

doi: 10.12029/gc20221025004

毕书海, 周文辉, 袁国礼, 高琪, 李永春, 邰苏日嘎拉. 2025. 宁夏固原市原州区土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 中国地质, 52(1): 1-11.

Bi Shuhai, Zhou Wenhui, Yuan Guoli, Gao Qi, Li Yongchun, Tai Surigala. 2025. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soils in the Yuanzhou District of Guyuan City, Ningxia[J]. Geology in China, 52(1): 1-11(in Chinese with English abstract).

宁夏固原市原州区土壤重金属分布特征及其生态风险评价

毕书海¹, 周文辉¹, 袁国礼², 高琪¹, 李永春¹, 邰苏日嘎拉¹

(1. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:【研究目的】通过研究宁夏固原市原州区表层土壤重金属含量及空间分布特征, 对该地区进行生态风险评价, 明确原州区表层土壤重金属累积情况。【研究方法】系统采集了研究区表层土壤样品 12988 件, 获取了 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 等 8 种重金属含量, 采用单因子指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法进行土壤重金属生态风险评价。【研究结果】与宁夏自治区表层土壤元素背景值相比, 原州区表层土壤 8 种重金属富集系数分别为 As(1.01)、Cd(1.42)、Cr(1.04)、Cu(0.99)、Hg(1.03)、Ni(0.81)、Pb(1.01)和 Zn(1.07)。土壤中 8 种重金属空间分布特征相似, 高值区主要分布在六盘山东西两侧、固原市区、张易镇和黄铎堡镇等人类活动频繁区域, 在东北部第四纪黄土覆盖区的炭山乡、寨科乡土壤重金属富集程度较低。单因子指数法评价结果显示, 原州区土壤整体清洁, 无污染。内梅罗综合污染指数法分析结果显示, 土壤各重金属元素污染指数均小于 0.7, 属清洁水平, 污染风险等级为安全。潜在生态危害指数法分析结果显示, Cd 和 Hg 单元素潜在危害指数达到中等风险水平, 重金属综合潜在生态危害指数为轻微风险。【结论】固原市原州区土壤重金属生态风险较低, 受人类活动影响的区域, 表层土壤重金属存在轻微富集。

关键词: 土壤重金属; 污染指数; 生态风险; 环境地质调查工程; 固原市; 宁夏

创 新 点: 采用多种评价方法综合评价了宁夏固原市原州区表层土壤重金属生态风险; 结合 GIS 空间分析和主成分分析, 探讨了原州区表层土壤重金属富集的主要控制因素。

中图分类号: X53;X826 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)01-0001-11

Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soils in the Yuanzhou District of Guyuan City, Ningxia

BI Shuhai¹, ZHOU Wenhui¹, YUAN Guoli², GAO Qi¹, LI Yongchun¹, TAI Surigala¹

(1. Hohhot General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China;
2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

收稿日期: 2022-10-25; 改回日期: 2023-02-28

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20191015)资助。

作者简介: 毕书海, 男, 1994 年生, 工程师, 主要从事环境地质研究工作; E-mail: 2632624258@qq.com。

通讯作者: 周文辉, 男, 1980 年生, 正高级工程师, 主要从事土地质量地球化学调查、生态地质调查研究工作; E-mail: zhouwenhui8005@163.com。

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] This study investigated the contents and spatial distributions of heavy metals in surface soils in Yuanzhou District, Guyuan City, Ningxia, evaluating heavy metal accumulation and its associated ecological risk. **[Methods]** A total of 12988 soil samples were collected and the levels of eight heavy metals, namely, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn, were measured. The single-factor index, Nemerow comprehensive pollution index, and potential ecological hazard index were used to estimate the ecological risks associated with heavy metal contamination in soils. **[Results]** Compared to the background values of the Ningxia Autonomous Region, the average enrichment coefficients of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn were 1.01, 1.42, 1.04, 0.99, 1.03, 0.81, 1.01, and 1.07, respectively. Similar distributions of the eight heavy metals, with high concentrations, were observed in areas characterized by high human activity, such as the east and west sides of Liupan Mountain, as well as Guyuan City, Zhangyi Town, and Huangduobao Town. In contrast, low concentrations were observed in Tanshan Township and Zhaike Township in the northeast Quaternary areas with loess-covered soil. Single-factor index evaluation revealed that the soil was "clean" in the Yuanzhou area. Evaluation using the Nemerow comprehensive pollution index indicated that the soil pollution index of all heavy metals was less than 0.7, which is considered "clean." While the single-element potential hazard index of Cd and Hg showed a level of moderate risk, the comprehensive potential ecological hazard index of the heavy metals showed slight risk levels. **[Conclusions]** The soil quality in Yuanzhou District, Guyuan City, is in good condition, although slight enrichment of heavy metals was seen in the topsoil due to human activities in some areas.

Key words: soil heavy metals; pollution index; ecological risk; environmental geological survey engineering; Guyuan City; Ningxia

Highlights: The ecological risk of heavy metals in the surface soils of the Yuanzhou District was assessed using several evaluation methods; GIS spatial analysis and principal component analysis were employed to identify the main factors controlling the enrichment of heavy metals in the surface soils of the Yuanzhou area.

About the first author: BI Shuhai, male, born in 1994, engineer, mainly engaged in environmental geological research; E-mail: 2632624258@qq.com.

About the corresponding author: ZHOU Wenhui, male, born in 1980, professor level senior engineer, mainly engaged in land quality geochemical investigation and ecological geological investigation; E-mail: zhouwenhui8005@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20191015).

1 引 言

土壤是农业生产的基础,是保障粮食安全的重要组成部分。土壤环境质量直接关系到耕地质量、农产品安全和人体健康(庄国泰, 2015)。重金属污染不仅引起农业土壤成分、结构和功能的变化,而且抑制作物根系生长,甚至降低作物产量(Cai et al., 2012)。此外,土壤重金属污染可通过食物链直接和间接地对人体健康产生有害影响(Zhang et al., 2012)。由于土壤重金属污染具有隐蔽性、高毒性、持久性和生物积累的特点(Pan et al., 2016; Huang et al., 2018),土壤重金属污染(如 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)已成为世界许多地区面临的严重问题,并受到了广泛关注(Huang et al., 2018; 曹胜伟等, 2022; 刘同等, 2022)。

