

格陵兰岛稀土矿资源潜力及对中国的可利用性评价

刘青枰^{1,2}, 赵元艺¹, 刘春花¹

LIU Qingping^{1,2}, ZHAO Yuanyi¹, LIU Chunhua¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所/自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences/MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resources, Beijing 100037, China;*

2. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

摘要: 格陵兰地处北极, 是全球最大的岛屿, 经历了约40亿年的地质构造演化, 矿产资源极丰富, 尤其是以重稀土元素为特色的稀土矿资源。前人主要集中研究格陵兰岛黑色和多金属矿产资源, 较少涉及稀土资源。通过研究, 为保护中国有限的稀土资源, 给中方企业和地勘单位实施“走出去”政策在格陵兰寻找潜在稀土资源提供基础资料。收集资料发现, 格陵兰岛的稀土矿床主要集中在西南部、南部、中东部、中西部, 其类型有碳酸岩型、碱性岩型、古砂矿型, 可能有IOCG型。格陵兰岛稀土矿资源潜力巨大, 通过分析格陵兰岛地质资料确定了4个远景区, 由2个Ⅰ级、1个Ⅱ级和1个Ⅲ级组成。下一步重点关注格陵兰岛南部和西南部的2个Ⅰ级远景区, 其次关注中东部和中西部Ⅱ级和Ⅲ级远景区。从多方面考虑, 格陵兰岛稀土矿资源可利用性评价良好, 格陵兰岛的稀土元素矿床值得中国企业关注。

关键词: 格陵兰岛; 稀土矿; 资源潜力; 可利用性评价

中图分类号: P618.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2019)08-1386-10

Liu Q P, Zhao Y Y, Liu C H. REE resources potential in Greenland and the availability evaluation in favor of China. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(8):1386-1395

Abstract: Located in the North Pole, Greenland is the world's largest island. After about four billion years of geological evolution, Greenland has been extremely rich in mineral resources, especially with heavy rare earth elements as the characteristics of the rare earth mineral resources. The previous researchers mainly concentrated their attention on ferrous metal and polymetallic mineral resource, with very insufficient attention paid to the rare earth metal resource. In order to protect the limited rare earth resources and provide basic information for Chinese enterprises' and geological exploration organizations' implementation of "going out" policy in Greenland with the purpose of seeking for potential REE resources, the authors, through the collection of literature and online information, found that the rare earth mineral deposits are mainly concentrated in southwest, south, east, and west of Greenland, and the types of these resources include mainly a carbonate rocks type, a alkaline rocks type, a paleo-placer type, and a possible IOCG type. The REE potential of Greenland is great. The four potential regions were determined by analysis of geological data from Greenland, which include two class I prospect, one class II prospect and and one class III prospect. The next step should focus on the potential area of southern and southwest Greenland two class I prospects, followed by the work in the middle east class II prospect and the middle west class III prospect. From various aspects of Greenland's rare earth mineral resources utilization, the authors consider that the REE deposits in Greenland deserve Chinese enterprises' much attention.

Key words: Greenland; resources potential; REE deposit; availability

格陵兰岛是世界上最大的岛, 位于北美, 南北长约2670km, 东西长最宽约1050km, 面积217.56×10⁴km²。其冰川覆盖面积可达全岛的4/5, 基岩裸露面积可达41.05×10⁴km²。格陵兰稀土成矿地质条件

收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-04-20

资助项目: 中国地质调查局项目《境外大型矿产资源基地及资源潜力评价》(编号: DD20190437)

作者简介: 刘青枰(1993-), 男, 硕士, 从事矿床学及矿床地球化学方面的研究。E-mail: 1807247397@qq.com

通讯作者: 赵元艺(1966-), 男, 研究员, 从事矿床学及矿床地球化学方面的研究。E-mail: yuanyizhao2@sina.com

优越,稀土矿类型较多,目前已发现几处大型稀土矿,其稀土矿资源潜力巨大,2016年已有中方企业进行了投资^[1]。稀土元素作为“工业味精”,其需求量不断地增大,尤其是重稀土元素资源^[2-3],而中国重稀土元素相对缺乏^[4],因此积极寻找新的稀土资源非常必要,尤其是重稀土元素资源。这在一定程度上可以保护中国有限的稀土资源,巩固中国稀土资源在全球的地位。关于格陵兰岛稀土资源的中文资料很少,前人主要考虑黑色和有色金属^[5-13],目前看稀土资源也有很大前景。为了加强对格陵兰岛稀土矿的了解,结合有限的资料评价格陵兰岛稀土矿资源,并与中国典型稀土矿——四川牦牛坪稀土矿对比,为中国地勘单位和矿产企业在格陵兰寻找潜在的稀土资源提供参考资料。

1 格陵兰岛地质背景

格陵兰岛从始太古宙到新近纪经历了大约 40 亿年的地质构造演化,主要由一系列太古宙和早元古代造山作用形成的结晶基底组成(图 1-A)。在约 16 亿年前作为劳伦系(Laurentian)地盾的一部分稳定下来^[14]。地盾由 3 个基底省组成:① 3.1~2.6Ga 太古代基底;② 1.85Ga 年前经古元古代再造形成的太古宇岩层;③ 2~1.75Ga 古元古代岩浆源形成的基底岩层。

格陵兰岛主要分为 7 个地质单元(图 1-A)^[14-16],从北到南依次为:① 北格陵兰岛褶皱带,为古生代造山带,主要由一套浊积岩地层组成;② 林基(Rikian)褶皱带,主要分布于格陵兰西部,由强烈褶皱的太古宙基底和元古宙盖层组成;③ 加里东褶皱带,主要位于格陵兰东部,由一套连续沉积的灰岩和白云岩组成;④ 古近纪一新近纪火成岩区,主要分布于格陵兰岛的中东部和中西部,主要由玄武岩和岩脉、岩基构成;⑤ 纳基格托伊顿迪安(Nagsugtoqidian)造山带,主要位于格陵兰岛的西部和东部,分别由石英闪长质-英云闪长质和苏长质-紫苏花岗质侵入岩套组成;⑥ 太古宙克拉通,主要位于格陵兰岛西南部和东南部,由表壳岩和变质片麻岩构成;⑦ 凯迪利迪安(Ketilidian)褶皱带,位于格陵兰岛南部,主要由火成岩和片麻岩组成。格陵兰岛中心被冰川覆盖,出露基岩基本环绕岛的边缘分布。

