

贵州开阳磷矿开采对洋水河放射性核素的影响评价

程 馨, 张成江, 施泽明, 倪师军

(成都理工大学 地学核技术四川省重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要:为探究磷矿资源采选对矿区周围水体天然放射性核素的影响,以贵州开阳磷矿洋水矿区洋水河为研究对象,测试和分析了河水及表层沉积物中铀和钍的质量浓度、质量分数和分布特征,并运用潜在生态危害指数法对沉积物中的铀进行生态风险评价。结果表明:受磷矿资源采选活动影响,洋水河河水中铀的平均质量浓度($0.958\ 44\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$)明显高于中国部分河水中铀的平均质量浓度,钍在河水中的质量浓度极低,接近于0,钍不易富集在河水中而铀易于富集;矿井冷却水中铀的质量浓度为 $2.87\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$,是河水中铀平均质量浓度的2.99倍,表层沉积物中铀平均质量分数为 4.95×10^{-6} ,是中国水系沉积物背景平均值的2.24倍,钍的平均质量分数为 5.43×10^{-6} ,低于中国水系沉积物元素背景平均值,钍和铀在沉积物中均有富集且富集程度相当;沉积物中铀的平均污染指数和潜在生态危害指数分别为1.06和5.30,总体上属于中等污染水平,其潜在生态风险程度为中等。

关键词:放射性核素;影响评价;潜在生态危害指数法;河水;开阳磷矿;贵州

中图分类号:P641.3;X522

文献标志码:A

Impact Assessment of the Exploitation of Kaiyang Phosphate Deposit on the Radionuclide of Yangshui River in Guizhou

CHENG Xin, ZHANG Cheng-jiang, SHI Ze-ming, NI Shi-jun

(Sichuan Province Key Laboratory of Geological Nuclear Technology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: In order to find the effect of phosphorite resource exploitation on the natural radionuclide of water around the mining area, taking Yangshui River of Kaiyang phosphate deposit in Guizhou as the research target, the mass concentrations, mass fractions and distribution characteristics of uranium and thorium from water and surface sediment were measured and analyzed, and the ecological risk of uranium in the sediment was assessed by potential ecological risk index method. The results show that because of phosphorite resource exploitation, average mass concentration of uranium ($0.958\ 44\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$) from water in Yangshui River is obviously higher than that in part rivers of China, and the mass concentration of thorium is extremely low (approximately zero), and the uranium is rich in river water but thorium is not; mass concentration of uranium ($2.87\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$) from cooling water in mine is 2.99 times more than that from river water; mass fraction of uranium (4.95×10^{-6}) is 2.24 times more than the average background value of stream sediment in China, and mass fraction of thorium (5.43×10^{-6}) is lower than the

收稿日期:2013-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41272100)

作者简介:程 馨(1985-),女,甘肃古浪人,理学博士研究生,E-mail:chengxin.cdut@gmail.com。

average background value of stream sediment in China, and uranium and thorium are equivalently rich in the sediment; average pollution index and potential ecological risk index of uranium in the sediment are 1.06 and 5.30, so that the pollution level is medium, and the potential ecological risk is moderate.

Key words: radionuclide; impact assessment; potential ecological risk index method; river water; Kaiyang phosphate deposit; Guizhou

0 引言

磷矿石常与天然放射性核素铀、钍共生或伴生,磷矿石中铀的品位一般为 0.005%~0.030%,沉积型磷块岩要高些^[1],个别超过 0.050%。近年来,随着中国人口的快速增长和科学技术的高速发展,2003~2007 年中国磷矿石产量增长了 82.54%,磷矿资源的开采量逐年攀升,加之磷矿资源开采过程中存在诸多不利于环境的因素,伴生或共生于其中的天然放射性核素随着矿山“三废”进入矿区周围水体,给水体和生态环境带来深远影响^[2]。

