

doi: 10.12029/gc20220619

杨玲, 田磊, 白光宇, 裴圣良, 张德强. 2022. 内蒙古新巴尔虎右旗土壤重金属生态风险与来源分析[J]. 中国地质, 49(6): 1970–1983.

Yang Ling, Tian Lei, Bai Guangyu, Pei Shengliang, Zhang Deqiang. 2022. Ecological risk assessments and source analysis of heavy metals in the soil of Xin Barag Youqi, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 49(6): 1970–1983(in Chinese with English abstract).

内蒙古新巴尔虎右旗土壤重金属生态风险与来源分析

杨玲¹, 田磊², 白光宇², 裴圣良², 张德强²

(1. 中国煤炭地质总局, 北京, 100038; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要:【研究目的】新巴尔虎右旗地处呼伦贝尔草原深处, 矿业活动频繁。了解该地区土壤中重金属来源以及生态风险是评估区域环境影响前提。【研究方法】本文系统采集了矿石、基岩及土壤样品共 221 件, 测试并分析了 Cd、Cr、As、Hg、Ni、Pb、Zn 等 7 种重金属元素的含量。利用地积累指数法和潜在生态风险指数法评价了重金属的污染程度和生态风险, 并综合运用相关分析、主成分分析法判断了土壤重金属的来源。【研究结果】研究表明, 新巴尔虎右旗土壤重金属污染以轻度为主, Cd、Ni、As、Cr、Pb 元素均存在一定程度的污染, 污染区域集中于甲查矿区、准乌兰诺尔、呼伦湖西北岸以及克鲁伦河中游。Cr、Ni、Hg 主要受人类活动影响; Cd、Zn、Pb 受到自然因素与人类活动共同影响, As 主要受自然因素影响。【结论】总体来看, 本区生态风险整体较低, 以 Cd 对生态风险的贡献最为突出, 在本区土壤质量监测中应受到重视。

关键词: 土壤重金属; 潜在生态风险; 矿山地质环境调查工程; 内蒙古; 新巴尔虎右旗

创 新 点: 分析了内蒙古新巴尔虎右旗地区土壤重金属元素空间分布规律并探讨了其主要来源途径, 有助于了解采矿活动对内蒙古草原区环境的影响。

中图分类号: X53; X826 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2022)06–1970–14

Ecological risk assessments and source analysis of heavy metals in the soil of Xin Barag Youqi, Inner Mongolia

YANG Ling¹, TIAN Lei², BAI Guangyu², PEI Shengliang², ZHANG Deqiang²

(1. China National Administration of Coal Geology, Beijing 100038, China; 2. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

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

[Objective] Xin Barag Youqi is located in hulun buir grassland, and mining activities are frequent. Understanding the sources and ecological risks of heavy metals of soil in this area is prerequisite for assessing environmental impact. **[Methods]** We collected a total of 221 samples of ore, bed rock and soil, and tested contents of 7 elements (Cd, Cr, As, Hg, Ni, Pb and Zn). The pollution degree and distribution characteristics of heavy metals were evaluated by geoaccumulation index method and potential ecological

收稿日期: 2020–06–20; 改回日期: 2020–10–09

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190701)资助。

作者简介: 杨玲, 女, 1981 年生, 高级工程师, 从事矿山地质调查工作; E-mail: 931150675@qq.com。

通讯作者: 张德强, 男, 1976 年生, 教授级高工, 长期从事矿山地质环境调查与生态修复工作; E-mail: zhangdq@cigem.cn。

risk index method. The sources of heavy metals in soil were determined by correlation analysis and principal component analysis. **[Results]** It was found that the heavy metal pollution in the soil of Xin Barag Youqi is mainly mild, and Cd, Ni, As, Cr and Pb are polluted. The contaminated areas are located in Jiawula-Chagan Mining Area, Zhuang Ulanor, northwest shore of Hulun Lake and middle of the Krumlun River. Source analysis results shows that Cr, Ni and Hg are mainly from human activities, Cd, Zn and Pb are affected by both natural factors and human activities, and As is mainly from natural factors. **[Conclusions]** In general, the ecological risk in Xin Barag Youqi is low, and Cd has the most prominent contribution to the ecological risk of the soil in this area, which should be taken seriously in soil quality monitoring.

Key words: soil heavy metals; potential ecological risk; mine environmental geological survey engineering; Inner Mongolia; Xin Barag Youqi

Highlights: This paper analyzes the spatial distribution of heavy metals in the soil of Xin Barag Youqi, Inner Mongolia, and discusses the main sources of heavy metals, which is helpful to understand the impact of mining activities on the environment in the grassland area of Inner Mongolia.

About the first author: YANG Ling, female, born in 1981, master, senior engineer, mainly engages in mine geological survey; E-mail: 931150675@qq.com.

About the corresponding author: ZHANG Deqiang, male, born in 1976, professor-level senior engineer, mainly engaged in mine geological environment survey and ecological restoration; E-mail: zhangdq@cigem.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190701).

1 引言

土壤重金属污染是中国目前生态环境面临的最严重的威胁之一,重金属污染事件在全国各地均有报道(张进德等,2008;戴彬等,2015;赵倩等,2016;黄大伟等,2017;吴珊珊等,2019;鲍丽然等,2020;曹胜伟等,2022;刘同等,2022),其具有毒性大、潜伏周期长的特点(房增强,2016;吴先亮等,2018)。长期以来,金属矿山的开采被认为是土壤重金属污染的重要来源之一(覃朝科等,2013;周艳等,2018)。大量研究表明金属矿山尾矿中的Pb、Zn、Cd、As、Cu等重金属元素污染严重,并通过粉尘和废水向周边环境释放(周科平等,2015;李俊凯等,2018;陈文德等,2019;刘智峰等,2019)。其中,陆泗进等(2014)运用潜在生态危害指数法对会泽某铅锌矿周边土壤进行评价,查明46.3%的采样点处于强生态风险程度,15.6%的采样点处于极强生态风险程度。周耀渝等(2012)、邓超冰等(2009)分别对湖南与广西的典型铅锌矿周边土壤进行研究,结果表明Pb、Zn、Cd均达到中到重度污染,并以Cd污染最为严重。王京(2017)、孙锐等(2011)分别运用聚类分析与Pb同位素法探讨了矿区重金属元素的来源,认为Cd、Pb、Zn等元素的污染与尾矿库的影响及冶炼厂烟气粉尘的沉降有关。张晗等(2015)通过对金属矿山周边农作物的研究发现植物受到了土壤中重金属元

素的胁迫,Cd与Pb明显富集。因此,了解矿区周边土壤重金属元素分布,富集程度以及来源,对于土壤污染治理与维护生态安全具有重要意义。

新巴尔虎右旗地处内蒙古呼伦贝尔草原西部,矿产资源丰富,区内分布有多个大型多金属矿床(李云刚,2013;张璟等,2015)。同时,新巴尔虎右旗属呼伦湖流域,区内克鲁伦河是呼伦湖重要补给来源,对区域生态、气候、经济影响深远(杨培峰等,2015)。习近平总书记在十三届全国人大二次会议中强调了内蒙古呼伦贝尔地区生态环境对于中国北疆、乃至华北地区的重要性。因此,新巴尔虎右旗生态环境受到众多学者的愈发重视,前人对本区的水、土壤、植被等方面研究均有报道(乌云娜等,2012;巴图,2013;杨文焕等,2015;李卫平等,2016),杨培峰等(2015)、任波(2015)通过采样调查,报道了克鲁伦河沿岸土壤存在重金属污染的现象,但研究只限于河流两岸,控制范围较小,无法确定重金属元素的分布状况及来源。本次研究系统分析新巴尔虎右旗土壤重金属污染特征,评价生态风险,并探讨重金属元素来源,为维护当地牧业健康发展提供更有力的理论支撑。

2 研究区概况

本文研究区地处呼伦贝尔草原区新巴尔虎右

旗,属于旱半干旱大陆性季风气候,年降水量为247~319 mm,年均蒸发量为1500 mm,具有降水少而蒸发强烈的特征。地貌单元属呼伦贝尔断裂下陷盆地。以克鲁伦河为界,北部地形起伏较大,坡度略陡,海拔一般为700~800 m;南部地形起伏较小,坡度较缓,海拔一般在550~700 m,全旗呈现西北高,东南低的态势(邸择雷等,2017;金林雪等,2018)。

