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 叶亚康¹²,周家云¹²,曾令熙¹,陈伟¹²,寻倩男¹²,蒋晓丽¹²,惠博¹ (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:为查明格陵兰岛 llímaussaq 岩体内异霞正长伟晶岩中稀土矿物和元素的分布与赋存状态,采用化学分析、电子探针、矿物能谱分析和光学显微镜等手段进行了矿石的主要化学成分、矿物组成、单矿物化学成分以及稀土矿物赋存状态的研究。结果表明:异霞正长伟晶岩中稀土氧化物平均品位 0.64%,重稀土含量占比达 33%; 通过电子探针和单矿物化学分析,确定了异性石是主要的赋稀土矿物,异性石稀土含量约占矿石的 95%;异性石 中含有独立的稀土矿物,且稀土矿物呈细粒嵌布于蚀变的异性石中。研究结果对异霞正长伟晶岩的进步一选冶研 究具有重要的指导意义。

 关键词: Ilímaussaq; 异性石; 伟晶岩; 稀土 doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.05.018
 中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2021) 05-0120-05

位于格陵兰岛南部的 Ilímaussaq 火成杂岩是一 个中元古代复合侵入体,主要由过碱性的钠质正长 岩、霞石正长岩、异霞正长岩组成,该岩体是全球 过碱性钠质岩的典型产地之一。杂岩体中的钠质岩 富含碱金属元素 (Li、Na、Rb、Cs)、 卤族元素 (F、Cl、Br、I)、高场强元素 Zr、Hf、Nb、Ta、 REE、U、Th 和其他相对稀有的元素如 Be、Sn、 Sb、W、Mo、As、Zn、Pb 和 Ga^[1-3]。Ilímaussag 岩 体的矿物种类十分丰富,目前在该岩体中发现有 大约 220 种矿物类型,主要的成岩矿物包括方钠 石、霞石、霓石、钠铁闪石、异性石等,其中有9 种矿物是 Ilímaussaq 杂岩所特有的, 如 硫锑铊矿 (chalcothallite)、硅锰碱石 (kvanefjeldite)、瑙 云母 (naujakasite)、 硅铍稀土石 (semenovite) 和硅铍锡钠石 (sorensenite) 等^[4]。Ilímaussaq 岩 石是岩浆分异过程中的最终产物,在矿物学和地 球化学领域是罕见的岩浆岩石类型。

Ilímaussaq 岩体具有很长的勘查和勘探历史, 部分岩石中稀土、锆、铌、铍和铀具有较好的潜 力与经济价值,目前 Ilímaussaq 杂岩体为世界上最 大的稀土和铀矿床之一。尽管在 Ilímaussaq 地区进 行了 100 多年的科学研究并发表了数百篇出版物, 但对于部分 Ilímaussaq 岩石的起源、杂岩体的构造 和深层结构以及在过碱性岩石中存在的碳氢化合 物和沥青的意义等重要问题仍未弄清楚^[5]。因此, 对这些罕见岩石的进一步研究还有很大的空间, 需要进行跨学科的研究,以更好地弄清这种独特 的岩浆杂岩的成因。本文通过实地踏勘并采集了 相关伟晶岩的岩石样品,查阅大量前人的资料和 研究成果,拟通过岩石矿物组成分析和单矿物地 化数据相结合,探讨异霞正长伟晶岩的稀土赋存 状态。

```
收稿日期: 2020-05-15
```

基金项目:中国地质调查局地质调查项目"格陵兰岛西南部稀土-铀矿产资源潜力评价(DD20190446)" 作者简介:叶亚康(1992-),男,硕士,工程师,主要从事矿床学,岩石学及相关研究。 通讯作者:周家云(1973-),男,博士,教授级高工,主要从事矿床学,岩石学及相关研究。 第5期 2021年10月

1 地质背景

Ilímaussaq 杂岩体是格陵兰南部 Gardar 火成岩省 的一部分,在地表呈一个 NW-SE 长 18km、NE-SW 长 8km 的椭圆状,严格受到断裂构造控制,杂岩体 的中心坐标 N60°55′,W45°50′^[6]。Gardar 省大 部分地区的古元古代基底围岩是由钙碱性花岗岩 组成的,构成了 Ketilidian 造山带内发育的安第 斯型 Julianehåb 岩基,这一岩基形成于 1850 Ma ~ 1725 Ma,被认为是太古代克拉通之下的一个大洋 板块俯冲之后形成的^[7]。

