

淮北矿区土壤重金属空间分布与环境评价

孙浩,周春财,徐仲雨,王兴明,刘桂建

(中国科学技术大学地球和空间科学学院,安徽合肥 230026)

摘要:以淮北矿区为研究区域,采集了311个土壤样品,测定了Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, As的含量,研究重金属的空间分布特征,同时对土壤重金属进行环境评价.结果表明,研究区土壤中6种重金属存在一定程度富集,其中Zn元素富集程度最高. Cu, Zn和Pb元素的富集是由煤炭开采、化肥使用和交通运输等人为因素引起的, Cr和Ni元素受自然因素和人为活动共同影响, As的空间分布主要与成土母质等自然因素有关. 环境评价结果显示, 淮北矿区土壤重金属整体处于未污染或轻度污染状态, 生态风险轻微, 环境质量良好.

关键词:淮北矿区; 土壤; 重金属; 空间分布; 环境质量

中图分类号: X825 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.07.006

引用格式: 孙浩,周春财,徐仲雨,等. 淮北矿区土壤重金属空间分布与环境评价[J]. 中国科学技术大学学报, 2018,48(7):560-566.

SUN Hao, ZHOU Chuncai, XU Zhongyu, et al. Spatial distribution and environmental assessment of heavy metals in the soil of the Huaibei mining area[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018,48(7):560-566.

Spatial distribution and environmental assessment of heavy metals in the soil of the Huaibei mining area

SUN Hao, ZHOU Chuncai, XU Zhongyu, WANG Xingming, LIU Guijian

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: To investigate the spatial distribution of heavy metals and environmentally evaluate heavy metals in soil, 311 soil samples were taken from the Huaibei mining area, and the content of Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, and As in these samples were measured. Results show that the six heavy metals are enriched to a certain extent in soil, with Zn being the most enriched metal element. Enrichment of Cu, Zn, and Pb is the result of human activities such as coal mining, use of chemical fertilizers, and transportation. A joint effect of natural and human activities enriched Cr and Ni. Natural factors, such as the soil parent material, play a role in the spatial distribution of As. Environment evaluation results show that the Huaibei mining area is in general slightly polluted or not polluted by heavy metals and faces only minor environmental risk.

Key words: Huaibei mining area; soil; heavy metal; spatial distribution; environmental quality

收稿日期: 2017-08-18; 修回日期: 2018-04-27

基金项目: 国家重点研发计划青年项目(2-16YFC0201600)资助.

作者简介: 孙浩,男,1992年生,硕士生. 研究方向: 微量元素环境地球化学. E-mail: lysh@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 刘桂建, 博士/教授. E-mail: lgj@ustc.edu.cn

0 引言

煤炭是我国主要能源,煤炭的开采过程中,重金属元素通过多种途径迁移进入周边土壤^[1].其不仅危害生态环境,还通过食物链、食物网逐级富集,最终进入人类体内,威胁人类的健康^[2-5].

随着土壤重金属污染现象日益增加^[6],人们愈发重视土壤重金属污染问题,相关研究方法也越来越丰富.GIS 技术广泛应用于土壤中重金属空间分布研究^[7-9],相关分析和主成分分析法是对土壤重金属来源分类和判别的常用手段^[7, 10-12].当前土壤重金属污染常用的评价方法主要有地质累积指数法^[13]、潜在生态风险评价法^[14-15]、单因子指数法和内梅罗综合指数法^[16-17]等.

淮北矿区是安徽省重要的煤炭产地,各煤矿周边土壤均遭受到不同程度的影响.目前许多学者对淮北矿区土壤重金属开展了研究^[18-19],但多局限于某个煤矿周边的土壤污染和重金属元素迁移转化,缺乏对淮北矿区整体土壤重金属污染情况和重金属空间分布的研究,因此开展淮北矿区土壤中重金属污染研究具有重要意义.为此,本文针对淮北矿区,结合前人研究^[20-23],选取较为常用的 6 种重金属 Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, As 作为研究目标元素,对 6 种重金属含量及空间分布特征进行了分析,并评价了土壤重金属环境质量现状,以期为矿区土壤污染综合防治和环境保护提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

