个功能区均属于轻度污染.

潜在生态风险指数法是将土壤重金属含量与毒理学效应联系起来对土壤环境质量进行综合评价, 不同功能区土壤重金属生态风险评价结果见表 5. 潜在生态风险指数大小顺序为: 生活保障区

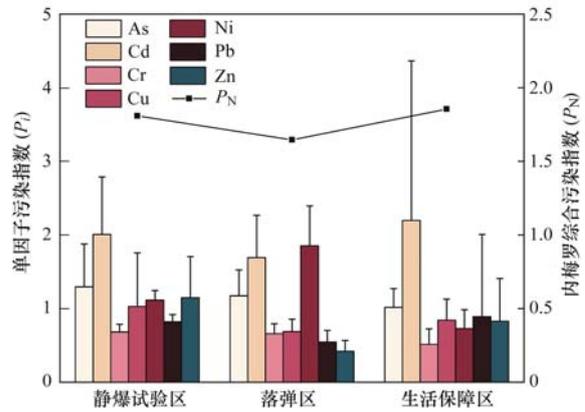


图 7 不同功能区土壤重金属单因子污染指数和内梅罗综合污染指数评价结果

Fig. 7 Results of single-factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index for heavy metals in the soils of different functional areas

(90.49) > 静爆试验区 (88.96) > 落弹区 (79.66), 整体上 3 个区域都处于中度生态污染水平. 7 种重金属平均潜在生态风险大小顺序为: Cd (58.65) > As (11.57) > Ni (6.14) > Cu (4.25) > Pb (3.74) > Cr (1.23) > Zn (0.80), 其中 Cd 的风险贡献率最高, 达到 67.90%, 在落弹区 Cd 的潜在生态风险等级属于中等, 而在静爆试验区和生活保障区土壤中 Cd 的单项重金属潜在生态风险指数超过 60, 达到较强生态风险等级, 这可能与 Cd 具有较高的毒性系数有关^[55]. 地累积指数和单因子污染指数也显示出 Cd 污染水平最高, 因此研究区域 Cd 污染造成的潜在生态风险需引起注意.

表 5 不同功能区土壤重金属潜在生态风险评价结果

Table 5 Potential ecological risk assessment results of heavy metals in the soils of different functional areas

区域	E_i^p							RI	生态风险等级
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn		
静爆试验区	10.02	64.98	1.01	4.16	3.58	4.39	0.82	88.96	中度
落弹区	11.73	50.76	1.32	3.44	9.26	2.73	0.42	79.66	中度
生活保障区	12.96	60.21	1.36	5.15	5.57	4.10	1.15	90.49	中度
平均值	11.57	58.65	1.23	4.25	6.14	3.74	0.80	86.37	中度
风险贡献率/%	13.40	67.90	1.42	4.92	7.11	4.33	0.92		

4 结论

(1) 3 个功能区表层土壤的 As、Cr、Cu、Ni 和 Zn 含量差异显著, 静爆试验区表层土壤的 Cu、Zn、As 和 Cd 含量偏高且空间异质性强, 落弹区表层土壤重金属含量接近背景值且样品间差异较小, 生活保障区表层土壤中重金属 Pb、Cd、Zn 和 Cr 变异系数较大.

(2) 静爆试验区表层土壤样品中重金属含量最高, 重金属在土壤深度剖面上未发生明显的垂直迁

移, 落弹区土壤中重金属基本保持土壤母质背景水平, 受落弹重金属输入影响小.

(3) 源解析分析发现, Zn、Pb 和 Cd 主要与试验活动相关的污染源有关, Cr 和 Ni 主要受成土母质自然源影响, As 和 Cu 来源较为复杂, 其中 As 以自然源和生活源的贡献为主, 而 Cu 与试验污染源、自然源和生活源等都有关系.

(4) 3 个功能区表层土壤中 7 种重金属的综合污染程度为: 生活保障区 > 静爆试验区 > 落弹区, 潜在生态风险评价结果表明, 研究区土壤质量整体上

都处于中等生态风险程度,主要污染因子是 Cd.