杂岩体受北东向深大断裂与近东西向断裂的 共同控制,断裂的交汇位置即为岩浆侵入的中心。 在杂岩体侵位之前断裂已经形成,并在侵位过程中 进一步活跃,杂岩体未遭受后期断裂的破坏作用, 侵位深度为3~4 km,整体保存完好。Tunulliarfik 峡湾被认为是一条断裂带,两条 NE-SW 向的大断 层将 Ilímaussaq 岩体从南东向北西分为基底 (basal level)、中部 (mid level)和顶部 (upper level) 三 部分^[8-9]。

杂岩体由连续的四期岩浆侵入形成的:第一 期产生辉长岩,形成了一个边缘的壳层;第二期是 碱性花岗岩的侵入,这些花岗岩大多保存在岩体项 部;第三期和第四期是侵入的主要阶段,它们的成 分是钠质霞石正长岩类岩石,第三期岩浆分化为形 成顶部系列的斑霞正长岩、流霞正长岩和方钠霞石 正长岩;第四期产生了钠质霞石正长岩类的异霞正 长岩和条纹霞石正长岩,是杂岩体主要的赋矿岩体, 具有特殊经济意义。这些岩石类型是由富含挥发性 的碱性岩浆形成的,它们富含不相容的元素,如稀 土元素、铀、锂、铍、铌和钽等元素^[10]。

Ilímaussaq 杂岩体的形成年龄前人做了大量 年代学研究工作,指示该杂岩体侵位时代为中 元古代。辉石正长岩的斜锆石 U-Pb 定年结果为 1160±5Ma^[11];碱性花岗岩的锆石 U-Pb 定年结果 为1166±9Ma^[12];钠质霞石正长岩的异性石 U-Pb 定年结果为 1018~1134 ± (29~34) Ma^[13];条纹霞 石正长岩的角闪石、异性石和钠铁闪石 U-Pb 定年 结果为 1059~1173 ± 8.8~17 Ma^[14]。

在野外路线调查中,可以清楚的看到异霞正 长伟晶岩脉侵位于伊犁马萨克碱性杂岩体中,伟 晶岩脉出露宽度大于 200 m。在伟晶岩脉的东侧为 辉石正长岩,西侧为异霞正长岩/方钠霞石正长岩, 伟晶岩脉沿二者的接触界线侵入。肉红 - 灰白色异 霞正长伟晶岩主要矿物组成有粗粒自形异性石、 长柱状或不规则状黑色钠铁闪石和粒状方钠石。

2 矿物组成

本文所采样品为Ilímaussaq杂岩体的北部 Zone3区异霞正长伟晶岩,手标本新鲜面呈肉红色, 伟晶结构、块状构造。岩石的矿物组成比较简 单,主要矿物成分为肉红色异性石(含量约50%~ 60%)、灰白色方钠石(含量约20%~30%)、黑 色钠铁闪石(含量约10%~20%)(图1)。异性 石多呈团块状集合体产出,粒径大于2 cm,镜下 呈浅玫瑰红色;方钠石为自形粒状、长柱状分散分 布,粒径大于0.5 cm,方钠石为均质体,正交偏光 下为全消光;钠铁闪石呈不规则状充填于异性石、 方钠石等矿物之间的缝隙中,粒度多大于1 cm。



