

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
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	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

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

夏子书^{1,2}, 白一茹^{1*}, 王幼奇², 高小龙^{1,2}, 阮晓晗^{1,2}, 钟艳霞²

(1. 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021)

摘要: 为探明宁南山区小流域土壤重金属污染分布特征及主要污染源, 确保土壤环境质量. 采集并测定了 260 个表层(0~20 cm)土壤样品重金属 Pb、Ni、Zn、Mn、Cu、Cr 和 Cd. 基于宁夏土壤背景值, 通过单因素和 Nemera 综合指数评价土壤重金属污染现状, 使用潜在生态风险指数对生态环境风险水平进行评价, 利用正定矩阵因子分析法(PMF)和 Kriging 插值相结合的方法分析土壤重金属空间分布及来源. 结果表明, $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 均值分别为 31.42、36.22、62.89、546.18、22.26、61.90 和 0.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 除 Ni 外, 其他元素通常比宁夏土壤背景值高, 但低于农业土壤污染风险选择标准和绿色食品环境质量标准背景值. Nemera 综合指数表明, 轻度、中度和重度重金属污染占比分别为 71.92%、19.23% 和 1.54%. 潜在生态风险以轻微风险为主, 所占比例为 98.85%, 此外还存在极少量中等潜在生态风险等级样点, 占总样点数 1.15%. 来源解析表明宁南山区小流域土壤重金属主要来源为施肥和工业排放混合源(12.6%)、农业活动源(23.5%)、自然母质源(27.6%)、农药使用和矿业开发排放混合源(17.7%)和大气沉降源(18.6%).

关键词: 土壤重金属; 潜在生态风险; 正定矩阵因子分析(PMF); 空间分布; 宁夏

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0432-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105128

Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model

XIA Zi-shu^{1,2}, BAI Yi-ru^{1*}, WANG You-qi², GAO Xiao-long^{1,2}, RUAN Xiao-han^{1,2}, ZHONG Yan-xia²

(1. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to ascertain the distribution characteristics of soil heavy metal pollution and main pollution sources in a small watershed in the southern mountainous area of Ningxia and to ensure the quality of the soil environment, the contents of heavy metals Pb, Ni, Zn, Mn, Cu, Cr, and Cd in 260 surface soil samples (0-20 cm) were collected and determined. Based on the soil background value in Ningxia, the soil heavy metal pollution status and potential ecological risk were evaluated through the single factor index, Nemera composite index, and potential ecological risk index, and the method of combining positive definite matrix factor analysis (PMF) and Kriging interpolation was used to analyze the soil heavy metal spatial distribution and source. The results showed that the average contents of $\omega(\text{Pb})$, $\omega(\text{Ni})$, $\omega(\text{Zn})$, $\omega(\text{Mn})$, $\omega(\text{Cu})$, $\omega(\text{Cr})$, and $\omega(\text{Cd})$ were 31.42, 36.22, 62.89, 546.18, 22.26, 61.90, and 0.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Except for Ni, the other elements were higher than the background value of Ningxia but lower than the background value of agricultural soil pollution risk selection criteria and green food environmental quality standards. The Nemera composite index showed that the proportions of mild, moderate, and severe heavy metal pollution were 71.92%, 19.23%, and 1.54%, respectively. The potential ecological risks were mainly minor risks, accounting for 98.85%. In addition, there were a very small number of samples with medium potential ecological risk levels, accounting for 1.15% of the total number of samples. Source analysis showed that the main sources of soil heavy metals in the small watershed in the mountainous area of southern Ningxia were mixed sources of fertilization and industrial emissions (12.6%), agricultural activity sources (23.5%), natural parent material sources (27.6%), mixed sources of pesticide use and mining development emissions (17.7%), and atmospheric deposition sources (18.6%).

Key words: heavy metals in soil; potential ecological risk; positive matrix factorization (PMF); spatial distribution; Ningxia

近年来土壤污染防治已逐渐成为社会关注的焦点,“十九大”关于建设生态文明相关报告明确指出应加强对土壤污染的防治,扎实推进土壤污染管控^[1].与其他污染物相比,典型土壤污染物重金属具有更易积累、更加隐蔽和难以治理等特点^[2],在土壤中留存时间长,并且不受迁移的影响,一旦超过环境承载力,就会影响植被的生长和繁衍,土壤质量也会受到长期影响^[3].宁南山区王洼流域位于黄土高原西南缘,属于典型的黄土丘陵沟壑区,特殊气候和独特地形条件,导致水土流失严重.由于水土流失引起的重金属面源污染对土壤养分降解和循环具有干扰作用,影响微生物代谢速率从而使土壤酶活性

降低,直接或间接地改变土壤结构^[4].且通过生态系统迁移影响粮食安全,最终进入食物链对人体健康构成严重威胁^[5].宁南山区蕴藏着丰富煤炭资源,在煤矿开采中,大量未经处理的废水和煤渣等残留物流入周围环境增加了土壤中重金属含量^[6].因此,加强宁南山区小流域土壤重金属调查与研究对建设当地生态环境具有重要作用,是实现当前流域

收稿日期: 2021-05-12; 修订日期: 2021-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41867003, 41761049); 宁夏自然科学基金项目(2020AAC03049); 宁夏青年科技人才托举工程项目; 国家重点研发计划重点项目(2018YFC1802906)

作者简介: 夏子书(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤属性的空间分析, E-mail: xzs0131@163.com

