

doi: 10.12029/gc20220509

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.
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).

山东省沂南县东部土壤重金属生态健康风险评价

刘同^{1,2,3}, 刘传朋^{1,2,3}, 邓俊¹, 康鹏宇¹, 王凯凯¹, 赵玉岩⁴

(1. 山东省第七地质矿产勘查院, 山东 临沂 276006; 2. 山东省金刚石成矿机理与探测重点实验室, 山东 临沂 276006; 3. 山东省金刚石成矿机理与探测院士工作站, 山东 临沂 276006; 4. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

摘要:【研究目的】山东是中国矿业与农业发达省份、沂南县东部堪称其代表。掌握当地土壤重金属污染及对生态健康风险的影响对生态环境保护有重要意义。【研究方法】系统调查分析表层土壤样品 4779 件, 获取 Hg、Cd、Cr、Ni、As、Cu、Pb、Zn 等元素分布最新数据, 并用地累积指数法、潜在生态危害指数法和健康风险评估模型等评价研究了生态健康风险及相关问题。【研究结果】(1) 上述重金属均量与临沂市土壤背景值大致相当, 仅 Hg 略偏高且变异系数最大, 指示当地土壤 Hg 受人类活动影响明显。与国家农用地土壤污染风险筛选值相比, Cu、Cr、Ni 是相对主要超标元素, As、Cd、Cu、Pb 超标倍数大, 它们均可能会产生生态健康危害; (2) 据地累积指数平均值, 该区土壤总体无污染, 据单样值, Hg、Cu 污染最突出, 其他 6 元素污染较轻; (3) 生态风险方面, Hg、Cd 是主要生态风险元素, As、Cu 次之。高生态风险区为铜井镇南东部、界湖镇西北金场附近以及县城西部主城区 3 个片区; (4) 人体健康风险方面, 重金属对成人不具有非致癌风险和致癌风险, 极个别地区对儿童具有非致癌风险和致癌风险, Cr、As 是主要非致癌风险元素, As 致癌风险最大。【结论】沂南县东部土壤质量总体较好, 铜井镇南东部、界湖镇西北金场附近以及县城西部主城区 3 个片区为高生态风险区, Hg、Cr、As 为主要生态健康风险元素。

关键词: 土壤; 重金属; 生态风险; 健康风险; 土壤与农业地质调查工程; 沂南县东部; 山东省

创新点: 以地累积指数法、潜在生态危害指数法和健康风险评估模型等多方法评价研究了沂南县东部土壤重金属生态健康风险。

中图分类号: P595; X142 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)05-1497-12

Ecological health risk assessment of soil heavy metals in eastern Yinan County, Shandong Province

LIU Tong^{1,2,3}, LIU Chuanpeng^{1,2,3}, DENG Jun¹, KANG Pengyu^{1,2,3}, WANG Kaikai¹, ZHAO Yuyan⁴

(1. The 7th Geological and Mineral Exploration Institute of Shandong Province, Linyi 276006, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Metallogenic Mechanism and Exploration of Diamonds in Shandong Province, Linyi 276006, Shandong, China; 3. Academician Workstation of Diamond Metallogenic Mechanism and Exploration in Shandong Province, Linyi 276006, Shandong, China; 4. College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China)

收稿日期: 2021-10-10; 改回日期: 2021-12-30

基金项目: 山东省财政基金项目(鲁勘字(2019)42号)资助。

作者简介: 刘同, 男, 1975 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事农业地质和矿产地质工作; E-mail: liutong0001@126.com。

通讯作者: 刘传朋, 男, 1981 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事农业地质和矿产地质工作; E-mail: liuchuanpeng666@163.com。

Abstract: This paper is the result of soil and agricultural geological survey engineering.

[Objective] The east of Yinan County is the representative of Shandong Province with developed mining and agriculture in China. It is of great significance for environmental protection to control the local soil heavy metal pollution and its ecological health risks. **[Methods]** This study systematically investigated and analyzed 4779 surface soil samples, obtained the latest distribution data of Hg, Cd, Cr, Ni, As, Cu, Pb, Zn, and evaluated the ecological health risks and related problems by geoaccumulation index method, potential ecological hazard index method and health risk assessment model. **[Results]** (1) The mean content of each heavy metal mentioned above is roughly equivalent to the soil background value in Linyi City, but the Hg content is slightly high and its coefficient of variation is the largest, indicating that Hg in local soil is significantly affected by human activities. Compared with the risk screening values for soil contamination of agricultural land in China, Cu, Cr and Ni are the main elements exceeding the standard, the As, Cd, Cu and Pb contents are many times of the standard, and all of them may cause ecological health hazards. (2) According to the values of geoaccumulation index, the soil in this area is generally pollution-free, and the pollution of Hg and Cu was slightly stronger than that of the other six elements. (3) In terms of ecological risk, Hg and Cd are the main ecological risk elements, followed by As and Cu. The high ecological risk area includes three zones: the southeast of Tongjing Town, the area around Jinchang Village at the northwest of Jiehu Town, and the main urban area in the west of the county town. (4) In terms of human health risks, heavy metals have no non-carcinogenic risks and carcinogenic risks for adults, but they have non-carcinogenic risk and carcinogenic risk for children in few areas. Cr and As are the main non-carcinogenic risk elements, and As has the highest carcinogenic risk. **[Conclusions]** The soil quality is generally good in the eastern Yinan County. However, the southeast of Tongjing Town, the area around Jinchang Village at the northwest of Jiehu Town and the main urban area in the west of the county town are high ecological risk areas. Hg, Cr and As are the main elements with ecological health risks.

Key words: soil; heavy metal; ecological risk; health risk; soil and agricultural geological survey engineering; eastern Yinan County; Shandong Province

Highlights: By the method of soil accumulation index, potential ecological hazard index and health risk assessment model, the ecological health risk of soil heavy metals in the eastern Yinan County was evaluated.

About the first author: LIU Tong, male, born in 1975, master, engaged in research on agricultural geology and mineral geology; E-mail: liutong0001@126.com.

About the corresponding author: LIU Chuanpeng, male, born in 1981, master, engaged in research on agricultural geology and mineral geology; E-mail: liuchuanpeng666@163.com.

Fund support: Supported by Shandong Provincial Financial Fund Project (Lu Kan Zi(2019) No.42).