2 格陵兰岛主要稀土矿简介

丹麦和格陵兰岛地质调查局(GEUS)与格陵兰矿产与石油局(现为格陵兰岛矿产资源部(BMP))在 2010 年针对格陵兰岛稀土矿产资源开展了潜力评价研讨会。在这次研讨会上,汇总了格陵兰岛已知稀土矿床、地质背景、水系沉积物地球化学数据,并将这些信息与稀土矿床模型结合,简要地评价了稀土元素资源潜力(图 1-B、C)。格陵兰稀土矿类型主要有 4 种^[17]:① 碳酸岩型,稀土富集成矿与碳酸岩杂岩体有关,如 Sarfartoq(萨法托克)碳酸岩杂岩体、Qaqarsuk(卡卡尔萨克)碳酸岩杂岩体等。格陵兰的稀土矿主要与后期热液活动有关,剪切带中的通道和接合部位在成矿过程中扮演着重要的角色;② 碱性侵入体型,稀土的富集主要发生在强烈分异的层状侵入体的岩浆作用过程中,此过程可能会伴有热液活动;③ IOCG 型,通常稀土富集在一个典型的低钛矿化系统内,其中钠、钾蚀变强烈,Co、Ag、U、Cu 和 P 在同时代的岩浆含量呈增长趋势;④ 古砂矿型,砂矿是重矿物二次堆积形成的,通常含有稀土矿物,如独居石和磷钇矿。由北向南,从东到西各类型矿床的详细情况如下。

2.1 格陵兰岛未知类型稀土矿

西格陵兰中部的 Niaqornakassak (NIAQ) 稀土矿床是 Avannaa 资源有限公司在 2007 年和 2009 年期间发现的,该矿床一直延伸到 Umiammakku Nunaa (UMIA) 半岛,在走向上从 NIAQ 延伸了 7km^[18](图 2-A)。这 2 个矿床一起命名为 Karrat。Avannaa 资源有限公司 2010 年在 NIAQ 和 UMIA 矿床进行的工作包括金刚石钻井和采集 13 件小批量的样品。稀土元素主要富集在早古元古代 Karrat 组变质火山岩和变质沉积岩中。NIAQ 矿床的走向长度为 1.5km,厚度变化在 10~33m 之间。NIAQ 矿体的全岩样品分析结果表明,所有稀土氧化物(TREO+Y)的平均品位为 1.36%,其中重稀土氧化物(HREO+Y)的平均含量约占稀土氧化物总量的 13%。NIAQ 矿体初步资源的估计量为 2600 Mt。稀土元素分布在氟碳铈镧矿、独居石和褐帘石矿物中,这些矿物都与矿化序列中的热液作用有关。对 UMIA 矿体所做的工作非常有限。根据 3 个钻孔的资料,UMIA 矿床总的稀土氧化物品位变化在

