

白云鄂博稀土矿开发利用的辐射环境影响研究

李 洋^{1,2}, 陈海龙¹, 刘 腾¹

(1. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006;
2. 清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘 要:以包钢白云鄂博矿区为研究对象,对稀土矿开采的气态流出物排放造成的辐射环境影响进行了调查与评价。评价结果表明,虽然矿山生产所致的辐射影响低于我国矿产资源开发利用的公众个人有效剂量限值 1 mSv/a,但是已对当地局部辐射环境质量造成了影响,导致当地居民所受剂量明显升高。为了改善当地的辐射环境质量,提出了应选取适宜的覆盖材料对废渣场、排土场尽快进行覆盖治理,新的废渣场及排土场的选址应尽量远离白云鄂博矿区城区,进一步减少开采及运输过程中的粉尘排放等建议。

关键词:白云鄂博;辐射环境影响;稀土

中图分类号:X821 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-0277(2020)04-0041-05

稀土的用途十分广泛,是很多高科技装备生产必不可少的原料,也被称为“工业黄金”和“维生素”。在为国家经济发展作出突出贡献的同时,稀土矿开发利用过程中的放射性污染问题也引起了广泛的关注。以包钢白云鄂博矿区为典型,对我国稀土矿开采的气态流出物排放造成的辐射环境影响进行调查与评价,可以发现稀土开发利用的辐射环境问题,具有现实意义。同时,也可为其它共生放射性矿产资源的开发和保护提供借鉴。2017~2018年由原环境保护部组织,以中国辐射防护研究院为主要承担单位对包钢白云鄂博矿开采的辐射环境影响进行了调查与评价。

1 矿山概况

白云鄂博稀土矿(以下简称白云矿)是特大型

铁、稀土、铈等多元素的共生矿。矿床自西向东分为西矿、主矿、东矿、东介勒格勒和东部接触带五个主要矿体。白云矿中的放射性元素铀、钍的含量与包头地区土壤中本底水平相当,可不予单独考虑。白云矿伴生放射性元素是钍,其中主矿和东矿的钍含量(ThO_2)平均为 0.04%,西矿平均为 0.02%,是典型的放射性伴生矿^[1-4]。白云矿位于阴山之北的乌兰察布草原西北部,属内蒙古自治区包头市所辖。地理坐标为东经 109°47'~110°04',北纬 41°39'~41°53',南距包头市城区 149 km。距离白云矿最近的人口聚居区是白云鄂博矿区城区,位于主、东矿采坑以南,最近距离约 1.5 km。白云鄂博矿区城区下辖两个街道(矿山路街道和通阳道街

收稿日期:2019-05-04

基金项目:原环境保护部核与辐射安全监督专项核设施、核基地放射性污染防治项目(调查 1705)

作者简介:李 洋(1977-),男,河南永城人,博士研究生,研究员,主要从事核与辐射设施环境影响评价方面研究工作, E-mail: 13934146321@163.com

DOI:10.16533/J.CNKI.15-1099/TF.202004005

道),共 4 个社区。根据 2016 年的人口调查结果,城区常住人口约为 19962 人。

建国以来,白云矿一直以露天开采方式开采主矿和东矿。2010 年底包钢完成了西矿的采矿、选矿和输送一系列工程的建设并达产。根据规划包钢逐渐将包头选矿环节分期搬迁至白云矿区。目前已将选矿厂 600 万吨氧化矿选矿生产线和稀土选矿生产线搬迁至白云鄂博,并增加了铌精矿和萤石精矿的回收,以提高资产利用率和经济效益^[5,6]。同时在白云矿区新建了配套的选矿废渣堆场。

目前白云矿的生产包括矿山开采以及选矿环

节。其中,主、东矿铁矿石生产规模分别为 700 万吨/年和 500 万吨/年;西矿铁矿石生产规模为 1500 万吨/年,其中东采场 600 万吨/年,西采场 900 万吨/年。白云矿采矿工艺主要包括以下几个工段:穿孔、爆破、采装、转载、破碎作业与胶带运输、排岩等,选矿工艺包括破碎、磨选等工段^[7~9]。

