

## 格陵兰岛稀土资源潜力分析

叶亚康<sup>1,2</sup>, 陈伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 四川 成都 610041)

**摘要:** 格陵兰岛目前已发现包括世界第二大稀土矿 Kvanefjeld 矿在内的 14 个稀土矿床, 这些稀土矿床的地质背景各不相同, 成矿年龄跨度很大。根据矿床成因类型可以划分为与碱性岩有关的稀土矿、与碳酸岩有关的稀土矿、铁氧化物铜-金 (IOCG) 型稀土矿、与伟晶岩有关的稀土矿以及砂矿 5 类。对格陵兰岛 40 个稀土资源潜力区域进行成矿条件分析, 结合有利成矿地质条件对潜力区进行了赋值评价。总结可凡湾稀土矿床的放射性、地球化学、遥感热红外、重砂等多种综合异常信息, 在 Garder 碱性岩省圈定了 4 处稀土成矿远景区。格陵兰岛南部的碱性岩省是发现稀土矿床最有潜力的区域, 西部的碳酸岩区和东部碱性岩区也具备稀土找矿前景。

**关键词:** 格陵兰岛; 稀土; 资源潜力; 碱性岩型; 碳酸岩型

doi:10.12476/kczhly.202411110298

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 04-0065-11

**引用格式:** 叶亚康, 陈伟. 格陵兰岛稀土资源潜力分析[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(4): 65-75.

YE Yakang, CHEN Wei. Potential analysis of rare earth resources in greenland[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(4): 65-75.

稀土是宝贵的战略资源, 有“工业味精”、“新材料之母”之称, 广泛应用于尖端科技领域和军工领域。目前稀土应用于永磁、发光、储氢、催化等功能材料, 已是先进装备制造业、新能源、新兴产业等高新技术产业不可缺少的原材料, 此外还广泛应用于电子、石油化工、冶金、机械、新能源、轻工、环境保护、农业等领域<sup>[1]</sup>。

据美国地质调查局 (2024) 发布的数据, 全球稀土 2023 年储量分布为: 中国  $4.4 \times 10^7$  t, 越南  $2.2 \times 10^7$  t, 巴西  $2.1 \times 10^7$  t, 俄罗斯  $1 \times 10^7$  t, 印度  $6.9 \times 10^6$  t, 澳大利亚  $5.7 \times 10^6$  t, 美国  $1.8 \times 10^6$  t, 格陵兰岛  $1.5 \times 10^6$  t, 南非、坦桑尼亚和加拿大均  $<1 \times 10^6$  t; 全球稀土 2023 年产量分布为: 中国  $2.4 \times 10^5$  t, 美国  $4.3 \times 10^4$  t, 缅甸  $3.8 \times 10^4$  t, 澳大利亚  $1.8 \times 10^4$  t, 泰国  $7.1 \times 10^3$  t<sup>[2]</sup>。

自 2007 年以来, 格陵兰岛开展了针对稀土矿产的勘探活动, 鉴于稀土元素市场容量有限,

镧、铈轻稀土产能过剩, 而经济驱动因素与镨、钕、铽和镱等关键稀土元素有关, 全球大量以轻稀土元素 (LREE) 为主的勘探项目被搁置, 格陵兰岛活跃的稀土项目与南部碱性侵入杂岩体有关, 稀土矿床类型为大吨位—低品位矿床<sup>[3]</sup>。格陵兰岛目前已发现包括世界第二大稀土矿 Kvanefjeld 矿在内的 14 个稀土矿床, 这些稀土矿床的成矿地质背景各不相同, 成矿年龄跨度很大<sup>[4]</sup>。根据其成因类型可以划分为: 与碱性岩有关的稀土矿、与碳酸岩有关的稀土矿、铁氧化物铜-金 (IOCG) 型稀土矿、与伟晶岩有关的稀土矿以及砂矿 5 类。格陵兰岛南部、东部和西南部的潜在含稀土区域是由于加达尔侵入体、碳酸岩和碱性侵入体的存在。然而, 在格陵兰北部, 由于存在广泛的碳酸盐台地, 仅界定了少数地区以及沉积盆地中可能存在的稀土矿床。对格陵兰岛的重要稀土矿床及类型进行的较为详尽的阐述, 旨在通

收稿日期: 2024-11-11

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221809)

