

格陵兰岛西南部可凡湾稀土矿床地质特征

晁文文¹, 周家云², 蒋晓丽², 叶亚康², 惠博², 陈伟²

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 可凡湾稀土矿是格陵兰岛世界级大型稀土矿床, 位于格陵兰岛西南部加达尔碱性岩省中部。控矿岩体为中元古代伊犁马萨克杂岩体, 成矿母岩为钠铁闪石异霞正长岩和霓石异霞正长岩 2 种钠质碱性岩。矿体受裂隙或层间滑动面控制, 有方钠异霞正长伟晶岩脉和钠铁闪石异霞正长岩两种类型, 矿石由于矿物组合及赋存形式不同而分为钠铁闪石-钠长石-斯坦硅石型和方钠石-霓石-异性石型等 2 种类型。斯坦硅石和异性石分别是 2 种矿石最主要的稀土矿物, 斯坦硅石的 $\omega(\text{REO})$ 含量 31.5%~44.9%, 平均 35.9%, 以轻稀土为主, 含少量重稀土, 富含 U、Th, 易被独居石、铀钍石取代; 异性石 $\omega(\text{REO})$ 含量 1.41%~1.90%, 富含重稀土及 Nb、Ta, 一部分稀土元素以类质同像形式存在, 一部分稀土以极细粒的独居石和斯坦硅石等其他稀土矿物包裹形式存在。伴随碱性杂岩体的多阶段成岩过程, 碱性岩浆分别在霓石异霞正长岩阶段发生岩浆热液成矿作用和钠铁闪石异霞正长岩阶段发生岩浆成矿作用, 在整体上形成层状-透镜状构造, 成岩-成矿模型具有“异源-多幕-同位侵入”的特征。

关键词: 伊犁马萨克; 钠质碱性岩; 稀土; 格陵兰

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.01.002

中图分类号: TD981 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 01-0010-06

伊犁马萨克 (Ilimaussaq) 岩体位于格陵兰岛西南部那萨克 (Narsaq) 镇^[1], 是全球分布极少的钠质碱性岩的典型代表, 其极端的地球化学成分导致了独特丰富的矿物组成^[2]。该岩体以其独特的过碱性岩石组合和超过 220 种稀有矿物而闻名于世, 其中有 15 种矿物为该岩体所独有, 目前在世界其他地方并未发现^[3]。伊犁马萨克岩体是目前世界上第二大稀土资源富集地, 发现有可凡湾 (Kvanefjeld) 和克林格勒 (Kringlerne) 2 个世界级稀土矿床^[4], 其独特的地质背景、极大的矿床价值以及独特的岩石矿物组合等无不吸引着全世界的地质学家。可凡湾稀土矿床的资源储量巨大, 重稀土占比较高, 属富铕的矿物型重稀土矿床。稀土元素主要赋存在全球少见的斯坦硅石和异性石中。本文在综合收集前人研究基础上, 系统总结了可凡湾稀土矿床的地质特征、稀土矿物特征、成矿模式, 对于探讨钠质碱性岩成因模式、岩浆演化及其与稀土成矿关系具有重要的理论和实际意义。

1 区域地质背景

南格陵兰包括 3 个主要构造-地层单元: (1) 太古宙基底, (2) 古元古代凯蒂利安造山带; (3) 中元古代加达尔碱性火成岩省^[4]。太古宙基底由中-新太古宙的片麻岩组成, 分布于南格陵兰北部; 古元古代凯蒂利安造山带细分为中部和南部, 中部地区主要分布 1850~1780 Ma 朱利安哈火成岩杂岩, 南部地区主要分布强烈变形变质的区域变质岩及镁铁质变质火山岩和火山碎屑岩^[4]。中元古代加达尔 (Gardar) 碱性火山岩省横跨太古宙基底和凯蒂利安造山带, 形成于一个封闭的裂谷构造环境, 岩浆活动从 1350 Ma 持续到 1160 Ma^[5], 主要在 1300~1250 Ma 和 1180~1140 Ma 两个时间段以大量的岩墙和岩墙群以及许多大小不同的岩浆复合体形式侵入到古元古代-太古宙基底之中^[6]。Gardar 侵入体常呈椭圆形, 长约 300 m 至 50 km 不等, 岩性主要有碱性玄武岩、粗面岩、钠质碱流岩、碱性辉长岩、碱性正长岩、碱