放射性核素的毒性具有双重性:放射毒性和化学毒性。近年来,中国曾对非铀矿矿产资源开发利用过程中各环境介质放射性核素的辐射危害进行了大量研究。白丽娜等就白云鄂博稀土采矿和冶炼过程中,矿区局部气象、土壤环境放射性水平及含放射性废水对四道沙河流域及黄河、地下水饮用水源的污染状况进行了研究,认为稀土工业废水未经治理直接进入四道沙河造成流域水体污染的事实不容忽视^[3];侯海燕等就镍(钼)矿开采和冶炼过程中矿区环境介质的辐射水平进行了评价^[4-5];王文武就闽北某钨钼矿开采和冶炼中放射性核素对矿区土壤、水体放射性污染进行了分析^[6];李舟等对贵州某磷矿区氡及放射性水平进行了评价;煤矿开采和利用过程造成环境介质放射性污染的研究也有很多研究成果^[7]。伴生放射性矿产资源开采过程中,放射性核素的污染研究成果可概括为 2 个方面:增加了矿区近地表环境介质 γ 辐射水平,同时也增加了空气氡浓度及其子体 α 潜能水平,进而增加了矿区居民的外照射水平;增加了矿区土壤、水体中天然放射性核素的浓度,进而增加了矿区居民对放射性核素的年摄入量。但是上述研究成果都集中在对天然放射性核素辐射毒性的研究方面,对其化学毒性的研究尚未引起足够重视。铀作为一种持久性污染物,通过各种途径进入水体,大部分都被固定在表层沉积物中,对水生动植物生存及人类健康造成长期潜在危害。因此,弄清楚磷矿资源开采过程中放射性核素

在矿区周围河流水体中的分布及其环境行为的潜在生态风险,对人类健康和水生动植物生存具有重要的意义。

笔者以贵州开阳磷矿洋水矿区洋水河为研究对象,通过分析河水及表层沉积物中天然放射性核素铀、钍的质量浓度,探究磷矿资源开采对矿区周围水体的放射性核素影响程度,同时采用潜在生态危害指数法对表层沉积物中天然放射性核素铀的潜在生态危害进行评价,为环境放射性安全管理提供基础资料。

1 研究区概况

开阳磷矿洋水矿区位于贵州省中部开阳县金钟镇境内,是一个质优量大的特大型矿床,矿石中 P_2O_5 平均含量(质量分数,下同)高达 34.23%,现在每年能开采 500×10^4 t 磷矿石。研究区出露的地层有前震旦系板溪群、震旦系、寒武系、二叠系、三叠系,以震旦系、寒武系分布最广,岩系为沉积岩,其中以白云岩为主,还有含砂质泥岩和白云质页岩,气候属亚热带高原大陆性气候。矿区地势切割强烈,由于背斜构造和断裂构造的影响,开阳磷矿可自然分成 6 个矿段:沙坝土矿段、马路坪矿段、牛赶冲矿段、两岔河矿段、用沙坝矿段和极乐矿段。洋水河是研究区唯一的河流,流量为 $14\,475.02 \sim 1\,425\,591.19 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,河水由南向北流出矿区,并与风岩河交汇,最终汇入乌江,地表水系属乌江水系。由于受到磷矿资源开采活动的影响,洋水河污染严重,污染源主要来源于境内的几座磷矿山及矿粉厂排出的“三废”^[8]。

2 样品采集与分析

2.1 样品采集

沿洋水河流向自上游未受或少受磷矿开采影响的河段开始,结合研究区地质地貌特征和污染源分布特征,用平行法采集水体样品;在采集水样的同时采集该采样点处的表层沉积物样品。用聚乙烯瓶采集离河床有一定距离的流动水和直接排入洋水河的矿井冷却水(湿法磷酸生产过程中产生的矿山废

水),同一采样点采集 2 瓶水样,用精密便携式 ORP 测量仪测量水样的 Ph 值和 Eh 值,采集水样前聚乙烯瓶用采样点处的流动水清洗 3 次。用不锈钢铲采集表层沉积物样品,用白色布样袋盛装,外套聚乙烯塑料袋,采样点位置用 GPS 定位(图 1),所有样品贴好标签运回实验室分析。