淮北矿区位于安徽省北部,地处东经 115°42′~117°15′,北纬 33°06′~34°08′,面积约 4650km².区内已有 40 多对矿井,2014 年原煤产量达 7878.26 万吨,是安徽省以及中国东部重要的煤矿区.区域属于温带半湿润季风气候区,冬季干寒、夏季多雨,四季分明.淮北矿区平均气温 14.9℃,春秋多东北风,夏季多东—东南风,冬季多北—西北风,多年平均降雨量为 830~865mm,多年平均蒸发量为 1045.2~1890.6mm.工作区地处淮北平原,地形平坦开阔.淮北平原上主要土壤类型为半水成土纲的潮土与砂姜黑土,在低山丘陵有棕壤分布.

1.2 样品采集与测试

本研究根据矿区内工矿企业分布,进行土壤样品采集.采样点布设于各煤矿矸石山周边、选煤厂和

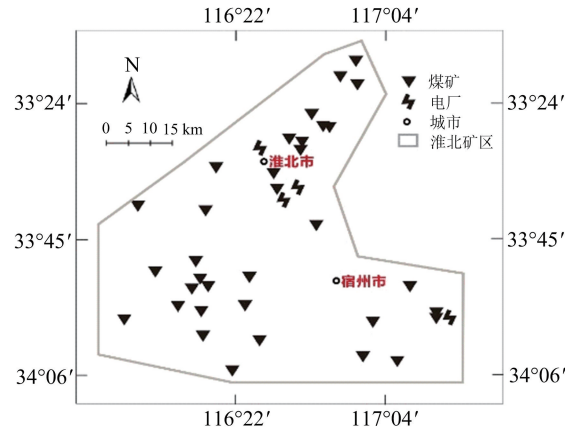


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location diagram of the studied area

电厂附近区域,每个区域根据其水文特征和气象特征等采集 5~10 个土壤样品,样品采集具有代表性.土壤样品以农田土为主,采样深度为 0~20cm,按梅花式采集土样,装袋密封,并用 GPS 记录采样点地理坐标,共采集土壤样品 311 个.研究区域示意图如图 1 所示.

将土壤样品去除砂砾和植物根系后,在通风橱中自然风干,采取四分法进行研磨处理并过 100 目筛.用 HNO₃, HClO₄, H₂O₂ 混合酸(5:2:1)进行消解,用电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)测定 Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, As 6 种重金属含量.测试过程采用土壤标样 GBW07403(GSS-3)、空白样和重复样进行质量控制,达到标准要求.

1.3 评价方法

本研究采用单因子指数法、内梅罗指数法、潜在生态危害指数法和地质累积指数法对淮北矿区表层土壤进行环境质量评价.具体评价分级标准见表 1.

单因子指数计算公式为

$$P_i = \frac{C_i}{S}$$

式中, P_i 为污染物 i 的单因子指数; C_i 为土壤中污染物 i 的实测浓度; S 表示土壤环境质量标准,在本次研究中采用国家土壤环境质量标准 II 级标准(GB15618-1995).

内梅罗指数计算公式为:

$$I = \sqrt{\frac{P_{i_{\max}}^2 + \left(\frac{\sum P_i}{n}\right)^2}{2}}$$

式中, I 为内梅罗综合指数; P_i 为土壤中 i 元素标准污染指数(污染物单因子指数); $P_{i_{\max}}$ 表示所有元

素污染指标中的最大值。

Hakanson 潜在生态危害指数法的计算公式为

$$RI = \sum E_i = \sum \left(T_i \times \frac{C_i^s}{C_i^n} \right)$$

式中, RI 为多种重金属元素的潜在生态风险指数; E_i 为单一重金属潜在危害系数; T_i 为单个污染物的毒性响应参数, 不同的重金属对应不同的毒性响应参数, 本研究选用 Hakanson 制定的标准: $Zn=1$, $Cr=2$, $Cu=Pb=Ni=5$, $As=10$; C_i^s 为土壤重金属