收稿日期: 2021-11-02

作者简介: 晁文文 (1997-), 女, 硕士, 研究方向为地质工程。

性花岗岩、霞石正长岩和碳酸岩等^[7]。

2 矿区地质概况

伊犁马萨克碱性杂岩体是 Gardar 碱性火山岩省的晚期岩浆代表, 年龄约 1160 Ma, 侵入花岗质基底, 上覆元古界 Eriksfjord 组砂岩和熔岩^[8], 反应了南格陵兰中元古代大陆裂谷的隆起和侵蚀事件^[6]。杂岩体地表出露呈椭圆形, 长约 18 km, 宽约 8 km, 受断裂构造控制, 呈北西-南东向展布, 其层状构造明显, 通常被认为由三个侵入阶段组成: (1) 顶部岩相带由碱性普通辉石正长岩组成; (2) 中部过渡岩相带由过碱性石英正长岩和碱性花岗岩组成; (3) 下部岩相带为碱性霞石正长岩, 又细分为顶层霞石正长岩, 中间层异霞正长岩, 底层条纹霞石正长岩^[9]。岩体分为南北两个部分, 北部形成可凡湾 (Kvanefjeld) 稀土矿, 南部形成克林格勒 (Kringlerne) 稀土矿。碱性杂岩围岩主要为 Eriksfjord 组一套韵律交替的陆源沉积和火山岩组合, 沉积岩有砂岩、砾岩, 火山岩有玄武岩、碳酸岩和火山碎屑岩等^[10]。矿区构造主要有北东向和近东西向断裂两组, 断裂的交汇位置往往为岩浆侵入的中心。

3 矿床地质特征

伊犁马萨克 (Ilimaussaq) 杂岩体的西北边缘分布有该区规模最大的可凡湾 (Kvanefjeld) 稀土-钍多金属典型矿床, 据格陵兰矿物和能源公司 2015 年公布的数据, 为世界级超大型稀土矿床, 也是该地区首先探明且资源储量最大的矿床, 已施工钻孔间距 40~70 m, 已达到勘探程度。早期可凡湾矿床仅指岩体西北部 Kvanefjeld 地区, 后期在该矿床南部和南东部分别发现 Zone2 和 Zone3 矿段, 其成矿地质条件、矿床特征、矿体特征等方面都与 Kvanefjeld 矿段基本一致。目前的可凡湾 (Kvanefjeld) 稀土矿床共有 3 个矿段, 探明稀土氧化物 (TREO) 资源量 172 万 t, 控制资源量 342 万 t, 推断资源量 600 万 t, 估计总资源量 1114 万 t^[11]。矿区岩浆岩主要出露伊犁马萨克 (Ilimaussaq) 杂岩体的顶部岩相、中部过渡岩相带, 以及下部岩相带顶层和中间层, 岩性主要有辉石正长岩、霞石正长岩、霓石异霞正长岩、钠铁闪石异霞正长岩和方钠异霞正长岩伟晶岩等, 其中与稀土成矿有关是 2 种重要的钠质碱性岩是钠铁闪石异霞正长岩和霓石异霞正长岩^[4], 主要分

布于矿区北东部 Kvanefjeld 矿区, 南部 Zone2 矿区和南东部 Zone 矿区。霓石异霞正长岩呈灰白色, 不等粒状结构, 块状构造, 主要矿物有方钠石、霓石、斜长石、霞石和正长石, 次要矿物有异性石、钠云母、辉石、正长石、闪锌矿, 稀土矿物有独居石、铈硅磷灰石、斯坦硅石和磷硅铈钠石等。钠铁闪石异霞正长岩呈灰黑色, 具半自形针状结构, 致密块状构造, 主要矿物有钠铁闪石、瑙云母、钠长石等, 次要矿物有正长石、霓石、斯坦硅石, 副矿物有异性石、方沸石、方钠石、霞石和氟化钠等。