* 通信作者, E-mail: yf0823@163.com

安全的必要举措。

随着土壤重金属污染相关研究成为目前关注热点,已有针对土壤重金属污染的研究主要包括累积情况^[7,8]、空间分布特征^[9,10]、污染评价^[11,12]和污染与食品安全^[13]等各方面,而确定土壤重金属来源,特别是搞清土壤重金属是来源于成土母质以及地质活动致使地壳中重金属上移还是人为活动污染所致是相关研究的重点。目前广泛应用的土壤重金属来源解析模型可分为扩散模型和受体模型两类,分别以污染源和污染区作为研究对象。扩散模型将污染物浓度、污染排放速率、排放源到研究区距离和污染物的理化特征等参数代入扩散方程计算污染源贡献率,但其结果受气象因素和复杂化学变化过程的强烈影响。受体模型则包括主成分分析/绝对主成分得分、同位素标记法和正定矩阵因子分析法(PMF)等。其中 PMF 方法不仅可以得出污染源数目和对每个污染源有较大贡献的重金属元素,还可以给出各污染源对某一重金属元素的贡献百分比,因此一些学者利用 PMF 法分析土壤中重金属来源。吕建树^[14]、陈志凡等^[15]和比拉力·依明等^[16]分别对烟台市海岸带、城郊农田和准东露天煤矿采用 PMF 方法分析出不同区域不同重金属元素对各污染源的贡献量和各污染源对研究区平均贡献率。可以看出已有研究主要集中于城市化、农业活动和矿区开采等导致的土壤重金属污染及其污染来源解析,但针对流域尺度土壤重金属污染情况较全面和系统的研究目前相对缺乏。因此通过对宁南山区小流域土壤重金属污染状况的分析,将 PMF 方法与 GIS 技术相结合,对主要污染源、污染贡献量和空间分布特征进行探究,以期对宁南山区小流域综合治理中提出的生态恢复等决策提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁南山区固原市彭阳县王洼镇,地理位置为 $106^{\circ}37'20'' \sim 106^{\circ}39'25''E$, $36^{\circ}04'40'' \sim 36^{\circ}08'10''N$,区域面积约为 9.74 km^2 ,地形复杂,塬、梁、峁、涧和沟壑交错分布,海拔为 $1698 \sim 1903 \text{ m}$;属半湿润半干旱气候,年均温 7.1°C ,气温日较差 27°C ,年均降水量约 400 mm ,时空分布不均,主要集中在 7~9 月,年均蒸发量 1000 mm 左右;土壤类型以黄绵土为主, ω [黏粒($0 \sim 0.002 \text{ mm}$)]、 ω [粉粒($0.002 \sim 0.05 \text{ mm}$)]和 ω [砂粒($0.05 \sim 2 \text{ mm}$)]分别为 7.47% 、 73.57% 和 18.96% , pH 值介于 $7.68 \sim 8.96$,土层深厚,土质疏松;土地利用类型主要为农用地、草地和林地,主要植被类型有人工草地、天

然长芒草地、人工灌木林和玉米地等。经过政府的大力支持和建设,王洼镇近几年工业、交通和教育等方面逐步发展,203 省道横贯南北,位于王洼镇的王洼煤矿是固原市经济社会发展的重要增长点。

1.2 样点布设及土样采集测定

2019 年 6 月,经过初步调查并结合宁南山区地形分布和自然地理条件,根据网格法和 3S 技术,共对 260 个样点进行采集,取样深度 $0 \sim 20 \text{ cm}$,采样间隔约 300 m ,在实际采样过程中根据采样点实际情况略微调整,各采样点土地利用类型包括农用地、林地和草地,最终形成土壤采样点分布(图 1)。根据 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 正方形 4 个顶点和中心点分别采样,用木铲各取约 500 g 表层土,充分混合后从中取 500 g 样品作为代表该采样点的土壤样品,记录该样点编号和经纬度等信息后,装入自封袋带回实验室放置在无太阳直射且阴凉的室内,经自然风干,剔除动植物残体和石块,研磨后过 0.15 mm 尼龙筛,贴上标明编号和地点等信息的标签保存以备日后使用。为避免样品污染,在采样和存储过程中避免与金属器皿直接接触。

依次使用 HNO_3 - HCl - HF - HClO_4 对土壤样品进行消解处理,然后采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES, HK-8100)对 260 个土样中 7 种重金属元素(Pb、Ni、Zn、Mn、Cu、Cr 和 Cd)进行测定,检出限分别为 0.03 、 0.005 、 0.003 、 0.003 、 0.003 、 0.005 和 $0.003 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,检测波长分别为 220.353 、 221.647 、 213.856 、 257.610 、 324.754 、 205.552 和 214.438 nm 。前期进行预实验后,为保证各样点重金属元素均在浓度梯度范围内,故正式实验时 Pb、Ni、Zn、Mn、Cu 和 Cr 选取梯度浓度为 0 、 0.5 、 1 、 2 和 $5 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的标准溶液绘制曲线, Cd 选取梯度浓度为 0 、 0.001 、 0.002 、 0.004 和 $0.006 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的标准溶液绘制曲线。Pb、Ni、Zn、Mn、Cu、Cr 和 Cd 各标准曲线拟合相关系数分别为 0.9996 、 0.9996 、 0.9995 、 0.9996 、 0.9999 、 0.9999 和 0.9998 。为保证实验结果的准确性,每个土壤样点均进行 3 次平行测验,并将均值作为最终土壤重金属浓度。为进行质量控制,使用国家标准土壤样品(GSS-8)确定准确性并计算加标回收率,各重金属元素相对误差控制在 10% 以内, Pb、Ni、Zn、Mn、Cu、Cr 和 Cd 的平均加标回收率分别为: 100.1% 、 95.6% 、 102.5% 、 99.5% 、 96.2% 、 93.4% 和 98.8% ,同时随机抽查异常点,测定结果均在误差允许范围内^[17]。

1.3 污染指数法

单因素污染指数(P_i)和 Nemera 综合污染指数($P_{\text{综}}$)可反映出各重金属元素污染等级以及研究

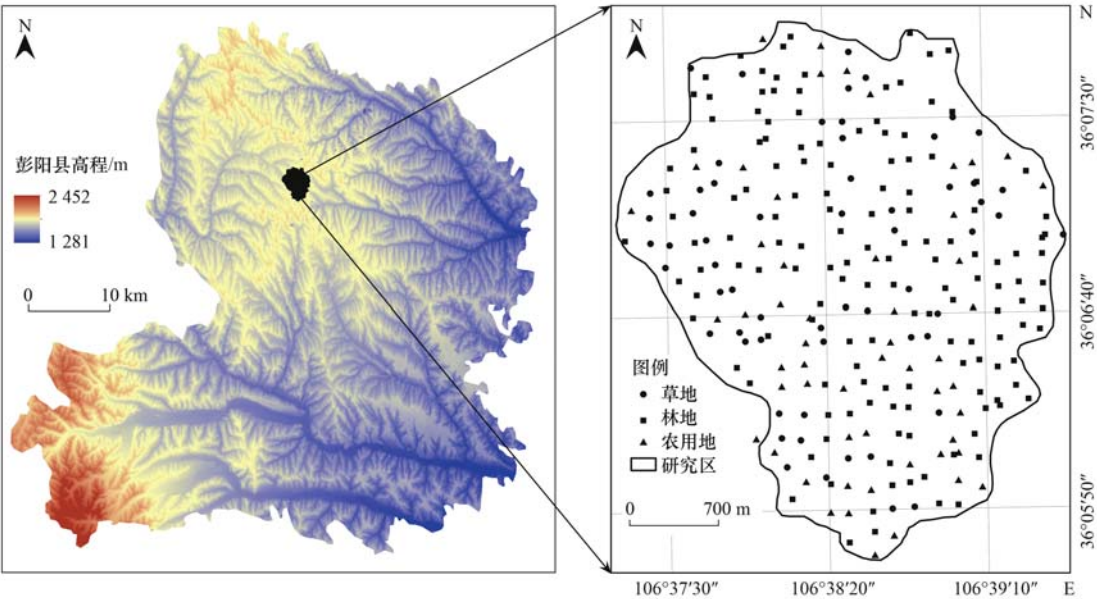


图1 研究区土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

区综合污染水平,其计算公式为:

$$P_i = C_i/S_i \tag{1}$$

$$P_{\text{综}} = \sqrt{[(\bar{P}_i)^2 + (P_{i\text{max}})^2]/2} \tag{2}$$

式中, P_i 为土壤重金属元素 i 污染指数; C_i 为重金属元素 i 实测值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 为重金属 i 的土壤背景值, 本文选择宁夏土壤元素背景值^[18]

[$\omega(\text{Pb})$: $20.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Ni})$: $36.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Zn})$: $58.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Mn})$: $524\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Cu})$: $22.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Cr})$: $60.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Cd})$: $0.11\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]. $P_{\text{综}}$ 为土壤重金属元素的综合污染指数; $\bar{P}_i$ 为单因子污染指数的平均数; $P_{i\text{max}}$ 为最大单因子污染指数. 具体评价等级划分见表 1.

表1 土壤重金属污染评价标准

Table 1 Evaluation standard of heavy metal pollution in soil

等级划分	单因子污染指数(P_i)	综合污染指数($P_{\text{综}}$)	污染等级	污染水平
I	$P_i \leq 0.7$	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全级	清洁
II	$0.7 < P_i \leq 1$	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$	警戒级	尚清洁
III	$1 < P_i \leq 2$	$1 < P_{\text{综}} \leq 2$	轻度污染级	开始受污染
IV	$2 < P_i \leq 3$	$2 < P_{\text{综}} \leq 3$	中度污染级	受重度污染
V	$P_i > 3$	$P_{\text{综}} > 3$	重度污染级	污染已相当严重

1.4 潜在生态风险评价

采用潜在生态风险指数法对宁南山区小流域土壤重金属潜在生态风险进行评价,不仅可以评价单个重金属元素的生态危险,而且可以了解多种重金属对土壤的综合生态风险水平^[17]. 其计算公式如下:

$$E_i = T_i \times (C_i/B_i) \tag{3}$$

$$\text{RI} = \sum_{i=1}^n E_i \tag{4}$$

式中, E_i 为重金属元素 i 的单项潜在生态风险指数; T_i 为重金属元素 i 的毒性响应系数, 本研究中毒性响应系数为 $\text{Cd} = 30 > \text{Pb} = \text{Cu} = \text{Ni} = 5 > \text{Cr} = \text{Mn} = 2 > \text{Zn} = 1$ ^[19]; C_i 为重金属元素 i 实测值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); B_i 为重金属元素 i 背景值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),

本研究选用宁夏土壤重金属背景值; RI 为综合潜在生态风险指数. 潜在生态风险指数分级标准^[20] 如表 2 所示.

表2 潜在生态风险指数分级标准

Table 2 Grade standards of potential ecological hazard index

E_i	RI	生态风险程度
$E_i < 40$	$\text{RI} < 150$	轻微风险
$40 \leq E_i < 80$	$150 \leq \text{RI} < 300$	中度风险
$80 \leq E_i < 160$	$300 \leq \text{RI} < 600$	强度风险
$160 \leq E_i < 320$	$600 \leq \text{RI} < 1\ 200$	很强风险
$E_i \geq 320$	$\text{RI} \geq 1\ 200$	极强风险

1.5 PMF 法

采用美国环保署(EPA)推出的 PMF 5.0 模型对宁南山区小流域土壤重金属进行来源解析^[21]. PMF 是一种以受体模型为基础并利用样本组成对

污染源进行定量化解析的一种数学方法^[22]，1994年由 Paatero 等^[23]首次提出. 与其他方法不同的是，PMF 模型不需要测量污染源成分谱，污染源成分谱和源贡献系数也均为正数，因此得到的分析结果更具实用性；此外，每个数据点的误差估计能够合理且高效地处理不完整和不准确数据. PMF 源解析基本原理如下：假设矩阵 X 为测定样品数据，矩阵 X 可以分解为分数矩阵 G 和载荷矩阵 F ，残差矩阵 E 表示矩阵 X_{ij} 和模型矩阵 Y_{ij} 之间的差值. 其基本方程如下：

$$E_{ij} = X_{ij} - Y_{ij} = X_{ij} - \sum_{h=1}^p G_{ih} F_{hj}$$

$(i = 1, \cdots, m; \quad j = 1, \cdots, n)$

(5)

式中， E_{ij} 为残差矩阵； G_{ih} 为样品 i 在第 h 源中的贡献，即源分数矩阵； F_{hj} 为污染物 j 在源 h 中贡献浓度，即源载荷矩阵.

PMF 模型将实验实测数据分为系数的贡献 (G) 和因子数 (F) 两个矩阵，利用每个取样点污染物含量和不确定度数据按照加权系数对各个点进行加权，得到最小目标函数 Q ：

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[X_{ij} - \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{kj} \right] / u_{ij}$$

(6)

式中， Q 为累积残差， i 为样品数， j 为测定的污染物种类； p 为 PMF 模型找到的合适因子数； F 为每个源的成分矩阵； G 为样品中每种污染物的贡献矩阵； u_{ij} 为每个样品/污染物种类的不确定性，计算方法如下：

$$u_{ij} = \begin{cases} \frac{5}{6} \times L_{MDL} & (x_{ij} \leq L_{MDL}) \\ \sqrt{(RSD \times x_{ij})^2 + (L_{MDL})^2} & (x_{ij} > L_{MDL}) \end{cases}$$

(7)

式中，RSD 为重金属浓度的相对标准偏差， L_{MDL} 为

方法检出限， x_{ij} 为重金属样品浓度.

1.6 数据处理

土壤重金属含量统计分析、污染评价和潜在生态风险评价采用 SPSS 23 和 Excel 2010 软件，PMF 源解析由 EPA PMF 5.0 软件进行，采用 ArcGIS 10.3 软件对土壤重金属进行 Kriging 插值得到空间分布.