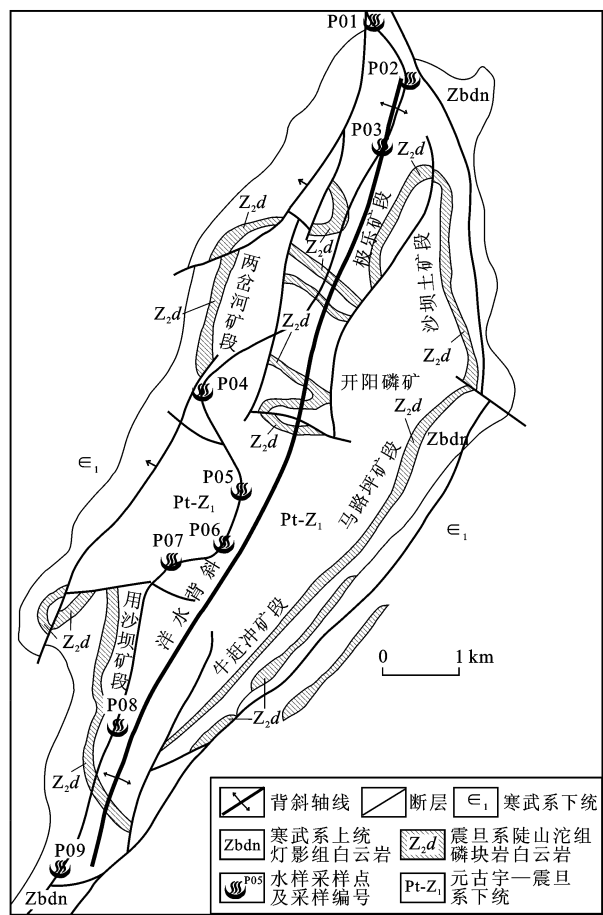


图 1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of Sampling Sites

2.2 样品处理与分析

水样中铀、钍的质量浓度用 ICP-MS 直接测定;表层沉积物样品在室温条件下自然风干,剔除砾石等,用玛瑙研钵研细过 200 目(粒径为 0.071 mm)尼龙筛,装入样品袋,放入干燥器中待测。固体样品中铀、钍的总量主要采用 HNO₃-HF-高压密封消解,用 ICP-MS 测定。为保证试验测量的准确性和可靠性,用空白样校正仪器的零基准,用水系沉积物成分分析标准物质 GBW-07309 全程控制,同时选取 20% 的样品做平行样,平行样之间的误差控制在 ±5% 以内,试验中所需的酸均为微电子级,其他试剂均为优级纯,试验所用水均为超纯水。

2.3 评价方法

采用 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法^[9]

对洋水河表层沉积物中铀的单因子污染指数和潜在生态风险指数进行定量评价。该方法加入了对环境和人类健康有重要影响的毒性系数,主要评价重金属污染程度对生态系统或人类健康的威胁程度。

单个重金属的污染系数 C_f 为

$$C_f = \frac{C_s}{C_n} \tag{1}$$

单个重金属的潜在生态危害系数 E_r 为

$$E_r = T_r C_f \tag{2}$$

式中: C_s 为实测值; C_n 为背景参比值; T_r 为重金属的毒性响应系数。

不同研究对背景参比值的选择各不相同。Hakanson 提出以工业化以前全球沉积物核素的最高背景值为参比值^[9]。为了更好地反映洋水河污染现状,本研究以贵州省 A 层土壤背景值作为参比值^[10],相对定量地反映洋水河污染程度。对于铀的毒性响应系数,目前还没有可以参考的铀毒性响应系数,由于铀的化学行为和生理毒性与其他核素(尤其是铅)类似而受到广泛关注^[11-15],而铅的毒性响应系数为 5,所以本文定义铀的毒性响应系数为 5。潜在生态危害指数法中重金属污染指数和潜在生态危害指数的分级范围与污染物的种类和数量有关,本次研究仅涉及 1 种污染物,与潜在生态危害指数法所研究的 8 种污染物在种类和数量上并不一致,因此,需要对基于污染物种类和数量的潜在生态危害指数法评价指标的分级标准进行调整。单个重金属的污染指数最低级上限值为参评污染物数目(1 种),其余级别上限值依次加倍。 E_r 最低级上限值由 C_f 最低级上限值(1 种)与毒性响应系数相乘得到,其余级别上限值依次加倍^[16-18],据此得到本研究各评价指标的等级划分标准(表 1)。