3.1 矿体特征

可凡湾矿床主要由岩浆热液作用形成的方钠异霞正长伟晶岩脉和岩浆结晶作用形成的层状钠铁闪石异霞正长岩体组成。伟晶岩脉受断层, 岩石劈理、节理等构造控制, 赋存于辉石正长岩、霞石正长岩和霓石异霞正长岩中, 矿脉与围岩之间接触界限清晰, 蚀变较弱, 矿脉内矿物和围岩矿物迥然不同, 显示了成矿流体的充填成矿作用。在可凡湾矿床 3 个矿段中共发现 9 条伟晶岩脉, 其中 W01 规模最大, 位于 Zone3 矿区东侧, 其余 8 条脉体规模较小。对于伟晶岩脉, 矿体边界不等于矿脉边界, 但是有时可与矿脉边界重合, 矿体基本由单一矿脉构成。W01 矿 (化) 体形态为脉状, 整体走向呈北西-南东向, 地表出露长度约为 968.7 m, 平均厚度约 100 m。

方钠异霞正长伟晶岩脉主要由方钠石、钠铁闪石、钠长石、霞石和异性石组成, 少量钠云母、辉石、正长石、闪锌矿等, 稀土矿物有异性石、独居石、铈硅磷灰石、斯坦硅石和磷硅铈钠石等。矿体 ω (REO) 品位一般在 0.8%~1.1% 之间, 最高可达 3%, 重稀土相对富集, 重稀土占比约 33.02%, 富含 Pr、Nd、Dy、Y 等高值稀土元素, 并伴生有 Hf、Rb、Ta、W、Th 等稀有元素。

层状钠铁闪石异霞正长岩体本身稀土含量极高, 平均 Σ REE 高达 8606.8×10^{-6} , 且富 U、Th 等元素, 稀土在岩浆结晶分异过程中局部富集导致岩体直接矿化, 因此, 岩体基本就是矿体。矿体边界与岩体边界基本一致, 矿体形态为层状、似层状、透镜状。该类矿石稀土含量平均 1.41%, 稀土配分以轻稀土为主, 含少量重稀土, 重稀土占比 16.02%, 富含 U、Th 等元素。

3.2 稀土矿物特征

根据矿石矿物与脉石矿物组合以及赋存形式可把可凡湾稀土矿床的矿石分为钠长石-斯坦硅石

型和方钠石-异性 2 种类型: (1) 钠长石-斯坦硅石型矿石具块状构造, 细晶针状结构, 矿物颗粒在显微镜下较难辨认。对矿石进行初步破碎制成砂光片, 在中国地质科学院矿产综合利用研究所采用澳大利亚 AMICS 矿物参数自动定量分析系统 (SIGMA 300 场发射扫描电子显微镜系统、布鲁 Quantax 200 Xflash 能谱仪和 AMICS 矿物参数自动定量分析软件组成) 进行矿物组成分析, 发现矿物种类繁多, 多达 20 多种 (图 1), 其中矿石矿物主要为斯坦硅石 (也叫菱黑稀土矿, 矿物含量约 5.58%), 其次为独居石 (矿物含量约 0.09%)、磷铈钠石、独居石等十多种副矿物, 几者常呈团块状, 并含伴生铀、钍等元素, 放射性异常显著, 脉石矿物主要有钠铁闪石 (31.68%)、璵云母 (11.46%)、钠长石 (11.27%)、正长石 (9.51%) 等; (2) 方钠石-异性石型矿石具粗粒状结构、伟晶状结构, 脉状构造、块状构造, 矿石内矿物清晰, 矿石矿物主要为异性石, 含量约 50%~60%, 肉红色, 呈团块状集合体, 粒径大于 2 cm, 镜下呈浅玫瑰红色, 常伴生有铈、钍等稀有元素, 脉石矿物主要有方钠石, 含量约 20%~30%, 钠铁闪石, 含量约 10%~20%。