研究区基岩以中生界中酸性火山岩及华力期、燕山期花岗岩为主;大部分地区被第四系覆盖,主要为黄色、黄褐色风成砂、粉砂质黏土及砂砾石(双宝,2012;周多等,2015);区内地下水不丰富,主要的补给来源为大气降水,地下水总体由山区流向河谷,之后向下游径流,排泄方式以蒸发及补给克鲁伦河为主(邢苒苒等,2011)。

新巴尔虎右旗属得尔布干成矿带,现已发现多个大型金属矿床,其中以白音甲乌拉铅锌矿、查干布拉根银铅锌矿、额仁陶勒盖锰银矿等矿床为代表,矿石矿物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、白铁矿、硬锰矿、磁黄铁矿、黄铜矿、自然银等(许立权等,2014;杨梅等,2017)。

3 样品采集与测试

3.1 样品采集

本次采样时间为2018年7—8月,所采样品均匀分布于整个研究区内,兼顾各种土壤及基岩类型,并有重点的对矿山及周边进行适当加密,本次土壤样品采样对象为表层土壤(0~20 cm),以GPS定位的采样点为中心,向四周辐射30~50 m确定3~5个分样点。在捡除石块、作物残体后,将取样各点土样充分混合。之后采用四分法缩分样品至1 kg左右,最后将完全晾干密封并过20目尼龙筛后的土壤样品于10日内运送至实验室。全区共采集表层土壤单点样182件,组合分析样38件;基岩样品采样对象为矿区周边地表出露较好的基岩,均为剥除岩石风化面后去的新鲜样品,以GPS定位的采样点为中心,向四周辐射300~500 m确定3~5个分样点,并兼顾本区基岩类型,共采集基岩单点样24件,组合分析样6件;矿石样品主要采集于甲乌拉、查干布拉及额仁陶勒盖矿区内部,选择新鲜未分选的矿石进行采样,共采集矿石单点样15件,组合分析样5

件,土壤组合分析样品位置见图1。

3.2 测试方法

本次测试委托内蒙古原野测试公司完成。测试流程严格按照自然资源部发布的区域地球化学样品分析方法(DZT0279-2016)执行。分析方法的准确度及精密度采用国家一级土壤标准物质进行检验(GBW系列),实验全程进行空白试验及平行试验,重复样检测率为10%,各元素加标回收率达90%以上,测试方法及检出限如表1所示。

4 评价方法

目前国内关于土壤重金属污染评价的方法主要有内梅罗指数法、富集因子法、地积累指数法和潜在生态危害指数法等。内梅罗指数法是以土壤环境质量标准值作为评价标准,广泛应用于土壤重金属污染评价中,但本地区污染本底值较低,采用固定的标准值有忽视污染风险的可能;富集因子法是以Ca、Al等元素作为参考元素,并以地壳中元素平均含量进行标准化,进而评价土壤中重金属污染情况。但各地区岩石风化及成土过程的不同会使地壳或背景区域中目标元素与参考元素比值难以确定,影响评价结果;地积累指数法通过元素在环境介质中实测含量与目标元素地球化学背景值相比,能够减少环境地球化学背景值以及造岩运动可能引起的背景值变动的干扰;潜在生态危害指数法将重金属含量和环境生态效应、毒理学有效联系起来,能够较好地对重金属的影响进行评价(王玉军等,2017)。因此,本文选择地积累指数法及潜在生态危害指数法进行评价。

4.1 地积累指数法

地积累指数法由德国科学家Muller提出,最初是被用作研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标。它从环境地球化学的角度出发,不仅考虑到人类影响因素、区域地球化学背景值,还考虑到由基岩类型变化而引起的背景值变动,能够良好地反映重金属元素污染情况(Muller, 1969;柴世伟等,2006)。其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5B_n)$$

式中, C_n 为元素实测值, B_n 为该元素背景值。地积累指数从无污染至极强污染共分为7级,具体见表2。

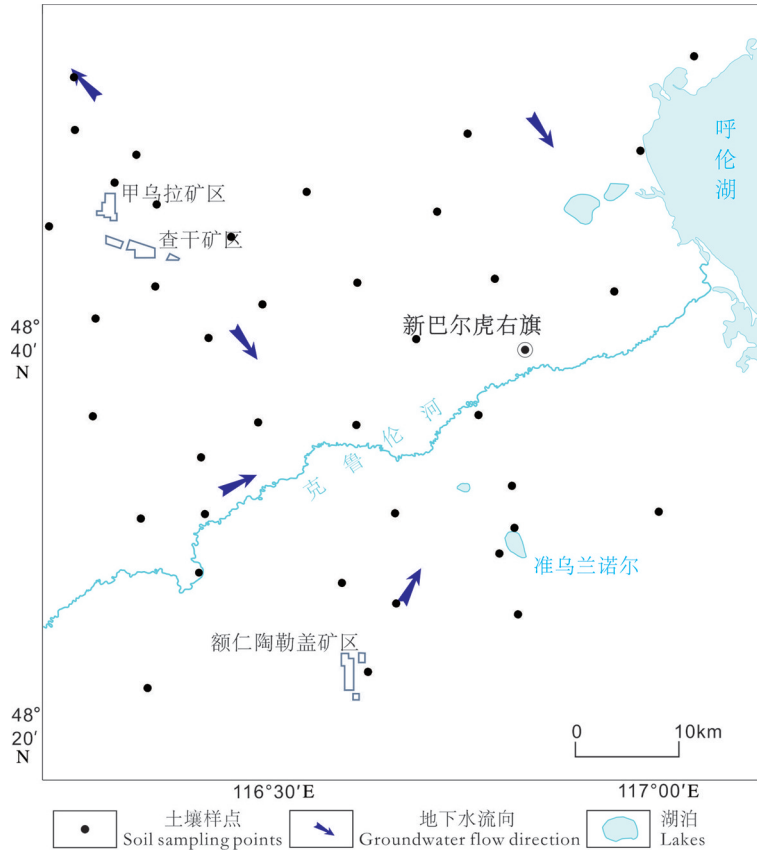


图1 新巴尔虎右旗土壤采样位置图
Fig.1 Location map of soil sampling in the Xin Barag Youqi

4.2 潜在生态风险评价方法

潜在生态危害指数评价法从沉积学角度出发,兼顾了土壤中重金属含量、污染物类型与污染物毒性水平等多方面影响因素(杨辉等,2013;尹鑫等,2016)。由于本文研究区土壤重金属元素本底值较低,选取土壤环境质量标准中二级标准值不能良好地反映土壤中重金属元素的迁移变化趋势,故选取区域土壤的背景值作为对比标准值(赵丕忠等,2014),能够综合评价土壤中重金属元素的影响潜力。

$$P_i = C_s^i / C_n^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times P_i$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times P_i$$

式中: P_i 为单因子污染指数, C_s^i 为重金属浓度实测值, C_n^i 为区域背景值, T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数, E_r^i 为重金属 i 的潜在危害指数, RI 为综合潜在生态危害指数,即各重金属 E_r^i 之和。其中毒性响应因子由各元素本身毒性与生物生产指数共同确

表1 各元素测试方法及检出限

Table 1 Test methods and detection limits for each element		
测试方法	检出限	
Cd	电感耦合等离子体质谱法	0.04×10 ⁻⁶
Cr	电感耦合等离子体光谱法	5×10 ⁻⁹
As	原子荧光光度法	1×10 ⁻⁶
Hg	原子荧光光谱法	4×10 ⁻⁹
Ni	电感耦合等离子体质谱法	2×10 ⁻⁶
Pb	电感耦合等离子体光谱法	4×10 ⁻⁶
Zn	电感耦合等离子体光谱法	4×10 ⁻⁶

表2 地积累指数分级

Table 2 Classification of geoaccumulation index	
地积累指数	污染程度
5 < I_{geo} ≤ 10	极严重污染
4 < I_{geo} ≤ 5	强—极严重污染
3 < I_{geo} ≤ 4	强污染
2 < I_{geo} ≤ 3	中度—强污染
1 < I_{geo} ≤ 2	中度污染
0 < I_{geo} ≤ 1	轻度污染
I_{geo} ≤ 0	无污染

定,本文采用Hakanson制定的标准化重金属毒性响应系数为评价依据,分别为: Cd=30, Cr=2, As=10, Hg=40, Ni=5, Pb=5, Zn=1 (Hakanson, 1980), 潜在生态风险指数分级见表3。

