

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.04.002

# 锂矿石基因特性及其对选矿的影响

肖仪武<sup>1,2</sup>, 王臻<sup>1,2</sup>, 冯凯<sup>1,2</sup>, 王明燕<sup>1,2</sup>, 金建文<sup>1,2</sup>,  
叶小璐<sup>1,2</sup>, 郜伟<sup>1,2</sup>, 权鸿雁<sup>1,2</sup>

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 102628)

**摘要:** 锂是重要的战略性新能源矿产, 锂矿床主要有卤水型、伟晶岩型、花岗岩型、隐爆角砾岩型和黏土型等五种类型。对于后四类固体矿床来说, 因成矿条件及过程的差异, 其矿石基因特性具有明显不同。伟晶岩型锂矿  $\text{Li}_2\text{O}$  品位高, 锂矿物主要为锂辉石、透锂长石、磷锂铝石和锂云母等; 花岗岩型锂矿  $\text{Li}_2\text{O}$  品位通常较低, 但矿床规模大, 锂主要赋存于锂白云母、铁锂云母和锂云母中; 隐爆角砾岩型锂矿  $\text{Li}_2\text{O}$  品位也较高, 矿石中的含锂矿物较单一, 通常为锂云母; 黏土型锂矿中的锂主要赋存在锂的独立矿物(锂绿泥石、羟硼硅钠锂石等)中, 或以类质同象和/或吸附形式赋存于黏土矿物(高岭石、伊利石、蒙脱石等)和一水硬铝石中。矿石中锂的回收利用工艺与锂的赋存状态密切相关。花岗岩型锂矿和黏土型锂矿资源在我国广泛分布, 随着提锂技术的发展, 这两种类型的锂资源具有广阔的开发利用前景。

**关键词:** 锂矿; 矿石基因; 赋存状态; 关键矿产; 工艺矿物学

中图分类号: TD912

文献标志码: A

文章编号: 1671-9492(2024)04-0023-10

## Genetic Characteristics of Lithium Ores and Its Influence on Mineral Beneficiation

XIAO Yiwu<sup>1,2</sup>, WANG Zhen<sup>1,2</sup>, FENG Kai<sup>1,2</sup>, WANG Mingyan<sup>1,2</sup>, JIN Jianwen<sup>1,2</sup>,  
YE Xiaolu<sup>1,2</sup>, GAO Wei<sup>1,2</sup>, QUAN Hongyan<sup>1,2</sup>

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 10060, China;

2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China)

**Abstract:** Lithium is a critical strategic energy metal, and lithium deposits mainly include five types: brine type, pegmatite type, granite type, cryptoexplosive breccia type and clay type. For the latter four solid mineral types of deposits, their ore genetic properties are significantly different due to different mineralization conditions and ore forming processes. Pegmatite type lithium deposits feature high grade of  $\text{Li}_2\text{O}$ , and the lithium minerals mainly are spodumene, petalite, montebrasite and lepidolite. Granite type lithium deposits generally have low grade of  $\text{Li}_2\text{O}$  and large deposit scale, and the lithium minerals mainly include trillithionite, zinnwaldite, and lepidolite. The  $\text{Li}_2\text{O}$  grade of the cryptoexplosive breccia type lithium deposits is relatively high, and the lithium bearing mineral in such deposits is mainly lepidolite. In the clay type lithium deposits, lithium usually forms independent lithium minerals such as cookeite and jadarite, lithium might occur in adsorption and isomorphism states in clay minerals such as kaolintie, illite, montmorillonite and diaspore as well. The recovery and utilization of lithium in the lithium ores is closely related to the occurrence state of lithium. Granite type and clay type lithium deposits are widely distributed in China. With the development of lithium extraction techniques, these two types of lithium resources have promising prospects for further development and utilization.

**Key words:** lithium deposit; genetic ore properties; occurrence state; critical minerals; process mineralogy

收稿日期: 2024-03-29

作者简介: 肖仪武(1965—), 男, 江西上饶人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事工艺矿物学研究及矿产资源可利用性评价。

随着现代科技的不断进步和新兴产业的快速崛起,对关键金属(稀有、稀散、稀土及部分稀贵)矿产的需求也会加速增长<sup>[1-2]</sup>。近年来,在高新产业的带动下,锂行业市场高速发展,锂的战略地位逐渐凸显,世界各国围绕锂的竞争也越来越激烈。美国、欧盟、澳大利亚、日本均将其列为关键矿产,我国也将锂矿列为24种国家战略性矿产资源之一<sup>[3-5]</sup>。锂作为一种核心战略关键金属矿产,其资源高效开发利用技术已成为热点。锂资源按地质成因可划分为卤水型、伟晶岩型、花岗岩型、隐爆角砾岩型和黏土型等五类<sup>[6-8]</sup>。由于成矿条件的不同,不同成因锂矿床在矿石的结构构造、矿物组合、矿物的结晶粒度大小等基因特性方面存在着明显差异,进而对矿石的选别回收产生影响<sup>[9]</sup>。

## 1 花岗伟晶岩型矿床

伟晶岩型锂矿矿石中Li<sub>2</sub>O品位比较高,一般都在1%以上。通常按照锂矿物种类的不同,将伟晶岩型锂矿石分为锂辉石型和锂云母型。锂辉石型锂矿中,矿石中的锂矿物主要为锂辉石,其次为透锂长石、磷锂铝石、锂云母等;主要脉石矿物为长石、石英、白云母,少量磷灰石、绿泥石、高岭石、黑云母等。锂云母型锂矿相比锂辉石型锂矿更少见,其矿石矿

物组成和锂辉石型大致相近,锂矿物主要为锂云母。该类矿石通常具有伟晶结构,有用矿物锂辉石、透锂长石、磷锂铝石、锂云母等的嵌布粒度较粗,粗粒部分可以通过手选回收。一般矿石通过粗磨,有用矿物就能得到充分解离。由于锂辉石比共生的石英、长石等主要脉石矿物密度大一些,对于结晶粒度较粗的锂辉石,可以采用重悬浮液或重介质选矿法使锂辉石成为重矿物产品,而脉石矿物则为轻产品,从而实现锂辉石与伴生脉石矿物的有效分离;细粒部分则可进一步通过浮选回收。锂辉石和透锂长石通常产于伟晶岩的中间带或者核部,两者随温度压力条件的改变可发生相互转换。当温度降低时,透锂长石可以转换为锂辉石和石英集合体,而当压力升高时,锂辉石和石英集合体又可以转换为透锂长石<sup>[13]</sup>。透锂长石的可浮性较差,浮选效果不理想,但其密度相对锂辉石、磷锂铝石、石英和长石更低,因此可考虑先采用重介质选矿方法优先分选透锂长石,然后再对锂辉石进行浮选回收<sup>[14]</sup>。