作者简介: 叶亚康 (1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩石学、地质矿产相关研究。



| 序号 | 区域    | 位置                            | 矿床类型 | 说明                                                                                                                | 稀土潜力                                 | 评分  |
|----|-------|-------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----|
| 7  | A5    | Skjoldungen Alkaline Province | 碱性岩  | 该地区的稀土元素高于背景值。没有矿化显示。大的岩浆省，大量侵入体与构造线一致（侵入体活动通道）。能否成矿存疑。                                                           | 潜力小<br>元素异常=3<br>区域地质背景=5            | 8   |
| 8  | A6    | Kap Gustav Holm               | 碱性岩  | Nefilitic正长岩侵入体，该地区缺乏信息。                                                                                          | 低潜力<br>元素异常=1<br>区域地质背景=3            | 4   |
| 9  | A7    | Kangerlussuaq                 | 碱性岩  | 格陵兰最大的正长岩侵入体。外部是石英正长岩，内部是正长岩，核部是霞石正长岩。有含REE细脉。广泛的热液蚀变（包括Flammefjeld）。几个附属侵入体。总的来说，格陵兰的正长岩侵入物需要更多的风化作用才能进一步富集稀土元素。 | 潜力小<br>元素异常=2<br>区域地质背景=4            | 6   |
| 10 | A8    | Borgtinderne                  | 碱性岩  | 正长岩侵入体侵入玄武岩中。该地区没有太多地质信息。                                                                                         | 低潜力<br>元素异常=0<br>区域地质背景=1            | 1   |
| 11 | A9    | Renland                       | 碱性岩  | 大型二长花岗岩侵入体。该地区没有太多地质信息。                                                                                           | 极低潜力                                 | 0   |
| 12 | A10   | Kap Wardlaw                   | 其他类型 | 花岗岩侵入的顶部区域。A型花岗岩？轻微富集U和Th，大量萤石富集。没有矿化显示。与A12相似的地质背景                                                               | 低潜力<br>元素异常=2<br>区域地质背景=1            | 3   |
| 13 | A11   | Werner Bjerge                 | 碱性岩  | 没有矿点。两个深部断层=活动路径。在细脉中有Th矿化。在岩石中有Nb和REE矿化。Werner Bjerge是一个大型的多期侵入杂岩体。大量的热液蚀变。                                      | 潜力小<br>元素异常=3<br>区域地质背景=4            | 7   |
| 14 | A11.1 | Kap Simpson                   | 碱性岩  | 碱性正长岩杂岩体。岩石样品富含稀土元素（3%）和铌（3.2%）。通过高光谱图可以发现Malmbjerg型蚀变（高温蚀变）。从冰川中可以看到几种矿化岩石的来源                                    | 潜力中等<br>1个矿点=9<br>元素异常=5<br>区域地质背景=5 | 19  |
| 15 | A12   | Kap Franklin (Hudson Land)    | 其他类别 | 该地区发现了Devon岩浆活动（Myggbukta）+亚碱性和碱性玄武岩                                                                              | 低潜力<br>元素异常=2<br>区域地质背景=1            | 3   |
| 16 | A13   | Prøven Granite                | 碱性岩  | I型花岗岩（非碱性=低潜力）。疑似异常位于区域边界。                                                                                        | 低潜力                                  | 未评估 |
| 17 | A14   | Ubekendt Island               | 碱性岩  | 微正长岩（古近纪）热液蚀变，有REE异常。岛上人迹罕至，难以到达。需要更多地质信息                                                                         | 低潜力                                  | 未评估 |
| 18 | A15   | 涵盖加达尔省的区域（不包括A1，A2，A3和A3.1）   | 碱性岩  | 没有已知的REE矿点，大的碱性岩区域。该地区有几个深层的构造。                                                                                   | 潜力小<br>元素异常=3<br>区域地质背景=5            | 8   |
| 19 | A16   | Nunarssuit                    | 碱性岩  | 没有矿化显示。水系沉积物中富含La和Yb。在这个区域进行了有限的工作。                                                                               | 潜力小<br>元素异常=2<br>区域地质背景=5            | 7   |
| 20 | A17   | Ivittuut冰晶石矿床                 | 碱性岩  | 冰晶石矿床，在老坑里有稀土矿化显示。水系沉积物中富含稀土元素                                                                                    | 潜力中等<br>1个矿点=9<br>元素异常=5<br>区域地质背景=5 | 19  |
| 21 | C1    | Ataa Sund                     | 碳酸岩  | 该地区已发现超镁铁质煌斑岩岩脉                                                                                                   | 低潜力                                  | 未评估 |
| 22 | C2    | Attu                          | 碳酸岩  | 该地区发现有碳酸岩脉                                                                                                        | 低潜力                                  | 未评估 |

| 序号 | 区域   | 位置                                               | 矿床类型 | 说明                                                                                                                                                                   | 稀土潜力                                        | 评分 |
|----|------|--------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----|
| 23 | C3   | 涵盖Sisimiut和Fiskefjord之间的钻石省的整体区域（不包括C3.1 + C3.2） | 碳酸岩  | 该地区已经侵入了两期碳酸岩=极有可能发现更多未发现的碳酸岩。在Sukkertoppen Iskappe以南地区的水系沉积物中有Yb和P异常。没有稀土矿化显示                                                                                       | 潜力中等<br>元素异常=7<br>区域地质背景=3                  | 10 |
| 24 | C3.1 | Sarfartoq                                        | 碳酸岩  | 1个已知的碳酸岩稀土矿点，在该地区发现了金伯利岩。该区域存在岩块边界，可能存在岩浆活动通道                                                                                                                        | 潜力巨大<br>1个待勘查矿床=9+9+9<br>元素异常=7<br>区域地质背景=7 | 41 |
| 25 | C3.2 | Qaqarssuk (Qeqertaasaq)                          | 碳酸岩  | 1个已知的碳酸岩稀土矿点。在该地区发现了煌斑岩。可能存在岩浆活动通道                                                                                                                                   | 潜力大<br>1个勘查区=9+9<br>元素异常=7<br>区域地质背景=7      | 32 |
| 26 | C4   | Tikiussaq                                        | 碳酸岩  | 1个已知的碳酸岩露头。在该地区发现了煌斑岩。该区域的存在岩块边界，可能存在岩浆活动通道                                                                                                                          | 潜力较大<br>1个矿点=9<br>元素异常=6<br>区域地质背景=6        | 21 |
| 27 | C4.1 | Tikiussaq碳酸岩以西的整体区域（不包括C4）                       | 碳酸岩  | 该区域发现磷异常，在该地区发现了煌斑岩（=存在岩浆活动通道）                                                                                                                                       | 潜力小<br>元素异常=3<br>区域地质背景=3                   | 6  |
| 28 | C5   | Frederikshåb Isblink                             | 碳酸岩  | 冰川下的地球物理异常。超镁铁质和碱性的煌斑岩脉（也被描述为碳酸岩）。可能的地块边界，水系沉积物未见异常。报告了该地区可能的放射性异常                                                                                                   | 潜力小<br>元素异常=3<br>区域地质背景=5                   | 8  |
| 29 | C6   | Paamiut area (Kvane fjord), 西格陵兰                 | 碳酸岩  | 没有已知的碳酸岩矿床。该地区发现了煌斑岩/金伯利岩（Ailikites）。贯穿与古元古代年龄的白云岩脉有关的主要区域构造                                                                                                         | 低潜力<br>元素异常=1<br>区域地质背景=2                   | 3  |
| 30 | C7   | Pyramidefjeld, 格陵兰西南部                            | 碳酸岩  | 没有已知的矿点。该地区发现了煌斑岩/金伯利岩（Ailikites）。靠近Grønnedal Ika碳酸岩和Gardar省。水系沉积物数据显示REE和P升高。Pyramidefjeld花岗岩中有明显的辐射信号。主构造贯穿该区域=活跃通道                                                | 潜力小<br>元素异常=3<br>区域地质背景=3                   | 6  |
| 31 | C8   | Grønnedal-Ika, 南格陵兰                              | 碳酸岩  | 1个已知的碳酸岩矿点（Ika碳酸岩），水系沉积物稀土元素升高。碳酸岩中铈升高。没有任何硅化的迹象。存在磁铁矿                                                                                                               | 潜力中等<br>1个矿点=9<br>元素异常=4<br>区域地质背景=5        | 18 |
| 32 | C8.1 | 不包括C8的区域                                         | 碳酸岩  | 1个已知的矿点。该地区发现了煌斑岩/金伯利岩（Ailikites）。Ivittuut有云英岩蚀变。该地区存在放射性岩脉（富含Ce）-辐射来自Ika碳酸岩                                                                                         | 潜力中等<br>1个矿点=9<br>元素异常=5<br>区域地质背景=5        | 19 |
| 33 | C9   | 覆盖整个加达尔地区火成岩省（不包括C9.1）                           | 碳酸岩  | 碳酸岩分布区域大=稀土潜力增加。水系沉积物中的磷含量高。超镁铁煌斑岩。放射性岩脉。难以收集其他地区的河流沉积物。很可能发现新的矿点究竟是碳酸岩还是富含碳酸岩的火山通道，还存在一些不确定性（后者不是好的稀土找矿目标）。该地区未发现任何放射性岩脉，也未见任何霓长岩化。发现了超镁铁质煌斑岩。磷异常位于该区域的西部。裂谷环境=活动通道 | 潜力中等<br>元素异常=5<br>区域地质背景=7                  | 12 |
| 34 | C9.1 | Qassiarssuk                                      | 碳酸岩  | 该地区未发现任何放射性岩脉，也未见任何霓长岩化。发现了超镁铁质煌斑岩。磷异常位于该区域的西部。裂谷环境=活动通道                                                                                                             | 潜力中等<br>元素异常=5<br>区域地质背景=7                  | 12 |