参考文献:

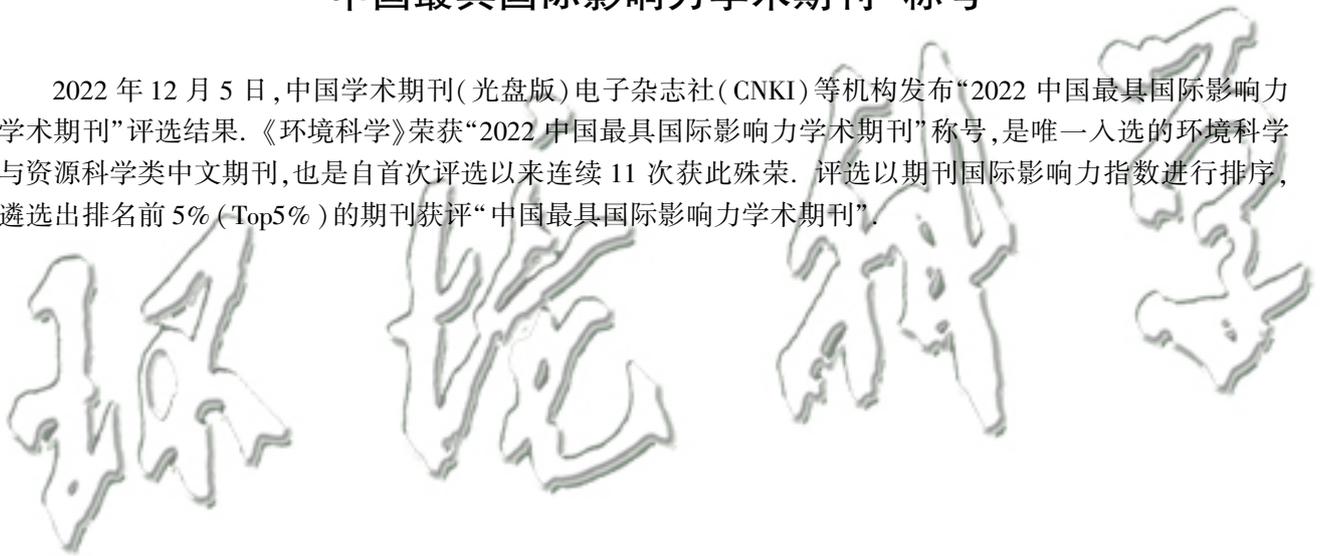
- [1] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 3018-3027.
Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas[J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- [2] Han W, Gao G H, Geng J Y, *et al.* Ecological and health risks assessment and spatial distribution of residual heavy metals in the soil of an e-waste circular economy park in Tianjin, China[J]. Chemosphere, 2018, **197**: 325-335.
- [3] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2822-2833.
Chen W X, Li Q, Wang Z, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- [4] Zentelis R, Lindenmayer D. Bombing for biodiversity-Enhancing conservation values of military training areas[J]. Conservation Letters, 2015, **8**(4): 299-305.
- [5] Radziemska M, Bęś A, Gusiatiń Z M, *et al.* The combined effect of phytostabilization and different amendments on remediation of soils from post-military areas[J]. Science of the Total Environment, 2019, **688**: 37-45.
- [6] Barker A J, Clausen J L, Douglas T A, *et al.* Environmental impact of metals resulting from military training activities: a review[J]. Chemosphere, 2021, **265**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129110.
- [7] 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 等. 炸药的多相界面环境行为与归趋研究进展[J]. 含能材料, 2019, **27**(7): 569-586.
Zhang H J, Zhu Y B, Zhao S P, *et al.* A review on environmental behavior and fate of explosives in multiphase interfaces[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, **27**(7): 569-586.
- [8] Sanderson P, Qi F J, Seshadri B, *et al.* Contamination, fate and management of metals in shooting range soils-a review[J]. Current Pollution Reports, 2018, **4**(2): 175-187.
- [9] Dinake P, Kelebemang R. Critical assessment of mechanistic pathways for chemical remediation techniques applied to Pb impacted soils at shooting ranges-a review[J]. Environmental Pollutants and Bioavailability, 2019, **31**(1): 282-305.
- [10] Reigosa-Alonso A, Dacunha R L, Arenas-Lago D, *et al.* Soils from abandoned shooting range facilities as contamination source of potentially toxic elements: distribution among soil geochemical fractions[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, **43**(10): 4283-4297.
- [11] Manduca P, Al Baraquini N, Al Baraquini L, *et al.* Hospital centered surveillance of births in Gaza, Palestine, 2011-2017 and heavy metal contamination of the mothers reveals long-term impact of wars[J]. Reproductive Toxicology, 2019, **86**: 23-32.
- [12] Jirau-Colón H, Cosme A, Marcial-Vega V, *et al.* Toxic metals deuration profiles from a population adjacent to a military target range (Vieques) and main island Puerto Rico[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, **17**(1), doi: 10.3390/ijerph17010264.
- [13] Lawrence M J, Stemberger H L J, Zolderdo A J, *et al.* The effects of modern war and military activities on biodiversity and the environment[J]. Environmental Reviews, 2015, **23**(4): 443-460.
- [14] Skalny A V, Aschner M, Bobrovitsky I P, *et al.* Environmental and health hazards of military metal pollution[J]. Environmental Research, 2021, **201**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111568.