锂辉石中Li<sub>2</sub>O含量为5.8%~8.1%(表1),磷锂铝石中Li<sub>2</sub>O含量为7.1%~11.5%(表2),当矿石中的锂矿物以锂辉石和磷锂铝石为主时,易于通过选矿方法富集得到高品质的锂精矿(Li<sub>2</sub>O含量6%以上);透锂长石和锂云母中Li<sub>2</sub>O的含量相对较低(表3、4),

表1 锂辉石电子探针成分分析结果

Table 1 EPMA compositions of spodumene

/%

序号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	Rb <sub>2</sub> O	Cs <sub>2</sub> O	Li <sub>2</sub> O*	Total
1	63.83	27.43	—	0.16	0.02	0.02	8.00	99.46
2	64.30	27.61	0.04	—	—	—	7.89	99.84
3	64.04	27.40	0.01	0.22	—	—	8.06	99.73
4	64.58	27.28	0.02	0.30	—	0.02	7.93	100.13
5	64.41	27.58	0.04	—	—	—	8.04	100.07
6	64.03	27.24	0.05	0.58	—	0.01	7.93	99.84
7	64.19	27.54	0.04	—	—	—	8.04	99.81
8	64.20	27.06	0.04	0.61	—	0.01	8.03	99.95
9	64.54	27.57	—	0.07	0.04	—	7.97	100.19
10	64.57	27.69	0.08	0.25	—	0.01	7.96	100.56
11	64.22	27.64	0.05	—	—	—	8.00	99.91
12	63.71	27.37	0.10	0.13	—	0.01	7.97	99.29
13	64.26	27.43	0.04	0.05	0.01	—	8.03	99.82
14	64.18	27.63	0.06	0.04	—	—	8.03	99.94
15	64.34	27.37	0.03	0.18	—	—	7.94	99.86
16	63.90	27.72	0.04	0.01	—	0.01	7.91	99.59
17	63.98	27.63	0.02	0.08	—	0.01	8.03	99.75
18	64.22	27.51	0.03	0.11	—	—	7.85	99.72
19	63.89	27.53	—	0.12	—	—	8.07	99.61
20	64.33	27.48	0.11	0.25	0.01	—	7.95	100.13
21	64.49	26.78	0.05	0.17	0.09	—	7.95	99.53
22	64.05	27.49	0.03	0.09	—	—	8.06	99.72
23	64.15	27.43	0.04	0.17	0.01	—	7.99	99.79

注: \*表示计算结果,下同。

表 2 磷锂铝石电子探针成分分析结果

Table 2 EPMA compositions of montebrasite

/%

序号	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	F	TiO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> O*	H <sub>2</sub> O*	Total
1	50.19	34.28	0.02	1.29	0.05	10.87	4.93	101.64
2	49.96	34.38	0.02	2.82	0.06	10.75	4.45	102.43
3	49.69	34.58	0.01	1.23	0.10	10.58	4.97	101.17
4	50.19	32.99	0.02	1.88	0.03	11.25	5.14	101.49
5	49.93	34.06	0.03	1.30	0.06	10.82	5.05	101.25
6	50.79	34.12	0.01	1.92	0.08	11.17	4.65	102.73
7	49.98	34.03	0.02	2.09	0.03	10.86	4.79	101.79
8	50.52	33.59	0.01	2.28	0.06	11.21	4.75	102.42
9	50.89	33.95	0.03	1.60	0.08	11.26	4.79	102.58
10	49.71	34.15	0.02	3.43	0.04	10.71	4.37	102.44
11	49.78	34.16	0.01	3.30	—	10.74	4.40	102.39
12	50.28	34.17	0.02	0.13	0.01	10.94	5.34	100.89
13	49.72	33.46	0.03	1.76	0.05	10.92	5.13	101.07
14	49.91	34.13	0.02	1.81	0.03	10.80	4.87	101.57
15	49.97	34.15	0.03	3.63	0.07	10.81	4.25	102.91
16	49.73	34.35	0.01	0.72	0.08	10.66	5.20	100.75
17	49.55	33.57	0.02	3.00	0.10	10.81	4.73	101.78
18	49.72	33.91	0.02	3.41	0.04	10.78	4.45	102.33
19	50.84	33.77	0.03	1.27	0.09	11.29	4.96	102.25
20	49.49	33.68	0.03	1.33	0.04	10.75	5.25	100.57
21	49.62	33.79	0.01	3.20	0.01	10.78	4.58	101.99
22	49.55	33.74	0.03	2.89	0.06	10.76	4.71	101.74
23	49.87	33.38	0.03	2.20	0.08	11.00	4.98	101.54
24	49.49	34.13	0.03	2.42	0.01	10.62	4.76	101.45

表 3 透锂长石电子探针成分分析结果

Table 3 EPMA compositions of petalite

/%

序号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	Li <sub>2</sub> O*	Total
1	77.95	16.71	—	0.03	4.84	99.53
2	77.29	16.71	—	—	4.80	98.80
3	78.11	16.63	—	0.03	4.86	99.63
4	78.53	16.65	0.03	0.01	4.88	100.10
5	77.32	16.52	0.01	0.01	4.81	98.67
6	77.05	16.53	—	—	4.79	98.37
7	77.70	16.65	—	—	4.83	99.18
8	77.84	16.69	0.03	0.02	4.84	99.42
9	77.97	16.70	—	—	4.85	99.52
10	76.68	16.50	0.01	—	4.77	97.96
11	77.15	16.62	—	0.02	4.80	98.59
12	77.64	16.49	—	0.01	4.83	98.97
13	77.83	16.59	—	0.01	4.84	99.27
14	77.71	16.67	—	—	4.83	99.21
15	76.95	16.68	0.01	0.01	4.78	98.43
16	77.60	16.67	—	0.03	4.82	99.12
17	78.16	16.68	—	—	4.86	99.70
18	77.62	16.57	—	0.01	4.82	99.02
19	77.28	16.53	—	—	4.80	98.61
20	78.12	16.77	—	—	4.86	99.75

