

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.08.001

非洲稀土资源研究进展

任军平^{1,2}, 张航^{1,2}, 古阿雷^{1,2}, 孙凯^{1,2}, 李建武³, 胡鹏⁴, 孙宏伟^{1,2}, 卢宜冠^{1,2},
吴兴源^{1,2}, 周佐民^{1,2}, 王杰^{1,2}, 左立波^{1,2}, 董津蒙^{1,2}, 张津瑞^{1,2}

REN Junping^{1,2}, ZHANG Hang^{1,2}, GU Alei^{1,2}, SUN Kai^{1,2}, LI Jianwu³, HU Peng⁴,
SUN Hongwei^{1,2}, LU Yiguan^{1,2}, WU Xingyuan^{1,2}, ZHOU Zuomin^{1,2}, WANG Jie^{1,2},
ZUO Libo^{1,2}, DONG Jinmeng^{1,2}, ZHANG Jinrui^{1,2}

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

2. 中国地质调查局南部非洲矿业研究所, 天津 300170;

3. 中国地质调查局矿业战略研究所, 北京 430205;

4. 中国地质调查局北部非洲矿业研究所, 湖北 武汉 430205

1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. Southern African Mining Research Institute, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

3. Mining Strategy Research Institute, China Geological Survey, Beijing 430205, China;

4. Northern African Mining Research Institute, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China

摘要:稀土是现代高科技产业发展的关键金属,被世界主要经济体列为关键矿产资源。虽然中国稀土资源丰富,但2017年以来中国稀土资源进口量呈现出明显的上升趋势。总结中国稀土资源的进口数据,以及非洲稀土项目分布、储量及资源量、矿床类型、成矿时代、典型矿床特征及勘查投资等情况,以提升对非洲稀土资源的认识。研究表明,非洲稀土资源丰富,稀土氧化物的高级资源量超过 1000×10^4 t,近年来勘探及开发进度提升迅速。稀土储量及资源量主要集中于坦桑尼亚等12个国家,成矿类型可划分为火成碳酸岩型及离子吸附型等8种(成矿时代跨度大),其中火成碳酸岩型和离子吸附型稀土矿床是目前勘探及开发的重点。非洲稀土矿床勘查投资规模2012年达到顶峰,之后持续下降,2017年降至低谷,2018年开始迅速反弹。未来,随着国际上稀土矿项目逐步投产,由中国主导全球稀土市场价格的局面将面临挑战。非洲稀土矿成矿条件优越,中资企业可利用地—采—选—冶的技术优势,积极引导并推动非洲稀土生产进入中国产业链。

关键词:稀土资源;储量及资源量;地质特征;勘查投资;价格走势;非洲

中图分类号:P618.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)08-1241-17

Ren J P, Zhang H, Gu A L, Sun K, Li J W, Hu P, Sun H W, Lu Y G, Wu X Y, Zhou Z M, Wang J, Zuo L B, Dong J M, Zhang J R. Research progress of rare earth element resources in Africa. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(8): 1241–1257

Abstract: Rare earth elements are an essential part for modern high-tech development and have been listed as key mineral resources by major economies in the world. Since 2017, the import trend of rare earth element resources has increased significantly in China. This paper systematically composes and summarizes China's imported rare earth element resource data, distribution of rare earth projects, reserves and resources, deposit types, mineralization ages, typical deposit characteristics and exploration investment in Africa. Africa is rich

收稿日期:2022-11-01;修订日期:2022-11-22

资助项目:国家重点研发计划课题《环太平洋和非洲成矿域战略性矿产信息及成矿规律》(编号:2021YFC2901804)、商务部技术援外项目《赞比亚东北地区航空物探和地质地球化学综合填图》(编号:[2015]352)和《赞比亚北部省卡萨马地区区域地质与地球化学调查》(编号:[2012]558)、中国地质调查局项目《南部非洲国际合作地质调查》(编号:DD20230125和DD20221801)、《莫桑比克—坦桑尼亚钽铌矿资源调查》(编号:DD20201150)、《非洲中东部大型铜—钴资源基地评价》(编号:DD20190439)和《非洲中南部重要矿床地质背景、成矿作用和找矿潜力研究》(编号:1212011220910)

作者简介:任军平(1980-),男,正高级工程师,从事地质矿产勘查与研究工作。E-mail:rjp2333@126.com

in rare earth element resources, with advanced resources of rare earth oxides exceeding 10 million tons. In recent years, the exploration and development progress have been enhanced rapidly. The mineralization types can be divided into eight types (complex mineralization period), in which the reserves and resources are mainly concentrated in 12 countries, such as Tanzania, and the igneous carbonatite type and ion adsorption-type REE deposits are currently the focus of exploration and development. The largest exploration investment of rare earth element deposits in Africa occurred in 2012, then continued to decline, reaching a low point in 2017, and the exploration investment has grown very rapidly since 2018. With the gradual production of rare earth element minerals projects in the future internationally, China's dominant global rare earth element market prices will face competition. Rare earth element ore formation conditions are superior in African, and Chinese investment enterprises can use the technical advantages to actively guide and promote African rare-earth element production into our industrial chain.

Key words: rare earth element resources; reserves and resources; geological characteristics; exploration investment; price trend; Africa

稀土元素(Rare Earth Element, REE)是发展现代高新技术产业的关键金属,包括镧系元素、Y 和 Sc 共 17 种元素,其中可细分为轻稀土元素(LREE; La、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm 和 Eu)和重稀土元素(HREE; Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y 和 Sc)。相对于轻稀土元素,重稀土元素更稀少。地壳中稀土元素的丰度通常在 $0.5 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$ 之间。稀土元素主要应用于永磁体/材料、抛光、催化剂、储氢、发光等新材料领域,以及陶瓷和玻璃冶金应用和合金等领域,相继被日本(2009 年)、中国(2016 年)、欧盟(2014、2017、2020 年)、美国(2018、2022 年)、澳大利亚(2019 年)等主要经济体列为战略性或关键矿产。在中国,稀土资源呈现出“北轻南重”的特点,即北方以轻稀土资源为主,南方以离子吸附型重稀土资源为主(王登红等,2019)。

据 Mineral Commodity Summaries(USGS, 2022)数据,全球稀土氧化物的储量约为 1.2×10^8 t, 矿山产量从 2020 年的约 24×10^4 t 已增至 2021 年的 28×10^4 t(表 1)。根据中国工业和信息化部及自然资源部发布的《关于下达 2021 年度稀土开采、冶炼分离总量控制指标的通知》中数据显示(工业和信息化部, 2021), 2021 年中国的矿山生产配额为 16.8×10^4 t, 其中轻稀土为 14.9×10^4 t, 重稀土(离子吸附型)为 1.9×10^4 t; 年度冶炼分离总量控制指标为 16.2×10^4 t, 两者指标均较 2020 年增加 20%。同时, 2022 年首批稀土开采、冶炼控制指标均较 2021 年同比增长 20%。虽然, 非洲国家有明确储量或资源量的稀土矿业项目不多, 但是美国、加拿大、澳大利亚、英国、日本等国家近年来对非洲稀土矿项目的长期投入在不断加大, 使非洲稀土勘探和开发速度迅速提升。本文对中国近年来进口稀土资源情况, 非洲稀土资源分布、典型矿床特征、重点国家稀土矿的勘

探投入、稀土资源价格的未来趋势等问题进行梳理, 以提升对非洲稀土资源的认识。

1 中国近 5 年进口稀土资源情况

中国不仅是世界第一稀土生产大国, 也是世界第一稀土消费大国。2015 年中国开始进口稀土资源, 特别是 2017 年以来进口量上升趋势显著(图 1)。据中国海关数据(2022), 中国进口稀土金属矿的主要国家包括美国、布隆迪、泰国、肯尼亚、马来西亚等; 未列名氧化稀土的主要国家包括缅甸、马来西亚、越南、美国、日本等; 未列名稀土金属及其混合物的化合物的主要国家包括缅甸、马来西亚、越南、

表 1 全球稀土资源禀赋和开发情况(USGS, 2022)
Table 1 Global rare earth element resources and productions

国家和地区	产量/t		资源量 /10 ⁴ t
	2020 年	2021 * 年	
中国	140000	168000	4400
美国	39000	43000	180
缅甸	31000	26000	—
澳大利亚	21000	22000	400
泰国	3600	8000	—
印度	2900	2900	690
马达加斯加	2800	3200	—
俄罗斯	2700	2700	2100
越南	700	400	2200
巴西	600	500	2100
布隆迪	300	100	—
格陵兰岛	—	—	150
坦桑尼亚	—	—	89
加拿大	—	—	83
南非	—	—	79
其他国家	100	300	28

