

高原,熊亮,张宇,等.重庆南川区大佛岩铝土矿床有益元素分布特征及可利用性评价.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(4):1199-1223.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230103.

Gao Yuan, Xiong Liang, Zhang Yu, et al. Distribution Characteristics and Availability Evaluation of Beneficial Elements in Dafoyan Bauxite Deposit, Nanchuan District, Chongqing. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(4): 1199-1223. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230103.

重庆南川区大佛岩铝土矿床有益元素分布特征 及可利用性评价

高原^{1,2},熊亮²,张宇²,李良林²,黄培培²,徐厚倜³,栾进华¹

1.重庆地质矿产研究院(重大地质事件资源环境效应重庆市重点实验室),重庆 401120

2.重庆华地资环科技有限公司,重庆 401120

3.浙江省第十一地质大队,浙江 温州 325006

摘要:为了理清重庆市南川区大佛岩铝土矿床有益组分分布特征及伴生元素可利用性,本文通过剖面测量、实地调查和样品分析等工作方法,对南川区大佛岩铝土矿床及其伴生元素的分布特征进行了深入研究,并建立了矿产资源可利用性评价模型。Ga质量分数高值区呈北东向和近南北向分布,中西部Ga质量分数高,北东部Ga质量分数较低。Li质量分数在梁山组中上部最高,最高为致密状铝土矿,其次为铝土岩,土状铝土矿中较低。Li的富集与铝土岩的关系较为密切。稀土元素的富集部位更容易出现于赋矿地层底部。评价模型对矿区铝土矿资源的评价结果为可利用。在开发利用铝土矿资源的过程中,可以考虑回收利用Ga元素。但是,由于Li、Sc、REE元素受到选冶技术和选矿成本等因素的限制,现阶段回收利用技术上虽然可行,但经济性存在瓶颈。因此,在开发利用铝土矿资源的同时,还需要探索更经济的回收利用技术,以提高资源的利用率。本文所建立的评价模型结合了评价指标体系,可为铝土矿资源的利用和评价提供科学参考,同时也为其他矿产资源的评价提供借鉴。当然,对于评价指标的选择和权重的确定需要根据不同的矿产资源和应用场景进行调整、优化,才能更好地满足实际需求。

关键词:铝土矿;有益元素;伴生元素;评价模型;可利用性;大佛岩铝土矿床

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230103

中图分类号:P595;P618.42

文献标志码:A

Distribution Characteristics and Availability Evaluation of Beneficial Elements in Dafoyan Bauxite Deposit, Nanchuan District, Chongqing

Gao Yuan^{1,2}, Xiong Liang², Zhang Yu², Li Lianglin², Huang Peipei², Xu Houti³, Luan Jinhua¹

收稿日期:2023-04-19

作者简介:高原(1984—),男,硕士研究生,正高级工程师,主要从事矿床学与资源开发方面的研究,E-mail:49775907@qq.com

通信作者:栾进华(1982—),男,硕士研究生,正高级工程师,主要从事矿产资源开发方面的研究,E-mail:124407681@qq.com

基金项目:重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX1375)

Supported by the Chongqing Natural Science Foundation General Project (CSTB2022NSCQ-MSX1375)

1. *Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources (Chongqing Key Laboratory of Major Geological Events and Effects of Resources and the Environment)*, Chongqing 401120, China
2. *Chongqing Huadi Resources and Environment Technology Co., Ltd.*, Chongqing 401120, China
3. *The 11th Geological Brigade of Zhejiang Province*, Wenzhou 325006, Zhejiang, China

Abstract: A detailed investigation of the Dafoyan bauxite deposit in Nanchuan District, Chongqing, was conducted to assess the distribution of beneficial components and associated elements. The study established a mineral resource availability evaluation model based on field investigations and sample analyses. High Ga quality scores are distributed in a northeast and nearly north-south direction, with higher Ga in the central and western regions and lower Ga in the northeast and eastern regions. The Li mass fraction is highest in the upper part of the Liangshan Formation, dense bauxite having the highest, followed by bauxite rock, and lower in soil bauxite. The enrichment of Li is closely related to bauxite. The enrichment sites of rare earth elements are more likely to occur at the bottom of the ore bearing strata. The evaluation model shows that bauxite resources in the mining area are exploitable. In developing and utilizing bauxite resources, the recovery and utilization of Ga elements can be considered. However, limitations in Li, Sc, and REE elements caused by factors such as beneficiation technology and beneficiation costs pose economic bottlenecks, despite the feasibility of current recycling technology. Therefore, alongside developing and utilizing bauxite resources, exploring more cost-effective recycling and utilization technologies is crucial to improve resource utilization efficiency. This evaluation model, with an index system, can provide scientific guidance for bauxite resource utilization and evaluation, as well as for the evaluation of other mineral resources. Adjusting and optimizing evaluation indicators and weights according to specific mineral resources and scenarios is necessary to better serve practical needs.

Key words: bauxite; beneficial element; associated element; evaluation model; availability; Dafoyan bauxite deposit

0 引言

铁矿、铝土矿、铜矿、铅锌矿、钾盐等大宗矿产资源对世界和中国经济发展具有举足轻重的作用^[1]。铝是全球第二大使用广泛的金属,主要由铝土矿生产^[2]。我国铝土矿资源总量约 54 亿 t,主要矿产地位于重庆、山西、河南、贵州、广西等。重庆铝土矿主要发育在南川、黔江、武隆、丰都等地,均属古风化壳沉积型,当前发现 51 个铝土矿床或矿点,达到地质详查程度及以上的矿区有 15 个,其中 2 个为大型矿床,中小型矿床 21 个,其余部分均为小型以下,资源总量约 1.56 亿 t。南川区大佛岩铝土矿区地处黔中北—渝南铝土矿成矿带北段的重庆市境内,与贵州省交界。自发现大佛岩铝土矿床起,地勘单位经过多年工作,现已查明大佛岩铝土矿床已达大型规模。自二十一世纪以来多名学者对大佛岩铝土矿床进行了多方面研究,如锆石 U-Pb 定年^[3]、锆石赋存形式^[4]、碳氧同位素^[5]、矿床成因^[6]、沉积相^[7]和岩相古地理^[8]等,但是有关大佛岩铝土矿床中主要有益

组分分布特征及伴生元素的可利用性等方面的研究程度较低。总体上看,以前学者对铝土矿床中主量元素和伴生有益组分可利用性研究工作较零散,工作深度不够,综合利用方面往往只注重对矿石加工技术性能的分析,对矿产资源相关的政策、当地经济、社会、环境^[9]、选冶技术成本、矿山建设的经济性等制约因素的影响综合分析不足。

本次工作方法以剖面测量、实地调查为主,辅以采样及样品统计分析,在分析南川大佛岩铝土矿床的主量元素及部分伴生元素、稀土元素分布特征的基础上,系统调查 46 个可利用性评价指标,通过构建评价指标体系和矿产资源可利用性评价模型,对大佛岩矿床铝土矿的可利用性进行系统分析研究,为后续新建矿山提供可利用性评价理论依据。

1 地质概况

黔中—渝南铝土矿成矿带位于扬子陆块区川中前陆盆地(Mz)、扬子陆块南部碳酸盐台地(Pz)与上扬子东南缘被动边缘盆地(Pz₁)交汇处^[10-11],大地构

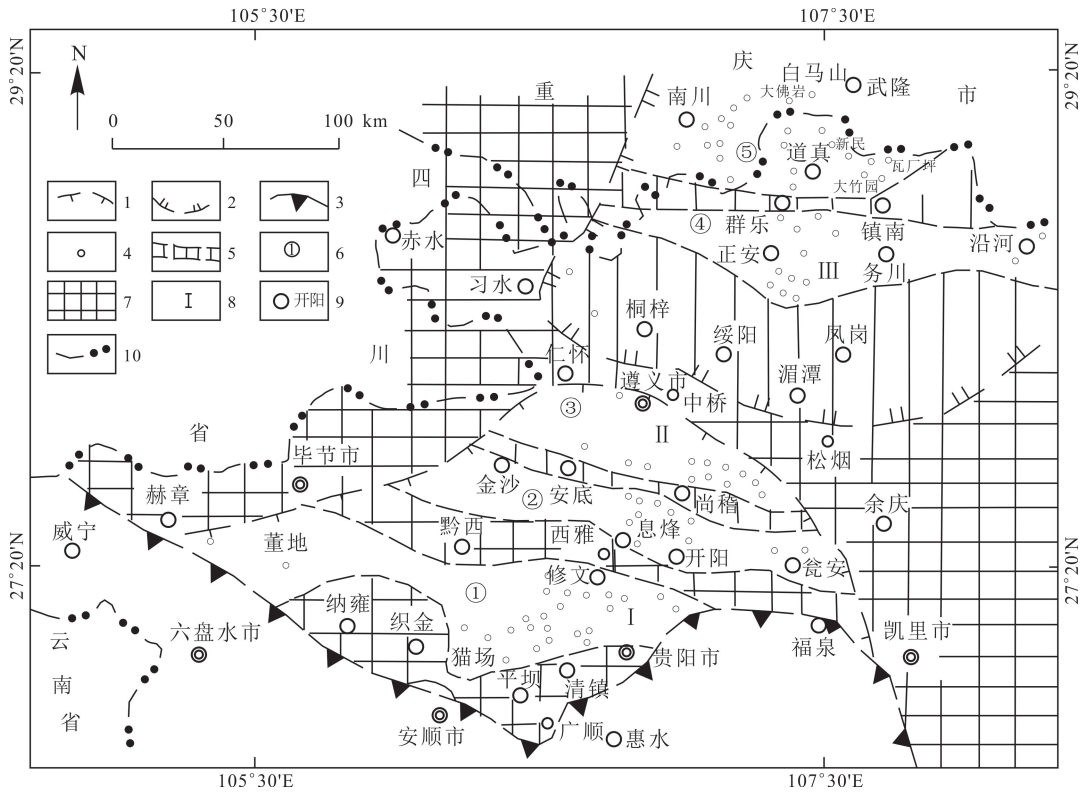
造位置属于扬子陆块的东南缘。成矿带内分布贵州清镇—修文、息烽—遵义和绥阳—正安—武隆3个沉积区^[12],典型矿床包括重庆南川区大佛岩、武隆区申基坪以及贵州务川瓦厂坪、大竹园、道真新民大型铝土矿床等^[13]。大佛岩铝土矿床位于黔中—渝南铝土矿成矿带之道真铝土矿带内(图1),赋矿地层为梁山组。研究区处于长坝向斜西南扬起端,区内构造走向均呈北北东向,与区域总的构造线方向一致^[14]。矿区从新到老发育地层分别为嘉陵江组(T_1j)、飞仙关组(T_1f)、龙潭组(P_3l)、栖霞组(P_2q)、梁山组(P_2l)、韩家店组(S_2h)和小河坝组(S_1x)。

大佛岩矿区可划为3个矿段,分别为大佛岩矿段、川洞湾矿段、吴家湾矿段(图2),其中大佛岩矿段已查明2条铝土矿体(I号和II号),川洞湾矿段和吴家湾矿段均各查明1条铝土矿体(III号和IV号)。I号矿体规模最大,资源量占总资源量的约79%。I号矿体展布于长坝向斜南东扬起端及南东翼,长轴呈北西—南东展布,长2 890~5 060 m,短

轴呈北东展布,宽2 410~2 740 m^[10]。铝土矿体沿沉积地层层位分布,平面上没有一定规则。梁山组为赋矿地层,铝土矿体主要赋存于梁山组中部、上部,通常情况距栖霞组底界0.40~1.60 m,距韩家店组顶界2.20~5.20 m^[11]。

2 样品与分析

样品采自大佛岩铝土矿床I号、III号和IV号矿体钻孔,基本化学分析样品共计52件,其中I号矿体采集钻孔7个、III号矿体采集钻孔3个、IV号矿体采集钻孔2个(图2)。52件样品中除灰岩、粉砂质页岩10件样品外,其余42件样品均采自梁山组赋矿地层。样品在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室检测。主量元素使用测试仪器是AXIOS荧光光谱仪进行X射线荧光光谱分析,以GBW07105、NCSDC009、SA RM-4、SARM-5、GBW07104和GBW07108为参考物质,误差优于±5%。微量元素使用仪器是加拿大



1. 九架炉组分布区(推测边界);2. 大竹园组分布区(推测边界);3. 石炭纪海相地层分布区(推测边界);4. 铝土矿床、点;5. 基本无矿带;6. 铝土矿带编号:①修文铝土矿带,②息烽铝土矿带,③遵义铝土矿带,④正安铝土矿带,⑤道真铝土矿带;7. 侵蚀、溶蚀、剥蚀区;8. 含矿岩系沉积区编号:Ⅰ. 清镇—修文沉积区,Ⅱ. 息烽—遵义沉积区,Ⅲ. 绥阳—正安—武隆沉积区;9. 地名;10. 省界。

图1 黔中—渝南铝土矿含矿岩系沉积区分布图^[12]

Fig.1 Distribution of bauxite-bearing rock series sedimentary areas in central Guizhou - south Chongqing region^[12]

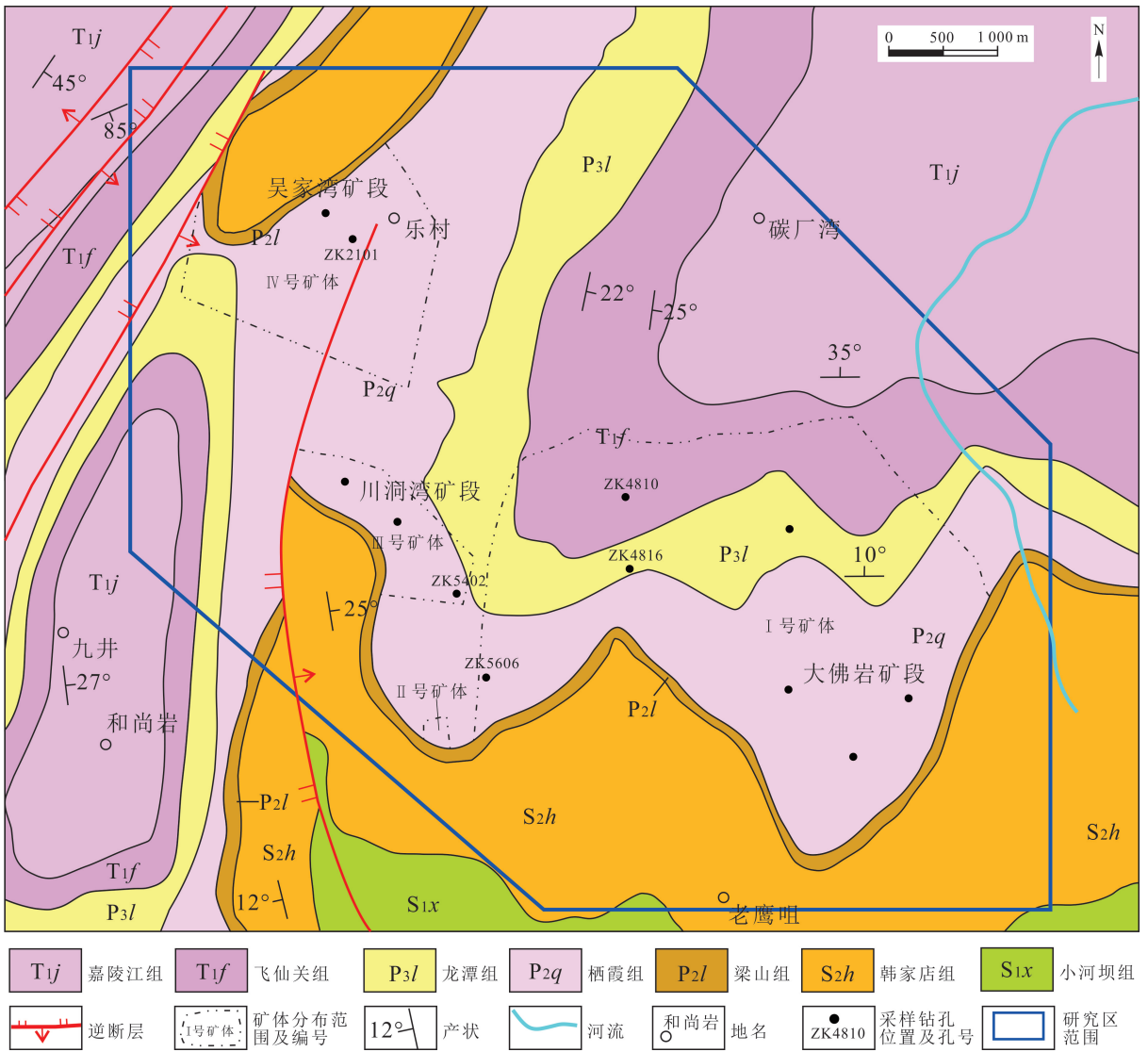


图 2 大佛岩铝土矿区地质图

Fig.2 Geological map of Dafoyan bauxite mining area

PerkinElmerg 公司制造的四级杆型电感耦合等离子质谱仪 (Q - ICP - MS), 以 GBM908 - 10、MRGEO08、OREAS - 120 和 STSD - 1 为对照品, 除部分元素外, 其他元素的误差优于 $\pm 7\%$ 。样品测试精度符合沉积型铝土矿的实验要求。