| 序号 | 区域    | 位置                                     | 矿床类型 | 说 明                                                        | 稀土潜力                       | 评分 |
|----|-------|----------------------------------------|------|------------------------------------------------------------|----------------------------|----|
| 35 | C9.2  | Igdlerfigsalik Centre                  | 碳酸岩  | 放射性硅酸岩岩墙。没有煌斑岩。没有碳酸岩相关的岩浆活动                                | 作为C9评估的一部分                 | -  |
| 36 | C10   | Timiarmiut                             | 碳酸岩  | 区内发现有碳酸岩脉。水系沉积物中的稀土元素升高。位于科迪利安岩块的边界。该地区的工作程度很有限            | 潜力小<br>元素异常=4<br>区域地质背景=5  | 9  |
| 37 | C11.1 | Singertat                              | 碳酸岩  | 在该地区发现了碳酸岩。水系沉积物中的稀土元素含量升高，并采集样品，可见霓长岩化。该地区的工作程度有限         | 潜力中等<br>元素异常=5<br>区域地质背景=6 | 11 |
| 38 | C11   | 涵盖<br>Skjoldungen碱性省的全部区域<br>(C11.1除外) | 碳酸岩  | 没有已知的碳酸岩，Skjoldungen Sund南侧大量磁异常。该地区的工作程度有限                | 潜力小<br>元素异常=3<br>区域地质背景=5  | 8  |
| 39 | C12   | Kap Gustav Holm                        | 碳酸岩  | 已知含碳酸岩岩墙，Kap Gustav Holm nefelinitic杂岩体位于该区域内。海岸平行结构=可能的通道 | 低潜力<br>元素异常=1<br>区域地质背景=3  | 4  |
| 40 | C13   | Gardiner（包括<br>Batbjerg）               | 碳酸岩  | 碳酸岩、霓长岩化。REE在河流沉积物中略微升高。衰退裂谷背景                             | 潜力小<br>元素异常=5<br>区域地质背景=4  | 9  |

注：矿床规模和品位等数据基于公司报告。

矿床, 即 Kvanefeld 和 Kringlerne 矿床。另外也有霞石正长岩杂岩体, 例如稀土元素赋存于霞石正长岩杂岩体中的 Motzfeldt Sø 矿床。

## 2.1 Kvanefield 稀土-铀矿床

Kvanefjeld 矿床位于 Narsaq 东北 8 km 处, 自 20 世纪 50 年代以来一直由丹麦和格陵兰地质调查局与丹麦国家实验室进行铀勘探。2010—2015 年格陵兰矿产与能源有限公司 (GME) 对 Kvanefjeld 地区进行稀土元素勘探, GME 持有三个勘探许可证 (2010/02、2011/26 和 2011/27), 包括三个勘探目标, 即 Kvanefjeld, Sørensen 区以及 Zone3 区。该矿床经历 1960—1983 年和 1983 年至今两个重要的勘查开发阶段, 现已施工钻孔 227 口, 钻孔进尺共计 46 578 m, 钻孔网度为: 东北部为 70 m×70 m, 西南部为 140 m×140 m, 大部分孔深在 200~300 m, 最深的钻孔 (K174) 500 m。

Kvanefjeld 矿区内碱性岩出露面积为 17 km<sup>2</sup> × 8 km, 含矿岩体从上到下分为黑色钠铁闪石异霞正长岩—绿色异霞正长岩—条纹霞石正长岩。异霞正长岩厚度至少有 500 m, 主要呈细粒结构, 局部也有中粒-粗粒结构, 稀土、铀、钍矿化主要赋存在黑色异霞正长岩中, 钍、钽和铌矿化主要赋存在条纹霞石正长岩中<sup>[8-9]</sup>。异霞正长岩主体是一群近水平分布的透镜体, 十几米到 200 m 厚。异霞正长岩透镜体在地表也有出露。整个异霞正长

岩延伸 SW-NE 向 2 200 m, NW-SE 向 1 000 m。Ilmaussaq 杂岩体有两种主要的含稀土矿石类型<sup>[10-12]</sup>, Kvanefjeld 矿床稀土成矿主要与黑色致密细粒状钠铁闪石异霞正长岩有关, 形成斯坦硅石型矿石; Zone3 区赋矿岩性为灰白色中—粗粒状霓石异霞正长岩, 以异性石型矿石为主。

根据格陵兰矿产和能源有限公司 (GME) 的勘探成果, 其总矿石量 (JORC 标准) 为  $673 \times 10^6 \text{ t}$  (表 2), 包括查明矿石量  $143 \times 10^6 \text{ t}$ , 控制矿石量  $308 \times 10^6 \text{ t}$  和推断矿石量  $222 \times 10^6 \text{ t}$ 。其中, 探明+控制+推断 TREO 资源量合计为  $736 \times 10^4 \text{ t}$ ,  $\text{U}_3\text{O}_8$  资源量合计为  $16.67 \times 10^4 \text{ t}$ , 探明稀土氧化物为  $173 \times 10^4 \text{ t}$ , 平均品位 1.21%, 探明  $\text{U}_3\text{O}_8$  为  $4.33 \times 10^4 \text{ t}$ , 平均品位 303 g/t。