实际检测含量; C_i^n 为计算依照的参比值。

地质累积指数计算公式为

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_{ij}}{1.5 \times BE_j}$$

式中, I_{geo} 为地质累积指数值; C_{ij} 表示第 i 个样品中元素 j 的浓度值; 1.5 为修正指数, 是由成岩作用引起的背景值变动系数; BE_j 表示元素 j 的背景浓度值。

表 1 重金属污染等级划分^[24]

Tab.1 The grade division of heavy metal pollution^[24]

| 地质累积指数 | | 内梅罗指数 | | | | 潜在生态危害指数 | | | |
|----------------------|----------|------------------|------|----------------|------|------------------------|-----------|---------------------|--------|
| I_{geo} | 污染等级 | P_i | 污染等级 | I | 污染等级 | E_i^i | 单因子危险程度等级 | RI | 生态风险等级 |
| $I_{geo} < 0$ | 无污染 | $P_i \leq 1$ | 未污染 | $I \leq 1$ | 未污染 | $E_i^i < 40$ | 轻微生态危害 | $RI < 150$ | 轻微生态危害 |
| $0 \leq I_{geo} < 1$ | 无污染-中污染 | $1 < P_i \leq 2$ | 轻度污染 | $1 < I \leq 2$ | 轻度污染 | $40 \leq E_i^i < 80$ | 中等生态危害 | $150 \leq RI < 300$ | 中等生态危害 |
| $1 \leq I_{geo} < 2$ | 中污染 | $2 < P_i \leq 3$ | 中度污染 | $2 < I \leq 3$ | 中度污染 | $80 \leq E_i^i < 160$ | 强生态危害 | $300 \leq RI < 600$ | 强生态危害 |
| $2 \leq I_{geo} < 3$ | 中污染-强污染 | $3 < P_i \leq 5$ | 重度污染 | $3 < I \leq 5$ | 重度污染 | $160 \leq E_i^i < 320$ | 很强生态危害 | $RI \geq 600$ | 很强生态危害 |
| $3 \leq I_{geo} < 4$ | 强污染 | $P_i > 5$ | 严重污染 | $I > 5$ | 严重污染 | $E_i^i \geq 320$ | 非常强生态危害 | | |
| $4 \leq I_{geo} < 5$ | 强污染-极强污染 | | | | | | | | |
| $5 \leq I_{geo}$ | 极强污染 | | | | | | | | |

1.4 数据处理方法

土壤重金属含量数据统计分析使用 SPSS 18.0 软件. 研究区位置示意图绘制使用 CoreDRAW X7 软件. 重金属空间分布示意图绘制使用 ArcGIS 10.2 软件.

2.1 土壤重金属含量统计分析

将测得的数据进行整理统计, 得到 6 种重金属含量最小值、最大值、平均值、标准差、变异系数, 并与淮北市土壤背景值^[25] 和国家土壤 II 级标准^[26] 作比较, 结果见表 2.

2 结果与讨论

表 2 土壤重金属元素含量统计分析

Tab.2 Statistical analysis of heavy metal contents

| 元素 | 最小值 $/(mg \cdot kg^{-1})$ | 最大值 $/(mg \cdot kg^{-1})$ | 平均值 $/(mg \cdot kg^{-1})$ | 标准差 | 变异 系数 | 淮北市土壤背景值 ^[25] $/(mg \cdot kg^{-1})$ | II 级标准 $/(mg \cdot kg^{-1})$ |
|----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------|----------|---|---------------------------------|
| Cr | 20.8 | 142.17 | 61.26 | 17.09 | 0.28 | 60.6 | 250 |
| Ni | 11.9 | 75.18 | 26.68 | 6.65 | 0.25 | 24.1 | 60 |
| Cu | 12.54 | 166.76 | 31.29 | 11.83 | 0.38 | 22.6 | 100 |
| Zn | 低于检测线 | 541.56 | 125.78 | 58.11 | 0.46 | 47.3 | 300 |
| Pb | 10.41 | 185.72 | 29.18 | 18.92 | 0.65 | 24.6 | 350 |
| As | 1.53 | 15.19 | 7.80 | 2.24 | 0.29 | 7.8 | 25 |