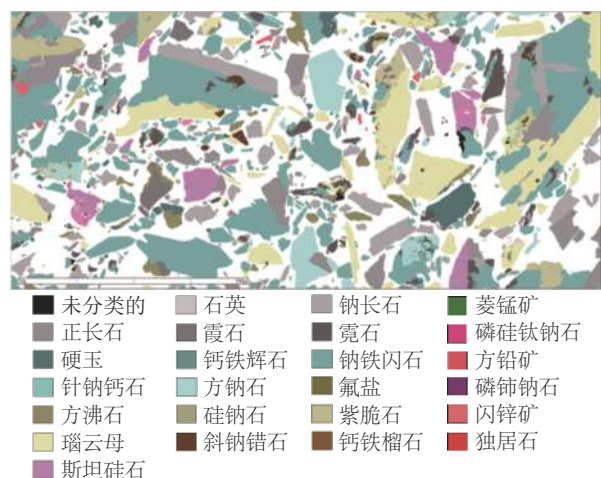


图 1 钠长石-斯坦硅石型矿石中矿物组成 (MLA 分析)

Fig.1 Mineral composition of Ab-Stc Ore (Analysed by MLA)

从以上分析可以看出, 钠长石-斯坦硅石型和方钠石-异性石型矿石的主要工业矿物分别为斯坦硅石和异性石。

(1) 斯坦硅石

斯坦硅石 $[\text{Na}_{14}\text{Mn}_2(\text{Fe}, \text{Mn})_2(\text{REE})_6\text{ZrSi}_{12}\text{O}_{36}(\text{PO}_4)_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$, 又称菱黑稀土矿, 一种由钠、镧系元素、钙、锰、铁、锆和钍等多种元素组成的复

杂磷酸硅盐矿物, 赋含稀土和铀, 是钠长石-斯坦硅石型矿石中最主要工业矿物, 含量约 5.58%。斯坦硅石是伊犁马萨克岩体中钠质矿物组合中重要的成岩矿物, 是可凡湾矿床的主要放射性矿物。这种矿物一般是原生的, 其内部具有成分分带性在很长一段时间内就已经被人们所认识, 但它们的起源却没有被很好的解释^[12]。斯坦硅石呈黑色, 粒度极细, 呈细粒状、针状, 平均嵌布粒度约 187.5 μm , 矿物中 $\omega(\text{REO})$ 含量 31.5%~44.9%, 平均 35.9%。在强烈蚀变条件下, 斯坦硅石往往被独居石、铀钍石和 U-Zr-Na 硅酸盐的细粒团聚体所取代而留下原矿物假形。

以前的学者对斯坦硅石的元素组成进行了研究, 指出斯坦硅石中至少包含有 21 种以上元素^[10], 并且发现斯坦硅石主要富集 REE_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO 和 H_2O , 贫 Na_2O , SiO_2 和 P_2O_5 。斯坦硅石中元素还呈带状分布, 从中心到边缘 Nb_2O_5 , MnO , SrO , Na_2O , REE_2O_3 , P_2O_5 等元素和 Mn/Fe , La/Nd , REE/Th and Nb/Ti 等元素比值逐渐增高, 相反的 TiO_2 , FeO , CaO 和 Y_2O_3 则逐渐减低, 尤其是非均质的边缘比矿物核部具有很低的 U 和 Th^[13]。

(2) 异性石 $[\text{Na}_4(\text{Ca}, \text{Ce})_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+})\text{ZrSi}_8\text{O}_{22}(\text{OH}, \text{Cl})_2]$, 是一种富钠的锆硅酸盐矿物, 含有不同数量的 Ca、Fe、Mn、REE、Sr、Nb、K、Y 和 Ti, 最早就发现于伊犁马萨克碱性岩体^[14-15], 主要赋存于异霞正长伟晶岩以及霓石异霞正长岩中, 是方钠石-异性石型矿石的主要成分^[16], 常与霞石、钠铁闪石、钾长石、钠长石等紧密共生。矿石中异性石呈棕褐色, 自形长条状, 四方晶型, 晶体大小约 5 mm×10 mm, 矿物中 REO 平均含量 2.33%。通常, 稀土元素以类质同像形式置换 Ca 元素而进入异性石, 但是, 采用电子探针