1 引 言

土壤是宝贵的自然资源之一,人类生存和农业生产都离不开清洁的土壤。工业和农业的加速不断损害土壤生态环境,土壤污染问题越发突出。近年矿区周边土壤重金属污染以及农业施肥致土壤重金属污染引起国内外学者的广泛关注。采矿和冶炼是土壤重金属高风险因素。矿山开采、选矿和冶炼过程会产生粉尘、矿渣、废石和尾矿,其中重金属都会以淋滤或扩散等方式向土壤中释放(徐友宁等,2014;蔡奎等,2016;崔邢涛等,2016;Liu et al.,2020;Sun et al.,2020;汪春鹏等,2021;郭俊刚等,2021)。王爽等(2014)研究了陕西潼关县农田土壤重金属污染及潜在风险,发现土壤主要受到矿业采

冶造成的Hg、Cd、Pb的污染,生态风险轻微至很强。徐友宁等(2014)研究某金矿区农田土壤镉污染和环境效应,基于国家土壤环境质量二级标准,发现土壤镉明显超标,人发镉含量较高,人群健康遭受威胁。田美玲等(2018)研究广西南丹矿业活动影响区稻田土壤As、Sb、Cd、Pb、Cu和Zn等的污染状况,发现Cd、As严重超标。熊孜(2017)研究了河北农田土壤,发现Cd是首要污染元素,其主要来源为矿业开采、工业生产和污水灌溉。赵秀芳等(2020)研究了安丘农用地土壤污染状况,认为金属矿产开采冶炼、交通等人类活动是Hg、Cd、Pb等重金属高含量的主要来源。农田土壤重金属污染会损害农作物品质和食用安全,危害人类健康(于瑞莲和胡恭任,2008;吕建树等,2012;徐友宁等,

2014; 王腾飞等, 2017)。农业生产中, 以鸡粪、猪粪和牛粪等为原料的有机肥料已成为土壤重金属污染重要来源(姜佰文等, 2020)。吕建树等(2012)研究日照市东港区和岚山区农田土壤, 发现Cd、Pb、Hg是主要污染元素, 工农业及交通运输是主要污染源。

沂南县东部矿产资源丰富, 工业和特色农业发达, 人口稠密(康鹏宇等, 2021)。研究区以沂河为界, 西部金多金属矿山采冶、非金属矿开采加工、工业制造发达; 东部则农业种养活动活跃, 有较多猪、鸡的大棚式规模养殖, 沂南生姜、黄瓜、砖埠草莓等已成为“中国地理标志产品”。由于广泛的种养殖业, 研究区西边部界湖镇一带地下水水质已受到较大影响(魏善明等, 2021)。研究区有成规模的矿区、工业区和农业区, 其土壤重金属污染状况和生态风险影响, 以往研究几近空白。估计研究区局部地段土壤质量或会不可避免地受到矿业、工业、交通、农业活动的影响。基于生产可持续生态宜居的生态文明建设要求, 在以往农业地质调查(康鹏宇等, 2021)的基础上, 本文依据沂南东部8个乡镇农用地土壤重金属测试数据, 采用地累积指数法、潜在生态危害指数法和健康风险评估模型系统研究土壤重金属污染特征、生态危害和人体健康风险, 以期研究区土壤重金属污染防治、生态环境保护和居

民健康生活提供科学依据。

2 研究区概况

研究区位于山东省临沂市沂南县东部, 东临日照市莒县, 南依临沂市河东区、兰山区, 西接沂南县张庄镇、依汶镇, 北与沂水县交界, 行政区划包括沂南县东部8个乡镇, 面积约785 km²。研究区范围: 118°25'00"~118°44'00"E, 35°18'00"~35°46'00"N。研究区地势总体上平缓而略显北高南低, 自西而东则因沂沭断裂带地垒地堑而呈现出高一低一高一低带状相间分布的特征(图1)。西部为丘陵、山地, 主要分布早古生代碳酸盐岩和碎屑岩。中部地势低洼为沂河两岸平原, 主要覆盖第四系, 南半部出露大片早白垩世中酸性火山岩。东部为低缓丘陵, 广泛发育新太古代中酸性变质侵入岩。西部和西北部分布有金铜多金属矿、灰岩矿、白云岩矿、大理岩矿、石英砂岩矿, 正被开采利用。沂河东矿产不发育。区内土壤为棕壤土、褐土、潮土、砂姜黑土和水稻土5个土类, 以水浇地、旱地、有林地等农用地为主。研究区属北温带大陆性半湿润季风气候区, 四季分明, 年平均气温13.1℃, 年平均降水量768.1 mm。境内主要有沂河、汶河, 总体流向自北而南, 自西北而东南。研究区人口密度每平方千米570

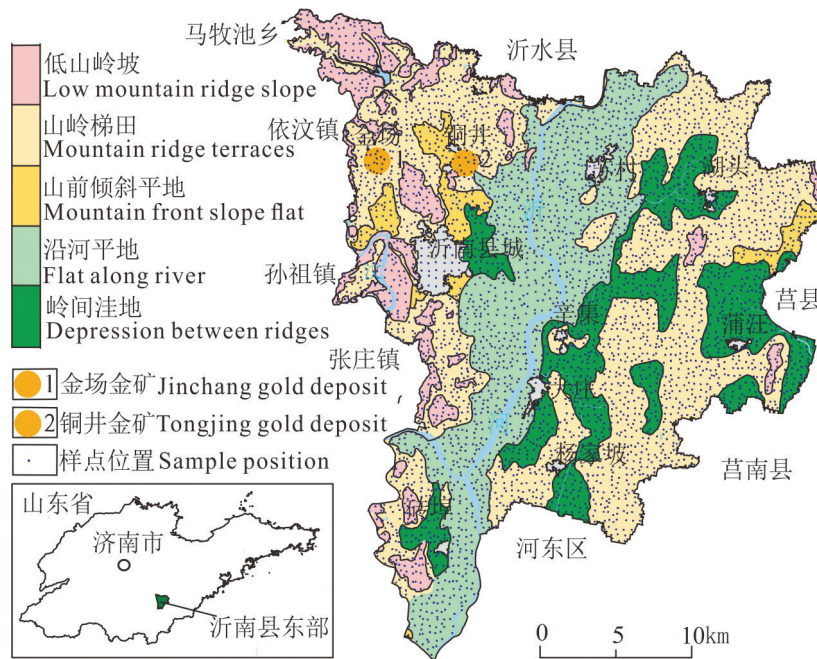


图1 研究区地貌类型和地理位置

Fig.1 Geomorphologic types and geographical location map of the study area

人,人口预期寿命79.39岁。据《沂南县居民疾病与健康状况报告(2017年)》,研究区居民死亡原因中慢性病所占的比例最大,为89.99%,而且自30岁以后,以肿瘤为主的慢性病发病率大幅增高。报告认为吸烟喝酒等不良生活习惯是主要危险因素,但没有研究是否有环境因素。

3 材料与方 法

3.1 样品采集与测试

结合研究区土地利用现状、土壤类型和地质情况,按照1:5万土地质量地球化学调查采样密度要求,以样点均匀分布和图斑有效控制为原则,划分采样格布设采样点,表层样由一个中心点及4个分点采集等量组成,采样深度0~20 cm,共采集土壤样品4779件(图1)。土样经晾晒风干、碾碎后过孔径为10目的尼龙筛。

土壤样品由山东省第七地质矿产勘查院实验室分析测定Cd、Hg、Pb、As、Cr、Ni、Cu、Zn、pH。测试过程执行《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T0130.1-2006),采取实验室内部检查、密码抽查、外部检查等手段,严格监控分析测试准确度、精密度。结果显示,111件重复样合格率均大于85%,225件外部标准控制样合格率均大于90%,数据报出率为100%,重复性检验样品合格率均高于90%,各项质量指标均符合规范要求,分析数据质量可靠。