从数据结果上来看, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, As 6 种重金属元素平均含量分别为 61.26, 26.68, 31.29, 125.78, 29.18, 7.80mg/kg. 与淮北市土壤背景值相

比, 除了 As 元素外, 其他 5 种重金属元素含量的均值高于淮北市土壤背景值, 说明淮北矿区存在土壤重金属富集, 其中 Zn 元素平均含量为当地背景值

的 2.66 倍,富集程度最为明显.但 6 种重金属元素平均含量并未超出国家土壤环境质量 II 级标准,表明土壤重金属不存在明显污染情况.

变异系数是标准差的无量纲化结果,因此可以更好地反映重金属含量的离散性.除了 Pb 和 Zn 两种元素外,其他 4 种元素的变异系数相对较低,说明在淮北矿区范围内污染程度受到空间位置影响较

小.Pb 和 Zn 变异系数分别为 0.65 和 0.46,说明其空间离散性大,分布不均匀,可能受到外界因素影响.

2.2 重金属空间分布特征

结合各样点坐标和重金属浓度数据,使用 ArcGIS 10.2 软件绘制重金属空间分布图,采用反距离空间权重插值法进行插值,结果如图 2 所示.

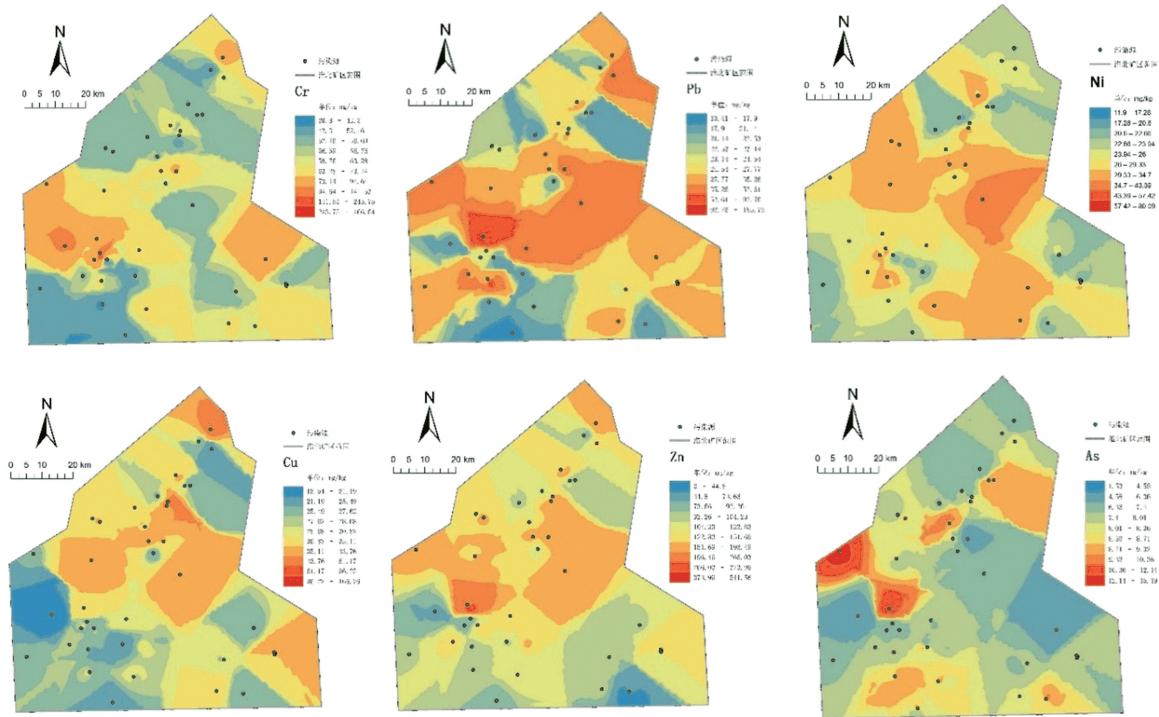


图 2 重金属含量空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of heavy metal contents