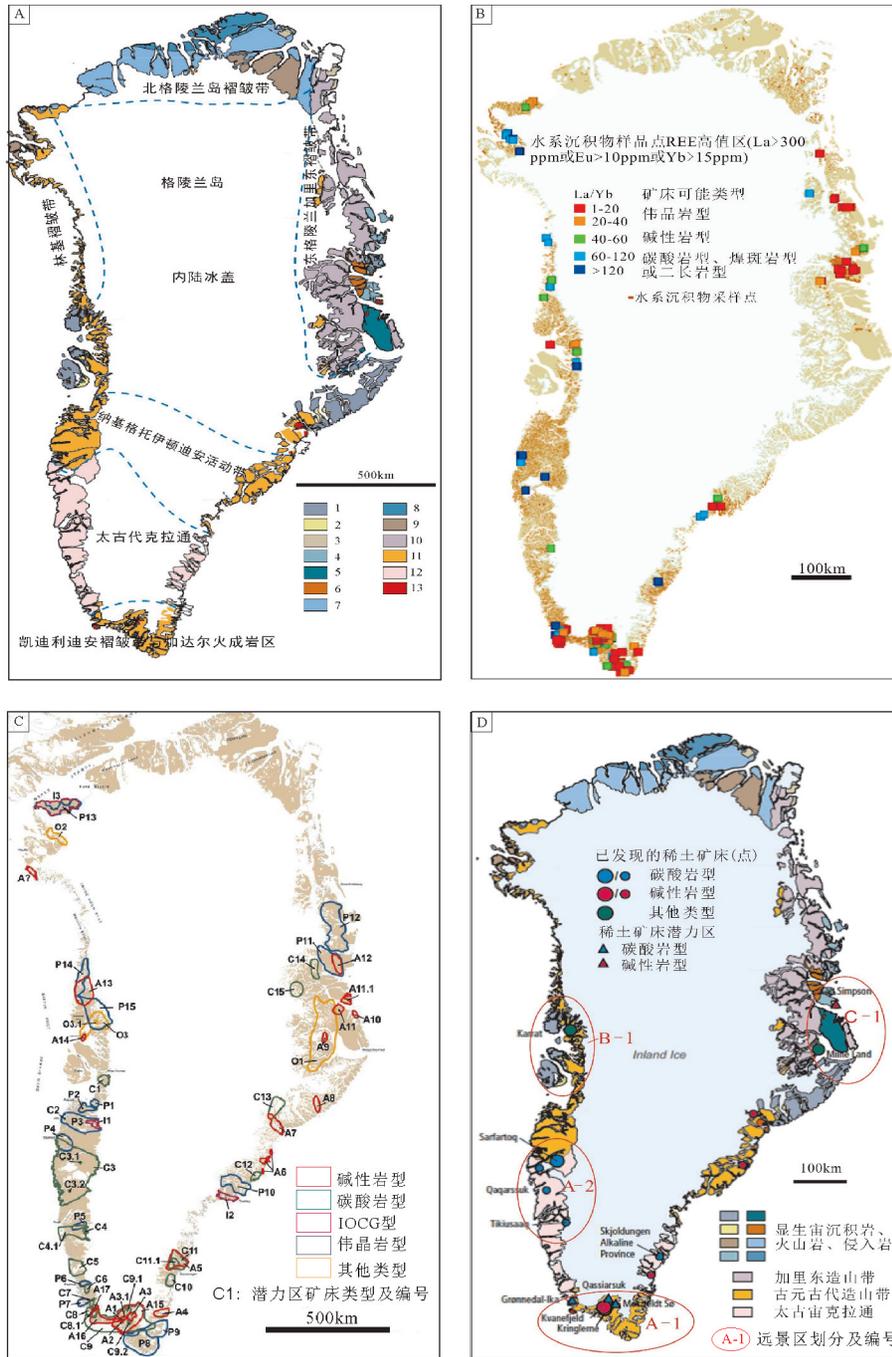


图1 格陵兰岛地质概况与远景区划分

Fig. 1 Sketch geological map of Greenland and the division of prospective areas

A—格陵兰主要地质单元(据参考文献[15]修改);B—格陵兰水系沉积物分布(据参考文献[16]修改);C—格陵兰已知稀土矿成矿类型(据参考文献[16]修改);D—格陵兰稀土矿远景区划分(据参考文献[15]修改);1—古近纪玄武岩;2—石炭纪—白垩纪沉积岩,东格陵兰 kangerlussaq 盆地,西格陵兰 Nuussuaq 盆地;3—石炭纪—古近纪沉积岩,北格陵兰 Wandel Sea 盆地;4—泥盆纪沉积岩,北—东格陵兰岛;5—石炭纪—白垩纪沉积岩,东格陵兰岛 Jameson 盆地;6—格陵兰岛东北部加里盆地;7—北格陵兰 Franklinian 盆地早古生代沉积岩,地台;8—北格陵兰 Franklinian 盆地早古生代沉积岩;9—中—新元古代沉积岩和火山岩;10—加里东造山带;11—古元古代造山带;12—太古宙克拉通;13—东格陵兰古近纪,南格陵兰中元古代侵入杂岩体