3.2 评价方法

先采用描述性统计获得研究区各元素数据特征,以《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准试行》(GB15618-2018)中的农用土壤污染风险筛选值比较筛选获得各样点各元素的超标情况。接着,用德

国科学家Muller(1969)提出的地累积指数法评价土壤重金属污染水平(Forstner et al., 1993)。在此基础上,采用Hakanson潜在生态危害指数法评价研究区土壤重金属生态风险。该法引入重金属毒性响应参数(Hakanson, 1980;徐争启等,2008),是目前生态风险评价使用较广泛的方法(崔邢涛等,2011;管后春等,2013;代杰瑞等,2018;李苹等,2018;鲍丽然等,2020)。评价土壤重金属形成的人体健康风险(鲍丽然等,2020)则采用USEPA公布的健康风险评估模型,先做暴露计算,再做风险表征。

上述评价方法使用了10个计算公式,其计算过程、结果分级和意义规定以及所涉及常规参数参照鲍丽然等(2020)文中所述。其中,地累积指数和潜在生态风险指数计算中的参比值采用临沂市土壤重金属元素背景值(喻超和王红晋,2014);暴露皮肤面积以王喆等(2008)统计的不同季节中国人暴露皮肤表面积数据加权临沂市气候特征计算得出。

4 结果与分析

4.1 土壤重金属分布特征

研究区表层土壤Cd等8种重金属元素基本参数以及临沂市背景值(庞绪贵等,2018)列于表1。除Hg外,其余7种元素含量平均值与临沂市土壤背景值大致相当,基于这两个值的富集系数在0.94~1.16,说明这7种元素在土壤中含量相对均匀。按喻超和王红晋(2014)对富集系数的区段划分,Cr、Zn、As、Pb、Ni的富集系数在0.96~1.06,为相当,应主要为自然源。Cr、Cu、Hg富集系数在1.12到1.29,为略偏高,暗指这3种元素相对富集,特别是Hg较明显富集,其组成有自然源叠加人为源的较大可能性。

表1 表层土壤重金属元素质量分数特征值(N=4779)

Table 1 Mass fraction characteristic values of heavy metal elements in surface soil(N=4779)

元素	最大值	最小值	平均值	中值	标准差	富集系数	C _v /%	偏度	峰度	临沂市土壤背景值
Hg	2.24	0.003	0.036	0.026	77.00	1.29	215.00	17.91	408.59	0.028
Cd	4.19	0.03	0.12	0.10	0.09	0.94	74.00	22.48	993.38	0.13
As	118.97	0.30	6.80	5.80	4.60	1.06	67.00	6.90	108.90	6.40
Cr	682.70	16.50	68.50	62.90	33.40	1.12	49.00	5.18	54.68	61.30
Ni	831.00	5.80	29.10	26.50	18.20	1.06	62.00	20.50	825.04	27.40
Cu	856.50	2.70	27.70	22.70	34.70	1.16	125.00	13.32	239.62	23.80
Zn	1181.50	15.20	64.20	60.40	31.10	0.99	49.00	12.51	373.70	64.80
Pb	1621.90	7.10	26.20	23.70	27.10	1.00	103.00	44.91	2550.48	26.10

注:标准差/富集系数/变异系数/偏度/峰度均无量纲;其他指标值的质量分数单位为mg/kg;临沂市土壤背景值来自于山东省临沂市农业生态地球化学调查与评价数据。

变异系数表征重金属元素在空间上的离散和变异程度(赵秀芳等,2020)。C_v值越大,可能受人类活动干扰越大。研究区表层土壤重金属元素变异程度由大到小为Hg>Cu>Pb>Cd>As>Ni>Cr=Zn, Hg、Cu、Pb的变异系数分别达到215%、125%、103%,说明Hg、Cu、Pb在区内分布相对不均匀,Hg元素受人类活动影响最大。

偏度可以衡量概率分布的不对称性,偏度系数小于0为左偏,反之为右偏。仅受控于自然源时,母质类型相同的土壤元素遵从正态分布,但人类活动的影响会改变其分布形态(Zhao et al., 2010)。研究区8种重金属元素偏度系数全为正值(表1),分布形态属正偏,偏度值差别较大,从大到小为Pb>Cd>Ni>Hg>Cu>Zn>As>Cr, Cu、Zn、As、Cr、弱正偏,峰度低,其含量分布应主要受成土母质影响,而Pb、Cd、Ni、Hg偏度较大、峰度也明显高,其含量分布受人类活动影响大。

研究区土壤pH值介于3.57~10.75,与土壤环境质量农用地土壤污染风险筛选值相比(生态环境部等,2018),超标情况见表2。由表可知,8种元素超标率0.23%~3.31%,由多到少为Cu>Cr>Ni>As>Cd>Pb>Zn>Hg,最大值比标准值,As、Cd、Cu、Pb是6倍到10倍,可见,研究区土壤重金属超标率低,但极大值的超标倍数较大,应是局部点式或小片污染程度较重,可能会对生态环境、农作物安全和人体健康带来危害。

4.2 重金属污染程度分析

以临沂市土壤背景值为评价参比值,计算研究区土壤重金属污染地累积指数如表3。各元素地累积指数平均值为-0.53~-0.90,全为负,总体呈无污染状态。从单元素分级数据来看,各元素轻污染到

极重污染样本数最多769个,最少284个,在样本总数中占比最高16.1%,最低5.9%,从多到少为Hg>As>Cu>Ni>Cr>Cd>Zn>Pb,这说明各元素在土壤中都已有了污染,Hg染污样点数占比最大。从中污染到极重污染样本数最多176个最少26个,各元素占样本总数最高3.7%,最低0.5%,从多到少为Hg>Cu>As>Cr>Ni>Cd>Pb>Zn。极重污染级里,Hg有5样,Pb有1样。重—极重污染级里Cu有6样,Hg有5样,Ni和Cd皆为1样,其他为0。重污染级里,Hg有21样,Cu有9样,As、Ni、Zn和Pb各有1样,其他为0。显然,Hg、Cu污染现象最为突出,污染程度重、样品多,其他6种元素按有污染样品数由多到少为As、Ni、Cr、Cd、Zn、Pb,污染较轻。

4.3 重金属潜在生态风险评价

以临沂市土壤背景值为参比值,计算研究区农田土壤重金属潜在生态危害指数(鲍丽然等,2020),结果见表4。Cr、Zn在全部样品的生态危害指数均小于40,为低生态风险;Ni生态危害指数范围1.06~151.64,绝大多数为低风险,中风险和高风险样本各仅有1个;Pb生态危害指数范围1.36~310.71,绝大多数为低风险,中风险样本2个,高风险和很高风险样本各仅有1个;As生态危害指数范围为0.39~185.89,大部为低风险,占99.35%,中风险样本23个,高风险7个和很高风险1个;Cu生态危害指数范围为0.57~179.94,大部为低风险,占99.54%,中风险样本9个,高风险11个和很高风险2个;Cd生态危害指数范围为6.92~966.92,超高风险样本1个,很高风险2个,高风险64个,占1.34%,中风险472个,占9.88%,其余全为低风险,占88.72%;Hg生态危害指数范围为4.64~3198.81,超高风险样本41个,占0.86%,很高风险61个,占1.28%,高风险