3 主量元素特征

在 52 件样品中选择铝土矿体及顶底板 28 件样品进行主要氧化物质量分数分析 (表 1), 其中: 铝土矿样品 8 件, 铝土岩样品 20 件。含矿岩系主要成分为 Al_2O_3 (21.74% ~ 69.82%, 平均为 42.54%)、 SiO_2 (6.46% ~ 43.58%, 平均为 31.33%)、 TiO_2 (0.63% ~ 4.12%, 平均为 1.82%)、 Fe_2O_3 (0.86% ~

32.48%, 平均为 7.75%)、 K_2O (0.06% ~ 5.28%, 平均为 1.71%)、 Na_2O (0.18% ~ 1.81%, 平均为 0.84%)、 CaO (0.12% ~ 1.88%, 平均为 0.59%)、 MgO (0.12% ~ 3.89%, 平均为 1.06%)、烧失量 (4.98% ~ 15.56%, 平均为 12.19%), 此外含矿岩系中还发现一定量的 P_2O_5 和 MnO , 多数质量分数小于 0.1%。在铝土矿体层及顶板、底板的不同层位, 顶板和矿体层的 Al_2O_3 质量分数明显大于底板岩层。 SiO_2 底板质量分数最高, 其他部位相对偏低。 TiO_2 质量分数的高值区出现在铝土矿体层附近, 且相对较稳定, 一般样品数值处于 2% ~ 3% 之间。底板的 Fe_2O_3 质量分数明显高于铝土矿体层和顶板, 可能是黄铁矿和针铁矿等矿物在成矿后期底板岩层

表1 大佛岩矿区含矿岩系主要氧化物质量分数

Table 1 Mass fraction of main oxides in the ore bearing rock series of Dafuyan mining area

%

样品号	矿石名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	P ₂ O ₅	烧失量	总计
DFY-109	土状铝土岩	36.52	42.85	1.26	0.45	0.68	3.12	0.58	0.68	0.01	0.04	13.80	99.99
DFY-110	豆鲕状铝土岩	26.02	49.29	1.45	0.71	0.62	4.43	2.52	0.18	0.00	0.08	14.60	99.90
DFY-111	致密状铝土岩	34.85	43.09	1.35	1.70	1.18	2.78	1.88	0.16	0.01	0.05	12.88	99.93
DFY-112	豆鲕状铝土岩	32.02	45.03	2.50	0.91	0.66	4.69	0.61	0.38	0.01	0.03	13.25	100.09
DFY-113	含铁致密状铝土岩	32.12	38.05	1.01	4.35	1.21	6.75	1.48	1.88	0.00	0.05	12.98	99.88
DFY-114	致密状铝土岩	35.98	42.12	2.25	0.76	1.33	3.02	0.68	0.21	0.02	0.07	13.66	100.10
DFY-115	鲕状铝土岩	33.42	40.39	2.08	5.08	0.82	6.36	1.92	0.15	0.00	0.06	9.45	99.73
DFY-116	豆鲕状铝土岩	35.27	42.13	2.75	0.06	0.18	2.76	0.12	0.88	0.02	0.03	15.56	99.76
DFY-117	致密状铝土岩	31.14	43.05	1.31	0.68	0.96	7.05	1.48	0.41	0.01	0.09	13.85	100.03
DFY-101	致密状铝土矿	26.15	48.30	3.26	0.08	0.42	7.23	0.13	0.38	0.02	0.02	13.95	99.94
DFY-102	致密状铝土矿	22.02	59.13	2.15	0.16	0.36	0.97	0.24	0.39	0.01	0.05	14.42	99.90
DFY-103	豆鲕状铝土矿	7.58	66.12	3.86	1.21	0.43	4.88	0.51	0.48	0.01	0.04	14.82	99.94
DFY-104	豆鲕状铝土矿	23.94	58.22	2.46	0.72	0.52	0.86	0.13	0.38	0.00	0.04	12.50	99.77
DFY-105	致密状铝土矿	23.41	55.28	2.87	1.45	1.81	1.36	0.48	0.18	0.00	0.06	13.14	100.04
DFY-106	致密状铝土矿	22.02	57.42	2.33	0.94	1.55	1.96	0.52	0.12	0.00	0.11	13.02	99.99
DFY-107	豆鲕状铝土矿	6.46	69.82	4.12	0.39	0.38	5.15	0.26	0.33	0.00	0.02	12.92	99.85
DFY-108	含鲕粒铝土矿	25.01	50.35	1.02	0.28	1.15	5.95	0.84	0.42	0.22	0.05	14.74	100.03
DFY-132	黏土岩	41.35	39.06	1.87	5.16	0.80	4.06	0.87	1.62	0.03	0.14	4.98	99.94
DFY-133	黏土岩	42.17	37.05	0.88	3.01	0.82	5.86	0.85	0.92	0.15	0.06	8.33	100.10
DFY-134	含鲕黏土岩	30.69	26.71	0.63	0.52	1.15	25.91	3.89	1.18	0.10	0.07	9.14	99.99
DFY-135	铁质黏土岩	33.93	28.22	1.57	0.21	0.65	24.89	1.95	1.52	0.02	0.04	6.88	99.88
DFY-136	铁质黏土岩	41.88	28.56	0.95	3.08	0.81	9.75	1.87	0.38	0.00	0.08	12.45	99.81
DFY-137	铁质黏土岩	40.00	35.42	1.80	2.84	0.41	6.81	1.38	0.56	0.00	0.11	10.68	100.01
DFY-138	豆鲕状黏土岩	28.28	21.74	0.90	0.63	0.85	32.48	0.60	0.97	0.02	0.06	13.24	99.77
DFY-139	水云母黏土岩	43.58	29.21	1.24	2.92	1.32	9.60	0.38	0.42	0.00	0.08	11.14	99.89
DFY-140	碳质黏土岩	38.55	26.09	0.74	3.51	1.02	16.35	1.08	0.22	0.00	0.06	12.23	99.85
DFY-141	灰绿色黏土岩	39.23	34.99	0.89	5.28	0.77	7.60	0.88	0.48	0.02	0.50	9.15	99.79
DFY-142	铝土质黏土岩	43.55	33.47	1.59	0.78	0.58	4.33	1.43	0.54	0.01	0.07	13.56	99.91

更有利于 Eh 值和 pH 值的生长(图 3)。K₂O 高值主要出现于底板岩层,偶尔出现于顶板岩层,铝土矿体层质量分数较低。Na₂O、CaO 和 MgO 在底板质量分数相对顶板和矿体层高,应该是底板高岭石等黏土类物质较多,Al₂O₃ 和高岭石等物质可以交换 Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺, 从而引起含 Na、Ca 和 Mg 等矿

物的富集。总体而言,与原生铝土矿相比,沉积型铝土矿具有高 Al₂O₃ 而相对较低的 Fe₂O₃、SiO₂ 质量分数的特征^[15]。

大佛岩矿区铝土矿石样品电子探针背散射图像(图 4)证实了锐钛矿、金红石、锆石、高岭石等副矿物多发育在硬水铝石中的说法。铝土矿成熟度越

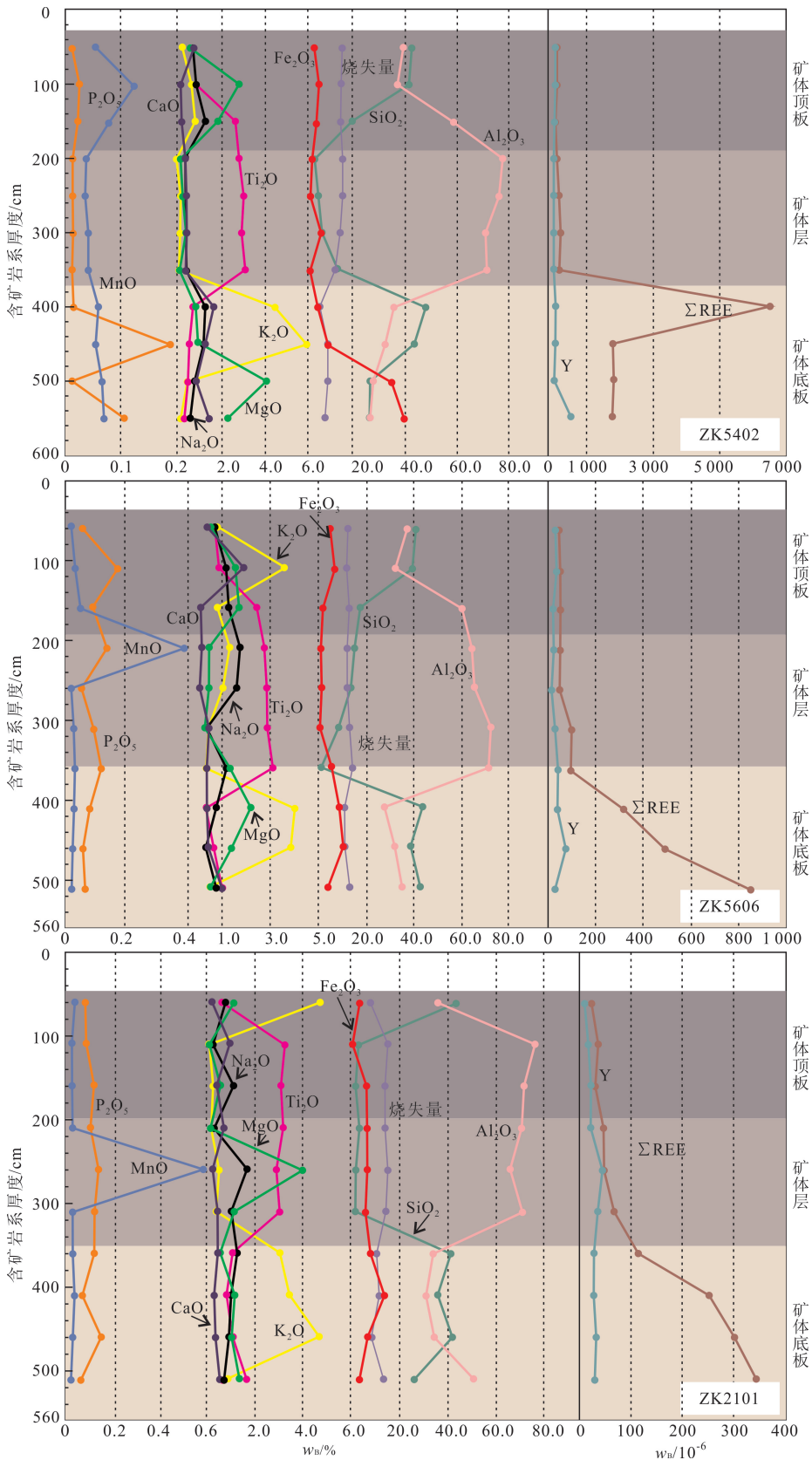
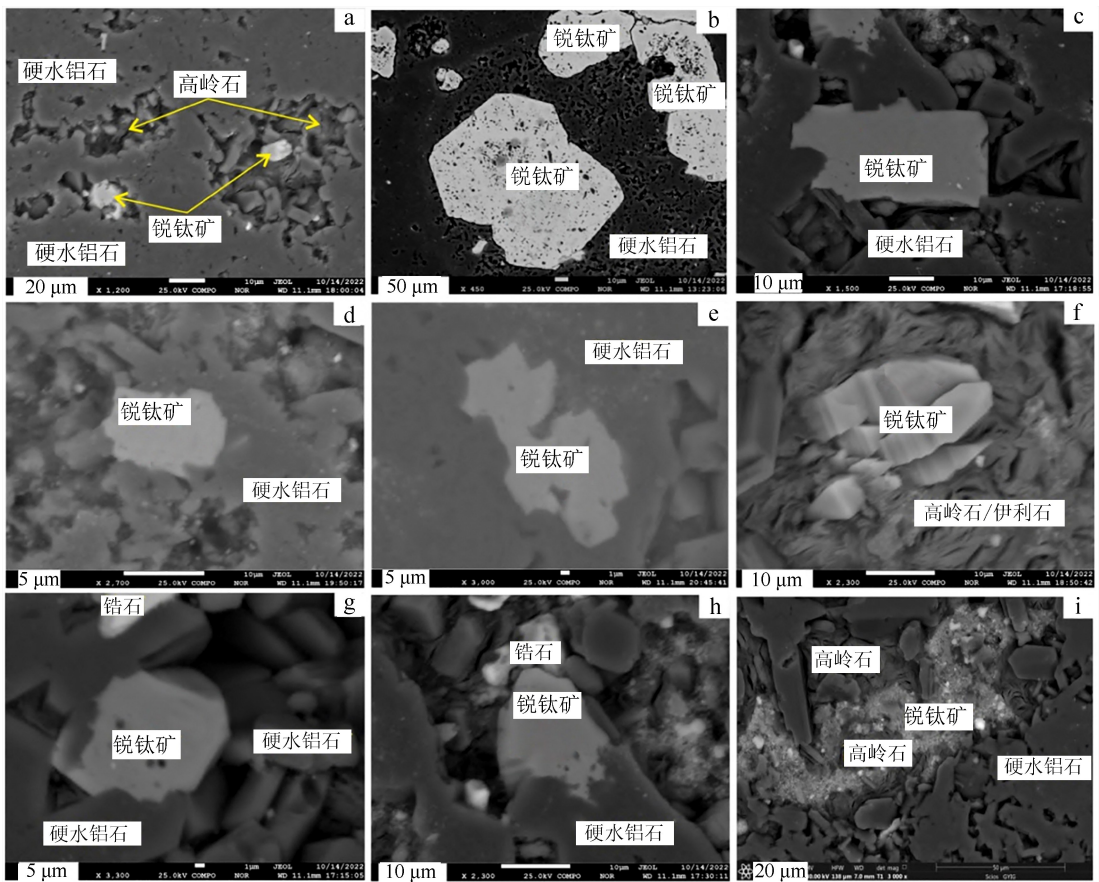


图 3 大佛岩铝土矿区含矿岩系主要氧化物钻孔柱状图

Fig.3 Bar chart of main oxide boreholes in the ore bearing rock series of Dafuyan bauxite mining area



a、b、c、d、e. 锐钛矿与硬水铝石连生; f. 锐钛矿镶嵌于高岭石/伊利石中; g、h. 锆石、锐钛矿镶嵌于硬水铝石中; i. 高岭石、锐钛矿与硬水铝石连生。

图 4 大佛岩矿区铝土矿石样品电子探针背散射图像

Fig.4 Electron probe backscatter images of bauxite ore samples from Dafoyan mining area