5 重金属元素含量及生态风险

5.1 土壤重金属元素含量特征

由表4可见,新巴尔虎右旗土壤中Cd、Cr、As、Hg、Ni、Pb、Zn等元素的含量变幅分别为0.10~0.48、12.20~73.38、2.18~32.69、5.79~23.16、9.67~30.13、9.00~50.00、198.99~889.24,均值分别为0.17、35.20、11.47、18.34、17.35、19.18、36.74。Cd、As、Ni等元素均值超过背景值,分别为背景值的1.88、1.22及1.31倍,Cr的均值与背景值相当,Hg、Pb、Zn等元素均值在背景值以下。各元素变异系数在0.28~0.47,以Pb、Cd、As、Hg等元素的变异系数较高,表明Cd、As、Ni、Cr、Pb等元素在空间分布上不均匀,具有局部富集趋势。

5.2 土壤重金属污染评价

以新巴尔虎右旗土壤背景值为标准(赵丕忠等,2014),对研究区土壤重金属污染程度进行地积

累指数评价(表5)。由表5可知,地积累指数均值由大到小的排序为: Cd>Ni>As>Cr>Pb>Hg>Zn。其中Cd、Ni、As、Cr、Pb元素在本区均具有一定程度的污染,以Cd污染程度最高,采样点位中有68.43%的样品为轻度污染,10.52%的样品达中度污染水平。除此之外,有1个分析样的As元素达到中度污染水平,Cr、Ni、Pb均为轻度污染,分别占全部样品数的7.89%、23.68%及7.89%。总体来看,研究区土壤以轻度污染为主。

5.3 土壤重金属污染分布特征

运用克里金插值法对各样点地积累指数进行插值并绘制各元素污染分布图(图2),污染区域主要集中于甲乌拉、查干矿区周边(以下简称甲查矿区)、准乌兰诺尔、呼伦湖西北岸以及克鲁伦河中游。

由图2可知,在甲查矿区,各元素的污染范围Cd>Ni>Cr≈Pb>As,在准乌兰诺尔各元素的污染范围Cd>As>Ni>Pb≈Cr,Cd的污染范围均最大。前人在对土壤中重金属的迁移性研究中发现,当Zn、Pb、Cd、As等元素同时存在时,Cd因具有较小的吸附亲和力,不易被土壤吸附,能够长距离迁移(Saha et al., 2002; Antoniadis et al., 2007),研究区污染特征

表3 潜在生态风险指数分级

Table 3 Classification of potential ecological risk index

单元素潜在生态危害指数 E_i^p	单元素潜在生态风险程度	潜在生态危害指数 RI	潜在生态风险程度
$E_i^p < 40$	低	$RI < 150$	低
$40 \leq E_i^p < 80$	中	$150 < RI \leq 300$	中
$80 \leq E_i^p < 160$	较重	$300 < RI \leq 600$	重
$160 \leq E_i^p < 320$	重	$600 \leq RI$	严重
$320 \leq E_i^p$	严重		

表4 新巴尔虎右旗重金属元素统计($n=49$)

Table 4 Statistics of heavy metal elements in Xin Barag Youqi soil ($n=49$)

指数评价	Cd	Cr	As	Hg	Ni	Pb	Zn
土壤							
最大值	0.48	73.38	32.69	39.47	30.13	50.00	60.00
最小值	0.10	12.20	2.18	5.79	9.67	9.00	17.00
均值	0.17	35.20	11.47	18.34	17.35	19.18	36.74
标准差	0.08	12.25	5.31	7.15	4.78	9.04	13.48
变异系数	0.45	0.35	0.46	0.39	0.28	0.47	0.37
区域背景值	0.09	35.43	9.38	25.15	13.25	24.04	63.89
地积累							
指数							
轻度污染/%	68.43	7.89	18.42	0	23.68	7.89	0
中度污染/%	10.52	0	2.63	0	0	0	0
潜在生态							
风险指数							
中风险/%	68.43	0	0	0	0	0	0
中度污染/%	10.52	0	0	0	0	0	0

注: Hg元素单位为 $\mu\text{g}/\text{kg}$,其余元素单位均为 mg/kg 。

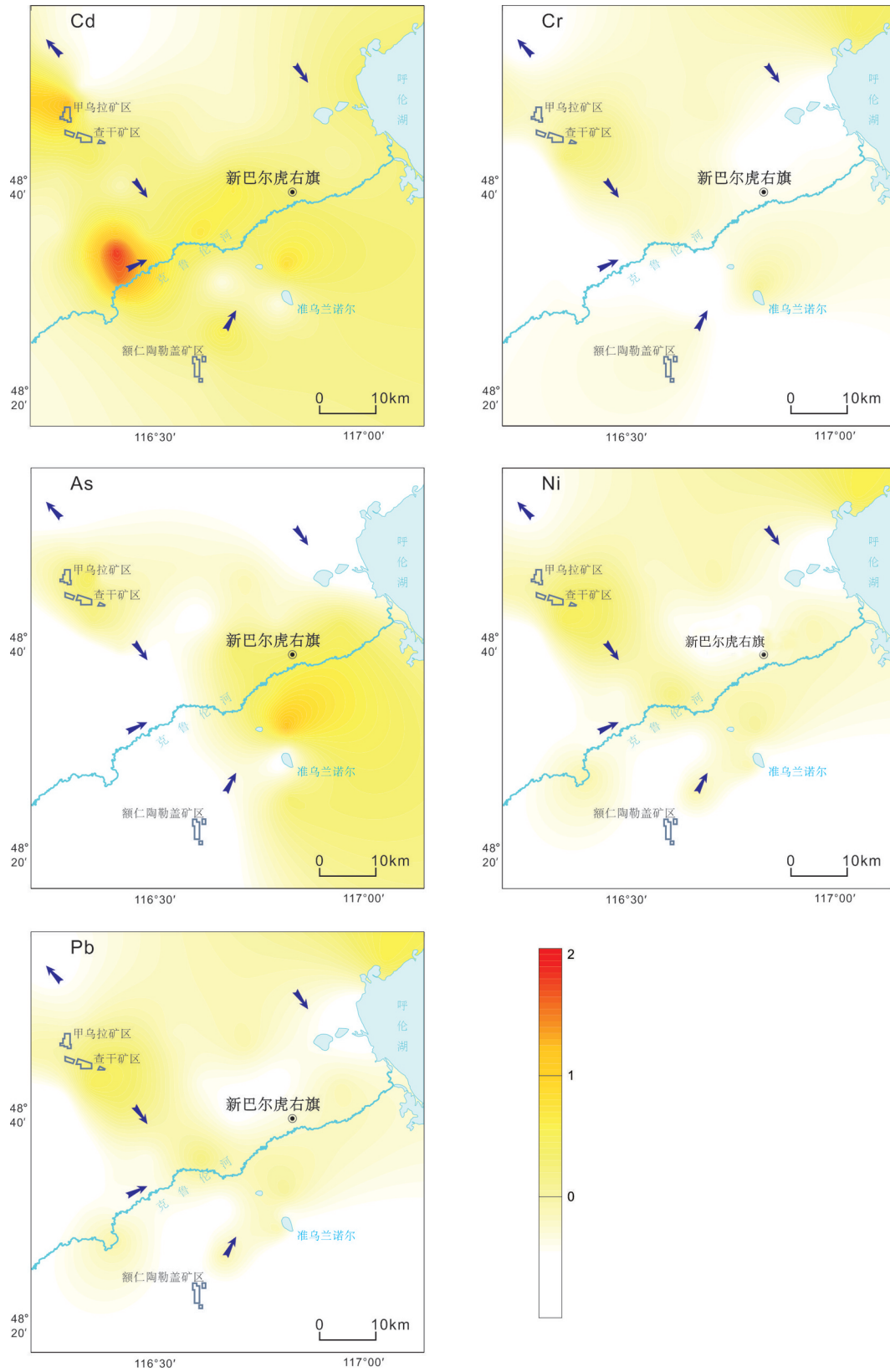


图2 新巴尔虎右旗土壤地积累指数分布图

Fig.2 Distribution of geoaccumulation index in Xin Barag Youqi soil

表5 土壤重金属污染地积累指数分级

Table 5 Classification of heavy metals in soil based on the Igeo

重金属	指数范围	各级样本占比/%						
		无污染	轻度污染	中度污染	中-强污染	强污染	强-极严重污染	极严重污染
Cd	-0.37~1.89	21.05	68.43	10.52	0	0	0	0
Cr	-2.21~0.47	92.11	7.89	0	0	0	0	0
As	-2.69~1.22	78.95	18.42	2.63	0	0	0	0
Hg	-2.70~0.07	100	0	0	0	0	0	0
Ni	-1.04~0.60	76.32	23.68	0	0	0	0	0
Pb	-2.00~0.47	92.11	7.89	0	0	0	0	0
Zn	-2.50~0.09	100	0	0	0	0	0	0