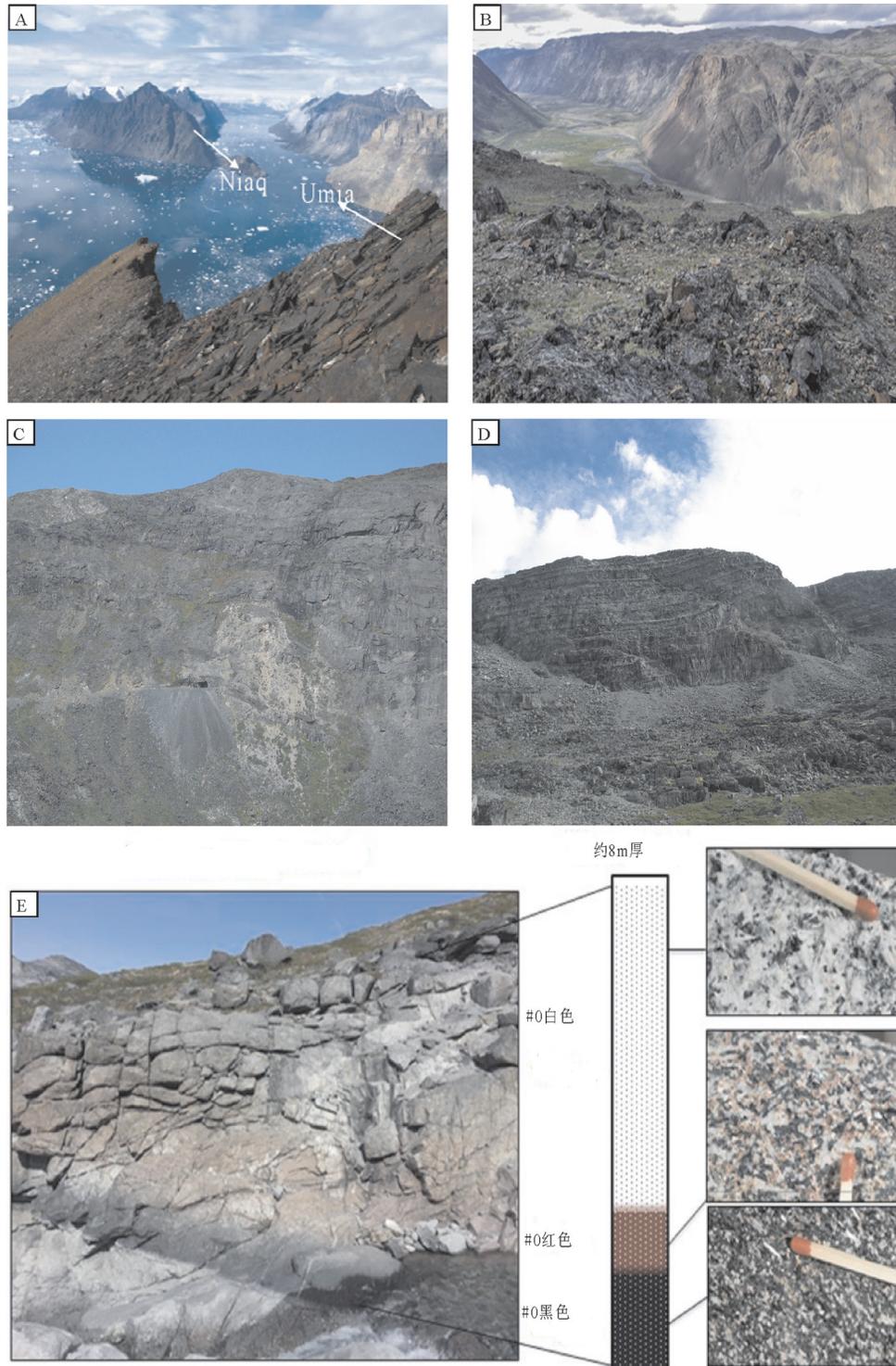


图2 格陵兰已知稀土矿床野外照片

Fig. 2 The known REE deposits in Greenland

A—Umia 和 Niaq 矿床(相距 7km); B—Sarfartoq 碳酸岩稀土矿床(据参考文献[19]修改); C—一条纹霞石正长岩野外产状图;
 D—伊犁马萨克杂岩体层状条纹霞石正长岩野外产状图; E—#0 单元条纹霞石正长岩的层状特征和白色(碱性长石)、
 红色(异性石)、黑色(钠铁闪石)的条纹霞石正长岩手标本照片(据参考文献[20]修改)

0.08%~0.12%之间^[18]。该区2个矿床的特点为吨位大、富重稀土元素、可露天开采、紧邻海岸。其矿床类型不能明确,可能是IOCG型稀土矿,但还需进一步工作才能确定。

2.2 格陵兰岛古砂矿型稀土矿

中生代 Milne Land (米尔恩地) 古砂矿是 Nordisk Mineselskab 股份有限公司 1968 年在重砂矿物集中采样调查及航空放射性调查过程中发现的。该砂矿位于 Charcot Bugt 建造的古老基底中(一套侏罗纪浅海沉积物), 所处位置极其反常, 其中“Hill 800”地处 Bays Fjelde, 方圆直径有 500m, 厚度 40~50m^[21]。重矿物赋存在 20m 厚的基底砂岩中, 稀土元素、铀、钍等潜在资源赋存在独居石中。1990 年 Coffs Harbour 金红石公司和 Nunaoil 股份公司在“Hill 800”地区的 5 个矿点精选了 15t 样品, 约有 10t 用于冶金学上的相关研究。从试点规模研究中进行矿物回收, 得出结论, 从砂矿中能分选独居石、锆石和石榴子石, 但不能分选出锐钛矿, 因为该矿物粒度很细, 性质也很复杂。Coffs Harbour 金红石公司估计, “Hill 800”矿区含有资源量 370Mt, 锆石的品位为 1.1%, 独居石的品位为 0.5%, 锐钛矿的品位为 2.6%, 石榴子石的品位为 3.1%, 磷钇矿的品位为 0.03%^[22]。

2.3 格陵兰岛碳酸岩型稀土矿

萨法托克碳酸岩岩体(564Ma)位于太古宙克拉通和古元古代 Nagssugtoqidian 活动带之间的过渡带。1976 年格陵兰地质调查局根据区域航空放射性测量和后来的野外地质工作发现了该杂岩体。随后, 该岩体就成为各种针对金刚石、Nb、P 和稀土元素(REE)进行勘探活动的目标。岩体的中央核部区域被一系列似环状岩层或岩墙包围, 有多个碳酸盐角砾岩脉侵入其内。大量的霓长岩化出现在核部区域周围。霓长岩化外带的独立地带发现有铀和 REE 矿化。含稀土元素矿物主要为氟碳铈镧矿、氟碳钙铈矿和独居石。2010 年, Hudson 资源公司报道了杂岩体北部 ST1 矿点(图 2-B), 符合 NI 43-101 标准的资源估算结果: 在 TREO(总稀土氧化物)边界品位为 0.8%, 平均品位为 1.53% 时, 推断资源量为 1400Mt。稀土元素含量为: Ce 约占 45%、La 约占 20%、Nd 约占 25%、Pr 约占 6%、Sm 约占 2%、Gd、Dy 和 Y 共占 2%^[23]。

卡卡尔萨克碳酸岩杂岩体(165Ma)位于格陵兰

西部 Maniitsoq 以东 60km, 伴有金伯利岩岩墙和碱性侵入体。碳酸岩的成分从黑云碳酸岩变化到粗粒白云碳酸岩。2010 年, Nuna 矿业股份有限公司开始对该碳酸岩进行勘探。主要的潜力资源位于隐藏在碳酸盐岩脉中杂岩体的核心区域, 该公司报道 1.5km² 区域内总稀土氧化物的品位为 2.4%, 主要的寄主矿物为碳酸铈铈矿(Sr 和稀土元素的碳酸盐)。以轻稀土元素的矿化作用为主, 其中稀土元素含量为: Ce 约占 50%, La 约占 27%, Nd 约占 16%, Pr 约占 5%。存在稀土元素矿化的矿脉通常不超过 1m 厚^[17]。

丹麦-格陵兰地质调查局在 2005 年通过使用区域水系沉积物数据和区域航空物探数据发现了 Tikiusaaq (提库萨克) 碳酸岩岩体, 该岩体由块状的白云石-方解石碳酸岩岩席组成, 这些岩席约在 158Ma 前沿韧性剪切带侵入进来, 之后又被富碳酸盐超镁铁质硅酸盐岩墙侵入。Nuna 矿业股份有限公司在 2010 年开始对提库萨克碳酸岩岩体进行勘查, 尤其是针对航空磁测圈定的碳酸岩岩体的核心部位进行了勘查。稀土元素主要在碳酸岩岩浆作用的最后阶段富集, 主要的含稀土元素矿物是碳酸铈铈矿(铈和稀土元素的碳酸盐矿物)^[24]。在 Th 异常区, 富含稀土元素的碳酸岩岩体表层样品的稀土氧化物含量达 9.6% (主要是轻稀土元素)。稀土元素所占比例如下: Ce 约占 47%, La 约占 33%, Nd 约占 12%, Pr 约占 4%, 其他稀土元素约占 4%^[24]。