注: 表中数据为稀土氧化物量; “*” 代表推断数据; “—” 代表未获得数据

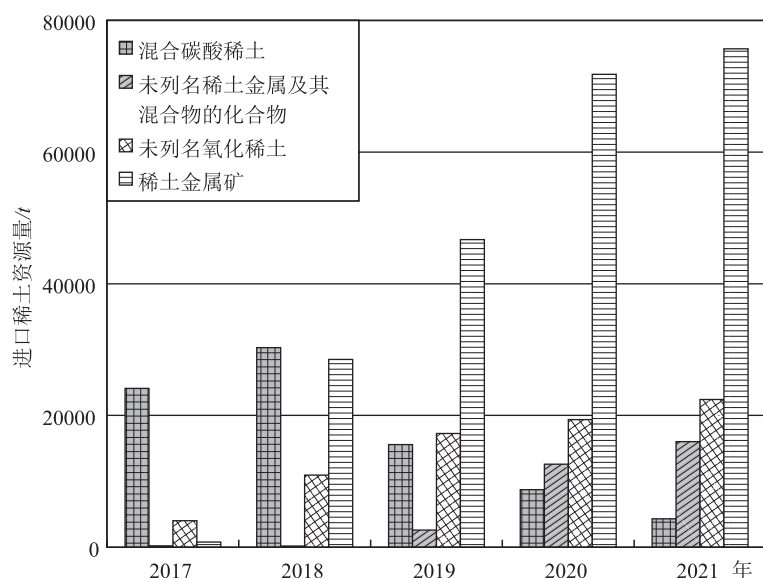


图 1 中国近 5 年进口稀土资源情况(中国海关,2022)

Fig. 1 China's import of rare earth element resources in recent five years

哈萨克斯坦、法国等;混合碳酸稀土的主要国家包括缅甸、马来西亚、越南、印度、俄罗斯等。其中,中国从 2017 年至 2021 年进口的稀土金属矿总量约为 22343 t,由 76 t 增加至 7567 t,5 年增长近 100 倍。同时,未列名氧化稀土、未列名稀土金属及其混合物的化合物进口量均为增长态势(图 1)。

2 非洲稀土资源分布及特征

2.1 稀土项目分布

经梳理非洲上市公司年报及已掌握的矿业项目等信息,截至 2022 年 5 月,共获得非洲涉及稀土矿业项目信息 64 个(图 2)。其中,以稀土矿为主矿种的矿业项目 34 个(图 3-a),活动状态矿业项目 24 个(图 3-b),纳米比亚矿业项目最多为 16 个(图 3-c),勘探阶段的矿业项目 43 个(图 3-d)。

2.2 稀土资源特征

本次统计坦桑尼亚、马拉维和南非 3 个国家 4 个矿业项目稀土氧化物的储量为 195.6×10^4 t;坦桑尼亚、安哥拉、肯尼亚、加蓬、南非、马达加斯加、马拉维、纳米比亚、乌干达、赞比亚、莫桑比克和布隆迪 12 个国家(图 4),18 个矿业项目稀土氧化物的高级资源量(探明+控制)为 1014.4×10^4 t。其中,坦桑尼亚的稀土氧化物储量为 88.7×10^4 t,高级资源量 333.9×10^4 t,均位居非洲首位。按照《矿产资源储量规模划分标准》(国土资发[2000]133 号),已掌握非洲 3 个超大型矿床、5 个大型矿床、3 个中型矿床、

3 个小型矿床的相关信息。

目前,由于非洲地区的稀土项目多处于勘查阶段,有明确的稀土储量和资源量数据的项目较少。非洲稀土矿元素种类较齐全,Pr、Nd 和重稀土元素品位高于美国和澳大利亚的稀土矿。通过整理近年来非洲稀土项目信息,笔者发现美国、加拿大、澳大利亚、英国、日本等国家不断加大对非洲稀土矿项目的投入,导致非洲稀土勘探和开发速度加快(表 2),值得重点关注。

3 非洲稀土矿床特征

3.1 矿床类型

全球具有经济价值的稀土矿床主要与火成碳酸岩、碱性杂岩、花岗岩、伟晶岩、混合岩和含稀土的粘土矿及砂矿有关(张培善,1989)。稀土矿床类型通常包括与碳酸岩和碱性岩相关的硬岩型矿床,以及由侵蚀和风化作用形成的低温矿床(Goodenough et al.,2018)。低温矿床包括砂矿和离子吸附矿床,品位较低,但比硬岩型矿床更容易开采和加工(Wall et al.,2017)。碳酸岩岩浆源于地幔,深度为 70~80 km(约 2.1 GPa)(Harmer et al.,1997)。目前,全球已发现 600 多处碳酸岩稀土矿床(点)(Madugalla et al.,2014),碳酸岩是轻稀土元素和 Sc 的主要来源,其中中国的白云鄂博矿床拥有含量为 4%~6% 的稀土氧化物(REO) 5740×10^4 t,美国的芒廷帕斯(Mountain Pass)矿床拥有含量为 5%~10% 的稀土氧化物 2800×10^4 t,澳大利亚的德山(Mount Weld)、俄罗斯的托姆托(Tomtor)和巴西的阿拉查(Aracha)稀土矿床拥有稀土氧化物的含量分别为 11%~17%、8%~31% 和 2.5%~13%(Kanazawa et al.,2006;Kynicky et al.,2012)。非洲稀土矿主要产于火成碳酸岩中,稀土元素赋存于氟碳铈矿、独居石、磷钇矿等矿物中(Lehmann et al.,1994;Bodeving et al.,2017;Broom-Fendley et al.,2017;Witt et al.,2019;Buyse et al.,2020)。本次以稀土矿床成矿地质作用和含稀土岩系划分大类,将非洲稀土矿床划分为火成碳酸岩型、砂矿型、伟晶岩型、离子吸附型、花岗岩型、变质岩型、沉积岩型和不整合面型 8 种(图 5)。其中,火成碳酸岩型和离子吸附型稀土矿床是目前勘探及