与前人研究成果一致。由此来看,Cd在本区迁移能力最强,在土壤污染监测中可作为指示元素。

5.4 潜在生态风险评价

从单元素潜在生态风险看,全部样品的Cr、As、Ni、Pb和Zn生态风险指数均小于40,为轻微生态风险;仅有Cd与Hg元素范围超过40,其中Cd风险指数范围为33.33~160,存在低至中等生态风险,占总体样品的78.95%,Hg风险指数范围为9.12~62.78,存在低风险,占总体样品的7.89%。由图3可看出,Cd、Hg、As元素对潜在生态风险的贡献率较高,其中以Cd元素贡献度最高,达51.55%。Hg因其强烈的毒性导致在综合潜在生态风险中亦具有较高的贡献度,达25.94%。As元素为10.87%。Ni、Pb、Cr、Zn的贡献均较小,贡献率分别为5.82%、3.55%、1.77%及0.51%。

同时,潜在生态风险指数法可将多种污染元素

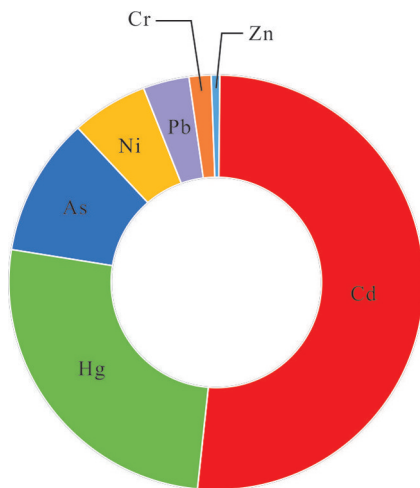


图3 重金属元素潜在生态风险贡献率

Fig. 3 The potential ecological risk contribution of every heavy metal in soil

生态风险统一为综合指标,能够较好地分析区域内的综合风险。由表6可知,潜在生态风险指数RI范围为58.77~201.64,平均值为112.49,达到轻度污染级别以上的样点占13.16%,表明总体生态危害风险较低。但由图4可看出,仍有两处的潜在生态风险达到中等风险,分别为甲查矿区及克鲁伦河中游,其中以克鲁伦河中游较为严重。分布范围与Cd的污染空间范围吻合度较高。

总体来看,新巴尔虎右旗土壤重金属的生态风险较低,Cd是造成生态风险的最主要元素。

6 重金属元素来源

6.1 成土母质含量

将各元素测量值与区域背景值的比值进行比较,可消除各元素间因含量差异而带来的影响,从而更直观地对比各元素的富集程度与彼此间的耦合程度。由表7和图5可知,Cd、As、Pb、Zn元素在矿石中具有极高的相对含量,在基岩中含量虽略有下降,但仍然保持有较高的水平,同时具有较好的

表6 土壤重金属的潜在生态危害指数统计

Table 6 Potential ecological risk coefficient for every heavy metal in soil

危害指数	范围值	均值	各级样本占比/%				
			低	中	较重	重	严重
Cd	33.33~160.00	57.98	68.43	10.52	0	0	0
Cr	0.69~4.14	1.99	0	0	0	0	0
As	2.32~34.85	12.23	0	0	0	0	0
Hg	9.21~62.78	29.18	7.89	0	0	0	0
Ni	3.62~11.37	6.55	0	0	0	0	0
Pb	1.87~10.40	3.99	0	0	0	0	0
Zn	0.21~1.14	0.58	0	0	0	0	0
RI	58.77~201.64	112.49	13.16	0	0	0	0

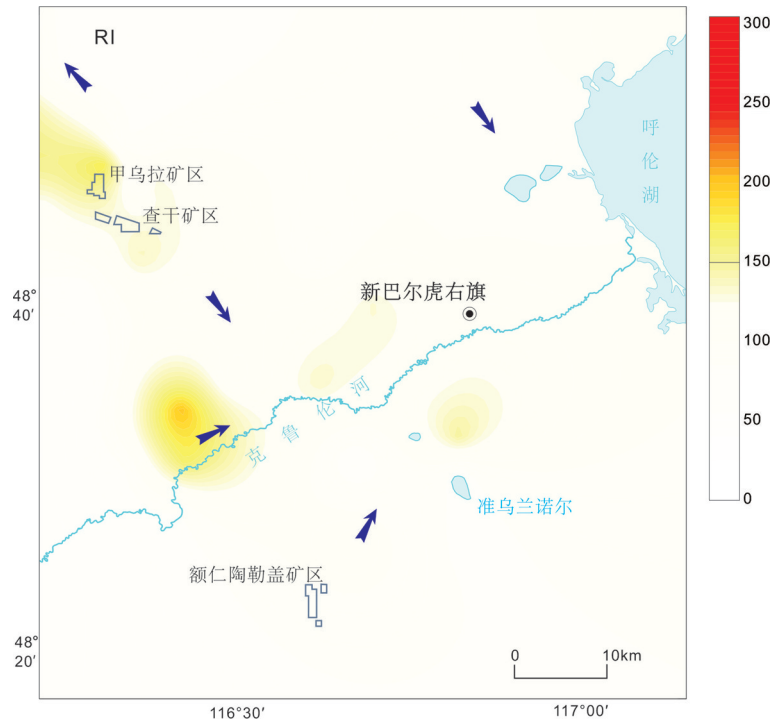


图4 新巴尔虎右旗土壤潜在生态风险分布图

Fig.4 Distribution of potential ecological risk index in Xin Barag Youqi soil

协同性;Cr、Ni在基岩中的比值总体小于0,基本不富集;Hg在基岩中基本不富集,而在矿石中较为富集,表明在基岩中Cd、As、Pb、Zn具有一定的伴生关系且含量较高,Hg与矿床关系较为紧密,Cr、Ni元素在基岩中较为分散。

在土壤中,各元素相关性不明显,Cd、As、Pb、Zn元素间协同性明显下降。Cd、As、Ni、Pb具有较高的相对含量,但各元素比值大部分低于2.0,表明各元素在土壤中富集程度有限。由此来看,Cd、As、Pb在矿石→基岩→土壤的过程中具有一定的继承性,可能受到成土母质的影响;Cr、Ni的本底值较低,受成土母质的影响较小。

同时,从含量上来看(表7),对于矿石与基岩(围岩)中较富集的Cd、As、Pb、Zn等元素,土壤中的富集程度明显低于矿石与基岩(围岩),表明这几种元素穿透性较差。正如前文所述,研究区土壤以轻度污染为主,可能与研究区寒冷干旱的气候有关,使元素缺少迁移的动力与载体。

6.2 相关性分析

相关性分析能为判断各元素的来源提供重要依据(郭彦海等,2017;秦先燕等,2017)。从表8来看,在基岩中,Cd、Cr、As、Pb、Zn之间具有较强的相关性,除此之外,Cd、Pb、Zn均与pH值呈明显的负相关,表明其间具有一定的同源关系(项萌等,2010;

表7 新巴尔虎右旗基岩重金属元素统计(n=11)

Table 7 Statistics of heavy metal elements in Xin Barag Youqi rock(n=11)

岩石类别	统计值	Cd	Cr	As	Hg	Ni	Pb	Zn
矿石	最大值	310.00	206.00	3834.00	306.50	20.78	66422.50	44280.00
	最小值	9.24	23.37	146.00	81.70	8.83	3492.50	1725.26
	均值	163.45	66.77	1393.80	213.54	15.34	25884.50	21719.77
基岩	最大值	6.39	50.63	279.30	23.16	27.66	653.15	889.24
	最小值	0.78	9.20	26.68	5.74	5.80	79.00	198.99
	均值	2.54	33.33	107.81	12.23	17.23	233.54	393.10

