

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.03.017

轻稀土矿区土壤和植物中铀和钍核素的分布特征

于晓燕¹, 宋宇辰¹, 魏光普¹, 於国兵²

(1. 内蒙古科技大学, 内蒙古 包头 014010;

2. 安徽省辐射环境监督站, 合肥 230071)

摘要:研究轻稀土矿区土壤和植物中放射性核素含量,采用内梅罗综合分析法对土壤中污染物分布进行分析,用富集系数、转移系数分析植物体内核素的分布特征。设置11个采样点,用 γ 能谱仪法测定土壤和5种优势植物。结果显示:矿区土壤中放射性核素含量未高于中国或世界背景值,但高于包头市对照组背景值,土壤中放射性核素含量西北侧最高,东南侧最低,该区域属于轻度污染;5种植物的铀核素富集、转运和根滞留系数范围分别为0.01~0.05、0.10~0.45、0.55~0.90;钍核素富集、转运和根滞留系数范围分别为0.01~0.09、0.26~0.84、0.16~0.74。5种植物富集、转运系数均小于1,且钍核素>铀核素,当地植物的耐受性有利于生态修复土壤中的铀和钍核素。

关键词:铀;钍;土壤;植物;含量分布

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)03-0109-07

Distribution Characteristics of Uranium and Thorium Nuclides in Soil and Plants of Light Rare Earth Mining Area

YU Xiao-yan¹, SONG Yu-chen¹, WEI Guang-pu¹, YU Guo-bing²

(1. Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China;

2. Anhui Radiation Environment Supervision Station, Hefei 230071, China)

Abstract: Radionuclides contents in soil and plants of light rare earth mining area were studied. Distribution of pollutants in soil was analyzed by Nemero comprehensive analysis method, and distribution characteristics of radionuclides in plants were analyzed by enrichment coefficient and transfer coefficient. Together 11 sampling points were set up, and the soil and 5 dominant plants were determined by γ -ray spectrometer. The results show that radionuclides content in soil of mining area is not higher than background value of China or the world, but higher than background value of Baotou City control group. Radionuclides content in soil is the highest in northwest and the lowest in southeast, which causes light pollution. Enrichment, transport and root retention coefficients of five plants are 0.01—0.05, 0.10—0.45, 0.55—0.90, respectively. Enrichment, transport and retention coefficients of thorium nuclides range from 0.01 to 0.09, 0.26 to 0.84, and 0.16 to 0.74, respectively. Enrichment and transport coefficients of 5 dominant plants are all less than 1, and thorium radionuclides is higher than uranium radionuclides. Tolerance of local plants is conducive to ecological restoration of uranium and thorium in soil.

Key words: ^{238}U ; ^{232}Th ; soil; plant; content distribution

收稿日期:2020-05-25

基金项目:内蒙古科技攻关计划项目(2020GG0227);国家自然科学基金资助项目(71363040);内蒙古自然科学基金资助项目(2018LH07002)

作者简介:于晓燕(1985-),女,辽宁人,博士,讲师;通信作者:魏光普(1986-),男,山东人,副教授

中国稀土储量占世界总储量的41%,地域分布表现为北轻南重的格局,内蒙古包头市白云鄂博矿稀土储量约为中国总储量的85%。稀土分为轻稀土和离子型稀土^[1],内蒙古白云鄂博矿是独居石和氟碳铈矿的混合型轻稀土矿床,其伴生钍和铀核素,其中钍核素含量约为3%^[2]。研究表明,由于露天开采、选矿和60余年的排土场堆放导致土壤中放射性核素成分被改变,间接威胁着生态环境系统和当地居民身体健康。钍、铀核素及其衰变子体均具有放射性,世卫组织2017将钍-232及其衰变产物分为一类致癌物^[3]。铀和钍核素在生物链中的迁移积累严重威胁着土壤、地下水、植物、动物乃至整个生态系统安全^[4-5]。钍核素具有放射毒性和化学毒性,同时还危害植物生长发育,导致食物链中毒^[6-7]。