土壤重金属主要来源于自然源和人为源。自

然源的重金属主要来源于岩石自然风化,占土壤重金属含量的主要部分,自然源重金属主要以植物难以生物利用的形式存在,具有较低的生态风险(Temmerman et al., 2003; Song et al., 2018)。人为源重金属主要是农业活动、采矿作业、工业排放、生活污水和化石燃料燃烧等造成的(刘同等, 2022)。例如,在农业生态系统中,经常使用的石灰和过磷酸肥不仅含有植物营养和生长所必需的营养元素,还含有 As、Cd 和 Pb 等有毒金属杂质(Pezzarossa et al., 1990)。金属矿石的加工、采矿和运输也会增加土壤中的重金属污染水平(周勤利等, 2019; Chen et al., 2023)。人为源重金属通常具有较高的生物活性,易被植物吸收利用,具有较高的生态风险(唐豆豆等, 2018; Dong et al., 2023)。因此,确定土壤中重金属的来源对控制土壤污染至关重要。

宁夏回族自治区是中国历史最悠久的灌溉区之一,在区域粮食安全以及生态环境保护方面都做

出了历史贡献。但是迄今鲜有针对宁夏地区开展土壤重金属污染和生态风险研究工作,宁夏地区土壤环境污染状况及其生态风险不清。本研究通过采集大量实测数据,在了解固原市原州区耕地重金属分布特征的基础上,对原州区表层土壤重金属生态风险进行评价,为该区土壤重金属污染防治、土地合理开发利用提供科学依据。

2 研究区概况

原州区隶属于宁夏回族自治区固原市,位于宁夏南部山区,六盘山东麓,属黄土高原西部半干旱梁状丘陵区(图 1),位于 $105^{\circ}58''\sim 106^{\circ}32''E$, $35^{\circ}34''\sim 36^{\circ}38''N$,南北最长 117 km,东西最宽达 47 km,总面积 2766 km^2 ,耕地面积 10.76 万 hm^2 (梁永峰, 2012)。原州区南部为六盘山阴湿区,北部为清水河谷平原区,东部为黄土丘陵沟壑区,南部六盘山东西两侧为红土丘陵区。在地层上,该地区处于华北地层区和祁连地层区内。由于地质构造不同,加之经历畜牧业、农牧业、旱作农业的不同发展阶段和自然条件的影响,形成的土壤类型不一,主要有黄绵土、黑垆土、灰褐土、新积土、粗骨土和潮土等不同土壤类型,其中属黄绵土和黑垆土占地最广,占全区耕地总面积的 94.6%(梁永峰, 2012; 张树海和魏固宁, 2012)。

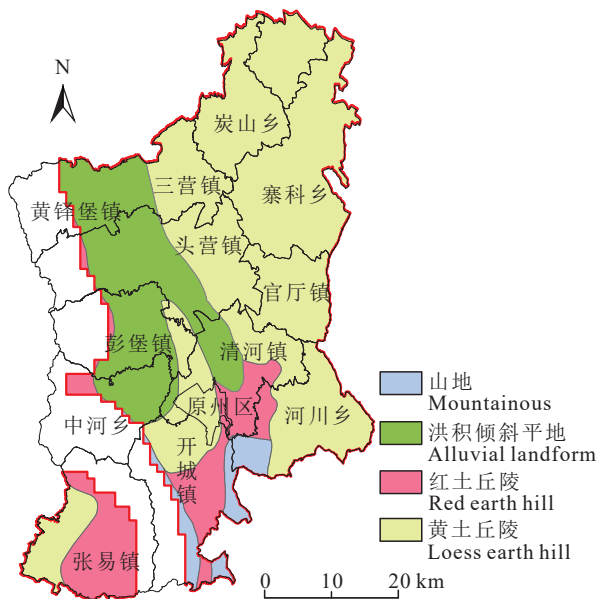


图 1 研究区位置和地貌类型

Fig.1 Location and geomorphic type of the study area

3 研究方法

3.1 样品采集

土壤样品采集及处理严格遵循《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295-2016),覆盖了原州区绝大部分农耕地及山林地,面积约 2237 km^2 ,遍及原州区下辖的 3 个街道、7 个镇、4 个乡:北塬街道、古雁街道、南关街道、三营镇、开城镇、张易镇、彭堡镇、头营镇、官厅镇、黄钵堡镇、中河乡、河川乡、炭山乡、寨科乡。土壤样品采用网格加图斑的原则布设,保障样品空间上相对均匀,并且主要分布在农用地,平原地区土壤样品采样密度范围保持在 9 点/ km^2 ,山林地采样密度保持在 4~5 点/ km^2 。在地形地貌复杂、丘陵地区、土地利用方式多样、人类活动影响强烈、元素及污染物含量空间变异性大的地区适当加大采样密度。

根据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295-2016)要求,土壤样品需采集地表 0~20 cm 土壤层,样品采集时采用 5 点组合法进行采样,将采集的各子样点的土壤掰碎,挑出根系、秸秆、石块、虫体等杂物,充分混合后,用四分法取约 1~1.5 kg 装入样品袋。样品晾干和加工场地确保无污染,在阴凉处悬挂在样品架上自然风干,将风干后的样品平铺在制样板上,用木棍碾压,并将植物残体、石块等其他所有非土物质剔除干净,细小已断的植物须根,采用静电吸附的方法清除。自然风干后用木质工具碾碎并用玛瑙研钵研磨、混匀过 2 mm(十目)筛后保存,取 350 g 送实验室用于土壤重金属元素含量分析。

3.2 样品分析与质量控制

3.2.1 分析方法

土壤样品重金属分析测试由内蒙古地矿科技有限责任公司实验室测试完成。实验室采用“离子选择电极法(ISE)、粉末压片-X 射线荧光光谱法(XRF)、石墨炉原子吸收光谱法(GF-AAS)、原子荧光光谱法(AFS)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)”等方法组成配套分析方案,对土壤中 Cu、Zn、Ni、Cr、Cd、Hg、As、Pb 等 8 种重金属进行测定,具体分析方法如下:

3.2.2 质量控制

实验室根据《土地质量地球化学评价规范》

表 1 实验室元素分析测试方法

Table 1 Laboratory elemental analysis and testing methods

元素	实验室分析方法
Cu、Zn、Ni、Cr	粉末压片-X射线荧光光谱法 (XRF)
Cd	石墨炉原子吸收光谱法 (GF-AAS)
Hg	原子荧光光谱法 (AFS)
As	原子荧光光谱法 (AFS)
Pb	电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)

(DZ/T 0295-2016)、《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》(DZ/T 0258-2014)规定,对分析测试“准确度、精密度、重复性检验、异常点重复性检验”采取如下措施:

准确度控制:每 500 件样品中密码插入 12 个国家一级标准物质(GBW),计算测定值与标准值对数差($\Delta \lg C$)。每种元素的分析准确度合格率均 $\geq 98\%$ 。**精密度:**根据该工作区地质特点,选择 4 个不同国家一级标准物质(GBW)密码插入每一分析批次(50 个号码),解密并计算测量值与监控值对数偏差($\Delta \lg C$),对数标准偏差(λ)。每种元素的分析精密度合格率均 $\geq 98\%$ 。**重复性检验:**实验室预先抽取,并交由熟练人员单独重复分析,占总数 5% 的密码平行样品,解密并计算原始分析数据与重复性检验数据之间的相对偏差(RD),单元素一次性合格率要求均达到 90% 以上。**异常点重复性检验:**每批样品分析完后,实验室对部分特高或特低含量试样应进行异常点重复性检验,单元素合格率均 $>85\%$ 。**外部控制样:**实验室将标准控制样密码编入每批(约 50 个号码,每批插入 4 件),与样品同时分析,外部控制样各项技术指标,经物化探所标准物质研制与分析质量监控中心解密评价,均满足要求。

3.3 污染评价方法

结合实际情况,本文选取了单因子指数法、内梅罗综合污染指数法、潜在生态危害指数法 3 种方法进行综合评价。单项污染指数法能直观地反映环境中各项污染指标的情况;内梅罗综合指数法不仅考虑到了所有评价因子单项污染程度的平均水平,而且还考虑到了最大污染指数;潜在生态危害指数法则综合考虑了多元素综合协同作用,毒性水平,污染浓度以及环境对重金属污染敏感性等因素,因此能够更为科学、综合的反映评价区域内土壤环境总体质量状况(刘凤莲等, 2015)。

3.3.1 单因子指数法

单因子指数法是最常见、最基础的评价方法,选用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)重金属风险筛选值为评价标准,作为综合污染评价的基础,其计算公式为:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式(1)中, P_i 为单因子污染指数; C_i 为实测浓度(mg/kg); S_i 为标准值(mg/kg),实测土壤 pH 值大于 7.5,引用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)风险筛选值作为标准 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 和 Pb 对应筛选值分别为 25、0.6、250、100、3.4、190、170 和 300 mg/kg。单因子污染指数分级标准详见表 2。

3.3.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法可用于分析评价全区多种重金属污染程度(周勤利等, 2019),其计算公式为:

$$PI = \sqrt{(P_{i_{max}}^2 + P_{i_{ave}}^2)/2} \quad (2)$$

式(2)中, P_i 为土壤中污染物的单项污染指数;PI 为内梅罗综合污染指数; $P_{i_{max}}$ 为单因子指数最高值; $P_{i_{ave}}$ 为单因子污染指数的算术平均值。具体污染等级划分标准见表 3。

3.3.3 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法最早由瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出(Hakanson, 1980),是从各种重金属的毒性水平和生物对其污染的敏感程度来评价重金属的污染程度。其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \cdot C_f^i) = \sum_{i=1}^n (T_r^i \cdot \frac{C_i}{C_n^i}) \quad (3)$$

表 2 单因子污染指数分级标准

Table 2 Grading standard of single factor pollution index				
指标范围	$P_i < 1.0$	$1.0 \leq P_i < 2.0$	$2.0 \leq P_i < 3.0$	$P_i \geq 3.0$
污染等级	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染

表 3 内梅罗综合污染指数分级标准

Table 3 Grading standard of Nemerow comprehensive pollution index			
等级划分	PI	污染等级	污染水平
I	$PI \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < PI \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
III	$1.0 < PI \leq 2.0$	轻污染	土壤开始受到污染
IV	$2.0 < PI \leq 3.0$	中污染	土壤已受中度污染
V	$PI > 3.0$	重污染	土壤已受重度污染

式(3)中, C_i 为 i 重金属的含量; C_{in} 为 i 重金属的参比值, 这里采用贵州省表层土壤元素背景值; C_{if} 为 i 重金属的污染指数; Eir 为单项元素潜在生态风险指数; Tir 为 i 重金属的毒性相应系数, As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的毒性响应系数分别为 10、30、2、5、40、5、5 和 1(徐争启等, 2008); RI 为重金属总的潜在生态风险指数。单项元素潜在生态风险指数和重金属综合潜在生态风险指数分级见表 4。

3.4 样品分析及数据统计

采用 SPSS22 软件进行数据正态分布检验、元素相关性分析和主成分分析, 采用 ArcGIS 10.2 软件进行元素地球化学空间插值制图。

4 结果与讨论

4.1 土壤重金属含量统计

原州区表层土壤重金属含量描述性统计结果见表 5 和图 2。表层土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量分别为 (12.1±0.9) mg/kg、(0.159±0.020) mg/kg、(62.1±4.0) mg/kg、(21.8±2.1) mg/kg、(0.022±0.027) mg/kg、(29.7±2.1) mg/kg、(20.7±1.9) mg/kg 和 (63.0±6.4) mg/kg。与宁夏土壤

表 4 土壤重金属潜在生态危害指数分级标准

Table 4 Grading standard of potential ecological hazard index of heavy metals in soil

评价指标	指标范围	潜在生态危害程度
Eir 或 RI	$Eir \leq 40$ 或 $RI \leq 150$	轻微风险
	$40 < Eir \leq 80$ 或 $150 < RI \leq 300$	中等风险
	$80 < Eir \leq 160$ 或 $300 < RI \leq 600$	较强风险
	$160 < Eir \leq 320$ 或 $600 < RI \leq 1200$	很强风险
	$Eir \geq 320$ 或 $RI > 1200$	极强风险

表 5 研究区表层土壤重金属含量特征 (n=12988)

Table 5 Characteristics of heavy metal concentrations in surface soils of the study area (n=12988)

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
最小值/(mg/kg)	5.0	0.043	17.3	4.1	0.002	5.8	11.6	10.8
最大值/(mg/kg)	25.3	0.423	87.8	46.0	1.441	43.3	92.9	164.1
中位值/(mg/kg)	12.0	0.158	61.9	21.5	0.018	29.7	20.5	62.1
平均值/(mg/kg)	12.1	0.159	62.1	21.8	0.022	29.7	20.7	63.0
标准差/(mg/kg)	0.9	0.020	4.0	2.1	0.027	2.1	1.9	6.4
变异系数/%	7.8	12.7	6.5	9.8	125.8	7.0	9.1	10.2
宁夏土壤元素背景值/(mg/kg)	11.9	0.112	60	22.1	0.021	36.6	20.6	58.8
富集系数 (元素含量/背景值)	1.01	1.42	1.04	0.99	1.03	0.81	1.01	1.07