注:Hg元素单位为μg/kg,其余元素单位均为mg/kg。

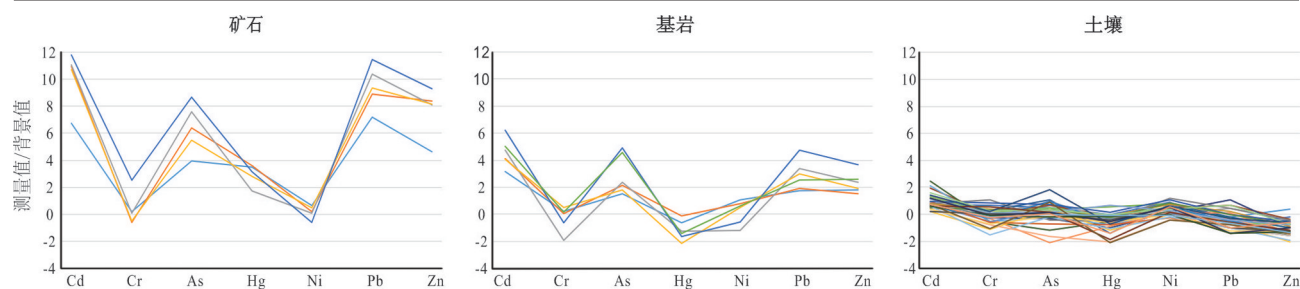


图5 新巴尔虎右旗土壤重金属元素配分曲线

Fig.5 Distribution curve of heavy metal elements in Xin Barag Youqi soil

Guo et al., 2012); 在土壤中, Cr、Hg、Ni、Zn 之间相关性较强。表明 Cr、Hg、Ni、Zn 之间可能存在一定的复合污染关系。

6.3 主成分分析

除此之外, 笔者对新巴尔虎右旗土壤中 7 种重金属元素进行了主成分分析, 以便达到对数据降维的目的 (Singh et al., 2004; 卜红梅等, 2009)。从表 9 可看出, 共提取 3 个主成分, 累计解释能力超过 70%, 能够反映本区土壤重金属元素超标的绝大部分成因。第一主成分 (PC1) 的方差贡献率为 40.07%, 主要由 Cr、Ni 元素控制, Cr、Ni 的载荷分别为 0.913 与 0.873, Zn、Hg 次之, 载荷分别为 0.653 与 0.570。第二主成分 (PC2) 的方差贡献率为 16.89%, 主要由 Cd、Pb 元素控制, Cd、Pb 的载荷分别为 0.831 与 0.661, 同时 Zn 亦占有一席之地, 载荷为 0.511。

表 8 新巴尔虎右旗土壤重金属相关关系

Table 8 Correlative coefficients of heavy metals in Xin Barag Youqi soil

	PH	Cd	Cr	As	Hg	Ni	Pb	Zn	
基岩	Cd	-0.70*	1	0.64*	0.91**	-0.01	-0.48	0.92**	0.99**
	Cr	-0.58	-	1	0.85**	0.13	-0.30	0.83**	0.69*
	As	-0.58	-	-	1	-0.02	-0.51	0.99**	0.90**
	Hg	-0.36	-	-	-	1	-0.047	-0.02	0.02
	Ni	0.12	-	-	-	-	1	-0.49	-0.48
	Pb	-0.65*	-	-	-	-	-	1	0.92**
	Zn	-0.74*	-	-	-	-	-	-	1
土壤	Cd	-0.09	1	0.08	0.00	0.25	0.10	0.27	0.34*
	Cr	-0.32*	-	1	0.28	0.47**	0.79**	0.36*	0.69**
	As	-0.08	-	-	1	0.19	0.37*	0.06	0.32
	Hg	-0.68**	-	-	-	1	0.47**	0.13	0.38*
	Ni	-0.17	-	-	-	-	1	0.29	0.57**
	Pb	-0.15	-	-	-	-	-	1	0.42**
	Zn	-0.16	-	-	-	-	-	-	1

注: *在 0.05 级别显著性相关, **在 0.01 级别显著性相关。

第三主成分 (PC3) 的方差贡献率为 13.39%, 主要由 As 元素控制, 载荷为 0.913。

6.4 讨论

结合前文分析, 本文将分 3 组对重金属元素来源进行阐述, 分别为: Cr、Ni、Hg; Cd、Pb、Zn; As。

首先, Cr、Ni、Hg 之间具有极高的相关性, 且均对 PC1 具有较高载荷。众所周知, 在自然界中, Cr、Ni 主要集中于超基性—基性岩中, 而新巴尔虎右旗基岩以流纹岩、花岗岩等酸性岩为主, 虽然 Cr 在基岩中与成矿元素相关性较高, 但 Cr、Ni、Hg 在基岩中并不富集, 来自于成土母质的可能性较低, 从空间分布来看, Cr、Ni 元素富集区主要位于甲查矿区及呼伦湖西北岸, 呼伦湖西北岸正处于满洲里市地下水径流下游, 即 Cr、Ni 主要富集于矿区周边与城市周边等人类活动密集区。从用途来讲, Cr、Ni 被广泛应用于制作合金制品, 电镀、着色剂等领域 (王振兴, 2011; 温先华等, 2015)。于元赫等 (2018)、郭彦海等 (2017) 在分别对黄河下游与上海市周边土壤的研究中发现 Cr、Ni 可通过喷涂、电镀、冶金等工业污染进入土壤。Van Bohemen and Van De Laak

表 9 研究区土壤重金属含量主成分分析成分矩阵

Table 9 Component matrix of principal component analysis of heavy metal concentrations in soil of the study area

	PC1	PC2	PC3
Cd	-0.017	0.831	-0.104
Cr	0.913	0.157	0.277
As	0.193	0.037	0.913
Hg	0.570	0.188	-0.230
Ni	0.873	0.135	0.359
Pb	0.345	0.661	0.154
Zn	0.653	0.511	0.353
方差贡献率/%	40.07	16.89	13.39
累计方差贡献率/%	40.07	56.95	70.34

(2003)发现汽车零部件以及轮胎等含Cr制品的磨损,同样会向土壤中释放Cr。同时,前人研究表明,Hg多来自于纺织、冶金、煤炭燃烧等人类活动。另外,在PC1中,Zn虽然不是主要控制因素,但同样具有较高的载荷,Lü et al.(2013)在对日照土壤进行研究中发现汽车镀锌零部件的腐蚀与磨损会增加土壤中Zn的含量。结合本区功能定位来看,新巴尔虎右旗为草原纯牧区,区内并没有成规模的制造业与工业,因此,土壤中Cr、Ni、Hg的来源极有可能与当地牧民冬季燃煤取暖、随意堆放废弃车辆与工具器械以及夏季旅游季外来人口激增有关,即PC1可理解为“人类活动”因子。推测土壤中Cr、Ni主要来源是采矿活动中工具器械以及交通工具的磨损、腐蚀,而Hg则来自于煤炭燃烧。

Cd、Pb、Zn是PC2主要控制元素。前文已述,Pb、Zn是本区矿床中主要的成矿元素。Cd、Pb、Zn在本区矿石与基岩中具有极强的相关性与极高的含量,前人大量研究均报道过矿山周边土壤中存在明显的Cd、Pb污染现象,本文矿石样本中Pb含量更是达66422.2 mg/kg。Cd因化学性质与Zn相似,常与Zn伴生,因具有较强的亲S性质,容易进入到硫化物晶格中,在晚期的热液阶段产生富集。因此初步推断PC2与矿山有关。结合空间分布来看,Cd、Pb在矿区周边土壤均有富集,推测受到矿体次生晕与废石堆砌淋滤影响。但Cd与Pb在具有相同来源的同时,也分别具有各自的特性。Cd在表生地质作用中由于具有较大的离子半径和较低的能量系数,易随水溶液迁移。而Cd富集的区域克鲁伦河中游,是甲乌拉、查干、额仁陶勒盖等多个矿区的地下水径流区,推测是采矿扰动使Cd进入地下水所致;另一方面,Pb常被作为汽车尾气污染的标志性元素(马建华等,2009;吕建树等,2012;张倩等,2015),Pb在PC1中也具有较高的载荷即说明Pb受到交通污染的影响,结合Pb的空间分布来看,Pb除在矿区周边富集外,在呼伦湖西北亦有富集,可与主成分分析结果相互印证。因此,PC2可理解为“矿产与矿业活动”因子。Cd、Zn主要来源于矿体次生晕,采矿活动在一定程度上加速了Cd元素向表层土壤迁移;Pb则受到矿体、采矿活动与交通污染的复合影响。