表2 基于风险筛选值的超标情况

Table 2 Exceedance based on risk-screening values

pH值 范围	阶段 样数	As		Cd		Cr		Cu		Hg		Ni		Pb		Zn	
		筛选值	超标数	筛选值	超标数	筛选值	超标数	筛选值	超标数	筛选值	超标数	筛选值	超标数	筛选值	超标数	筛选值	超标数
≤5.5	2324	30	5	0.3	10	150	39	50	50	0.5	5	60	37	70	8	200	1
5.5~6.5	1068	30	1	0.3	19	150	38	50	58	0.5	1	70	28	90	3	200	5
6.5~7.5	678	25	3	0.3	16	200	11	100	20	0.6	0	100	5	120	2	250	3
≥7.5	709	20	42	0.6	4	250	5	100	30	1	5	190	2	170	4	300	3
合计	4779		51		49		93		158		11		72		17		12
超标率/%			1.07		1.03		1.95		3.31		0.23		1.51		0.36		0.25

注:8种元素筛选值的质量分数单位为mg/kg。

表3 土壤重金属污染地累积指数分级

Table 3 Geoaccumulation Index classification of soil heavy metal contamination

元素	值域	均值	分级样本数/件						
			无污染 (<0)	轻污染 ($\geq 0 \sim <1$)	中污染 ($\geq 1 \sim <2$)	中一重污染 ($\geq 2 \sim <3$)	重污染 ($\geq 3 \sim <4$)	重一极重污染 ($\geq 4 \sim <5$)	极重污染 (≥ 5)
As	-5.26~3.64	-0.69	4055	656	58	9	1	0	0
Cd	-2.70~4.43	-0.90	4378	358	41	1	0	1	0
Cr	-2.48~2.89	-0.53	4281	433	60	5	0	0	0
Cu	-3.72~4.58	-0.64	4093	562	84	25	9	6	0
Hg	-3.69~5.74	-0.65	4010	593	113	32	21	5	5
Ni	-2.83~4.34	-0.62	4251	481	45	0	1	1	0
Zn	-2.68~3.60	-0.69	4467	286	22	3	1	0	0
Pb	-2.46~5.37	-0.69	4495	250	26	6	1	0	1

270个,占5.65%,中风险1658个,占34.69%,其余为低风险,占57.52%。所以,Hg、Cd为研究区土壤的主要潜在生态危害元素,As、Cu次之,Ni、Pb等个别样点达中等至很高风险,其余全为低水平。

研究区重金属总潜在生态风险指数 RI 范围为27.6~3309.4,以低风险为主,占90.04%,中风险样本398个,占8.33%,高风险样本45个,占0.94%,很高23个,超高10个,合占比仅0.69%。 RI 空间分布图(图2)显示,铜井镇东南部、界湖镇西北金场附近以及县城西部主城区3个片区生态风险程度高范围大,中风险区连片分布,高到超高风险区集中呈多处小片区分布。铜井和金场两个片区为金铜矿区,采冶历史悠久,高风险集中区内有堆场和冶炼厂分布,主要高风险重金属为Hg、Cd,次为As、Cu、Pb高风险区仅在朱家峪东山采场呈点状小片分布。沂

南县城西部主城区,交通发达,人口稠密,多为居民小区、医院、学校,主要为Hg、Cd风险。另外,大庄镇中部、蒲汪镇南西角西坡村西、南东角山东村一带、湖头镇西北角牛家小河到曹家小河村一带,零星分布小片高到超高风险区,主要是Hg高风险。其他大片区域,生态风险低。

4.4 人体健康风险评价

4.4.1 重金属暴露评估分析

先计算研究区土壤重金属的日暴露量,结果见表5和表6。据重金属非致癌平均日暴露量,成人和儿童不同途径平均日摄入量由高到低为 $ADD_{ing} > ADD_{dem} > ADD_{inh}$,经口摄入量远高于经皮肤接触和呼吸吸入量;8种重金属3种途径成人的平均日摄入量由高到低为 $Cr > Zn > Ni > Cu > Pb > As > Cd > Hg$;所有重金属的儿童单一途径日摄入量及3种途径日摄

表4 土壤重金属潜在生态危害指数特征

Table 4 Characteristics of potential ecological damage index of soil heavy metals

危害指数	值域	分级样本数/件					
		低	中	高	很高	超高	
		<40	40~80	80~160	160~320	>320	
As	0.39~185.89	4748	23	7	1	0	
Cd	6.92~966.92	4240	472	64	2	1	
Cr	0.54~22.27	4779	0	0	0	0	
E_i	Cu	0.57~179.94	4757	9	11	2	0
	Hg	4.64~3198.81	2749	1658	270	61	41
	Ni	1.06~151.64	4777	1	1	0	0
	Pb	1.36~310.71	4775	2	1	1	0
	Zn	0.23~18.23	4779	0	0	0	0
RI	27.6~3309.4	<150	150~300	300~600	600~1200	>1200	
		4303	398	45	23	10	

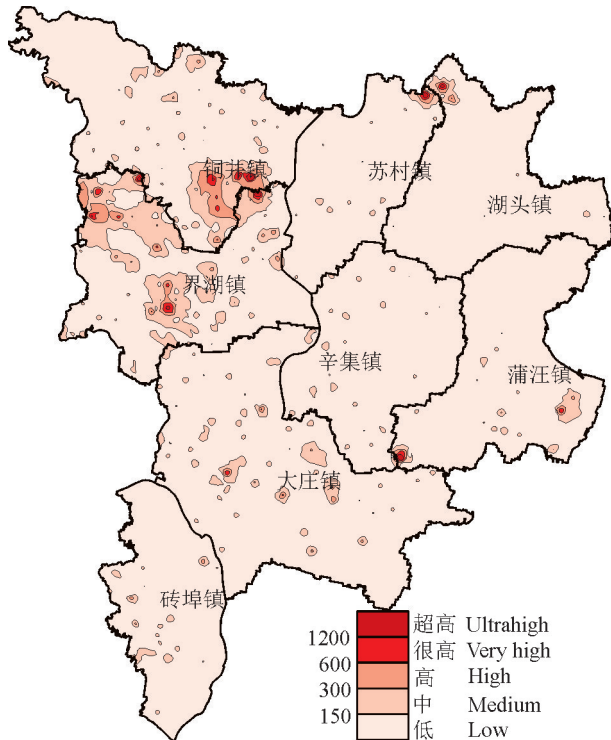


图2 研究区土壤重金属总生态风险等级分布图
Fig.2 Distribution map of total ecological risk grade of soil heavy metals in the study area

入总量均显著高于成人。As、Cd、Cr、Ni元素致癌平均日暴露量中,经口摄入同样远高于皮肤和呼吸,成人和儿童平均日摄入量由高到低顺序一致为Cr>Ni>As>Cd,儿童摄入量同样显著高于成人。因此,经口摄入是土壤重金属致癌和非致癌暴露的主要途径,儿童平均日暴露量显著高于成人。