表2 Kvanefjeld 稀土—铀矿床资源量统计  
Table 2 Kvanefjeld rare earth-uranium deposit resources statistics

| 资源量类别 |     | 矿石量/<br>×10 <sup>6</sup> t | TREO<br>品位/% | U <sub>3</sub> O <sub>8</sub><br>品位/(g/t) | TREO<br>总量/×10 <sup>4</sup> t | U <sub>3</sub> O <sub>8</sub><br>总量/×10 <sup>4</sup> t |
|-------|-----|----------------------------|--------------|-------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 国外    | 国内  |                            |              |                                           |                               |                                                        |
| 探明    | 331 | 143                        | 1.21         | 303                                       | 173                           | 4.33                                                   |
| 控制    | 332 | 308                        | 1.11         | 253                                       | 342                           | 7.79                                                   |
| 推测    | 333 | 222                        | 1.00         | 205                                       | 222                           | 4.55                                                   |
| 合计    |     |                            |              |                                           | 736                           | 16.67                                                  |

数据来源: Kvanefield项目可行性研究报告<sup>[13]</sup> (2015年4月)。

Kvanefjeld 三个勘探区域的大部分稀土矿化发生在异霞正长岩中, 稀土主要赋存于磷酸盐菱

黑稀土矿中, 铀元素与稀土元素伴生。其他潜在的副矿物产品是闪锌矿中的锌和氟盐中的氟。

矿山年计划生产  $7.2 \times 10^6$  t, 其中废石  $4.2 \times 10^6$  t, 计划加工  $3 \times 10^6$  t。根据可研报告, 该项目的目标是生产大约 23 000 t/a TREO, 以及 500 t/a  $U_3O_8$ 、6 000 t/a Zn 和 9 000 t/a 萤石。生产成本 (OPEX) 估计为 3.07 美元/kg TREO, 铀值为 70 美元/磅, 针对欧洲市场生产铈和铈的商用产品 (6 000 t/a  $La_2O_3$  和 10 000 t/a  $CeO_2$ )。剩余的 REO 精矿 (约 6 400 t) 将运往中国, 用于分离成商业产品。GME 公布产品稀土配分如下: 钕 33%; 镨 18%; 镱 13%; 铈 8%, 铀 7%; 镧 5%; 铈、铈和铈各占 4%; 铈、铈、铈和铈各占 1%。

## 2.2 Kringlerne 铈—稀土—铈—铈矿床

Kringlerne 矿床形成于 Ilímaussaq 侵入体的下部, 位于 Narsaq 镇以南 15 km 处, 自 20 世纪 70 年代以来, 大多公司一直在对矿床进行铈、铈、铈和方钠石的研究。2001 年, Tanbreez Mining Greenland A/S 获得了 2006/04 年度的探矿权, Rimbal Pty 获得了 2010/24 探矿权, 两个实体属于一个私有集团<sup>[14]</sup>。

Kringlerne 矿床含有巨大的层状碳酸岩序列, 包括约 300 m 的富含异性石的旋回层, 稀土元素为主要的目标。矿体位于层状碱性霞石正长岩较底部的堆积体, 常称为条纹霞石正长岩。条纹霞石正长岩堆晶岩形成 29 个循环的有规律岩层, 每个岩层厚约 8 m<sup>[15]</sup>。

条纹霞石正长岩单元由黑色正长岩 (主要为钠铁闪石)、略带红色的正长岩 (主要为异性石, 富集元素 Ta、Nb、REE、Zr、Y) 和发白的正长岩 (主要为斜长石) 等单元组成。据报道其资源量不少于  $10 \times 10^8$  t, 其中  $ZrO_2$  的品位为 2%,  $Nb_2O_5$  为 0.25%, REO 为 0.5%,  $Y_2O_3$  为 0.1%,  $Ta_2O_5$  为 0.025%。在异性石中, 轻、重稀土的占比分别是 88% 和 12%。

根据 Tanbreez 企业公布数据, “目前推断的资源量超过  $4.3 \times 10^8$  t 的含异性石矿石, 其中包含 1.8% $ZrO_2$ 、0.2% $Nb_2O_5$ 、0.5%LREO、0.15%HREO”。稀土的配分具体为 0.116% $La_2O_3$ 、0.217% $CeO_2$ 、0.021% $Pr_6O_{11}$ 、0.08% $Nd_2O_3$ 、0.015% $Sm_2O_3$ 、0.002% $Eu_2O_3$ 、0.017% $Gd_2O_3$ 、0.003% $Tb_4O_7$ 、0.019% $Dy_2O_3$ 、0.004% $Ho_2O_3$ 、0.016% $Er_2O_3$ 、

0.002% $Tm_2O_3$ 、0.013% $Yb_2O_3$ 、0.002% $Lu_2O_3$ 、0.127% $Y_2O_3$ 。在加工过程中, 考虑了三种产品:

(1) 异性石精矿 (稀土、铈、铈) (100 000 t/a); (2) 长石精矿 (200 000 t/a) 和 (3) 钠铁闪石精矿, 所有产品都将运往格陵兰岛以外的地方进行进一步加工。计划的工厂产能为  $50 \times 10^4$  t/a, 相当于约 3 250 t TREO (包括 400 t/a  $Nd_2O_3$  和 90 t/a  $Dy_2O_3$ ) 和 9 000 t/a  $Zr_2O_5$ 。

目前, 推断资源估计为超过  $4.7 \times 10^8$  t 的含异性石矿石, 平均品位为 1.8%  $ZrO_2$ 、0.2%  $Nb_2O_5$ 、0.5% LREE 和 0.15% HREE。