2.4 格陵兰岛碱性岩型稀土矿

格陵兰岛南部的中生代-古生代加达尔火成岩省认为是由砂岩和多种火成岩和深成岩浆岩组成的克拉通裂谷区域。深成岩岩浆系列为碱性-过碱性系列, 是 Ilímaussaq (伊犁马萨克杂岩体) (1160Ma) 的一部分。伊犁马萨克侵入岩体主要受沉陷地块的影响经历了 3 次脉动^[25]。其中, 第三次形成了一系列层状霞石正长岩。该岩体主要富集 U、Th、Nb、Ta、Be、Zr、Li、F、Zn 和 REE 元素。在杂岩体内包含了 2 个稀土元素矿床, 如克林雷恩(底部堆积的条纹霞石正长岩为主)和 Kvanefjeld(可凡湾)(异霞正长岩为主)。加达尔火成岩省(Gardar Province)也发育 Igaliko(伊高立克)霞石正长岩杂岩体, Motzfeldt So(莫兹菲特)稀土元素矿床也赋存在其中^[25]。

可凡湾多元素矿床位于格陵兰南部 Narsaq 地

区以北几千米处。另外还包括早期的碱性侵入体,这些侵入体在后期的碱性岩浆活动中形成岩块和岩席。所有的稀土元素(还有U和Th)都与异霞正长岩有关,该岩体产有浸染状磷硅稀土矿,它是REE及U和Th的原生矿物。矿床还含有锌,在异霞正长岩中呈浸染状闪锌矿产出。因可凡湾多元素矿床U和Th元素具有资源潜力而对其进行了勘探。GMEL(格陵兰矿产资源能源股份有限公司)报道了矿产资源估计数据(边界品位为 U_3O_8 150×10^{-6}):JORC总资源量为619Mt,其中JORC探明资源量为437Mt,JORC推断资源量为182Mt。TREO(稀土氧化物总量)为6.6Mt,其中重稀土氧化物24Mt, Y_2O_3 0.53Mt, U_3O_8 15.87Mt,锌1.4Mt。在近地表附近圈定了品位较高的矿带,包括品位为1.4%的TREO 122Mt,以及 404×10^{-6} 的 U_3O_8 (重稀土氧化物品位为0.05%, Y_2O_3 为0.12%)^[26]。

Kringlerne(克林雷恩)多元素矿床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,矿床位于南格陵兰岛那萨克和科克托克镇区。条纹霞石正长岩堆晶岩形成29个循环的有规律岩层(图2-C、D)。每个岩层厚约8m,都已经重新填图,编号序号从-11到+17^[27]。单独的填图单元由黑色正长岩(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(图2-E)。Rimbal私人公司对条纹霞石正长岩研究了数十年,主要针对Zr、Y、Nb和REE。该公司目前的工作成果表明资源量不少于1000Mt,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、重稀土的占比例分别是88%和12%。

Motzfeldt So(莫扎菲特)稀土矿床是伊高利克霞石正长岩杂岩体的一部分。莫扎菲特正长岩中含有烧绿石堆积物,表明Ta的品位较高。20世纪80年代,丹麦-格陵兰地质调查局在调查研究的基础上估算出钽资源量为600Mt(Ta品位为 120×10^{-6})。在高品位矿带Ta的含量高达 426×10^{-6} 。另外,铌资源量至少为130Mt(Nb_2O_5 的品位为0.4%~1.0%)。Ram私人有限公司目前正在勘查与稀土资源有关的侵入体。2010年的工作表明,已知的铌-钽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铌-钽矿化最富,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^[28]。

3 稀土矿远景区划分

本次远景区的划分从大地构造背景、矿化元素组合复杂程度、赋矿岩体、主要矿物组成、稀土元素矿床、矿点及稀土元素品位6个方面考虑,分为4个远景区(图1-D),分别为A-1级南格陵兰岛远景区、A-2级西南部格陵兰岛远景区、B-1级西格陵兰岛远景区、C-1级东格陵兰岛远景区(表1)。

A-1远景区位于南格陵兰岛,发现的矿床为碱性岩型稀土元素矿床(可凡湾、克林雷恩、莫扎菲特)。矿床以Eriksfjord建造为主,其岩性为一套陆地砂岩和由玄武岩构成的熔岩火山沉积岩,与尤利安娜霍布Julianehab花岗岩体呈不整合接触;构造方面以2条NE-SW向大断层作为控矿构造;侵入岩以位于艾瑞克斯建造玄武岩熔岩上部的伊犁马萨克杂岩含矿岩体为主^[9](图3)。这3个控矿因素是形成碱性岩型稀土矿床的重要因素。在岩体控矿因素上同中国四川冕宁稀土矿床一样,矿体在时间和空间上与碱性正长岩关联密切^[30]。因此考虑该类型的稀土元素矿潜力需从碱性岩体出发,推测在格陵兰南部的Qassiasuk(A3.1)、Ivigtut(A17)均具有形成碱性岩型稀土矿床的潜力。

A-2潜力区位于格陵兰岛的西南部,本区碳酸岩型矿床产于大陆裂谷环境,且与Iapetus Ocean^[31]的打开有关。稀土矿床有萨法托克、卡卡尔萨克、提库萨克稀土元素矿床。同中国内蒙古的白云鄂博H8典型的火成碳酸岩赋矿杂岩体,具有典型的霓长岩化,并认为富钾板岩(H9)是赋矿碳酸岩伴生的一种霓长岩化现象^[32]。可能暗示碳酸岩稀土矿具有专属性。该类型未发现的稀土资源主要从碳酸岩岩体和霓长岩化蚀变两方面考虑,根据此规律Niaqornakav、Gronnedal-lka均具有良好的潜力。

