

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.12.017

华南铀尾矿附近土壤和水体中铀的分布与污染评价

宋鑫,熊芷毓,李杰,毛悦梅,曾涛涛

(南华大学 土木工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:在统计近10年来我国南方铀尾矿土壤和水体中铀污染相关文献数据的基础上,采用单因子指数法和潜在生态危害指数法对铀尾矿的土壤和水体中铀的分布及其污染状况进行了分析探讨。结果显示,当以各地区的背景值作为参照时,土壤和水体铀含量的变异系数(CV)分别为109.9%和103.5%,表明铀的分布不均匀。土壤、水体中铀的单因子污染指数范围分别为0.45~17.63和1.44~140.31,平均值分别为4.83和24.63;内梅罗综合污染指数范围分别为0.90~13.42和4.40~425.53,平均值分别为13.42和46.35,潜在生态风险危害系数 E_p^i 范围分别为17.82~705.24和57.42~5612.24,平均值分别为193.19和985.03。华南地区铀尾矿土壤、水体中铀的含量较高,且各分区中铀的分布不均匀,存在较大差异。华南地区铀尾矿土壤和水体的污染及生态风险值得进一步关注。

关键词:铀尾矿;重金属;铀;污染评价;生态风险

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-7545(2024)12-0139-07

Distribution and Evaluation of the Contamination Profile of Uranium in Soil and Water Near Uranium Tailings in South China

SONG Xin, XIONG Zhiyu, LI Jie, MAO Yuemei, ZENG Taotao

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China)

Abstract: Based on the statistics of literature data related to uranium pollution in soil and water of uranium tailings in southern China in the past 10 years, the distribution and pollution status of uranium in soil and water of uranium tailings were investigated by single factor index and potential ecological hazard index method. The results show that when the background values of each area are taken as reference, the coefficients of variation (CV) of uranium content in soil and water is 109.9% and 103.5%, respectively, indicating uneven distribution of uranium. The single-factor pollution indices of uranium in soil and water ranges from 0.45 to 17.63 and 1.44 to 140.31, with the average values of 4.83 and 24.63, respectively. The Nemerow comprehensive pollution index ranges from 0.90 to 13.42 and 4.40 to 425.53, with average values of 13.42 and 46.35, respectively. The potential ecological risk hazard coefficient E_p^i ranges from 17.82 to 705.24, and 57.42 to 5612.24, with average values of 193.19 and 985.03, respectively. The content of uranium in the soil and water of uranium tailings in South China is higher, and the distribution of uranium in each zone is uneven, with large differences. The pollution and ecological risk of soil and water bodies of uranium tailings in South China need to be paid more attention.

Key words: uranium tailings; heavy metals; pollution assessment; ecological risk

收稿日期:2024-03-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52170164)

作者简介:宋鑫(1998-),女,硕士研究生;**通信作者:**曾涛涛(1985-),男,博士,教授

随着社会进步,大众对能源的需求持续增长,而化石燃料给环境带来的不良后果也日益凸显。目前全世界面临着能源危机和温室效应两大难题。相较于传统的化石燃料,核能在清洁和环境保护方面具有明显的优势。目前,核能已经成为人类社会发展中重要的动力来源。铀作为核能中应用最广的原料物质,具有庞大的储量、易于开采等优点和多种用途。目前,世界上许多国家都在积极开发和利用铀矿资源。但是铀矿开采往往伴随着大量尾矿的产生,最常见的处置方法是将其堆积在铀尾矿库中。据调查,截至2010年,中国约有0.6亿吨铀尾矿^[1]。受长期露天堆放的影响,尾矿中的大量放射性元素可能通过风化、雨水侵蚀或大气沉降进入地表水和土壤环境^[2],对生态环境造成极大威胁。铀矿开采过程中产生的放射性核素的影响引起了公众的极大关注。铀的化学毒性和放射毒性表现出明显的生物效应,对人类构成威胁^[3]。

长期饮用受铀污染的地下水或在受污染土壤中生长的作物对人体健康造成极大损害^[4-5]。已有报道铀引起基因毒性和免疫毒性的病例,对铀矿附近居民的血液样本进行微量元素和蛋白分析,表明铀的开采确实对居民造成了一定的公共健康问题^[6]。因此,有必要对尾矿库附近土壤-水系统中铀的污染特征进行研究。