表4 锂云母电子探针成分分析结果

Table 4 EPMA compositions of lepidolite

/%

序号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Rb <sub>2</sub> O	Cs <sub>2</sub> O	ZnO	F	Li <sub>2</sub> O*	H <sub>2</sub> O*	O=F	Total
1	48.58	24.27	0.03	2.15	0.14	0.41	0.13	9.26	2.10	1.02	—	5.87	4.39	1.53	-2.47	97.41
2	49.60	25.40	—	0.33	0.38	—	0.19	9.89	2.11	0.29	0.05	6.74	4.68	1.21	-2.84	98.04
3	50.20	22.64	0.03	2.43	0.15	0.55	0.10	9.27	2.26	1.01	—	6.67	4.85	1.20	-2.81	98.54
4	49.35	23.96	0.06	1.91	0.22	0.16	0.23	9.30	2.18	0.64	0.09	6.76	4.61	1.14	-2.85	97.76
5	49.41	23.61	—	1.75	0.27	0.10	0.15	9.03	2.37	1.27	—	6.76	4.63	1.12	-2.85	97.62
6	49.14	26.22	0.02	1.47	0.14	0.13	0.25	9.61	2.00	0.33	—	5.50	4.55	1.82	-2.31	98.86
7	49.57	23.23	0.02	1.67	0.31	0.15	0.17	9.40	2.02	1.00	0.06	7.36	4.68	0.83	-3.10	97.36
8	48.54	26.33	—	0.31	0.36	—	0.23	9.40	2.18	0.72	0.04	6.12	4.38	1.46	-2.58	97.49
9	49.14	26.22	0.02	1.47	0.14	0.13	0.25	9.61	2.00	0.33	—	5.50	4.55	1.82	-2.31	98.86
10	50.20	22.64	0.03	2.43	0.15	0.55	0.10	9.27	2.26	1.01	—	6.67	4.85	1.20	-2.81	98.54
11	49.14	26.22	0.02	1.47	0.14	0.13	0.25	9.61	2.00	0.33	—	5.50	4.55	1.82	-2.31	98.86
12	48.36	27.73	0.02	0.27	0.28	—	0.18	9.65	1.84	0.63	0.02	5.25	4.33	1.93	-2.21	98.27
13	49.60	25.40	—	0.33	0.38	—	0.19	9.89	2.11	0.29	0.05	6.74	4.68	1.21	-2.84	98.04
14	49.69	24.84	—	0.36	0.34	0.01	0.17	9.60	2.21	0.85	0.08	7.30	4.71	0.91	-3.08	97.99
15	48.80	27.05	—	0.35	0.39	—	0.26	9.73	2.17	0.29	0.03	6.49	4.45	1.35	-2.73	98.63
16	49.60	25.40	—	0.33	0.38	—	0.19	9.89	2.11	0.29	0.05	6.74	4.68	1.21	-2.84	98.04
17	49.69	24.84	—	0.36	0.34	0.01	0.17	9.60	2.21	0.85	0.08	7.30	4.71	0.91	-3.08	97.99
18	49.35	23.96	0.06	1.91	0.22	0.16	0.23	9.30	2.18	0.64	0.09	6.76	4.61	1.14	-2.85	97.76
19	49.02	25.34	—	0.39	0.44	0.01	0.16	9.43	2.30	1.01	0.01	7.12	4.52	0.98	-3.00	97.71
20	48.43	27.92	—	0.27	0.29	—	0.21	9.91	1.93	0.27	—	5.31	4.35	1.92	-2.23	98.56
21	48.37	27.33	0.02	0.30	0.31	—	0.24	9.85	2.17	0.28	0.02	5.85	4.33	1.63	-2.46	98.25
22	48.64	27.48	0.02	0.24	0.26	—	0.24	9.90	1.95	0.29	0.09	5.65	4.41	1.75	-2.38	98.53

当矿石中的锂矿物以透锂长石和锂云母为主时,通过选矿方法所获得锂精矿的品位也相对较低。此外,由于磷灰石的可浮性与磷锂铝石接近,当矿石中含有一定量的磷灰石时,磷锂铝石精矿的 Li<sub>2</sub>O 品位会受到一定影响。锂辉石易于在伟晶岩的后期热液流体交代过程中发生蚀变。随着伟晶岩体系结晶分异作用的进行,体系将从相对酸性的环境演化至富碱金属和碱土金属的偏碱性盐水溶液环境。在碱交代阶段,这种偏碱性流体与原生矿物反应,发生钾化和钠化,同时伴随着原生矿物中 Li<sup>+</sup> 的大量迁移流失,被热液带出而进入围岩中,致使矿石中的 Li<sub>2</sub>O 含量不断降低。由于蚀变程度不同,蚀变矿物组合、化学成分、物理化学性质也存在着规律性变化。蚀变微弱时,基本上以锂辉石残留体为主,仅有少量的白云母、高岭石等蚀变产物沿锂辉石的解理和裂隙产出,锂辉石仍保留其外形,称为“腐锂辉石”。随着蚀变程度的加深,锂被不断带出,腐锂辉石中 Li<sub>2</sub>O 含量不断降低,直接影响到所富集锂精矿的 Li<sub>2</sub>O 品位<sup>[15-16]</sup>。当锂辉石经受深度蚀变时,此时已不存在锂辉石残留体,锂辉石已全部被蚀变为锂绿泥石及其他黏土矿物, Li<sub>2</sub>O 含量更低。

当锂矿石受到严重的热液蚀变或风化时,会产生相当量的绢云母、锂绿泥石、绿泥石和高岭石等,经磨矿后会形成大量的矿泥,恶化浮选环境,增大浮

选分离难度,直接影响锂辉石和锂云母的浮选效果。因此,应采用预先脱泥,再浮选回收锂辉石、锂云母的工艺方案。

## 2 花岗岩型矿床

花岗岩型锂矿的成矿作用具多阶段性的特点。幔源岩浆加热促使下地壳基底发生部分熔融形成初始岩浆,在逐级上升过程中初始岩浆不断发生分异,导致酸性程度逐步升高, Li、Rb、Cs 等稀有金属元素和挥发分随岩浆分异和残余岩浆上侵,逐渐向岩浆房顶部聚集,促成含矿岩浆顶部发生云英岩化,稀有元素进入云母类矿物中,使其富集成矿<sup>[17]</sup>。随着岩浆的分异演化程度不断提高,花岗岩中云母类矿物种属也发生了相应变化,即从岩浆分异的早期至晚期,云母主要由富锂白云母过渡到铁锂云母甚至形成高度富锂的锂云母<sup>[18]</sup>。

该类矿石 Li<sub>2</sub>O 品位较低,一般为 0.2%~0.5%,但通常规模大、采矿难度小,因而呈现出显著的规模效应。矿石中的锂主要赋存于锂白云母、铁锂云母和锂云母中。脉石矿物主要为钠长石、正长石、石英、白云母、黄玉等。矿石一般具有中粒或中-细粒花岗结构,富锂矿物嵌布粒度较粗,在粗磨条件下锂矿物易于单体解离,有利于锂矿物的回收。因矿床受长期的风化蚀变作用,而且云母、长石节理发育,

导致矿石易于泥化,因此选择适宜的磨矿细度尤为重要。磨矿细度过高,会使得锂白云母、铁锂云母粒径急剧减小和石英比表面积增加,导致两者可浮性差异变小;同时微细粒泥质矿物易吸附罩盖于矿物表面,导致矿物间表面性质差异降低,影响捕收剂的捕收效果,不利于锂矿物的回收<sup>[19]</sup>。