研究表明,白云鄂博矿区地表 γ 辐射剂量高于该地区天然辐射剂量 $7.2 \times 10^{-8} \text{ Gy/h}$,平均值为 $34.1 \times 10^{-8} \text{ Gy/h}$ ^[8-9]。珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)和尼泊尔酸模(*Rumex nepalensis*)可用于铀污染土壤的生态修复^[10]。水莎草(*Juncellus serotinus*)茎的铀含量高达1.52‰($1\,520 \mu\text{g/g}$),是铀的超富集植物^[11]。拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)根系铀含量为35 mg/kg,枝器官含量17 mg/kg,转移系数分别为1.2和0.6^[12]。向日葵(*Helianthus annuus L.*)是修复水中铀核素的首选植物^[13]。小飞蓬(*Conyza canadensis* (L.) Cronq.)、白茅(*Imperata cylindrica* (L.) Beauv.)和五节芒(*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum. et Laut.)体内的钍和铀核素高出背景区对照值10~35倍^[13]。珠江三角洲等地11种植物中铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)转移和富集系数均大于1,是钍的超富集植物^[14]。白云鄂博矿区受到核污染含量较高和核资源保密等原因的影响,核素的生态治理研究较少^[15]。本文研究内蒙古轻稀土矿中铀和钍核素在土壤和植物中的含量分布及迁移累积的特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白云鄂博矿区(东经 $109^{\circ}47' \sim 110^{\circ}04'$,北纬 $41^{\circ}39' \sim 41^{\circ}53'$),隶属于内蒙古包头市。白云鄂博矿始建于1957年,是全世界最大的多金属伴生矿,矿区主要由五个矿体组成,分别是东、主、西、东介格勒矿和东部接触带矿区,目前已发现110余种矿

物^[16]。矿区在内蒙古高原南部,干旱寒冷,年平均气温 2.4°C ,最低气温 -35.1°C ,年平均降水量约 242.9 mm ^[17]。

1.2 土壤及植物样品采集

土壤污染研究样点采集方法通常分为五种,包括:五点采集法、对角线采集法、网格点采集法、蛇形打点采集法和放射线打点采集法^[18]。前两种采集方法适合面积较小地势平坦的场地,网格点采集方法适合中等面积、地势平坦的场地,蛇形采集方法适用于较大面积且地势高差较大的场地,放射线采集方法是以某一污染源向四周散射线上进行土样采集。白云鄂博矿山通过五种采集方法的对比,选择蛇形采集方法进行土壤样品的采集,采样点分布在五个矿体周边区域、排土场、居民区、道路(铁路)沿线和宝山选矿厂区域。采样区 $E 109^{\circ}05' \sim 110^{\circ}23'$, $N 41^{\circ}62' \sim 41^{\circ}89'$,共设置11个采样点(见图1),每个采样点分别采集三个样品(表层0~20 cm,中层20~40 cm,底层40~60 cm,共计采集33个样品。依照采样点设置图用GPS确定点位,用环刀取样。采样点:

- 1 $E 109^{\circ}58'31'' \sim N 41^{\circ}47'39''$;
- 2 $E 109^{\circ}59'51'' \sim N 41^{\circ}48'49''$;
- 3 $E 109^{\circ}59'53'' \sim N 41^{\circ}48'05''$;
- 4 $E 109^{\circ}59'37'' \sim N 41^{\circ}47'31''$;
- 5 $E 109^{\circ}58'11'' \sim N 41^{\circ}46'50''$;
- 6 $E 109^{\circ}58'04'' \sim N 41^{\circ}48'38''$;
- 7 $E 110^{\circ}00'30'' \sim N 41^{\circ}46'41''$;
- 8 $E 109^{\circ}57'28'' \sim N 41^{\circ}46'28''$;
- 9 $E 109^{\circ}52'48'' \sim N 41^{\circ}47'55''$;
- 10 $E 109^{\circ}54'19'' \sim N 41^{\circ}48'54''$;
- 11 $E 109^{\circ}54'58'' \sim N 41^{\circ}46'01''$ 。

采用四分法留样,每采样点采集5份1.6 kg土壤,均匀混合后均分为4等份,每份2 kg,随机保留1份土壤装入无菌自封袋备用。供试土壤过2 mm土壤筛,高压灭菌锅 121°C 条件下灭菌2 h,以保证土壤中无菌跟真菌^[19]。土样采集时间为2019年7月。