As作为低温成矿元素,通常富集于岩浆分异系列晚期的中酸性岩中,在本区基岩中亦具有较高的

含量,最大值可达279 mg/kg,在方铅矿、闪锌矿中As含量可达3834 mg/kg,在矿石与基岩中与成矿元素均具有较高的相关性。空间上主要分布于甲查矿区及额仁陶勒盖矿区下游汇水区(准乌兰诺尔)。众所周知,铅锌矿床外围经常会形成As的次生晕,在普查阶段常被看作重要的找矿标志。通常认为As的来源主要有:成土母质、煤炭及垃圾的燃烧、工业排放、化肥施用等(郭伟等,2011;宋波等,2018;乔雪等,2019)。结合新巴尔虎右旗为草原纯牧区的特点,基本不存在工业排放与施用化肥的情况,因此认为As主要来源于矿体与成土母质。即PC3可看作是“自然因素”因子。但值得注意的是,额仁陶勒盖矿区周围的As富集区出现在准乌兰诺尔,不排除采矿扰动加速As迁移的可能。

综上所述,Cr、Ni主要来源于工具磨损与交通污染,Hg主要来源于煤炭燃烧;Cd、Zn主要受矿体次生晕与采矿活动影响,Pb受到矿体次生晕、采矿活动与交通污染的复合影响。As主要受矿体影响。

7 结 论

(1)新巴尔虎右旗土壤重金属污染以轻度为主,Cd、Ni、As、Cr、Pb元素在本区均具有一定程度的污染。污染区域主要集中于甲查矿区、准乌兰诺尔、呼伦湖西北岸以及克鲁伦河中游。

(2)新巴尔虎右旗土壤重金属生态风险整体处于较低水平,其中Cd对本区土壤重金属潜在生态危害贡献最为突出,在本区土壤质量监测中应受到重视。

(3)新巴尔虎右旗土壤重金属元素来源分析表明,Cr、Ni、Hg主要受人类活动影响;Cd、Zn、Pb受到自然因素与人类活动共同影响,As主要受自然因素影响。

References

- Antoniadis V, Tsadilas C D, Ashworth D J. 2007. Monometal and competitive adsorption of heavy metals by sewage sludge-amended soil[J]. *Chemosphere*, 68(3): 0-494.
- Ba Tu. 2013. Comparative Study on Vegetation Deteriorated and Soil Properties in Kherlen River Grassland in China and Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Bu Hongmei, Liu Wenzhi, Zhang Quanfa. 2009. Application of multiple statistical analysis to spatial–temporal variations of water quality of the Jinshui River [J]. *Resources Science*, 31(3): 429–434 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Chai Shiwei, Wen Yamao, Zhang Yalei, Zhao Jianfu. 2006. Application of index of geoaccumulation (Igeo) to pollution evaluation of heavy metals in soil [J]. *Journal of Tongji University (Nature Science)*, (12) :1657–1661 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wende, Xiang Lili, He Zhengwei. 2019. Evaluation of heavy metal pollution in soil of Xuejiping–Chundu copper mining area[J]. *Journal of Hebei Normal University (Natural Science Edition)*, 43(2):163–170(in Chinese with English abstract).
- Dai Bin, Lü Jianshu, Zhan Jincheng, Zhang Zulu, Liu Yang, Zhou Rujia. 2015. Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry–based city of Shandong province, Eastern China [J]. *Environmental Science*, 36(2): 507–515 (in Chinese with English abstract).
- Deng Chaobing, Li Lihe, Wang Shaungfei, Li Ning, Zhang Chaolan, Li Zhongyi. 2009. Pollution characteristics of heavy metal in paddy soil near a typical Pb–Zn mining area [J]. *Journal of Agro–environment Science*, 28(11): 2297–2301 (in Chinese with English abstract).
- Di Zelei, Wu Yunna, Song Yantao, Huo Guangwei, Zhang Fengjie, Wang Xiaoguang, Zhang Xiaoguang. 2017. Variatiom of temperature and precipitation in the Xin Barag right banner of the Hulunbeier grassland during 1958–2016[J]. *Journal of Desert Research*, 37(5): 1006–1015 (in Chinese with English abstract).
- Fang Zengqiang. 2016. Pollution Characteristics of Heavy Metal in Soil from Lead and Zinc Mine and its Stabilization Study[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Guo Guanghui, Wu Fengchang, Xie Fazhi, Zhang Ruiqing. 2012. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 24(3): 410–418.
- Guo Wei, Zhao Renxin, Zhang Jun, Bao Yhuying, Wang Hong, Yang Ming, Sun Xiaoli, Jin Fan. 2011. Distribution characteristic and assessment of soil heavy metal pollution in the iron mining of Baotou in Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 32(10): 3099–3105(in Chinese with English abstract).
- Guo Yanhai, Sun Xuchao, Zhang Shibing, Yu Guangjie, Tang Zheng, Liu Zhenhong, Xue Gang, Gao Pin. 2017. Pollution characteristics, source analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils surrounding a municipal solid waste incineration plant in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 38(12): 5262–5271 (in Chinese with English abstract).
- Hakanson Lars. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 14(8): 975–1001.
- Huang Dawei, Gui Herong. 2017. Sources analysis and content characteristics of soil heavy metal in Sunan mining area, China[J]. *Earth and Environment*, 45(5): 546–554(in Chinese with English abstract).
- Jin Linxue, Liu Hao, Wang Haimei. 2018. Spatial and temporal variation characteristics of PCD and PCP in growing season in different ecological regions of Hulunbeier [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 36(3): 390–396 (in Chinese with English abstract).
- Li Weiping, Chen Ahui, Yu Linghong, Yang Wenhuan, Yin Zhenyu, Yang Peifeng, Jiao Liyan. 2016. Pollutant influx from the main river (Kherlen River) of Lake Hulun in wet seasons, 2010–2014[J]. *Journal of Lake Sciences*, 28(2): 281–286(in Chinese with English abstract).
- Li Yungang. 2013. Mineralization mechanism analysis of typical ore deposits in Deerbugan area of Xinbaer Huyouqi, Inner Mongolia [J]. *Western Resources*, (1): 105–108 (in Chinese).
- 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).
- Lü Jianshu, Liu Yang, Zhang Zulu, Dai Jierui. 2013. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi–scale variability of heavy metals in soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 261: 387–397.
- Lü 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).
- Lu Sijin, Wang Yeyao, He Lihuan. 2014. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils around a Pb–Zn mine in Huize Country[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 23(11): 1832–1838(in Chinese with English abstract).
- Ma Jianhua, Gu Lei, Li Wenjun. 2009. Accumulation and potential risk of heavy metals in roadside soils along the section of Zhengzhou–Shangqiu, Lianyungang–Huoerguosi highway[J]. *Environmental Science*, 30(3): 894–899(in Chinese with English abstract).
- Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J]. *Geojournal*, 2(3):108.
- Qiao Xue, Deng Lin, Wang Jinyu, Zhang Daoming. 2019. Sources of soil heavy metals and their health risk evaluation in urban green space of Qiqihar city [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 50(1):