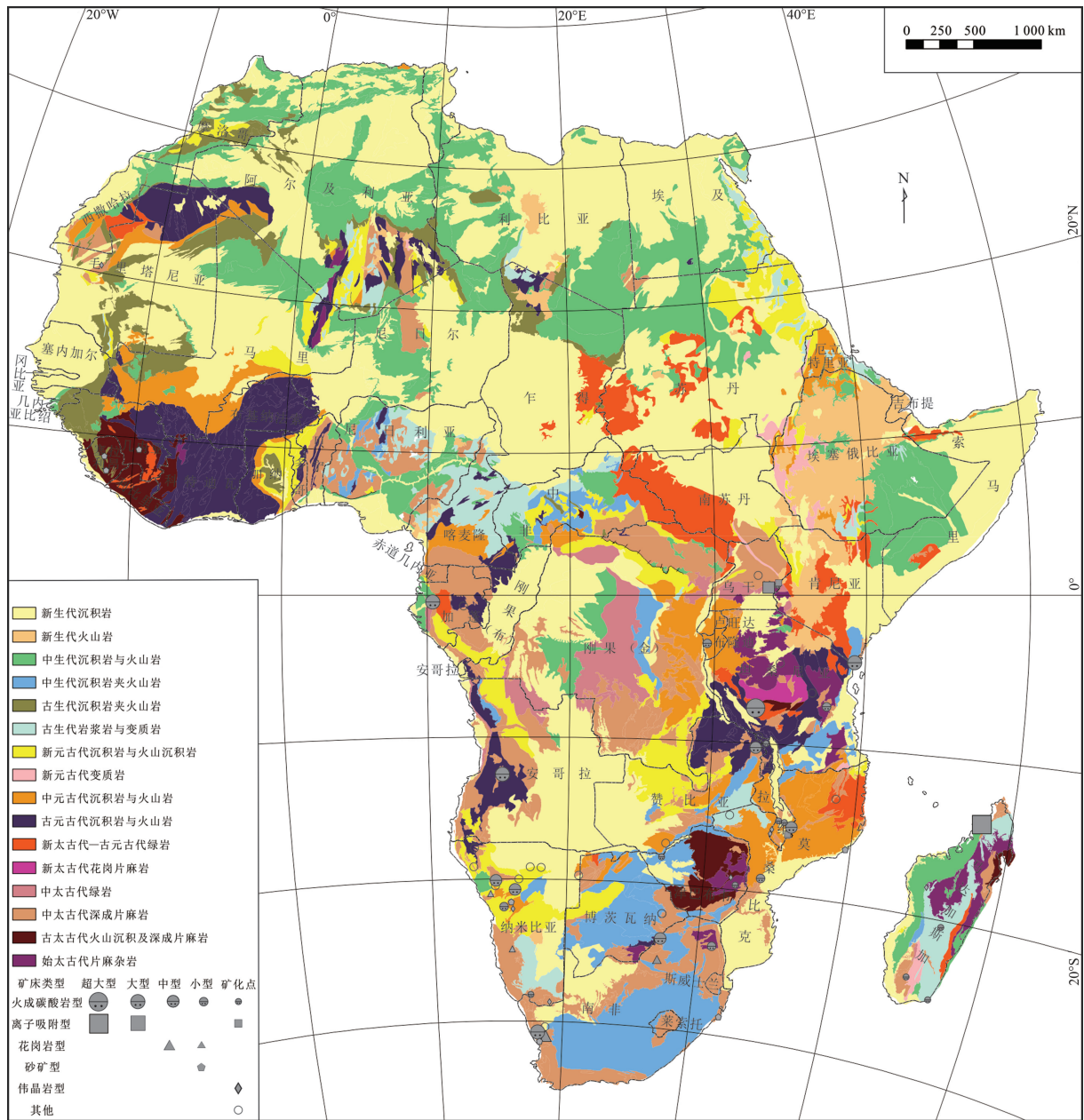


图2 非洲主要稀土矿分布图(底图据任军平等,2021)

Fig. 2 Map of major rare earth element deposits in Africa

开发应重点关注的矿床类型。

3.2 成矿时代

目前,在非洲火成碳酸岩型、砂矿型、伟晶岩型、离子吸附型、花岗岩型、变质岩型、沉积岩型和不整合面型8种稀土矿床中,笔者仅收集到了火成碳酸岩型和花岗岩型稀土矿床的相关成矿年龄数据,其中前者主要形成于元古宙和中生代,后者主要形成于中元古代和中生代(表3)。

3.3 典型矿床

非洲稀土矿床主要与卡普瓦拉克拉通、刚果克拉通及西非克拉通(任军平等,2021;胡鹏等,2022)演化密切相关,根据已掌握的类型,本文选取其中5处代表性的矿床进行解剖。

3.3.1 恩格拉稀土矿床

恩格拉碳酸岩杂岩位于坦桑尼亚西南部姆贝亚西北147 km处(图2),其在大地构造上位于坦桑

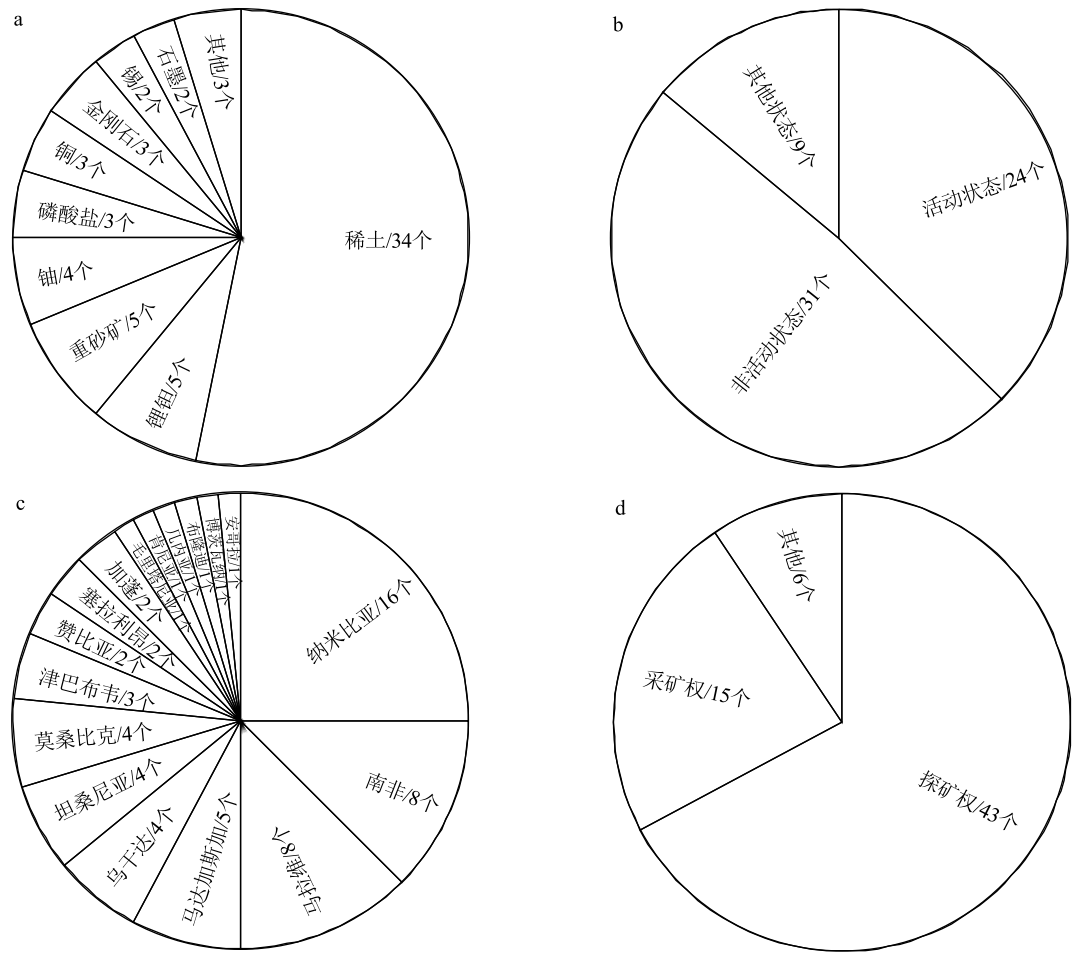


图 3 非洲稀土矿业项目特征
Fig. 3 Characteristics of rare earth element deposits in Africa

表 2 非洲主要稀土矿项目统计

Table 2 Statistical list of major rare earth element deposits in Africa

序号	中文名称	英文名称	国家	控股公司	高级资源量(含储量,氧化物)	开发状态
1	恩格拉	Ngualla	坦桑尼亚	匹克资源公司(澳大利亚)	428×10 ⁴ t(重稀土占 1%)	可行性研究
2	松尾山	Songwe Hill	马拉维	姆坎戈 资源公司(加拿大)	29.74×10 ⁴ t(重稀土占 6.7%)	可行性研究
3	加卡拉	Gakara	布隆迪	彩虹稀土公司(英国)	3.3×10 ⁴ t	在产
4	洛夫达尔	Lofdal	纳米比亚	日本石油天然气金属矿产资源机构	7.6×10 ⁴ t(重稀土占 75.2%)	详查
5	姆里马山	Mrima Hill	肯尼亚	太平洋野猫资源公司(加拿大)	214.3×10 ⁴ t	详查
6	康甘昆德	Kangankunde	马拉维	林甸资源公司(澳大利亚)	10.7×10 ⁴ t(重稀土占 0.55%)	普查
7	维古山	Wigu Hill	坦桑尼亚	维塔尔金属公司(加拿大)	8.6×10 ⁴ t	详查
8	马库图	Makuutu	乌干达	爱奥尼克稀土公司(澳大利亚)	0.73×10 ⁴ t(重稀土占 28.8%)	可行性研究
9	赞德科普锥弗特	Zandkopsdrift	南非	边境稀土公司(卢森堡)	165.75×10 ⁴ t(重稀土占 6.6%)	普查
10	斯廷坎普斯科拉尔	Steenkampskraal	南非	斯廷坎普斯科拉尔钽公司(挪威)	8.7×10 ⁴ t(重稀土占 8.0%)	普查
11	奥赞戈	Ozango	安哥拉	彭萨纳稀土公司(英国)	110×10 ⁴ t(其中镨、钆氧化物含量 23×10 ⁴ t)	可行性研究
12	坦塔罗斯	Tantalus	马达加斯加	ISR 投资公司(新加坡)	17.7×10 ⁴ t(重稀土占 37.3%)	详查