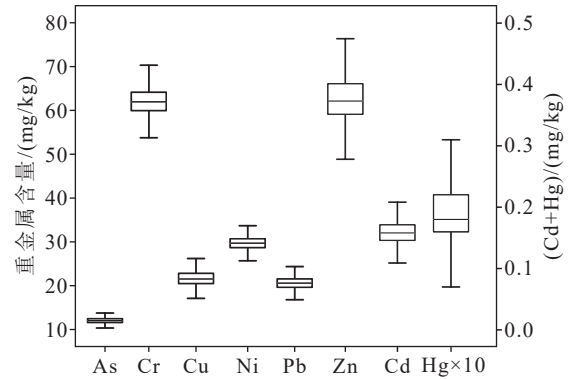


图 2 土壤重金属含量分布图

Fig.2 Distribution of heavy metal concentrations in soils

元素背景值相比(中国环境检测总站, 1990), As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 富集系数分别为 1.01、1.42、1.04、0.99、1.03、0.81、1.01 和 1.07, 除 Cd 外, 其他重金属富集系数相对较低, 说明研究区表层土壤重金属未发生明显的富集。与农用地土壤污染风险筛选值(pH>7.5)相比, 8 种重金属均未超标, 表明研究区土壤重金属污染风险较低。土壤中 Hg 含量变异系数(125.8%)大于 35%, 属于高度变异(张仁铎, 2005), 说明 Hg 含量离散程度较高, 含量分布极不均匀; 而土壤中其他 7 种元素变异系数均小于 15%, 属于低度变异(张仁铎, 2005), 含量离散程度较低, 含量分布较均匀。

4.2 土壤重金属分布特征

原州区表层土壤重金属元素地球化学分布图(图 3)显示, 表层土壤中 As、Cd、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 7 种重金属含量的空间分布具有较高的相似性, 总体分布特征为西南高, 东北低。高值出现在张易镇、开城镇南部及固原市周边地区, 其余地区相对分布较少。这一分布特征主要与研究区成土母质分布相吻合, 研究区东北部成土母质主要为第四纪黄土和砂土, 成土母质单一, 重金属分布均匀。除此之外, Cr、Hg 两种元素分布则与其他重金属略有不同, Cr 除了在张易镇、开城镇富集外, 在东北部的炭山乡、寨科乡、三营镇等地区也存在相对富集; Hg 除了在张易镇、开城镇富集外, 在原州区周围发生了相对富集。

4.3 土壤重金属生态风险评价

单因子污染指数大小顺序为 As>Cd>Cr>Cu>Zn>Ni>Pb>Hg, 8 种重金属元素单因子污染指数均

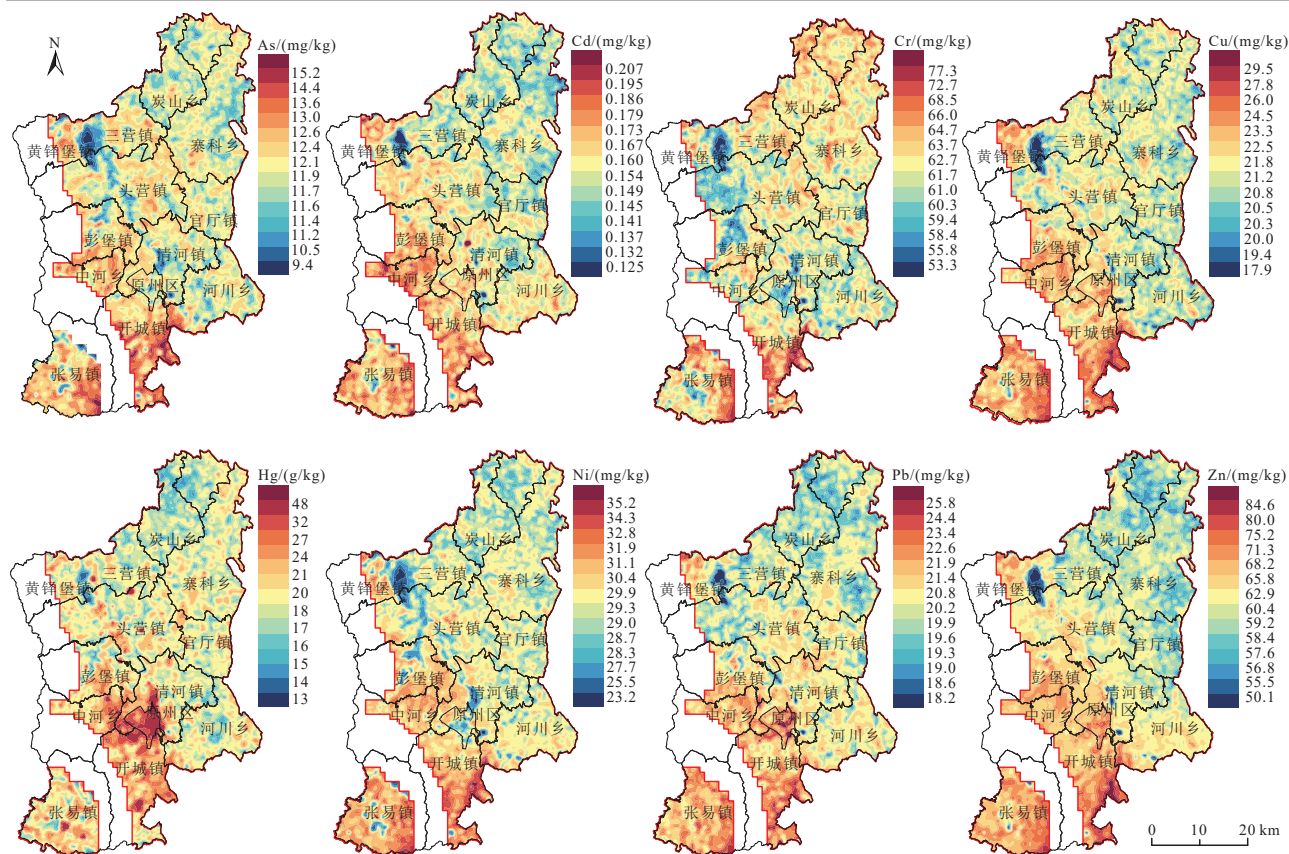


图3 研究区表层土壤重金属含量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of heavy metal concentrations in surface soils of the study area