- 217–225(in Chinese with English abstract).
- Qin Xianyan, Li Huaiyun, Sun Yue, Peng Miaozi. 2017. Source apportionment of soil heavy metals in typically agricultural region around Chaohu Lake, China [J]. *Earth and Environment*, 45(4): 455–463(in Chinese with English abstract).
- Ren Bo. 2015. Risk assessment of heavy metals in soils along the Banks of the Kherlen river basin [J]. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, (3): 17–20, 33(in Chinese).
- Saha U K, Taniguchi S, Sakurai K. 2002. Simultaneous Adsorption of Cadmium, Zinc, and Lead on Hydroxylaluminum– and Hydroxylaluminosilicate– Montmorillonite Complexes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 66(1): 117.
- Shaung Bao. 2012. Metallogenic Series and Metallogenic Prognosis of Nonferrous and Precious Metal Deposits in Manzhouli–Xin Barag Youqi [D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Singh K P, Malik A, Mohan D, Sinha S. 2004. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India)——A case study[J]. *Water Research*, 38(18): 0–3992.
- Song Bo, Zhang Yunxia, Pang Rui, Yang Zijie, Bin Juan, Zhou Ziyang, Chen Tongbin. 2018. Analysis of characteristics and sources of heavy metals in farmland soils in the Xijiang river draining of Guangxi[J]. *Environmental Science*, 39(9): 4317–4326(in Chinese with English abstract).
- Sun Rui, Shu Fan, Hao Wei, Li Li, Sun Weiling. 2011. Heavy metal contamination and Pb isotopic composition in natural soils around a Pb/Zn mining and smelting area[J]. *Environmental Science*, 32(4): 1146–1153(in Chinese with English abstract).
- Van Bohemen H D, Van De Laak W H J. 2003. The influence of road infrastructure and traffic on soil, water, and air quality[J]. *Environmental Management*, 31(1): 50–68
- Wang Jing. 2017. Geochemical Characteristics and Environmental Impact Assessment of Heavy Metals in Lead Zinc Mine—In Tang Jia Township Hanyuan Lead–zinc Deposit as an Example [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Wang Yujin, Wu Tongliang, Zhou Dongmei, Chen Huaiman. 2017. Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis [J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 36(12): 2365–2378.
- Wang Zhenxing. 2011. Transport Modeling of Hexavalent Chromium and Dynamic Evaluating/ Early– Warning of Health Risk[D]. Changsha: Central South University (in Chinese with English abstract).
- Wen Xianhua, Hu Gognren, Yu Ruilian, Liu Xianrong. 2015. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in dustfall of Xiamen City, China[J]. *Earth and Environment*, 43(1):1–7 (in Chinese with English abstract).
- Wu Shanshan, Sun Huilan, Zhou Yongchao, Zhou Ling. 2019. Heavy Metal pollution in urban soil and environment quality in Yinin[J]. *Arid Zone Research*, 36(3):752– 760(in Chinese with English abstract).
- Wu Xianliang, Huang Xianfei, Li Zhaochan, Hu Jiwei, Tang Fenghua, Zhang Zedong. 2018. Soil heavy metal pollution degrees and metal chemical forms around the coal mining area in Western Guizhou [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 25(6): 335–341 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yunna, Zhang Fengjie, Pei Hao, Jiang Jian. 2012. The effect of temperature and precipitation during the growing season on the biomass of steppe communities in the Herlen Basin, Northern China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 21(2): 227– 232 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Meng, Zhang Guoping, Li Ling, Wei Xiaofei, Li Haixia. 2010. The characteristics of heavy metals in soil around the Hechi antimony–lead smelter, Guangxi, China [J]. *Earth and Environment*, 38(4): 495–500 (in Chinese with English abstract).
- Xing Ranran, Wang Wenhua, Xing Zifeng, Liu Jianrong. 2011. Analysis of hydrological characteristics of the Kherlen river basin [J]. *Inner Mongolia Water Resources*, (1): 49–50(in Chinese).
- Xu Liquan, Liu Cui, Deng Jinfu, Li Ning, Dai Meng, Bai Libing. 2014. Geochemical characteristics and zircon U– Pb SHRIMP age of igneous rocks in Erentaolegai silver deposit, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3203– 3212 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hui, Chen Guoguang, Liu Hongying, Liang Xiaohong, Zhang Ming. 2013. Pollution of heavy metals in the sediments from the lower reaches of the Yangtze River and its potential ecological risk assessment [J]. *Earth and Environment*, 41(2): 160– 165 (in Chinese with English abstract).
- Yang Mei, Sun Jinggui, Wang Zhongyu, Zhao Shifeng, Liu Chen, Feng Yangyang, Ren Zening. 2017. Petrogenesis and geological significance of the alkali–rich granite porphyry in the Jiawula Cu–Ag–Pb– Zn deposit in the western slope of the Great Xing'an Range: Zircon U– Pb dating and geochemical characteristics [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 47(2): 477–496 (in Chinese with English abstract).
- Yang Peifeng, Li Weiping, Yu Linghong, Chen Ahui, Yang Wenhuan, Han Peiji, Ren Juanhui, Jiao Liyan. 2015. Ecological risk assessment of soil heavy metals in riparian zone of Kerulen river [J]. *Journal of Agro– Environment Science*, 34(11): 2126– 2132 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wenhuan, Chen Ahui, Li Weiping, Yu Linghong, Yin Zhenyu, Han Peiji, Duan Hanjie. 2015. Water quality assessment of Kherlen river and impact analysis of the water environment of Hulun Lake[J]. *Environmental Engineering*, 33(10):113– 116(in Chinese with English abstract).
- Yin Xin, Zhou Guangzhu, Wang Cuizhen, Wang Shihao, Cheng Weiyu.

2016. Speciation and risk assessment for heavy metals in lead and zinc slag at Zhehai, China[J]. *Earth and Environment*, 44(4): 478–483 (in Chinese with English abstract).
- Yu Yuanhe, Li Jianshu, Wang Yameng. 2018. Source identification and spatial distribution of heavy metals in soils in typical areas around the lower Yellow River[J]. *Environmental Science*, 39(6):2865–2874(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fengjie, Wu Yunna, Yang Baoling, Li Haishan, Hu Gaowa, Liu Di. 2009. The research on the spatial heterogeneity of the soil nutrient and the quantitative properties of plant communities in Hulunbeier steppe[J]. *Acta Agriculturae Boreali- Occidentalis Sinica*, 18(2): 173–177,183(in Chinese with English abstract).
- Zhang Han, Jin Qingwen, Huang Renlong, Lin Ning, Jia Zhenzhen, Shu Yuehong. 2017. Characteristics of heavy metal pollution in agricultural soils and bioaccumulation in plants of Dabaoshan mine[J]. *Soils*, 49(1): 141–149(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinde, Tian Lei, Zhao Hui. 2008. A preliminary study on the working methods of mine geological environment monitoring in China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 35(2): 129–132 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jing, Shao Jun, Bao Qingzhong, Wang Hongbo, Zhou Yongheng. 2015. A comparative study of lithochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of lead-zinc deposits in the Herlen-Manzhouli metallogenic belt along China-Mongolia border area[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(4): 663–674 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qian, Chen Zongjuan, Peng Changsheng, Li Fasheng, Gu Qingbao. 2015. Heavy Metals pollution in topsoil from Dagang industry area and its ecological risk assessment [J]. *Environmental Science*, 36(11): 4232–4240 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Pizhong, Xie Xuejin, Cheng Zhizhong. 2014. Regional geochemical background and metallogenic belt division of North Da Hinggan Mountain [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(1): 99–108 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Qian, Ma Lin, Liu Yifei, He Jiangtao, Li Guanghe. 2016. Distribution characteristics and potential ecological hazards assessment of soil heavy metals in typical soil profiles in southeast suburb of Beijing [J]. *Environmental Science*, 37(5): 1931–1937(in Chinese with English abstract).
- Zhou Duo, Dong Zaimin, Chen Anxia. 2015. Magnetic anomaly and metallogenic prediction in the Xin Barag Youqi area, inner Mongolia [J]. *Geology and Resources*, 24(4): 369–372, 324 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Keping, Lin Yun Hu Jianhua, He Chuan, Gao Feng. 2015. Migration disciplinarian and pollution assessment of heavy metal of Dajiaoling tailings reservoir of lead and zinc[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 46(5): 1953–1958(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yan, Chen Qiang, Deng Shaopo, Wan Jinzhong, Zhang Shengtian, Long Tao, Li Qun, Lin Yusuo, Wu Yunjin. 2018. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in Southwestern China [J]. *Environmental Science*, 39(6): 2884–2892 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yaoyu, Yang Shengxiang, Yuan Zhizhong, Zhou Jianjun, Zhang Xiaojun. 2012. Assessment of heavy metal pollution in mine soil and bioaccumulation characteristics of dominant plants in a Lead-Zinc mineland, West Hunan[J]. *Earth and Environment*, 40(3): 361–366(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 巴图. 2013. 中蒙克鲁伦河流域草地植被退化及土壤特性比较研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学.
- 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.
- 卜红梅, 刘文治, 张全发. 2009. 多元统计方法在金水河水质时空变化分析中的应用[J]. *资源科学*, 31(3):429–434.
- 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.
- 柴世伟, 温琰茂, 张亚雷, 赵建夫. 2006. 地积累指数法在土壤重金属污染评价中的应用[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, (12):1657–1661.
- 陈文德, 向莉莉, 何政伟. 2019. 雪鸡坪-春都铜矿区土壤重金属污染评价[J]. *河北师范大学学报(自然科学版)*, 43(2):163–170.
- 戴彬, 吕建树, 战金成, 张祖陆, 刘洋, 周汝佳. 2015. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 36(2): 507–515.
- 邓超冰, 李丽和, 王双飞, 黎宁, 张超兰, 李忠义. 2009. 典型铅锌矿区水田土壤重金属污染特征[J]. *农业环境科学学报*, 28(11): 2297–2301.
- 邸择雷, 乌云娜, 宋彦涛, 霍光伟, 张凤杰, 王晓光, 张小红. 2017. 1958—2016年呼伦贝尔草原新巴尔虎右旗气温和降水变化特征[J]. *中国沙漠*, 37(5): 1006–1015.
- 房增强. 2016. 铅锌矿区土壤重金属污染特征及稳定化研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京).
- 郭伟, 赵仁鑫, 张君, 包玉英, 王宏, 杨明, 孙小丽, 金帆. 2011. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J]. *环境科学*, 32(10): 99–3105.
- 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振鸿, 薛罡, 高品. 2017. 上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 38(12): 5262–5271.
- 黄大伟, 桂和荣. 2017. 宿南矿区土壤重金属含量特征及其来源解析[J]. *地球与环境*, 45(5): 546–554.
- 金林雪, 刘昊, 王海梅. 2018. 呼伦贝尔不同生态区生长季降水水集中度和集中中期时空变化特征[J]. *干旱气象*, 36(3): 390–396.
- 李卫平, 陈阿辉, 于玲红, 杨文焕, 殷震育, 杨培峰, 焦丽燕. 2016. 呼