我国已发现和开采的铀矿大多位于湖南、江西和广东。目前针对华南地区尾矿库附近土壤和水体污染的研究很多。如蒋文波等^[7]对位于南岭山脉南

麓某县的铀矿周边土壤进行现场调研和统计分析,结果表明,铀放射性浓度为813.44~5 059.20 Bq/kg,污染评价表明研究区属于重度-极重度污染,且强生态风险危害的土壤面积占比最高。高杨等^[8]对江西某铀矿周边农田土壤进行采集评估,结果表明,铀含量为江西土壤背景值的20~40倍,土壤污染呈现极重度污染,潜在生态风险评价(E_i^p)中强生态风险占50%以上。然而,关于华南地区尾矿库的土壤和水质的总结分析,目前的报道还相当少。因此本文在前人研究的基础上,对华南地区尾矿库土壤和水体中铀的空间分布特征进行了整理和分析,探讨了铀的富集程度,解析了尾矿库土壤和水体的污染与生态风险程度,为铀尾矿库的污染防治提供参考。

1 材料和方法

1.1 数据收集和整理

本研究数据来源于中国知网和 Web of Science 数据库,目的是从已经公开发布的学术文献中,搜集近十年来华南地区尾矿库土壤和水体中铀含量的相关数据,共收集到了12个土壤和10个水体的数据。通过对这些数据进行整理、统计和分析,得到我国尾矿库的土壤和水体的铀含量情况以及其空间分布特征。研究中,我们都将铀的平均含量作为特定点位的参考值,在此基础上分析了这些均值之间的关系以及影响因素,并对其进行初步探讨。尾矿库土壤和水体的采样材料及分析方法见表1和表2。数据分析和处理过程使用 Excel 2016。

表1 尾矿库土壤样本情况和分析方法

Table 1 Soil samplings and analysis methods in tailings ponds

序号	所在地区	采样时间	样本量	深度/cm	分析方法	文献
1	江西	2015-11	28	0、40、60、80、100	ICP-OES	[9]
2	湖南	—	205	30	便携式 XRF 元素分析仪	[10]
3	四川	2017	42	0~20	电感耦合等离子体发射光谱仪	[11]
4	湖南	—	205	30	电感耦合等离子体发射光谱仪	[12]
5	南方	2017	12	0~20	电感耦合等离子体发射光谱仪	[13]
6	江西	—	72	0、20、40、60、80、100	电感耦合等离子体发射光谱仪	[14]
7	东南	—	45	0~15、15~30、30~45	高纯锗(HPGe) γ 谱仪	[15]
8	东南	2019-09	33	0~20	电感耦合等离子体发射光谱仪	[16]
9	广东	2020-10	6	—	电感耦合等离子体发射光谱仪	[17]
10	湖南	2016-03	58	—	γ 能谱法	[18]
11	东南	2018-09	20	0~20	ICP-OES	[19]
12	—	—	43	0~20	ICP-MS	[20]

注:“—”表示参考文献中未标明此部分信息,下同。

表 2 尾矿库水体样本情况和分析方法

Table 2 Water bodies samplings and analysis methods in tailings ponds

序号	所在地区	采样时间	样本量	分析方法	文献
1	南方	—	14	WGJ-III 型微量测铀仪	[21]
2	江西	—	15	高性能高分辨电感耦合等离子体质谱仪	[22]
3	华东	—	4	电感耦合等离子体质谱仪	[23]
4	湖南	2018—05	15	ICP-MS	[24]
5	江西	—	8	电感耦合等离子体质谱仪	[25]
6	广东	—	9	MUA 激光测铀仪	[26]
7	鄱阳湖	2016—07	6	ICP-MS	[27]
8	南方	—	7	ICP-OES	[14]
9	江西	2016—10	13	ICP-OES	[28]
10	广东	2015—09	21	ICP-MS	[29]

1.2 污染评价方法

采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对华南地区尾矿周围土壤和水体污染进行评价,具体计算公式和分级标准见文献[30-31]。计算时 S_i 采用当地土壤和水体中铀元素的背景值。潜在生态指数法作为评估单个或多个重金属生态风险的模型,已被用于水和土壤污染等多个领域,因此本研究选用潜在生态指数法评估华南地区尾矿周围环境生态风险状况,计算公式和分级标准见文献[31]。毒性响应系数 T_i 参照 Hakanson 研究结果设定为 40。