高,硬水铝石就越多,黏土矿物、铁矿物、绿泥石、硫酸铁矿物、碳酸盐矿物等就越少^[16]。根据 SPSS 软件分析 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 MgO 、 CaO 、 Li 、 Sc 、 V 、 Ga 、 Nb 、 Ce 、 Nd 和 ΣREE 质量分数共 16 项之间的相关关系, Al_2O_3 与 SiO_2 、 TiO_2 、 Sc 元素质量分数之间明显相关(表 2)。具体来看: Al_2O_3 和 SiO_2 质量分数之间的相关系数为 -0.64,并且呈现出 0.01 水平的显著性,说明 Al_2O_3 和 SiO_2 质量分数之间有着显著的负相关关系; Al_2O_3 和 TiO_2 质量分数之间的相关系数为 0.45,并且呈现出 0.05 水平的显著性,说明 Al_2O_3 和 TiO_2 质量分数之间有着显著的正相关关系; Al_2O_3 和 Sc 质量分数之间的相关系数为 -0.50,并且呈现出 0.05 水平的显著性,说明 Al_2O_3 和 Sc 元素质量分数之间有着显著的负相关关系。除此之外, Al_2O_3 与其他 12 项质量分数之间的相关关系数值并不会呈现出明显的相关性(表 2)。

3.1 平面上 Al_2O_3 分布特征

通过统计大佛岩矿区 78 个钻孔及探槽工程 Al_2O_3 的质量分数,绘制主矿物 Al_2O_3 质量分数等值线图(图 5)。从图 5 可知,大佛岩矿区 Al_2O_3 平面上质量分数离散程度小,属于较均匀类型。对比岩相图, Al_2O_3 高值区与沉积相位置关系较为紧密。研究区出现 3 处高值区和 3 处低值区,高值区分别出现在矿区北西角、矿区北部及矿区中部,低值区分别出现在矿区西部 2 处和矿区东南角 1 处。最高点出现在探槽 TC102 处, Al_2O_3 质量分数为 60.06%,最低点出现在钻孔 ZK185 处, Al_2O_3 质量分数为 27.01%。整体来看, Al_2O_3 质量分数高值区主要出现在豆鲕状铝土岩和致密状铝土矿区域; Al_2O_3 质量分数低值区主要出现在土状铝土岩和黏土岩区域。

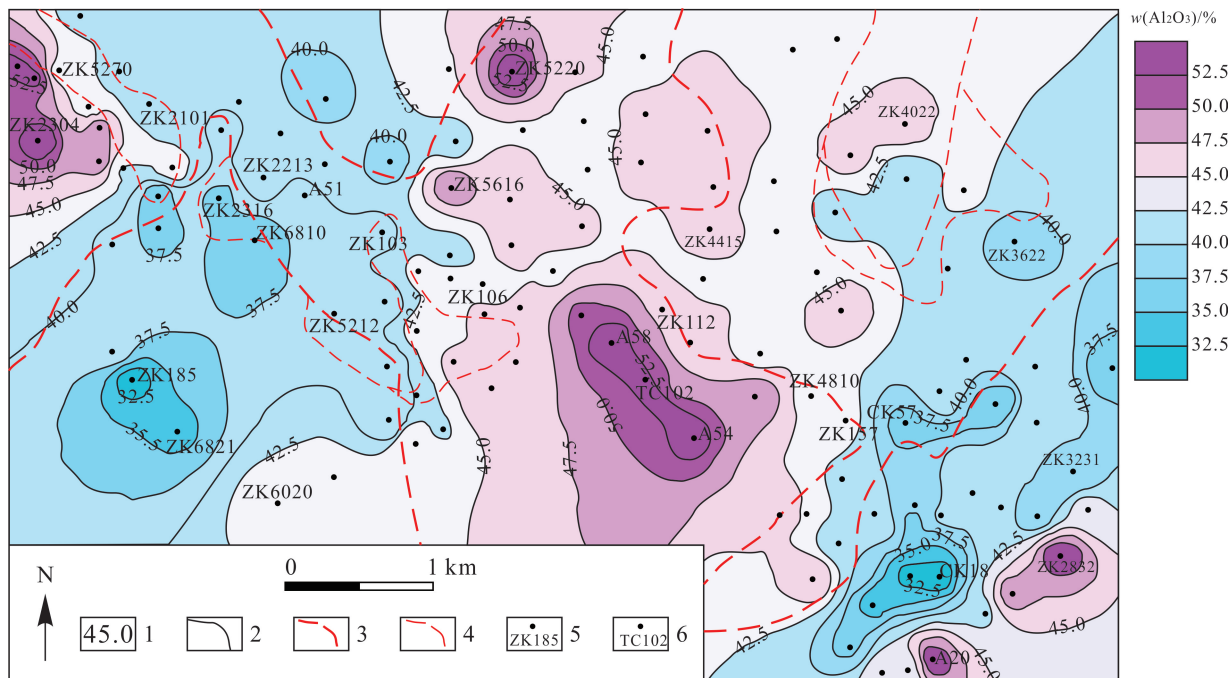
3.2 剖面上 Al_2O_3 分布特征

以钻孔 ZK4816 和 ZK4810 柱状图为例,分析

表 2 大佛岩矿区 28 件样品化学组分相关性矩阵

Table 2 Correlation matrix of chemical components of 28 samples in Dafoyan mining area

项目	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Li	Sc	V	Ga	Nb	Ce	Nd	ΣREE
Al ₂ O ₃	1															
SiO ₂	-0.64	1														
TiO ₂	0.45	-0.44	1													
Fe ₂ O ₃	-0.34	0.28	-0.31	1												
K ₂ O	-0.22	0.04	-0.12	0.00	1											
Na ₂ O	-0.18	0.16	-0.33	0.01	0.36	1										
MgO	-0.40	0.37	-0.49	0.46	0.28	0.27	1									
CaO	-0.35	0.17	-0.23	0.26	-0.12	-0.12	0.06	1								
Li	-0.37	0.27	-0.06	0.09	0.07	0.05	0.08	-0.03	1							
Sc	-0.50	0.48	-0.18	0.11	0.14	0.01	0.24	0.10	0.55	1						
V	0.08	-0.02	0.21	-0.11	-0.15	-0.05	-0.25	0.05	-0.02	0.00	1					
Ga	0.15	-0.33	0.12	-0.03	0.17	0.11	-0.04	-0.03	-0.04	-0.22	0.10	1				
Nb	0.09	0.00	0.14	0.03	-0.32	0.07	-0.01	-0.17	0.07	0.03	0.17	0.03	1			
Ce	-0.03	-0.13	-0.10	0.12	0.01	-0.15	-0.07	0.28	-0.05	-0.11	-0.20	0.10	-0.16	1		
Nd	0.01	-0.16	-0.07	0.09	0.04	-0.21	-0.04	0.24	0.01	-0.10	-0.17	0.11	-0.19	0.85	1	
ΣREE	0.01	-0.19	-0.09	0.09	-0.01	-0.22	-0.06	0.27	-0.04	-0.09	-0.19	0.08	-0.19	0.91	0.91	1

1. Al₂O₃质量分数;2. 等值线;3. 沉积亚相分界线;4. 沉积微相分界线;5. 钻孔位置及孔号;6. 探槽位置及编号。图 5 大佛岩铝土矿区 Al₂O₃质量分数等值线图Fig.5 Contour map of Al₂O₃ mass fraction in Dafoyan bauxite mining area

垂向剖面上的沉积岩相与 Al_2O_3 质量分数分布特征的关系(图 6)。在 ZK4816 和 ZK4810 垂向剖面中, Al_2O_3 质量分数与赋矿地层岩性类型具有密切的相关性:在高岭石等黏土矿物中,其质量分数多数不大于 20%;在土状铝土岩等矿物中其质量分数约为 20%;在鲕状铝土岩等矿物中较为富集,其质量分数一般为 30%~60%;在豆状铝土岩等矿物中最为富集,其质量分数一般大于 60%。在铝土矿体层及顶板、底板的层位(图 3),顶板和矿体层的 Al_2O_3 质量分数明显大于底板岩层。

3.3 Al_2O_3 矿体厚度变化特征

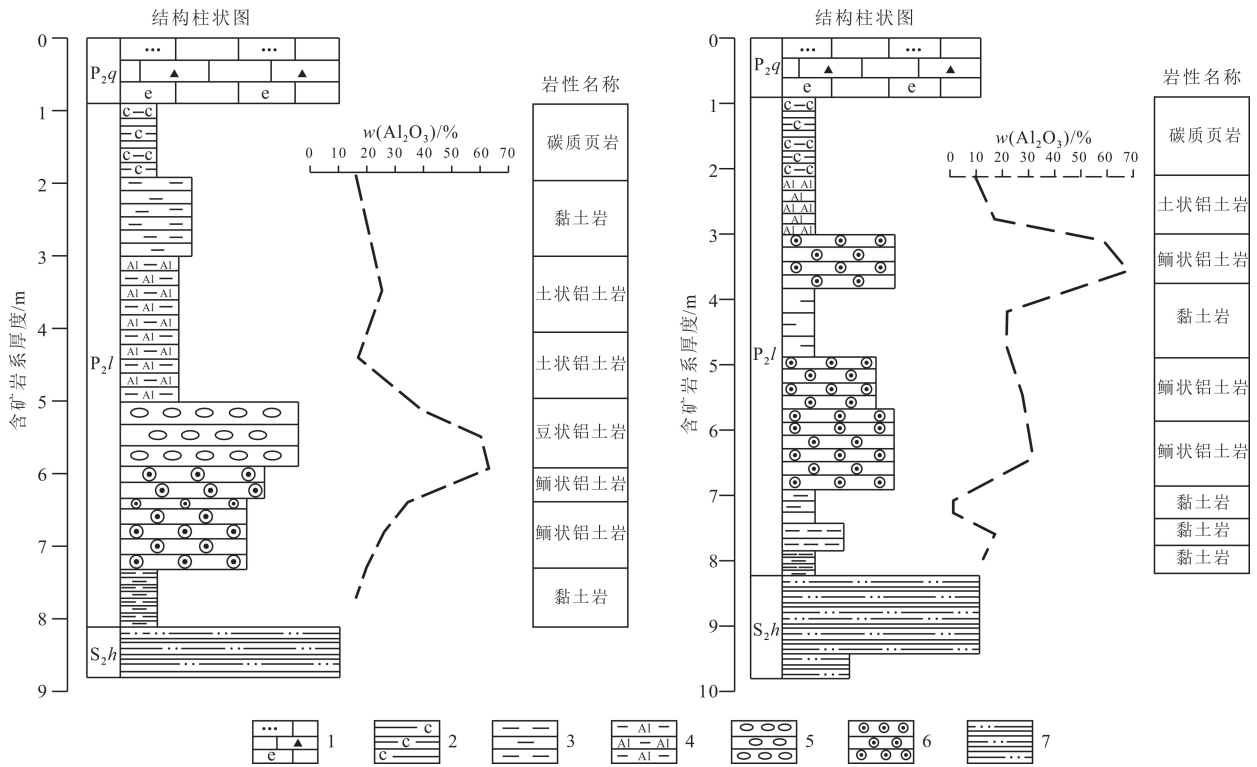
大佛岩 I 号铝土矿体规模最大,总体上较为稳定,矿体中间出现 4 处较薄区域,且均分布于南侧,最大 1 处厚度较薄区域呈多边形不规则状(图 7)。I 号铝土矿体最大厚度达 6.00 m,最小厚度为 0.10 m,一般情况下为 1.00~2.50 m,矿体平均厚度为 1.93 m,变化系数为 58.12%,属较稳定型。平均品位: $w(Al_2O_3)$ 为 62.14%、 $w(SiO_2)$ 为 14.76%、 $w(Fe_2O_3)$ 为 5.59%、 $w(TiO_2)$ 为 2.53%、 $w(S)$ 为

1.23%、烧失量(Loss)为 13.93%,铝硅比(A/S)为 4.21。

根据工业指标圈定的铝土矿矿体厚度只与赋矿地层厚度呈正相关性,而与地层走向、倾向、埋深无关。大致关系是赋矿地层厚度为 6~9 m,矿体厚度大、稳定性较好;除此以外,偶尔出现厚度大矿体,多数时候矿体较薄、稳定性差,如 ZK5220 孔,含矿岩系厚度为 11.29 m,而矿体厚度则有 6.00 m,如此类型的工程尚有不少。

3.4 富矿体分布特征

大佛岩矿区 I 号矿体内按 $w(Al_2O_3) \geq 62\%$ 、铝硅比(A/S) ≥ 7 和 $w(Al_2O_3)$ 为 $<62\%$ 、 $7 >$ 铝硅比(A/S) ≥ 1.8 工业指标,可划分为富矿体和贫矿体,本次共圈出 13 个铝土矿富矿体。其中:10 个富矿体分布在矿区东部和北部,与铝土矿矿体厚度等值线有一定的相关性;3 个富矿体分布在矿区东南部。除了铝土矿富矿体,其余均为贫矿体,主要分布在矿区东北部、北部,少量分布在矿区西部。少富多贫是大佛岩铝土矿区的特征。



1. 含高岭石黏土岩; 2. 碳质页岩; 3. 黏土岩; 4. 土状铝土岩; 5. 豆状铝土岩; 6. 鲕状铝土岩; 7. 粉砂质页岩。

图 6 大佛岩铝土矿区 ZK4816(a) 和 ZK4810(b) 柱状图

Fig.6 Histogram of ZK4816 (a) and ZK4810 (b) in Dafuyan bauxite mining area

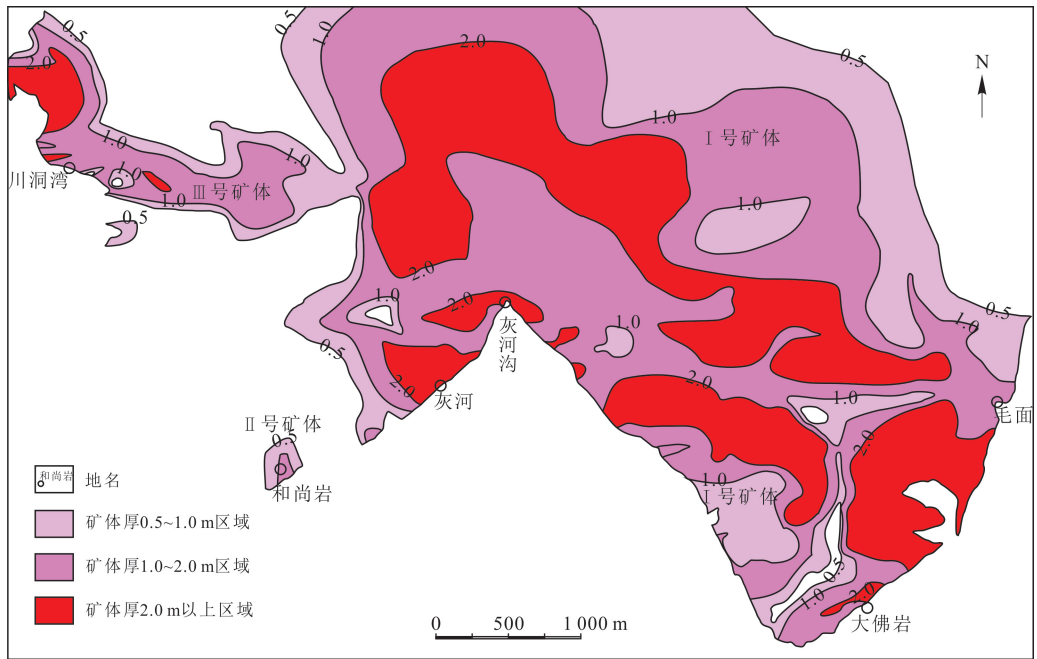


图 7 大佛岩铝土矿矿体厚度分布图

Fig.7 Distribution of ore body thickness of Dafuyan bauxite

多数富矿体赋存于赋矿地层中上部和中部,偶见于赋矿地层下部,贫矿主要赋存在赋矿地层上部和下部(图 8)。富矿体矿石类型以土状、豆状铝土矿和碎屑状铝土矿为主,其次为致密块状铝土矿,贫矿以铝土岩和黏土岩类型为主。