(型号: Shimadzu EPMA1720, 实验条件: Accv=15.0 KV, BC=20.0 nA, SC=18.9 nA, Beam Size=10 μm , 测试单位: 中国地质科学院矿产综合利用研究所) 对大量异性石微区化学元素分析发现, 异性石中仅检测到少量稀土, REO 平均含量 0.73%, 初步估算这部分稀土仅占异性石中稀土总量的 31.33%。进一步采用能谱仪 (型号: 布鲁仪 Quantax 200 Xflash) 对异性石进行能谱面分析发现, 异性石中常赋存极细的其他稀土矿物包体, 这些包体矿物主要为独居石和斯坦硅石, 统计发现独居石平均粒径 0.018 mm, 斯坦硅石平均粒径 0.032 mm。因此, 总体上异性石中稀土元素赋存

状态主要有类质同像和矿物包体2种状态。

4 成矿模式探讨

稀土矿床通常与碱性岩浆岩共生, 碱性岩浆演化过程可以为矿床成因提供重要信息^[17]。前已叙述, 可凡湾矿区出露碱性岩主要有辉石正长岩、碱性花岗岩、霞石正长岩、霓石异霞正长岩和钠铁闪石异霞正长岩等。这几种岩性成岩年龄基本一致, 大约在1134~1160 Ma^[18], 层状-似层状垂直分带明显^[19], 因此, 前人普遍认为伊犁马萨克碱性岩是响岩质岩浆深部分馏上侵^[9]-浅部堆晶作用的产物^[20], 成岩模式主要有“三明治”模式^[21-23]和“多幕侵入”模式^[10]。“三明治”模式强调岩浆的就地结晶分异作用, 指出异霞正长岩是在一个封闭的岩浆房中, 顶部和底部首先结晶后留下中部富含挥发性和稀有元素的残余熔体再结晶形成的。详细的野外观察发现, 杂岩体中辉石正长岩、霞石正长岩、霓石异霞正长岩和钠铁闪石异霞正长岩等几种岩石具有明显的穿插关系和捕虏体现象, 说明几种岩石并不完全是同一岩浆就地结晶分异作用形成, 因此, 一些学者提出了“多幕侵入”的成岩模式, 认为碱性岩浆首先来源于地壳深处分馏碱性玄武质岩浆库^[9,24], 岩浆在1134~1160 Ma期间多次脉冲上侵形成辉石正长岩、碱性花岗岩、霞石正长岩和异霞正长岩的岩浆层序^[10]。同时, 由于几种岩石具有比较一致的近球粒陨石初始 $\epsilon(\text{Nd})$, 显示都来源于地幔源区, 因此, 持“多幕侵入”模式的学者还强调伊犁马萨克(Ilimaussaq)杂岩体不同岩性的同源性, 并认为霓石异霞正长岩和钠铁闪石异霞正长岩这两种异霞正长岩是同一幕岩浆结晶分异的结果^[10]。进一步的研究发现, 几种岩性在岩石分类、岩浆源区和成岩过程还明显不同, 一方面证实该碱性杂岩体具有多期活动特点, 也进一步指示不同岩性来源于不同地球化学组分源区。新的岩石地球化学和Sr-Nd-Pb同位素研究发现, 在A.R.-SiO₂图解上, 辉石正长岩、霞石正长岩落入钙碱性区, 方钠异霞正长岩、钠铁闪石异霞正长岩落入碱性区, 在K₂O-Na₂O图解上, 辉石正长岩、霞石正长岩落在钾质区, 方钠异霞正长岩、钠铁闪石异霞正长岩落入钠质区, 表明辉石正长岩、霞石正长岩属钾质钙碱性岩石, 而含异性石的霓石异霞正长岩和钠铁闪石异霞正长岩为钠质碱性岩; 在^{(207Pb/204Pb)_i}-^{(206Pb/204Pb)_i}和^{(208Pb/204Pb)_i}-^{(206Pb/204Pb)_i}图中, 辉