2 结果与讨论

2.1 铀的含量与分布

表 3 和表 4 详细列出了华南地区尾矿库中铀的含量和主要特性。在尾矿土壤和水体中,铀的含量在近 10 年内分别是 0.09~527.7 mg/kg 和 0.01~223 $\mu\text{g/L}$,平均含量分别为 17.51 mg/kg 和 8.07 $\mu\text{g/L}$ 。以各尾矿库当地背景值为参考,91.7%的土壤点位铀含量超标,实测铀含量平均值是背景值的 4.32 倍;水体中的铀含量全部大于背景值,铀含量是背景值的 10.91 倍。说明华南地区铀尾矿库附近土壤和水体受到铀的不同程度污染。

变异系数(CV)用来衡量重金属含量的离散程度,能表示土壤和水体中重金属空间分布变化的差异性^[32]。在华南地区铀尾矿库的土壤和水体中,铀的变异系数分别是 109.9%和 103.5%,这表明铀在空间分布上具有很强的变异性(如果 $CV > 36\%$,表示强变异),说明华南地区铀尾矿库土壤和水体中铀的空间分布极不均匀。尾矿土壤中铀的峰度(6.06)和水体铀的峰度(1.81)分别是背景值峰度(0.34 和 0.67)的 17.82 倍和 2.70 倍,而水体中铀的偏度(1.64)也是背景值偏度(1.23)的 1.33 倍。说明尾矿对地下水有一定的污染作用。研究结果显示,铀在尾矿土壤和水体中的含量峰值波动较大,并且呈

现出不同程度的正偏斜现象。这和各地土壤水体的背景值不同有关(土壤、水体的铀含量背景值变异系数分别为 17.1%和 65.5%),也和不同尾矿受到人为活动影响不同有关,造成铀在不同尾矿的含量与分布不均^[33]。

基于华南各个地区的社会经济发展特点,将其划分为西部、中部、南部和东部四个主要区域。在本研究中,选择了 22 个研究对象。根据它们的地理位置,四川的尾矿库位于西部,湖南和江西的尾矿库位于中部,广东的尾矿库位于南部,而华东和东南的尾矿库则位于东部。在西部、中部、南部和东部四个分区的尾矿土壤中,铀的平均含量分别是 19.62、21.74、18.91 和 12.15 mg/kg。而在中部、南部和东部三个分区的尾矿水体中,铀的平均含量分别是 6.61、11.04 和 3.54 $\mu\text{g/L}$ 。

表 3 国内尾矿土壤中铀含量统计分析

Table 3 Statistical analysis of uranium content in domestic tailings soils

序号	所在地区	铀含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)			背景值
		最小值	最大值	均值	
1	江西	1.34	13.39	6.83	4.4
2	湖南	3.21	62.37	12.16	5.18
3	四川	—	—	19.62	2.79
4	湖南	3.21	120.52	13.69	4.2
5	南方	0.38	17.10	4.42	4.4
6	江西	0.09	5.22	1.96	4.4
7	东南	5.20	48.10	24.51	2.72
8	东南	1.95	20.75	6.35	4.4
9	广东	20.20	43.50	33.40	4.11
10	湖南	6.88	527.77	74.05	4.2
11	东南	1.82	20.75	5.60	4.4
12	—	4.05	12.21	7.52	3.39
变化范围		0.09~20.2	5.22~527.7	1.96~74.05	2.72~5.18
平均值		4.03	33.08	17.51	4.05
标准差		5.27	33.15	19.23	0.69
变异系数*		—	—	109.9	17.1
偏度		—	—	2.34	-0.86
峰度		—	—	6.06	0.34
超标率*		91.7			

注:单位为%,下同。

表4 国内尾矿水体中铀含量统计分析
Table 4 Statistical analysis of uranium content in domestic tailings waters