2 白云矿污染源和释放途径分析

白云鄂博铁矿的伴生放射性元素主要是钍。根据地质普查,白云鄂博不同地段的矿石中钍、铀的含量见表 1^[10,11]。

表 1 不同地段中白云鄂博矿石中钍、铀的含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Table 1 Concentrations of thorium and uranium in different sections in Bayan Obo ore/($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Type	Element		Eastern contact zone	East ore	Main ore	West ore	Surface zone	Deep zone
Niobium rare earth ore	Thorium	Range	3~67	23~128	2~896	1~373	1~100	50~300
		Mean	22	54	124	112	969	274.8
	Uranium	Range	1~3	0.5~2.1	0.5~2	2~4	1~3	0.5~2
		Mean	2.5	1.1	1.6	3.1	2.9	1.1
Niobium rare earth iron ore	Thorium	Range	-	100~300	100~700	100~300	50~500	100~1040
		Mean	-	261	4.26	291	309	678
	Uranium	Range	-	1~3	0.5~2.5	2~5	1~3	1~2
		Mean	-	2.3	2.7	3.2	2.3	1.8

由白云矿采、选矿工艺分析可知,白云矿放射性释放途径主要有:矿石和废石中钍射气及其子体通过扩散进入周围大气环境。矿石破碎过程中产生的粉尘通过烟囱排入环境。因此可将白云矿的放射性污染源分为面源和点源两大类,面源包括:主矿、东矿和西矿,各排土、渣场;点源包括破碎车间各烟囱。各污染源污染释放途径汇总于表 2。

表 2 各污染源污染释放途径分析

Table 2 Analysis of release pathways of pollution sources

Pollution source	Released pollutants	Recipient carrier
Main, east and west ore	Thoron and its daughters	Atmosphere
Crushing workshop	Radioactive dust	Atmosphere
Dumping site, slag yard	Thoron and its daughters	Atmosphere

3 辐射环境现状评价

采用原环境保护部全国核基地与核设施辐射环境现状调查与评价项目建立的辐射环境现状评价方法进行白云矿辐射环境现状评价,该评价方法通过原环境保护部组织的审查,并以环核辐函[2015]1号文发布实施^[12]。

3.1 基于流出物监测的评价

根据当地人口分布调查结果以及已有辐射环境评价资料^[11,13~15]可以确定,白云鄂博矿区城区是白云矿基于流出物监测的评价需考虑的敏感目标,需考虑的照射情景为城市居民照射景象,需考虑的照射途径包括吸入氡(Rn)、钍(Tn)子体和粉尘所致内照射、地面沉积外照射和空气浸没外照射。参考 2009 年原

环境保护部组织完成的《包头及白云鄂博辐射环境现状分析和治理对策》中的估算结果,评价需考虑点源释放的²³²Th、²³⁸U、²²⁶Ra 所致的辐射影响,以及面源释放的 Rn、Tn 子体所致的辐射影响。

根据白云矿 2017 年实际生产状况,估算得到了选矿环节放射性核素年释放量,见表 3。面源释放采用实测的 Rn、Tn 子体监测结果进行源项估算,Rn、Tn 子体监测结果见表 4。

表 3 白云鄂博选矿环节放射性核素年释放量/(Bq/a)

Table 3 Annual release of radionuclides of the concentration of Bayan Obo Mine/(Bq/a)

Source	²³⁸ U	²³² Th	²²⁶ Ra
Main and east ore	1.09×10 ⁶	1.16×10 ⁸	1.04×10 ⁶
West ore	1.81×10 ⁶	1.93×10 ⁸	1.73×10 ⁶
Total	2.90×10 ⁶	3.09×10 ⁸	2.77×10 ⁶

表 4 白云矿 Rn、Tn 子体监测结果/(Bq/m³)

Table 4 Monitoring results of Rn and Tn progenies of Bayan Obo Mine/(Bq/m³)

Relative azimuth	Equilibrium-equivalent	Equilibrium-equivalent
	Rn concentration	Tn concentration
Dumping site	2.08~2.46	0.09~0.16
Slope	1.21~6.88	0.16~0.46

采用 AERMOD 大气扩散模式对白云矿气载流出物释放后的迁移进行了模拟。通过剂量估算可知,白云矿 2017 年生产运行影响最大的是白云鄂博矿区城区矿山路街道百灵社区生活的成年居民,其所受的公众个人有效剂量为 8.89×10⁻² mSv/a,主要照射途径是吸入内照射,主要由矿坑及废渣场、排土场等释放的氡、钍子体所致。白云矿 2017 年生产运行所致 80 km 评价范围的集体剂量为 8.67 希·年。

3.2 基于环境监测的评价

与基于流出物监测的评价相比,采用环境监测数据进行评价可以更直观的对设施放射性释放所致的环境影响进行评价。对于伴生矿所含的天然放射性核素,在评价时需要先将当地天然放射性核素本底水平从环境监测结果中扣除再进行评价。