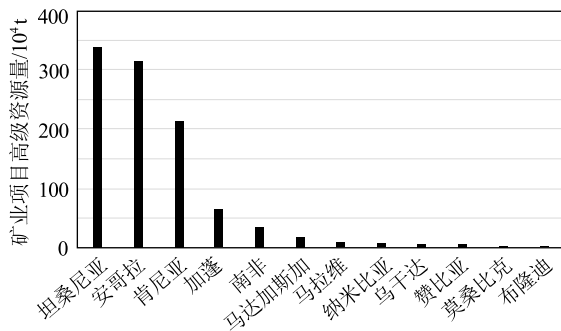


图4 非洲稀土高级资源量分布图

Fig. 4 The distribution of rare earth element resources in Africa

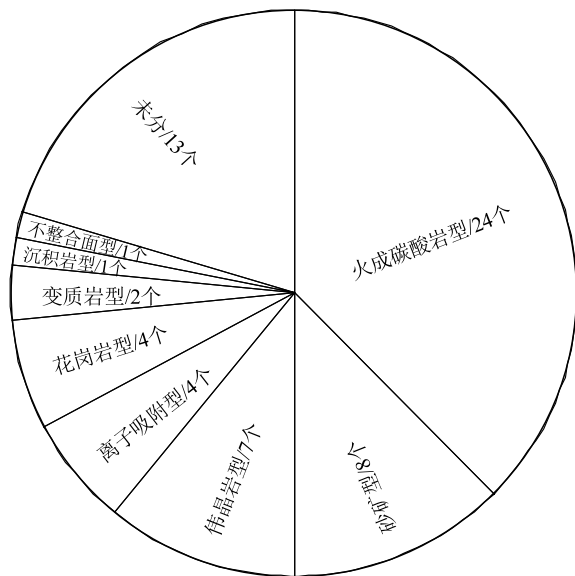


图5 非洲稀土矿床成因类型

Fig. 5 The genetic classification of rare earth element deposits in Africa

尼亚克拉通西南缘,毗邻东非大裂谷(王杰等, 2022)。20 世纪 80 年代早期,坦桑尼亚和加拿大大学机构联合在对该碳酸岩的稀土资源潜力进行评价的基础上开始勘探。2022 年 10 月 19 日,盛和资源控股公司盛和资源(新加坡)有限公司与匹克资源公司签署了非约束性的谅解备忘录,内容涵盖稀土产品承购、战略合作及盛和资源直接收购恩格拉项目权益等事宜(盛和资源控股股份有限公司, 2022)。

根据黑云母的 K-Ar 年龄(1040 ± 40 Ma)(Cahen et al., 1966)推断,恩格拉碳酸岩于中

元古代就位,其可能与约 1040 Ma 伊鲁米德构造带幔源岩浆活动有关(De Waele et al., 2008)。该杂岩体大致呈圆形,直径约 3.8 km(图 6),外围被一个约 1 km 的霓长岩环形山丘包围。碳酸岩杂岩包括一个环形方解石碳酸岩侵入体,内部还有一个大的和一个小的镁质碳酸岩侵入体。一条铁质山脊从镁质碳酸岩侵入体向北延伸,穿过方解石碳酸岩;另外一条铁质山脊分布于西南部冲积层中。岩体内的一个磷酸碳酸岩单元中磷灰石含量大于 5%,最高可达 40%。方解石碳酸岩中局部发育以北北东向为主的矿物条带。尽管出露最大的镁质碳酸岩岩墙呈北北西向,但绝大多数镁质碳酸岩岩墙小且呈东西向展布。方解石碳酸岩中的稀土氧化物总量(REO)含量通常小于 0.5%,主要由独居石组成。在镁质碳酸岩中,稀土氧化物总量从外向内由约 1% 增加至 4%,主要在石英、方解石、萤石和重晶石晶洞中形成氟碳铈矿和氟碳钙铈矿等稀土矿物(Witt et al., 2019)。经风化作用而次生富集的稀土

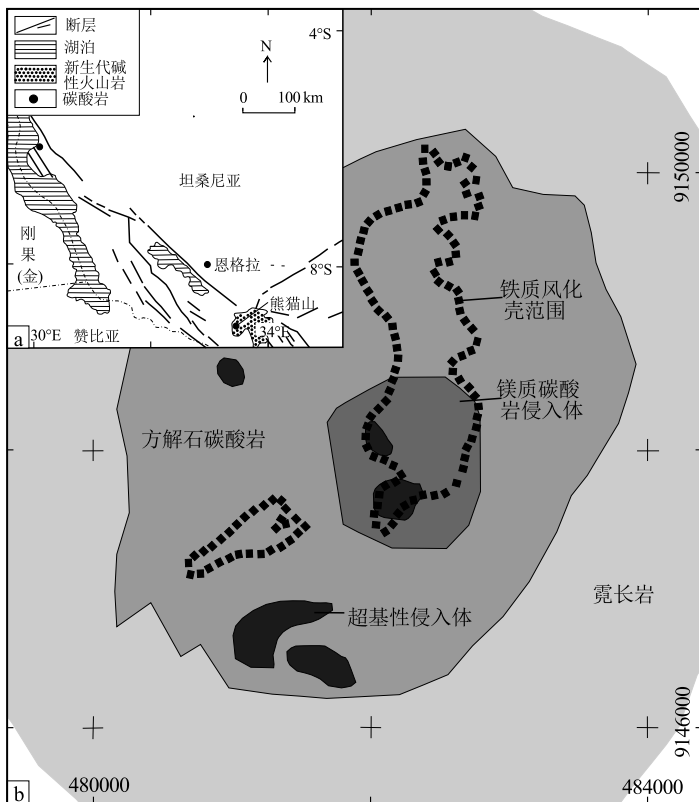


图6 恩格拉碳酸岩杂岩体位置(a)及地质图(b)

(据 Witt et al., 2019 修改)

Fig. 6 The location(a) and geological map(b) of the Ngualla carbonatite complex

表 3 非洲主要稀土矿床同位素年龄
Table 3 Isotopic ages of the rare earth element deposits in Africa

序号	中文名称	英文名称	国家	矿床类型	主要含稀土矿物	成矿年龄/Ma	测试方法	大地构造位置	资料来源
1	帕拉博拉	Phalaborwa	南非	火成碳酸岩	独居石、磷灰石和方解石	2060	锆石和斜锆石 SIMS U-Pb 测年	卡普瓦尔克拉通	Wu et al., 2011
2	恩格拉	Ngualla	坦桑尼亚	火成碳酸岩	氟碳铈钨矿、独居石和磷灰石	1943~1871	锆石 SHRIMP U-Pb 测年	乌本迪构造带	Tulibonywa et al., 2015
3	洛夫达尔	Lofdal	纳米比亚	火成碳酸岩	氟碳铈矿、独居石和磷钇矿	~760	霞石正长岩的 Rb-Sr 全岩等时线测年, 锆石及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年	达马拉构造带	Hawkesworth et al., 1983; Jung et al., 2007; Wall et al., 2008
4	恩库姆瓦山	Nkombwa Hill	赞比亚	火成碳酸岩	氟碳铈矿和独居石	680	金云母 Rb-Sr 等时线测年	伊鲁米德构造带	Snelling, 1965; Zambazi et al., 1997
5	加卡拉	Gakara	布隆迪	火成碳酸岩	氟碳铈矿和独居石	602~587	氟碳铈矿的 ^{138}La - ^{138}Ba 测年, 氟碳铈矿和独居石 LA-ICP-MS 测年	开巴连构造带	Nakai et al., 1988
6	马林卡斯	Marmkas	纳米比亚	火成碳酸岩	磷灰石	567~520	白云母 K-Ar 测年和碱性花岗岩(未注明具体测试方法)	库布斯-不来梅火成岩省	Smithies et al., 1998
7	卡尔克费尔德	Kalkfeld	纳米比亚	火成碳酸岩	磷灰石	242	霞石正长岩 Rb-Sr 全岩等时线测年	达马拉构造带	Kramm et al., 2017
8	松尾山	Songwe Hill	马拉维	火成碳酸岩	磷灰石和氟碳铈钨矿	133	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年	奇尔瓦成矿省	Broom-Fendley et al., 2017
9	康甘昆德	Kangankunde	马拉维	火成碳酸岩	独居石	123	金云母 Rb-Sr 等时线测年	奇尔瓦成矿省	Snelling, 1965
10	熊猫山	Panda Hill	坦桑尼亚	火成碳酸岩	氟碳铈矿和磷灰石	113	金云母 Rb-Sr 等时线测年	乌本迪构造带	Snelling, 1965; 吴兴源等, 2019
11	斯廷坎普斯克拉尔	Steenkampskraal	南非	花岗岩	独居石	1046	锆石 SHRIMP U-Pb 方法	布什曼兰德成矿省	Knoper, 2010
12	布兰德山	Brandberg	纳米比亚	花岗岩	独居石	164~123	玄武岩和辉绿岩 K-Ar 测年	达马拉造山带	Siedner et al., 1968