4 Ga、Li、Sc、稀土元素分布特征

铝土矿成矿过程十分复杂,通常会富集 Li、Ga、V、Ti、NbTa 和稀土等金属元素^[18],其中伴生镓、锂和稀土元素富集非常明显^[19]。

4.1 Ga 分布特征

根据样品分析结果(表 3),22 件铝土矿和铝土岩样品 $w(\text{Ga})$ 为 $(22.50 \sim 115.60) \times 10^{-6}$, 平均为 57.67×10^{-6} 。铝土矿中镓的富集程度最高,平均为 72.67×10^{-6} ;其次为铝土岩, $w(\text{Ga})$ 平均为 49.11×10^{-6} ,黏土岩中 $w(\text{Ga})$ 最低,平均为 3.20×10^{-6} 。铝土矿体中 $w(\text{Ga})$ 变化系数为 37,为不稳定型。粉砂质页岩中 $w(\text{Ga})$ 为 $(22.30 \sim 45.20) \times 10^{-6}$,平均为 34.12×10^{-6} ,比含矿地层平均质量分数略低。灰岩中 $w(\text{Ga})$ 为 $(3.50 \sim 10.70) \times 10^{-6}$,平均为 7.39×10^{-6} ,比赋矿地层中 Ga 的质量分数小得多。

4.1.1 平面上 Ga 的分布特征

根据以往地质勘查化验成果(图 9),研究区

$w(\text{Ga})$ 高值区呈北东向和近南北向分布,中西部 $w(\text{Ga})$ 高,北东部 $w(\text{Ga})$ 较低。 $w(\text{Ga})$ 在钻孔 ZK2141—ZK6821 和 ZK4816 区域出现高值区,最高大于 100×10^{-6} ;在钻孔 ZK2836—ZK3630 和 ZK2161—ZK3104 区域比较低。

4.1.2 垂向上 Ga 的分布特征

以 60×10^{-6} 为线,Ga 的质量分数分为高品位矿石和低品位矿石两类。根据钻孔柱状图(图 10),高品位矿石主要赋存位置除含矿地层下部和上部外,其余部位均有分布。在赋矿地层中 Ga 高品位矿石和铝矿富集区位置基本一致,由赋矿地层中上部开始到底部,Ga 的质量分数缓慢升高,在铝土矿层中显示高 Ga 的特征,赋矿地层中 Ga 的质量分数普遍高于顶板和底板中 Ga 的质量分数,Ga 的富集程度与 Al 的富集程度密切相关,二者呈正相关性。

4.1.3 Ga 与其他元素的相关性

根据 52 件样品测试结果和相关性分析发现,Ga 的质量分数与 Al_2O_3 的质量分数呈弱正相关(图 11a)、 SiO_2 的质量分数呈负相关(图 11b)、铝土岩和铝土矿中 Fe_2O_3 的质量分数呈弱正相关(图 11c)、 TiO_2 的质量分数呈明显正相关(图 11d)、铝硅比(A/

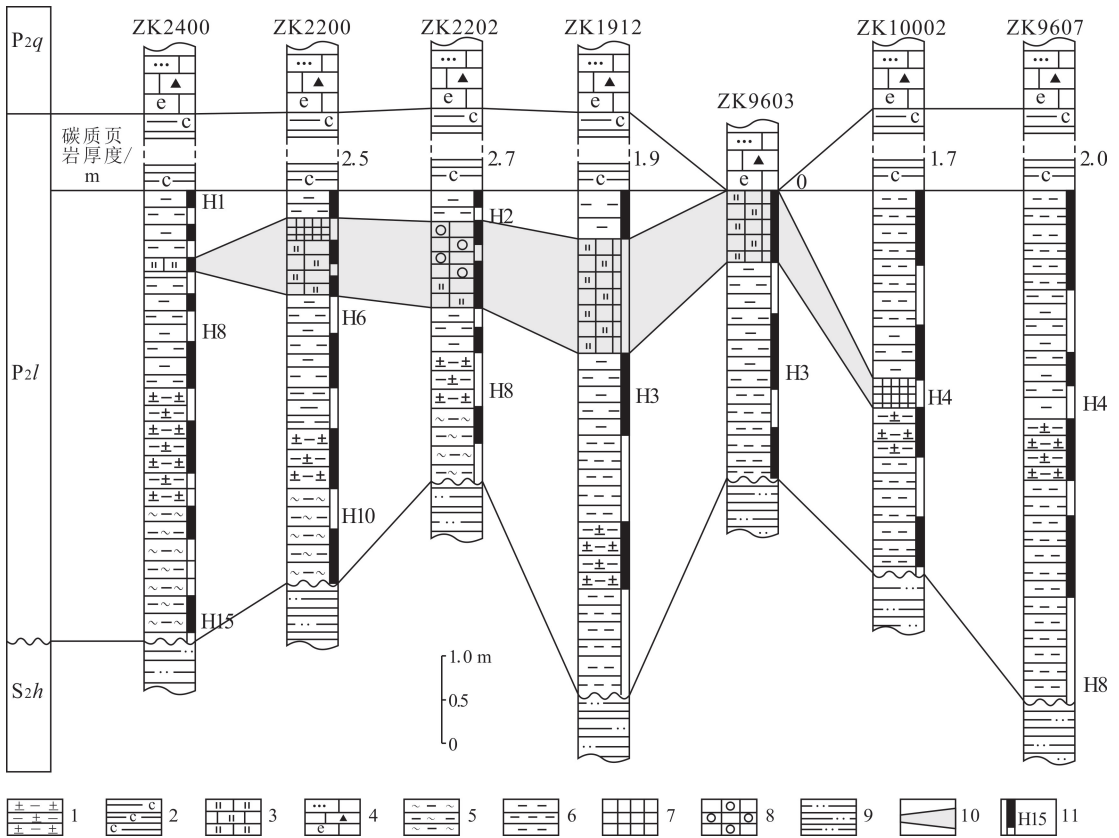


图 8 大佛岩(吴家湾矿段)铝土矿区富矿体赋存形态示意图^[17]

Fig.8 Schematic diagram of the occurrence pattern of rich ore body in the bauxite area of Dafoyan (Wujiawan Section)^[17]

S)呈弱正相关(图 11e)。Ga 在赋矿地层中的质量分数在一定程度上受控于 Al_2O_3 的质量分数,多以类质同象形式赋存于 Al_2O_3 等氧化物中;其次为离子吸附型形式存在,完全风化土状铝土矿中 Ga 流失殆尽,说明 Ga 的主要载体矿物应该不是一水铝石。

Ga 的质量分数与 V、Zr、Sr 等的质量分数呈弱正相关,与 Cr、Ni、Co、Rb、Ba 等质量分数呈负相关。微量元素相关性分析发现 Ga 赋存于富 V、Zr、Sr 的矿石内,多数 Ga 出现于金红石或锆石等副矿物中^[20]。

Ga 的质量分数与稀土总量、轻稀土质量分数、重稀土质量分数、LREE/HREE 值呈弱正相关。总体而言,Ga 的质量分数与各类稀土质量分数之间关系不密切,没有规律可循。

4.2 Li 分布特征

4.2.1 赋矿地层与 Li 质量分数的关系

大佛岩矿区赋矿地层中 Li 富集程度高,平均质量分数远大于地球丰度值 20×10^{-6} ^[21]、全国沉积岩

Li 平均值 31.45×10^{-6} ^[22]。不同的矿石类型和岩性其化学元素质量分数亦不同。如:Li 在铝土矿的质量分数为 $(2.52 \sim 1\ 603.00) \times 10^{-6}$,平均为 534.66×10^{-6} ;铝土岩中质量分数为 $(117.00 \sim 1\ 655.00) \times 10^{-6}$,平均为 $1\ 010.86 \times 10^{-6}$;黏土岩中质量分数为 $(63.60 \sim 473.00) \times 10^{-6}$,平均为 224.86×10^{-6} 。具体而言,Li 的质量分数从高到低依次为:碎屑状铝土矿 $(1\ 655.00 \times 10^{-6})$ →豆鲕状铝土岩 $(1\ 605.00 \times 10^{-6})$ →致密状铝土矿 $(1\ 603.00 \times 10^{-6})$ →致密状铝土岩 $(1\ 325.00 \times 10^{-6})$ →含鲕粒铝土矿 (758.00×10^{-6}) →土状铝土矿 (16.78×10^{-6}) 。

从矿物组合上看,含矿岩系矿物种类单一时 Li 的质量分数偏低,而种类复杂时则比较富 Li;铝矿物体积分数过高 Li 的质量分数极低,无铝矿物时 Li 的质量分数变化较大;无伊利石或无高岭石或无绿泥石含矿岩系均不富 Li,黄铁矿、水铁矾中不含 Li,针铁矿存在时 Li 的质量分数明显增加(图 12)。

表 3 大佛岩矿区部分元素样品分析结果

Table 3 Table of analysis results of some elemental samples in Dafoyan mining area

样品编号	样品名称	Li	Sc	V	Ga	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
DFY-101	致密状铝土矿	1 603.00	8.64	467.00	60.80	74.10	26.93	81.32	7.94	33.86	8.74	1.83
DFY-102	致密状铝土矿	302.00	9.15	348.00	25.60	51.30	102.00	231.00	17.21	43.31	5.88	1.83
DFY-103	土状铝土矿	2.52	20.52	412.00	96.20	40.20	10.51	37.11	3.40	14.01	2.95	0.79
DFY-104	豆鲡状铝土矿	295.00	9.19	574.00	72.70	33.20	15.24	47.84	4.06	16.86	4.54	0.79
DFY-105	致密状铝土矿	615.00	8.00	574.00	56.10	77.90	7.93	12.85	1.15	3.58	1.13	0.49
DFY-106	致密状铝土矿	685.00	5.70	297.00	115.60	97.80	5.62	15.45	1.46	5.63	1.87	0.56
DFY-107	土状铝土矿	16.78	17.32	557.00	76.60	104.20	18.55	38.65	3.24	11.91	2.98	1.08
DFY-108	含鲡粒铝土矿	758.00	22.10	648.00	77.73	91.20	4.75	18.77	1.63	7.14	2.31	0.79
DFY-109	碎屑状铝土岩	1 365.00	35.12	376.00	32.90	40.40	235.00	362.00	36.31	97.01	17.01	6.48
DFY-110	豆鲡状铝土岩	364.00	19.12	143.00	30.00	49.40	15.15	15.15	3.19	10.16	2.35	0.82
DFY-111	致密状铝土岩	1 325.00	23.52	393.00	69.70	60.90	1.24	4.71	0.64	2.71	1.08	0.43
DFY-112	豆鲡状铝土岩	1 435.00	39.12	361.00	28.90	43.60	4.79	9.14	1.01	3.56	1.59	0.49
DFY-113	含铁致密状铝土岩	117.00	15.02	209.00	69.20	31.20	36.85	121.00	6.35	19.51	3.44	0.81
DFY-114	致密状铝土岩	1 015.00	41.62	561.00	22.50	94.70	2.13	9.06	0.57	1.77	0.54	0.23
DFY-115	豆鲡状铝土岩	1 605.00	82.55	348.00	97.20	62.20	23.93	54.07	6.43	24.46	5.65	1.20
DFY-116	豆鲡状铝土岩	1 055.00	31.72	464.00	41.60	126.20	3.63	11.92	0.88	2.74	0.85	0.32
DFY-117	致密状铝土岩	883.00	23.52	153.00	33.40	121.20	415.00	1 899.85	195.33	931.75	229.00	47.16
DFY-118	碎屑状铝土岩	1 655.00	63.22	557.00	90.20	52.20	84.15	189.00	17.91	63.41	12.05	1.76
DFY-119	致密状铝土岩	1 301.00	25.22	327.00	46.80	37.80	31.45	258.00	6.03	22.11	5.22	1.66
DFY-120	豆鲡状铝土岩	595.00	20.62	440.00	64.70	101.20	11.14	20.94	1.66	5.24	1.27	0.37
DFY-121	致密状铝土岩	780.00	29.52	548.00	32.90	72.40	7.56	14.45	1.58	5.86	2.16	0.98
DFY-122	豆鲡状铝土岩	657.00	26.22	397.00	27.50	47.50	5.99	13.20	1.42	4.96	2.06	0.58
DFY-123	黏土岩	473.00	18.72	234.00	38.60	44.00	72.45	177.00	9.82	25.11	3.60	0.67
DFY-124	黏土岩	110.00	38.12	740.00	50.80	38.80	37.13	90.36	7.74	21.67	2.77	0.58
DFY-125	黏土岩	243.00	19.02	201.00	33.90	35.80	192.00	173.00	40.51	181.00	46.55	21.60
DFY-126	黏土岩	211.00	34.72	340.00	21.50	23.90	135.40	162.00	32.51	138.00	29.88	8.83
DFY-127	黏土岩	201.00	17.92	576.00	38.60	53.40	401.00	177.00	87.01	342.00	60.20	9.50
DFY-128	黏土岩	63.60	15.92	210.00	41.00	38.60	301.00	161.00	60.91	186.00	17.41	3.51
DFY-129	黏土岩	521.00	7.27	84.50	17.10	38.50	284.00	115.20	35.61	79.91	5.68	1.03
DFY-130	黏土岩	281.00	26.72	196.00	48.10	34.20	182.00	748.00	59.71	242.00	49.62	9.35
DFY-131	黏土岩	335.00	13.62	725.00	42.80	58.60	16.10	89.05	4.07	14.90	2.82	0.75
DFY-132	黏土岩	187.00	35.62	261.00	43.00	30.20	87.00	1 068.00	34.61	125.00	18.90	3.55
DFY-133	黏土岩	104.70	19.72	296.00	34.80	40.80	12.15	24.68	3.10	11.21	3.25	0.65
DFY-134	含鲡黏土岩	299.00	16.52	467.00	31.50	45.50	148.00	123.11	29.76	89.19	10.10	1.38
DFY-135	铁质黏土岩	133.00	7.39	224.00	32.10	29.90	6.08	22.15	1.54	5.26	1.62	0.48
DFY-136	铁质黏土岩	195.00	22.82	204.00	44.60	38.00	1 189.00	362.50	222.13	740.00	131.00	19.80