- [15] 刘玉通, 方振东, 杨琴, 等. 基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1725-1730.
Liu Y T, Fang Z D, Yang Q, *et al.* Evaluation of heavy metal pollution in soils from a training ground based on GIS[J]. Environmental Science, 2012, **33**(5): 1725-1730.
- [16] 刘玉通, 方振东, 杨琴, 等. 某军事区域土壤重金属污染状况及其评价[J]. 后勤工程学院学报, 2010, **26**(1): 62-65.
Liu Y T, Fang Z D, Yang Q, *et al.* State and evaluation of heavy metal pollution of soil from a military area[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2010, **26**(1): 62-65.
- [17] 刘玉通, 方振东, 杨琴, 等. 某轻武器射击场土壤重金属总量及赋存形态分析[J]. 安全与环境学报, 2013, **13**(5): 103-107.
Liu Y T, Fang Z D, Yang Q, *et al.* Analysis of the total concentration and the existing speciation of heavy metals in small arms shooting range soils[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, **13**(5): 103-107.
- [18] 朱勇兵, 赵三平, 李瑞雪, 等. 射击场土壤重金属污染及其生物有效性[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(3): 594-602.
Zhu Y B, Zhao S P, Li R X, *et al.* Heavy metal contamination and bioavailability in shooting range soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(3): 594-602.
- [19] Bai J, Zhao X F. Ecological and human health risks of heavy metals in shooting range soils: a meta assessment from China[J]. Toxics, 2020, **8**(2), doi: 10.3390/toxics8020032.
- [20] Broomandi P, Guney M, Kim J R, *et al.* Soil contamination in areas impacted by military activities: a critical review[J]. Sustainability, 2020, **12**(21), doi: 10.3390/su12219002.
- [21] Sládková A, Száková J, Havelcová M, *et al.* The contents of selected risk elements and organic pollutants in soil and vegetation within a former military area[J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2015, **24**(3): 325-342.
- [22] Liu X D, Nie Y G, Sun L G, *et al.* Eco-environmental implications of elemental and carbon isotope distributions in ornithogenic sediments from the Ross Sea region, Antarctica[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2013, **117**: 99-114.
- [23] 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 等. 我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5519-5525.
Sun S, Geng N B, Guo C C, *et al.* Accumulation characteristics and dietary exposure estimation of heavy metals in vegetables from the eastern coastal region of China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5519-5525.
- [24] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. GeoJournal, 1969, **2**(3): 108-118.
- [25] Aghlidi P S, Cheraghi M, Lorestani B, *et al.* Analysis, spatial distribution and ecological risk assessment of arsenic and some heavy metals of agricultural soils, case study: South of Iran[J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2020, **18**(2): 665-676.
- [26] Wang Z Q, Hong C, Xing Y, *et al.* Spatial distribution and sources of heavy metals in natural pasture soil around copper-molybdenum mine in Northeast China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **154**: 329-336.
- [27] Zahra A, Hashmi M Z, Malik R N, *et al.* Enrichment and geoaccumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of