4.4.2 健康风险评价

基于评价参数和调查数据,按健康风险评价模型,计算研究区8种重金属的非致癌和致癌健康风

险指数,结果见表7和表8。

$HQ \leq 1$ 表示重金属非致癌风险可忽略,反之存在非致癌风险(李如忠等,2012;尹伊梦等,2018)。非致癌健康风险指数显示,成人和儿童的同一元素不同暴露途径的非致癌风险均表现为 $HQ_{ing} > HQ_{derm} > HQ_{inh}$,表明经口摄入是土壤重金属非致癌风险的主要途径。不同重金属成人和儿童的非致癌风险排序一致,但按平均值和按最大值稍有不同,按平均值由高到低为 $Cr > As > Pb > Ni > Cu > Zn > Cd > Hg$,按最大值则为 $Pb > As > Cr > Ni > Cu > Hg > Cd > Zn$,两相比较,相似点是, Cr、As、Pb 都是高风险元素,其余5种都是低风险元素。从平均值看,单项重金属非致癌风险指数平均值最大为0.8399,均小于1,说明总体上研究区内各单项重金属对人体健康尚不存在非致癌风险。从最大值看,各单项重金属的成人非致癌风险指数也均小于1,说明各单项重金属对成人健康尚不存在非致癌风险。按最大值计算,单项重金属的儿童非致癌风险指数大于1的元素有3个,分别是Cr、Pb、As。经统计,单元素儿童非致癌风险指数大于1的样品件数, Cr有917件,占总计19.11%, As有35件,占总计0.73%, Pb仅有3件。这说明As、Pb的少量极大值点区域会对儿童存在一定非致癌风险, Cr是区内最主要的儿童非致癌风险元素。Cr超标样点较广泛分布在整个研究区,其相对高值点则主要分布在铜井镇北东部、大庄镇北部、湖头镇东南部。显然, Cr是研究区土壤中主要非致癌元素, As次之,应加强两元素的非致癌风险预防。

致癌健康风险指数显示,不同暴露途径对成人和儿童致癌风险大小同样表现为 $CR_{ing} >> CR_{derm} > CR_{inh}$,经口摄入造成的风险占比大于99.5%,是致癌

表5 土壤重金属非致癌平均日暴露量[$ADD/10^{-3}mg/(kg \cdot d)$]
Table 5 Non-carcinogenic average daily exposure doses of heavy metals in the soil

重金属	ADD_{ing}		ADD_{inh}		ADD_{derm}		ADD	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	1148.44	8205.20	0.12	0.23	4.93	9.44	1153.49	8214.87
Cd	19.83	141.70	0.00	0.00	0.09	0.16	19.92	141.86
Cr	11566.24	82636.76	1.23	2.28	49.62	95.03	11617.09	82734.07
Cu	4675.00	33401.23	0.50	0.92	20.06	38.41	4695.56	33440.56
Hg	6.04	43.12	0.00	0.00	0.03	0.05	6.07	43.17
Ni	4915.06	35116.43	0.52	0.97	21.09	40.38	4936.67	35157.78
Pb	4422.75	31599.02	0.47	0.87	18.97	36.34	4442.19	31636.23
Zn	10831.28	77385.75	1.15	2.13	46.47	88.99	10878.90	77476.87
ADD	37584.64	268529.21	3.99	7.40	161.26	308.80	37749.89	268845.41

表6 土壤As、Cd、Cr、Ni元素致癌平均日暴露量[ADD/10⁴mg/(kg·d)]
Table 6 Carcinogenic average daily exposure doses of As、Cd、Cr and Ni in the soil

重金属	ADD _{mg}		ADD _{inh}		ADD _{derm}		ADD	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Cd	6.89	18.69	0	0	0.03	0.04	6.92	18.73
As	398.76	1082.53	0.04	0.06	1.71	2.5	400.51	1085.09
Cr	4016.05	10902.45	0.43	0.62	17.23	25.15	4033.71	10928.22
Ni	1706.62	4632.99	0.18	0.26	7.32	10.69	1714.12	4643.94
ADD	6128.32	16636.66	0.65	0.94	26.29	38.38	6155.26	16675.98

绝对因素。重金属致癌风险由高到低为As>Cd>Cr>Ni。As对成人的致癌风险在4个元素风险指数总和中按最大值占86%，按平均值占91%，对儿童的致癌风险按最大值占87%，按平均值占92%，Cd对成人和对儿童的致癌风险按最大值同样占12%，按平均值占6%，这说明As是主要致癌风险元素。成人和儿童致癌风险指数平均总值分别为 6.61×10^{-6} 和 1.77×10^{-5} ，处于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ ，说明总体上研究区重金属引起的致癌总风险尚可接受(李如忠等, 2012; 尹伊梦等, 2018)，但仍超出美国EPA提出的土壤治理基准值 10^{-6} (鲍丽然等, 2020)。从致癌风险指数最大总值看，成人和儿童分别为 1.22×10^{-4} 和 3.28×10^{-4} ，成人值稍超出可接受范围上限 10^{-4} ，儿童值则

明显超出可接受范围，这主要由As的经口摄入途径导致。经统计分析发现，儿童致癌风险总指数超标样品共9件，成人致癌风险总指数超标样品仅1件，都是As致癌风险指数超标，其余3种重金属致癌风险指数均未超出可接受范围。9件超标样品零星散布于铜井镇和界湖镇。因此，该区土壤重金属对儿童呈现零星致癌风险，主要是As元素的致癌风险较大，应注意防范。

5 讨 论

上节初步研究了该区表层土壤8项重金属元素的分布特征、污染程度、潜在生态风险和人体健康风险，各项研究结论有较明显的不一致性，是因为

表7 土壤重金属非致癌健康风险指数(HQ/10⁻⁴)
Table 7 Non-carcinogenic health risk index of heavy metals in the soil (HQ/10⁻⁴)

重金属		HQ _{mg}		HQ _{inh}		HQ _{derm}		HQ	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	最大值	6694.88	47832.63	14.28	26.38	28.72	55.01	6737.88	47914.02
	平均值	382.81	2735.07	0.82	1.51	1.64	3.15	385.27	2739.72
Cd	最大值	70.74	505.38	0.75	1.39	12.14	23.25	83.63	530.03
	平均值	1.98	14.17	0.02	0.04	0.34	0.65	2.34	14.86
Cr	最大值	3841.81	82345.14	48.19	89.04	659.25	1262.63	4549.25	83696.80
	平均值	385.54	8263.68	4.84	8.94	66.16	126.71	456.54	8399.32
Cu	最大值	361.49	2582.71	—	—	1.55	2.97	363.04	2585.68
	平均值	11.69	83.50	—	—	0.05	0.10	11.74	83.60
Hg	最大值	126.01	900.27	0.01	0.02	7.72	14.79	133.74	915.09
	平均值	2.01	14.37	0.00	0.00	0.12	0.24	2.14	14.61
Ni	最大值	701.45	2505.82	65.03	120.16	75.23	144.08	841.71	2770.06
	平均值	24.58	87.79	2.28	4.21	2.64	5.05	29.49	97.05
Pb	最大值	7823.17	55893.86	0.83	0.00	221.63	424.48	8045.64	56318.33
	平均值	126.36	902.83	0.01	0.00	3.58	6.86	129.96	909.69
Zn	最大值	66.49	475.03	—	—	0.29	0.55	66.77	475.58
	平均值	3.61	25.80	—	—	0.02	0.03	3.63	25.82
HQ	最大值	19686.03	193040.83	129.10	237.00	1006.53	1927.75	15646.71	117188.93
	平均值	938.59	12127.21	7.97	14.69	74.55	142.77	1021.10	12284.70