续表 3

样品编号	样品名称	Li	Sc	V	Ga	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	
DFY-137	铁质黏土岩	155.00	15.02	305.00	32.00	26.70	12.47	17.57	2.00	6.17	1.59	0.56	
DFY-138	豆鲕状黏土岩	323.00	39.72	215.00	24.40	25.50	59.45	110.50	11.61	46.01	13.21	4.44	
DFY-139	水云母黏土岩	71.00	33.92	213.00	7.80	28.70	91.40	148.60	22.53	92.73	22.41	4.89	
DFY-140	碳质黏土岩	86.20	21.12	268.00	42.30	46.20	22.80	68.15	5.80	17.91	2.59	0.62	
DFY-141	灰绿色黏土岩	289.00	28.82	341.00	3.20	46.40	43.25	108.30	11.41	41.91	8.01	1.61	
DFY-142	铝土质黏土岩	215.00	23.82	187.00	27.50	28.80	11.15	53.85	2.09	5.73	1.25	0.32	
DFY-143	粉砂质页岩	119.00	37.02	206.00	22.30	26.50	389.00	447.00	110.12	589.00	138.00	40.10	
DFY-144	粉砂质页岩	68.50	19.42	151.00	33.00	23.10	142.00	160.30	24.71	90.10	15.60	3.28	
DFY-145	粉砂质页岩	46.80	13.62	112.40	26.60	24.00	47.55	92.45	10.71	39.61	8.70	1.72	
DFY-146	粉砂质页岩	79.00	23.12	175.00	45.20	33.10	47.85	83.80	9.71	33.71	4.32	1.22	
DFY-147	粉砂质页岩	51.80	27.02	184.00	43.50	16.60	115.14	442.10	39.45	174.55	40.80	7.21	
DFY-148	灰色颗粒灰岩	25.60	8.02	17.60	7.00	8.85	33.85	55.12	8.36	36.61	10.70	2.73	
DFY-149	灰岩	29.90	8.72	50.10	9.48	7.01	46.75	109.00	13.61	55.71	12.00	3.29	
DFY-150	亮晶灰岩	31.30	13.12	27.60	10.70	5.78	8.04	11.15	1.96	0.34	2.44	1.07	
DFY-151	灰岩	86.00	2.94	43.20	3.50	2.50	20.77	32.76	5.48	24.74	6.55	2.41	
DFY-152	泥晶灰岩	22.46	6.82	30.70	6.29	3.88	51.95	65.75	14.31	62.91	19.40	4.80	
样品编号	样品名称	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	LREE/HREE	δ Ce	δ Eu
DFY-101	致密状铝土矿	8.06	1.29	6.85	1.49	3.76	0.71	4.61	0.75	193.79	6.76	1.44	0.67
DFY-102	致密状铝土矿	6.87	9.45	5.05	1.00	2.90	0.44	2.60	0.39	425.53	21.02	5.57	0.84
DFY-103	土状铝土矿	5.08	1.00	5.92	1.33	4.53	0.62	3.99	0.61	95.59	4.10	1.65	0.53
DFY-104	豆鲕状铝土矿	4.61	0.78	4.89	1.17	1.94	0.56	3.32	0.53	112.18	5.59	1.60	0.52
DFY-105	致密状铝土矿	1.79	0.41	3.12	0.63	2.07	0.37	2.25	0.34	44.72	3.59	4.55	0.34
DFY-106	致密状铝土矿	2.82	0.70	3.87	1.07	3.20	0.51	3.18	0.52	50.10	2.15	5.81	0.68
DFY-107	土状铝土矿	3.80	0.88	4.86	1.25	3.56	0.61	3.72	0.60	150.29	4.82	5.19	0.87
DFY-108	含鲕粒铝土矿	2.88	0.38	3.45	0.70	3.96	0.39	2.56	0.42	80.89	3.87	1.84	0.89
DFY-109	碎屑状铝土岩	16.10	1.97	9.60	1.48	3.45	0.61	3.55	0.53	800.68	21.40	3.92	0.44
DFY-110	豆鲕状铝土岩	4.10	1.00	6.33	1.82	4.39	1.04	7.00	1.13	79.53	134.82	0.46	0.57
DFY-111	致密状铝土岩	1.63	0.42	3.12	0.57	5.08	0.37	2.41	0.38	25.08	1.19	5.50	0.27
DFY-112	豆鲕状铝土岩	2.78	0.61	3.87	0.88	6.00	0.53	3.44	0.56	39.79	2.26	1.17	0.64
DFY-113	含铁致密状铝土岩	3.60	0.78	6.15	1.30	4.20	0.69	4.19	0.70	207.57	9.45	1.95	0.62
DFY-114	致密状铝土岩	0.77	0.18	1.12	0.29	0.81	0.17	0.83	0.16	22.11	4.45	2.24	0.71
DFY-115	豆鲕状铝土岩	6.85	1.08	6.32	1.20	0.74	0.55	3.35	0.56	144.04	6.15	1.21	0.59
DFY-116	豆鲕状铝土岩	1.01	0.14	1.14	0.28	40.07	0.16	0.78	0.15	28.90	5.98	2.05	0.82
DFY-117	致密状铝土岩	212.20	18.50	101.50	16.50	5.67	4.68	30.20	3.91	4 169.06	9.72	1.73	0.70
DFY-118	碎屑状铝土岩	9.70	1.62	7.81	1.58	5.76	0.78	5.04	0.81	406.81	12.04	1.30	0.50
DFY-119	致密状铝土岩	6.71	1.17	6.89	1.69	2.11	1.00	6.53	1.02	367.39	11.79	4.84	0.87
DFY-120	豆鲕状铝土岩	1.47	0.19	1.64	0.41	1.18	0.23	1.26	0.22	50.39	7.30	1.32	0.70
DFY-121	致密状铝土岩	3.71	0.88	6.45	1.74	2.97	0.99	7.11	1.13	64.15	2.16	1.15	1.03
DFY-122	豆鲕状铝土岩	2.70	0.62	4.16	0.94	2.95	0.53	3.52	0.55	47.08	2.79	1.25	0.69

续表 3

样品编号	样品名称	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	∑REE	LREE/HREE	δCe	δEu
DFY-123	黏土岩	4.70	0.79	5.80	1.44	6.27	0.93	5.92	0.96	324.08	12.63	7.04	0.19
DFY-124	黏土岩	2.90	0.51	3.41	0.67	6.74	0.44	3.03	0.53	176.39	13.62	1.40	0.58
DFY-125	黏土岩	55.80	11.56	65.90	13.55	8.73	4.49	24.80	3.22	864.96	2.71	0.39	0.56
DFY-126	黏土岩	39.50	6.45	38.60	10.20	6.03	2.95	14.60	2.17	649.63	4.39	0.67	0.81
DFY-127	黏土岩	52.30	7.63	50.50	10.30	4.89	3.18	20.30	2.30	1 246.90	7.81	2.82	0.76
DFY-128	黏土岩	10.50	1.99	9.30	2.38	3.69	1.09	6.83	1.03	769.52	17.43	1.29	0.76
DFY-129	黏土岩	4.97	1.03	6.70	1.33	3.28	0.71	4.52	0.71	545.74	23.54	1.48	0.70
DFY-130	黏土岩	40.32	6.08	30.20	5.02	2.30	1.94	11.60	1.83	1 401.41	13.30	7.28	0.67
DFY-131	黏土岩	2.96	0.51	2.90	0.74	2.03	0.43	2.70	0.43	144.48	10.76	11.37	0.87
DFY-132	黏土岩	12.88	1.29	2.86	0.52	1.62	0.21	1.32	0.24	1 369.93	47.07	4.78	0.62
DFY-133	黏土岩	3.85	1.01	5.67	1.39	4.32	0.80	5.36	0.82	83.83	1.28	1.13	0.52
DFY-134	含鲕黏土岩	6.68	1.22	8.40	1.72	7.58	0.98	5.90	1.09	442.38	13.85	0.55	0.53
DFY-135	铁质黏土岩	2.52	0.60	3.97	0.89	13.75	0.51	3.40	0.54	55.97	3.37	1.96	0.65
DFY-136	铁质黏土岩	90.20	16.09	80.10	14.80	13.35	6.32	38.20	5.36	2 988.20	10.25	6.17	0.66
DFY-137	铁质黏土岩	2.09	0.41	3.80	0.65	26.05	0.37	2.37	0.39	54.50	4.70	0.97	0.85
DFY-138	豆鲕状黏土岩	19.09	4.21	19.80	4.55	20.43	1.73	9.77	1.36	323.91	4.18	4.26	0.90
DFY-139	水云母黏土岩	20.50	2.52	11.60	2.23	46.85	0.96	6.20	0.88	447.25	8.92	0.95	0.75
DFY-140	碳质黏土岩	2.63	0.52	2.87	0.69	6.24	0.46	2.88	0.47	135.11	10.07	6.02	0.31
DFY-141	灰绿色黏土岩	8.12	1.44	7.85	1.92	3.38	1.01	5.80	1.01	255.57	7.35	1.33	0.64
DFY-142	铝土质黏土岩	1.66	0.28	2.36	0.51	38.65	0.30	1.90	0.32	86.24	9.78	2.91	0.53
DFY-143	粉砂质页岩	148.00	22.68	128.00	19.80	4.48	6.27	28.90	4.19	2 166.63	5.03	2.29	0.31
DFY-144	粉砂质页岩	9.60	2.56	12.80	2.80	2.40	1.20	6.70	1.00	485.15	1.35	2.89	0.66
DFY-145	粉砂质页岩	7.20	9.41	6.08	1.18	2.46	0.54	3.30	0.53	225.65	9.94	4.23	0.27
DFY-146	粉砂质页岩	5.20	0.78	3.85	0.93	7.54	0.44	2.54	0.40	203.26	11.97	4.07	0.71
DFY-147	粉砂质页岩	40.90	4.69	2.54	6.10	4.77	2.41	14.82	2.22	935.58	8.14	1.69	0.61
DFY-148	灰色颗粒灰岩	15.60	2.22	9.10	2.02	2.69	0.67	3.46	0.53	189.70	5.05	0.92	0.77
DFY-149	灰岩	11.80	2.05	9.60	2.01	41.55	0.78	4.17	0.62	283.14	7.44	4.39	0.30
DFY-150	亮晶灰岩	3.47	0.51	3.04	0.60	2.78	0.23	1.10	0.19	46.54	4.19	0.80	1.11
DFY-151	灰岩	10.40	1.40	6.60	1.36	3.31	0.51	2.83	0.43	124.33	4.62	0.84	0.90
DFY-152	泥晶灰岩	18.90	4.12	18.70	3.80	16.87	1.26	6.60	0.89	295.35	4.04	2.52	0.80

注:微量元素质量分数单位为 10^{-6} 。

研究表明, Li 元素质量分数在赋矿地层梁山组中、上部岩石中最高, 其中致密状铝土矿质量分数最高, 其次铝土岩中质量分数也比较高, 土状铝土矿中 Li 的质量分数较低。Li 多呈类质同象或离子、层间吸附形式富集在高岭石、伊利石等脉石中; 含铁矿物(黄铁矿、针铁矿、褐铁矿等)的存在对 Li 的质量分数高低有一定作用。土状铝土矿中 Li 的质量分数

相对偏少, 是因为其形成过程中的表生风化、氧化作用使 Al 元素富集, Si、Fe 等元素淋滤流失, 特别是土状铝土矿中 Li 流失更甚, 土状铝土矿显示为高 Al 贫 Li 的特点。

4.2.2 垂向上 Li 的分布特征

由钻孔柱状图(图 13) Li 元素变化情况可以看出, 在赋矿地层垂向上, Li 的质量分数自上到下有

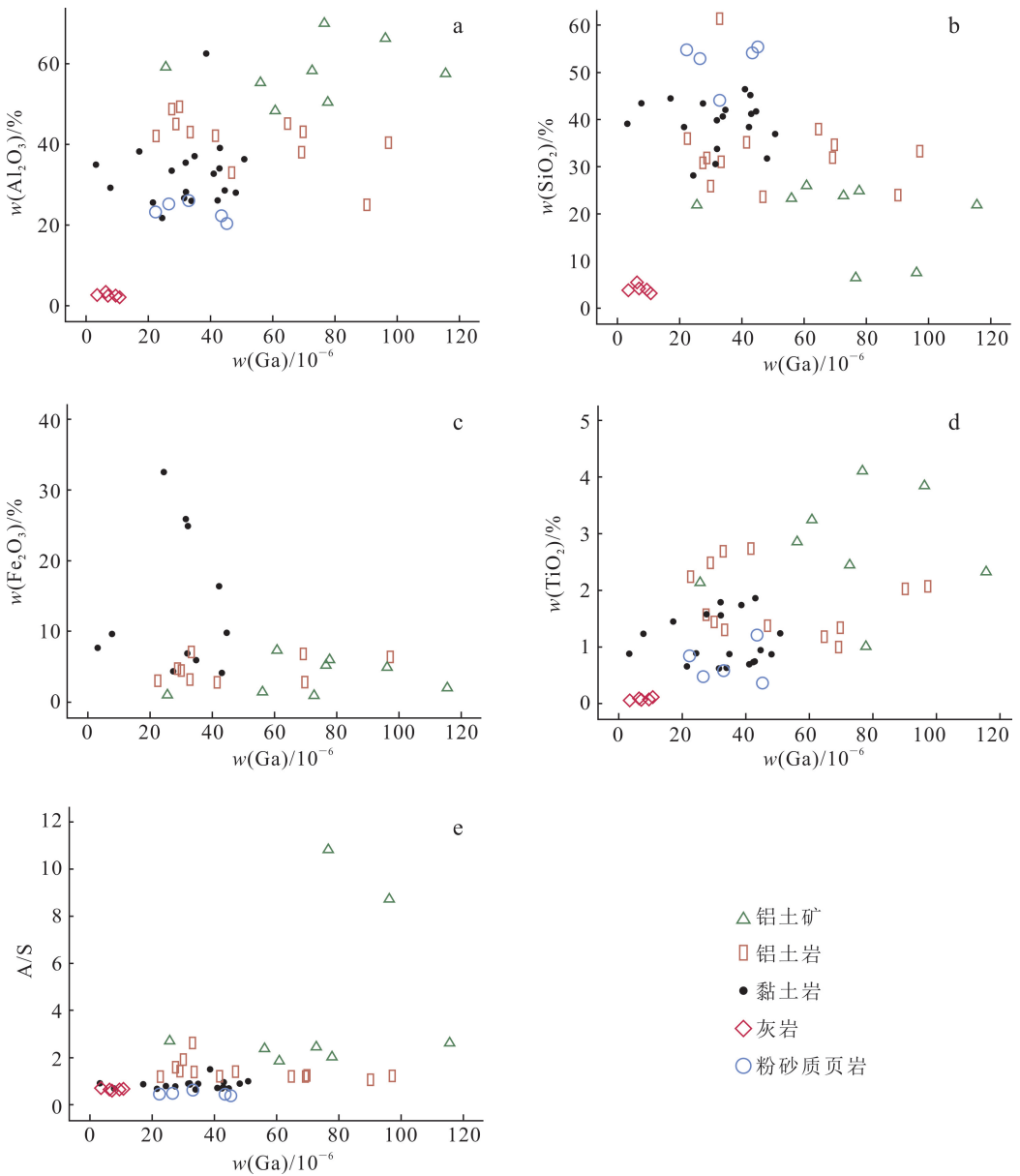


图 11 大佛岩铝土矿区 Ga 与主要氧化物质量分数相关性图解

Fig.11 Diagram of the correlation between Ga and major oxide mass fractions in Dafoyan bauxite mining area

缓慢减少的变化规律,而从赋矿地层岩性来看,Li 的质量分数铝土岩>铝土矿>黏土岩,显示 Li 元素的富集与铝土岩的关系较为密切。

4.2.3 Li 与主微量元素的相关性

由 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 、A/S 和 Li 质量分数关系图(图 14)可知,Li 在赋矿地层中的富集主要受硅铝及其比值影响。即 Li 和 SiO_2 、 Al_2O_3 之间均呈先正相关后负相关的特征,同时 A/S 最佳值为 1.1~1.8,过高或过低的均不利于 Li 的富集,Li 的质量分数和 TiO_2 质量分数呈正相关。褐铁矿化黏土岩中 Li 质量分数大于含黄铁矿铝土矿,说明 Fe^{3+} 比

Fe^{2+} 对 Li 的赋存状态影响更大^[23]。Li 与微量元素的质量分数相关性(表 4)说明 Li 与 Zr、Mn、V、Sr、Sc 等部分微量组分关联性较微弱,与 REE、Ga、Co 等元素组分无显著相关性,表明 Li 元素的质量分数特征和富集由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、A/S 决定。

4.3 Sc 分布特征

Sc 是一种稀散元素,独立矿物很难看到,仅发现钽铌矿、水磷钽矿和铁硅钽。相关研究表明,在铝土矿石及矿渣中,黏土矿物、铝土矿物及金红石、钛铁矿等副矿物的晶格常赋存有 Sc 元素。Sc 可能以类质同象、离子吸附和超显微结构混入物 3 种形式