小于1,根据单因子污染指数分级标准,评价等级为无污染。内梅罗污染指数大小依次 $As > Cd > Zn > Pb > Cu > Cr > Hg > Ni$,内梅罗综合污染指数均小于0.7,污染等级为安全,污染水平为清洁。单个元素潜在生态危害指数大小依次 $Cd > Hg > As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn$,其中Cd和Hg潜在生态危害指数分别为42.72和41.37,在40~80,属于中等风险,其他重金属均为轻微风险。如图4所示,Hg的中等风险区主要位于原州区市区和开城镇附近,Cd的中等风险区占到了研究区大部分面积。重金属综合潜在生态危害指数为111.39,小于150,土壤整体表现为轻微风险,Cd和Hg相比其它元素对潜在风险贡献率

较大(杨冰雪等,2020;张倩等,2021)。

4.4 土壤重金属源解析

利用相关性分析法和主成分分析法进行土壤重金属源解析。8种重金属两两之间均呈显著正相关(显著性水平 $P < 0.05$)(表7),表明土壤重金属具有同源性。对研究区重金属元素进行主成分分析,KMO为0.869,Bartlett检验值 < 0.001 ,表明数据适合做主成分分析。抽取特征值大于1的成分,如表8和图5所示,8种重金属元素共提取了两个主成分,此两组主成分累积能够解释总方差的68.7%,对前两个主成分进行分析可以反映两种重金属含量数据的大部分信息,其中主成分1的贡献率为

表6 原州区土壤重金属风险指数评价

Table 6 Risk index evaluation of heavy metal in soils of the Yuanzhou District

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
单因子指数 P_i	0.48	0.27	0.25	0.22	0.006	0.16	0.12	0.21
内梅罗综合污染指数 PI	0.69	0.53	0.304	0.36	0.297	0.20	0.40	0.42
单个元素潜在生态危害指数 E_i^p	10.13	42.72	2.07	4.94	41.37	4.06	5.03	1.07
多种重金属综合潜在生态危害指数 RI								111.39

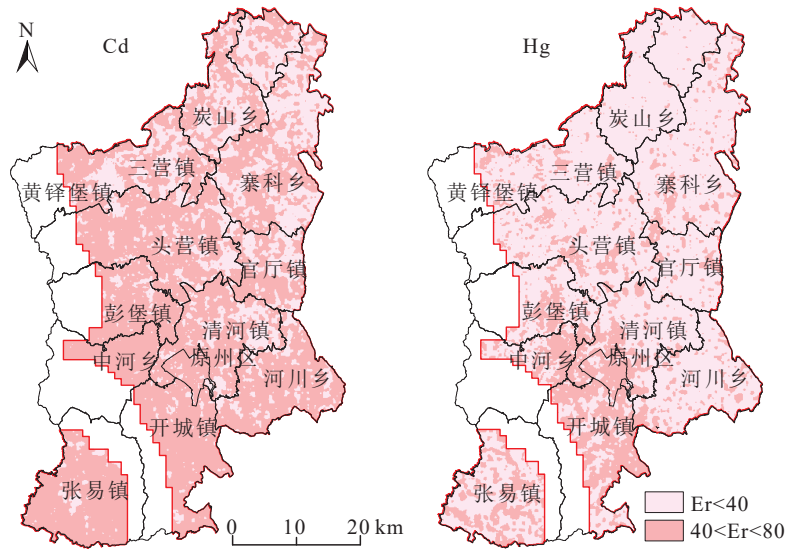


图 4 研究区土壤重金属元素生态风险等级分布

Fig.4 Distribution of potential ecological hazards of heavy metals in soils of the study area

表 7 土壤重金属含量的 Pearson 相关性系数

Table 7 Pearson correlation coefficient of heavy metal concentrations in soils

重金属	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1	0.366**	0.489**	0.639**	0.052**	0.700**	0.390**	0.601**
Cd		1	0.227**	0.477**	0.164**	0.372**	0.408**	0.552**
Cr			1	0.566**	0.025**	0.658**	0.344**	0.468**
Cu				1	0.219**	0.705**	0.562**	0.833**
Hg					1	0.044**	0.240**	0.243**
Ni						1	0.419**	0.681**
Pb							1	0.599**
Zn								1

注: **代表相关性在0.01水平上显著(双尾)。

表 8 土壤重金属主成分分析

Table 8 Principal component analysis of heavy metal in soils

成分	初始特征值			提取载荷平方和载入		
	总计	方差/%	累积/%	总计	方差/%	累积/%
1	4.271	54.188	53.388	4.271	54.188	53.388
2	1.154	14.525	68.713	1.154	14.525	67.813
3	0.759	9.486	77.299			
4	0.572	7.148	84.447			
5	0.489	6.107	90.554			
6	0.367	4.587	95.141			
7	0.239	2.99	98.131			
8	0.15	1.869	100			

54.2%, 且成分 1 中 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn、Pb 7 种元素载荷值较高, 表明研究区表层土壤中这 7 种重金属元素具有相近的来源; 成分 2 中 Hg 元素的载荷值较高, 表明 Hg 的其他来源与 7 种元素不同。此外, 需要注意的是 Cd、Pb 和 Zn 在成分 2 中也有相对较高的载荷。

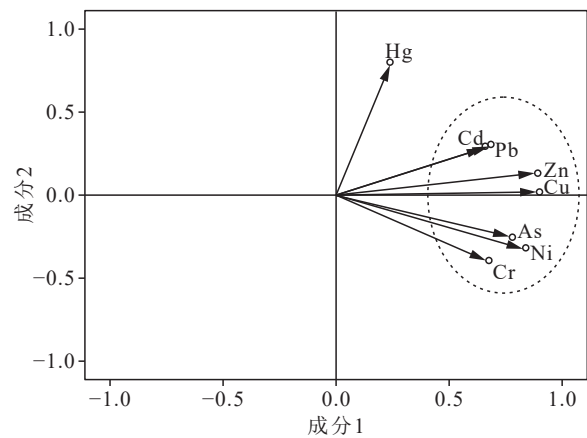


图 5 土壤重金属因子载荷图

Fig.5 Initial factor load matrix of heavy metal in soils

土壤重金属主要来源自然地质背景和人为活动, 社会的工业化发展和城市化进程及一系列工农业生产活动都是土壤重金属污染的诱因(宋玉婷和

雷泞菲, 2018; 党民团等, 2020)。原州区土壤重金属富集程度较低, 且空间分布较均匀, 根据相关性和主成分分析结果, 本文认为原州区影响重金属累积主要因素主要有以下两点:

4.4.1 地质背景因素

地质建造背景不仅是土壤圈、水圈、岩石圈的载体, 同时也是土壤形成的物质基础。土壤在形成过程中, 成土母质许多特性, 如质地、颜色、矿物成分等, 都被不同程度的继承, 并且土壤中大部分元素来自母岩(马义波等, 2020; 张腾蛟等, 2020)。如图 3 所示, 土壤中除 Hg 元素外, As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 元素的空间分布高度一致, 重金属含量相对高值区出现在六盘山东西两侧的红土丘陵区(图 1), 与古近系固原群清水营组(E_{3q})和寺口子组(E_{3s})褐红、棕红色的泥岩、粉砂岩和砂砾岩及石膏层在空间上高度吻合(图 6), 根据研究区岩石样品重金属元素含量数据统计, 清水营组(E_{3q})泥岩和泥岩夹细砂岩样品中重金属 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、

Zn 元素含量平均值为 10.89、0.14、58.70、22.48、26.52、21.81、60.30, 与土壤中重金属含量接近, 数据表明地质背景对 7 种元素含量具有明显的控制作用, 7 种元素富集于古近系褐红色砂岩、泥岩等成土母质发育形成的土壤中, 而研究区东北部第四纪黄土覆盖区重金属含量相对较低。因此, 地质背景因素可能为表层土壤重金属元素相对累积表现的重要因素。

4.4.2 人为因素

除地质背景因素影响外, 土壤重金属含量的增加主要是由人为活动的影响造成(张小敏等, 2014), 重金属元素分布也相对集中区域多为人口分布密集区, 人类活动频繁区域。工业发展在一定程度上促进了农田土壤重金属的累积, 工业区布局对农业用地土壤中重金属累积趋势的影响较为明显(王美俄等, 2016), 如原州区土壤 Hg 地球化学分布图(图 3)所示, 在区域分布上, 土壤中 Hg 元素仍然相对富集在调查区西侧区域, 但在固原市城区周边形

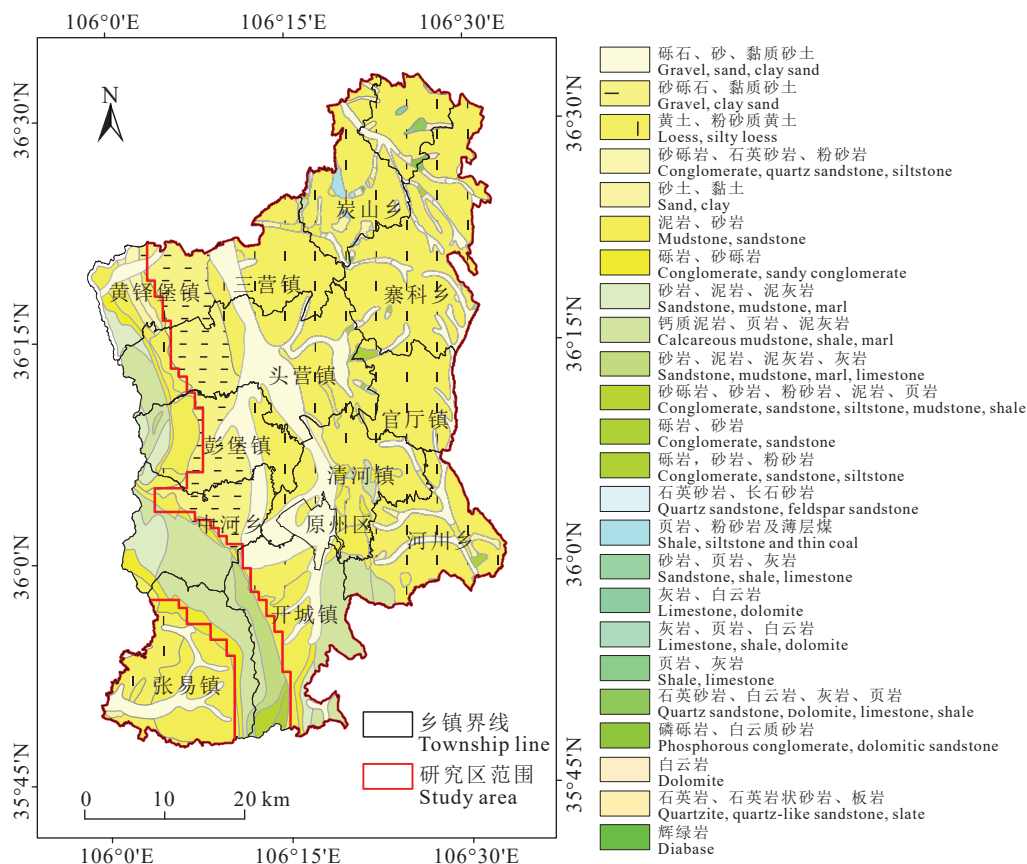


图 6 研究区地质简图

Fig.6 Geological map of the study area

成明显高值异常区,显示出强烈的人为影响控制因素。固原市表层土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 含量的空间分布具有较高相似性,高值分布区都在城区的东南、东北和中心部;As 的高值区出现在固原最早的南河滩商业聚集区;Pb 高浓度样点主要分布在固原汽车站和高速公路进出口周围(马贵等, 2021)。研究区工业发展并不发达,经济发展主要依赖于农业种植和畜禽养殖,农业用地中水浇地比例较小,多数为旱地梯田,排除部分耕地区的水质污染因素,大量的工业化肥、农药、地膜、饲料参与了生产作用过程,形成累积性重金属污染(胡琪等, 2020)。宁夏作为枸杞的主产地,在枸杞种植生产过程中,农药的使用也是造成土壤污染的重要因素。徐晓卫等(2014)在《宁夏枸杞中重金属元素和有机氯农药残留的分析》研究表明,农药是中药材的重要污染物之一,也是造成中药材质量下降的重要因素,研究过程中在枸杞中检出一定量的有害重金属。同时,当地养殖业的大力发展加大了农家肥的施用比重,连续施用畜禽粪便向农田土壤中带入大量外源重金属元素,加剧了土壤重金属的积累,继而引发农田土壤重金属质量分数超标,对土壤质量甚至作物品质产生负面影响,给土壤环境带来污染风险(魏益华等, 2019; 穆虹宇等, 2020; 楚天舒等, 2021)。所以养殖业的发展,农家肥的施用也是影响土壤重金属的积累的重要因素。

5 结 论

(1)研究区表层土壤重金属各元素含量平均值接近宁夏土壤元素背景值,其中 Cd 富集系数为 1.42,略高于其余 7 种重金属,未发生明显富集。从重金属元素分布情况来看,Hg 元素变异系数高于 35%,属高度变异,在张易镇、开城镇和原州区城区相对富集,其余 7 种重金属元素变异系数相对较低,属低度变异,空间分布上相对均匀。