序号	所在地区	铀含量/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)			背景值
		最小值	最大值	均值	
1	南方	0.55	12.05	5.13	1.66
2	江西	0.08	223	20.15	0.62
3	华东	1.36	5.95	3.54	0.62
4	湖南	0.38	49.78	6.62	1.66
5	江西	2.80	5.58	2.06	0.62
6	广东	0.88	25.10	9.16	0.196
7	鄱阳湖	1.00	8.20	3.33	0.62
8	南方	0.55	3.36	2.36	0.05
9	江西	0.01	3.75	0.89	0.62
10	广东	4.19	114.70	27.50	0.196
变化范围		0.01~4.19	3.36~223	0.89~27.500	196~1.66
平均值		1.18	45.15	8.07	0.74
标准差		1.26	67.76	8.36	0.49
变异系数*		—	—	103.5	65.5
偏度		—	—	1.64	1.23
峰度		—	—	1.81	0.67
超标率*		100			

2.2 铀的污染评价

以各研究区域当地的背景值为标准,采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对尾矿土壤水体中铀污染程度进行评价^[34]。尾矿土壤、水体铀的污染评价结果见表5和表6。由表5和表6可知,土壤和水体的各个分区的单因子指数值和内梅罗综合污染指数值均超过3,这表明尾矿土壤和水体整体上存在严重的铀污染。从土壤和水体的单因子指数和内梅罗综合污染指数均值可以判断污染程度为重度污染。从土壤和水体的特征值来看,最大值、最小值和均值都是 $P(\text{水体}) > P(\text{土壤})$,这表明尾矿水体的污染程度比土壤的污染程度更深。从表中数据可知,单因子指数法和内梅罗综合污染指数法结果显示土壤和水体的污染情况中重污染占比最大,土壤污染情况中重污染占比分别为36.36%和72.73%,水体污染情况中重污染占比分别为90%和100%。

表5 单因子指数法铀污染评价结果

Table 5 Evaluation results of uranium contamination by single factor index method

项目	研究区域				范围	均值	污染程度百分比/%			
	西部	中部	南部	东部			无污染	轻污染	中污染	重污染
土壤	7.03	5.05	4.57	3.91	0.45~17.63	4.83	18.18	27.27	18.18	36.36
水体	—	8.40	63.38	5.71	1.44~140.31	24.63	0	10	0	90

表6 内梅罗综合污染指数法铀污染评价结果

Table 6 Evaluation results of uranium contamination by the Nemeru composite contamination index method

项目	研究区域				范围	均值	污染程度百分比/%				
	西部	中部	南部	东部			无污染	轻微污染	轻度污染	中污染	重污染
土壤	4.97	24.42	6.14	6.99	0.90~89.71	13.42	0	9.1	0	18.18	72.73
水体	—	50.45	175.83	7.90	4.40~425.53	46.35	0	0	0	0	100

2.3 铀的生态风险

采用各地的背景值作为评估准则,我们使用潜在生态危害风险评价法来评估华南地区尾矿土壤和水体中铀的生态风险,具体的评价结果参见表7。从表7可以看出,土壤和水体中铀的潜在生态危害系数分别在17.82~705.24和57.42~5 612.24,其中潜在危害水体大于土壤,这与铀土壤和水体的污染评估结果是一致的。因此可以看出,华南地区尾矿库环境中的铀对生态环境存在潜在威胁。经过计算,得知土壤中铀的 E_r^i 平均值为193.19,其波动范围是17.82~705.24,这表明土壤铀的潜在生态风险为轻微风险到极强风险,整体风险为很强风险;水体中铀的 E_r^i 平均值为985.03,波动范围为57.42~5 612.24,显示水体铀的潜在生态风险为中等风险

到极强风险,整体风险为极强风险。国家相关标准《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》(GB 23727—2020)规定了铀在废水排放口处的排放浓度限值,水体中铀浓度没有超过相关排放标准,但与背景值相比,铀的生态风险值得进一步关注。

表7 潜在生态风险评价法评价结果

Table 7 Evaluation results of potential ecological risk evaluation method

分区	土壤		水体	
	E_r^i	风险程度	E_r^i	风险程度
西部	281.29	很强风险	—	—
中部	201.89	很强风险	336.12	极强风险
南部	182.62	很强风险	2 535.08	极强风险
东部	156.36	强风险	228.39	很强风险
均值	193.19	很强风险	985.03	极强风险
范围	17.82~705.24		57.42~5 612.24	