氧化物总含量会更高。

恩格拉碳酸岩杂岩体演化经历了 5 个演化阶段 (Witt et al., 2019): ①在坦桑尼亚克拉通西南部, 中元古代晚期幔源岩浆由于流体出熔而导致上覆岩石圈(长英质硅酸盐岩石)破裂和角砾岩化, 侵入体就位, 并形成霓长岩(图 7-a)。②方解石碳酸岩以岩浆的形式侵位于角砾状霓长岩中, 并含有霓长岩

捕虏体, 同时形成的硅酸盐、磷酸盐和矿物氧化物不规则地分布于整个侵入体中(图 7-b)。③镁质碳酸岩以岩浆或晶粥形式侵入已固化的方解石碳酸岩, 形成了杂岩体核部(直径约 1.2 km)和 2 种岩性过渡带(图 7-c)。④ 2 种碳酸岩侵入体之间的过渡带充满了捕虏体, 在镁质碳酸岩结晶之前超镁铁质岩浆已经侵位, 导致 2 种岩浆充分混合, 同时在已固

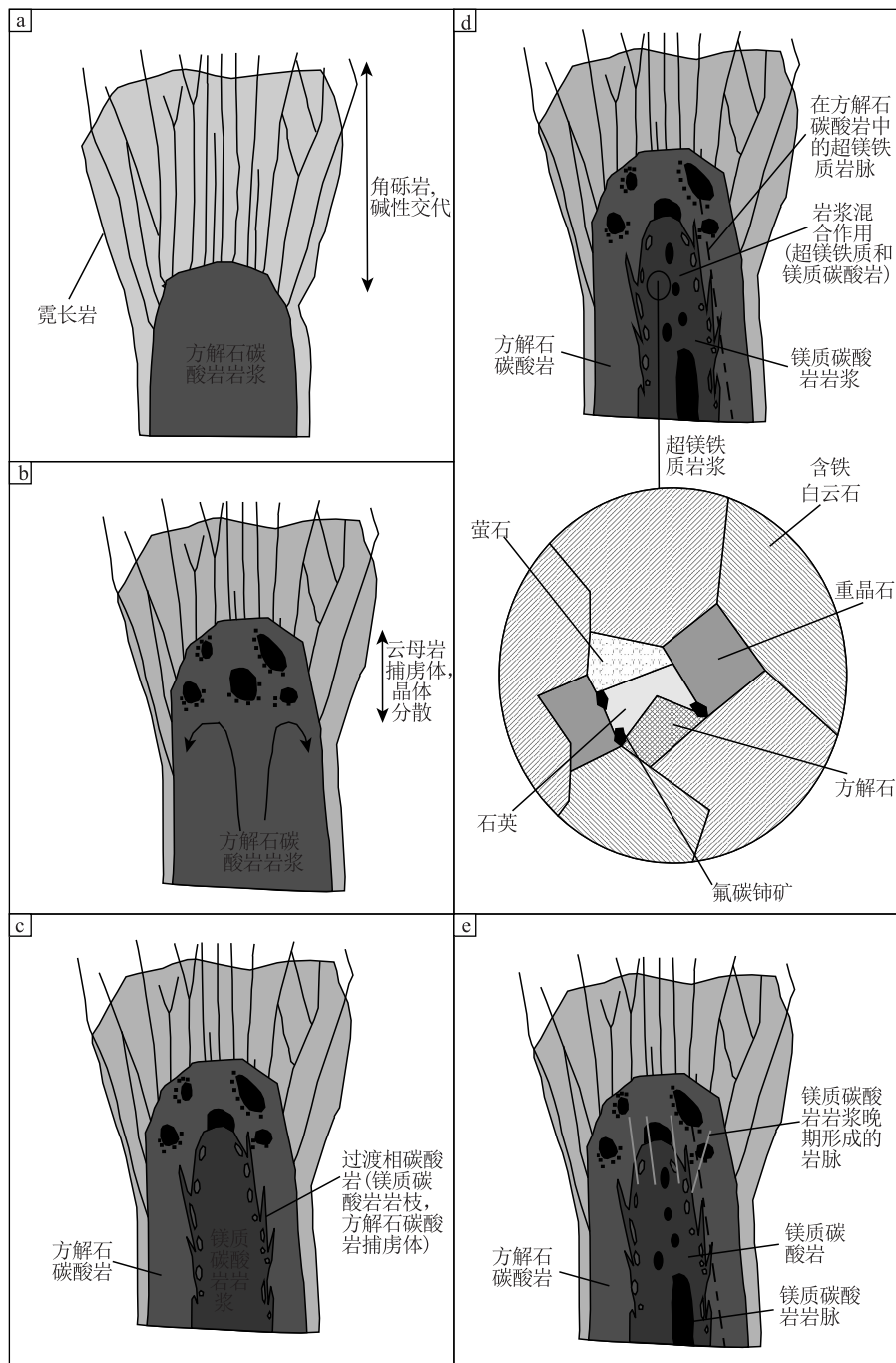


图 7 恩格拉碳酸岩杂岩体演化示意图(据 Witt et al., 2019 修改)

Fig. 7 Evolution diagrams of the Ngualla carbonatite complex

化的方解石碳酸岩中形成超基性岩脉,不相容元素(Si、Ba、F、REE)的残余岩浆进一步形成氟碳铈矿等稀土矿物(图 7-d)。⑤后期的少量镁质碳酸岩脉侵入到已固化的镁质碳酸岩和方解石碳酸岩中(图 7-e)。

3.3.2 帕拉博拉稀土矿床

南非帕拉博拉碱性杂岩体位于比勒陀利亚北东 350 km 处(图 2),德兰士瓦东北部的勒柯普(Loolekop)山地区,海拔约为 478 m,于古元古代约

2060 Ma(Reischmann, 1995; Wu et al., 2011)侵位于由花岗岩质岩、片麻岩、角闪岩和滑石-蛇纹片岩组成的太古宙卡普瓦尔(Kaapvaal)克拉通基底中(Groves et al., 2001),主要包括北部辉石岩区(Northern Pyroxenite)、勒柯普和南部辉石岩区(Southern Pyroxenite),总出露范围南北长约 6.5 km,东西宽 1.5~3.5 km(图 8)。杂岩体中不仅形成了全球著名的管状铜金矿床,而且与其相关的铁、铂