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量描述性统计

宁南山区小流域表层土壤重金属 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 均值分别为 31.42、36.22、62.89、546.18、22.26、61.90 和 0.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 3)，依据土壤环境质量农用地污染风险管控标准 (GB 15618-2018)，研究区各重金属元素均小于农业土壤污染风险筛选值，为安全无污染风险等级；根据绿色食品产地环境质量标准 (NY/T 391-2013)，除 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 和 $\omega(\text{Mn})$ 无标准值外，其余各重金属元素均未超过绿色食品产地环境质量标准；除 $\omega(\text{Ni})$ 外，所有重金属元素平均值均不同程度地高于宁夏土壤背景值，特别是 $\omega(\text{Cd})$ 和 $\omega(\text{Pb})$ 均值分别为各自宁夏背景值的 1.64 和 1.53 倍. 变异系数可以反映土壤元素在空间上变化程度与均匀性，通常认为变异系数与人类活动干扰程度成正比，根据变异系数评价准则^[24]，小于 0.1 时呈现较弱变异性，大于 1 时呈现较强变异性，位于二者之间属于中等变异，研究区 7 种重金属均属于中等程度变异，变异系数大小为： $\text{Cd}(0.50) > \text{Cr}(0.47) > \text{Pb} = \text{Zn}(0.37) > \text{Cu}(0.32) > \text{Ni}(0.29) > \text{Mn}(0.23)$. 说明伴随地区发展，宁南山区小流域土壤重金属含量已在一定程度上受到种植和耕作等人类活动的影响.

表 3 研究区表层土壤重金属含量特征¹⁾

Table 3 Characteristics of heavy metal content in surface soil of the study area

元素	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	标准差 /mg·kg ⁻¹	变异系数	宁夏背景值 /mg·kg ⁻¹	GB 15618-2018 II (pH > 7.5)/mg·kg ⁻¹	NY/T 391-2013 (pH > 7.5)/mg·kg ⁻¹
Pb	1.52	61.66	31.42	11.78	0.37	20.6	170	50
Ni	1.54	89.85	36.22	10.42	0.29	36.6	190	—
Zn	2.65	248.96	62.89	23.30	0.37	58.8	300	—
Mn	22.06	1 049.09	546.18	123.85	0.23	524	—	—
Cu	1.44	72.26	22.26	7.15	0.32	22.1	100	60
Cr	0.40	187.18	61.90	29.39	0.47	60.6	250	120
Cd	0.002	0.53	0.18	0.09	0.50	0.11	0.6	0.4

1) “—”表示无标准值；GB 15618-2018 II：《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》土壤污染风险筛选值；NY/T 391-2013：绿色食品产地环境质量标准

2.2 土壤重金属污染评价

根据宁夏土壤背景值计算出各重金属元素 P_i 和 $P_{\text{综}}$ ，如表 4 所示，结果表明 7 种重金属元素

在宁南山区小流域均受到不同程度污染，7 种重金属均有轻度和中度污染样点，其中 Zn、Cu、Cr 和 Cd 重度污染级样点占总样点数百分比分别为

0.38%、0.38%、0.38%和3.46%，通过 P_i 可知Cd是贡献最大的污染因素。 $P_{\text{综}}$ 表明宁南山区小流域整体处于轻度污染状况，轻度、中度和重度污染占比分别为71.92%、19.23%和1.54%，表

明表层土壤在部分样点重金属的综合污染效应已经致使该样点的土壤出现一定程度污染，但污染情况不严重，需要加以重视并做好预防和保护工作。

表 4 不同污染级别样点数占总数百分比

Table 4 Percentages of sites at different pollution levels

元素	污染指数	不同污染级别样点比例/%				
		安全级	警戒级	轻度污染级	中度污染级	重度污染级
Pb	P_i	15.77	6.54	61.54	16.15	0
Ni	P_i	13.46	38.46	33.89	1.15	0
Zn	P_i	3.08	22.31	71.15	3.08	0.38
Mn	P_i	5.38	34.62	59.62	0.38	0
Cu	P_i	10.77	38.46	49.62	0.77	0.38
Cr	P_i	21.92	26.92	47.31	3.46	0.38
Cd	P_i	18.08	8.85	38.08	31.54	3.46
	$P_{\text{综}}$	1.54	5.77	71.92	19.23	1.54

2.3 土壤重金属潜在生态风险评价

为深入探讨土壤重金属状况，以确定其对生态环境的影响，采用潜在生态风险指数法对宁南山区小流域土壤进行评价，评价结果如表5所示，单项潜在生态风险指数均值大小依次为：Cd>Pb>Cu>Ni>Mn>Cr>Zn，与武汉市集中饮用水源地土壤^[25]得出的结论相同。研究区内所有土壤样品中Pb、Ni、Zn、Mn、Cu和Cr的单因子潜在生态风险指数均小于40，表现为轻微生态风险；Cd的潜在生态风险指数为1.34~145.36，存在轻微至强生态风险，所占比例分别为37.69%、53.85%和8.46%，以中等生态风险为主，所占比例超过总样点数的一半。以上结果表明，该区主要潜在生态风险因子是Cd，而其它重金属元素对生态环境影响相对较小。造成土壤7种重金属潜在生态风险水平存在

差异的主要原因有两个：一方面各种重金属毒性系数不同，由于各种重金属具有大小不同的毒性系数，毒性系数较大的重金属对 E_i 值贡献更大，如Cd毒性系数为30，毒性系数较小的重金属对 E_i 值影响较小，如Zn毒性系数为1，Cr毒性系数为2；另一方面由于 $\omega(\text{Cd})$ 平均值高出宁夏土壤背景值较多，这意味着单因子污染指数相对高于其他重金属，综合在7种重金属中，Cd单因子潜在生态风险指数突出。

宁南山区小流域7种土壤重金属综合潜在生态风险指数RI介于12.95~173.23之间，均值为71.88，整体状况良好，存在轻微至中等潜在生态风险，以轻微风险为主，所占比例为98.85%，此外还存在极少量的中等潜在生态风险等级的样点，仅占总样本数的1.15%。

表 5 研究区土壤重金属潜在生态风险指数分级统计

Table 5 Classification statistics of potential ecological risk index of heavy metals in surface soil of the study area