根据本次基于流出物监测的辐射环境影响评价结果以及已有辐射环境评价资料,可以确定白云鄂博矿区城区是白云矿基于环境监测的评价需考虑的敏感目标,需考虑的照射途径包括吸入 Tn 子体和粉尘所致内照射和外照射。空气中 Tn 子体监测结果见表 5。经分析可知,Tn 子体测值范围为 2.43 nJ/m³~33.32 nJ/m³,Tn 子体监测结果与包头市区差别不大,即白云矿生产未造成白云鄂博矿区城区 Tn 子体浓度的升高,因此吸入 Tn 子体和粉尘所致内照射可不予考虑。这里仅需考虑外照射所致影响即可。白云城区的地表 γ 辐射剂量率见表 6。

表 5 白云矿 Tn 子体监测结果/(nJ/m³)

Table 5 Monitoring results of Tn progeny of Bayan Obo Mine/(nJ/m³)

Site	Range of monitoring values	Daily mean value	Maximum primary value	Maximum daily mean value
	Surface of iron concentrate pile	5.88~12.34	7.82	33.32
Medial position between tailings dam and pile	11.41~20.67	15.14	33.32	15.14
	2.43~33.32	14.33		
Southern margin of tailings dump	6.57~6.86	6.74		
	7.88~8.84	8.25	8.84	8.25
50 m south of tailings dump	6.47~7.80	7.18		
	3.46~13.78	8.60	15.59	8.87
urban area of Baotou	2.45~6.70	4.90	10.84	8.10
	4.33~9.58	6.24		

由表 6 可知,白云矿矿产资源开发基于环境监测进行评价所致剂量为 0.02 mSv/a~0.58 mSv/a,最大所致剂量为 0.58 mSv/a。

综上可知,白云矿开采气态流出物排放造成的辐射环境影响最大为 0.58 mSv/a,低于我国矿产资源开发利用的公众个人有效剂量限值 1 mSv/a,但是已对当地局部辐射环境质量造成了影响,导致当地居民所受剂量明显升高,应予以关注。

表 6 白云鄂博城区地表 γ 辐射剂量率所致剂量估算结果

Table 6 Doses caused by surface gamma radiation dose rate in Bayan Obo urban area

Site	Gamma dose rate results/(nGy/h)	Results after deducting the natural background/(nGy/h)	Effective dose /(mSv/a)
1 150 m south of S104 and S210 cross turntable	151	66	0.58
2 Environmental protection management station	108	23	0.20
3 Sewage treatment plant	87	2	0.02

4 结论与建议

通过本次评价可知,白云矿的大规模开发利用已经导致了矿区厂区及其周边环境天然放射性水平的升高,白云矿周边公众所受剂量主要由矿坑及废渣场、排土场所释放的氡、钍射气所致。白云矿生产所致剂量虽仍低于矿产资源开发利用的公众个人有效剂量限值 1 mSv/a,但是已造成周边居民所受剂量的显著升高。

因此,为了改善当地的辐射环境质量,应选取适宜的覆盖材料对废渣场、排土场尽快进行覆盖治理以降低氡、钍射气的释出;新的废渣场及排土场的选址应尽量远离环境敏感目标——白云鄂博矿区城区。同时,应进一步加强矿区开采及运输的管理,降低生产活动粉尘的排放。对白云矿城区周边的已有污染区域应尽快进行详查并治理。

参考文献:

[1] 吴其反,刘华,马成辉,赵顺平,朱新华,熊盛青,王红艳. 白云鄂博伴生矿产资源开发利用对区域环境放射性污染影响的调查[J]. 辐射防护,2011,31(6):364-370.
Wu Q F, Liu H, Ma C H, Zhao S P, Zhu X H, Xiong S Q, Wang H Y. Investigation of radiological environment impact from exploitation of Bayan Obo Mine[J]. Radiation Protection, 2011, 31(6):364-370.

[2] 于长江,徐月和. 包头混合稀土矿开发利用过程中 Th 元素走向与分布研究[J]. 中国有色冶金,2016,(3):39-42.
Yu C J, Xu Y H. Study on Th trend and distribution in the development of Baotou rare earth mine[J]. China

Nonferrous Metallurgy, 2016, (3): 39-42.

[3] 张铁柱,王建英,李保卫,刘明宝,张雪峰. 白云鄂博稀土、铈、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, Liu M B, Zhang X F. Distribution and association of REE, Nb and Th in Bayan Obo Ore[J]. Chinese Rare Earths, 2015,36(5):87-91.