3 结论

1)以不同地区的背景值作为参照,华南地区的铀尾矿土壤和水体中铀的单因子污染指数分别为4.83和24.63,内梅罗综合污染指数分别为13.42和46.35,这表明与背景值相比,它们都是重度污染,而且水体的污染状况比土壤更为严重。不同区域内铀尾矿对环境造成的危害存在显著差异性。

2)在华南不同的土壤和水体分区中,铀的含量存在显著差异,中部地区的含量相对较高,其次是西部和南部,而东南地区的含量则是最低的。在水体中,南部的铀含量是最高的,中部紧随其后,而东部的含量则是最低的。在土壤和水体中,铀的变异系数分别达到了109.9%和103.5%,这表明铀在空间上的分布存在很大的差异。

3)华南地区铀尾矿土壤和水体中铀的潜在生态危害系数均值分别为193.19和985.03,潜在生态风险评估法显示整体风险为很强风险和极强风险,说明与背景值相比,铀的生态风险值得进一步关注。

参考文献

- [1] HU L, ZHANG Z, WU L, et al. Experimental study on the solidification of uranium tailings and uranium removal based on MICP [J]. Sustainability, 2023, 15 (16): 12387.
- [2] SHI T R, MA J, WU X, et al. Inventories of heavy metal inputs and outputs to and from agricultural soils: a review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 164: 118-124.
- [3] XUE S Q, WANG Z L, OUYANG J B, et al. Release behavior of uranium from a uranium tailing in Jiangxi Province [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022: 995533.
- [4] YIN M L, SUN J, HE H P, et al. Uranium re-adsorption on uranium mill tailings and environmental implications [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416: 126153. DOI:10.1016/j.jhazmat.2021.126153.
- [5] SHARMA T, SHARMA A, KAUR I, et al. Uranium distribution in groundwater and assessment of age dependent radiation dose in Amritsar, Gurdaspur and Pathankot districts of Punjab, India [J]. Chemosphere, 2019, 219: 607-616.
- [6] XIE T, QIAN T W, LIAN B, et al. Research on leaching behavior of uranium from a uranium tailing and its adsorption behavior in geotechnical media [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 353: 120207. DOI:10.1016/j.jenvman.2024.120207.
- [7] 蒋文波,高柏,张海阳,等.某铀矿区周边土壤²³⁸U和²²⁶Ra分布特征及污染评价[J].中国环境科学,2021,41(4):1799-1805.
- JIANG W B, GAO B, ZHANG H Y, et al. Distribution characteristics of ²³⁸U and ²²⁶Ra in soils around a uranium mining area and evaluation of pollution [J]. China Environmental Science, 2021, 41(4): 1799-1805.
- [8] 高杨,高柏,蒋文波,等.某铀矿²³⁸U、²³²Th污染土壤分布特征及健康风险评价[J].有色金属(冶炼部分),2021(8):145-150.
- GAO Y, GAO B, JIANG W B, et al. Distribution characteristics and health risk evaluation of ²³⁸U, ²³²Th contaminated soil from a uranium mine [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(8): 145-150.
- [9] 樊骅,张春艳,李艳梅,等.基于ICP-OES分析的某尾矿库土壤铀分布特征与污染评价[J].光谱学与光谱分析,2018,38(5):1563-1566.
- FAN H, ZHANG C Y, LI Y M, et al. Characterization of soil uranium distribution and pollution evaluation of a tailing pond based on ICP-OES analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38 (5): 1563-1566.
- [10] 马盼军,王哲,易发成,等.某铀尾矿库周边土壤中铀元素的空间分布与污染评价[J].原子能科学技术,2017,51(5):956-960.
- MA P J, WANG Z, YI F C, et al. Spatial distribution and pollution evaluation of uranium in soil around a uranium tailings pond [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(5): 956-960.
- [11] LI R F, DONG F Q, YANG G, et al. Characterization of arsenic and uranium pollution surrounding a uranium mine in Southwestern China and Phytoremediation Potential [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2020, 29(1): 173-185.
- [12] WANG W H, LUO X G, WANG Z, et al. Heavy metal and metalloid contamination assessments of soil around an abandoned uranium tailings pond and the contaminations' spatial distribution and variability [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(11): 2401-2414.
- [13] LU Z, LIU Z. Pollution characteristics and risk assessment of uranium and heavy metals of agricultural soil around the uranium tailing reservoir in Southern China [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2018, 318(2): 923-933.
- [14] MA W, GAO B, GUO Y, et al. Occurrence and distribution of uranium in a hydrological cycle around a