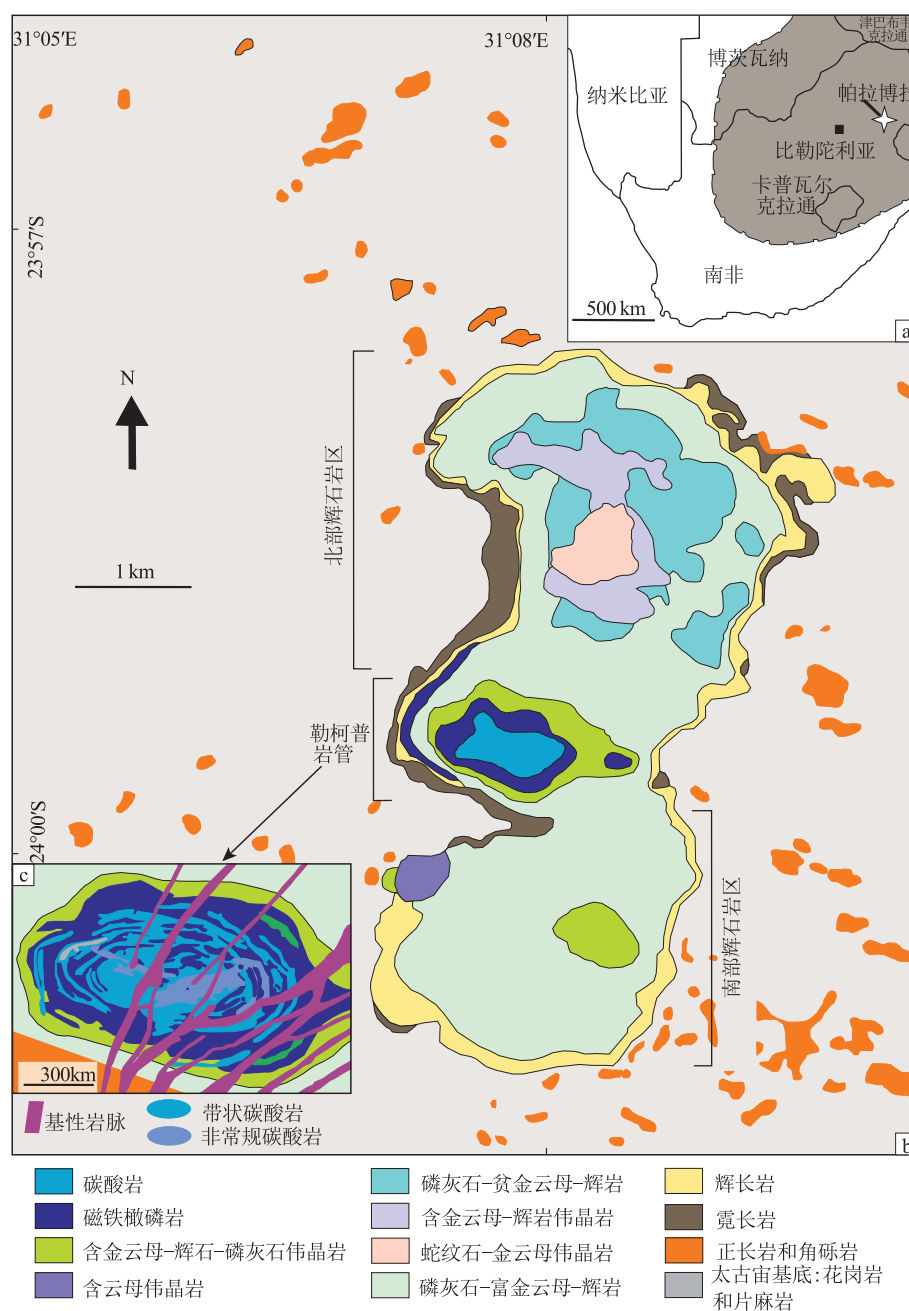


图 8 帕拉博拉杂岩体位置(a)、地质简图(b)及勒柯普岩管图(c)(据 Decrée et al., 2020 修改)

Fig. 8 The location(a), geological map(b) and Loolekop pipe map(c) of the Phalaborwa complex

族、铀、稀土、铌、磷等资源已备受关注(Ihlen et al., 2014; Emsbo et al., 2015; Goodenough et al., 2016)。其中,岩浆成因的磷灰石中通常含有超过 0.35% 的稀土元素,且有害组分含量低(Ihlen et al., 2014)。

磷酸盐岩和碳酸岩是杂岩体中的主要岩性,稀土元素含量高且分别达到 0.2% 和 0.1% 时就可以轻松提取稀土元素。独居石是最常见的稀土矿物(60%),而磷灰石和方解石是最重要的含稀土矿物(分别为 1% 和 0.5%)。其中,磷精矿中稀土氧化物的平均总含量约为 6000×10^{-6} ,碳酸岩和辉石岩中稀土氧化物的含量为 8000×10^{-6} 。此外,与传统的稀土矿勘探相比,从磷酸盐矿床中提取稀土元素相对容易,且对环境的污染小(Emsbo et al., 2015)。

矿床中磷灰石和方解石相对白云石更富集轻稀土元素(Hornig-Kjaarsgaard, 1998; Dawson et al., 2003)。磷灰石主要赋存于辉石岩、磷铁矿和碳酸岩中,呈现蓝色,表明轻稀土元素富集明显(Zirner et al., 2015; Broom-Fendley et al., 2017),其主要形成于幔源碳酸岩岩浆演化过程中(Milani et al., 2017)。早期形成的磷灰石轻稀土元素含量高,并且环状磷灰石核部比边缘更富集稀土元素,该特点可能与岩浆分异作用有关。同时,与碳酸岩和碱性杂岩相关的磷灰石可通过岩浆作用、热液交代作用及表生作用进一步富集成矿(Vartiainen et al., 1979; Walter et al., 1995; De Toledo et al., 2004; Broom-Fendley et al., 2016; Giebel et al., 2017)。

根据地球化学分析结果,目前从产生铜矿和磷矿的尾矿中提取独居石、磷灰石、方解石和白云石中的稀土元素,每吨可分别生产 5.65 kg 和 1.75 kg 的稀土元素。因此,矿物综合利用将是矿床未来发展的重大潜力方向(Gómez-Arias et al., 2022)。

帕拉博拉杂岩体是深大断裂与岩浆活动的产物,矿床受岩石圈地幔交代作用影响,2060 Ma 左右富含挥发性组分的碱性熔浆沿构造薄弱部位向地壳上部运移,且与围岩发生强烈水-岩反应,形成大面积分布的热液蚀变带(Groves et al., 2001)。碳酸岩和超镁铁质侵入岩所构成的大规模岩管是勒柯普矿体的主要容矿围岩,并且发育有钠化(钠长石、方柱石)和钾化(钾长石、绢云母)蚀变带。

3.3.3 洛夫达尔稀土矿床

洛夫达尔碳酸岩和相关霞石正长岩岩套位于纳米比亚西北部的达马拉地区(图 2、图 9),其包括

一个主侵入体(约 4 km^2)和几个零星的小侵入体,伴随着大量从响岩质碱玄岩到响岩质硅酸盐岩脉或碳酸岩岩墙。这些侵入体均侵位于长约 30 km 太古宙刚果克拉通南缘古元古代($>1700 \text{ Ma}$)的 Huab 变质杂岩内北东-南西向的剪切带中(Miller, 2008)。

洛夫达尔侵入岩套由一个正长岩-碳酸岩主侵入体和一个小的岩体组成,其包含大量呈东西走向的碳酸岩脉,以及较小的方解石碳酸岩岩体。大多数响岩和碳酸岩岩墙的宽度从厘米级至 30 m 不等,并沿走向延伸可达 15 km,其中的一些岩墙热液蚀变特征明显,并且与主侵入体的方解石碳酸岩特征相似。在未蚀变的主侵入岩方解石碳酸岩中主要含稀土矿物是黄碳铈钠石。洛夫达尔方解石碳酸岩的成分和结构特征表明,在碳酸岩演化的岩浆阶段,黄碳铈钠石与方解石同时形成。碳酸岩岩浆富含钠、铈、钡和轻稀土元素,是黄碳铈钠石早期结晶的证据,并且黄碳铈钠石受到蚀变的影响,形成了氟碳铈矿、碳铈铈矿、氟碳钡铈矿、菱铈矿、天青石和重晶石等矿物组合(Sitnikova et al., 2021)。

与铁氧化物、钍石、磷灰石和含 Ce 辉长岩有关的含 Y 捕虏体是主要的重稀土矿物,通常出现于富铁方解石碳酸岩岩脉中(Wall et al., 2008)。洛夫达尔侵入岩套由钙质碳酸岩和硅质饱和和碱性侵入岩组成,成分从响岩质碱玄岩到响岩(及霞石正长岩)。从 Y/Ho 和 Nb/Ta 值看,响岩质碱玄岩是由地幔部分熔融所形成的。同时,响岩和霞石正长岩是响岩质碱玄岩通过部分结晶演化形成的。然而,霞石正长岩的稀土元素含量低于响岩。碳酸岩可能是从响岩质碱玄岩或响岩熔体中演化出的一种不混溶液体,不仅形成富含重稀土元素的钙质碳酸岩(Bodeving et al., 2017),而且与帕拉博拉杂岩体类似,富含轻稀土(Hornig-Kjaarsgaard, 1998)。

洛夫达尔侵入岩套中楣石的 U-Pb 年龄为 $754 \pm 8 \text{ Ma}$ (Jung et al., 2007),霞石正长岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 $764 \pm 60 \text{ Ma}$ (Hawkesworth et al., 1983),2 组年龄表明该岩套就位于新元古代达马拉陆裂谷演化时期(Miller, 2008)。同时, Jung et al. (2007) 利用各种成果建立了两阶段侵位模型:首先是上地幔部分熔融,其次是未暴露的碱性玄武质岩浆分异形成岩体。Bodeving et al. (2017) 则认为,重稀土的富集可能与后期热液作用有关。