表8 土壤重金属As、Cd、Cr、Ni致癌健康风险指数($CR/10^{-8}$)
Table 8 Carcinogenic health risk index of heavy metals(As, Cd, Cr, Ni) in the soil ($CR/10^{-8}$)

重金属		CR_{ing}		CR_{inh}		CR_{derm}		CR	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	最大值	10460.76	28397.99	0.00	0.00	44.88	65.50	10505.64	28463.50
	平均值	598.15	1623.80	0.00	0.00	2.57	3.75	600.71	1627.54
Cd	最大值	1498.23	4067.27	0.16	0.24	6.43	9.38	1504.82	4076.89
	平均值	42.01	114.04	0.00	0.01	0.18	0.26	42.19	114.31
Cr	最大值	—	—	179.20	258.67	—	—	179.20	258.67
	平均值	—	—	17.98	25.96	—	—	17.98	25.96
Ni	最大值	—	—	4.36	6.30	—	—	4.36	6.30
	平均值	—	—	0.15	0.22	—	—	0.15	0.22
CR	最大值	11958.99	32465.26	183.73	265.21	51.30	74.89	12035.28	32576.21
	平均值	640.15	1737.83	18.14	26.19	2.75	4.01	661.04	1768.03

研究的视角不同,所选指标及指标权重不同,结果就不一致。例如,按富集系数和变异系数从大到小排列,Hg、Cu、Pb都排在前面,而按偏度大小,Pb、Cd、Ni则排到了前面。再参考土壤pH值不同会致元素生物活性不同时,Hg则成为超标率最低的元素。地累积指数没把pH值作为加权指标,则Hg依然是质量分数最高有最高污染风险的元素。潜在生态危害指数计算时则加权了各元素明显不同毒性响应参数,这就让Hg、Cd凸显成为最主要的生态风险元素。健康风险指数计算则加权了更多的指标值,结果就变为8种元素对成人无健康风险,而仅在少数样点中对儿童有非致癌和致癌风险,主要元素为Cr、As。视角不同,主要的风险污染元素不一致,这也从一侧面说明,研究区内没有特别严重的污染和风险元素。

各元素染污程度和风险程度有不一致性,但它们在空间分布上则较为一致,高程度区都主要分布在铜井镇矿业区和界湖镇工业区,即重污染导致高风险。通常情况下,重金属总量并不能反映重金属生物有效性(窦磊等,2007;李继宁等,2013;李华等,2015;武慧君等,2017)。刘婉(2009)认为,基于总量的土壤环境评价结果不仅与生物体内含量的相关性很差,更重要的是往往扩大了污染危害程度,尽管如此,但这也往往是一最大化的危害程度指示,还是有助于警醒人们提前注意到污染风险。本次研究,特别是潜在生态风险评价和人体健康风险评价,是基于表层土壤中各元素总量的,没有加

权生物有效性,据前人研究成果,这样得出的污染程度和风险程度往往会是一个最大化的结果。另一方面,本次研究也仅是基于土壤重金属对人体的直接影响讨论健康风险,没有涉及一些间接因素。如:农作物对重金属元素富集转归、重金属对饮用水的污染、人体内各重金属元素之间及与其他因素间的拮抗等。因此,本次风险评价结论有一定程度的扩大化和不确定性。康鹏宇等(2021)获得的农作物籽实测试结果显示,各重金属元素超标的样点大多分布在本研究区的高污染高风险区。所以,本次风险评价仍然值得人们重视并用以加强预警和防范。

6 结 论

(1)常规的8大重金属元素中除Hg外,As、Cd、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn等7元素含量平均值与临沂市土壤背景值大致相当。Hg略偏高,且变异系数明显最大,有自然源叠加人为源的较大可能性。与国家农用地土壤污染风险筛选值相比,Cu、Cr、Ni是相对主要超标元素,As、Cd、Cu、Pb超标倍数大,它们均可能会产生生态健康危害。

(2)地累积指数评价结果显示,据平均值,该区土壤总体无污染,据单样值,Hg、Cu污染现象最为突出,污染程度重、样品多,其他6元素按有污染样品数由多到少为As、Ni、Cr、Cd、Zn、Pb,污染较轻。

(3)重金属潜在生态风险评价结果表明,Hg、Cd为研究区土壤主要相对高风险元素,As、Cu次之,

Ni、Pb 极个别样点可达到中等至很高风险,其余全为低风险—无风险。主要的高风险区分布在铜井镇南东部、界湖镇西北金场附近以及县城西部主城区等3个片区。

(4)重金属人体健康风险评估结果显示,成人非致癌健康风险可忽略,儿童更易受到重金属威胁,经手口摄入是主要风险途径,Cr是主要非致癌元素,As次之,Cr、Pb、As的少量极大值点区域会对儿童存在一定非致癌风险。成人和儿童致癌风险总指数均超出可接受范围,这主要由As的经口摄入途径导致。As对儿童具有较大致癌风险,应特加防范。

致谢:论文撰写过程中单位领导和项目组成员给予了大力支持,山东省金刚石成矿机理与探测重点实验室多名人员参与样品分析测试,多位山东省级专家和吉林大学赵玉岩博士给予悉心指导,匿名审稿专家和责任编辑提出了宝贵修改意见,在此一并致以衷心的感谢。