 (A) (C) 单偏光; (B) (D) 正交偏光。Eud- 异性石; Sdl-方 钠石; Arf-钠铁闪石

图 1 异霞正长伟晶岩薄片镜下特征 Fig.1 Microphotographs of the eudialyte alkaline pegmatite

3 岩石化学成分

岩石样品的全岩主量元素、微量元素和稀土 元素分析由中国地质科学院矿产综合利用研究所 分析测试中心完成,分析结果见表1。

	Table 1Pegmatite sample analysis results																		
样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P_2O_5	MnO	LOI	$\mathrm{H_2O^+}$	CO ₂	Na ₂ O /K ₂ O	Na ₂ O+ K ₂ O	A/ NK	A/ CNK	σ43
A8	44.22	13.65	5.68	5.44	5.35	0.10	0.63	13.52	0.97	0.021	0.358	2.93	2.49	0.034	21.46	14.15	0.6	0.42	58.39
A10	48.67	14.83	2.55	8.71	2.67	0.10	2.71	12.14	1.39	0.010	0.328	1.58	1.21	0.016	4.48	14.85	0.65	0.53	32.59
样号	La [*]	Ce*	Pr*	Nd*	Sm^*	Eu*	Gd^*	Tb*	Dy^{*}	Но*	Er*	Tm*	Yb*	Lu*	Y^*	ΣREE^*	LREE [*]	HREE [*]	LREE/ HREE
A8	1150	1930	277	832	205	19.9	193	37.9	258	57.7	194	30.8	196	25.0	1160	5406.30	4413.90	992.40	4.45
A10	730	1230	184	555	133	12.2	122	24.2	173	38.5	124	18.9	120	15.7	772	3480.50	2844.20	636.30	4.47
样号	LaN /YbN*	δEu [*]	δCe [*]	Cr*	Ni*	Co*	Li*	Rb [*]	Cs*	Sr*	Ba*	V^{*}	Sc*	Nb [*]	Ta [*]	Zr*	Hf^{*}	U^*	Th^*
A8	4.21	0.31	0.84	10.7	3.37	1.17	163	82.4	4.48	231	79.4	26.8	0.25	3230	294	32400	661	18.4	41.2
A10	4.36	0.29	0.82	9.10	3.68	1.40	208	297	5.09	150	142	25.3	0.25	2410	158	20700	465	16.1	55.4

表 1 伟晶岩样品分析结果 /% Table 1 Pegmatite sample analysis results

* 单位为 µg/g。

由表1可知,岩石贫硅富碱,K₂O+Na₂O > 14%,SiO₂含量<50%,TFeO含量约11%,MgO 含量较低,为典型的钠质碱性岩系列。稀土元素 表现为Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y等重稀土元素富集, 稀土氧化物品位0.64%,重稀土占比33%,微量元 素表现为富Nb(>2400×10⁻⁶)、Zr、Hf、Yb、 Lu、Y,而亏损Ba、K、Rb、Sr、P等大离子亲石 元素以及Ti。岩石具有相对较低的Ni/Co比值(<3) 和低的Cr值(<10×10⁻⁶),Nb/Ta比值(<15) 也相对较低,同时表现为极低的Rb/Sr比值。

4 稀土元素赋存状态

将岩石样品破碎至 0.25 mm 后,在双目镜 下进行单矿物的挑选,挑选出的异性石、方钠 石、钠铁闪石单矿物由中国地质科学院矿产综合 利用研究所分析测试中心进行分析,分析元素包 括 REE、Mn、Rb、Sr、Sc、Nb、Ta、Zr、Hf、 U、Th。分析数据表明异霞正长伟晶岩中的稀土 元素主要来自异性石矿物,方钠石的稀土氧化物 含量较低,为133.24×10⁶;钠铁闪石的稀土氧化 物总量为969.97×10⁶;异性石的稀土氧化物总 量为23320.35×10⁻⁶,稀土含量在矿石中占比达到 95%。根据异性石的稀土元素配分,其中重稀土占 比达到 34.46%,镨(Pr)占比 3.31%,钕(Nd) 占比 13.76%,镝(Dy)占比 3.85%,钇(Y)占比 20.28%,这一结果与异霞正长伟晶岩矿石的稀土配 分一致,显示异性石为该类型矿石的赋矿矿物。

电子探针结果显示异性石中稀土元素氧化物 La₂O₃ (0.33%)、Ce₂O₃ (0.79%)、Nd₂O₃ (0.47%)、 Y₂O₃ (0.57%),与异性石单矿物化学分析结果较 为一致,分析结果可靠。

异性石在样品中结晶颗粒较大,但受后期交 代蚀变常形成细粒集合体颗粒。异性石的能谱微 区分析显示多数矿物颗粒无稀土等显示(未蚀变部 分),异性石常被其他矿物或后期流体交代,在蚀 变较强的异性石颗粒中可见细粒的稀土矿物,边 部多被方钠石所包裹。稀土矿物与蚀变的异性石 嵌布密切,稀土矿物呈细粒被包裹或包含于其中 (图 2)。在矿物成分分析中将异性石中含有稀土 的矿物确定为独立的部分,其成分分析显示 Ce 分 析值为 0.73%,结果见表 4。



图 2 蚀变异性石中稀土矿物分布 Fig.2 Distribution of REE-bearing minerals in altered eudialyte

第5期 2021年10月

表 2 单矿物微量元素及稀土元素分析结果 / (μg·g⁻¹) Table 2 Trace and rare earth element compositions of the ores