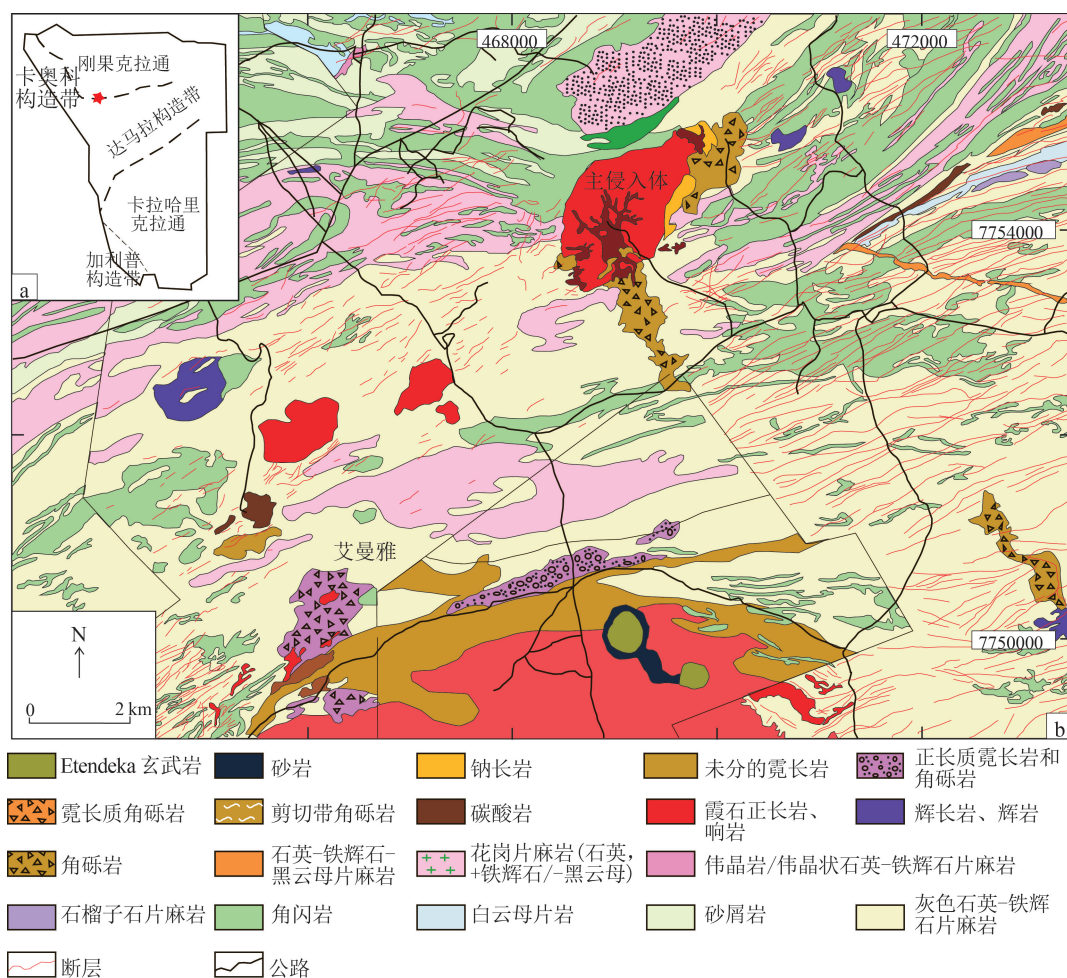


图 9 洛夫达尔侵入岩套位置(a)及地质图(b) (据 Bodeving et al., 2017 修改)

Fig. 9 The location(a) and geological map(b) of the Lofdal intrusive suite

3.3.4 Ambohimirahavavy 稀土矿床

Ambohimirahavavy 碱性杂岩体位于马达加斯加西北部(图 2),形成于新生代,杂岩体中碱性花岗岩类等火成岩的红色风化产物形成离子吸附型稀土矿床(IADs)。该类型稀土矿床通常是由含有原生或次生稀土矿物的火成岩在亚热带环境下风化形成的,其稀土元素主要吸附在粘土(高岭石和埃洛石)表面,但也赋存于次生矿物晶格中。矿床一般总的稀土氧化物含量在 $300 \times 10^{-6} \sim 3500 \times 10^{-6}$ 之间,规模通常在 $1 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4$ t 之间,提供了全球主要的经济价值较高的重稀土元素(Bao et al., 2008; Li et al., 2017)。该类矿床主要开采于中国南方地区,但近年来在非洲、南美和东南亚等地区也进行了较大规模的勘探和开发(Sanematsu et al., 2016)。影响离子吸附型稀土矿床形成的因素主要包括气候、地形、基岩成分和在稳定环境中暴露的时间等方面。

同时,重稀土矿床富集还与岩浆混合作用、交代作用和蚀变作用有关。前人研究成果表明,稀土元素从剖面顶部淋滤,并在中间层位富集(Bao et al., 2008; Sanematsu et al., 2016)。在目前开采的矿床中,稀土元素的提取主要是通过使用中度酸性($\text{pH}=4$)的硫酸铵溶液进行地浸或堆浸获得(Moldoveanu et al., 2016),该开采工艺因成本低、易于实施而受到追捧,但对环境破坏大(Packey et al., 2016)。本次研究的杂岩体隶属于马达加斯加新生代北部碱性火成岩省,其由许多侵入体和喷出火成岩体组成,并且附近还出露前寒武纪基底和中生代沉积岩(图 10)。这些岩石大致可分为 Ampasindava 侵入岩岩套和 Ankaizina 火山岩群。

Ampasindava 岩套的碱性火成岩侵入体出露于 Ampasindava 半岛及其周围,主要包括中新世—渐新世辉长岩、霞石正长岩、正长岩、石英正长岩和碱性花

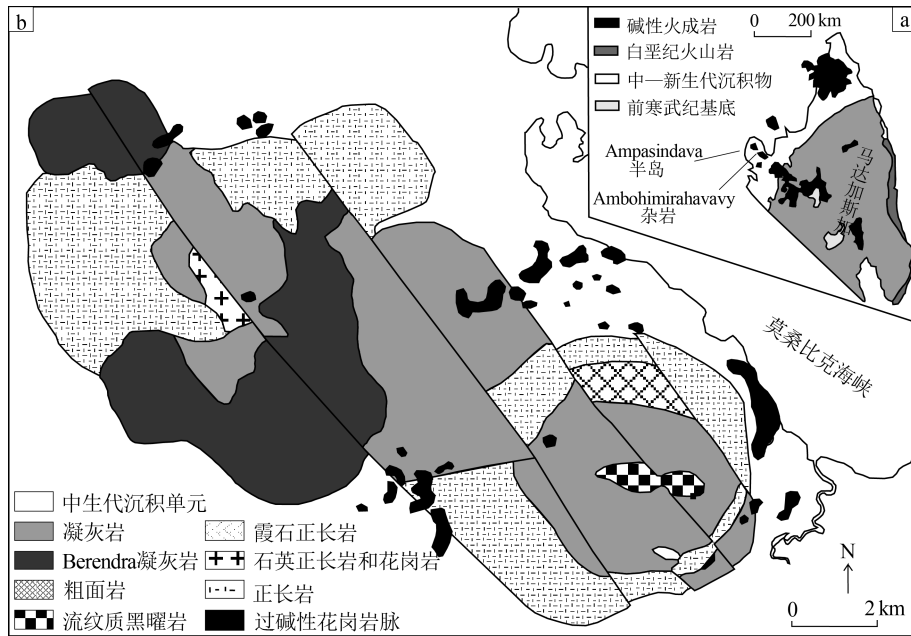


图 10 Ambohimirahavavy 碱性杂岩体位置(a)及地质图(b)(据 Estrade et al., 2019 修改)

Fig. 10 The location(a) and geological map(b) of the Ambohimirahavavy complex

岗岩的侵入体,围岩为中生代沉积岩(Cucciniello et al., 2016)。Ampasindava 半岛东北部和东南部主要由从玄武岩到响岩-流纹岩质 Ankaizina 火山岩群组成(Melluso et al., 2007)。该地区属于热带湿润气候,年平均温度在 20~27℃之间,年降雨量约为 1500 mm。这种气候有利于形成茂密的植被和厚层的风化层。

Ambohimirahavavy 杂岩体是 Ampasindava 半岛四大碱性杂岩之一(其他 3 个为 Manongarivo、Bezavona 和 Andranomatavy 杂岩体),其由喷出和侵入火成岩成因的硅质不饱和或过饱和岩石组成,包括含少量石英正长岩及花岗质正长岩侵入体(西北部)和含少量霞石正长岩、石英正长岩及花岗岩的圆形正长岩侵入体(东南部)。其中,东南部的圆形侵入体中央和北部的凹陷区主要被火山碎屑岩覆盖,伴有少量粗面岩至响岩质熔岩流,以及极少的粗面岩至流纹质熔岩穹窿。周围出露的中生代沉积岩中侵入了大量的粗面质、花岗质和花岗伟晶质岩脉(Estrade et al., 2019)。