表 1 评价指标等级划分标准

Tab. 1 Grade Standards for Evaluation Indexes

取值范围	等级划分
$C_f < 1$	污染程度低
$1 \leq C_f < 2$	污染程度中等
$2 \leq C_f < 4$	污染程度较高
$C_f \geq 4$	污染程度高
$E_r < 5$	潜在生态风险程度轻微
$5 \leq E_r < 10$	潜在生态风险程度中等
$10 \leq E_r < 20$	潜在生态风险程度较高
$20 \leq E_r < 40$	潜在生态风险程度高
$E_r \geq 40$	潜在生态风险程度极高

3 结果与讨论

3.1 河水中铀、钍质量浓度分布富集特征

河水样品中铀、钍质量浓度测定结果见表 2。河水中铀的平均质量浓度为 $0.958\ 44\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$, 范围为 $1.763\ 2 \sim 0.691\ 2\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$; 钍在河水中的质量浓度极低, 接近于 0, 这主要是由于钍和铀的物理化学性质差异而造成的。铀的化学性质很活泼, 在自然界中主要以 U^{4+} 和 U^{6+} 形式存在, 在表生条件下铀通常以 U^{6+} 存在并形成 UO_2^{2+} , 其化合物多是易溶的; 而钍只有 Th^{4+} , 在地球表面条件下迁移能力较弱。在磷矿资源开采过程中, 进入近地表环境介质的天然放射性核素铀在长期风化淋溶作用下大部分都迁移进入水体, 而钍则大部分留在原地, 这使得河水中铀的质量浓度远远高于钍; 与河水中铀的质量浓度相比, 矿井冷却水中铀的质量浓度为 $2.87\ \text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$, 是河水中铀平均质量浓度的 2.99 倍, 这说明磷矿资源采选过程中产生的矿山废水是造成洋水河河水放射性核素污染的主要原因。磷矿工业废水未经处理直接排入洋水河造成流域放射性污染的事实不容忽视。

表 2 河水中铀、钍质量浓度

Tab. 2 Mass Concentrations of Uranium and Thorium in the River Water

样品编号 或来源	$\rho(\text{Th})/$ ($\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$)	$\rho(\text{U})/$ ($\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$)	$\rho(\text{Th})/$ $\rho(\text{U})$
P01	—	0.570 6	—
P02	0.001 3	1.317 0	0.002 00
P03	0.000 2	1.763 2	0.000 10
P04	0.003 0	1.214 7	0.002 00
P05	0.001 8	1.122 7	0.002 00
P06	0.000 7	0.692 0	0.010 00
P07	0.000 1	0.538 8	0.000 10
P08	0.003 5	0.719 3	0.005 00
P09	0.001 3	0.691 2	0.001 90
矿井冷却水	0.000 1	2.870 0	0.000 03

注: “—”表示未检出; $\rho(\cdot)$ 为元素质量浓度。

对表 2 进一步分析发现, 河水中铀质量浓度总体上呈现上游高、下游低的趋势, 这可能与沿岸磷矿企业的分布有关。洋水河上游除了开阳磷矿洋水矿区之外, 还密集分布着多家私营磷矿企业。洋水河是沿岸磷矿企业直接的纳污水体, 尤其是选矿废水或矿井冷却水等未经处理就直接排入河水中, 导致铀在水体中富集; 穿过洋水矿区, 河水中铀的质量浓

度逐渐降低, 一方面可能是河水中的铀随水流迁移过程中逐渐转入到底泥中, 使水体中铀的质量浓度降低, 另一方面也可能是下游其他水体对洋水河河水的补给稀释了铀的质量浓度。河水中 $\rho(\text{Th})/\rho(\text{U})$ 值远小于 1, 这说明放射性核素钍不易富集在河水中, 而铀易于在河水中富集, 并且铀会随河水不断迁移, 进而扩大其污染范围。

为了进一步探讨和对比磷矿资源开采对河水中放射性核素的影响程度, 引用中国部分河水中铀的平均质量浓度及世界河水中铀的平均质量浓度(表 3)跟本研究进行对比。

表 3 中国部分河水及世界河水中铀的平均质量浓度

Tab. 3 Average Mass Concentrations of Uranium in Part Rivers of China and the Rivers Around the World