石正长岩和霞石正长岩在常常紧密伴随, 投点在地幔演化线下面靠近原始地幔一侧, 钠铁闪石异霞正长岩则投点在地幔演化线下面靠近高 μ 地幔一侧, 表明这些碱性岩浆源区具有不同组分; 在La/Sm-La关系图上, 辉石正长岩、霞石正长岩及霓石异霞正长岩的成岩过程主要为结晶分离, 而钠铁闪石异霞正长岩成岩过程主要为部分熔融; 霓石异霞正长岩岩浆熔融深度最深, 结晶分异作用程度高, 钠铁闪石异霞正长岩岩浆部分熔融深度浅, 熔融程度低。因此, 推测这些碱性岩是在同一构造-岩浆活动背景下, 不同深度源区形成的岩浆上侵到浅部于同一构造部位沿早期岩石顺层侵入的结果, 整体上形成层状-透镜状构造, 而杂岩体的成矿作用主要是伴随碱性杂岩体的多幕式成岩过程, 在霓石异霞正长岩阶段发生岩浆热液成矿作用, 在钠铁闪石异霞正长岩阶段发生岩浆结晶成矿作用, 分别形成方钠石-霓石-异性石型矿石和钠铁闪石-钠长石-斯坦硅石型矿石, 从而提出伊犁马萨克岩体“异源-多幕-同位侵入”的成岩-成矿模型。

5 结论

(1) 伊犁马萨克岩体是格陵兰岛西南部中元古代加达尔碱性岩省的典型代表, 也是全球分布极少的钠质碱性岩的典型代表。岩体具有多阶段活动特点, 并形成独特、丰富的矿物组成, 其中有15种矿物为该岩体所独有。

(2) 可凡湾稀土矿床的成矿作用主要与钠铁闪石异霞正长岩和霓石异霞正长岩这两种钠质碱性岩有关。这些碱性岩浆来源于不同深度和熔融程度, 并在浅部同一构造部位常沿早期岩石水平顺层侵入, 整体上形成层状-透镜状构造, 成岩-成矿模型具有“异源-多幕-同位侵入”的特征。

(3) 伴随碱性杂岩体的多阶段成岩过程, 碱性岩浆分别在霓石异霞正长岩阶段发生岩浆热液成矿作用和钠铁闪石异霞正长岩阶段发生岩浆成矿作用, 形成方钠石-霓石-异性石型矿石和钠铁闪石-钠长石-斯坦硅石型矿石。钠铁闪石-钠长石-斯坦硅石型矿石具细晶针状结构, 块状构造, 稀土矿物主要为斯坦硅石, 并含伴生铈、钍等元素; 方钠石-霓石-异性石型矿石具粗粒状结构、伟晶状结构, 脉状构造、块状构造, 稀土矿物主要为异性石, 少量独居石和斯坦硅石, 并伴生伴生铈、钍等稀有元素。

(4) 斯坦硅石和异性石是钠质碱性岩钠质矿物组合中重要的成岩矿物,也是可凡湾稀土矿床中 2 种十分特别的含稀土矿物。斯坦硅石内部具有成分分带性,其中的稀土氧化物 REO 含量 31.5%~44.9%,平均 35.9%,并富含 U、Th;异性石中稀土元素有类质同像和其他稀土矿物包体 2 种赋存状态,稀土含量相对较低。

参考文献:

- [1] 赵元艺,卢伟,汪傲,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.
- [2] ZHAO Y Y, LU W, WANG A, et al. Research progress on the Ilimaussaq Nb-Ta-U-REE deposit, Greenland[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(5):9-17.
- [3] 叶亚康,周家云,曾令熙,等.格陵兰岛 Ilimaussaq 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.
- [4] YE Y K, ZHOU J Y, ZENG L X, et al. Occurrence of rare earth elements in Lujavrite-pegmatite in the Ilimaussaq complex, Greenland[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):120-124.
- [5] FRIIS H. Primary and secondary mineralogy of the Ilimaussaq alkaline complex, South Greenland[M]. In Symposium on critical and strategic materials proceedings. G. J. Simandl and M. Neetz, eds, 2015.
- [6] STEINFELT A, KOLB J, THRANE K. Metallogeny of South Greenland: A review of geological evolution, mineral occurrences and geochemical exploration data[J]. Ore Geology Review, 2016, 77:194-245.
- [7] KOHLER J, SCHONENBERGER J, UPTON B, et al. Halogen and trace-element chemistry in the Gardar Province, South Greenland: Subduction-related mantle metasomatism and fluid exsolution from alkalic melts[J]. Lithos, 2009, 113:731-747.
- [8] UPTON B G J, MACDONALD R, ODLING N, et al. A review of five decades of research into an alkaline complex in South Greenland, with new trace-element and Nd isotopic data[J]. Mineralogical Magazine, 2013, 77:523-550.
- [9] 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, 68:43-65.
- [10] SØENSEN H, BAILEY J C, ROSE-HANSEN J. The emplacement and crystallization of the U-Th-REE-rich agpaitic and hyperagpaitic lujavrites at Kvanefjeld, Ilimaussaq alkaline complex, South Greenland[J]. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 2011, 59:69-92.
- [11] MARKL G, MARKS M, SCHWINN G, et al. Phase equilibrium constraints on intensive crystallization parameters of the Ilimaussaq complex, South Greenland[J]. Journal of Petrology, 2001, 42:2231-2258.
- [12] SØENSEN H, BOHSE H, BAILEY J C. The origin and mode of emplacement of lujavrites in the Ilimaussaq alkaline complex, South Greenland[J]. Lithos, 2006, 91:286-300.
- [13] GMEL. Greenland minerals and energy Ltd. 2015.
- [14] PETERSEN O V. List of all minerals identified in the Ilimaussaq alkaline complex, South Greenland. In: Sørensen. The Ilimaussaq alkaline complex, South Greenland: state of mineralogical research with new results.[J]. Geology of Greenland Survey Bulletin, 2001, 190:25-33.
- [15] 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.
- [16] JIANG X L, ZHOU J Y. A rare rare earth mineral: Stan silica[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):125-128+119.
- [17] JOHNSEN O, GRICE J D. The crystal chemistry of the eudialyte group[J]. Canadian Mineralogist, 1999, 37:865-891.
- [18] STROMEYER F. Summary of meeting 16 December 1819 [Analyse einiger grönländischen, von Prof. Giesecke erhaltenen Fossilien][J]. Göttingische gelehrte Anzeigen, 1819, 3:1993-2000.
- [19] JOHNSEN O, GRICE J D, GAULT R A. The eudialyte group: a review. In: Sørensen. The Ilimaussaq alkaline complex, South Greenland: state of mineralogical research with new results[J]. Geology of Greenland Survey Bulletin, 2001, 190:65-72.
- [20] BOWDEN P. The geochemistry and mineralization of alkaline ring complexes in Africa (a review)[J]. Journal of African Earth Sciences, 1985, 3(1/2):17-39.
- [21] BORST A M, WAIGHT T E, FINCH A A, et al. Dating agpaitic rocks: A multi-system (U/Pb, Sm/Nd, Rb/Sr and 40Ar/39Ar) isotopic study of layered nepheline syenites from the Ilimaussaq complex[J]. Greenland. Lithos, 2019, 324-325:74-88.
- [22] LINDHUBER M J, MARKS M A W, BONS P, et al. Crystal mat-formation as an igneous layering-forming process: Textural and geochemical evidence from the 'lower layered' nepheline syenite sequence of the Ilimaussaq complex, South Greenland[J]. Lithos, 2015, 224-225:295-309.
- [23] HUNT E J, FINCH A A, DONALDSON C H. Layering in peralkaline magmas, Ilimaussaq Complex, S Greenland[J]. Lithos, 2017, 268-271:1-15.
- [24] FERGUSON J. Geology of the Ilimaussaq alkaline intrusion, South Greenland[J]. Bulletin-Grønlands Geologiske Undersøgelse 1964, 39: 82.
- [25] GERASIMOVSKY V I. Geochemistry of Ilimaussaq Alkaline Massif[J]. Nauka, Moscow, 1969:174.
- [26] SØRESEN H. The Ilimaussaq batholith. A review and discussion. Bulletin - Grønlands Geologiske Undersøgelse[J]. 1958, 19: 48.
- [27] LARSEN L M, SØRESEN H. The Ilimaussaq intrusion-progressive crystallization and formation of layering in an agpaitic magma[M]. In Alkaline Igneous Rocks. Special Publication-Geological Society of London. J. G. Fitton and B. G. J. Upton, eds. 1987: 473-488.