从图 2 中可以看出,Cu 和 Zn 元素空间分布规律较为相似,元素含量高值集中在淮北矿区中部的临涣镇.临涣镇煤炭开采历史悠久,镇内煤矿数量众多,同时还有临涣选煤厂.临涣焦化等多个大型工矿企业.有研究认为^[22-23],煤炭开采和利用会导致土壤中 Cu,Zn 富集.另外,工矿企业周边有大范围的农田,农业生产中化肥和农药的不合理使用也在一定程度上会促进土壤中 Cu,Zn 的富集^[27]. Pb 元素在矿区中部和矿区北部萧县附近含量较高.煤炭运输会引起 Pb 元素在煤矿集中的矿区中部聚集.萧县位于安徽省北部,紧邻连霍高速,东距徐州市仅 15km,交通发达,交通运输是 Pb 元素在此富集的主要原因.根据元素相关分析结果(表 3),Cu-Zn,Pb-Zn,Cu-Pb 相关系数分别为 0.415,0.390,0.158,并通过 0.01 水平的检验,说明 3 种元素两两之间显著相关,这在一定程度上反映了它们的同源性.结合前

文分析,Cu,Zn 和 Pb 3 种元素平均含量显著超出淮北市土壤背景值,可以推断 Cu,Zn 和 Pb 3 种元素主要受到人为因素影响.

表 3 重金属含量相关性分析

Tab.3 Correlation analysis of heavy metal contents

| | Cr | Ni | Cu | Zn | Pb | As |
|----|---------|---------|---------|---------|--------|----|
| Cr | 1 | | | | | |
| Ni | 0.023 | 1 | | | | |
| Cu | 0.124* | 0.248** | 1 | | | |
| Zn | 0.123* | 0.219** | 0.415** | 1 | | |
| Pb | 0.183** | 0.137* | 0.158** | 0.390** | 1 | |
| As | -0.069 | 0.073 | 0.101 | 0.160** | 0.114* | 1 |

【注】*表示在 0.01 水平上显著相关,*表示在 0.05 水平上显著相关.

Cr 元素空间分布与 Cu 和 Zn 类似,在矿区中部

含量相对较高.根据李长春等^[28]的研究,煤矿区土壤中 Cr 含量主要受煤矿开采时煤尘和人为因素的影响.但淮北矿区土壤 Cr 元素含量均值仅略高于背景值,说明人类活动对 Cr 元素空间分布影响有限.

一般认为 Ni 元素主要来源于岩石风化^[29].淮北矿区 Ni 元素集中分布在淮北和宿州市区附近,该区域工厂集中、工业活动频繁.王锐等^[30]认为,工业中使用含 Ni 催化剂、电镀工艺中含 Ni 残渣的排放都会产生土壤中 Ni 污染.综合分析认为,Cr 和 Ni 元素受自然和人为因素共同影响.

As 元素分布区域性明显,在矿区西部含量较高,其他区域含量较低.As 广泛分布于地壳中,主要通过火山喷发、岩石风化、底层交换等途径向环境中释放^[31].本研究中 As 元素在土壤中的平均含量并未超出淮北市土壤背景值,说明受人类活动影响很小,As 元素主要受自然因素控制,As 在矿区西部的富集可能是地质环境引起的.

2.3 环境质量评价

土壤中重金属难以降解,煤炭开采等人类活动会使土壤重金属不断积累,进而对周边生态环境和人类健康造成严重危害.因此进行土壤环境质量评价,了解矿区土壤主要污染因子,对淮北矿区土壤污染防治有重要意义.由于土壤样品主要来自矿区周边农田,因此选择国家土壤环境质量标准(GB15618-1995) II 级标准,即为保障农业生产、维护人体健康的土壤限制值为评价依据,计算单因子指数和内梅罗综合指数.以淮北市土壤背景值为标准,计算地质累积指数和潜在生态危害指数.土壤重金属污染评价结果如表 4 所示,内梅罗综合指数评价结果如表 5 所示.