[4] 杨占峰,李强,王振江,王其伟. 白云鄂博矿床萤石型铁矿石中稀土分布规律研究[J]. 中国稀土学报,2017,35(4):520-527.
Yang Z F, Li Q, Wang Z J, Wang Q W. Distribution regularity of rare earth in fluorite type iron ore in Bayan Obo[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2017, 35(4):520-527.

[5] 李春龙,李小钢,徐广尧. 白云鄂博共伴生矿产资源综合利用技术开发与产业化[J]. 稀土,2015,36(5):151-158.
Li C L, Li X G, Xu G R. Technology development and industrialization of resources comprehensive utilization of intergrowth and associated ore in Baiyun Obo[J]. Chinese Rare Earths, 2015,36(5):151-158.

[6] 郭财胜,李梅,柳召刚,张栋梁,高凯. 白云鄂博稀土、铈资源综合利用现状及新思路[J]. 稀土,2014,35(1):96-100.
Guo C S, Li M, Liu Z G, Zhang D L, Gao K. Present status and new ideas on utilization of Bayan Obo rare earth and niobium resource[J]. Chinese Rare Earths, 2014,35(1):96-100.

[7] 崔凤,张羽,李银霞. 白云鄂博矿山资源开采及展望[J]. 包钢科技,2015,41(4):1-4.
Cui F, Zhang Y, Li Y X. Exploitation and prospects for mining resources of Bayan Obo iron mine[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2015,41(4):1-4.

- [8] 马莹,李娜,王其伟,杨启山. 白云鄂博矿稀土资源的特点及研究开发现状[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(6):641-649.
Ma Y, Li N, Wang Q W, Yang Q S. Characteristics and current research situation of rare earth resources in Bayan Obo Ore [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2016, 34(6):641-649.
- [9] 宿丽娟. 白云鄂博西矿 1000 万 t/a 选矿厂设计及生产调试[J]. 中国矿山工程, 2011, 40(2):26-28.
Su L J. Design and production adjustment of 10000 kt/a concentrator in Baiyunebo western mine[J]. China Mine Engineering, 2011, 40(2):26-28.
- [10] 王济中. 白云鄂博综合利用天然放射性致职工辐射剂量三十年评价(1960-1990)[J]. 包钢科技, 1994, 20(3):48-52.
Wang J Z. Thirty years evaluation of radiation dose to workers caused by comprehensive utilization of natural radiation in Bayan Obo mine[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 1994, 20(3):48-52.
- [11] 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.
- [12] 李洋,杨洁,赵杨军,张宇,顾志杰. 全国核基地辐射环境现状评价方法[J]. 中国科技成果, 2017, (7):31-34.
Li Y, Yang J, Zhao Y J, Zhang Y, Gu Z J. Radiation environmental quality assessment method of nuclear base in China[J]. China Science and Technology Achievements, 2017, (7):31-34.
- [13] 陈耕. 主、东矿回顾性环境影响评价[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2012.
Chen G. Retrospective Environmental Impact Assessment of Bayan Obo Main and East Mine[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2012.
- [14] 李学业. 包钢白云鄂博铁矿(西矿)采矿工程放射性环境影响的监测分析[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2015.
Li X Y. Baogang Baiyunebo Iron Ore (West Mine) Mining Engineering Radioactivity Monitoring and Analysis of Environmental Impacts[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2015.
- [15] 张保生,吕婉婷. 包头市天然放射性环境调查与评价[J]. 辐射防护, 2017, 37(1):67-71.
Zhang B S, Lü W T. Environmental survey and evaluation of natural radioactivity in Baotou City[J]. Radiation Protection, 2017, 37(1):67-71.

Study on Radiation Environmental Impact of Exploitation and Utilization of Bayan Obo Rare Earth Ore

LI Yang^{1,2}, CHEN Hai-long¹, LIU Teng¹

(1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China;

2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Taking Bayan Obo mining area of Baotou Iron and Steel Company as a typical case, the radiation environmental impact caused by the gas effluent emission from rare earth mining was investigated and evaluated. The evaluation results show that it has caused significant impact on the surrounding residents, although still lower than the limit of personal effective dose (1 mSv/a). As to improving the local radiation environmental quality, some measures should be taken as follows. Suitable covering materials should be selected to cover the waste slag yards and dumps as soon as possible. The locations of the new waste slag yards and dump yards should be kept as far away from the urban area of Bayan Obo mining area as possible. The dust emission during mining and transportation should be further reduced.

Key words: Bayan Obo; radiation environmental impact; rare earth