危害指数		分布范围	平均值	各级样本数				
				轻微	中	强	很强	极强
Ei	Pb	0.37 ~ 10.97	7.63	260	0	0	0	0
	Ni	0.21 ~ 12.27	4.95	260	0	0	0	0
	Zn	0.05 ~ 4.23	1.24	260	0	0	0	0
	Mn	0.08 ~ 4.00	2.08	260	0	0	0	0
	Cu	0.32 ~ 16.35	5.04	260	0	0	0	0
	Cr	0.01 ~ 6.18	2.04	260	0	0	0	0
	Cd	1.34 ~ 145.36	48.90	98	140	22	0	0
RI	12.95 ~ 173.23	71.88	257	3	0	0	0	

2.4 土壤重金属来源解析

采用PMF模型对宁南山区小流域土壤重金属进行来源解析。将数据导入EPA PMF 5.0软件后，设置因子数目使软件运行，过多或过少的因子数对源解析结果都有显著影响，本研究分别设置3~6个因子数进行多次运算后，确定了因子数为5时Q

(Robust)与Q(True)相接近，真实含量值与模型预测值之间达到最佳拟合效果，且大部分残差处于-3~3之间，结果见表6。从中可知，除Ni和Zn元素的拟合曲线 R^2 为0.5696和0.5391外，其余元素拟合曲线 R^2 均大于0.9，表明PMF软件整体解析效果较好，所选取的因子个数能够较好地解释实测数据信息。

表 6 元素观测值和模型预测值拟合结果
Table 6 Results of fitting observed values and model predictions for elements

元素	斜率	截距	R^2
Pb	1.00	-0.05	0.998 8
Ni	0.55	14.75	0.569 6
Zn	0.49	33.94	0.539 1
Mn	0.99	-0.40	0.953 3
Cu	0.85	3.15	0.927 9
Cr	1.01	-0.79	0.988 8
Cd	0.97	0.005	0.986 6

PMF 软件分析所得结果见图 2。从中可知,因子 1 主要贡献元素为 Cr,贡献率为 81.1%。通常来说,自然母质是土壤中 Cr 的主要来源,受人为影响较小^[20]。但本研究区中有超过 50% 的土壤样点 $\omega(\text{Cr})$ 大于宁夏土壤背景值,处于受污染状态,因此判断该小流域土壤中 $\omega(\text{Cr})$ 受到人为活动的影响^[26,27]。有报道指出化肥中 $\omega(\text{Cr})$ 较高,一般氮肥和过磷酸钙中 $\omega(\text{Cr})$ 分别为 5 ~ 3 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 50 ~ 250 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,据统计,世界上通过肥料输入到土壤中的 Cr 为 0.03 ~ 0.38 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[28],过量施肥会造成 Cr 积累。位于研究区北部的王洼矿业是宁南山区大型能源基地,煤矿开采等工业生产活动会使用含有 Cr 等重金属元素的原料,生产过程中产生的“三废”排入土壤造成 Cr 累积^[29]。因此,因子 1 可能为施肥和工业排放混合源。

Cd 可作为因子 2 的标志元素,贡献率为 78.9%。有研究表明,肥料、塑料薄膜、大气沉降、淤泥灌溉和金属矿山废水等均会导致 Cd 在土壤中累积^[30],在本研究调研与采样时发现,部分农户种植玉米等农作物时,会采用地膜覆盖地表,而地膜覆盖会导致土壤中 $\omega(\text{Cd})$ 上升。此外磷肥中富含 Cd^[31],由于种植玉米等需施肥,也导致了研究区 Cd 的积累。因此,因子 2 可能为农业活动源。

因子 3 贡献率高的元素为 Mn、Zn 和 Ni,贡献率分别为 67.1%、55% 和 51.5%。Mn 由于受人类活动干扰较小,通常用作自然源的标志,主要受地壳活动和土壤侵蚀影响^[32]。地壳表层 $\omega(\text{Mn})$ 较高,宁南山区小流域群山环绕,风化侵蚀作用会使岩石中 Mn 元素在土壤累积。 $\omega(\text{Ni})$ 平均值未超过宁夏土壤背景值,且 Ni 是一种易于与土壤中氧化物结合的铁族元素,与成土母质有密切联系^[33]。 $\omega(\text{Mn})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的平均值分别为宁夏土壤背景值的 1.04 和 1.07 倍,这与宁夏土壤背景值很接近,并且 Mn、Zn 和 Ni 的变异系数分别为 0.23、0.37 和 0.29,变异系数均较小,说明这些元素受人类干扰影响较小,主要受自然地质背景影响,单因素污染指数法和潜在

生态风险指数法的评价结果也可以验证这一点,这些重金属基本都处于安全级别和轻度污染并且很少对生态环境造成危害。许多学者也指出,Ni 和 Mn 等主要受成土母质的影响^[34]。因此,因子 3 被认为是自然母质源。

因子 4 对 Cu、Pb、Ni、Zn 和 Cr 均有贡献率,其中对 Cu 的贡献率最高,达到 60.9%。农药生产中使用大量 Cu,主要以 CuSO_4 的形式用作果树杀虫剂^[35]。通过实地调研可知,小流域种植有较多杏树和桃树等果树,为了避免遭受虫害且保证水果品质,当地农民会使用杀虫剂等农药,这一过程可能导致土壤中 Cu 积累的风险。在煤矿开采过程中也会产生大量富含 Cu 元素的粉尘,粉尘通过大气沉降附着在周围土壤中并长期积累,导致煤矿周围土壤 $\omega(\text{Cu})$ 增高^[36]。此外,在矿业开发过程中产生大量的尾矿和残渣,堆积在地表,通过雨水淋滤等导致尾矿和废渣中的重金属元素向周围扩散,迁移到土壤中,在土壤中富集,增加了其附近土壤 $\omega(\text{Cu})$ ^[37]。因此因子 4 可代表农药使用和矿业开发排放混合源。

因子 5 的主要载荷元素为 Pb,贡献率为 72.3%。有研究表明 Pb 常作为交通运输源的标志污染元素^[38]。机动车尾气排放^[39]、轮胎磨损^[40]和汽油添加剂的使用^[41]导致 Pb 等元素在土壤中积累,特别是重型车辆行驶时,会导致大量 Pb 排放^[42]。尽管 2000 年起全国汽车停用含 Pb 汽油,但由于重金属难以治理且不易迁移等特点,仍使其在土壤中存留。实地调研表明,本研究区虽远离城区,但少数取样点离交通干线较近,这些污染物通过大气沉降及空气粉尘吸附作用在土壤中积累,导致土壤中含有一定量 Pb。同时在周围煤矿开采的作用下会产生含有 Pb 等重金属的粉尘,含 Pb 粉尘随着干湿沉降一同进入土壤表层并长期积累^[43],增加了其土壤中的 $\omega(\text{Pb})$ 。土壤重金属富集的一个重要途径是大气沉降,随着颗粒物的远距离飘散,Pb 可随着降尘遍布于研究区的大部分区域进而造成污染。因此,因子 5