## 2.3 Motzfeldt 铈—铈—稀土矿床

Motzfeldt Sø 稀土矿床, 位于 Narsarsuaq 国际机场以东 25 km 处, 是 Igaliko 霞石正长岩杂岩体的一部分。Motzfeldt 矿是在 20 世纪 80 年代早期由 Sydurán 项目发现的, 当时主要考虑其作为 Nb-Ta 资源的潜力<sup>[16]</sup>。Ram 私人有限公司于 2015 年对侵入体的稀土资源开展了地质勘查工作。矿石矿物有烧绿石、铈铁矿、钽铁矿、独居石、铈石、铈矿以及未经鉴定的稀土、铈、铈、铈、铈等矿物。由于已知矿化系统中只有一部分经过钻探验证, 因此推断该矿床可能存在巨大的勘探潜力, 且为“低品位大吨位”资源。据报道, 已知的铈-铈矿化与稀土元素矿化相关性很弱。在侵入体的中央部位发现铈-铈矿化最富, 岩性以蚀变的正长岩为主, 伴有少量伟晶岩和闪长岩脉。然而, 在深部高品位的稀土都集中在伟晶岩侵入体中, 沿整个钻孔可见零散分布, 品位向东逐渐减低。

来自 Aries 地区的典型分析结果包含以下稀土元素的相对比例: La 22%、Ce 41%、Pr 4%、Nd 14%, 其他 LREO 3%; Gd 2%、Dy 2%、Y 10% 和其他 HREO 2%。

# 3 格陵兰岛碳酸岩型稀土矿

## 3.1 Sarfartoq 轻稀土矿床

Sarfartoq 区域位于努克以北约 200 km 处, 距康克鲁斯瓦克国际机场 60 km。自 2009 年以来, 一直将勘探重点放在沿碳酸岩杂岩外缘排列的稀土矿点上, 形成直径约 13 km 的圆形阵列。野外工作和钻探表明, 在这种环境下, 稀土矿化的潜力很大。其中一个远景区的资源以轻稀土为主, 铈和铈的占比很高<sup>[17]</sup>。

Sarfartoq 碳酸岩杂岩（金云母 Rb-Sr 年龄 564 Ma）<sup>[15]</sup> 出露良好，位于太古代克拉通和古元古代 Nagssugtoqidian 造山带之间的过渡带，围岩为花岗闪长岩片麻岩。1976 年，格陵兰地质调查局在区域航空辐射测量和后来的实地调查的基础上发现了这座岩性复杂的岩体。随后，该岩体一直作为钻石、磷、铌和稀土元素勘探活动的目标。

杂岩的中部核心区被一系列环状层或岩墙包围，包含无数侵入碳酸角砾岩脉。杂岩体核心周围发现大量霓长岩化蚀变作用，外部硅化带的不同区域发现了铌和稀土元素矿化现象。稀土元素与钍相关性好，稀土矿物主要为氟碳铈矿、硅铈矿和独居石。

2010 年，Hudson Resources 报告了杂岩体北部 ST1 现场符合 NI 43—101 的资源量估算结果：推断资源量  $14 \times 10^6$  t，TREO 平均品位为 1.53%，边界品位为 0.8% TREO。稀土元素配分为 20% La、45% Ce、6% Pr、25% Nd、2% Sm 和约 2% 的 Ga、Dy 和 Y。

### 3.2 Qaqarsuk 碳酸岩杂岩稀土矿

Qarssuk 碳酸岩杂岩体（金云母 Rb-Sr 年龄 165 Ma）位于格陵兰西部 Maniitsoq 以东 60 km，侵入太古代片麻岩杂岩，伴有金伯利岩岩墙和碱性侵入体<sup>[18]</sup>。

2010 年，Nunamineals A/S 在碳酸岩中进行了稀土元素勘查。主要的潜力似乎在杂岩的核心区域，隐藏在碳酸岩脉中。据 nuaminerals A/S 报告称， $1.5 \text{ km}^2$  区域内总稀土氧化物的品位为 2.4%，主要的含稀土矿物为碳酸铈铈矿。以轻稀土元素的矿化为主，其中稀土元素组成主要为：27% La、50% Ce、16% Nd、约 5% Pr。存在稀土元素矿化的矿脉厚度通常不超过 1 m。

### 3.3 Tikiusaaq 碳酸岩杂岩稀土矿

GEUS 于 2005 年通过使用区域水系沉积物数据、区域航空地质资料和现场工作发现的 Tikiusaaq 碳酸岩由块状白云石—方解石—碳酸岩岩片组成，在大约 158 Ma 时沿着韧性剪切带侵入，碳酸岩后来被富碳酸盐超镁铁质硅酸岩脉侵入<sup>[19]</sup>。Nunamineals A/S 于 2010 年开始对 Tikiusaaq 碳酸岩进行勘探，重点关注航磁确定的“碳酸岩核心”区域。

稀土元素通常在碳酸岩岩浆作用的最晚阶段

富集，主要的稀土矿物是碳酸铈铈矿（Sr-REE 碳酸盐）。在 Th 元素统计异常的区域，发现了富稀土碳酸岩，地表样品稀土品位高达 9.6% TREO（主要是 LREE）。稀土元素浓度组成主要为 33% La、47% Ce、4% Pr、12% Nd 和 4% 其他稀土元素，另外，从碳酸岩含磁性的样品中得到高品位磷酸盐（ $\text{P}_2\text{O}_5$  品位高达 8.5%）。

放射性和磁性数据表明存在一个长约 750 m、宽约 100 m 的独立碳酸岩体，碳酸岩脉的延伸深度至少为 500 m。

## 4 格陵兰岛古砂矿型稀土矿

1968 年，Nordisk Mine selskab A/S 在进行重矿物浓缩物取样计划和航空辐射测量时发现了中生代 Milne Land 古砂矿。砂矿位于 Charcot Bugt 建造的基底部分，最不规则的位置“Bays Fjelde”的“Hill 800”直径约 500 m，厚度 40~50 m。重矿物赋存于 20 m 厚的基底砂岩中。潜在的稀土、钽、铀资源主要赋存于独居石中。

1990 年，Coffs Harbour 金红石公司从“Hill 800”地区的 5 个矿坑中采集了 15 t 大块样品，并对约 10 t 进行了冶金试验研究。中试研究的回收率表明，提取独居石、锆石和石榴石的商业产品是可行的，但锐钛矿由于其细粒和复杂的性质而不可行。Coffs Harbour 金红石公司估计“Hill 800”的资源量为  $3.70 \times 10^6$  t，其中锆石含量为 1.1%，独居石含量为 0.5%，锐钛矿含量为 2.6%，石榴石含量为 3.1%，磷钇矿含量为 0.03%。

## 5 格陵兰岛其他类型稀土矿

2007 年，Avanna 资源有限公司在格陵兰中西部发现了 Niaqornakassak（NIAQ）稀土矿床。2009 年，在 Umiammakku Nunaa（UMIA）半岛上发现了矿床的延伸，该半岛距离 NIAQ 矿床 7 km。这两个矿床合称为“Karrat”。