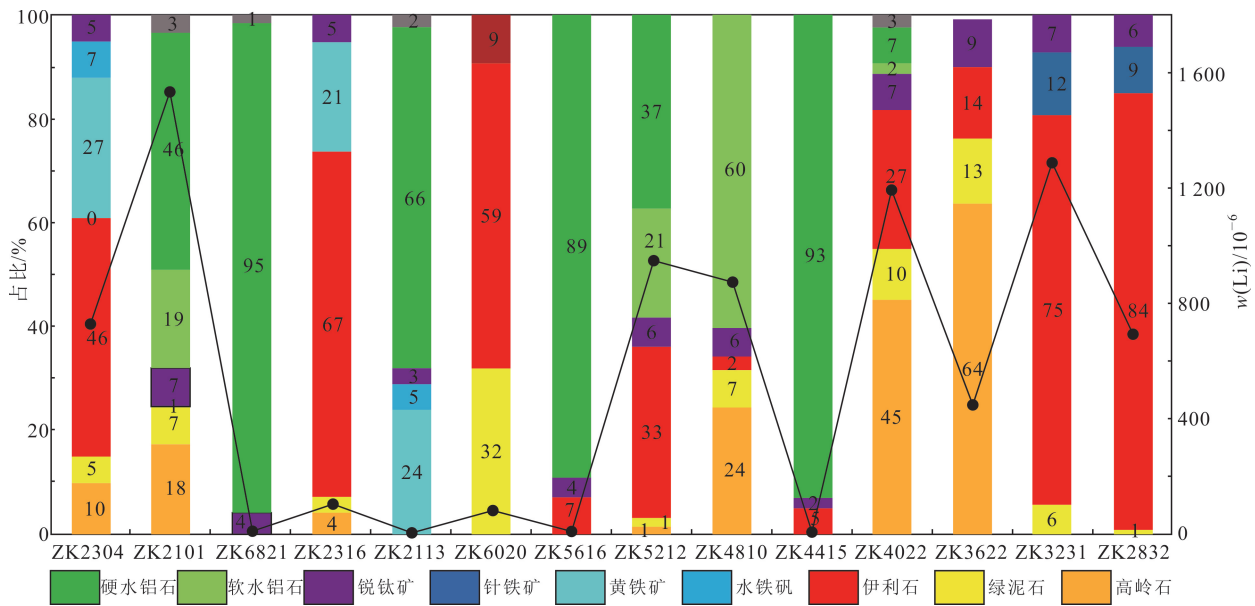


图 12 大佛岩矿区矿物组成与锂元素质量分数关系图

Fig.12 Relationship between mineral composition and lithium content in Dafuyan mining area

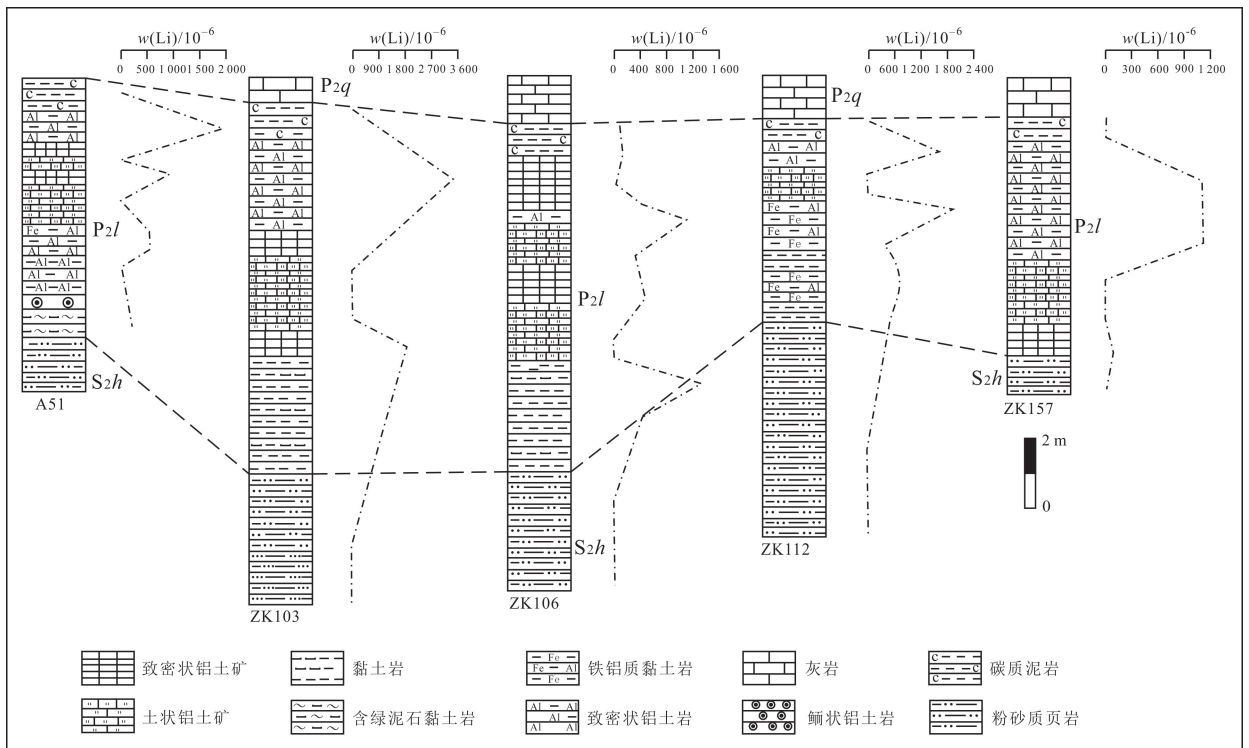


图 13 大佛岩矿区钻孔柱状图中 Li 质量分数变化示意图

Fig.13 Schematic diagram of Li content change in the histogram of boreholes in Dafuyan mining area

赋存于铝矿物、铁矿物及碎屑锆石中^[24]。

大佛岩矿区 Sc 元素在赋矿地层中质量分数和矿体厚度均为不均匀类型,无规律性。致密状铝土矿、黏土岩及粉砂质页岩中 Sc 的质量分数变化系数

较小,豆鲕状铝土岩、灰岩中 Sc 的质量分数变化系数均较大,质量分数最高为碎屑状铝土岩,最低为灰岩。Sc 的地球化学性质与 Al、Fe 和 Mg 相似,赋存状态可能与含铁矿物相关;Sc 与 Sn、Ti、Zr、Nb、

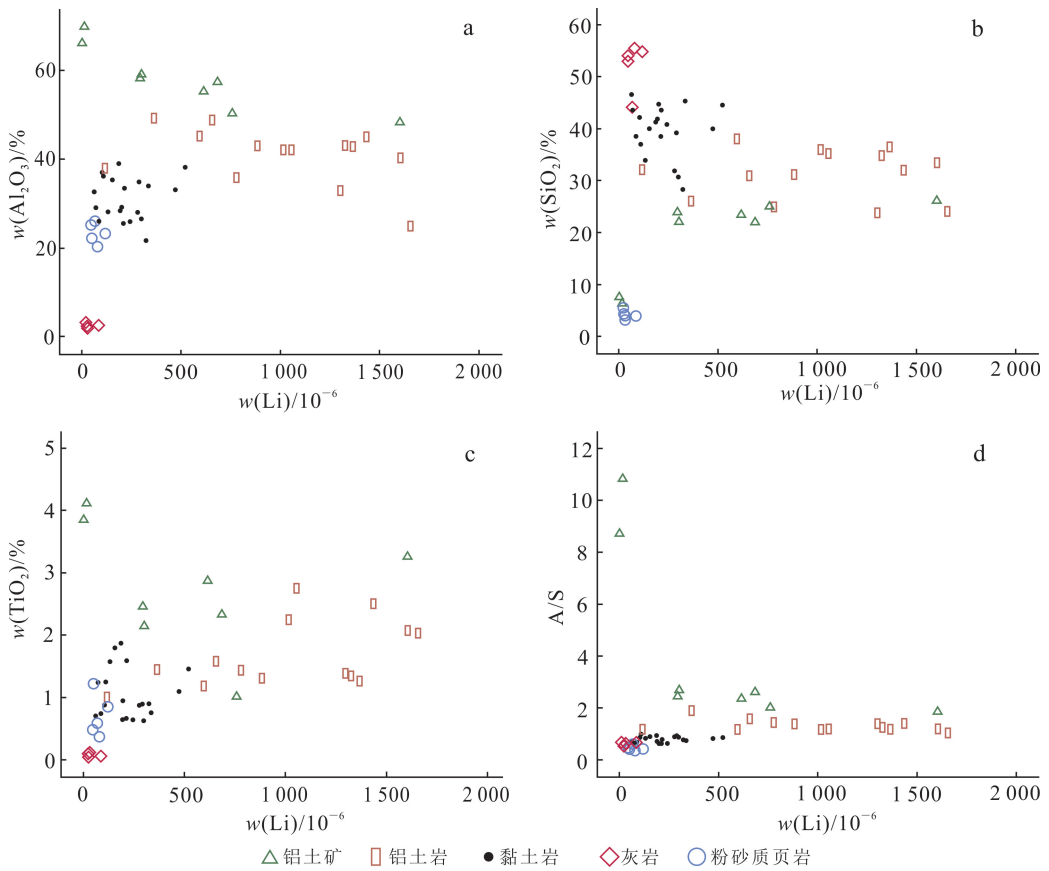


图 14 大佛岩矿区赋矿地层 Li 元素相关性图解

Fig.14 Correlation of Li element in mineral-bearing strata in Dafoyan mining area

表 4 大佛岩矿区赋矿地层 Li 与微量元素质量分数相关性

Table 4 The correlation between Li and trace element mass fraction in the ore bearing strata of Dafoyan mining area

元素	Li	Be	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Mo	Cd	In	Cs	Ba
Li	1	0.12	-0.12	-0.41	-0.07	-0.13	-0.13	0.08	-0.01	0.04	-0.29	0.18	0.02	0.02	-0.09	0.17
元素	Tl	Pb	Bi	Th	U	Nb	Ta	Zr	Hf	Sn	Sb	Ti	W	As	V	Sc
Li	0.07	0.06	-0.22	0.08	0.27	0.00	-0.04	0.32	0.30	0.20	0.10	0.08	0.09	-0.04	0.55	0.22
元素	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	
Li	-0.20	0.04	-0.18	-0.17	-0.11	-0.12	-0.06	0.01	0.01	0.04	0.00	-0.02	-0.03	-0.03	0.08	

Ta、W、In 的原子价和离子半径也相似。因此,Sc 在铝土矿中富集时,受其他性质相似元素干扰,导致 Al 与 Sc 的质量分数并无相关性^[25]。

4.4 稀土元素特征

粉砂质页岩 $w(\Sigma\text{REE})$ 为 $(203.26 \sim 2\ 166.63) \times 10^{-6}$, 平均为 803.25×10^{-6} ; 各类黏土岩 $w(\Sigma\text{REE})$ 为 $(54.90 \sim 2\ 988.20) \times 10^{-6}$, 平均为 618.30×10^{-6} ; 各类铝土岩 $w(\Sigma\text{REE})$ 为 $(22.11 \sim 4\ 169.06) \times 10^{-6}$, 平均为 460.90×10^{-6} ; 灰岩 $w(\Sigma\text{REE})$ 为 $(46.54 \sim 295.35) \times 10^{-6}$, 平均为 187.81×10^{-6} ; 矿

石中 $w(\Sigma\text{REE})$ 为 $(44.72 \sim 425.53) \times 10^{-6}$, 平均为 134.14×10^{-6} 。不同类型的岩石中 $w(\Sigma\text{REE})$ 截然不同,但多数超过文献^[26]统计的全球岩石圈地球稀土元素丰度值 35.78×10^{-6} , 均值自大到小为页岩、黏土岩、铝土岩、灰岩、铝土矿,赋矿地层梁山组的 $w(\Sigma\text{REE})$ 均值则不到 200×10^{-6} 。配分特征上,伴生稀土元素都具有明显的右倾特征,属于轻稀土元素富集型^[27-28],质量分数上沉积型含铝岩系中伴生稀土元素的总稀土元素 $w(\Sigma\text{REE})$ 均值最高^[29]。在地层形成的过程中 Ce 的质量分数可能会产生变

化,一般会使 δCe 与 δEu 形成显著的一致性、 δCe 与 $(\text{Dy}/\text{Sm})_N$ 呈显著负相关、 δCe 与 $w(\Sigma\text{REE})$ 呈显著正相关特征。

矿石中 LREE/LREE 为 2.15~21.02,平均为 6.49;铝土岩 LREE/LREE 为 1.19~134.82,平均为 16.54;黏土岩 LREE/LREE 为 1.28~47.07,平均为 11.35;粉砂质页岩 LREE/LREE 为 1.35~11.97,平均为 7.29;灰岩 LREE/LREE 为 4.04~7.44,平均为 5.07;平均值由大到小依次为铝土岩、黏土岩、页岩、铝土矿、灰岩。

铝土矿矿石中 δCe 为 1.44~5.81,平均为 3.46;粉砂质页岩中 δCe 为 1.69~4.23,平均为 3.03;铝土岩 δCe 为 0.46~5.50,平均为 2.15;黏土岩 δCe 为 0.39~11.37,平均为 3.24;灰岩 δCe 为 0.80~4.39,平均为 1.89。铝土矿矿石和页岩样品 δCe 全部为正异常;铝土岩、黏土岩、灰岩样品 δCe 负异常($\delta\text{Ce}<0.95$)、正常($0.95<\delta\text{Ce}<1.05$)、正异常($\delta\text{Ce}>1.05$)均有分布。

铝土矿矿石中 δEu 为 0.34~0.89,平均为 0.67;铝土岩 δEu 为 0.27~1.03,平均为 0.65;黏土岩 δEu 为 0.19~0.90,平均为 0.64;粉砂质页岩 δEu 为 0.27~0.71,平均为 0.51;灰岩 δEu 为 0.30~1.11,平均为 0.78。大部分岩石中铈存在负异常($\delta\text{Eu}<1$),特别是灰岩中铈负异常较明显。

介质的 pH 值以及含矿岩系铝土矿化程度制约稀土元素富集^[30]。赋矿地层下部 pH 中性—碱性,为稀土元素的富集提供了有利的外部条件。矿石中稀土元素的富集程度与风化程度密切相关,稀土元素的富集部位更容易出现在赋矿地层底部。赋矿地层底部稀土元素富集程度与高岭石、伊利石等黏土矿物的富集程度具有显著的正相关性,多以类质同象形式出现于黏土矿物中。赋矿地层底部因各种地质作用引起稀土元素富集,其也是因素之一。同时研究表明,稀土元素吸附能力与其离子半径成正比,推测 LREE 相对于 HREE 更易为铝土矿中黏土矿物所吸附,这是轻稀土元素在铝土矿中相对富集的主要原因^[31]。

5 可利用性评价

5.1 铝土矿可利用性评价

矿产资源可利用性评价是一项复杂的系统工程,对其影响的因素众多。根据王岩等^[32]将评价指标归纳为 5 个因素:社会需求因素、地理环境因素、

矿床地质因素、矿山企业经营因素和经济因素等,共计 44 个指标。2020 年自然资源部在全国矿产资源国情调查中,明确提出对矿产资源可利用性评价需重点考虑工程建设项目压覆和重要功能区重叠等外部影响因素,矿产资源可利用性初始评价指标为 46 个。

根据专家打分法选取最影响渝南地区铝土矿开发利用的 12 个指标,分别为产业政策、经济效益、压覆情况、选冶难易程度、矿床规模、矿石品位、生态环境影响、开采技术条件、采矿回收率、国内供需、重要功能区重叠和交通条件等。

本次可利用性评价研究采用层次分析法与加权叠加的评价模型。首先,采用层次分析法确定指标权重;其次,采用问卷调查并结合资料综合分析为各评价指标量化赋值;最后,采用加权叠加法对评价指标的权重和赋值进行加权叠加并获得各矿区的评价指数。评价指数越高,铝土矿资源的可利用性越高。计算采用 SPSS 软件进行。层次分析法的基本思想是将决策问题按照总体目标、子目标、评价标准和具体措施的顺序分解为不同的层次;然后用求判断矩阵的特征向量的方法,求出每个层次各要素对前一级的权重;最后使用加权方法递归合并它们,以找到每个指标在总体目标上的权重。