河水来源或标准	铀平均质量浓度/($\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$)	数据来源
洋水河河水	0.89	本文
乌江水	0.66	文献[19]
长江水	0.59	文献[20]
黄浦江水	0.51	文献[21]
西安黑河河水	0.38	文献[22]
珠江水	0.69	文献[23]
中国河水	1.66	文献[23]
世界河水	0.31	文献[24]
中国露天水源铀最大限制	50.00	文献[25]

表 3 表明, 洋水河河水中铀的平均质量浓度高于中国部分河水和世界河水中铀的平均质量浓度, 这说明磷矿资源采选活动已造成放射性核素铀在洋水河的富集, 但其质量浓度远低于中国露天水体中铀最大限制质量浓度。

3.2 表层沉积物中铀、钍含量分布富集特征

从表 4、5 可知, 表层沉积物中钍的含量为 $(8.55 \sim 2.94) \times 10^{-6}$, 平均为 5.43×10^{-6} , 低于中国水系沉积物元素背景平均值 (9.33×10^{-6}) , 铀的含量为 $(6.22 \sim 3.94) \times 10^{-6}$, 平均为 4.95×10^{-6} , 是中国水系沉积物背景平均值 (2.21×10^{-6}) 的 2.24 倍。水系沉积物中放射性核素铀和钍无明显的变化规律, 整体上呈现上游含量低、下游含量逐渐增高的趋势, 这说明放射性核素在随水迁移过程中由于物理、化学和生物作用, 从水体中逐渐转入到沉积物中, 并在沉积物中富集。放射性核素 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值接近于 1, 这说明钍和铀在沉积物中均有富集, 且富集程度相当。通过与中国部分河水沉积物中钍、铀质量浓度的对比分析, 洋水河表层沉积物中铀含量高于石亭江、沱江、长江水系沉积物。沉积物作为水体的纳

表 4 洋水河表层沉积物中铀、钍含量
Tab. 4 Contents of Uranium and Thorium in the
Surface Sediments of Yangshui River

样品编号	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/w(\text{U})$
P01	2.94	4.49	0.65
P02	5.01	4.54	1.10
P03	5.41	4.74	1.21
P04	4.16	4.04	1.03
P05	6.03	5.74	1.05
P06	5.02	5.53	0.91
P07	5.03	4.81	1.05
P08	6.72	6.22	1.08
P09	8.59	4.40	1.95

注: $w(\cdot)$ 为元素含量。

表 5 中国部分河水沉积物中铀、钍平均含量
Tab. 5 Average Contents of Uranium and Thorium
in the Sediment of Part Rivers, China

沉积物来源或推荐值	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	数据来源
洋水河水系	5.43	4.95	本文
绵远河水系	3.20	5.68	文献[26]
石亭江水系	4.60	3.64	文献[26]
沱江水系	7.00	3.30	文献[26]
长江水系	13.00	3.50	文献[27]
中国水系沉积物背景推荐值	9.33	2.21	文献[28]

污受体,在一定程度上反映了流域水环境的污染程度,并可能会使其成为具有潜在危害的二次污染源,对水生动植物生存及人类健康造成长期潜在危害。

3.3 河水-沉积物体系中铀、钍分布特征

在河水-沉积物体系中,放射性核素铀、钍在表层沉积物中的含量远远高于其在上覆水体中的质量浓度,尤其是放射性核素钍在沉积物中的富集程度更为明显,这也使得在表生环境中紧密共生的铀和钍在河水这一界面上发生了铀、钍分离,这主要是铀和钍的物理、化学性质不同所致。河水-沉积物体系中,河水 $\rho(\text{Th})$ 和沉积物 $w(\text{Th})$ 比值($0.000\ 000\ 3\ \text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$)以及河水 $\rho(\text{U})$ 和沉积物 $w(\text{U})$ 比值($0.000\ 19\ \text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$)说明放射性核素铀和钍都易于富集在沉积物中,相对而言铀在河水中的溶解度较钍更大。