References

- Bao Liran, Deng Hai, Jia Zhongmin, Li Yu, Dong Jinxiu, Yan Mingshu, Zhang Fenglei. 2020. Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 47(6): 1625–1636(in Chinese with English abstract).
- Cai Kui, Duan Yamin, Luan Wenlou, Li Qian, Ma Yunchao. 2016. Geochemical behavior of heavy metals Pb and Hg in the farmland soil of Hebei plain[J]. *Geology in China*, 43(4): 1420–1428(in Chinese with English abstract).
- Cui Xingtao, Luan Wenlou, Niu Yanbin, Li Suimin, Song Zefeng. 2011. An assessment of the heavy metal pollution and potential ecological hazards in urban soil of Tangshan City[J]. *Geology in China*, 38(5): 1379–1386(in Chinese with English abstract).
- Cui Xingtao, Luan Wenlou, Song Zefeng, Ma Yunchao. 2016. A study of the spatial distribution and source of heavy metals in urban soil in Shijiazhuang City[J]. *Geology in China*, 43(2): 683–690(in Chinese with English abstract).
- Dai Jierui, Pang Xugui, Song Jianhua, Dong Jian, Hu Xueping, Li Xiaopeng. 2018. A study of geochemical characteristics and ecological risk of elements in soil of urban and suburban areas of Zibo City, Shandong Province[J]. *Geology in China*, 45(3): 617–627(in Chinese with English abstract).
- Dou Lei, Zhou Yongzhang, Gao Quanzhou, Peng Xianzhi, Cai Limei, Gu Zhihong. 2007. Methods and environmental implications of measuring bioavailability of heavy metals in soil environment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 38(3): 576–583(in Chinese with English abstract).
- Forstner U, Ahlf W, Calmano W. 1993. Sediment quality objectives and criteria development in Germany[J]. *Water Science and Technology*, 28(8): 307–314.
- Guan Houchun, Li Yunhuai, Peng Miaozi, Liu Daobin. 2013. The evaluation of heavy metal pollution and its potential ecological risk of urban topsoil in Huangshan City[J]. *Geology in China*, 40(6): 1949–1958(in Chinese with English abstract).
- Guo Jungang, Zhao Hengqin, Bian Xiaodong, Sun Xiaoyan. 2021. Characteristics and ecological risk of soil heavy metals of a Tungsten mine in Yudu, Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(7): 1195–1202(in Chinese with English abstract).
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control a sediment to logical approach[J]. *Water Research*, 14(8): 975–1001.
- Jiang Baiwen, Lu Lei, Wang Chunhong, Gao Qiang, Zhang Di, Chen Xi, Wang Yanling. 2020. Effect of organic fertilizer application on heavy metals accumulation in soil and risk assessment[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 51(4): 37–44(in Chinese with English abstract).
- Kang Pengyu, Liu Chuanpeng, Liang Cheng, Deng Jun, Yao Yonglin, Liu Tong, Zhi Huan, Zong Chuanpan, Ge Yuejin, Wang Kaikai, Yu Guangting, Zhao Kunpeng, Zhang Lipeng, Gu Huaiqing, Li Xiaoqing, Jiang Zihu. 2021. 1: 50000 Land Quality Geochemical Survey and Evaluation Report in Eastern Yinan County, Shandong Province[R]. Linyi: Shandong Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development No.7 Geological Brigade(in Chinese with English abstract).
- Li Hua, Li Hailong, Zhu Yu'en, Liu Miao, Shi Weiyu, Chen Yiping, Wu Shan. 2015. Health risk assessment based on bioavailability of heavy metals in contaminated sites[J]. *Journal of Earth Environment*, 6(1): 60–66(in Chinese with English abstract).
- Li Jining, Hou Hong, Wei Yuan, Xu Yafei, Li Fasheng. 2013. Bioaccessibility and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil from Zhuzhou, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 26(10): 1139–1146(in Chinese with English abstract).
- Li Ping, Huang Yong, Lin Yun, Hua Peixue, Yuan Guoli. 2018. Distribution, source identification and risk assessment of heavy metals in topsoil of Huairou district in Beijing[J]. *Geoscience*, 32(1): 86–94(in Chinese with English abstract).
- Li Ruzhong, Pan Chengrong, Chen Jing, Jiang Yanmin, Ding Guizhen. 2012. Heavy metal contamination and health risk assessment for urban topsoil and dust in Tongling City[J]. *China Environmental Science*, 32(12): 2261–2270(in Chinese with English abstract).
- Liu Ruiping, Xu Youning, Zhang Jianghua, Wang Wenke, Elwardany Rafeay M. 2020. Effects of heavy metal pollution on farmland soils and crops: A case study of the Xiaolinling Gold Belt, China[J]. *China Geology*, 2(3): 402–410.
- Liu Wan. 2009. Research on the Ecological Risk Assessment Model of