(2)单因子指数评价结果显示,区内 8 种重金属单因子指数均小于 1,属于无污染等级;内梅罗综合污染指数均小于 0.7,污染等级为安全,污染水平为清洁;重金属潜在生态风险评价显示,Cd 和 Hg 属于中等风险,其他 6 种重金属均为轻微风险,重金属综合潜在生态危害指数小于 150,整体表现为轻微风险。

(3)原州区土地质量整体良好,但仍存在重金属元素累积现象。土壤重金属源解析表明,表层土壤重金属元素的累积与地质背景及人类活动有一定的关联性,区内土壤重金属含量主要受古近系褐色砂岩、泥岩等地质背景控制,土壤中 Hg 元素含量则受人为活动的影响较大,在今后的生产活动中需要重点关注。

References

- Cai L M, Xu Z C, Ren M Z, Guo Q W, Hu X B, Hu G C, Wan H F, Peng P A. 2012. Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 78: 2–8.
- Cao Shengwei, Liu Chunlei, Li Yasong, Li Jing, Hao Qichen, Gao Jie, Dong Yan, Lu Chenming. 2022. Sources and ecological risk of heavy metals in the sediments of offshore area in Quanzhou Bay, Fujian Province[J]. *Geology in China*, 49(5): 1481–1496 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z Y, Zhao Y Y, Chen D L, Huang H T, Zhao Y, Wu Y J. 2023. Ecological risk assessment and early warning of heavy metal cumulation in the soils near the Luanchuan molybdenum polymetallic mine concentration area, Henan Province, central China[J]. *China Geology*, 6(1): 15–26.
- China National Environmental Monitoring Centre. 1990. Background Value of Soil Elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 330–381 (in Chinese).
- Chu Tianshu, Wang Bingxiong, Gao Sicheng, Cheng Tianyi, Yang Zengling. 2021. Estimation on farmland carrying capacity for livestock and poultry manure based on risk screening values for farmland soil heavy metal contamination[J]. *Journal of China Agricultural University*, 26(2): 125–138 (in Chinese with English abstract).
- Dang Mintuan, Liu Juan, Yang Shan. 2020. Advance of heavy metal pollution in soil and its control[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 66(6): 94–96 (in Chinese).
- Dong Q Y, Wen H T, Pan W, Song C, Lai S Y, Yang Z J, Zhao Y Y, Yan M J. 2023. Health risk assessment of heavy metals in soils and crops in a mining area (Au–Ag–Cu–trona–oil et al.) of the Nanyang Basin, Henan Province, China[J]. *China Geology*, 6: 1–13.
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 14(8): 975–1001.
- Hu Qi, Liu Shaoyu, Liu Pengfei, Zhang Wenqiang. 2020. Evaluation of heavy pollution of farmland soil in eastern area of Fuyang City[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 48(7): 68–73 (in Chinese with English abstract).
- Huang S S, Tu J, Jin Y, Hua M, Wu X M, Xu W W, Yang Y B, Wang

- H O, Su Y M, Cai L M. 2018. Contamination assessment and source identification of heavy metals in river sediments in Nantong, Eastern China[J]. *International Journal of Environmental Research*, 12(3): 373–389.
- Liang Yongfeng. 2012. Measurement and evaluation on soil nutrient content in Yuanzhou County of Guyuan City[J]. *Journal of Anhui Agricultural*, 40(36): 17576–17577 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yongfeng. 2013. Soil nutrient status and wheat planting suitability in Yuanzhou County of Guyuan City[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 52(16): 3788–3790 (in Chinese with English abstract).
- Liu Fenglian, Yu Liping, Wu Huizhong, Xu Bingzhong. 2015. Survey of the content of cadmium and lead in rural soil, Ningxia[J]. *Modern Preventive Medicine*, 42(5): 798–800 (in Chinese with English abstract).
- Liu Tong, Liu Chuanpeng, Deng Jun, Kang Pengyu, Wang Kaikai, Zhao Yuyan. 2022. Ecological health risk assessment of soil heavy metals in eastern Yinan County, Shandong Province[J]. *Geology in China*, 49(5): 1497–1508 (in Chinese with English abstract).
- Ma Gui, Han Xinning, Wei Weixing, Li Meiyuan, Li Guodong. 2021. Distribution and health risk assessment of heavy metals in topsoil of urban areas of Guyuan city[J]. *Journal of Ningxia Normal University*, 42(4): 51–60.
- Ma Yibo, Li Longbo, Zhang Meixue, Mo Chunhu, Meng Wei. 2020. Discussion on soil forming rock type and its relation with cultivated land soil in Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 37(4): 425–429 (in Chinese with English abstract).
- Mu Hongyu, Zhuang Zhong, Li Yanming, Qiao Yuhui, Chen Qing, Xiong Jing, Guo Lili, Jiang Rongfeng, Li Huafen. 2020. Heavy metal contents in animal manure in China and the related soil accumulation risks[J]. *Environmental Science*, 41(2): 986–996 (in Chinese with English abstract).
- Pan L B, Ma J, Wang X L, Hou H. 2016. Heavy metals in soils from a typical county in Shanxi Province, China: Levels, sources and spatial distribution[J]. *Chemosphere*, 148: 248–254.
- Pezzarossa B, Malorgio F, Lubrano L, Tognoni F, Petruzzelli G. 1990. Phosphatic fertilizers as a source of heavy metals in protected cultivation[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 21(9/10): 737–751.
- Song H Y, Hu K L, An Y, Chen C, Li G D. 2018. Spatial distribution and source apportionment of the heavy metals in the agricultural soil in a regional scale[J]. *Journal of Soils & Sediments: Protection, Risk Assessment, & Remediation*, 18(3): 852–862.
- Song Yuting, Lei Ningfei. 2018. China's cadmium pollution land status and restoration measures[J]. *Journal of Xichang University (Natural Science Edition)*, 32(3): 79–83 (in Chinese with English abstract).
- Tang Doudou, Yuan Xuyin, Wang Yimin, Ji Junfeng, Wen Yubo, Zhao Wanfu. 2018. Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 37(1): 18–26 (in Chinese with English abstract).
- Temmerman L D, Vanongeval L, Boon W, Hoening M, Geypens M. 2003. Heavy metal content of arable soils in northern Belgium[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 148(1): 61–76.
- Wang Mei'e, Peng Chi, Chen Weiping. 2016. Impacts of industrial zone in arid area in Ningxia Province on the accumulation of heavy metals in agricultural soils[J]. *Environmental Science*, 37(9): 3532–3539 (in Chinese with English abstract).
- Wei Yihua, Qiu Suyan, Zhang Jinyan, Chen Qinglong, Chen Liumeng, Tu Tianhua, Dai Tingcan. 2019. Characteristic of heavy metal contents in agricultural wastes and agricultural risk assessment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 35(14): 212–220 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaowei, Hu Siyi, Pan Rouhe. 2014. Determination of heavy metals and organochlorine pesticides in lycium barbarum[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 24(10): 1487–1492 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhengqi, Ni Shijun, Tuo Xianguo, Zhang Chengjiang. 2008. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 31(2): 112–115 (in Chinese with English abstract).
- Yang Bingxue, Ma Qin, Fang Chen, Xu Xinhong, Ma Yuandan. 2020. Investigation and evaluation of heavy metal pollution of farmland soil in Linan district of Hangzhou City[J]. *Sichuan Environment*, 39(3): 132–138 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qian, Liu Xiangwei, Shui Yong, Tang Ting. 2021. Distribution of heavy metals in the upstream of Yellow River and ecological risk assessment[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 57(2): 333–340 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Renduo. 2005. *Spatial Variation Theory and Its Application*[M]. Beijing: Science Press, 82–91 (in Chinese).
- Zhang Shuhai, Wei Guning. 2012. *Evaluation and Formula Fertilization in Yuanzhou District, Guyuan City, Ningxia*[M]. Yinchuan: Sunshine Press, 3–9 (in Chinese).
- Zhang Tengjiao, Liu Hong, Ouyang Yuan, Huang Hanxiao, Zhang Jinghua, Li Fu, Xiao Qiliang, Zeng Jian, Hou Qian, Wen Dengkui, Duan Shengyi. 2020. A preliminary discussion on the physical and chemical characteristics and main controlling factors of soil and parent material in the middle and high mountain area: Take Xichang as an example[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40(1): 106–114 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaomin, Zhang Xiuying, Zhong Taiyang, Jiang Hong. 2014. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 35(2): 692–702 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X W, Yang L S, Li Y H, Li H R, Wang W Y, Ye B X. 2012. Impacts of lead/zinc mining and smelting on the environment and human health in China[J]. *Environ Monit Assess*, 184(4):