2010 年，Avanna 资源有限公司在 NIAQ 和 UMIA 矿床上开展的工作包括钻石钻探和收集 13 个小型散装样品。稀土元素赋存在古元古代 Karrat 群的角闪岩相中。NIAQ 矿体沿走向出露长度为 1.5 km，但两端都未闭合。NIAQ 矿体呈板状，最高海拔 56 m，最低海拔 168 m；厚度大约在 10~33 m 之间。NIAQ 捡块样品的 TREO 平均

为 1.36%，其中 HREO 平均含量约为 13%。NIAQ 矿体的预测资源量估算为  $2.6 \times 10^7$  t，稀土元素主要赋存于矿化层序中与热液活动有关的氟碳铈矿、独居石和褐帘石中。关于 UMIA 矿体的工作非常有限。通过 3 个钻孔分析，发现 UMIA 矿床的 TREO 品位范围为 0.08% ~ 0.12%。

目前格陵兰岛尚未有 IOCG 矿床发现的报道，据丹麦地质调查局 Stensgaard, B. M、Srensen 等认为位于 Inglefield Land（格陵兰岛北部）、Arfersirofik（格陵兰西部）和 Ammassalik（格陵兰东南部）的三个区域有大规模的钠和氧化铁蚀变、宏观-微观尺度构造和岩浆杂岩，这些迹象被认为有利于形成 IOCG 矿化系统。此外，位于 Niaqornaarsuk 和 Qoorormiut 的 Cu-Au-(±Co±Nb±P±REE) 矿床可能属于 IOCG 型矿化，需要进行更详细的调查才能确认矿床类型<sup>[20]</sup>。前人认为格陵兰岛存在 IOCG 矿床类型的稀土成矿潜力。

岩浆型（碱性、碳酸岩、伟晶岩型）的格陵兰稀土矿床经历了不同程度的热液稀土富集过程<sup>[21]</sup>。然而，唯一被认为是热液作用形成的格陵兰矿床是 Bjrnedal，稀土矿物有：黑稀金矿、铈钇矿、褐钇铈矿、独居石和氟碳铈矿。随机采集的

样品中稀土元素（包括钫、铈和钇）品位已高达 3%。

## 6 典型矿床成矿地质要素及成矿远景区

Kvanefjeld 稀土矿截至 2015 年探明+控制+推测 TREO 资源量合计为  $736 \times 10^4$  t，为全球第二大稀土矿，工作程度达详查，其矿床形成的地质条件、控矿因素、找矿标志在同类型稀土矿中具有代表性。区域化探 Sb、La、Th 指标的异常高值区及 Sb、La、Th 综合异常与可凡湾稀土矿分布吻合较好<sup>[22]</sup>，主要的稀土矿床（点）与相应重砂异常套合度较高，相关性较强，出现明显的异常显示，具有较好的找矿指示意义。Ilimaussaq 杂岩内铀矿资源丰富，大量放射性矿物的聚集在遥感热红外图像上表现为热异常，采用结合机器学习岩性分类信息和地表温度热异常信息的证据权重分析方法，对高纬度地区含放射性元素矿床进行了预测，结果表明，以高纬度地区地表温度热异常为重点的多面遥感信息查找方法，对寻找含放射性元素矿床潜在矿化区具有指导和参考价值<sup>[23]</sup>。

通过物、化、遥、重砂等多种信息综合研究后，并将预测要素划分为必要、重要、次要三类，填制 Kvanefjeld 稀土矿预测要素，见表 3。

表 3 Kvanefjeld 式稀土矿区域预测要素  
Table 3 Regional forecast features of Kvanefjeld-style rare earth ores

| 区域预测要素特征 |        | 描述内容                                                                 | 预测要素分类 |
|----------|--------|----------------------------------------------------------------------|--------|
|          |        | 与Garder期碱性杂岩有关的岩浆型Kvanefjeld稀土矿                                      |        |
| 区域成矿地质环境 | 构造背景   | 格陵兰岛南部裂谷带                                                            | 重要     |
|          | 成矿区带   | 与Gardar期碱性杂岩体内的Ilimaussaq-Igaliko-Motzfeldt稀土-铀多金属成矿带                | 重要     |
|          | 成矿时代   | 中元古代（1300~1140 Ma Garder期）                                           | 必要     |
|          | 成矿建造   | Garder期碱性杂岩（辉石正长岩、方钠霞石正长岩、霓石异霞正长岩和铁钠闪石异霞正长岩）建造                       | 必要     |
|          | 岩石结构构造 | 细粒结构；块状构造                                                            | 次要     |
|          | 成矿建造围岩 | Ketilidian造山带1.85~17.9亿年侵入的花岗岩及其Eriksfjord组沉积-玄武岩建造                  | 次要     |
|          | 成矿构造   | 北东向深大断裂与近东西向断裂带交汇部位共同控制                                              | 重要     |
| 区域成矿地质特征 | 矿体形态   | 层状、似层状、透镜状                                                           | 重要     |
|          | 矿石结构构造 | 自形-半自形晶细粒结构；叠层，细粒，有时层状或块状，局部中-粗粒构造                                   | 次要     |
|          | 主要稀土矿物 | Kvanefjeld矿床：斯坦硅石、磷铈钠石；Kringlerne矿床：异性石、独居石；Motzfeldt矿床：烧绿石、氟碳铈矿、独居石 | 必要     |
|          | 矿化信息   | 大型~小型、矿（化）点                                                          | 重要     |
|          | 品位     | REO含量>0.25%                                                          | 重要     |
| 综合信息     | 围岩蚀变   | 异性石化、碱性辉石化、绿泥石化、绿帘石化                                                 | 重要     |
|          | 航放     | 矿床位于区域航空放射性异常带内                                                      | 必要     |
|          | 化探     | 矿床位于区域化探综合异常内带中心位置                                                   | 重要     |
|          | 遥感     | 矿床位于区域遥感异常预测区内                                                       | 次要     |
|          | 找矿标志   | 霓石、沸石、钠铁闪石、异性石、斯坦硅石                                                  | 重要     |