表 4 土壤重金属污染评价结果

Tab.4 Assessment result of soil heavy metal pollutions

| 元素 | 单因子危害系数 | 地质累积指数 | 单因子指数 |
|----|---------|--------|-------|
| Cr | 2.02 | -0.62 | 0.25 |
| Ni | 5.54 | -0.48 | 0.44 |
| Cu | 6.92 | -0.18 | 0.31 |
| Zn | 2.66 | 0.59 | 0.42 |
| Pb | 5.93 | -0.50 | 0.08 |
| As | 10.00 | -0.65 | 0.31 |

6 种重金属单因子风险指数排序依次为 $As > Cu > Pb > Ni > Zn > Cr$, 均小于 40, 属于轻微生态危害.地质累积指数结果表明,仅 Zn 元素最高(为

0.59), 属于无污染到中度污染级别,其他 5 种元素地质累积指数均小于 0, 说明相较于地质背景,并未存在富集现象.从单因子指数结果上来看,六种重金属元素中单因子指数平均值排序为 $Ni > Zn > Cu > As > Cr > Pb$, 结合评价标准,其中 6 种元素单因子指数均小于 1, 属于未污染状态.3 种评价方法结果整体一致,但存在细微差别,主要是因为不同的评价方法侧重于不同方面.潜在生态危害指数法考虑到了不同重金属的生态毒性不同,对生态危害贡献也不同,因此评价结果更着重反映重金属元素的潜在危害性.地质累积指数法主要考虑成岩作用和人类活动所带来的元素背景值变动.单因子指数法评价结果受所使用的环境质量标准影响.综合分析可以得出,淮北矿区土壤重金属整体污染程度较低,主要污染因子为 Zn 元素.

土壤重金属污染多为复合污染,分别对单个元素的污染评价并不能完全反映出研究区污染情况,因此用内梅罗综合指数对每个样点进行综合评价,结果如表 5 所示.从内梅罗综合污染指数结果显示,在全部的 311 个采样点中,未受到污染的样点数为 309 个,占总数的 99.36%;轻度污染的样点数为 2 个,占 0.64%;不存在污染程度更高的样点.因此该结果总体上反映淮北矿区表层土壤 6 种重金属处于未污染到轻度污染的程度,与之前的评价结果相一致.

表 5 内梅罗综合指数评价结果

Tab.5 Results of Nemerow index method

| 内梅罗综合指数 | 污染程度 | 样点个数 | 百分比 |
|----------------|------|------|--------|
| $I \leq 1$ | 未污染 | 309 | 99.36% |
| $1 < I \leq 2$ | 轻度污染 | 2 | 0.64% |
| $2 < I \leq 3$ | 中度污染 | 0 | 0.00% |
| $3 < I \leq 5$ | 重度污染 | 0 | 0.00% |
| $I > 5$ | 严重污染 | 0 | 0.00% |

3 结论

本文通过系统的采样和分析测试,探究了淮北矿区土壤重金属空间分布特征,并在此基础上进行了土壤重金属环境质量评价,得到以下结论:

(I) 淮北矿区土壤中 Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, As 平均含量分别为 61.26, 26.68, 31.29, 125.78, 29.18, 7.80mg/kg.除 As 元素外,土壤中其他 5 种重金属元素含量均超过淮北地区背景值,存在一定程度的

富集现象。

(II) 基于对淮北矿区土壤重金属空间分布的特征分析,发现 Cu, Zn 和 Pb 元素的富集是由人为因素引起的, Cu, Zn 主要受煤炭开采和化肥使用等因素影响; Pb 元素来自交通运输产生的污染; Cr 和 Ni 元素受自然因素和人为活动共同影响; As 则受成土母质等自然因素影响较大。

(III) 单因子指数和地累积指数评价结果一致, 6 种重金属元素中 Zn 元素污染程度最高, 属于轻度污染水平, 其他元素均无污染。As 元素潜在危害系数最高, 为 10.00, 生态风险轻微。内梅罗综合评价结果显示, 未污染和轻度污染的样点占 95.18%, 研究区整体处于未污染至轻度污染的水平, 环境质量良好。