土壤基本理化性质(3个样本的算术平均值 $\pm$ 标准差):pH 8.34 ± 0.58 、有机质 $1.50\% \pm 0.02\%$ 、全氮 $(0.13 \pm 0.01) \text{ g/kg}$ 、全磷 $(0.14 \pm 0.01) \text{ g/kg}$ 、全钾 $(13.39 \pm 0.58) \text{ g/kg}$ 、速效氮 $(69.75 \pm 5.44) \text{ mg/kg}$ 、速效磷 $(8.16 \pm 1.08) \text{ mg/kg}$ 、速效钾 $(92.55 \pm 3.61) \text{ mg/kg}$ 、含水量 $5.56\% \pm 0.05\%$ 。

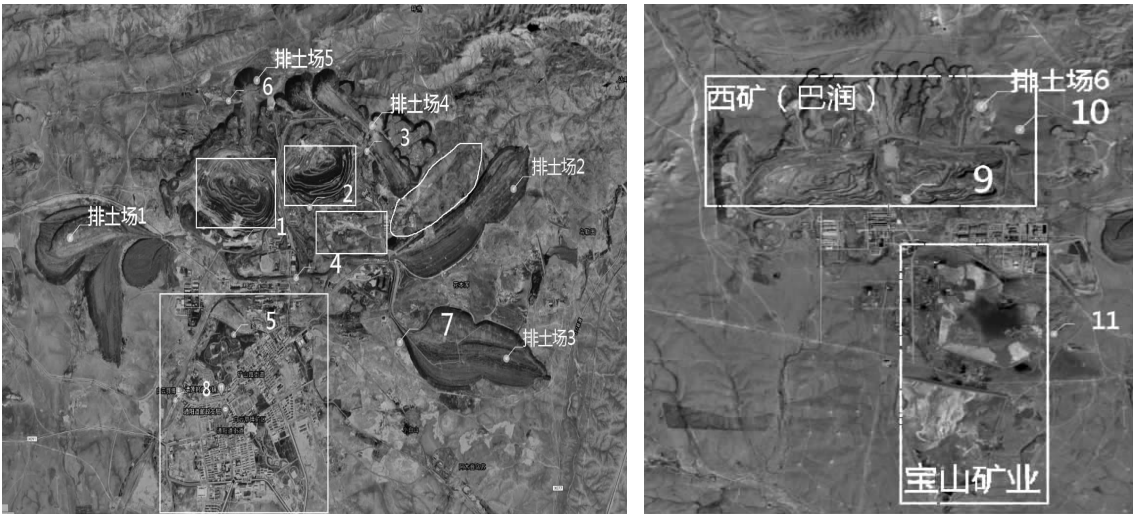


图 1 采样点位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling point location

1.3 样品测定

土壤核素测量仪器为 γ 谱仪(相对效率 66%),采集时间为 72 h^[20],详细方法参照 GB 11713—89^[21]。采用综合指数法(N L Nemerow)分析土壤单因子污染指数;采用 α 多样性和植物群落重要值方法^[22] 计算植物多样性;采用富集系数、转运系数和根系滞留系数^[13] 分析植物富集能力。采用 SPSS 20.0 和 Excel 2010 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤中铀和钍核素分布特征

土壤样品中放射性核素检测结果见表 1,矿区土壤中放射性核素含量高于市第三苗圃(对照组),但低于世界和中国参考值含量。

采用内梅罗综合法分析放射性核素的分布特征。将研究区域内采样点测得的放射性核素含量导入 SPSS 软件,运用软件分析得到平均值、标准差等数据。单因子指数法主要用于对土壤或沉积物中某一种污染物的污染程度进行分析,其计算公式及评价标准见文献[23]。

内梅罗指数法弥补了单因子指数法的不足,可以凸显出对土壤污染指数最大的重金属元素,综合反映出土壤中各种重金属元素污染程度,其计算公式及评价标准见文献[23]。

由表 2 可知,土壤中²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra 和 ⁴⁰K 四种放射性核素单因子污染指数和多因子污染指数可以反映出不同采样点污染源及污染方式的不同。11 个采样区土壤中放射性核素单因子污染指

数结果显示:²³⁸U>²³²Th>⁴⁰K>²²⁶Ra;11 个采样区均属于轻污染区域。多因子污染指数分析 11 个采样点均属于轻度污染区。通过内梅罗综合分析结果可以推断出矿业活动对土壤中放射性核素迁移影响较小。