锂白云母中Li<sub>2</sub>O含量较低,一般小于2%(表5);因Fe、Mn以类质同象形式进入锂云母矿物中,导致铁锂云母Li<sub>2</sub>O含量偏低(表6),同时使锂云母矿物表面电位增加,可浮性降低,使得其与长石、石英等脉石矿物的分离难度加大。矿石中铁锂云母和锂白云母之间的嵌布关系密切,铁锂云母常以不规则状

表5 锂白云母电子探针成分分析结果

Table 5 EPMA compositions of trilithionite

/%

序号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Rb <sub>2</sub> O	Cs <sub>2</sub> O	ZnO	F	Li <sub>2</sub> O*	H <sub>2</sub> O*	O=F	Total
1	46.16	31.47	0.09	3.48	0.41	0.02	0.65	10.09	0.49	—	0.12	2.38	1.24	3.27	-1.00	98.86
2	45.15	31.28	0.09	3.75	0.43	0.02	0.65	9.86	0.56	0.04	0.11	3.07	1.74	2.90	-1.29	98.35
3	46.38	28.88	0.02	4.38	0.58	0.01	0.36	10.04	0.94	0.08	0.06	3.45	2.03	2.70	-1.45	98.45
4	45.46	31.44	0.04	3.63	0.44	0.01	0.62	10.06	0.59	0.03	0.03	2.81	1.55	3.04	-1.18	98.56
5	44.33	32.85	0.04	2.68	0.35	—	0.66	9.99	0.49	0.02	0.13	2.21	1.13	3.28	-0.93	97.24
6	44.69	31.87	0.09	3.15	0.44	—	0.54	10.06	0.58	0.07	0.09	2.37	1.24	3.20	-1.00	97.36
7	44.86	30.63	0.03	3.29	0.59	0.02	0.66	9.86	0.69	0.01	0.09	3.58	2.13	2.63	-1.51	97.56
8	45.26	31.68	0.03	2.83	0.39	0.01	0.78	9.83	0.57	0.02	0.20	2.90	1.61	2.99	-1.22	97.86
9	45.08	31.62	0.05	3.07	0.43	0.09	0.52	9.99	0.45	—	0.13	2.50	1.33	3.15	-1.05	97.35
10	44.93	31.46	0.03	3.57	0.27	0.01	0.66	9.70	0.61	0.02	0.21	2.68	1.45	3.06	-1.13	97.52
11	45.08	33.42	0.03	1.61	0.42	—	0.55	9.95	0.72	0.01	0.10	2.33	1.21	3.27	-0.98	97.73
12	45.17	30.98	0.04	2.84	0.53	0.34	0.50	9.79	0.67	0.04	0.13	3.20	1.84	2.82	-1.35	97.54
13	44.88	30.23	0.05	4.19	0.47	0.11	0.62	9.86	0.71	0.03	0.13	3.10	1.76	2.84	-1.30	97.67
14	44.86	32.82	0.03	2.38	0.40	0.01	0.55	10.25	0.59	0.08	0.04	2.09	1.05	3.36	-0.88	97.63
15	44.33	32.15	0.06	3.09	0.44	0.02	0.55	10.28	0.53	0.03	0.12	2.54	1.36	3.12	-1.07	97.54
16	45.32	30.99	0.03	3.22	0.51	0.04	0.66	9.81	0.68	0.07	0.13	2.68	1.45	3.06	-1.13	97.52
17	45.13	31.41	0.06	3.41	0.52	—	0.55	9.98	0.72	0.04	0.10	2.54	1.35	3.13	-1.07	97.88

表6 铁锂云母电子探针成分分析结果

Table 6 EPMA compositions of zinnwaldite

/%

序号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Rb <sub>2</sub> O	Cs <sub>2</sub> O	ZnO	F	Li <sub>2</sub> O*	H <sub>2</sub> O*	O=F	Total
1	46.96	0.14	19.53	10.91	1.33	0.04	0.22	9.45	1.65	0.03	0.10	7.50	3.93	0.63	-3.16	99.26
2	43.54	0.13	21.72	12.16	1.66	0.03	0.45	9.24	1.40	0.01	0.13	6.87	2.94	0.83	-2.89	98.22
3	43.77	0.09	21.22	13.93	1.32	0.06	0.40	9.36	1.17	0.01	0.12	6.09	3.01	1.23	-2.56	99.22
4	45.04	0.12	20.75	11.64	1.66	0.02	0.36	9.48	1.20	0.01	0.04	7.51	3.37	0.57	-3.16	98.61
5	41.03	0.28	20.79	17.79	0.93	0.11	0.31	9.44	0.94	0.08	0.07	5.27	2.22	1.49	-2.22	98.53
6	44.29	0.20	20.44	14.03	1.11	0.03	0.13	9.74	1.24	0.05	—	6.65	3.16	0.96	-2.80	99.23
7	44.59	0.01	20.67	13.35	1.02	—	0.28	9.39	1.62	0.04	0.11	7.01	3.25	0.79	-2.95	99.18
8	44.83	0.06	20.47	12.97	1.11	—	0.32	9.32	1.70	0.05	0.13	7.21	3.32	0.71	-3.04	99.16
9	43.51	0.03	20.91	13.94	1.03	0.01	0.31	9.37	1.54	0.01	0.07	6.87	2.93	0.81	-2.89	98.45
10	45.22	0.13	19.94	12.18	1.32	0.03	0.18	9.53	1.42	—	0.16	6.71	3.42	0.93	-2.83	98.34
11	40.67	0.39	20.49	18.92	0.91	0.13	0.28	9.26	0.85	0.04	—	5.22	2.12	1.50	-2.20	98.58
12	41.03	0.28	20.79	17.79	0.93	0.11	0.31	9.44	0.94	0.08	0.07	5.27	2.22	1.49	-2.22	98.53
13	45.22	0.13	19.94	12.18	1.32	0.03	0.18	9.53	1.42	—	0.16	6.71	3.42	0.93	-2.83	98.34
14	47.33	0.18	19.13	10.64	1.79	0.02	0.10	9.76	1.35	0.04	0.06	7.33	4.03	0.73	-3.09	99.40
15	47.41	0.02	18.82	10.53	1.85	0.02	0.09	9.37	1.88	0.06	0.01	7.09	4.05	0.82	-2.99	99.03
16	46.96	0.12	19.48	11.39	1.40	0.03	0.14	9.53	1.67	0.03	0.20	6.71	3.93	1.02	-2.82	99.79
17	44.83	0.06	20.47	12.97	1.11	—	0.32	9.32	1.70	0.05	0.13	7.21	3.32	0.71	-3.04	99.16
18	46.17	0.07	20.16	11.36	1.77	0.03	0.27	9.47	1.32	—	0.06	7.42	3.70	0.66	-3.13	99.33
19	43.54	0.13	21.72	12.16	1.66	0.03	0.45	9.24	1.40	0.01	0.13	6.87	2.94	0.83	-2.89	98.22
20	47.60	0.08	19.01	10.54	1.84	0.01	0.11	9.77	1.22	0.06	0.07	7.52	4.11	0.64	-3.17	99.41
21	45.89	0.18	20.04	11.43	1.50	0.03	0.29	9.44	1.48	0.02	0.09	7.47	3.62	0.61	-3.15	98.94
22	43.77	0.09	21.22	13.93	1.32	0.06	0.40	9.36	1.17	0.01	0.12	6.09	3.01	1.23	-2.56	99.22