根据建立的评价指标和评价模型,对大佛岩铝土矿资源可利用性进行评价,评价指数为 0.854,为可利用矿区。为了验证大佛岩铝土矿资源可利用性评价结果,对渝东南地区其他 14 个铝土矿区也一并进行了可利用性评价。15 个矿区中无易利用矿区(评价指数 ≥ 0.9),可利用矿区 4 个(评价指数 0.8~0.9),近期难利用矿区 7 个(评价指数 0.6~0.8),难利用矿区 4 个(评价指数 < 0.6)。评价结果和实地调查情况基本一致,说明利用该评价模型进行资源可利用性评价具有一定的科学性。

重庆市铝土矿床整体以低品位铝土矿为主,对矿石选冶加工技术提出了更高要求。目前,我国在低品位铝土矿综合利用技术方面已取得突破^[33],通过活化、浸取、分离和回收等主要工艺技术过程,可使铝土矿中的 Al_2O_3 和 SiO_2 得到分离提取,能够提取满足国家标准的氧化铝和微细硅酸等产品。该项技术可以提高较低铝硅比等低品位矿石的开发利用水平,显著增加可选冶加工的铝土矿资源量,从而使得全国 90% 以上的低铝硅比资源量得以利用。

5.2 Ga、Li、Sc、REE 可利用性评价

大佛岩铝土矿中伴生的主要矿产为耐火黏土和铁矾土等,除此之外,伴生多种有益组分^[8]。晋中、豫西、渝南和黔北等地的沉积型铝土矿伴生丰富的“三稀”资源^[34]。

Ga 无独立的矿床工业指标,一般作为副产品在其他矿种冶炼过程中回收利用,用于消费电子产品和可再生能源应用^[35]。单独矿物极少发现,目前仅发现一种硫铜矿(CuGaS_2)。我国镓矿主要伴生在铝土矿、煤矿和铅锌矿之中,以铝土矿中伴生镓最为重要^[36],接近九成来源于铝土矿^[8]。2021年,中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所开展了铝土矿伴生镓综合评价指标论证,专家建议铝土矿伴生镓综合评价参考指标最低为 0.01%。三水型铝土矿中镓的浸出研究表明,赤泥和循环母液中的镓均具有回收价值^[37]。另外,从赤泥中提取镓的技术逐渐成熟^[38]。大佛岩矿区铝土矿石中 Ga 质量分数为 $(25.60 \sim 115.60) \times 10^{-6}$,平均为 72.67×10^{-6} 。根据矿区多年地质勘查数据,Ga 在铝土矿体中平均品位为 0.008 1%,依此估算 Ga 的潜在矿产资源为 10 955.42 t,具有较好的综合利用前景。

Li 被称为“二十一世纪绿色高能金属”,锂离子电池技术是汽车电气化的关键组成部分^[39]。目前常见的锂矿物和含锂矿物有 20 多种,主要有盐湖卤水型、花岗伟晶岩—碱长花岗岩型及沉积型 3 种矿床类型^[40]。我国铝土矿多数为沉积型,通常富集锂^[41],Al 主要存在于水铝石、高岭石和伊利石中,而 Li 主要存在于黏土矿物中,少量存在于水铝石中。Li 综合利用最低工业指标为 260×10^{-6} 。大佛岩铝土矿样品中 Li 为 $(16.78 \sim 1\ 605.00) \times 10^{-6}$,平均为 915.72×10^{-6} ,Li 质量分数在赋矿地层中变化系数较大,最高为铝土岩,其次为铝土矿。当前受多种因素制约,只在美国、墨西哥等国进行开发利用沉积型伴生锂矿床。国内外实验表明^[42],沉积型伴生锂资源在提取技术上是可行的,因未进行工业化试生产,其试验结果可重复性及经济性不够明确。因此,继续加强工艺矿物学研究,扩大实验室、半工业化或工业选冶试验研究,有望将沉积型伴生锂资源转变为可回收利用的资源,具有较好的综合利用前景。

Sc 的性质与稀土相似,没有独立的矿床类型。在地球化学循环中,已知 Sc 存在于镁铁质和超基性岩石中,而不是长英质岩石中,沉积岩通常表现出非

常低的 Sc 质量分数^[43]。目前国内没有综合利用的工业标准,国外回收最低质量分数为 20×10^{-6} 。根据大佛岩铝土矿赋矿地层 Sc 质量分数为 $(5.70 \sim 82.55) \times 10^{-6}$,平均为 34.01×10^{-6} ,质量分数大都超过了最低回收利用要求。初步选矿试验表明,利用高铁铝土矿焙烧—化学预脱硅—拜尔法工艺,Sc 回收率为 94.4%;利用高硫铝土矿浮选脱硅—浮选脱硅—拜尔法工艺,Sc 回收率为 68%^[25]。上述 2 种方法取得赤泥富含 Sc 元素,再经过选冶加工除杂,可获得 Sc 的高纯氧化物,其选矿回收率通常大于 95%。目前,还有多种方法可以从铝土矿矿渣(赤泥)或废水中提取 $\text{Sc}^{[44-47]}$ 。故而,在矿石选冶加工过程中,应考虑开展半工业—工业试验研究并比选实验方法经济性,研究综合利用伴生 Sc 元素。

V 独立的矿床很少,主要为共伴生矿床,相关类型主要有钒钛磁铁矿矿床、钒钾铀矿矿床、绿硫钒矿—地沥青矿床(独立矿床)和钒铅矿矿床等。攀枝花地区钒钛磁铁矿床是世界最大的钒矿资源产地。 V_2O_5 的最低综合利用工业指标为 0.10%~0.50%^[48]。研究区 V_2O_5 质量分数为 $(143.00 \sim 648.00) \times 10^{-6}$,平均为 416.09×10^{-6} ,均低于工业利用的最低指标,无综合利用价值。

REE 的富集受到碎屑物质风化程度的影响,以及该地区各种沉积岩中残余物质的沉积或再沉积的影响^[49]。含矿岩系中稀土元素和微量元素(如 Ti、Nb、Zr、Hf、Ta 和 Th)均有明显的富集^[50],来自母岩的稀土元素很容易被含有铁的氧化物且高度风化的土壤中的矿物捕获^[51]。目前,可以通过多种方法提取铝土矿矿渣中的稀土元素^[52-55]。REE 工业上目前没有回收利用指标,可参考其他类型稀土矿床回收指标:边界品位, $\omega(\Sigma\text{REE}) > 0.008\%$;工业品位, $\omega(\Sigma\text{REE})$ 为 0.016%~0.020%。本次采集样品中多数未达到要求且 REE 在矿石中的赋存状态不明。

根据分析认为,研究区 Ga、Nb、V 等伴生元素富集程度、分布特征与 Al_2O_3 的富集程度关系较为密切(图 15)。根据山西铝土矿伴生稀有稀土元素的研究,REE、Sc 等元素在赤泥中容易吸附集中,但 Ga、Li、V 等元素在循环母液中容易吸附集中。Ga 已经在铝土矿开发利用中进行了综合利用,通过选冶加工技术实验已经成功提取 Sc、Li 等元素,因选矿成本较高,目前无法规模化、工业化生产。单纯从矿石选冶加工技术而言,Ga、Li、Sc 等伴生元素的综合回收利用是可以实现的。

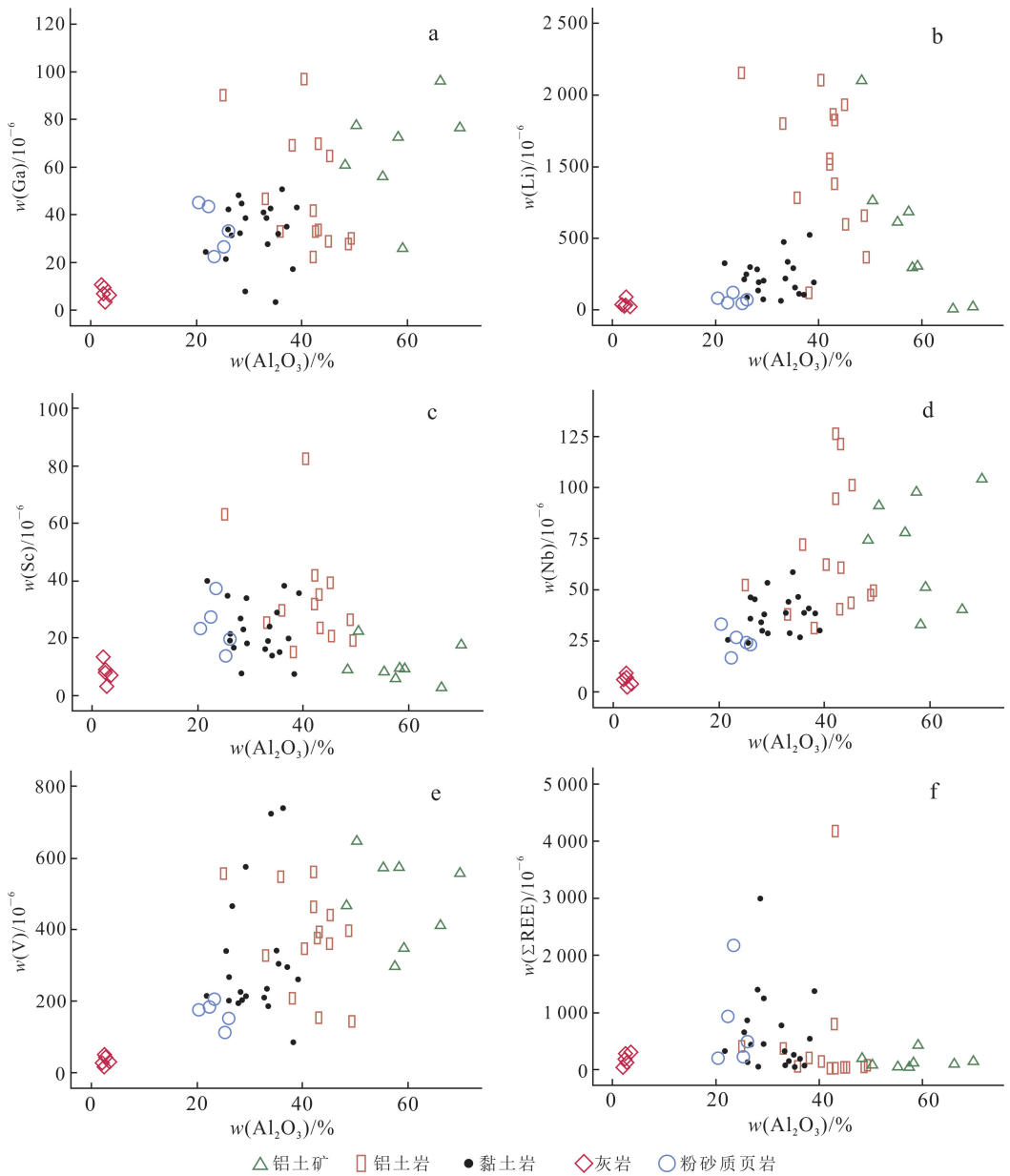


图 15 研究区 Ga、Li、Sc、Nb、V、ΣREE 与 Al₂O₃ 质量分数相关性分析图

Fig.15 Correlation analysis of research area Ga, Li, Sc, Nb, V, ΣREE and Al₂O₃

6 结论

1)研究区处于黔中—渝南成矿带内,为风化壳再沉积型矿床。矿体赋存于韩家店组或黄龙组之上、栖霞组或梁山组之下,铝土矿体沿沉积地层层位分布。铝土矿石主要特点是高品位矿不足、多为低品位矿。

2)大佛岩铝土矿区出现 3 处 Al₂O₃ 高值区和 3 处 Al₂O₃ 低值区,高值区分别出现在矿区北西角、矿区北部及矿区中部,低值区分别出现在矿区西部 2

处和矿区东南角 1 处。在铝土矿体层及顶板、底板的 不同层位 Al₂O₃ 质量分数存在差异,顶板和矿体层的 Al₂O₃ 质量分数明显大于底板岩层。I 号矿体规模最大,总体上较为稳定。Ga 质量分数高值区呈 北东向和近南北向分布,中西部 Ga 质量分数高,北 东部 Ga 质量分数较低。Li 质量分数在梁山组中、 上部最高,最高为致密状铝土矿,其次为铝土岩,土 状铝土矿中相对较低。Li 的富集与铝土岩的关系 较为密切。稀土元素的富集部位更容易出现于赋矿 地层底部。

3)通过构建可利用性评价指标体系,基于层次分析法及加权叠加的评价模型对大佛岩铝土矿资源的可利用性进行评价。本次所建立的评价模型可为铝土矿资源的可利用性评价提供科学参考,同时也可对其他矿产资源的可利用性评价提供借鉴。获得的评价结论不仅可以作为矿山企业建设投资的依据,也能为区域矿产资源规划、调整矿业布局和矿业生产要素合理配置提供理论基础,对促进重庆等地区矿产行业高质量发展亦具有重要的参考价值。当然,对于评价指标的选择和权重的确定,需要根据不同的矿产资源和应用场景进行调整和优化,以便更好地满足实际需求。

4)研究区铝土矿石中伴生有 Ga、Li、Sc 等多种有益元素。在开发利用主矿种 Al_2O_3 时可以同时综合回收 Ga 元素,但 Ga、Li、Sc、REE 元素受选冶技术和选矿成本等因素限制,现阶段综合利用技术上可行但经济性差。因此,在开采主矿种的同时,进行伴生元素和稀土元素的选冶加工实验研究及进一步降低选冶成本,实现经济合理的综合利用对我国紧缺矿种的资源保供工作和资源安全意义重大。

参考文献 (References):

- [1] Zhang Z Z, Jiang G Y, Wang X W, et al. Development and Utilization of the World's and China's Bulk Mineral Resources and Their Supply and Demand Situation in the Next Twenty Years[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2016, 90(4):1370 - 1417.
- [2] Tanvar H, Mishra B. Comprehensive Utilization of Bauxite Residue for Simultaneous Recovery of Base Metals and Critical Elements[J]. *Sustainable Materials and Technologies* Volume, 2022, 33:1279 - 1296.
- [3] 钟海仁, 孙艳, 赵芝, 等. 重庆南川铝土矿物源分析: 碎屑锆石 U - Pb 定年、Hf 同位素和锆石微量元素示踪[J]. *地质学报*, 2020, 94(5): 1505 - 1524.
- Zhong Hairen, Sun Yan, Zhao Zhi, et al. Analysis of Mineral Source of Bauxite in Nanchuan, Chongqing: Clastic Zircon U - Pb Dating, Hf Isotope and Trace Element Tracing of Zircon[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(5):1505 - 1524.
- [4] 李军敏, 陈莉, 徐金沙, 等. 渝南大佛岩矿区铝土矿碎屑锆石中铈的赋存形式研究[J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 630 - 638.
- Li Junmin, Chen Li, Xu Jinsha, et al. Study on the Occurrence form of Scandium in Bauxite Clastic Zircon in Dafoyan Mining Area of Yunan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4):630 - 638.
- [5] 赵晓东, 李军敏, 王涛, 等. 重庆南川—武隆铝土矿 C、O 同位素特征及其地质意义[J]. *金属矿山*, 2013(12): 78 - 80, 84.
- Zhao Xiaodong, Li Junmin, Wang Tao, et al. Isotopic Characteristics of C, O and Its Geological Significance of Chongqing Nanchuan-Wulong Bauxite [J]. *Metal Mine*, 2013(12):78 - 80, 84.
- [6] 陈阳, 尹福光, 李军敏, 等. 南川铝土矿沉积相特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 2012, 32(1): 106 - 112.
- Chen Yang, Yin Fuguang, Li Junmin, et al. Sedimentary Facies Characteristics of Nanchuan Bauxite Deposit [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2012, 32(1):106 - 112.
- [7] 张启明, 江新胜, 秦建华, 等. 黔北—渝南地区梁山组的岩相古地理特征和铝土矿成矿效应[J]. *地质通报*, 2012, 31(4): 558 - 568.
- Zhang Qiming, Jiang Xinsheng, Qin Jianhua, et al. Lithofacies Paleogeographical Characteristics and Bauxite Mineralization Effect of Liangshan Formation in Qianbei-Yunan Area [J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(4):558 - 568.
- [8] 赵晓东, 凌小明, 郭华, 等. 重庆大佛岩铝土矿床地质特征、矿床成因及伴生矿产综合利用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(4): 1086 - 1097.
- Zhao Xiaodong, Ling Xiaoming, Guo Hua, et al. Geological Characteristics, Genesis and Comprehensive Utilization of Associated Minerals of Chongqing Dafoyan Bauxite Deposit[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(4):1086 - 1097.
- [9] Northey S A, Mudd G M, Werner T T. Unresolved Complexity in Assessments of Mineral Resource Depletion and Availability [J]. *Natural Resources Research*, 2018, 27(2):241 - 255.
- [10] 陈阳, 程军, 任世聪, 等. 渝南大佛岩铝土矿伴生铈的分布规律研究[J]. *稀有金属*, 2013, 37(1):140 - 148.
- Chen Yang, Cheng Jun, Ren Shicong, et al. Study on the Distribution Law of Gallium Associated with Bauxite in Dafoyan in Yunan[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2013, 37(1):140 - 148.
- [11] 陈阳. 重庆大佛岩铝土矿沉积微相与岩相古地理研究[D]. 北京:中国地质科学院, 2012.
- Chen Yang. Microfacies and Lithofacies Paleogeography of Chongqing Dafoyan Bauxite Sediment[D]. Beijing:Chinese Academy of Geological Sciences, 2012.