- Heavy Metal Pollution on the Farm Soil near the Mine[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–69 (in Chinese with English abstract).
- Lu Jianshu, Zhang Zulu, Liu Yang, Dai Jierui, Wang Xue, Wang Maoxiang. 2012. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 67(7): 971–984(in Chinese with English abstract).
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. 2018. Environment quality risk control standard for soil contamination of agricultural land(GB 15618—2018Soil) [S]. Beijing: China Environmental Press (in Chinese).
- Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geological Journals*, 2(108): 108–118.
- Pang Xugui, Dai Jierui, Hu Xueping, Song Zhiyong, Yu Chao, Chen Lei, Zhang Huaping, Liu Huafeng, Wang Hongjin, Wang Zenghui, Zhao Xiqiang, Ceng Xiandong, Ren Wenkai. 2018. Background values of soil geochemistry in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 34(1): 39–43(in Chinese with English abstract).
- Sun Fangqiang, Yin Lihe, Jia Wuhui, Zhang Jun, Wang Xiaoyong, Zhu Lifeng, Zhang Xinxin, Tang Xiaoping, Dong Jiaqiu. 2020. Soil water movement and deep drainage through thick vadose zones on the northern slope of the Tianshan Mountain: Croplands vs. natural lands[J]. *China Geology*, 3(1): 113–123.
- Tian Meiling, Zhong Xuemei, Zhang Yunxia, Yu Yuanyuan, Pang Rui, Zhou Lang, Song Bo. 2018. Concentrations and health risk assessments of heavy metal contents in soil and rice of mine contaminated areas[J]. *Environmental Science*, 39(6): 2919–2926 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunpeng, You Jiangong, Sun Hao, Tian Ye, Hou Hongxing, Shi Jingtao, Jin Shengkai, Wang Mo. 2021. Characteristics and potential risk assessment of heavy metal contents in urban soil Liaoyang City[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(10): 1680–1687 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuang, Li Ronghua, Zhang Zengqiang, Feng Jing, Shen Feng. 2014. Assessment of the heavy metal pollution and potential ecological hazardous in agricultural soils and crops of Tongguan, Shaanxi Province[J]. *China Environmental Science*, 34(9): 2313–2320(in Chinese with English abstract).
- Wang Tengfei, Tan Zhangyin, Cao Xueying, Ou Yangda, Nie Jun, Wang Boren, He Qihui, Liang Yufeng. 2017. Effects of long-term fertilization on the accumulation and availability of heavy metals in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 36(2): 257–263(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhe, Liu Shaoqing, Chen Xiaomin, Lin Chunye. 2008. Estimates of the exposed dermal surface area of Chinese in view of human health risk assessment[J]. *Journal of Safety and Environment*, 8(4): 152–156(in Chinese with English abstract).
- Wei Shanming, Ding Guantao, Yuan Guoxia, Wang Lifang, Nie Yupeng, Du Jinliang. 2021. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Yi'nan, East Wenhe River basin in Shandong Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(6): 1973–1983(in Chinese with English abstract).
- Wu Huijun, Fang Fengman, Wu Jiayuan, Yao Youru, Wu Minghong, Kuang Ying. 2017. Bioaccessibility and health risk of heavy metals at topsoil in primary schools in a coal mining city[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 48(5): 1247–1255(in Chinese with English abstract).
- Xiong Zi. 2017. Studies on Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal in Hebei's Farmland Soil—A Case of Cadmium and Nickel[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 1–68(in Chinese with English abstract).
- Xu Youning, Zhang Jianghua, Ke Hailing, Chen Huaqing, Qiao Gang, Liu Ruiping, Shi Yufei. 2014. Human health risk under the condition of farmland soil heavy metals pollution in a gold mining area[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(8): 1239–1252(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).
- Yin Yimeng, Zhao Weituo, Huang Ting, Cheng Shenggao, Zhao Zhenli, Yu Congcong. 2018. Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a soil-rice system in an E-waste dismantling area[J]. *Environmental science*, 39(2): 916–926 (in Chinese with English abstract).
- Yu Chao, Wang Hongjin. 2014. Investigation and evaluation of agro-eco-geochemistry in Linyi City, Shandong Province[R]. Ji'nan: Shandong Institute of Geological Survey(in Chinese with English abstract).
- Yu Ruilian, Hu Gongren. 2008. Research progress in sources identification of soil heavy metal pollution[J]. *Non-ferrous Metal*, 60(4): 158–165(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiufang, Zhang Yongshuai, Feng Aiping, Wang Yixuan, Xia Lixian, Wang Honglei, Du Wei. 2020. Geochemical characteristics and environmental assessment of heavy metal elements in agricultural soil of Anqiu area, Shandong Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 44(6): 1446–1454(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yong Cun, Wang Zhi Gang, Sun Wei Xia, Huang Biao, Shi Xue Zheng, Ji Jun Feng. 2010. Spatial interrelations and multi-scale sources of soil heavy metal variability in a typical urban-rural transition area in Yangtze River Delta region of China[J]. *Geoderma*, 156(3/4): 216–227(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 李瑜, 董金秀, 严明书, 张风雷. 2020. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 47(6): 1625-1636.
- 蔡奎, 段亚敏, 栾文楼, 李倩, 马云超. 2016. 河北平原农田土壤重金属元素Pb、Hg地球化学行为的影响因素[J]. 中国地质, 43(4): 1420-1428.
- 崔邢涛, 栾文楼, 牛彦斌, 李随民, 宋泽峰. 2011. 唐山城市土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 中国地质, 38(5): 1379-1386.
- 崔邢涛, 栾文楼, 宋泽峰, 马云超. 2016. 石家庄城市土壤重金属空间分布特征及源解析[J]. 中国地质, 43(2): 683-690.
- 代杰瑞, 庞绪贵, 宋建华, 董建, 胡雪平, 李肖鹏. 2018. 山东淄博城市和近郊土壤元素地球化学特征及生态风险研究[J]. 中国地质, 45(3): 617-627.
- 窦磊, 周永章, 高全洲, 彭先芝, 蔡立梅, 古志宏. 2007. 土壤环境中重金属生物有效性评价方法及其环境学意义[J]. 土壤通报, 38(3): 576-583.
- 管后春, 李运怀, 彭苗枝, 刘道彬. 2013. 黄山城市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 中国地质, 40(6): 1949-1958.
- 郭俊刚, 赵恒勤, 卞孝东, 孙晓艳. 2021. 江西于都某钨矿区土壤重金属特征及生态风险评价[J]. 地质通报, 40(7): 1195-1202.
- 姜佰文, 陆磊, 王春宏, 高强, 张迪, 陈曦, 王艳玲. 2020. 施用有机肥对土壤重金属累积的影响及风险评价[J]. 东北农业大学学报, 51(4): 37-44.
- 康鹏宇, 刘传朋, 梁成, 邓俊, 姚永林, 刘同, 智欢, 宗传攀, 葛跃进, 王凯凯, 余广庭, 赵鲲鹏, 张立朋, 古怀庆, 李晓青, 蒋自虎. 2021. 山东省沂南县东部地区1:5万土地质量地球化学调查与评价报告[R]. 临沂: 山东省地质矿产勘查开发局第七地质大队.
- 李华, 李海龙, 朱宇恩, 刘苗, 时伟宇, 陈怡平, 吴山. 2015. 基于人体可给性的重金属污染场地健康风险评价[J]. 地球环境学报, 6(1): 60-66.
- 李继宁, 侯红, 魏源, 许亚飞, 李发生. 2013. 株洲市农田土壤重金属生物可给性及其人体健康风险评估[J]. 环境科学研究, 26(10): 1139-1146.
- 李苹, 黄勇, 林赞, 华培学, 袁国礼. 2018. 北京市怀柔区土壤重金属的分布特征、来源分析及风险评价[J]. 现代地质, 32(1): 86-94.
- 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 姜敏敏, 丁贵珍. 2012. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. 中国环境科学, 32(12): 2261-2270.
- 刘婉. 2009. 矿山环境农田土壤重金属污染潜在生态风险评价模型研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1-69.
- 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 代杰瑞, 王学, 王茂香. 2012. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 67(7): 971-984.
- 庞绪贵, 代杰瑞, 胡雪平, 宋志勇, 喻超, 陈磊, 张华平, 刘华峰, 王红晋, 王增辉, 赵西强, 曾宪东, 任文凯. 2018. 山东省土壤地球化学背景值[J]. 山东国土资源, 34(1): 39-43.
- 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 2018. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB15618—2018)[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波. 2018. 矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险[J]. 环境科学, 39(6): 2919-2926.
- 汪春鹏, 尤建功, 孙浩, 田野, 侯红星, 史敬涛, 靳胜凯, 王末. 2021. 辽阳市土壤重金属含量特征及潜在风险评价[J]. 地质通报, 40(10): 1680-1687.
- 王爽, 李荣华, 张增强, 冯静, 沈锋. 2014. 陕西潼关农田土壤及农作物重金属污染及潜在风险[J]. 中国环境科学, 34(9): 2313-2320.
- 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 欧阳达, 聂军, 王伯仁, 何其辉, 梁玉峰. 2017. 长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 36(2): 257-263.
- 王喆, 刘少卿, 陈晓民, 林春野. 2008. 健康风险评价中中国人皮肤暴露面积的估算[J]. 安全与环境学报, 8(4): 152-156.
- 魏善明, 丁冠涛, 袁国霞, 汪丽芳, 聂玉朋, 杜金亮. 2021. 山东省东汶河沂南地区地下水水化学特征及形成机理[J]. 地质学报, 95(6): 1973-1983.
- 武慧君, 方方满, 武家园, 姚有如, 吴明宏, 匡盈. 2017. 煤矿型城市小学校园表层土壤重金属生物可给性与健康风险研究[J]. 土壤通报, 48(5): 1247-1255.
- 熊孜. 2017. 河北农田土壤重金属污染特征及风险评估研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 1-68.
- 徐友宁, 张江华, 柯海玲, 陈华清, 乔冈, 刘瑞平, 史宇飞. 2014. 某金矿区农田土壤重金属污染的人体健康风险[J]. 地质通报, 33(8): 1239-1252.
- 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.
- 尹伊梦, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 赵珍丽, 余葱葱. 2018. 电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 39(2): 916-926.
- 于瑞莲, 胡恭任. 2008. 土壤中重金属污染源解析研究进展[J]. 有色金属, 60(4): 158-165.
- 喻超, 王红晋. 2014. 山东省临沂市农业生态地球化学调查与评价[R]. 济南: 山东省地质调查院.
- 赵秀芳, 张永帅, 冯爱平, 王艺璇, 夏立献, 王宏雷, 杜伟. 2020. 山东省安丘地区农业土壤重金属元素地球化学特征及环境评价[J]. 物探与化探, 44(6): 1446-1454.