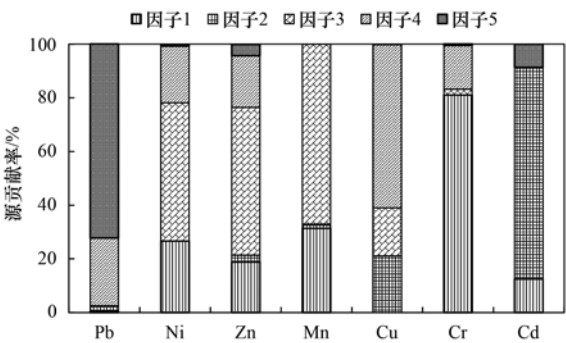


图 2 各因子对重金属浓度分布的贡献率

Fig. 2 Factor profile of heavy metals in soil from PMF model

可认为是大气沉降源。

综上,宁南山区小流域土壤重金属主要来源为施肥和工业排放混合源、农业活动源、自然母质源、农药使用和矿业开发排放混合源以及大气沉降源,所占比例分别为 12.6%、23.5%、27.6%、17.7% 和 18.6%。

2.5 土壤重金属含量空间分布

应用 ArcGIS 对宁南山区小流域土壤重金属元素进行 Kriging 插值,得到 7 种重金属含量空间分布,见图 3。从中可知,Ni、Zn 和 Mn 空间分布规律相

似,高值集中在西北部、中部和西南部, $\omega(\text{Mn})$ 高值区($589.63 \sim 677.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)占 20.78%, $\omega(\text{Zn})$ 高值区($87.3 \sim 224.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)占 5.83%, $\omega(\text{Ni})$ 高值区($41.23 \sim 47.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)占 8.42%;低值主要分布于东北部、东南部和西部。 $\omega(\text{Pb})$ 在研究区北部、中部和西南部存在高值分布,高值区($35.52 \sim 42.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)占 15.99%,低值分布在西部和东北部。 $\omega(\text{Cd})$ 高值分布于中部、东部和西南部,高值区($0.22 \sim 0.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)占 19.92%,低值主要分布于东北部。 $\omega(\text{Cu})$ 高值呈西南-东向条带状分

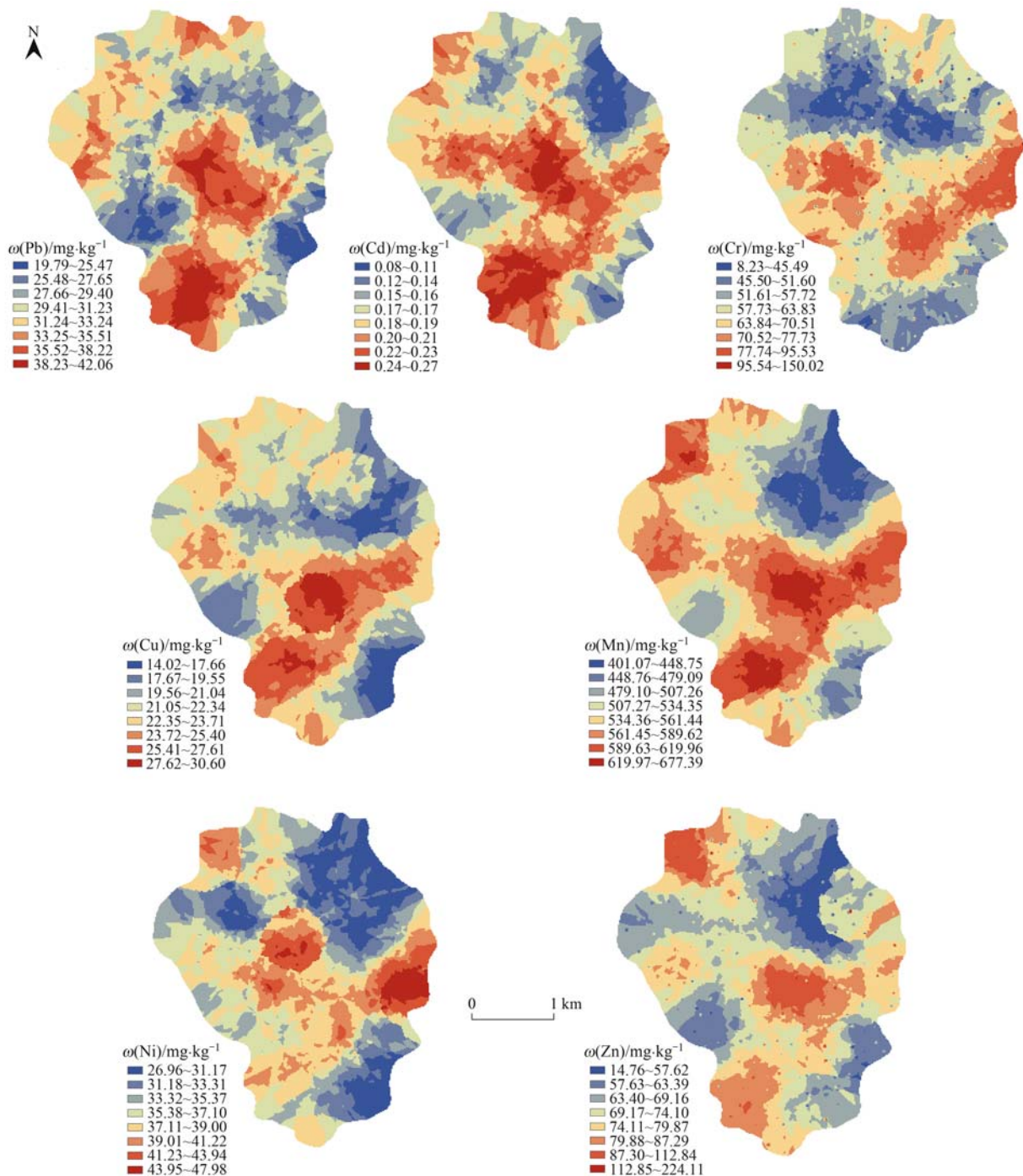


图 3 研究区土壤重金属空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil heavy metals in study area

布, 高值区 ($25.41 \sim 30.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 占 12.08%。 $\omega(\text{Cr})$ 高值区 ($77.74 \sim 150.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 占 7.95%, 主要分布在西部和东南部。