参考文献(References)

- [1] 刘桂建, 彭子成, 王桂梁, 等. 煤中微量元素研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 53-62.
LIU Guijian, PENG Zicheng, WANG Guiliang, et al. Study on trace elements in coal[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(1): 53-62.
- [2] BOCCA B, ALIMONTI A, PETRUCCI F, et al. Quantification of trace elements by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry in urine, serum, blood and cerebrospinal fluid of patients with Parkinson's disease[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2004, 59(4): 559-566.
- [3] 卢岚岚, 刘桂建, 王兴明, 等. 淮南顾桥矿土壤环境中微量元素的分布及其生态风险评价[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(2): 119-127.
LU Lanlan, LIU Guijian, WANG Xingming, et al. Distribution and ecological risk assessment of trace elements in mining soil in Guqiao Coal Mine, Huainan Coalfield[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(2): 119-127.
- [4] 张俊, 李余生, 孟雷, 等. 芦岭煤矿区土壤重金属元素地球化学特征及来源分析[J]. 环境化学, 2014, 33(11): 2001-2002.
- [5] 王兴明, 刘桂建, 董众兵, 等. 淮南煤矸石山周边土壤中蚯蚓对重金属的富集特征[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1219-1226.
WANG Xingming, LIU Guijian, DONG Zhongbing, et al. The characteristics of heavy metal accumulation in earthworms in the vicinities of the coal waste rock piles in Huainan[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7): 1219-1226.
- [6] ALI H, KHAN E, SAJAD M A. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications [J]. Chemosphere, 2013, 91(7): 869-881.
- [7] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. 环境科学, 2017, 38(3): 1018-1027.
LI Chunfang, WANG Fei, CAO Wentao, et al. Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou City[J]. Environmental Science, 2017, 38(3): 1018-1027.
- [8] 宋金茜, 朱权, 姜小三, 等. 基于 GIS 的农业土壤重金属风险评价研究: 以南京市八卦洲为例[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 81-91.
SONG Jinxi, ZHU Quan, JIANG Xiaosan, et al. GIS-based heavy metals risk assessment of agricultural soils: A case study of Baguazhou, Nanjing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(1): 81-91.
- [9] ALARY C, DEMOUGEOT-RENARD H. Factorial kriging analysis as a tool for explaining the complex spatial distribution of metals in sediments[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(2): 593-599.
- [10] 马辉英, 杨晓东, 龚雪伟, 等. 乌鲁木齐市水磨河沿岸土壤重金属污染现状及评价[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 300-307.
MA Huiying, YANG Xiaodong, GONG Xuewei, et al. Status quo and evaluation of heavy metal pollution in the riparian soils of the Shuimo River in Urumqi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 300-307.
- [11] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 971-984.
LU Jianshu, ZHANG Zulu, LIU Yang, et al. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(7): 971-984.
- [12] SAJN R, HALAMIC J, PEH Z, et al. Assessment of the natural and anthropogenic sources of chemical elements in alluvial soils from the Drava River using multivariate statistical methods [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, 110(3): 278-289.
- [13] 姚峰, 包安明, 古丽·加帕尔, 等. 新疆准东煤田土壤重金属来源与污染评价[J]. 中国环境科学, 2013, 33(10): 1821-1828.
YAO Feng, BAO Anming, GULI Jiapaer, et al. Soil heavy metal sources and pollution assessment in the coalfield of East Junggar Basin in Xinjiang[J]. China Environmental Science, 2013, 33(10): 1821-1828.
- [14] 王存龙, 庞绪贵, 杨丽原, 等. 土壤重金属生态危害评价: 以典型金矿区为例[J]. 地球化学, 2013, 42(6):