沿着锂白云母颗粒边缘或裂隙交代,构成粗粒的云母片状、聚片状集合体(图1),从而有利于矿石中锂的回收。由于岩浆分异程度的差异,不同矿床矿石中铁锂云母与锂白云母的矿物量之比值也有所变化,对锂精矿品质会造成影响。若矿石中的锂矿物主要为锂白云母,那么通过浮选获得的锂精矿  $\text{Li}_2\text{O}$

品位就难以达到 2%;而若以铁锂云母为主,则锂精矿  $\text{Li}_2\text{O}$  品位有可能超过 3%。当矿石中铁锂云母、锂白云母含量差异不大时,若锂白云母  $\text{Li}_2\text{O}$  含量很低( $<0.3\%$ ),可以考虑先浮选铁锂云母、锂白云母,再对锂粗精矿适当磨矿后采用强磁选分选铁锂云母,以便提高锂精矿  $\text{Li}_2\text{O}$  品位。

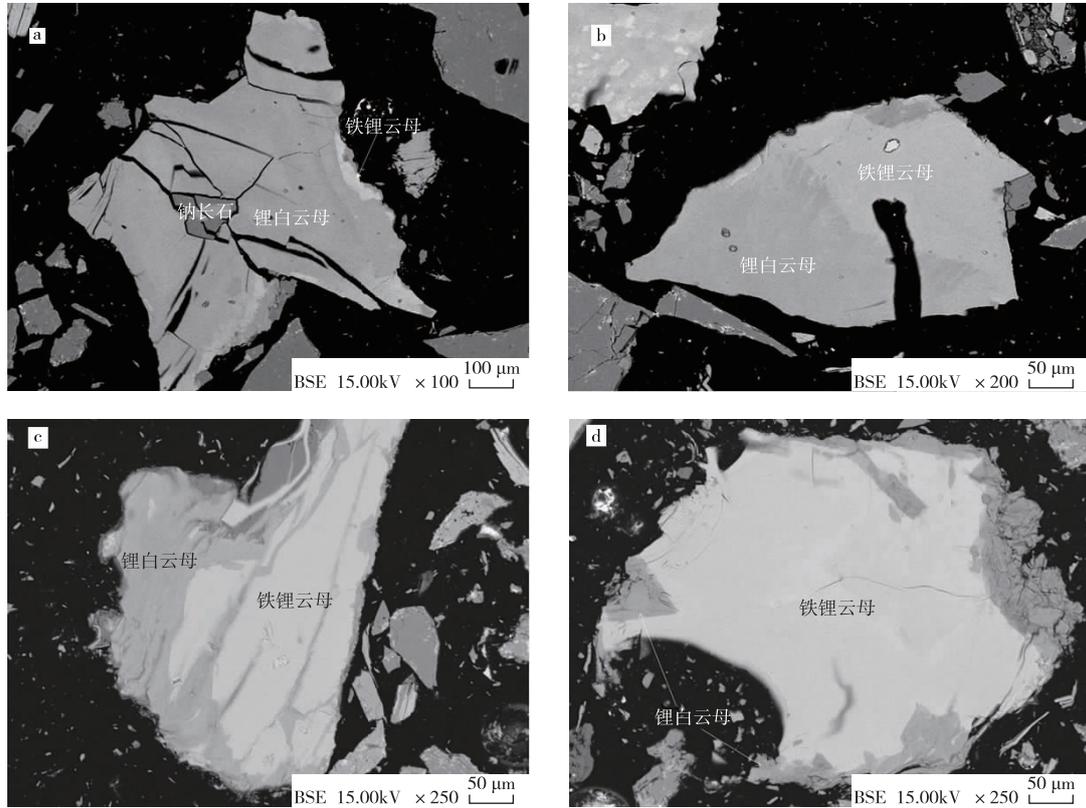


图1 铁锂云母沿着边缘和裂隙交代锂白云母

Fig. 1 The trilithionite replaced by zinnwaldite along the edges and cracks

### 3 隐爆角砾岩型矿床

隐爆角砾岩型锂矿产于热液隐爆角砾岩筒内。从深部高演化高分异含矿岩浆中分离出的富挥发分流体逐渐向上运移,并富集在岩体顶部的裂隙与岩体破碎带中,当压力达到临界时发生爆裂形成局部破碎带。在多次反复的作用下最终形成了大规模的隐爆角砾岩筒,同时在震碎角砾岩带和爆破角砾岩带中形成云英岩型锂铷等稀有元素矿床<sup>[20-21]</sup>。我国内蒙古维拉斯托锂矿属于此类型。

该类矿石中含锂矿物比较单一,主要为锂云母。矿石中矿物种类较多,金属矿物的含量较低,主要为锡石、黑钨矿、辉钼矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、黝铜矿、黄铜矿、方铅矿和毒砂等;非金属矿物主要为

石英,其次为斜长石、黄玉、黑云母、钠长石、钾长石、萤石、绿泥石和透辉石,少量萤石、透闪石、高岭石、方解石等(表7)。锂云母一方面呈浸染状分布在细粒花岗岩中,另一方面呈线脉状、网格状的“锂云母脉”出现在花岗岩体外侧的角砾岩筒中。

矿石中锂云母绝大部分以鳞片状集合体的形式聚合在一起(图2);部分锂云母与黑云母嵌布关系较为紧密,两者常紧密毗邻嵌布(图3)。锂云母的嵌布粒度较粗,通过浮选可以得到较好的回收。值得注意的是,矿石中还存在一定量的黑云母和绿泥石,这些矿物本身不含锂,且易在浮选过程中进入到锂精矿,从而影响锂精矿  $\text{Li}_2\text{O}$  含量的提高。因此,需要在浮选锂云母的过程中强化对黑云母和绿泥石的抑制。