表 1 土壤中放射性核素含量

Table 1 Radioactive elements in soil

/(Bq·kg ⁻¹)				
采样点	²³⁸ U	²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K
1—主矿南	27.6±1.1	41.0±3.2	24.0±2.9	652.4±59.3
2—东矿南	28.1±2.2	43.3±3.5	24.3±1.8	653.2±62.6
3—排土场 4	28.9±1.6	43.7±3.0	25.3±1.0	671.8±53.2
4—东介矿	23.2±0.7	38.7±2.2	22.9±1.7	544.3±57.1
5—矿山公园	21.5±0.9	36.3±3.1	22.3±1.9	526.3±57.8
6—排土场 5	25.3±1.0	41.2±2.7	24.5±2.5	621.3±56.5
7—排土场 3	24.0±0.7	38.7±3.8	23.3±2.8	552.5±64.5
8—火车站	22.9±1.1	37.7±1.9	22.5±2.4	533.8±49.8
9—西矿南	26.7±1.3	42.0±2.3	24.2±2.8	592.3±64.3
10—排土场 6	24.2±1.1	38.0±3.0	23.7±3.4	571.0±55.6
11—巴润选矿	23.0±0.9	39.3±2.0	23.7±2.8	553.3±53.9
矿山平均值	25.04	39.99	23.7	588.38
包头市第三苗圃土壤对照值	20.2±1.0	36.5±1.8	22.1±1.3	513.5±43.6
世界	33	45	32	412
中国	38.5	54.6	37.6	584.0
内蒙古环境天然辐射水平	5~87	8~98	7~88	84~1526
标准差值/%	12.13	6.28	3.88	10.30

注:表中数据为 3 个样本的算术平均值±标准差

表2 土壤放射性核素污染指数

Table 2 Radionuclide index in soil of mining area

采样点	单因子指数				多因子指数
	²³⁸ U	²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	
1—主矿南	1.37	1.12	1.09	1.27	1.61
2—东矿南	1.39	1.19	1.10	1.27	1.64
3—排土场4	1.43	1.20	1.14	1.31	1.69
4—东介矿	1.15	1.06	1.04	1.06	1.38
5—矿山公园	1.06	0.99	1.01	1.02	1.29
6—排土场5	1.25	1.13	1.11	1.21	1.50
7—排土场3	1.19	1.06	1.05	1.08	1.42
8—火车站	1.13	1.03	1.02	1.04	1.36
9—西矿南	1.32	1.15	1.10	1.15	1.56
10—排土场6	1.20	1.04	1.07	1.11	1.43
11—巴润选矿	1.14	1.08	1.07	1.08	1.38

2.2 植物多样性分析

2011年北京林业大学对白云鄂博矿区植物进行调查,结果显示,矿区植物共计46种,其中木本植物5种,草本植物41种,29种野生种,17种外来种(引种驯化)^[24-25]。本研究于2019年7月对白云鄂博主矿体东侧区域植物进行调查,该区域共有8种植物,植物群落以草本和灌木为主(见表3)。采用 α 多样性和植物群落重要值方法分析植物多样性。灌草植物是该区域主要植物群落,因此,选出多度、频度和重要值最高的5种草本植物,分别是沙打旺、紫花苜蓿、银背风毛菊、猫头刺和芨芨草作为优势植物。

表3 尾矿库周边植物多样性分析

Table 3 Analysis of plant diversity around tailings pond

植物	拉丁名	科属	多度	频度	盖度	相对多度	相对频度	相对盖度	重要值
银背风毛菊	<i>Saussurea nivea</i>	菊科,风毛菊属	3	0.15	0.02	8.57	10.42	7.69	26.68
猫头刺	<i>Oxytropis aciphylla</i>	豆科,棘豆属	3	0.14	0.03	8.57	9.72	11.54	29.83
沙打旺	<i>Astragalus adsurgens</i>	豆科,黄耆属	11	0.42	0.03	31.43	29.17	11.54	72.13
紫花苜蓿	<i>Medicago sativa</i>	豆科,苜蓿属	9	0.23	0.03	25.71	15.97	11.54	53.22
芨芨草	<i>Achnatherum splendens</i>	禾本科,芨芨草属	3	0.13	0.02	8.57	9.03	7.69	25.29
蒙古冰草	<i>Agropyron mongolicum</i>	禾本科,冰草属	2	0.12	0.06	5.71	8.33	23.08	37.12
紫花地丁	<i>Viola philippica</i>	堇菜科,堇菜属	2	0.12	0.02	5.71	8.33	7.69	21.74
红花岩黄耆	<i>Hedysarum multijugum</i>	豆科,岩黄耆属	2	0.13	0.05	5.71	9.03	19.23	33.97