- 557-566.
WANG Cunlong, PANG Xugui, YANG Liyuan, et al. Heavy metal ecological risk assessment of soil: A case study on typical gold fields[J]. *Geochimica*, 2013, 42(6): 557-566.
- [15] 高彦鑫,冯金国,唐磊,等. 密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(5): 1707-1717.
GAO Yanxin, FENG Jinguo, TANG Lei, et al. Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in iron and gold mine soil of Miyun Reservoir upstream [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(5): 1707-1717.
- [16] 许雅玲,欧阳通,陈江奖. 某铜矿区土壤重金属污染状况研究[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(11): 146-151.
XU Yaling, OUYANG Tong, CHEN Jiangjiang. Heavy metal contamination in the soil of a copper mine [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(11): 146-151.
- [17] 雷鸣,曾敏,廖柏寒,等. 某矿区土壤和地下水重金属污染调查与评价[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(12): 4687-4693.
LEI Ming, ZENG Min, LIAO Baihan, et al. Investigation and evaluation on heavy metal contamination in soils and groundwater of a mine zone [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2012, 6(12): 4687-4693.
- [18] 李刚. 淮北市典型土壤重金属现状评价[J]. *广州化工*, 2015, 43(17): 165-167.
LI Gang. Assessment of heavy metals in typical soil of Huaibei City[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2015, 43(17): 165-167.
- [19] 熊霜,桂和荣,彭位华. 矿区土壤-玉米重金属富集及健康风险[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(8): 80-86.
XIAO Shuang, GUI Hegui, PENG Weihua. Accumulation and health risk assessment of heavy metals in soil-maize system from coal mining area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(8): 80-86.
- [20] 尚文勤. 淮北采煤沉陷区土壤重金属分布赋存及微生物生态特征研究[D]. 合肥:安徽大学, 2017.
- [21] 熊霜. 临涣矿区土壤重金属元素含量和迁移特征研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2017.
- [22] 黄大伟,桂和荣. 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*, 2017, 45(5): 546-554.
HUANG Dawei, GUI Herong. Sources Analysis and content characteristics of soil heavy metal in Sunan Mining Area, China [J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(5): 546-554.
- [23] 杨莎,程雨蒙,王雷,等. 安徽淮北百善煤矿废弃地土壤重金属污染评价[J]. *江苏师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 35(2): 4-6.
YANG Sha, CHENG Yumeng, WANG Lei, et al. Assessment on heavy metal pollutions in Baishan coal mining wastelands in Huaibei, Anhui Province [J]. *Journal of Jiangsu Normal University(Natural Science Edition)*, 2017, 35(2): 4-6.
- [24] 刘巍,杨建军,汪君,等. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, 37(5): 1938-1945.
LIU Wei, YANG Jianjun, WANG Jun, et al. Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in opencast mine of East Junggar Basin in Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1938-1945.
- [25] 安徽省环境监测中心站. 安徽省土壤环境背景值调查研究报告[R]. 合肥:安徽省环境监测中心站, 1992.
- [26] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准: GB15618—1995 [S]. 北京:中国环境科学出版社, 1995.
- [27] 于文金,邹欣庆. 王港潮滩重金属 Pb、Zn 和 Cu 积累规律及污染评价[J]. *地理研究*, 2007, 26(4): 809-820.
YU Wenjin, ZOU Xinqing. The accumulation law and pollution estimation of heavy metals of Pb, Cu and Zn from Wanggang tidal flat [J]. *Geographical Research*, 2007, 26(4): 809-820.
- [28] 李长春,张光胜,姚峰,等. 新疆准东煤田五彩湾露天矿区土壤重金属污染评估与分析[J]. *环境工程*, 2014, 32(7): 142-146.
LI Changchun, ZHANG Guangsheng, YAO Feng, et al. Assessment of soil heavy metal pollution in area of xingjiang zhundong wucaiwaiwan surface coal mine [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(7): 142-146.
- [29] FACCHINELLI A, SACCHI E, MALLEEN L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114(3): 313-324.
- [30] 王锐,于宗灵,关旸. 土壤镍污染植物修复的研究概况[J]. *环境科学与管理*, 2013, 38(8): 111-114.
WANG Rui, YU Zongling, GUAN Yang. Overview on phytoremediation of nickel contaminated soil [J]. *Environmental Science and Management*, 2013, 38(8): 111-114.
- [31] 康彧. 煤矿区中砷的环境生物地球化学研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2014.