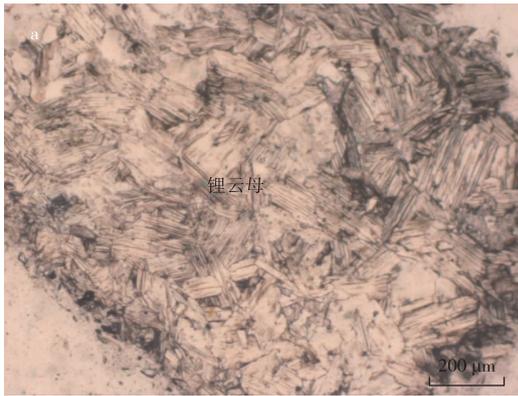


图2 锂云母以鳞片状集合体的形式分布

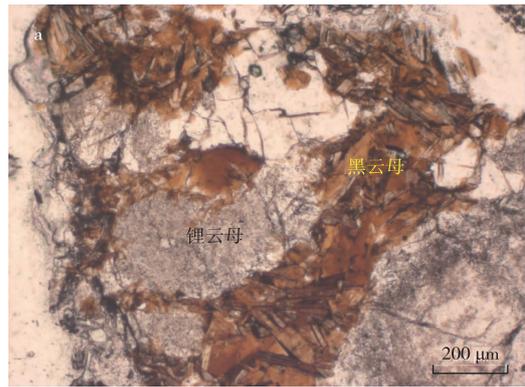


图3 锂云母与黑云母紧密嵌布

Fig. 2 The lepidolite distributed as a scaly aggregate

Fig. 3 The lepidolite closely interwoven with biotite

表7 维拉斯托锂矿石的矿物组成

Table 7 The mineral composition of the Weilasituo lithium ore

/%

矿物名称	含量	矿物名称	含量
锂云母	32.4	石英	27.36
黄铜矿	0.03	斜长石	7.15
闪锌矿	0.16	黄玉	6.89
锡石	0.06	黑云母	6.87
毒砂	0.04	钠长石	6.11
臭葱石	0.17	钾长石	4.92
褐铁矿	0.05	萤石	2.9
黄铁矿	0.03	绿泥石	1.57
金红石	0.31	透辉石	1.2
高岭石	0.52	透闪石	0.75
方解石	0.14	其他	0.29
磷灰石	0.08		

#### 4 富锂黏土型矿床

火山凝灰岩、岩浆岩和黏土岩等富锂基底岩石经受强烈的风化作用下发生分解,使得一部分锂从矿物中释出,以  $\text{Li}^+$  与卤素元素形成可溶性盐(如  $\text{LiCl}$ )而被水带走。在这一过程中,锂很容易被风化过程中形成的黏土矿物吸附,同时  $\text{Li}^+$  又易于与  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  产生的类质同象置换,因此导致黏土质土壤中的锂含量较高,形成富锂黏土型矿床<sup>[22-23]</sup>。黏土型锂矿根据成因不同,分为火山岩黏土型锂矿、碳酸盐黏土型锂矿和贾达尔锂矿。黏土型锂矿中锂的赋存状态主要有锂的独立矿物(锂绿泥石、羟硼硅钠锂石等),类质同象和/或吸附于黏土矿物(高岭石、伊利石和蒙脱石等)和一水硬铝石中。不同黏土型锂矿中锂的赋存状态存在差异。塞尔维亚的贾达尔(Jadar)锂矿熔矿岩系为一套湖相火山—沉积岩系,矿石矿物为含锂独立矿物—羟硼硅钠锂石  $[\text{NaLiSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})]$ ,该矿物  $\text{Li}_2\text{O}$  含量高达 7.3%。该矿床平均  $\text{Li}_2\text{O}$  品位为 1.8%,是迄今发现的品位

最高的黏土型锂矿床。由于黏土矿物为层状硅酸盐矿物,密度小、粒度细,因此可以通过重选富集羟硼硅钠锂石<sup>[24]</sup>。另两类黏土型锂矿中锂主要赋存在锂绿泥石、高岭石、伊利石、一水硬铝石和蒙脱石中(表8、图4~6)。

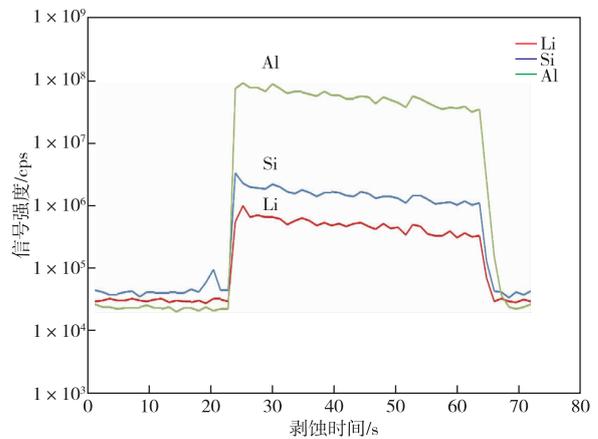


图4 高岭石 LA-ICPMS 时间分辨信号谱图

Fig. 4 The LA-ICPMS time-resolved signal spectra of kaolinite

表 8 锂绿泥石电子探针成分分析结果

Table 8 EPMA compositions of cookeite

/%

序号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	Li <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	Total
1	38.41	41.33	0.39	0.27	1.36	0.41	2.34	0.1	2.6	12.29	99.5
2	39.53	40.46	0.45	0.21	1.06	0.46	3.03	0.1	2.58	11.94	99.83
3	38.49	41.21	0.3	0.32	1.77	0.33	2.12	0.16	2.61	12.4	99.71
4	37.88	41.94	0.14	0.29	1.31	0.36	2.07	0.07	2.62	12.41	99.1
5	37.82	41.73	0.19	0.29	1.29	0.31	1.93	0.16	2.6	12.35	98.65
6	39.31	40.98	0.13	0.29	1.2	0.27	2.91	0.13	2.6	12.1	99.93
7	38.49	41.21	0.3	0.32	1.77	0.33	2.12	0.16	2.61	12.4	99.71
8	37.88	41.94	0.14	0.29	1.31	0.36	2.07	0.07	2.62	12.41	99.1
9	38.35	42.01	0.23	0.25	1.3	0.31	1.84	0.12	2.65	12.43	99.48
10	39.53	40.46	0.45	0.21	1.06	0.46	3.03	0.1	2.58	11.94	99.83
11	38.67	40.16	0.1	0.37	1.82	0.33	2.51	0.11	2.53	12.09	98.68
12	38.75	40.95	0.66	0.21	0.93	0.66	2.8	0.13	2.58	12.07	99.74
13	39.25	40.17	0.5	0.28	1.25	0.43	3.35	0.13	2.55	11.95	99.86
14	39.25	40.17	0.5	0.28	1.25	0.43	3.35	0.13	2.55	11.95	99.86
15	38.9	40.2	0.18	0.37	1.83	0.58	2.48	0.11	2.55	12.13	99.32
16	37.84	40.9	0.23	0.39	2.19	0.33	1.87	0.14	2.57	12.47	98.93
17	37.84	40.9	0.23	0.39	2.19	0.33	1.87	0.14	2.57	12.47	98.93
18	36.15	42.73	0.74	1.27	1.67	0.09	0.42	0.13	2.66	13.07	98.92
19	37.18	42.01	1.11	0.64	1.69	0.08	0.73	0.04	2.65	12.81	98.93
20	36.02	42.02	0.19	1.12	2.86	0.12	0.64	0.15	2.61	13.16	98.9
21	37.05	42.84	0.27	0.95	1.49	0.08	0.75	0.13	2.68	12.88	99.11
22	39.25	39.44	1.1	0.45	1.01	0.75	2.3	0.04	2.51	11.8	98.63
23	37.51	40.53	0.05	0.64	2.09	0.57	2.35	0.07	2.52	12.34	98.67
24	35.5	42.92	0.5	0.86	2.08	0.09	0.35	0.07	2.64	13.14	98.15
25	35.43	41.32	1.32	1.29	2.12	0.07	0.73	0.13	2.55	12.94	97.89