除 $\omega(\text{Cr})$ 和 $\omega(\text{Ni})$ 外, 其余 5 种重金属含量在西南部均具有较高值, 结合实地考察可知, 研究区西南部为王洼流域居民集中生活地区, 203 省道穿其而过, 较频繁的人类活动和交通运输是导致 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Mn})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 在西北部较高的原因, 而 Ni 主要受到成土母质的影响, 故人类活动对其影响较小。有研究表明^[44], Cr 与地形因子之间存在一定程度的相关性, 高程主要通过影响土壤侵蚀和种植活动来影响重金属向土壤的迁移, 高海拔地区水土流失较为严重, 且耕地分布主要以中低海拔地区为主, 因此 Cr 随土壤迁移在中低海拔区域积累。研究区以北分布有王洼煤业等工矿企业, 同时该区域主导风向为西北风, 导致矿业开发过程中粉尘和废渣排放产生的重金属 Cu 等向东南方向扩散, 使其在研究区西北部也存在高值分布。部分重金属元素在中部具有较高值可能因为研究区中部有较多耕地和果树种植地, 故在玉米和桃树等种植过程中存在地膜覆盖和化肥农药使用情况, 导致其重金属含量较高。

3 结论

(1) 宁南山区小流域土壤重金属 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 均值分别为 31.42、36.22、62.89、546.18、22.26、61.90 和 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 除 $\omega(\text{Ni})$ 外, 其他元素通常比宁夏土壤背景值高, 但均低于农业土壤污染风险选择标准和绿色食品环境质量标准。

(2) 以宁夏土壤背景值为标准, $P_{\text{综}}$ 表明宁南山区小流域轻度、中度和重度重金属污染占比分别为 71.92%、19.23% 和 1.54%。RI 范围为 12.95 ~ 173.23, 以轻微风险为主, 所占比例为 98.85%, 此外还存在极少量的中等潜在生态风险等级样点, 占 1.15%。

(3) PMF 法进行来源解析, 结果表明宁南山区小流域土壤重金属主要来源为施肥和工业排放混合源 (12.6%)、农业活动源 (23.5%)、自然母质源 (27.6%)、农药使用和矿业开发排放混合源 (17.7%) 以及大气沉降源 (18.6%)。

(4) Ni、Zn 和 Mn 的空间分布规律相似, 高值集中在西北部、中部和西南部, 低值在东北部、东南部和西部。北部、中部和西南部 $\omega(\text{Pb})$ 高, 低值在西部和东北部。 $\omega(\text{Cd})$ 高值分布于中部、东部和西南部, 低值分布于东北部。 $\omega(\text{Cu})$ 高值呈条带状分布, 主

要在东南部。 $\omega(\text{Cr})$ 高值主要分布在西部和东南部。

参考文献:

- [1] 刘媚媚, 高凤杰, 韩晶, 等. 黑土区小流域土壤重金属生态危害与来源解析[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(11): 12-21.
Liu M M, Gao F J, Han J, et al. Ecological risk and source analysis of soil heavy metals in a Mollisol watershed of China[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(11): 12-21.
- [2] Tang J Y, Zhang J C, Ren L H, et al. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: a review on heavy metal pollution[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 242: 121-130.
- [3] 安婧, 宫晓双, 陈宏伟, 等. 沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 37-44.
An J, Gong X S, Chen H W, et al. Temporal and spatial characteristics and health risk assessments of heavy metal pollution in soils of Shenfu irrigation area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(1): 37-44.
- [4] Kandeler F, Kampichler C, Horak O. Influence of heavy metals on the functional diversity of soil microbial communities[J]. Biology and Fertility of Soils, 1996, 23(3): 299-306.
- [5] 何林华, 高小红. 三江源区土壤重金属的累积特征及潜在生态风险评估——以青海省玉树县为例[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1071-1080.
He L H, Gao X H. Assessment of potential ecological risk for soil heavy metals in Sanjiang Source Region: a case study of Yushu County, Qinghai Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(6): 1071-1080.
- [6] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 270-279.
Liu S, Wu Q Y, Cao X J, et al. Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 270-279.
- [7] 黄敏, 杨海舟, 余萃, 等. 武汉市土壤重金属累积特征及其污染评价[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 135-139.
Huang M, Yang H Z, Yu C, et al. Accumulation characteristics and pollution evaluation of heavy metals in soils of Wuhan City[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 135-139.
- [8] 姚荣江, 杨劲松, 谢文萍, 等. 江苏沿海某设施农区土壤重金属累积特点及生态风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1498-1506.
Yao R J, Yang J S, Xie W P, et al. Accumulation and potential ecological risk assessment of heavy metals in greenhouse soils from coastal area of Jiangsu Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(8): 1498-1506.
- [9] 雷凌明, 喻大松, 陈玉鹏, 等. 陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 88-96.
Lei L M, Yu D S, Chen Y P, et al. Spatial distribution and sources of heavy metals in soils of Jinghui Irrigated Area of Shaanxi, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(6): 88-96.
- [10] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 710-716.
Wang Y Q, Bai Y R, Wang J Y. Distribution of urban soil heavy