- 伦湖主要入湖河流克鲁伦河丰水期污染物通量(2010–2014)[J]. 湖泊科学, 28(2): 281–286.
- 李云刚. 2013. 内蒙古新巴尔虎右旗德尔布干地区典型矿床特征成矿机制分析[J]. 西部资源, (1): 105–108.
- 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.
- 陆泗进, 王业耀, 何立环. 2014. 会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属生态风险评价[J]. 生态环境学报, 23(11): 1832–1838.
- 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.
- 马建华, 谷蕾, 李文军. 2009. 连霍高速郑商段路旁土壤重金属积累及潜在风险[J]. 环境科学, 30(3): 894–899.
- 乔雪, 邓琳, 王今雨, 张道明. 2019. 齐齐哈尔市主城区城市绿地土壤重金属来源解析与健康风险评价[J]. 土壤通报, 50(1): 217–225.
- 秦先燕, 李运怀, 孙跃, 彭苗枝. 2017. 环巢湖典型农业区土壤重金属来源解析[J]. 地球与环境, 45(4): 455–463.
- 任波. 2015. 克鲁伦河流域岸边土壤重金属风险评价[J]. 山西水土保持科技, (3): 17–20, 33.
- 双宝. 2012. 满洲里–新巴尔虎右旗有色、贵金属矿床成矿系列与成矿预测[D]. 长春: 吉林大学.
- 宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌. 2018. 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析[J]. 环境科学, 39(9): 4317–4326.
- 孙锐, 舒帆, 郝伟, 李丽, 孙卫玲. 2011. 典型Pb/Zn矿区土壤重金属污染特征与Pb同位素源解析[J]. 环境科学, 32(4): 1146–1153.
- 王京. 2017. 铅锌矿区重金属地球化学特征及环境影响评价—以汉源唐家乡铅锌矿为例[D]. 成都: 成都理工大学.
- 王玉军, 吴同亮, 周东美, 陈怀满. 2017. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. 农业环境科学学报, 36(12): 2365–2378.
- 王振兴. 2011. 重金属Cr(VI)迁移模型及健康风险动态评价预警研究[D]. 长沙: 中南大学.
- 温先华, 胡恭任, 于瑞莲, 刘贤荣. 2015. 厦门市大气降尘中重金属生态风险评价与源解析[J]. 地球与环境, 43(1): 1–7.
- 乌云娜, 张凤杰, 裴浩, 姜健. 2012. 克鲁伦河流域生长季有效温水组合对草原群落生物量的影响[J]. 草业学报, 21(2): 227–232.
- 吴珊珊, 孙慧兰, 周永超, 周玲. 2019. 伊宁市道路土壤重金属污染现状及其环境质量评价[J]. 干旱区研究, 36(3): 752–760.
- 吴先亮, 黄先飞, 李朝婵, 胡继伟, 唐凤华, 张泽东. 2018. 黔西煤矿区土壤重金属污染水平及其形态[J]. 水土保持研究, 25(6): 335–341.
- 项萌, 张国平, 李玲, 魏晓飞, 李海霞. 2010. 广西河池铅锡矿冶炼区土壤中镉等重金属的分布特征及影响因素分析[J]. 地球与环境, 38(4): 495–500.
- 邢苒苒, 王文华, 邢子丰, 刘建荣. 2011. 克鲁伦河流域水文特性分析[J]. 内蒙古水利, (1): 49–50.
- 许立权, 刘翠, 邓晋福, 李宁, 戴蒙, 白立兵. 2014. 内蒙古额仁陶勒盖银矿区火成岩岩石地球化学特征及锆石 SHRIMP U–Pb 同位素定年[J]. 岩石学报, 30(11): 3203–3212.
- 杨辉, 陈国光, 刘红樱, 梁晓红, 张明. 2013. 长江下游主要湖泊沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 地球与环境, 41(2): 160–165.
- 杨梅, 孙景贵, 王忠禹, 赵世峰, 刘晨, 冯洋洋, 任泽宁. 2017. 大兴安岭西坡甲乌拉铜银铅锌矿床富碱花岗岩的成因及其地质意义: 锆石 U–Pb 定年和地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(2): 477–496.
- 杨培峰, 李卫平, 于玲红, 陈阿辉, 杨文焕, 韩佩江, 任娟慧, 焦丽燕. 2015. 克鲁伦河滨岸带土壤重金属污染风险评估[J]. 农业环境科学学报, 34(11): 2126–2132.
- 杨文焕, 陈阿辉, 李卫平, 于玲红, 殷震雷, 韩佩江, 段浩洁. 2015. 克鲁伦河水质评价及其对呼伦湖水环境影响分析[J]. 环境工程, 33(10): 113–116.
- 尹鑫, 周广柱, 王翠珍, 王世豪, 程伟玉. 2016. 者海铅锌渣中重金属的赋存形态及环境风险评价[J]. 地球与环境, 44(4): 478–483.
- 于元赫, 吕建树, 王亚梦. 2018. 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, 39(6): 2865–2874.
- 张凤杰, 乌云娜, 杨宝灵, 李海山, 胡高娃, 刘迪. 2009. 呼伦贝尔草原土壤养分与植物群落数量特征的空间异质性[J]. 西北农业学报, 18(2): 173–177, 183.
- 张晗, 靳青文, 黄仁龙, 林宁, 贾珍珍, 舒月红. 2017. 大宝山矿区农田土壤重金属污染及其植物累积特征[J]. 土壤, 49(1): 141–149.
- 张进德, 田磊, 赵慧. 2008. 我国矿山地质环境监测工作方法初探[J]. 水文地质工程地质, 35(2): 129–132.
- 张璟, 邵军, 鲍庆中, 王宏博, 周永恒. 2015. 中蒙克鲁伦—满洲里成矿带铅锌矿地球化学特征及 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄对比[J]. 地质通报, 34(4): 663–674.
- 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝. 2015. 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 环境科学, 36(11): 4232–4240.
- 赵丕忠, 谢学锦, 程志中. 2014. 大兴安岭成矿带北段区域地球化学背景与成矿带划分[J]. 地质学报, 88(1): 99–108.
- 赵倩, 马琳, 刘翼飞, 何江涛, 李广贺. 2016. 北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险[J]. 环境科学, 37(5): 1931–1937.
- 周多, 董再民, 陈安霞. 2015. 内蒙古新巴尔虎右旗地区磁异常特征及成矿预测[J]. 地质与资源, 24(4): 369–372, 324.
- 周科平, 林允, 胡建华, 何川, 高峰. 2015. 大脚岭铅锌尾矿库重金属迁移规律与污染评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 46(5): 1953–1958.
- 周艳, 陈樯, 邓绍坡, 万金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金. 2018. 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, 39(6): 2884–2892.
- 周耀渝, 杨胜香, 袁志忠, 周建军, 张晓君. 2012. 湘西铅锌矿区重金属污染评价及优势植物重金属累积特征[J]. 地球与环境, 40(3): 361–366.