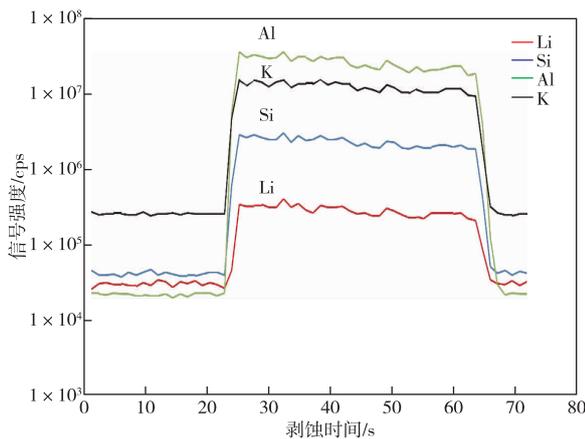


图 5 伊利石 LA-ICPMS 时间分辨信号谱图  
Fig. 5 The LA-ICPMS time-resolved signal spectra of illite

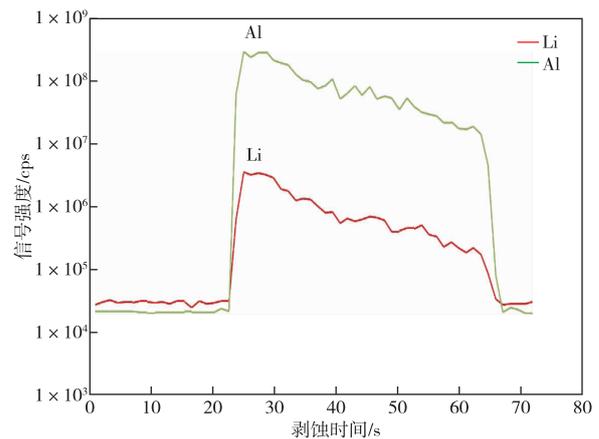


图 6 一水硬铝石 LA-ICPMS 时间分辨信号谱图  
Fig. 6 The LA-ICPMS time-resolved signal spectra of diaspore

尽管锂绿泥石中 Li<sub>2</sub>O 含量要比其他矿物高,但由于锂绿泥石与高岭石、伊利石、一水硬铝石等矿物紧密嵌布在一起,且它们易浮易泥化,在浮选过程中会产生夹带、吸附以及罩盖作用,恶化浮选环境,很难通过选矿方法有效分离。表 9 为不同矿床样品的矿物组成,随着矿石中锂绿泥石、高岭石、伊利石、一水硬铝石等易浮易泥化矿物含量的减少,和石英、长

石、方解石等矿物含量相应的增加,才能通过选矿方法有效提升矿石的锂富集比。表 8 中 A、B、C、D 样品石英、方解石等矿物含量较低, Li<sub>2</sub>O 很难通过选矿进行有效富集,锂品位提高难度大;E 样品可以提高一定的 Li<sub>2</sub>O 品位,但效果也不理想;只有 F 样品通过选矿分离较高含量的石英、方解石等矿物,实现 Li<sub>2</sub>O 的有效富集。

表9 不同黏土型锂矿石样品的矿物组成及含量

Table 9 The mineral composition and content of different clay type lithium ores

/%

矿物名称	A	B	C	D	E	F
锂绿泥石	—	16.73	9.19	11.23	20.09	19.85
伊利石	13.97	43.58	24.78	57.67	17.67	2.23
高岭石	59.56	10.18	16.77	21.04	25.32	4.52
一水硬铝石	11.31	19.02	28.51	4.78	—	—
一水软铝石	2.18	3.92	12.66	2.26	—	—
绿泥石	8.23	—	—	—	—	—
褐铁矿	3.41	3.51	4.32	2.08	6.75	1.06
金红石	0.55	1.42	1.21	0.34	0.15	0.55
石英	0.15	0.68	1.53	0.18	20.99	33.79
长石	0.25	—	—	—	0.93	1.68
方解石	0.30	0.62	0.68	0.27	7.79	36.07
其他	0.09	0.34	0.35	0.15	0.31	0.25

## 5 结论与展望

当前,随着全球新能源产业的蓬勃发展,锂资源供给和需求快速增长。我国作为全球第一大锂资源消费国,国内锂资源供给不足,对外依存度高。花岗岩型锂矿和黏土型锂矿是锂矿重要成因类型,在我国分布范围广,资源潜力巨大,但存在矿石中  $\text{Li}_2\text{O}$  含量低、经济性差的问题。为了此类矿产资源的经济高效开发利用,更应重视源头基础性的矿石基因特性,尤其是锂的赋存状态研究,探索最优回收利用方案,以期缓解我国锂产业发展长期面临的资源紧缺状况,继而从根本上保障国家资源安全。

### 参考文献

- [1] 翟明国,吴福元,胡瑞忠,等. 战略性关键金属矿产资源:现状与问题[J]. 中国科学基金,2019,33(2):106-111.  
ZHAI Mingguo, WU Fuyuan, HU Ruizhong, et al. Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(2): 106-111.
- [2] 李文昌,李建威,谢桂青,等. 中国关键矿产现状、研究内容与资源战略分析[J]. 地学前缘,2022,29(1):1-13.  
LI Wenchang, LI Jianwei, XIE Guiqing, et al. Critical minerals in China: current status, research focus and resource strategic analysis[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(1): 1-13.
- [3] 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1189-1209.  
WANG Denghong. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1189-1209.
- [4] 陈甲斌,霍文敏,冯丹丹,等. 中国与美欧战略性(关键)矿产资源形势分析[J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(8): 9-17.  
CHEN Jiabin, HUO Wenmin, FENG Dandan, et al. Analysis of strategic (critical) mineral resources situation in China and the U. S. and the EU[J]. Natural Resource Economics of China, 2020, 33(8): 9-17.
- [5] 田郁溟, 琚宜太, 周尚国. 我国战略矿产资源安全保障若干问题的思考[J]. 地质与勘探, 2022, 58(1): 217-228.  
TIAN Yubin, JU Yitai, ZHOU Shangguo. Thinking on several problems of China's strategic mineral resources security guarantee[J]. Geology and Exploration, 2022, 58(1): 217-228.
- [6] 王核, 黄亮, 白洪阳, 等. 中国锂资源的主要类型、分布和开发利用现状: 评述和展望[J]. 大地构造与成矿学, 2022, 46(5): 848-866.  
WANG He, HUANG Liang, BAI Hongyang, et al. Types, distribution, development and utilization of lithium mineral resources in China: review and perspective[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2022, 46(5): 848-866.
- [7] 刘雪, 王春连, 刘学龙, 等. 中国锂矿床主要类型特征、分布情况及开发利用现状[J/OL]. 中国地质, <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.p.20231109.1643.002>.  
LIU Xue, WANG Chunlian, LIU Xuelong, et al. Main types, distribution, development and utilization of lithium deposits in China[J/OL]. Geology in China, <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.p.20231109.1643.002>.
- [8] 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 等. 中国锂资源的主要类型、分布和开发利用现状: 评述和展望[J]. 地质力学学报, 2022, 28(5): 743-764.  
WANG Denghong, DAI Hongzhang, LIU Shanbao, et al. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(5): 743-764.
- [9] 孙传尧, 周俊武, 贾木欣, 等. 基因矿物加工工程研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(1): 1-7.  
SUN Chuanyao, ZHOU Junwu, JIA Muxin, et al. Research on genetic mineral processing engineering[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(1): 1-7.