- [12] 刘平,韩忠华,聂坤.黔中—渝南岩溶型铝土矿含矿岩系特征、控制条件及生成发展模式[J].地质论评, 2022, 68(6):2147-2174.
Liu Ping, Han Zhonghua, Nie Kun. Characteristics, Control Conditions and Generative Development Mode of Karst Bauxite Bearing System in Qianzhong-Yunan [J]. *Geological Review*, 2022, 68(6):2147-2174.
- [13] 徐林刚,孙莉,孙凯.中国铝土矿的成矿规律、关键科学问题与研究方法[J].矿床地质, 2023, 42(1): 22-40.
Xu Lingang, Sun Li, Sun Kai. Mineralization Law, Key Scientific Issues and Research Methods of Bauxite in China[J]. *Mineral Deposits*, 2023, 42(1): 22-40.
- [14] 任卫东.顶板不稳固缓倾斜铝土矿低贫损安全高效开采技术研究[D].长沙:中南大学, 2012.
Ren Weidong. Research on Safe and Efficient Mining Technology of Low Poverty and Low Sloping Bauxite with Unstable Roof [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [15] Cao J Y, Wu Q H, Li H, et al. Metallogenic Mechanism of Pingguo Bauxite Deposit, Western Guangxi, China: Constraints from REE Geochemistry and Multi-Fractal Characteristics of Major Elements in Bauxite Ore [J]. *Journal of Central South University*, 2017, 24(7):1627-1636.
- [16] 刘平,韩忠华,廖友常,等.黔中—渝南铝土矿含矿岩系微量元素区域分布特征及物质来源探讨[J].贵州地质, 2020, 37(1): 1-13.
Liu Ping, Han Zhonghua, Liao Youchang, et al. Regional Distribution Characteristics and Material Sources of Trace Elements in Qianzhong-Yunan Bauxite-Bearing Rock System [J]. *Guizhou Geology*, 2020, 37(1):1-13.
- [17] 凌小明,赵晓东,李军汤,等.重庆吴家湾铝土矿矿床地质特征及控矿因素探讨[J].沉积与特提斯地质, 2013, 33(4): 95-99.
Ling Xiaoming, Zhao Xiaodong, Li Juntang, et al. Geological Characteristics and Ore Control Factors of Wujiawan Bauxite Deposit in Chongqing [J]. *Sedimentary and Tethyan Geology*, 2013, 33(4):95-99.
- [18] 刘玉林,程宏伟.我国铝土矿资源特征及综合利用技术研究进展[J].矿产保护与利用, 2022, 42(6):106-114.
Liu Yulin, Cheng Hongwei. Research Progress on Characteristics and Comprehensive Utilization of Bauxite Resources in China [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(6):106-114.
- [19] Yang W, Zhang M, Tao C, et al. Comprehensive Utilization and Sustainable Development of Bauxite in Northern Guizhou on a Background of Carbon Neutralization [J]. *Sustainability Volume*, 2022, 14(21):14301.
- [20] 密静强,陈远荣,于浩,等.广西平果沉积型铝土矿Ga的分布特征与沉积环境关联性探讨[J].地质力学学报, 2022, 28(3):417-431.
Mi Jingqiang, Chen Yuanrong, Yu Hao, et al. Discussion on the Distribution Characteristics of Guangxi Pingguo Sedimentary Bauxite Ga and the Correlation Between Sedimentary Environment [J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(3):417-431.
- [21] 刘英俊,李兆麟,汪东波,等.粤东沿海一带中生代含锡建造的地球化学[J].矿物岩石地球化学通讯, 1986(3):124-125.
Liu Yingjun, Li Zhaolin, Wang Dongbo, et al. Geochemistry of Mesozoic Tin Bearing Formations in the Coastal Areas of Eastern Guangdong [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1986(3): 124-125.
- [22] 金中国,郑明泓,刘玲,等.贵州铝土矿含矿岩系中锂的分布特征及富集机理[J].地质学报, 2023, 97(1):69-81.
Jin Zhongguo, Zheng Minghong, Liu Ling, et al. Distribution Characteristics and Enrichment Mechanism of Lithium in Bauxite-Bearing Rock System in Guizhou [J]. *Acta Geological Sinica*, 2023, 97(1):69-81.
- [23] 钟海仁.重庆南川铝土矿沉积物源及含矿岩系伴生锂赋存状态和富集机理研究[D].北京:中国地质大学(北京), 2020.
Zhong Hairen. Study on Lithium Occurrence State and Enrichment Mechanism Associated with Bauxite Sedimentary Source and Ore-Bearing Rock System in Nanchuan, Chongqing [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [24] 杜茜,唐永永,张世帆,等.贵州铝土矿含铝岩系中关键金属富集特征及资源潜力[J].沉积学报, 2023, 41(5):1512-1529.
Du Lin, Tang Yongyong, Zhang Shifan, et al. Enrichment Characteristics and Resource Potential of Key Metals in the Aluminite-Bearing Rock System in Guizhou [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41

- (5):1512-1529.
- [25] 凌小明, 赵晓东, 李军敏, 等. 车盘向斜南东翼铝土矿矿特征及综合利用前景[J]. 金属矿山, 2014(1): 88-91.
Ling Xiaoming, Zhao Xiaodong, Li Junmin, et al. Characteristics and Comprehensive Utilization Prospect of Bauxite in the South and East Flank of the Car Disc[J]. *Metal Mine*, 2014(1):88-91.
- [26] 赵晓东, 胡昌松, 凌小明, 等. 重庆南川—武隆铝土矿含矿岩系稀土元素特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(6):1691-1701.
Zhao Xiaodong, Hu Changsong, Ling Xiaoming, et al. Characteristics of Rare Earth Elements and Its Geological Significance in Nanchuan-Wulong Bauxite Series, Chongqing [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45 (6):1691-1701.
- [27] 张桓, 陈亚军, 伍宏美, 等. 火山喷发间歇期沉积岩层古沉积环境的地球化学示踪与判别[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(5):1417-1436.
Zhang Huan, Chen Yajun, Wu Hongmei, et al. Geochemical Tracing and Discrimination of Ancient Sedimentary Environments in Sedimentary Rock Layers During Intermittent Volcanic Eruptions [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53 (5): 1417-1436.
- [28] 尚振, 赵超, 支成龙, 等. 鲁西龙宝山稀土矿重稀土矿体的发现及其勘查意义[J]. 地质通报, 2024, 43(增刊 1):484-488.
Shang Zhen, Zhao Chao, Zhi Chenglong, et al. Discovery and Exploration Significance of Heavy Rare Earth Ores in Baoshan Rare Earth Mine, Luxi [J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43 (Sup. 1): 484-488.
- [29] 唐波, 付勇, 龙克树, 等. 中国铝土矿含铝岩系伴生稀土资源分布特征及富集机制[J]. 地质学报, 2021, 95(8):2284-2305.
Tang Bo, Fu Yong, Long Keshu, et al. Distribution Characteristics and Enrichment Mechanism of Rare Earth Resources Associated with Bauxite Bearing Rock System in China [J]. *Acta Geological Sinica*, 2021, 95(8):2284-2305.
- [30] 谷静, 黄智龙, 金中国. 黔北务—正—一道地区新木—宴溪铝土矿含矿岩系底部稀土元素富集机制[J]. 矿物学报, 2021, 41(增刊 1):413-426.
Gu Jing, Huang Zhilong, Jin Zhongguo. Enrichment Mechanism of Rare Earth Elements at the Bottom of Xinmu-Yanxi Bauxite-Bearing Rock System in Qianbeiwu-Zheng-Dao Area [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2021, 41(Sup.1):413-426.
- [31] 黄苑龄, 谷静, 张杰黔, 等. 黔北务—正—一道铝土矿中稀土元素赋存状态[J]. 矿物学报, 2021, 41(增刊 1):454-459.
Huang Yuanling, Gu Jing, Zhang Jieqian, et al. Occurrence Status of Rare Earth Elements in Beiwu-Zheng-Dao Bauxite [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2021, 41(Sup.1):454-459.
- [32] 王岩, 邢树文, 卢烁十, 等. 重要低品位、难选冶金金属矿产可利用性评价[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
Wang Yan, Xing Shuwen, Lu Shuoshi, et al. Evaluation of the Usability of Important Low Grade and Difficult to Select Metallurgical Metal Minerals [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- [33] 高原, 黄培培, 郑绪忠, 等. 渝南地区铝土矿资源可利用性研究[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(1):120-127.
Gao Yuan, Huang Peipei, Zheng Xuzhong, et al. Study on the Usability of Bauxite Resources in the South of Chongqing [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(1):120-127.
- [34] 龙珍, 付勇, 何伟, 等. 贵州新民铝土矿矿床 Li 的地球化学特征与富集机制探究[J]. 矿床地质, 2021, 40(4):873-890.
Long Zhen, Fu Yong, He Wei, et al. Geochemical Characteristics and Enrichment Mechanism of Li in Xinmin Bauxite Deposit in Guizhou [J]. *Mineral Deposit*, 2021, 40(4):873-890.
- [35] Disna E, Zeng X L, Wang Z S, et al. Forecasting the Temporal Stock Generation and Recycling Potential of Metals Towards a Sustainable Future: The Case of Gallium in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689:332-340.
- [36] 罗培麒, 付勇, 唐波, 等. 中国镓矿分布规律、成矿机制及找矿方向[J]. 地球学报, 2023, 44(4):599-624.
Luo Peiqi, Fu Yong, Tang Bo, et al. Distribution Law, Metallogenic Mechanism and Prospecting Direction of Gallium Ore in China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2023, 44(4):599-624.
- [37] 蒋常菊, 雷占昌, 范志平. 某三水型铝土矿中镓和钪的浸出研究[J]. 矿产综合利用, 2024(2):185-189.
Jiang Changju, Lei Zhanchang, Fan Zhiping. Study on the Leaching of Gallium and Scandium in a Certain Trihydrate Bauxite [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024(2): 185-189.
- [38] Huang J, Wang Y B, Zhou G X, et al. Exploring a

- Promising Technology for the Extraction of Gallium from Coal Fly Ash[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2020, 42(6):1-12.
- [39] Hakim I, Danielle A. Availability of Mineral Resources and Impact for Electric Vehicle Recycling in Europe[J]. *Towards a Sustainable Economy*, 2018, 27(1):71-82.
- [40] 高利娥, 曾令森, 赵令浩, 等. 变质改造型关键金属矿: 富集 Li-Rb-Cs-Li-Ga 的云母片岩[J]. *岩石矿物学杂志*, 2023, 42(1):29-46.
- Gao Li'e, Zeng Lingsen, Zhao Linghao, et al. Metamorphic Transformation Type Key Metal Ore: Mica Schist Enriched in Li-Rb-Cs-Li-Ga[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2023, 42(1):29-46.
- [41] Tang B, Fu Y, Yan S, et al. The Source, Host Minerals, and Enrichment Mechanism of Lithium in the Xinmin Bauxite Deposit, Northern Guizhou, China: Constraints from Lithium Isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 141:256-268.
- [42] Han D Z, Peng Z H, Song E W, et al. Leaching Behavior of Lithium-Bearing Bauxite with High-Temperature Bayer Digestion Process in $K_2O-Al_2O_3-H_2O$ System[J]. *Metals*, 2021, 11(7):1123-1148.
- [43] Johannes V, Annelies M, Chiara B, et al. Modes of Occurrences of Scandium in Greek Bauxite and Bauxite Residue[J]. *Minerals Engineering*, 2018, 123:35-48.
- [44] Davris P, Balomenos E, Nazari G, et al. Viable Scandium Extraction from Bauxite Residue at Pilot Scale[J]. *Materials Proceedings*, 2022, 5(1):120-129.
- [45] Napol'skikh J A, Shoppert A A, Loginova I V. The Optimization of Sc Recovery from Red Mud Obtained by Water-Leaching of Bauxite-Sintering Product[J]. *Materials Science Forum*, 2022, 6217:436-441.
- [46] Shoppert A, Loginova I, Napol'skikh J, et al. High-Selective Extraction of Scandium (Sc) from Bauxite Residue (Red Mud) by Acid Leaching with $MgSO_4$ [J]. *Materials*, 2022, 15(4):1327-1343.
- [47] Botelho J A B, Espinosa D C R, Tenório J A S. Selective Separation of Sc(III) and Zr(IV) from the Leaching of Bauxite Residue Using Trialkylphosphine Acids, Tertiary Amine, Tri-Butyl Phosphate and Their Mixtures [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 279(15):89-102.
- [48] 汤艳杰, 贾建业, 刘建朝. 豫西地区铝土矿中镓的分布规律研究[J]. *矿物岩石*, 2002, 22(1):15-20.
- Tang Yanjie, Jia Jianye, Liu Jianchao. Study on the Distribution of Gallium in Bauxite in Western Yuxi Area[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2002, 22(1):15-20.
- [49] Tomašić N, Čobić A, Bedeković M, et al. Rare Earth Elements Enrichment in the Upper Eocene Tošići-Dujici Bauxite Deposit, Croatia, and Relation to REE Mineralogy, Parent Material and Weathering Pattern [J]. *Minerals*, 2021, 11(11):1249-1260.
- [50] Ling K Y, Zhu X Q, Tang H S, et al. Geology and Geochemistry of the Xiaoshanba Bauxite Deposit, Central Guizhou Province, SW China: Implications for the Behavior of Trace and Rare Earth Elements [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, 190:170-186.
- [51] Ali A, Maryam K, Ali A C. Geochemical Characteristics of the Arbanos Karst-Type Bauxite Deposit, NW Iran: Implications for Parental Affinity and Factors Controlling the Distribution of Elements [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 200:249-265.
- [52] Panda S, Costa R B, Shah S S, et al. Biotechnological Trends and Market Impact on the Recovery of Rare Earth Elements from Bauxite Residue (Red Mud)[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 171:105645.
- [53] Deng B N, Li G H, Luo J, et al. Selectively Leaching the Iron-Removed Bauxite Residues with Phosphoric Acid for Enrichment of Rare Earth Elements [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 227:115714.
- [54] Rodolfo M R, Buhle X, Ghania O, et al. Selective Rare Earth Element Extraction Using High-Pressure Acid Leaching of Slags Arising from the Smelting of Bauxite Residue [J]. *Hydrometallurgy*, 2019, 184:162-174.
- [55] Panagiotis D, Efthymios B, Dimitrios P, et al. Selective Leaching of Rare Earth Elements from Bauxite Residue (Red Mud), Using a Functionalized Hydrophobic Ionic Liquid[J]. *Hydrometallurgy*, 2016, 164:125-135.