2.3 植物中铀、钍含量及分布特征

在优势植物中筛选修复铀、钍核素的富集(耐受)植物来修复土壤的核素污染^[26]。白云鄂博矿区东侧长势良好的耐铀、钍核素优势植物有5种。植物对污染吸附提取、转运能力的高低可以分别采用富集系数(植物体内重金属含量均值/根际土壤中重金属含量)、转运系数(植物地上部分重金属含量/根部重金属含量)和根滞留系数(1-转运系数)来评价。富集系数、转运系数大于1的可作为富集植物应用,富集系数大于1且地上器官重金属含量是正常植物体内100倍的可作为超富集植物应用^[26-28]。在东侧土壤采集点附近采集的5种优势植物的富集

系数、转运系数和根滞留系数计算结果见表4和表5。从表4可以看出,所有优势植物铀核素的富集系数和转运系数均小于1,说明富集和转运能力铀核素的较弱;根滞留系数小于1,植物体内富集的铀核素大量留存在地下根系器官。由表5可知,所有优势植物钍核素的富集系数和转运系数也均小于1,富集和转运能力钍核素的较弱;银背风毛菊和沙打旺转运系数接近1,转运钍核素能力较强;根滞留系数范围为0.16~0.74,紫花苜蓿、芨芨草和猫头刺根系富集了大量的钍核素。5种优势植物对钍核素的富集、转运能力均优于铀核素,但均不能直接利用当地植物进行土壤铀和钍核素的修复。

表4 土壤和植物²³⁸U含量及植物富集、转运系数和根滞留系数Table 4 ²³⁸U contents of plant and soil, plant enrichment coefficients, transport coefficients and root retention coefficients/(Bq·kg⁻¹)

植物名称	根际土壤 ²³⁸ U含量	均值	根系	地上器官	富集系数*	转运系数*	根滞留系数*
紫花苜蓿	28.7	0.27	0.67	0.12	0.01	0.45	0.55
银背风毛菊	28.4	0.59	0.82	0.06	0.02	0.10	0.90
芨芨草	28.9	1.40	4.55	0.40	0.05	0.29	0.71
猫头刺	28.1	0.64	0.76	0.14	0.02	0.21	0.79
沙打旺	28.1	0.80	1.03	0.23	0.03	0.29	0.71

注: * 无单位,下同

表 5 土壤和植物²³²Th 含量及植物富集、转运系数和根滞留系数
Table 5 ²³²Th contents of plant and soils, plant enrichment coefficient,

transport coefficients and root retention coefficients					/(Bq · kg ⁻¹)		
植物名称	根际土壤 ²³² Th 含量	均值	根系	地上器官	富集系数*	转运系数*	根滞留系数*
紫花苜蓿	43.3	1.51	2.25	0.74	0.03	0.49	0.51
银背风毛菊	43.5	0.27	7.58	0.20	0.01	0.74	0.26
芨芨草	43.1	3.92	5.68	1.02	0.09	0.26	0.74
猫头刺	43.0	1.13	6.37	0.51	0.03	0.45	0.55
沙打旺	42.9	1.69	7.35	1.42	0.04	0.84	0.16

3 讨论

白云鄂博矿区地处内蒙古高原中部草原生态系统,抗干扰能力较弱,土壤中铀和钍核素会对当地植物、牲畜和居民等造成严重影响^[29-30]。有研究表明,白云鄂博矿区周边土壤中钍核素高于全国平均值 6 倍,其含量分布受西北风向影响东南最高^[2]。土壤中铀和钍核素含量随土层加深而减少,当土层深 30 cm 以下时铀和钍核素含量与包头城区一般环境土壤平均值处于同一水平^[31]。上述研究结果与本文相比污染值较高。内梅罗分析可知,本文 11 个土壤采样点区域的 4 种放射性核素指数均大于 1,属于轻度污染物区域。土壤中放射性含量由高到低呈现北侧大于南侧的分布特点。