名称	Mn	Rb	Sr	Sc	Nb	Та	Zr	Hf	U	Th	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Но	Er	Tm	Yb	Lu	Y	TREO
异形石	4460	30.5	458	75.5	9670	88.9	6.25	2020	19.8	22.7	3330	5740	649	2700	411	32.5	453	108	756	202	537	97.8	544	86.5	3980	23320.35
方钠石	25.9	821	13.3	<1	62.5	4.90	0.054	16.9	0.97	5.01	22.3	37.9	4.16	14.8	2.75	0.48	2.70	0.53	3.44	0.86	2.70	0.43	2.78	0.38	16.4	133.24
钠铁 闪石	5510	45.9	29.3	2.64	417	32.5	0.23	118	5.27	21.3	170	289	30.2	114	16.2	1.35	18.0	3.60	23.4	5.75	15.7	2.89	17.1	3.08	110	969.97

表 3 A8 样品异性石电子探针数据

Table 3	Electron	microprobe	dates	about	eudialyte of A8 samp	le
		1			2 1	

测点编号	Na ₂ O	K_2O	FeO	ZrO_2	Al_2O_3	CaO	La_2O_3	Cl	MgO	SiO_2	Ce_2O_3	TiO_2	Y_2O_3	Nd_2O_3	MnO	Nb_2O_5	Total
A8-1	12.48	0.22	5.96	13.41	0.22	11.11	0.39	1.76	0.01	50.43	0.73	0.08	0.50	0.25	0.67	0.63	98.86
A8-2	12.01	0.22	6.07	13.68	0.22	10.79	0.39	1.84	0.01	51.56	0.83	0.07	0.65	0.61	0.69	0.57	100.20
A8-3	12.22	0.20	6.30	12.57	0.20	10.80	0.37	1.84	0.02	52.44	0.77	0.07	0.66	0.47	0.67	0.68	100.26
A8-4	11.93	0.22	6.13	14.49	0.22	10.88	0.24	1.89	0.00	51.29	0.71	0.07	0.48	0.53	0.71	0.70	100.50
A8-5	11.79	0.22	6.20	13.59	0.34	10.85	0.32	1.70	0.01	51.73	0.99	0.04	0.52	0.46	0.80	0.69	100.23
A8-6	11.99	0.21	6.18	14.01	0.20	10.74	0.44	1.75	0.01	51.95	0.67	0.03	0.55	0.47	0.69	0.72	100.59
A8-7	11.79	0.21	6.77	13.67	0.21	10.67	0.12	1.79	0.02	52.19	0.86	0.14	0.61	0.48	0.62	0.70	100.84
平均值	11.89	0.21	6.23	13.63	0.23	10.84	0.33	1.80	0.01	51.65	0.79	0.07	0.57	0.47	0.69	0.67	100.07

	表 4 含稀土异性石的能谱分析值 /%											
Table 4 Results of EDS of REE-bearing eudialyte												
	0	Si	Ca	Na	Zr	Fe	Cl	Ce				
	36.7	22.52	11.01	10.62	10.03	6.69	1.7	0.73				

分析结果对异霞正长伟晶岩的进步一选冶研 究具有重要的指导意义,指明了异性石矿物为重点 目标对象,异性石为弱磁性、鲜红色硅酸盐矿物, 选矿工作可以针对异性石的物理、化学性质,采用 磁选或色选进行。同时,研究表明蚀变的异性石内 含有大量细小的稀土矿物,因此需将异性石矿物破 碎到较细粒度,有利于释放其中的稀土矿物。

5 结 论

(1) 异霞正长伟晶岩中稀土氧化物平均品位0.64%,重稀土含量较高,在矿石中占比达 33%。

(2)通过电子探针和单矿物化学分析,确定 了异性石是主要的赋稀土矿物,异性石单矿物的
稀土氧化物品位 2.33%,稀土含量占比达到 95%,
重稀土占比达到 34.46%,其中镨(Pr) 3.31%,钕(Nd)
13.76%,镝(Dy) 3.85%,钇(Y) 20.28%。

(3)结合矿相学和能谱微区分析,异性石中 含有独立的稀土矿物。多数未蚀变的异性石矿物 颗粒无稀土,稀土矿物与蚀变的异性石嵌布密切, 稀土矿物呈细粒被包裹或包含于其中。

参考文献:

[1] Charlier B , Namur O , Latypov R , et al. [Springer Geology] Layered Intrusions || The Ilímaussaq Alkaline Complex, South Greenland [J]. 2015, 10.1007/978-94-017-9652-1_14 (Chapter 14):649-691.