B-1远景区位于格陵兰岛西部,除已知的Karrat稀土矿床外,其他矿床类型不清楚,可能为IOCG型。此处工作程度较低,其成矿模式还需进一步研究。

C-1远景区位于格陵兰岛东部,该远景区仅存在已知的米尔恩地(Milne Land)古砂矿型稀土元素矿床。该区地层以石炭纪-白垩纪沉积岩为主。

表1 格陵兰岛稀土矿概况
Table 1 The summary of REE deposits in Greenland

远景区地理位置(编号)	格陵兰西南(A-1)	格陵兰南部(A-2)	格陵兰西部(B-1)	格陵兰东部(C-1)
已知典型矿床	典型矿床: 萨法托克(Sarfartoq)、卡斯苏克(Qaqarssuk)分别产于太古宙与古太古宙造山带过渡边界、太古代基底,前者在花岗闪长片麻岩及外围环状碳酸岩岩墙赋矿, TREO的工业品位为0.8%,推断资源量为14Mt, TREO平均品位为1.53%。后者以轻稀土为主,面积1.5km ² , TREO平均含量为2.4%,矿脉小于1m厚 ^[21]	典型矿床: 可凡湾、克林雷恩、莫兹非特稀土矿,均产于凯迪利迪安褶皱带,成矿时代均为新元古代;可凡湾总资源量为619Mt,其中探明资源量为437Mt, TREO 6.6Mt, Zn1.4 Mt, U ₃ O ₈ 15.87Mt。克林雷恩探明资源量为1000Mt,平均品位分别为: ZrO ₂ 为2%, Nb ₂ O ₅ 为0.25%, REO 为0.5%, Y ₂ O ₃ 为0.1%, Ta ₂ O ₅ 为0.025%, 轻、重稀土比例为88:12 ^[25-27]	典型矿床: 卡拉特(karrat)稀土矿;产于古元古代造山带中,成矿时代为古元古代,典型矿物: 独居石+氟碳铈矿+褐帘,矿体约为10~33m, TREO平均品位为1.36%,预测资源量为26Mt ^[6]	典型矿床: 米尔恩地稀土矿(Milne Land),产于加里东褶皱带,典型矿物为: 石榴子石+独居石+锐钛矿+磷钇矿等。总资源量3.7Mt, 1.1% ZrO ₂ , 5% Ce ₂ O ₃ , 2.6% Y ₂ O ₃ ^[18]
其余远景区	Qassiasuk(A3.1)、Iviglut(A17)(图1-C)	Niaqornakavsak Gronnedal-lka(图3)	需要进一步查明成矿模式	重点考察O1远景区(图1-C)
划分远景区级别依据	紧邻海岸、离国际机场近、矿床资源潜力大、成矿条件良好	交通运输方便(海运+空运)、矿床资源潜力巨大、成矿条件优越、伴有铀矿	可露天开采,紧邻海岸、富重稀土元素	具有重稀土元素、紧邻海岸、开采方便
远景区级别	I级	I级	II级	III级

通常砂矿是重矿物经过二次堆积形成,重矿物通常含有类似磷钇矿和独居石矿物,其潜在的古砂矿稀土资源矿床还有O1远景区稀土元素矿床(图1-C)。

总的来说, I级远景区应该重点考察已知矿床

的深部找矿地区和该区其他隐伏岩体和出露岩体的含矿性研究。此外还需加强 II级、III级远景区的东、西格陵兰太古宙和元古宙碱性岩的评价和找矿工作。

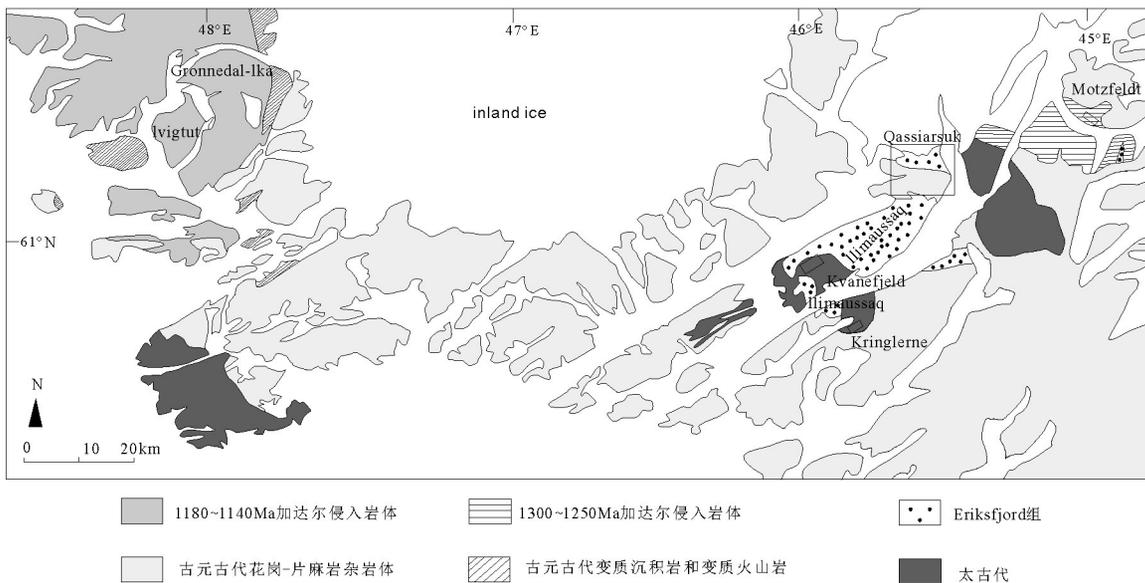


图3 格陵兰岛南部加达尔火成岩省地质简图(据参考文献[19,29]修改)