- the Kurang Nallah-Feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 925-933.
- [28] Kang Z M, Wang S L, Qin J H, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in paddy fields of Fujian province, China[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**, doi: 10.1038/s41598-020-69165-x.
- [29] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [30] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [31] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. *地理研究*, 2020, **39**(6): 1233-1241.
Ma J H, Han C X, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index [J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- [32] 杨安, 王艺涵, 胡健, 等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 886-894.
Yang A, Wang Y H, Hu J, *et al.* Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 886-894.
- [33] Li Y L, Zhu Y B, Zhao S P, *et al.* The weathering and transformation process of lead in China's shooting ranges [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2015, **17**(9): 1620-1633.
- [34] Chai Y, Guo J, Chai S L, *et al.* Source identification of eight heavy metals in grassland soils by multivariate analysis from the Baicheng-Songyuan area, Jilin Province, Northeast China [J]. *Chemosphere*, 2015, **134**: 67-75.
- [35] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys[A]. In: Nielsen D R, Bouma J (Eds.). *Soil Spatial Variability*[M]. Wageningen: Pudoc, 1985.
- [36] 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.
- [37] Fachin P A, Costa Y T, Thomaz E L. Evolution of the soil chemical properties in slash-and-burn agriculture along several years of fallow [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **764**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142823.
- [38] Liu C, Cui J, Jiang G F, *et al.* Soil heavy metal pollution assessment near the largest landfill of China[J]. *Soil & Sediment Contamination*, 2013, **22**(4): 390-403.
- [39] Fan Y R, Zheng C L, Liu H X, *et al.* Effect of pH on the adsorption of arsenic(V) and antimony(V) by the black soil in three systems: performance and mechanism [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.110145.
- [40] Liu J, Wang Z C, Zhao H Y, *et al.* Mercury and arsenic in the surface peat soils of the Changbai Mountains, northeastern China: distribution, environmental controls, sources, and ecological risk assessment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(34): 34595-34609.
- [41] Laporte-Saumure M, Martel R, Mercier G. Characterization and metal availability of copper, lead, antimony and zinc contamination at four Canadian small arms firing ranges [J]. *Environmental Technology*, 2011, **32**(7): 767-781.
- [42] Knechtenhofer L A, Xifra I O, Scheinost A C, *et al.* Fate of heavy metals in a strongly acidic shooting-range soil: small-scale metal distribution and its relation to preferential water flow [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, **166**(1): 84-92.
- [43] Van Meirvenne M, Meclit T, Verstraete S, *et al.* Could shelling in the First World War have increased copper concentrations in the soil around Ypres? [J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, **59**(2): 372-379.
- [44] Cristaldi M, Foschi C, Szpunar G, *et al.* Toxic emissions from a military test site in the territory of Sardinia, Italy [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, **10**(4): 1631-1646.
- [45] Bordeleau G, Martel R, Ampleman G, *et al.* Environmental impacts of training activities at an air weapons range [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, **37**(2): 308-317.
- [46] Wang M E, Zhang H Z. Accumulation of heavy metals in roadside soil in urban area and the related impacting factors [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(6), doi: 10.3390/ijerph15061064.
- [47] Clarke L W, Jenerette G D, Bain D J. Urban legacies and soil management affect the concentration and speciation of trace metals in Los Angeles community garden soils [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **197**: 1-12.
- [48] 易文利, 董奇, 杨飞, 等. 宝鸡市不同功能区土壤重金属污染特征、来源及风险评价[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(11): 2142-2149.
Yi W L, Dong Q, Yang F, *et al.* Pollution characteristics, sources analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in different functional zones of Baoji City [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(11): 2142-2149.
- [49] 张爱国, 魏兴萍. 西南典型岩溶槽谷土壤重金属污染与来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(12): 166-176.
Zhang A G, Wei X P. Pollution and source analysis of heavy metals in soils of typical karst troughs in Southwestern China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(12): 166-176.
- [50] 王玉, 辛存林, 于爽, 等. 南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价: 以江西省兴国县西北部为例[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4756-4766.
Wang Y, Xin C L, Yu S, *et al.* Evaluation of heavy metal content, sources, and potential ecological risks in soils of southern hilly areas: an example from Northwestern Xingguo County, Jiangxi Province [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4756-4766.
- [51] 赵东杰, 王学求. 滇黔桂岩溶区河漫滩土壤重金属含量、来源及潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(4): 1609-1619.
Zhao D J, Wang X Q. Distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in the floodplain soils of the karst area of Yunnan, Guizhou, Guangxi [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(4): 1609-1619.
- [52] 赵靓, 梁云平, 陈倩, 等. 中国北方某城市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5552-5561.
Zhao L, Liang Y P, Chen Q, *et al.* Spatial distribution, contamination assessment, and sources of heavy metals in the urban green space soils of a city in North China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5552-5561.
- [53] 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 等. 工业城市农田土壤重金属时

- 空变异及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1432-1439.
- Li Y L, Lu Y F, Chen W P, *et al.* Spatial-temporal variation and source change of heavy metals in the cropland soil in the industrial city[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1432-1439.
- [54] 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 等. 基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 432-441.
- Xia Z S, Bai Y R, Wang Y Q, *et al.* Spatial distribution and source analysis of soil heavy metals in a small watershed in the mountainous area of southern Ningxia based on PMF model[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 432-441.
- [55] 王敏, 董佳琦, 白龙龙, 等. 浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5949-5957.
- Wang M, Dong J Q, Bai L L, *et al.* Spatial variation and risk assessment of heavy metals in soils of main *Torreya grandis* plantation region in Zhejiang Province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5949-5957.

《环境科学》连续 11 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2022 年 12 月 5 日, 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2022 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果. 《环境科学》荣获“2022 中国最具国际影响力学术期刊”称号, 是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊, 也是自首次评选以来连续 11 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序, 遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.



CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-ni, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Toxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)