[2] Sørensen H. Brief introduction to the geology of the Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland, and its exploration history[J]. Geol Green lSurv Bull 190, 2001:7-24.

[3] Bailey J C, Gwozdz R, Rose-Hansen J, et al. Geochemical overview of the Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland[J]. Geol Greenl Surv Bull190, 2001:35-53.

[4] Petersen O V .List of minerals identified in the Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland[J]. Geol Greenl Surv Bull190, 2001:25-34.

[5] Bailey J C, Sørensen H, Andersen T, et al On the origin of microrhythmic layering in arfvedsonitelujavrite from the Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland[J]. Lithos, 2006, 91:301-318.

[6]Henning Sørensen .The Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland: status of mineralogical research with new results[J]. Geology of Greenland Survey Bulletin 190, 2001: 1-168.

[7]Garde A A, Hamilton M A, Chadwick B, et al. The Ketilidianorogeny of South greenland: geochronology, tectonics, magmatism, and fore-arc accretion during Palaeoproterozoicoblique convergence[J]. Can J Earth Sci, 2002, 39:765-793.

[8]Poulsen V. The sandstones of the Precambrian Eriksfjord formation in South Greenland[J]. Rapp Grønl Geol Under, 1964, 2:16.

[9]Halama R, Wenzel T, Upton B G J, et al. A geochemical and Sr–Nd–O isotopicstudy of the Proterozoic Eriksfjord Basalts, Gardar Province, South Greenland: reconstruction of an OIBsignature in crustally contaminated rift-related basalts[J]. Mineral Mag, 2003, 67:831-853.

[10]Sørensen H, Larsen L M. Layering in the Ilímaussaq alkaline intrusion, South Greenland. In:Parsons I (ed) origins of igneous layering[D]. Reidel, Dordrecht, 1987, 1-28.

[11]Krumrei T V, Villa I M, Marks M A W, et al. A 40Ar/39Ar and U/Pb isotopic study of the Ilímaussaq complex, South Greenland: implications for the 40 K decay constant and for the duration of magmatic activity in a peralkaline complex[J]. Chem Geol, 2006, 227:258-273.

[12]Upton B G J, Emeleus CH, Heaman LM, et al. Magmatism of themid-proterozoic Gardar Province, South Greenland: chronology, petrogenesis and geologicalsetting[J]. Lithos, 2003, 68:43-65.

[13]Fu-Yuan Wu, Yue-Heng Yang, Michael A W Marks, et al. In situ U–Pb, Sr, Nd and Hf isotopic analysis of eudialyte by LA-(MC)-ICP-MS [J]. Chemical Geology, 2010, 273(1-2):8-34. [14]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 Ilímaussaq complex, Greenland[J]. Lithos, 2019, 324-325: 74-88.

Occurrence of Rare Earth Elements in Lujaurite-pegmatite in thellímaussaq Complex, Greenland

Ye Yakang^{1,2}, Zhou Jiayun^{1,2}, Zeng Lingxi¹, Chen Wei^{1,2}, Xun Qiannan^{1,2}, Jiang Xiaoli^{1,2}, Hui Bo¹ (1.Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan, China;2.Technology Innovation Center of Rare Earth Resources Development and Utilization, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: Main chemical constituents, mineral composition, chemical composition of single mineral and occurrence state of rare earth minerals were studied by means of chemical analysis, electron probe analysis, mineral energy spectrum analysis and optical microscope, in order to find out the distribution and occurrence state of rare earth minerals in the lujaurite-pegmatite of Ilímaussaq complex, Greenland. The results show that: the average grade of rare earth oxides in lujaurite-pegmatite is 0.64%, and the content of heavy rare earth is 33%. It is confirmed that eudialite is the main rare-earth minerals, and the rare-earth content of eudialite is about 95% in the ore, By means of electron probe analysis and single mineral chemical analysis. Eudialite contain independent rare earth minerals, and the rare earth minerals are embedded in the altered-eudialiteas fine grains. The results of this study have important guiding significance for the research on the progress of lujaurite-pegmatite.

Keywords: Ilímaussaq ;Eudialite ; pegmatite ; Rare-earth element