3.4 表层沉积物中铀的潜在生态危害评价

根据潜在生态危害指数法对洋水河表层沉积物中放射性核素铀的评价结果见表 6。

表 6 铀的潜在生态危害指数
Tab. 6 Potential Ecological Risk Indexes of Uranium

元素	C_e	C_s	C_f	E_r
铀	4.69	4.95	1.06	5.30

表 6 表明,放射性核素铀在洋水河表层沉积物

中的平均污染指数为 1.06,属于中等污染水平,潜在生态危害指数为 5.30,铀的平均潜在生态风险程度为中等。同时,由于研究区属于放射性核素分布的高背景区(表 7),再加上人类采矿活动导致放射性核素在矿区环境介质中的进一步富集,其潜在生态危害不容忽视。

表 7 中国部分地区土壤环境铀、钍背景值
Tab. 7 Soil Environmental Background Values of
Uranium and Thorium in Part Regions of China

地区	贵州	云南	四川	陕西
铀含量/ 10^{-6}	4.69	1.22	2.87	2.66
钍含量/ 10^{-6}	17.19	15.40	13.84	12.47

注:数据引自文献[10];中国土壤环境中铀、钍的背景值分别为 3.03×10^{-6} 和 13.80×10^{-6} 。

4 结 语

(1)受磷矿资源采选活动的影响,贵州开阳磷矿周围的洋水河河水中天然放射性核素铀的平均质量浓度($0.889\ 6\ \text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$)明显高于中国部分河水 and 世界河水中铀的平均质量浓度,尤其是矿井冷却水未经处理就直接排入洋水河是造成河水放射性核素污染的直接原因。钍在河水中的质量浓度极低,接近于 0,钍不易富集在河水中而铀易于富集。

(2)洋水河水体中天然放射性核素铀和钍的整体分布规律除了受自身物理、化学性质的影响外,还与沿岸磷矿企业分布的密集程度有关。沿岸磷矿企业的密集程度决定着水体中放射性核素质量浓度的高低。

(3)通过与中国部分河水中铀、钍平均含量对比分析,洋水河表层沉积物中铀平均含量高于中国部分河水沉积物中铀的平均含量,是中国水系沉积物背景值的 2.24 倍,有可能使其成为具有潜在危害的二次污染源。就富集程度而言,铀和钍在表层沉积物中均有富集且富集程度相当。

(4)在河水-沉积物体系中,天然放射性核素铀和钍在沉积物中的含量明显高于其在上覆水体中的质量浓度,其在沉积物中的富集程度高于在河水中的富集程度。

(5)潜在生态危害指数法表明,洋水河表层沉积物中天然放射性核素铀的平均污染指数属于中等污染水平,平均潜在生态风险程度为中等。

参 考 文 献 :
References :