植被生态修复土壤中放射性核素的研究较少,主要原因是富集(耐受)植物难筛选,植物死亡后的灰化处理难等造成的^[32-33]。因此,本研究对白云鄂博矿区放射性核素最多的西北侧进行植物多样性调查,该区域共计 8 种草本植物,其中外来种 1 种,野生种 7 种,野生种多于外来种,与 2011 年北京林业大学研究结果相似^[24-25]。筛选出 5 种长势良好的优势植物,其中,外来种 1 种,野生种 4 种,结果表明,外来种可以与当地野生种共同生长。通过对 5 种优势植物地上器官和根系中铀和钍核素含量的测定,筛选富集植物,结果表明,植物富集钍核素的能力优于铀核素,外来种紫花苜蓿和野生种沙打旺是该区域富集钍核素最好的植被组合。

4 结论

1)白云鄂博矿区土壤中铀和钍核素污染是轻稀土露天开采、堆放造成的,污染浓度呈现西北侧高、东南侧低的分布特征,因东侧有主矿和排土场、又受到西北主导风向的影响,应在上风口西北方向增加植物防风防护墙,减少风对放射性核素的迁移。

2)白云鄂博矿区干旱、寒冷,经过植物多样性分

析,该区域植物种类稀少,野生种多于外来种,东侧 5 种优势植物中含有 1 种外来种(紫花苜蓿)和 4 种野生种。

3)土壤受到放射性核素的污染,通过富集、转运迁移到植物体内,虽然未筛选出铀和钍核素的富集植物,但植物体内的放射性核素含量可以有效进行土壤修复治理。

4)探索野生种结合外来种植被生态修复土壤中铀和钍核素的修复治理研究,可以减少化学修复方法,避免生态系统的二次破坏。

参考文献

[1] 张立锋,刘杰民,张翼明. 白云鄂博矿区土壤和植物中稀土元素的分布特征[J]. 岩矿测试, 2019, 38(5): 556-564.
ZHANG L F, LIU J M, ZHANG Y M. Distribution characteristics of rare earth elements in plants and soils from the Bayan Obo mining area[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(5): 556-564.

[2] 李若愚,李强,陈胜,等. 包头白云鄂博采矿区周边表层土壤中²³²Th 的分布特征[J]. 环境科学研究, 2014, 27(1): 51-56.
LI R Y, LI Q, CHEN S, et al. Distribution of radioactive thorium in surrounding soils of Bayan Obo mining area[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(1): 51-56.

[3] 薛清泼,魏浩,张国瑞,等. 某铀矿周边土壤典型重金属污染特征及植物筛选[J]. 中国矿业, 2019, 28(6): 81-88.
XUE Q P, WEI H, ZHANG G R, et al. Pollution characteristics of typical heavy metals in soil and plant screening around a uranium mine[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(6): 81-88.

[4] OBED R I, FARAI I P, JIBIRI N N. Population dose distribution due to soil radioactivity concentration levels in 18 cities across Nigeria [J]. Journal of Radiological Protection, 2005, 25(3): 305-312.