- uranium mill tailings pond, Southern China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17 (3): 773. DOI: 10.3390/ijerph1703773.
- [15] YAN X, LUO X G. Radionuclides distribution, properties, and microbial diversity of soils in uranium mill tailings from southeastern China [J]. *Journal of environmental radioactivity*, 2015, 139: 85-90.
- [16] OUYANG J F, LIU Z R, ZHANG L, et al. Analysis of influencing factors of heavy metals pollution in farmland-rice system around a uranium tailings dam [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 139: 124-132.
- [17] CHEN L, ZHANG Z H, TANG Z P, et al. Existent forms and ecological risk assessment of uranium and heavy metals in soil at a uranium mining area in northern Guangdong, China [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2023, 332(6): 1805-1814.
- [18] LIANG J, SHI C H, ZENG G M, et al. Spatial variation and assessment of heavy metal and radioactive risk in farmland around a retired uranium mine [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2017, 78 (1): 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/78/1/012005.
- [19] OUYANG J F, LIU Z R, YE T Z, et al. Uranium pollution status and speciation analysis in the farmland-rice system around a uranium tailings mine in Southeastern China [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2019, 322(2): 1011-1022.
- [20] 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. Characterization of typical heavy metal pollution in soil around a uranium mine and plant screening [J]. *China Mining Industry*, 2019, 28(6): 81-88.
- [21] 廉欢, 高柏, 郭亚丹, 等. 某尾矿库区水环境中放射性核素铀的变化特征及影响因素 [J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2017(5): 64-68.
- LIAN H, GAO B, GUO Y D, et al. Characterization of the change of radionuclide uranium in the water environment of a tailings storage area and the influencing factors [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2017(5): 64-68.
- [22] 刘媛媛, 高柏, 周维博, 等. 相山铀尾矿库周边不同水体中铀分布规律及健康风险评估 [J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(2): 576-582.
- LIU Y Y, GAO B, ZHOU W B, et al. Distribution pattern of uranium in different water bodies around the Xiangshan uranium tailings pond and health risk evaluation [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(2): 576-582.
- [23] 向龙, 刘平辉, 张淑梅. 华东某铀矿区地表水中放射性核素铀含量特征分析 [J]. *地球与环境*, 2016, 44(4): 455-461.
- XIANG L, LIU P H, ZHANG S M. Characterization of radionuclide uranium content in surface water of a uranium mining area in East China [J]. *Earth and Environment*, 2016, 44(4): 455-461.
- [24] 陈亮, 夏良树, 刘江, 等. 基于介形类生态特征评价湖南某铀矿山水地表水放射性环境 [J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(8): 1355-1360.
- CHEN L, XIA L S, LIU J, et al. Evaluation of surface water radioactivity environment in a uranium mine in Hunan based on mesocosm ecological characterization [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(8): 1355-1360.
- [25] 华恩祥, 张卫民, 曾云嵘, 等. 某铀矿下游河流水化学特征与铀的分布特征分析 [J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2017(3): 62-66.
- HUA E X, ZHANG W M, ZENG Y R, et al. Characterization of river hydrochemistry and uranium distribution downstream of a uranium mine [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2017(3): 62-66.
- [26] 齐文, 高柏, 陈井影, 等. 某铀尾矿库周边水环境中铀的分布特征及评价 [J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2016(5): 53-56.
- QI W, GAO B, CHEN J Y, et al. Distribution characteristics and evaluation of uranium in the water environment around a uranium tailings pond [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2016(5): 53-56.
- [27] YI L, GAO B, LIU H Y, et al. Characteristics and assessment of toxic metal contamination in surface water and sediments near a uranium mining area [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(2): 548-548.
- [28] HE L, GAO B, LUO X, et al. Health risk assessment of heavy metals in surface water near a uranium tailing pond in Jiangxi province, South China [J]. *Sustainability*, 2018, 10(4): 1-12.
- [29] 唐振平, 门倩, 杨文洁, 等. 华南某铀矿冶地域地表水放射性与重金属污染现状分析 [C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第五卷): 中国核学会 2017 年学术年会论文集第 5 册(核材料分卷、辐射防护分卷). 山东威海, 北京: 中国原子能出版社, 2017: 7.
- TANG Z P, MEN Q, YANG W J, et al. Analysis of the