- [10] 孙文礼,马叶情,宋庆伟. 中国花岗伟晶岩型锂矿特征和研究进展[J]. 地质与勘探,2021,57(3):478-496.  
SUN Wenli, MA Yeqing, SONG Qingwei. Characteristics and research progress of granitic pegmatite type lithium deposits in China[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(3):478-496.
- [11] 胡晓君,李欢. 花岗伟晶岩型锂矿床研究进展及展望[J]. 中国有色金属学报,2021,31(11):3468-3488.  
HU Xiaojun, LI Huan. Research progress and prospect of granitic pegmatite-type lithium deposits [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3468-3488.
- [12] 王建国,邢佳,宋振国,等. 我国典型锂矿床类型、分布特征及资源利用探讨[J]. 有色金属工程,2021,11(11):1-9.  
WANG Jianguo, XING Jia, SONG Zhenguo, et al. Discussion on the types, distribution characteristics and resource utilization of typical lithium deposits in China[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(11): 1-9.
- [13] 刘强,李鹏,严清高,等. 花岗伟晶岩中锂辉石和透锂长石产出特征及其形成条件[J]. 岩石学报,2023,39(7):2138-2152.  
LIU Qiang, LI Peng, YAN Qinggao, et al. The occurrence characteristics and formation conditions of spodumene and petalite in granitic pegmatite[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(7): 2138-2152.
- [14] 邓星星,殷志刚. 非洲某含透锂长石伟晶岩锂辉石矿综合回收锂的选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(5):87-92.  
DENG Xingxing, YIN Zhigang. Experimental study on comprehensive recovery of lithium from spodumene ore containing petalite pegmatite in Africa[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2023(5):87-92.
- [15] 孙志健,于洋. 某含腐锂辉石的难选锂辉石矿选矿试验研究[J]. 有色金属工程,2021,11(11):29-33.  
SUN Zhijian, YU Yang. Processing research on a refractory spodumene ore containing cymatolite [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(11): 29-33.
- [16] 钱志博,于洋,周少珍. 泥质化蚀变型锂辉石矿选别工艺研究[J]. 中国矿业,2020,29(增刊2):318-323.  
QIAN Zhibo, YU Yang, ZHOU Shaozhen. Study on separation technology of the argillaceous altered ore containing spodumene [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(Suppl. 2): 318-323.
- [17] 郭春丽,张斌武,郑义,等. 中国花岗岩型锂矿床:重要特征、成矿条件及形成机制[J]. 岩石学报,2024,40(2):347-403.  
GUO Chunli, ZHANG Binwu, ZHENG Yi, et al. Granite-type lithium deposits in China: important characteristics, metallogenic conditions, and genetic mechanism [J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(2): 347-403.
- [18] 龚敏,吴俊华,季浩,等. 赣西大港花岗岩型锂矿床锂赋存状态及成岩成矿年代学[J]. 地球科学,2023,48(12):4370-4386.  
GONG Min, WU Junhua, JI Hao, et al. Occurrence of lithium and geochronology of magmatism and mineralization in Dagang granite-associated lithium deposit, west Jiangxi province[J]. Earth Science, 2023, 48(12): 4370-4386.
- [19] 周贺鹏,张永兵,雷梅芬,等. 江西宜春高铁锂云母矿浮选分离试验研究[J]. 非金属矿,2019,42(4):64-67.  
ZHOU Hepeng, ZHANG Yongbing, LEI Meifen, et al. Flotation separation test of zinnwaldite in Yichun of Jiangxi[J]. Non-Metallic Mines, 2019, 42(4): 64-67.
- [20] 李泊洋,姜大伟,付旭,等. 内蒙古维拉斯托矿区锂多金属矿床地质特征及找矿意义[J]. 矿产勘查,2018,9(6):1185-1191.  
LI Boyang, JIANG Dawei, FU Xu, et al. Geological characteristics and prospecting significance of Weilasituo lithium polymetallic deposit, Inner Mongolia [J]. Mineral Exploration, 2018, 9(6): 1185-1191.
- [21] 陈新凯,周振华. 大兴安岭锂-铍-铌-钽等关键金属矿床类型、成矿规律与资源展望[J]. 岩石学报,2023,39(7):1973-1991.  
CHEN Xinkai, ZHOU Zhenhua. Deposit types, metallogenesis and resource prospect of Li-Be-Nb-Ta deposits in the Great Xing'an Range [J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(7): 1973-1991.
- [22] 王微,蒋少涌,葛文,等. 湖相沉积黏土型锂矿主要地质特征及成因[J/OL]. 矿物岩石地球化学通报,2024. DOI:10.3724/j.issn.1007-2802.20240001.  
WANG Wei, JIANG Shaoyong, GE Wen, et al. Geological characteristics and genetic mechanism of the lacustrine sedimentary clay type lithium deposit [J/OL]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2024. DOI:10.3724/j.issn.1007-2802.20240001.
- [23] 张七道,蒋少涌,王微,等. 铝土岩系和煤系地层中沉积黏土型锂矿床:研究现状与展望[J/OL]. 矿物岩石地球化学通报,2024. DOI:10.3724/j.issn.1007-2802.20240006.  
ZHANG Qidao, JIANG Shaoyong, WANG Wei, et al. Current status and prospect of researches on sediment-hosted Li deposits in bauxite formations and coal-bearing strata in China[J/OL]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2024. DOI: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240006.
- [24] 朱丽,顾汉念,杨永琼,等. 黏土型锂矿资源提锂工艺研究进展[J]. 轻金属,2020(12):8-13.  
ZHU Li, GU Hainian, YANG Yongqiong, et al. Research progress of lithium extraction from clay-type lithium ore resources[J]. Light Metals, 2020(12): 8-13.