- 2261-2273.
- Zhou Qinli, Wang Xuedong, Li Zhitao, Wang Xiahui, He Jun, Ji Guohua. 2019. Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metal in Helan County of Ningxia, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 36(4): 513-521 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang Guotai. 2015. Current situation of national soil pollution and strategies on prevention and control[J]. *Journal of China Academy of Sciences*, 30(4): 476-483 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹胜伟, 刘春雷, 李亚松, 李静, 郝奇琛, 高婕, 董岩, 陆晨明. 2022. 福建泉州湾近岸海域沉积物重金属来源分析与生态风险评价[J]. *中国地质*, 49(5): 1481-1496.
- 楚天舒, 王柄雄, 高思程, 成天一, 杨增玲. 2021. 基于农田土壤重金属污染风险筛选值的畜禽粪污农田承载力估算[J]. *中国农业大学学报*, 26(2): 125-138.
- 党民团, 刘娟, 杨珊. 2020. 土壤重金属污染及治理研究进展[J]. *陕西农业科学*, 66(6): 94-96.
- 胡琪, 刘少玉, 刘鹏飞, 张文强. 2020. 阜阳市东部地区农田土壤重金属污染评价[J]. *安徽农业科学*, 48(7): 68-73.
- 梁永峰. 2012. 固原市原州区土壤养分含量的测定与评价[J]. *安徽农业科学*, 40(36): 17576-17577.
- 梁永峰. 2013. 固原市原州区土壤养分含量及小麦种植适宜性[J]. *湖北农业科学*, 52(16): 3788-3790.
- 刘凤莲, 于丽萍, 吴惠忠, 许秉忠. 2015. 宁夏农村土壤重金属镉和铅含量调查与分析[J]. *现代预防医学*, 42(5): 798-800.
- 刘同, 刘传朋, 邓俊, 康鹏宇, 王凯凯, 赵玉岩. 2022. 山东省沂南县东部土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 49(5): 1497-1508.
- 马贵, 韩新宁, 魏卫星, 李美媛, 李国栋. 2021. 固原市表层土壤重金属空间分布及健康风险评价[J]. *宁夏师范学院学报*, 42(4): 51-60.
- 马义波, 李龙波, 张美雪, 莫春虎, 孟伟. 2020. 贵州成土母岩类型及其与耕地土壤关系探讨[J]. *贵州地质*, 37(4): 425-429.
- 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉. 2020. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. *环境科学*, 41(2): 986-996.
- 宋玉婷, 雷泞菲. 2018. 我国土壤镉污染的现状与修复措施[J]. *西昌学院学报(自然科学版)*, 32(3): 79-83.
- 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 季峻峰, 文字博, 赵万伏. 2018. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. *农业环境科学学报*, 37(1): 18-26.
- 王美俄, 彭驰, 陈卫平. 2016. 宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响[J]. *环境科学*, 37(9): 3532-3539.
- 魏益华, 邱素艳, 张金艳, 陈庆隆, 陈柳萌, 涂田华, 戴廷灿. 2019. 农业废弃物中重金属含量特征及农用风险评估[J]. *农业工程学报*, 35(14): 212-230.
- 徐晓卫, 胡思一, 潘柔和. 2014. 宁夏枸杞中重金属元素和有机氯农药残留的分析[J]. *中国卫生检验杂志*, 24(10): 1487-1492.
- 徐争启, 倪师军, 虞先国, 张成江. 2008. 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*, 31(2): 112-115.
- 杨冰雪, 马勤, 方晨, 许鑫红, 马元丹. 2020. 杭州市临安区农田土壤重金属污染调查与评价[J]. *四川环境*, 39(3): 132-138.
- 张倩, 刘湘伟, 税勇, 王婷. 2021. 黄河上游重金属元素分布特征及生态风险评价[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 57(2): 333-340.
- 张仁铎. 2005. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 23-39.
- 张树海, 魏固宁. 2012. 宁夏固原市原州区耕地地力评价与测土配方施肥[M]. 银川: 阳光出版社, 3-9.
- 张腾蛟, 刘洪, 欧阳渊, 黄瀚霄, 张景华, 李富, 肖启亮, 曾建, 侯谦, 文登奎, 段声义. 2020. 中高山区土壤成土母质理化特征及主控因素初探——以西昌市为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 40(1): 106-114.
- 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 江洪. 2014. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. *环境科学*, 35(2): 692-702.
- 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 330-381.
- 周勤利, 王学东, 李志涛, 王夏晖, 何俊, 季国华. 2019. 宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 36(4): 513-521.
- 庄国泰. 2015. 我国土壤污染现状与防控策略[J]. *中国科学院院刊*, 30(4): 476-483.