- current status of surface water radioactive and heavy metal pollution in a uranium mining and metallurgical territory in South China[C]//Chinese Nuclear Society. China Nuclear Science and Technology Progress Report (Volume 5); Proceedings of the 2017 Annual Academic Conference of the Chinese Nuclear Society, Volume 5 (Nuclear Materials Subvolume, Radiation Protection Subvolume). Weihai, Beijing: China Atomic Energy Press, 2017:7.
- [30] WANG N, LUO Y H, LIU Z, et al. Spatial distribution characteristics and evaluation of soil pollution in coal mine areas in Loess Plateau of northern Shaanxi[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1):16440.
- [31] TOWFIQUL M R A I, MEMET V, AHOSAN M H, et al. Risk assessment and source apportionment for metals in sediments of Kaptai Lake in Bangladesh using individual and synergistic indices and a receptor model[J]. Marine Pollution Bulletin, 2023, 190:114845.
- [32] 李卫平, 王非, 杨文焕, 等. 包头市南海湿地土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(11):1977-1984.
- LI W P, WANG F, YANG W H, et al. Evaluation of soil heavy metal pollution and source analysis in Nanhai wetland of Baotou city[J]. Journal of Ecology and Environment, 2017, 26(11):1977-1984.
- [33] 施宸皓, 梁婕, 曾光明, 等. 某废弃铀矿周边农田土壤重金属和放射性元素的风险分析和修复措施[J]. 环境工程学报, 2018, 12(1):213-219.
- SHI C H, LIANG J, ZENG G M, et al. Risk analysis and remediation measures of heavy metals and radioactive elements in farmland soil around an abandoned uranium mine[J]. Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(1):213-219.
- [34] YE H, ZANG S, XIAO H, et al. Speciation and ecological risk of heavy metals and metalloid in the sediments of Zhalong Wetland in China[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12:115-124.

(上接第 73 页)

- [20] 王祥, 吴天娇. 用空白焙烧—酸浸工艺从石煤钒矿中提取钒[J]. 湿法冶金, 2024, 43(3):224-229.
- WANG X, WU T J. Leaching of vanadium from stone coal vanadium ore by blank roasting-acid leaching process[J]. Hydrometallurgy of China, 2024, 43(3):224-229.
- [21] 谷利君, 戴子林, 张世贵, 等. 石灰乳中和法酸浸萃取提钒工艺:CN200810018235.8[P]. 2008-05-16.
- GU L J, DAI Z L, ZHANG S G, et al. Vanadium extraction process of acid leach and extraction by lime slurry neutralization method;CN200810018235.8[P]. 2008-05-16.
- [22] 戴子林. 一种含钒石煤中钒的湿法浸出方法:CN201010109457.8[P]. 2010-02-05.
- DAI Z L. A wet leaching method for vanadium in vanadium-containing stone coal;CN201010109457.8[P]. 2010-02-05.
- [23] 戴子林, 谷利君. 一种含钒石煤中钒的浸出方法:CN20101011171.6[P]. 2010-02-22.
- DAI Z L, GU L J. A method of leaching of vanadium in vanadium-containing stone coal;CN20101011171.6[P]. 2010-02-22.
- [24] 谷利君, 戴子林, 孙会昌, 等. 一种高纯五氧化二钒的制备方法:CN201310125862.2[P]. 2013-04-11.
- GU L J, DAI Z L, SUN H C, et al. A preparation method for high-purity vanadium pentoxide;CN201310125862.2[P]. 2013-04-11.
- [25] 戴子林, 高丽霞, 区菊花, 等. 一种石煤钒矿的湿法提钒工艺:CN201910126621.7[P]. 2019-02-20.
- DAI Z L, GAO L X, OU J H, et al. A process of wet vanadium extraction;CN201910126621.7[P]. 2019-02-20.