Geological Features of Kvanefield REE Deposit in Southwestern Greenland

Chao Wenwen¹, Zhou Jiayun², Jiang Xiaoli², Ye Yakang², Hui Bo², Chen Wei²

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

Abstract: Kvanefield REE deposit is a world-class REE deposit, which is located at the northern margin of the Ilímaussaq complex in the central part of Gardar igneous province, southwestern Greenland. The intrusion controlling ore is the mesoproterozoic Ilímaussaq complex, where two main varieties of metallogenic parent rocks are distinguished, green aegirine lujavrite and black arfvedsonite lujavrite, which all are agpaitic alkaline rocks, defined as a peralkaline nepheline syenite. The ore bodies are controlled by fractures or interlayer-gliding surfaces, which consist of sodalite lujavrite pegmatite veins and layered arfvedsonite lujavrite. According to mineral assemblage and occurrence form, the ores are divided into arfvedsonite-albite-steenstrupine type and sodalite-aegirine-eudialyte type. Specifically, steenstrupine and eudialyte are the main bearing rare earth element minerals in the two ores. The steenstrupine have varying $\omega(\text{REO})$ contents ranging from 31.5% to 44.9%, with an average of 35.9%, and stone LREE, U and Th enrichment, moreover, which are easily replaced by monazite and uranothorite. In addition, eudialyte have stable $\omega(\text{REO})$ contents ranging 1.41% to 1.90%, riching HREE, Nb, and Ta. Two mode of rare earth element occurrence are distinguished in eudialyte, isomorphism and other finely mineral inclusions such as monazite and steenstrupine. With alkaline complex multi-stage diagenesis process of rock mass and alkaline magma in aegirine lujavrite stage of magmatic hydrothermal mineralization and arfvedsonite lujavrite stage magma and mineralization, and form tratiiform-lenticular structure on the whole, diagenetic-mineralization model has a different source, multi-stage, with an invasion characteristics.

Keywords: Ilímaussaq; Agpaitic alkaline rocks; Rare earth element; Greenland

(上接第 9 页)

Geological Characteristics, Genetic Types and Utilization Value of Yonghong Fluorite Deposit in Mabian Area, Southwest Sichuan and Its Enlightenment to Regional Prospecting

Wen Jun^{1,2,3}, Zhao Wei^{1,2}, Li Fuyong¹, Zhu Helin^{1,2}, Zhang Hangfei^{1,2}, Zhang Jinyuan^{1,2}

(1.No.207 Geological Tem of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Leshan, Sichuan, China;

2.Zhang Jinyuan model worker Innovation Studio of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Leshan, Sichuan, China; 3.Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: Sichuan is an area where there are no fluorite deposits and no fluorite metallogenic belts. The discovery of medium-sized fluorite deposit in Mabian area is of great significance. Through field geological investigation and collection and analysis of geological data, the genesis of Yonghong Fluorite deposit in Mabian area and its enlightenment to regional prospecting are discussed. The results showed that the ore body occurs in the siltstone of Qiongzhusi Formation of Cambrian Terreneuvian, which is strictly controlled by fault. The metallogenic factors are dolomite, limestone, fluorine-containing phosphorites and fault, and there are no volcanic rock and intrusive rock. The five subtypes of hydrothermal filling type fluorite deposits summarized by predecessors have volcanic rock or intrusive rock. Therefore, it is summarized as a new subtype of hydrothermal filling fluorite type deposit-Yonghong subtype of hydrothermal filling type fluorite deposit (fault+carbonate rock+fluorophosphate); Yonghong fluorite deposit in Mabian area is a medium-sized fluorite deposit with an identified resource of 450000 t and its average content of CaF_2 was 34.61%; Through the comparative analysis of metallogenic factors, Mabian-Leibo-Jinyang areas on Ebian-Jinyang fault zone have good fluorite prospecting prospects. The above results are of great significance to fill the gap of fluorite without metallogenic belt in Sichuan, guide the regional prospecting of Ebian-Jinyang fault zone and promote the economic development of Wumeng Mountains region.

Keywords: Fluorite ore; Ebian-Jinyang fault; Qiongzhusi formation; Dengying formation; Hydrothermal filling type; Development value