Fig. 3 Sketch geological map of Gardar intrusive complex in southern Greenland

4 格陵兰岛稀土矿可利用性评价

根据格陵兰岛官方网站和已知的文献资料^[32-36],总结了格陵兰岛稀土资源可利用性评价。

(1)政府方面:格陵兰岛矿产石油局是唯一管理矿产勘查和开发的机构,全权负责关于矿产和石油开发的技术服务。一站式管理和审批探矿证、采矿证、矿业用地、环境评估报告,流程简单效率高。目前有艾凡那资源公司(Avanna)、哈德森资源公司(Hudson resources)、捷克地质研究组(CGRG)、格陵兰矿物能源公司(GME)、坦伯利兹(Tanbreez)、雷根西矿业公司(Regency mines)、稀土资源公司(Rare Earth resources)等多家矿业公司从事格陵兰稀土矿开发与勘探。格陵兰岛与中国外交关系良好,也会欢迎来自中方的企业。

(2)交通方面:格陵兰岛海运较发达,且短距离的直升机业务能够得到保障。虽然格陵兰岛大面积被冰雪覆盖,但随着全球变暖和技术提升,高纬度的极地地区不再是开发的禁区^[5]。使格陵兰岛地理位置纬度较高,但被封冻的面积范围有限,并不需要大面积开展破冰工作,因此能降低运输成本。

(3)劳工方面:由于格陵兰岛人烟稀少,在本地雇佣大批工人基本不现实,因此必须解决从哪雇佣工人的问题。中国劳工和邻近的北美或欧洲劳工相比具有更小的探亲成本,如果能雇佣中国劳工是

最佳选择。

(4)气候方面:与芬兰、瑞典几乎同纬度的格陵兰岛西南和南部海岸,在暖流的影响下,天气较温和,气候条件甚至优于加拿大北部。

5 与中国四川牦牛坪稀土矿对比

为进一步明确格陵兰稀土矿资源优势,将格陵兰南部最典型的伊犁马萨克稀土矿床与中国四川牦牛坪稀土矿相对比(表2)。根据已有的资料发现,这2类矿床严格受断裂构造的控制。尽管2种矿床产于不同的构造背景和时代,但它们表现出一定的相似性,又有特殊的成矿特征。其中伊犁马萨克稀土矿物种类繁多,此外还有含铀的矿物,而牦牛坪稀土矿物较单一。

6 结 论

(1)格陵兰岛的稀土矿床主要集中在西南部、南部、中东部、中西部,其类型有碳酸岩型、碱性岩型、古砂矿型,可能有IOCG型。

(2)格陵兰岛稀土矿资源潜力巨大,本文确定4个远景区,其中有2个I级、1个II级和1个III级,下一步工作应重点关注格陵兰的南部和西南部,其次关注中西部和中东部。

(3)格陵兰岛稀土矿资源可利用性评价良好,值得中方企业关注。

(4)格陵兰伊犁马萨克稀土矿与中国四川牦牛

表2 伊犁马萨克稀土矿与中国四川牦牛坪稀土矿对比

Table 2 Comparison of Ilimaussaq REE deposit and Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China

矿床	伊犁马萨克稀土矿	四川冕宁稀土矿(牦牛坪)
地理位置	格陵兰西南加达尔省那萨克镇(Narsaq)	四川南部冕宁西南22km
大地构造背景	加达尔省断裂	扬子陆台西缘陆缘拗陷带,康滇隆起与盐源-丽江台褶皱带的过渡部位
矿体展布	可凡湾和第二矿区的异霞正长岩在伊犁马萨克杂岩体中以连续层状产出	矿体主要呈一系列北北东向平行大脉
含矿岩体	伊犁马萨克杂岩体中的异霞正长岩	碳酸岩+正长岩杂岩体
矿物组合	碱性长石、方钠石、霞石、方沸石、霓石、钠铁闪石、斯坦硅石;绿色异霞正长岩、富钠铁闪石、黑色异霞正长岩	氟碳铈矿+少量(硅钛铈矿+氟碳钙铈矿);方解石+霓辉石等;硫化物:方铅矿+辉钼矿
矿石结构	中细粒结构、块状构造	块状、条带状、细脉状等
期次	伊犁马萨克杂岩体的侵入分为3个主要期次	可能有4期成矿作用
矿床成因	深部岩浆房从响质熔浆分馏成钠质火成岩	富REE和挥发组分岩浆演化体系,早期碱性岩浆上侵,晚期充填构造裂隙成矿
资料来源	[6][27][37]	[38-40]