[1] KHATER A E M, HIGGY R H, PIMPL M. Radio-

- logical Impacts of Natural Radioactivity in Abu-Tarator Phosphate Deposits, Egypt[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2001, 55(3): 255-267.
- [2] 施泽明,倪师军,张成江,等. 沱江流域磷矿开采和加工过程中放射性环境问题探讨[J]. 地球科学进展, 2012, 27(10): 1134-1139.
- SHI Ze-ming, NI Shi-jun, ZHANG Cheng-jiang, et al. Discussion on Radioactively Environmental Problems During Phosphorite Mining and Processing in Tuojiang Area[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(10): 1134-1139.
- [3] 白丽娜,张利成,王灵秀. 包头稀土生产带来的放射性环境污染及防治措施[J]. 稀土, 2001, 22(1): 76-78.
- BAI Li-na, ZHANG Li-cheng, WANG Ling-xiu. Radioactive Environmental Pollution Caused by Rare Earth Production in Baotou and Its Prevention Measures[J]. Chinese Rare Earths, 2001, 22(1): 76-78.
- [4] 侯海燕,郭喜庄. 汤家坪钼矿区天然放射性核素评价[J]. 湘潭师范学院学报: 自然科学版, 2009, 31(3): 20-24.
- HOU Hai-yan, GUO Xi-zhuang. Evaluation of Natural Radionuclides in Tangjiaping Molybdenum Deposit[J]. Journal of Xiangtan Normal University: Natural Science Edition, 2009, 31(3): 20-24.
- [5] 肖拥军,马光鼎,聂宇翰. 镍(钼)矿开采放射性污染的特点和防治措施[J]. 价值工程, 2010, 29(10): 105-106.
- XIAO Yong-jun, MA Guang-ding, NIE Yu-han. The Characteristics of Radioactive Contamination in Nickel (Molybdenum) Mining and Its Prevention Measures[J]. Value Engineering, 2010, 29(10): 105-106.
- [6] 王文武. 南平钽铌矿环境 γ 辐射监测[J]. 福建分析测试, 2006, 15(1): 34-36.
- WANG Wen-wu. Environmental Gamma Radiation Monitoring to the Nanping Tantalum Niobium Mine[J]. Fujian Analysis and Testing, 2006, 15(1): 34-36.
- [7] 李舟,杨忠,魏涛,等. 贵州省某磷矿区氡气及放射性水平的评价[J]. 中国辐射卫生, 2006, 15(3): 262-263.
- LI Zhou, YANG Zhong, WEI Tao, et al. Evaluation of Radon and Radioactivity Level in Phosphorite Area in Guizhou[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2006, 15(3): 262-263.
- [8] 汤贤勇. 开阳磷矿洋水矿区矿山开采与环境综合治理[J]. 贵州地质, 2001, 18(1): 64-67.
- TANG Xian-yong. Mine Exploitation and Environment Synthetic Treatment at Yangshui Field in Kaiyang Phosphorite of Guizhou[J]. Guizhou Geology, 2001, 18(1): 64-67.
- [9] HAKANSON L. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sedimentological Approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [10] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- State Environmental Protection Agency. Background Values of Soil Elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [11] 李月芳,姚檀栋,田立德,等. 青藏高原天然水体中铀含量的区域分布特征[J]. 地球化学, 2003, 32(5): 445-452.
- LI Yue-fang, YAO Tan-dong, TIAN Li-de, et al. Spatial Variation of Uranium Contents in Natural Waters of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Geochimica, 2003, 32(5): 445-452.
- [12] PAPASTEFANO C. Radiological Impact from Atmospheric Releases of ^{238}U and ^{226}Ra from Phosphate Rock Processing Plants[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2001, 54(1): 75-83.
- [13] HERRANZ M, ABELAIRAS A, LEGARDA F. Uranium Contents in Raw Waters from Biscay (Spain)[J]. Applied Radiation and Isotopes, 1999, 51(2): 203-208.
- [14] 宋昊,施泽明,倪师军,等. 铀在地表水中的主要迁移形式及其沉淀条件的模拟计算: 以四川沱江流域绵远河为例[J]. 环境化学, 2014, 33(1): 100-107.
- SONG Hao, SHI Ze-ming, NI Shi-jun, et al. Simulation Calculation for Migration Modes of Uranium in Surface Water and Its Precipitation Condition: A Case Study of Mianyu River in Tuojiang Valley[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(1): 100-107.
- [15] 李杰,施泽明,倪师军,等. 西南某地粘土对 U 吸附的动态模拟实验研究[J]. 地球与环境, 2012, 40(4): 618-622.
- LI Jie, SHI Ze-ming, NI Shi-jun, et al. Dynamic Simulation Experimental Research on Adsorption of Uranium on Clay Somewhere in Southwest China[J]. Earth and Environment, 2012, 40(4): 618-622.
- [16] 李如忠,潘成荣,徐晶晶,等. 基于 Monte Carlo 模拟的潜在生态危害指数模型及其应用[J]. 环境科学研究, 2012, 25(12): 1336-1343.
- LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, et al. Application of Potential Ecological Risk Assessment Model Based on Monte Carlo Simulation[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(12): 1336-1343.
- [17] 侯千,马建华,王晓云,等. 开封市幼儿园土壤重金属生物活性及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2011, 32