[5] MAHUR A K, KUMAR R, SONKAWADE R G,

- et al. Measurement of natural radioactivity and radon exhalation rate from rock samples of Jaduguda uranium mines and its radiological implications [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2008, 266(8): 1591-1597.
- [6] MISHRA D G, ACHARYA R, SWAIN K K, et al. Determination of thorium concentrations in soil and sand samples using instrumental neutron activation analysis [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2012, 294(3): 333-336.
- [7] EL AASSY I E, EL GALY M M, NADA A A, et al. Effect of alteration processes on the distribution of radionuclides in uraniferous sedimentary rocks and their environmental impact, southwestern Sinai, Egypt [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2011, 289: 173-184.
- [8] 苗金萍, 李兴明. 包头地区天然放射性致环境 γ 辐射水平及居民受照剂量的调查[J]. 中华放射医学与防护杂志, 1998, 18(6): 433-435.
- MIAO J P, LI X M. Investigation on the environmental γ radiation level caused by natural radioactivity and the radiation dose of residents in Baotou area [J]. Chinese Journal of Radiation Mediation and Protection, 1998, 18(6): 433-435.
- [9] 苗金萍, 邢茹, 武恒. 包头地区稀土产品的放射性水平[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2001, 21(3): 227.
- MIAO J P, XING R, WU H. Radioactivity level of rare earth products in Baotou area [J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2001, 21(3): 227.
- [10] 李若飞, 董发勤, 杨刚, 等. 尼泊尔酸模与珠芽蓼对铀矿修复区重金属的累积及化学形态特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(3): 482-490.
- LI R F, DONG F Q, YANG G, et al. Characteristics of heavy metals accumulation and their chemical forms found for *Polygonum viviparum* and *Rumex nepalensis* in the remediation area of abandoned uranium mine [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(3): 482-490.
- [11] 李稳, 陈功新, 孙占学, 等. 某铀尾矿中 U、Th 在电场作用下释放及迁移规律[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(2): 65-70.
- LI W, CHEN G X, SUN Z X, et al. Release and migration of U and Th in uranium tailings under electric field [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(2): 65-70.
- [12] 冯涌, 胡晓峰, 卢龙, 等. 铀、钍在尾矿-定居植物体系中迁移[J]. 地球与环境, 2014, 42(2): 201-206.
- FENG Y, HU X F, LU L, et al. The migration of U and Th in the tailings-plants system [J]. Earth and Environment, 2014, 42(2): 201-206.
- [13] 张志强, 陈迪云, 宋刚, 等. 放射性核素土壤-植物吸收与钍、镭富集植物的发现[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 1159-1163.
- ZHANG Z Q, CHEN Q Y, SONG G, et al. Uptake of radionuclides from soil to plant and the discovery of ^{226}Ra , ^{232}Th hyperaccumulator [J]. Environmental Science, 2011, 32(4): 1159-1163.
- [14] 江文静, 王丹, 姚天月. 铀及其伴生重金属镭的根茎类富集植物的筛选[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 39-47.
- JIANG W J, WANG D, YAO T Y. Screening of rhizomatic accumulators to uranium and cadmium [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(1): 39-47.
- [15] 姚天月, 王丹, 李泽华, 等. 8 种花卉植物对土壤中铀富集特性研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(2): 24-30.
- YAO T Y, WANG D, LI Z H, et al. Enrichment characteristics of eight ornamental plants to uranium in soil [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(2): 24-30.
- [16] 白淑英, 朱倩文, 沈渭寿, 等. 白云鄂博矿区生态退化研究[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(3): 367-373.
- BAI S Y, ZHU Q W, SHEN W S, et al. Effect of mining on ecological degradation in Bayan Obo [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(3): 367-373.
- [17] 张铁柱, 王建英, 李保卫, 等. 白云鄂博稀土、铌、钍在矿石中分布规律及伴生关系[J]. 稀土, 2015, 36(5): 87-91.
- ZHANG T Z, WANG J Y, LI B W, et al. Distribution and association of REE, Nb and Th in Bayan Obo ore [J]. Chinese Rare Earths, 2015, 36(5): 87-91.
- [18] 魏光普, 闫伟, 于晓燕, 等. 轻稀土尾矿库区植被修复的铜、钍富集植物筛选[J]. 林业科学, 2019, 55(5): 20-26.
- WEI G P, YAN W, YU X Y, et al. Selection of La and Ce hyper-tolerant plants for vegetation rehabilitation in light rare earth tailing [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(5): 20-26.
- [19] 向龙, 刘平辉, 张淑梅, 等. 某铀矿区水稻土—地表水铀含量对稻米铀含量的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(7): 67-73.
- XIANG L, LIU P H, ZHANG S M, et al. Effect of uranium contents of paddy soil and surface water on uranium contents of rice in a uranium mining area [J].

- Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2018(7): 67-73.
- [20] 付雄略,陈永华,刘文胜,等.湖南省衡阳市某铅锌尾矿区植物多样性及其重金属富集性研究[J].中南林业科技大学学报,2017,37(7):130-135.
- FU X L, CHEN Y H, LIU W S, et al. Plant diversity and its heavy metal enrichment investigation in a leadzinc tailings in Hengyang city of Hunan province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(7): 130-135.
- [21] 陈敏,王丹,姚天月,等.五种十字花科植物对土壤高浓度铀胁迫响应及富集特性研究[J].生态科学,2017, 36(4):58-63.
- CHEN M, WANG D, YAO T Y, et al. Stress response and enrichment characteristics of ten cruciferae plants to uranium in soil[J]. Ecological Science, 2017, 36(4): 58-63.
- [22] 孙静,何家东,李乾.多种水生植物对铀的富集特性对比研究[J].南华大学学报(自然科学版),2018,32(3): 27-31.
- SUN J, HE J D, LI Q. Comparative analysis about uranium accumulation characteristics of various aquatic plants[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2018, 32(3): 27-31.
- [23] 于晓燕,宋宇辰,魏光普,等.某轻稀土尾矿库土壤铀、钍污染特征及植物筛选[J].环境科学与技术,2020, 43(1):26-30.
- YU X Y, SONG Y C, WEI G P, et al. Pollution characteristics of U and Th in soil and plant screening in light rare earth tailings[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(1): 26-30.
- [24] 任利超.白云鄂博矿区13种木本植物引种及耐旱耐寒性研究[D].北京:北京林业大学,2011.
- REN L C. Study on introduction of 13 woody plants and their resistance to drought and cold in Bayan Obo[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [25] 李铁群.白云鄂博矿区草本植物引种及耐旱耐寒性研究[D].北京:北京林业大学,2011.
- LI Y Q. Herbaceous plant selection and introduction of Bayan Obo and research of cold resistance and drought tolerance [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [26] 刘媛媛,魏强林,高柏,等.放射性核素在不同介质中的迁移规律研究现状及进展[J].有色金属(冶炼部分), 2018(6):76-82.
- LIU Y Y, WEI Q L, GAO B, et al. Current status and progress on migration of radionuclides in different media[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2018(6):76-82.
- [27] VANDENHOVE H, VAN HEES M. Phytoextraction for cleanup low level uranium contaminated soil evaluated[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004, 72(1/2):41-45.
- [28] 姜晓燕,闫冬,何映雪,等.北方某铀矿区野生草本植物的铀富集能力研究[J].癌变·畸变·突变,2016, 28(6):464-467.
- JIANG X Y, YAN D, HE Y X, et al. Study of enrichment capacity of wild herbaceous plant for uranium[J]. Carcinogenesis, Teratogenesis & Mutagenesis, 2016, 28(6):464-467.
- [29] 周仲魁,孙占学,郑立莉,等.某铀矿区放射性核素对土壤微生物活性的影响研究[J].有色金属(冶炼部分), 2018(4):75-80.
- ZHOU Z K, SUN Z X, ZHENG L L, et al. Effects of radionuclides on soil microbial activity in a uranium mining area [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(4):75-80.
- [30] 白丽娜,张利成,王灵秀.包头市稀土生产带来的放射性环境问题及防治措施[J].辐射防护通讯,2001(3): 40-42.
- BAI L N, ZHANG L C, WANG L X. Environmental radioactivity problem arising from rare earth production and proposed prevention measures [J]. Radiation Protection Bulletin, 2001(3): 40-42.
- [31] 东双.白云鄂博西矿采选过程对外环境的辐射影响研究[D].长春:吉林大学,2013.
- DONG S. Research on environmental impacts of radiation generated during mining process in Baiyunebo West Mining areas [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [32] 王丹,陈晓明,唐运来,等.放射性核素污染土壤的植物提取修复技术研究关键问题探讨[J].辐射防护,2016, 36(2):94-103.
- WANG D, CHEN X M, TANG Y L, et al. Discussion on key issues to research the phytoextraction technology of contamination of radionuclides in soil[J]. Radiation Protection, 2016, 36(2):94-103.
- [33] 范镇获,陈井影,高柏,等.某铀尾矿周边农田土壤中放射性¹³⁷Cs的分布特征[J].有色金属(冶炼部分),2017(10): 66-70.
- FAN Z D, CHEN J Y, GAO B, et al. Distribution characteristics of radionuclide ¹³⁷Cs in farmland soil around tailings pond of uranium mine[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2017(10):66-70.