根据成矿地质条件及遥感、化探、自然重砂等综合信息研究，格陵兰西南部 Garder 碱性岩省圈定了4处可凡湾式稀土矿成矿远景区，分别是 Kvanefjeld A 类成矿远景区；Kringlerne、Motzfeldt B 类成矿远景区；Nunarssuit C 类成矿远景区（图2）。Kvanefjeld A 类成矿远景区：位于 Ilimaussaq 杂岩体北段，包括 Kvanefjeld、Zone2、Zone3，成矿容矿构造同属 Skovfjord-Tunulliarfik 断裂及穿过杂岩体的近东西向 Kangerluarsuk-Lakseelv 断层带，成矿岩体在带内呈层状、透镜状分布，成矿极条件极有利。Kringlerne B 类成矿远景区：与 Kvanefjeld 有相同的地质背景，岩性以

条纹霞石正长岩为主，航空放射性异常大于 5.2 g/t eU，水系沉积物异常强烈（ $U>110$  g/t， $Zn>250$  g/t， $Ta>10$  g/t， $La>300$  g/t， $Cs>8$  g/t， $Th>40$  g/t），综合成矿条件有利。Motzfeldt B 类成矿远景：成矿母岩为 Motzfeldt 碱性杂岩，以含烧绿石的蚀变正长岩和片状过碱性微正长岩为主，目前已发现了 Motzfeldt 大型钽-铌-稀土多金属矿床，此外在已知矿区外围发现有5个稀土矿点，综合成矿条件十分有利。Nunarssuit C 类成矿远景区：加达尔期碱性岩大面积出露，位于北东向深大断裂与近东西向断裂带交汇部位，化探异常呈椭圆状，浓集中心明显，综合成矿条件良好。

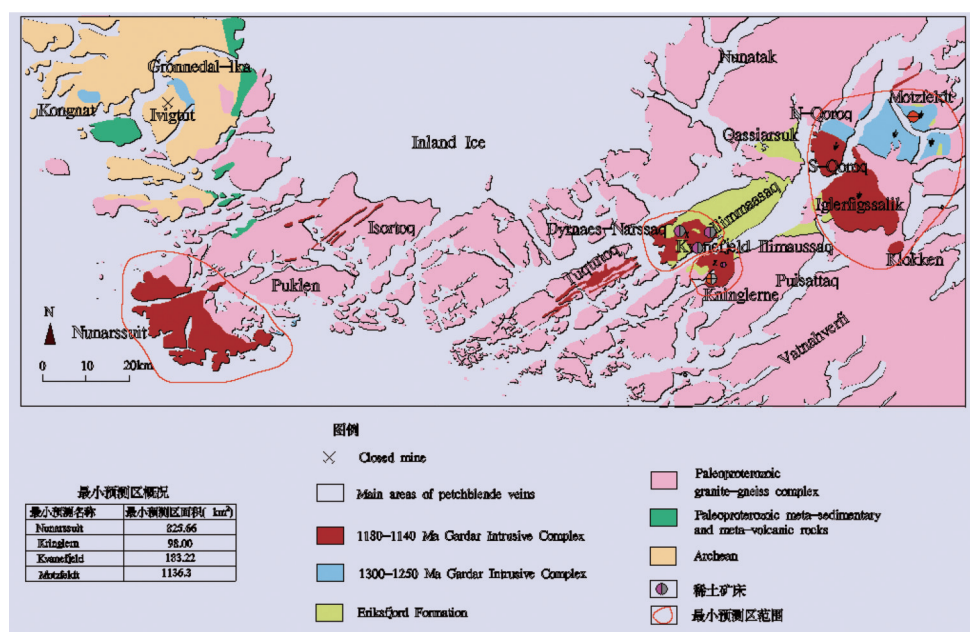


图2 优选最小预测区分布（比例尺 1:25 万）  
Fig.2 Distribution of the preferred minimum prediction area (Scale 1:250,000)

## 7 结 论

目前格陵兰岛已知的稀土矿床/矿点有14处，稀土资源主要赋存于 Ilimaussaq 杂岩体中，特点是“总量大、品位低”，除已知著名的 Kvanefjeld 和 Kringlerne 矿床外，通过分析现有基础地质资料和总结可凡湾稀土矿床的放射性、地球化学、遥感热红外、重砂等多种综合异常信息，在 Garder 碱性岩省圈定了4处稀土成矿远景区，格陵兰岛南部是碱性岩型稀土矿床产出的最有潜力区域。西部地区已知的碳酸岩稀土矿床有 Sarfartoq、Qaqarssuk 和 Tikiusaaq，综合水系沉积物异常、放射性异常以及深大断裂构造背景，该碳酸岩区域也

具有很好的稀土找矿前景。此外在格陵兰地质调查程度较低的地区，如中东部的 Kap-Simpson 碱性侵入体和东南部的 Skjoldungen 碱性岩省也有较好发现新稀土矿床的潜力。

## 参考文献：

- [1] Balaram V. Rare earth elements: a review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact[J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10(4):1285-1303.
- [2] U.S. Department of the Interior&U.S. Geological Survey[D]. Mineral Commodity Summaries, 2024.
- [3] Paulick H, Rosa D, Kalvig P. Rare Earth Element (REE) exploration potential and projects in Greenland[D]. MiMa

Rapport, 2015/2, 51 pp.

[4] 毛景文, 宋世伟, 刘敏, 等. 稀土矿床:基本特点与全球分布规律[J]. *地质学报*, 2022, 96(11):3675-3697.

MAO J W, SONG S W, LIU M, et al. Ree deposits: basic characteristics and global metallogeny[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(11):3675-3697.

[5] Lars Lund Sørensen, Per Kalvig Diogo Rosa. The rare earth element potential in Greenland[D]. GEUS, 2018.

[6] Sørensen L L, Kalvig P, Hanghøj K. Rare earth element potential in Greenland. Reporting the BMP/GEUS mineral resource assessment workshop[D]. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2011/80, 30 pp.

[7] 晁文文, 周家云, 蒋晓丽, 等. 格陵兰岛西南部可凡湾稀土矿床地质特征[J]. *矿产综合利用*, 2023, 44(1):10-15.

CHAO W W, ZHOU J Y, JIANG X L, et al. Geological features of Kvanefield ree deposit in southwestern Greenland[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023, 44(1):10-15.

[8] Sørensen H. The Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland: status of mineralogical research with new results[J]. *Geology of Greenland Survey Bulletin*, 2001, 190, 167 pp.