坪稀土矿既有一定的相似性又有各自的独特性。

致谢:本文在收集资料过程中得到了中国地质科学院矿产资源研究所聂凤军研究员、李九玲研究员、李振清副研究员的帮助,中国地质科学院矿产资源研究所杨岳清研究员在论文审阅过程中提出了宝贵意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]袁波.成都综合利用所控股企业海外矿山收购获得突破[EB/OL](2016-12-12)[2019-06-17]http://www.cgs.gov.cn/xwl/gjhz/201612/t20161212_419219.html. 2016.
- [2]李仲学,周宝炉,赵怡晴.未来世界稀土供需格局分析及对策[J].稀土,2016,37(3):153-158.
- [3]周宝炉,李仲学,赵怡晴.世界稀土市场动态及产业对策建议[J].中国稀土学报,2016,34(3):257-264.
- [4]程建忠,车丽萍.中国稀土资源开采现状及发展趋势[J].稀土,2010,(2):65-69,85.
- [5]聂凤军,张伟波,曹毅,等.北极圈及邻区重要矿产资源找矿勘查新进展[J].地质科技情报,2013,32(5):1-8.
- [6]赵元艺,卢伟,汪毅,等.格陵兰伊犁马萨克铌-钽-铀-稀土矿床研究进展[J].地质科技情报,2013,32(5):9-17.
- [7]刘益康.从2010加拿大国际矿业年会(PDAC)看全球矿产勘查动向[J].矿产勘查,2010,1(3):205-208.
- [8]水新芳,赵元艺,李九玲,等.格陵兰岛中东部马尔姆杰格(Malmbjerg)斑岩型钼矿床研究进展[J].地质科技情报,2013,32(5):46-51.
- [9]聂凤军,赵元艺,李振清,等.格陵兰岛南部纳鲁娜科金矿床地质特征及成因[J].矿物学报,2013,(S2):1054-1055.
- [10]柳建平.格陵兰伊苏亚BIF型铁矿地质地球化学特征研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2013:1-85.
- [11]赵元艺,聂凤军,李振清,等.格陵兰岛西南部Nassaq地区辉钼矿Re-Os年龄及意义[J].地质论评,2015,61(2):457-462.
- [12]逯文辉.格陵兰北部与西部重要矿床成矿规律与成矿预测[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2013:1-69.
- [13]Nicholas Rose,徐长宁.格陵兰岛有色金属勘探前景分析[J].世界有色金属,2012,(5):69-70.
- [14]李九玲,卢伟,赵元艺,等.格陵兰重要金属矿简介及分布规律[J].地质科技情报,2013,32(5):18-25.
- [15]Henriksen N, Higgins A K, Kalsbeek F, et al. Greenland from Archean to Quaternary descriptive text to the 1995 geological map of Greenland, 1:2500000 2nd edition[M]. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin, 2009:1-126.
- [16]Secher K, Thorning L, Bo M N, Schjøth F, et al. On-line presentation of mineral occurrences in Greenland[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 29(1):15-21.
- [17]Paulick H, Rosa D, Kalvig P. The rare earth element potential in Greenland. Geology and Ore-exploration and mining in Greenland[M]. Denmark Geocenter, 2015:1-51.
- [18]Mott A V, Bird D K, Grove M, et al. Karrat Isfjord: A newly discovered Paleoproterozoic carbonatite-sourced REE deposit, Central West Greenland[J]. Economic Geology, 2013, 108(6):1471-1488.
- [19]Kolb J, Keiding J K, Steenfelt A, et al. Metallogeny of Greenland[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 78:493-555.
- [20]Bohse H, Brooks C K, Kunzendorf H, et al. Field observations on the kakortokites of the ilimaussaq intrusion, south greenland, including mapping and analyses by portable x-ray fluorescence equipment for zirconium and niobium[M]. Denmark: Geological Survey of Greenland, 1971:38-43.
- [21]Harporth O, Pedersen J L, Schonwandt H K, et al. The mineral occurrences of central East Greenland[M]. Commission for Scientific Investigation in Greenland, 1986, 17:1-139.
- [22]Leth Nielsen B. Radiometric survey between Scores by Sund and Hold with Hope, central East Greenland[M]. Geological Survey of Greenland, 1976:1-44.
- [23]Hudson Resources Inc. Sarfartoq rare earth project[EB/OL](2015-5-10)[2019-06-17]http://www.hudsonresources.ca/files/Hudson_43-101_30May12.pdf. 2015.
- [24]Nunaminerals A S. Tikisuaq REE prospect[EB/OL](2015-05-12)[2019-06-17]<http://nunaminerals.com/en/projects/rare-earth-element-ree-projects/tikisuaq-ree-prospect.html>.
- [25]Upton B G J, Emeleus C H, Heaman L M, et al. Magmatism of the mid-Proterozoic Gardar Province, South Greenland: Chronology, petrogenesis and geological setting[J]. Lithos, 2003, 68(1):43-65.
- [26]Greenland Minerals and Energy Ltd. Developing Kvanefjeld-Greenland's world project[EB/OL](2015-02)[2019-06-17]<http://www.ggg.gl/rare-earth-elements/rare-earth-elements-at-kvanefjeld/>. 2015.
- [27]Henning Sørensen, Anker Weidick, Henry Emeleus, et al. Geological Guide South Greenland: The Narsarsuaq-Narsaq-Qaqortoq Region[M]. Geological Survey of Denmark and Greenland, 2006:1-75.
- [28]Regency Mines. Motzfeldt project[EB/OL](2010-12)[2019-06-17]https://www.govmin.gl/images/stories/minerals/events/perth_dec_2010/Ram_Resources.pdf.2010.
- [29]Upton B G J. Tectono-magmatic evolution of the younger Gardar southern rift, South Greenland[M]. Geological Survey of Denmark & Greenland Bulletin, 2013:1-124.
- [30]牛贺才,林传山.论四川冕宁稀土矿床的成因[J].矿床地质,1994,13(4):345-353.
- [31]Secher K, Heaman L M, 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, (S1), 112:400-406.
- [32]王希斌,郝梓国,李震,等.白云鄂博——一个典型的碱性-碳酸岩杂岩的厘定[J].地质学报,2002,76(4):501-524.
- [33]贾春阳.格陵兰岛:稀土宝藏还是地缘陷阱[J].世界知识,2014,

- (13): 50-51.
- [34] 刘益康. 北冰洋圈的矿产勘查热[J]. 世界有色金属, 2010, (12): 32-33.
- [35] 卢伟, 赵元艺, 逯文辉, 等. 格陵兰优势金属矿产与矿业投资环境分析[J]. 地质科技情报, 2013, 32(5): 52-54.
- [36] 宋国明. 格陵兰矿业合作前景广阔[J]. 国土资源情报, 2013, (1): 24-29.
- [37] Soerensen H, Bailey J C, Rosehansen J. The emplacement and crystallization of the U-Th-REE-rich apaitic and hyperapaitic lujavrites at Kvanefjeld, Ilimaussaq alkaline complex, South Greenland[J]. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 2011, 59:69-92.
- [38] 谢玉玲, 侯增谦, 徐九华, 等. 四川冕宁-昌都稀土成矿带铜锌、铜锡合金的发现及成因意义[J]. 中国科学(D辑), 2005, 35(6): 572-577.
- [39] 刘丛强, 黄智龙, 许成, 等. 地幔流体及成矿作用——以四川冕宁稀土矿床为例[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [40] 阳正熙, Anthony, 蒲广平. 四川牦牛坪稀土矿物流体包裹体研究[J]. 矿物岩石, 2001, 21(2): 26-33.