- metal and pollution evaluation in different functional zones of Yinchuan City[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 710-716.
- [11] 吕占禄, 张金良, 陆少游, 等. 某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2483-2492.
- Lü Z L, Zhang J L, Lu S Y, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of heavy metal pollution in surface soil around a municipal solid waste incineration power plant [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2483-2492.
- [12] 杨子鹏, 肖荣波, 陈玉萍, 等. 华南地区典型燃煤电厂周边土壤重金属分布、风险评估及来源分析[J]. *生态学报*, 2020, **40**(14): 4823-4835.
- Yang Z P, Xiao R B, Chen Y P, *et al.* Heavy metal distribution, risk assessment and source analysis of soil around a typical coal-fired power plant in South China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(14): 4823-4835.
- [13] Notten M J M, Oosthoek A J P, Rozema J, *et al.* Heavy metal concentrations in a soil-plant-snail food chain along a terrestrial soil pollution gradient[J]. *Environmental Pollution*, 2005, **138**(1): 178-190.
- [14] 吕建树. 烟台海岸带土壤重金属定量源解析及空间预测[J]. *地理学报*, 2021, **76**(3): 713-725.
- Lü J S. Source apportionment and spatial prediction of heavy metals in soils of Yantai coastal zone[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(3): 713-725.
- [15] 陈志凡, 化艳旭, 徐薇, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田重金属污染源解析[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(1): 276-283.
- Chen Z F, Hua Y X, Xu W, *et al.* Analysis of heavy metal pollution sources in suburban farmland based on positive definite matrix factor model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 276-283.
- [16] 比拉力·依明, 阿不都艾尼·阿不里, 师庆东, 等. 基于PMF模型的准东煤矿周围土壤重金属污染及来源解析[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(9): 185-192.
- Imin B, Abliz A, Shi Q D, *et al.* Pollution and source identification of heavy metals in surrounding soils of Eastern Junggar Coalfield based on PMF model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(9): 185-192.
- [17] 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 等. 基于GIS和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2885-2894.
- Bai Y R, Zhang X, Zhao Y P, *et al.* Spatial distribution characteristics and source apportionment of soil heavy metals in Chinese wolfberry land based on GIS and the receptor model[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2885-2894.
- [18] 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: 中国科学出版社, 1990.
- [19] 张富贵, 彭敏, 王惠艳, 等. 基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4197-4209.
- Zhang F G, Peng M, Wang H Y, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals at township scale in the high background of heavy metals, Southwestern, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4197-4209.
- [20] 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al.* Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in Southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- [21] 夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 等. 基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5656-5667.
- Xia Z S, Wang Y Y, Zhong Y X, *et al.* Spatial distribution characteristics and source apportionment of soil PAHs in Shizuishan City based on GIS and PMF model [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5656-5667.
- [22] 董骥睿, 胡文友, 黄标, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田土壤重金属源解析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(7): 2103-2111.
- Dong L R, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source appointment of heavy metals in suburban farmland soils based on positive matrix factorization[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(7): 2103-2111.
- [23] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [24] Wendroth O, Ritchey E L, Nambuthiri S, *et al.* Spatial variability of soil physical properties[A]. In: Gliński J, Horabik J, Lipiec J (Eds.). *Encyclopedia of Agrophysics*, Dordrecht: Springer, 2011: 827-839.
- [25] 朱静, 侯耀宗, 邹书成. 武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3215-3222.
- Zhu J, Hou Y Z, Zou S C. Spatio-temporal distribution characteristic and risk assessment of heavy metals in soils around Centralized drinking water Sources in Wuhan[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3215-3222.
- [26] 郭晓东, 孙岐发, 赵勇胜, 等. 珲春盆地农田重金属分布特征及源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(9): 1875-1883.
- Guo X D, Sun Q F, Zhao Y S, *et al.* Distribution and sources of heavy metals in the farmland soil of the Hunchun basin of Jilin Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(9): 1875-1883.
- [27] 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 等. 太渴河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 5073-5081.
- Li W D, Cui Y X, Zeng C C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils in the Taige Canal Valley [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 5073-5081.
- [28] 艾建超, 王宁, 杨净. 基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3530-3536.
- Ai J C, Wang N, Yang J. Source apportionment of soil heavy metals in Jiapigou goldmine based on the UNMIX model[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3530-3536.
- [29] 于元赫, 吕建树, 王亚梦. 黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2865-2874.
- Yu Y H, Lü J S, Wang Y M. Source identification and spatial distribution of heavy metals in soils in typical areas around the Lower Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2865-2874.
- [30] 曾庆庆, 付天岭, 邹洪琴, 等. 贵州省某县辣椒种植区土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(1): 102-113.
- Zeng Q Q, Fu T L, Zou H Q, *et al.* Spatial distribution

- characteristics and sources of heavy metals in soil in a pepper growing area of county in Guizhou Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(1): 102-113.
- [31] 黄青青, 刘星, 张倩, 等. 磷肥中镉的环境风险及生物有效性分析[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(2): 156-161.
Huang Q Q, Liu X, Zhang Q, *et al.* Evaluating the environmental risk and the bioavailability of Cd in phosphorus fertilizers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(2): 156-161.
- [32] 易文利, 董奇, 杨飞, 等. 陕西省宝鸡市不同功能区土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境与职业医学*, 2018, **35**(11): 1019-1024, 1030.
Yi W L, Dong Q, Yang F, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in different urban functional areas of Baoji City, Shaanxi Province[J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2018, **35**(11): 1019-1024, 1030.
- [33] 徐夕博, 吕建树, 徐汝汝. 山东省沂源县土壤重金属来源分布及风险评价[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(9): 216-223.
Xu X B, Lü J S, XU R R. Source spatial distribution and risk assessment of heavy metals in Yiyuan county of Shandong province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(9): 216-223.
- [34] Chen H Y, Teng Y G, Lü S J, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of trace metals in surface soils of Beijing metropolitan, China [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 1002-1011.
- [35] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [36] 庞文品, 秦樊鑫, 吕亚超, 等. 贵州兴仁煤矿区农田土壤重金属化学形态及风险评估[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(5): 1468-1478.
Pang W P, Qin F X, Lü Y C, *et al.* Chemical speciations of heavy metals and their risk assessment in agricultural soils in a coal mining area from Xingren County, Guizhou Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(5): 1468-1478.
- [37] 王斐, 黄益宗, 王小玲, 等. 江西某铜矿冶炼厂周边土壤重金属生态风险评价[J]. *环境化学*, 2014, **33**(7): 1066-1074.
Wang F, Huang Y Z, Wang X L, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of a copper smelting plant in Jiangxi Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(7): 1066-1074.
- [38] Milenkovic B, Stajic J M, Gulan L, *et al.* Radioactivity levels and heavy metals in the urban soil of Central Serbia [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(21): 16732-16741.
- [39] Pant P, Harrison R M. Critical review of receptor modelling for particulate matter: a case study of India [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **49**: 1-12.
- [40] Duong T T T, Lee B K. Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, **92**(3): 554-562.
- [41] Hjortenkrans D, Bergbäck B, Häggerud A. New metal emission patterns in road traffic environments [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **117**(1-3): 85-98.
- [42] Zhu W, Bian Bo, Li L. Heavy metal contamination of road-deposited sediments in a medium size city of China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **147**(1-3): 171-181.
- [43] 陈锦芳, 方宏达, 巫晶晶, 等. 基于 PMF 和 Pb 同位素的农田土壤中重金属分布及来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(5): 1026-1035.
Chen J F, Fang H D, Wu J J, *et al.* Distribution and source apportionment of heavy metals in farmland soils using PMF and lead isotopic composition [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(5): 1026-1035.
- [44] 张敏, 陈海, 史琴琴, 等. 黄土丘陵沟壑区耕层土壤重金属空间分异及影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(11): 2465-2475.
Zhang M, Chen H, Shi Q Q, *et al.* Spatial heterogeneity of heavy metals and influencing factors in the surface cultivated soil of the loess hilly-gully region, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(11): 2465-2475.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)