[9] Sørensen H. The Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland an overview of 200 years of research and outlook. Contribution to the mineralogy of Ilímaussaq no.130.Meddelser om Grønland[J]. *Geoscience*, 2006, 45, 70 pp.

[10] 叶亚康, 周家云, 曾令熙, 等. 格陵兰岛 Ilímaussaq 岩体异霞正长伟晶岩中稀土元素赋存状态研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(5):120-124.

YE Y K, ZHOU J Y, ZENG L X, et al. Occurrence of rare earth elements in lujaurite-pegmatite in the Ilímaussaq complex, Greenland[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(5):120-124.

[11] 陈伟, 周家云. 一种特有的稀土矿物-异性石[J]. *矿产综合利用*, 2023, 44(4):174-176,193.

CHEN W, ZHOU J Y. A special rare-earth mineral - eudialyte[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023, 44(4):174-176,193.

[12] 蒋晓丽, 周家云. 一种少见的稀土矿物:斯坦硅石[J]. *矿产综合利用*, 2021(5):125-128,119.

JIANG X L, ZHOU J Y. A scarce rare-earth mineral: steenstrupine[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(5):125-128,119.

[13] GREENLAND MINERALS AND ENERGY LTD. Kvanefjeld feasibility study completed[D]. Company Announcement, May 25, 2015.

[14] Hans K Schonwandt, Gregory B Barnes, Thomas Ulrich. The world-class ree deposit tanbreez, South Greenland: its size and structure[J]. ERES2014: 1st European Rare Earth Resources Conference Milos 04-07/09/2014.

[15] Secher K, L M Heaman, Nielsen T F D, et al. Timing of kimberlite, carbonatite, and ultramafic lamprophyre emplacement in the alkaline province located 64°– 67°N in southern West Greenland[J]. *Lithos*, 2009, 112S:400-406.

[16] Tukiainen T. Niobium-tantalum mineralisation in the Motzfeldt Centre of the Igaliko Nepheline Syenite Complex, South Greenland. In Boissonnas, J. & Omenetto, P. Mineral Deposits within the European Community[J]. SpringerVerlag Berlin & Heidelberg, 1988, 230-246.

[17] Secher K, Larsen L M. Geology and mineralogy of the Sarfartôq complex, southern West Greenland[J]. *Lithos* 13, 1980, 199-212.

[18] Grice J D, Gault R A, Rowe R, et al. Qaqarsukite-(Ce), a new barium-cerium fluor carbonate mineral species from Qaqarsuk, Greenland[J]. *Canadian Mineralogist*, 2006, 44:1137-1146.

[19] Tappe S, Steenfelt A, Heaman L M, et al. The newly discovered Jurassic Tikiusaaq carbonatite-aillikite occurrence, West Greenland, and some remarks on carbonatite- kimberlite relationships[J]. *Lithos* 112S, 2009, 385-399.

[20] Machacek E, Kalvig P. Assessing advanced rare earth element-bearing deposits for industrial demand in the EU[J]. *Resources Policy*, 49, issue C, 2016, 186-203.

[21] Harpøth O, Pedersen J L, Schønwandt H K, et al. The mineral occurrences of central East Greenland[M]. Meddelser om Grønland. *Geoscience*, 1986, 17, 138 pp.

[22] Steenfelt A. Geochemical atlas of Greenland West and South Greenland[D]. Dan marks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2001/46, 39 pp.

[23] He L, Lyu P, He Z, et al. Identification of Radioactive Mineralized Lithology and Mineral Prospectivity Mapping Based on Remote Sensing in High-Latitude Regions: A Case Study on the Narsaq Region of Greenland[J]. *Minerals*, 2022, 12:692.

## Potential Analysis of Rare Earth Resources in Greenland

YE Yakang<sup>1,2</sup>, CHEN Wei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Technology Innovation Center of Rare Earth Resources Development and Utilization, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** Greenland has now discovered 14 rare earth deposits, including Kvanefjeld, the world's second largest rare earth deposit. The geological settings of the deposits vary and the metallogenic ages span widely. According to the genetic of the deposit, it can be divided into 5 types: those related to alkaline rocks, carbonate type, iron oxide copper-gold (IOCG) type, pegmatites and placer ores. The metallogenic conditions of 40 potential rare earth resource areas in Greenland were analyzed, and the value assignment evaluation of the potential areas was carried out. Summarizing the radioactivity, geochemistry, remote sensing thermal infrared, placer and other comprehensive anomaly information of the Kvanefjeld rare earth deposit, and 4 rare earth metallogenic prospect areas are delineated in Garder province of alkaline. The alkaline province in southern Greenland is the most promising area for the discovery of rare earth deposits, and the carbonate area in western Greenland and the alkaline area in eastern Greenland are also prospective for rare earth prospecting.

**Keywords:** Greenland; rare-earth element; resource potential; alkaline rock type; carbonate rock type

////////////////////////////////////  
(上接第 56 页)

## Research Status of Andalusite Resources and its Beneficiation in China

LIU Yumo<sup>1</sup>, NA Yu<sup>1</sup>, LI Zhao<sup>1</sup>, CHEN Min<sup>2</sup>, HUANG Junwei<sup>3</sup>, DAI Shujuan<sup>1,2</sup>, LI Pengcheng<sup>1</sup>

(1. School of Mining Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan, Liaoning 114000, China; 2. School of Chemical Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan, Liaoning 114000, China; 3. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengzhou, Henan 450006, China)

**Abstract:** Andalusite is a natural anhydrous aluminosilicate mineral with high temperature resistance. As an important raw material for preparing high-grade refractory materials and aluminum-silicon alloys, it is widely utilized in building materials, ceramics, aviation and other industries. The andalusite resources in China are widely distributed and abundant, but most of the raw andalusite are within low grade and fine grain distribution, needing obligatory beneficiation. The beneficiation process of andalusite can be divided into coarse-grained beneficiation and fine-grained beneficiation according to its raw distribution size. The processing of coarse-grained andalusite mainly adopts selective grinding-screening or heavy medium beneficiation technology. Fine-grained andalusite is mainly beneficiated through acid flotation as well as high intensity magnetic separation. In this paper, the crystal structure as well as the physical and chemical properties of andalusite were introduced, the present situation of mineral resource distribution and beneficiation technology of andalusite in China were analyzed in detail. The reasonable prospects of the future development of andalusite were also provided.

**Keywords:** andalusite; resources survey; refractories; beneficiation technology