- (6):1764-1771.
HOU Qian, MA Jian-hua, WANG Xiao-yun, et al. Bioavailability and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in Kindergartens, Kaifeng City[J]. Environmental Science, 2011, 32(6):1764-1771.
- [18] FERNANDEZ J A, CARBALLEIRA A. Evaluation of Contamination, by Different Elements, in Terrestrial Mosses[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2001, 40(4):461-468.
- [19] 韩贵琳, 刘丛强, 王中良, 等. 贵州喀斯特地区乌江河水中铀的地球化学研究[J]. 地质地球化学, 1999, 27(4):66-71.
HAN Gui-lin, LIU Cong-qiang, WANG Zhong-liang, et al. Hydrogeochemical Characteristics of U in the Karst River, Guizhou, China[J]. Geology-geochemistry, 1999, 27(4):66-71.
- [20] 吴锦海, 汪铭侠, 王 力, 等. 1986~1997年上海天然水源中铀含量监测分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 1999, 19(5):361-362.
WU Jin-hai, WANG Ming-xia, WANG Li, et al. Monitoring Analysis of Uranium Content in Natural Water from 1986 to 1997 in Shanghai[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 1999, 19(5):361-362.
- [21] 吴锦海, 王 力, 王凤仙. 天然水源中微量铀钍含量与摄入量研究[J]. 广东微量元素科学, 1997, 4(11):56-57.
WU Jin-hai, WANG Li, WANG Feng-xian. Study on the Content of Uranium and Thorium in Natural Water[J]. Guangdong Trace Elements Science, 1997, 4(11):56-57.
- [22] 周春林, 尚爱国, 李天柁, 等. 西安市生活水源水体中天然铀含量调查[J]. 辐射防护通讯, 2001, 21(2):28-30.
ZHOU Chun-lin, SHANG Ai-guo, LI Tian-tuo, et al. Investigation on Natural Uranium Concentrations in the Drinking Water Sources in Xi'an City[J]. Radiation Protection Bulletin, 2001, 21(2):28-30.
- [23] 全国环境天然放射性水平调查总结报告编写小组. 全国水体中天然放射性核素浓度调查(1983~1990年)[J]. 辐射防护, 1992, 12(2):143-163.
The Writing Group of the Summary Report on Nationwide Survey of Environmental Radioactivity Level in China. Survey of Natural Radioactivity Level of the Waters in China (1983-1990)[J]. Radiation Protection, 1992, 12(2):143-163.
- [24] PALMER M R, EDMOND J M. Uranium in River Water[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57(20):4947-4955.
- [25] 胡晓峰, 卢 龙. 华南某铀矿山周围水环境的水质调查研究[J]. 江西化工, 2008(3):170-172.
HU Xiao-feng, LU Long. Research of Water Environment Around a Uranium-mine in South China[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2008(3):170-172.
- [26] 王 磊, 唐文春, 秦 兵, 等. 四川龙门山地区磷矿、煤矿开采对水系沉积物Cd等元素影响调查[J]. 地质科技情报, 2007, 26(6):36-41.
WANG Lei, TANG Wen-chun, QIN Bing, et al. The Survey of Cd and Other Elements in River Sediments Affected by Phosphorite Deposit and Coal Mine in the Area of Longmenshan Mountain, Sichuan Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(6):36-41.
- [27] 张立城, 余中盛, 章 申, 等. 水环境化学元素研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
ZHANG Li-cheng, YU Zhong-sheng, ZHANG Shen, et al. Study on Chemical Elements of Water Environment[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996.
- [28] 林才浩, 尤爱珍. 福建省水系沉积物元素含量本底值[J]. 福建环境, 1995, 12(3):22-23.
LIN Cai-hao, YOU Ai-zhen. Background Values of Elements from Stream Sediment in Fujian Province[J]. Fujian Environment, 1995, 12(3):22-23.

《地球科学与环境学报》2015年变更为双月刊的通告

《地球科学与环境学报》从2015年起变更为双月刊, 欢迎广大作者踊跃投稿!

《地球科学与环境学报》作为教育部主管、长安大学主办的地球科学与环境领域的权威性学术刊物, 长期以来一直受到广大地球科学与环境领域科研工作者的关爱, 学术质量不断提高, 影响力不断扩大, 投稿量不断增加。为了进一步缩短论文发表时滞, 使地球科学与环境领域的学术成果更多、更快地发表, 打造更权威的地球科学与环境领域学术交流平台, 编辑部继2013年、2014年连续两年增加页码之后决定再次扩容, 从2015年起由原来的季刊变更为双月刊。