杂岩体东南部的花岗岩、霞石正长岩和花岗伟晶岩脉是主要含稀土的岩性,其中与花岗伟晶岩脉有关的稀土成矿作用得到了详细的研究(Ganzeev et al., 2003),Tantalus Rare Earths AG 公司对稀土矿的经济价值进行了评估。这些岩石中主要的含稀土矿物包括稀土-氟碳酸盐、锆硅酸盐、硅酸盐和含少量磷酸盐的氧

化物(Estrade et al., 2018)。整个 Ambohimirahavavy 杂岩受到明显的热带湿润气候下强烈的风化作用影响,形成了厚约 12 m 的红土风化层。

对 Ambohimirahavavy 碱性杂岩体风化形成的红土剖面样品分析显示,稀土元素含量分布不均,受基岩的不同及土壤和腐殖土之间水文变化等因素控制(Estrade et al., 2019),具有 6 个方面特征:①所有分析的样品主要由高岭石和埃洛石组成,且在下部土壤和腐殖土中埃洛石的占比较高,同时埃洛石占比较高的红土层中所含稀土元素含量高。②典型的红土剖面通常呈现在淋滤层上部,显示随深度增加其容易淋滤的全部稀土+Y 含量也在增加。③稀土元素的主要控制因素是基岩的性质和含有稀土元素的原生矿物,并且红土剖面中稀土元素的分布受水文和地形因素控制。④易浸出重稀土元素且含量最高的位置是在基岩原岩之上,因为原岩含有可风化的稀土元素矿物,如氟碳酸盐(含稀土)和褐帘石(Ce)等。⑤表土与基岩中的 LREE/HREE 值具有相似性。⑥虽然交代作用通常被认为是形成更易风化矿物的有利过程,但在过碱性岩石中,该过程将易风化的钠质火成岩类矿物转化为难风化的锆石而抑制了离子吸附型稀土矿的形成。

3.3.5 斯廷坎普斯克拉尔稀土矿床

斯廷坎普斯克拉尔稀土矿位于南非西开普省

范伦斯多普 (Vanhynsdorp) 以北 71 km 处 (图 2), 目前斯廷坎普斯科拉尔独居石矿业公司拥有经营权。该矿于 1952—1963 年由英美资源公司运营, 随后关闭, 直到 2011 年才重启调查和勘探。除 $474 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的采矿权面积外, 该公司还拥有周围 3 个农场, 总面积约 $7 \times 10^7 \text{ km}^2$ (图 11)。该矿曾于 20 世纪五六十年代产出核燃料所需的钍, 目前已发现含有全部 15 种稀土元素的稀土资源量约为 $60.5 \times 10^4 \text{ t}$, 总的稀土氧化物 (TREO) 平均品位为 14.4%。其中, 钕、镨、镱和铽氧化物的资源量分别为 15630 t (品位为 2.58%)、4459 t、867 t 和 182 t, 这 4 种重要稀土元素的综合品位为 3.49%。从经济角度评估各元素的占比情况分别为 Nd 占 56.59%, Dy 占 14.19%, Pr 占 12.43%, Tb 占 9.62%, Gd 占 2.12%, Ce 占 1.95%, 其他占 3.12% (斯廷坎普斯科拉尔独居石矿业公司网站, 2022)。

斯廷坎普斯科拉尔稀土矿是一种薄透镜状独居石矿体, 位于南非中元古代纳马奎 (Namaqua) 构造带中。Read et al. (2002) 和 Andreoli et al. (2006) 对矿床地质特征进行了研究。独居石矿带东部被古近纪—第四纪沉积物覆盖, 覆盖层之下有不整合

接触的新元古代 Nama 群石英砂岩 (图 11-b), 在西部地区形成部分孤山。矿带位于花岗片麻岩、麻粒岩相正片麻岩和副片麻岩中, 通常具有典型的巨晶结构, 主要含辉石及紫苏花岗岩特征。主要片理 (S2) 发生在拥有主矿层和大部分矿层的中部孤山内。该片理向矿带西部倾斜较浅, 但沿走向和倾向陡峭, 在紧靠矿带北部和南部的区域呈中等倾斜。总的来说, 主要片理的走向和倾斜趋势在地表形成了独特的“螺纹”状结构或形成线状图案的褶皱 (图 11-c)。在“螺纹”状结构的中心, 独居石矿带以 $40^\circ \sim 60^\circ$ 的角度倾向南, 其包含苏长岩、闪长岩、石英斜长岩和英云闪长岩呈脉状或岩墙状分布 (Roodewal 岩套)。

纳马奎花岗片麻岩中的矿体在地表出露超过 400 m, 呈东西走向的块状细粒矿石, 向下延伸超过 450 m。根据地表及地下不同位置的矿体样品分析, 矿石主要是独居石+磷灰石+黄铜矿的富磷酸盐组合, 局部是磁铁矿+磷灰石+独居石+铁尖晶石+黄铜矿的富氧化物的组合。Knoper (2010) 利用锆石 SHRIMP U-Pb 方法获得花岗片麻岩中独居石的形成年龄为 $1046 \pm 8 \text{ Ma}$ 。

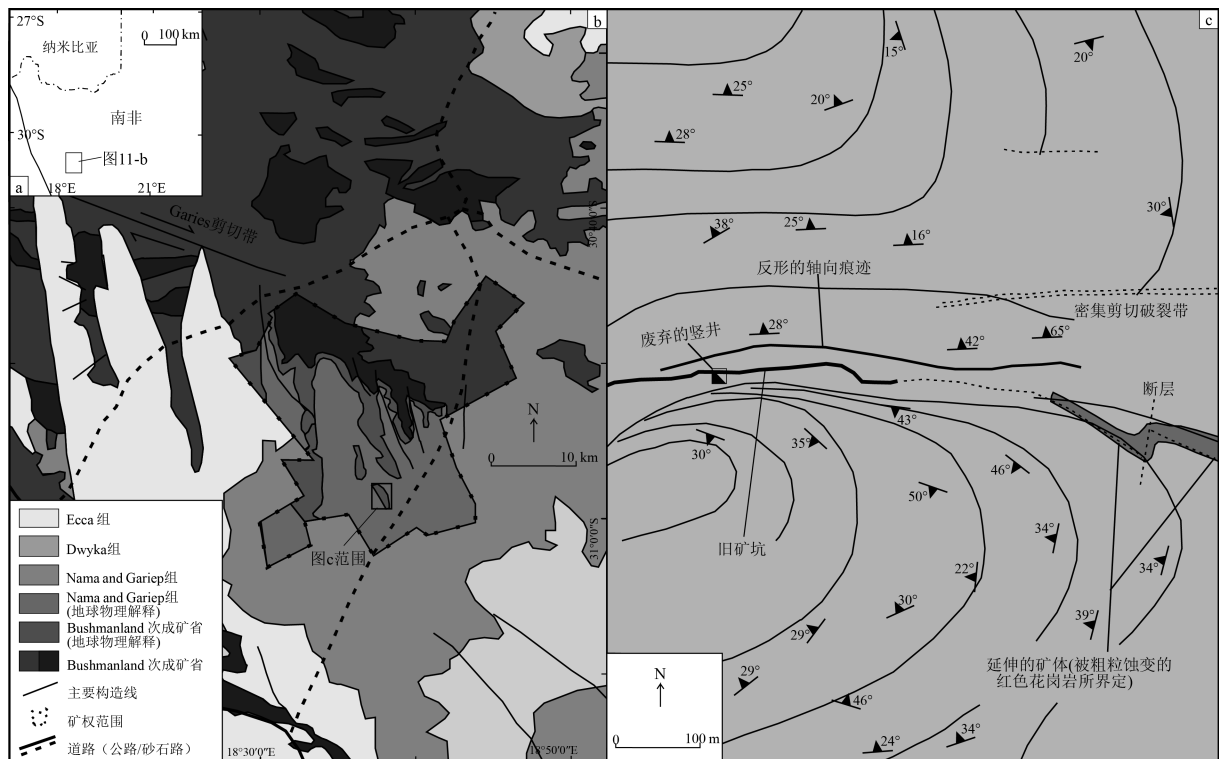


图 11 斯廷坎普斯科拉尔独居石矿床位置(a)、地质简图(b)及构造图(c) (据 Basson et al., 2016 修改)

Fig. 11 The location(a), geological(b) and structure(c) maps of Steenkampsraal monazite deposit

独居石矿带是存在于花岗片麻岩含矿母岩中的一个中度倾斜矿体,位于 F3 褶皱的南翼,深部和沿走向的厚度变化是 D2 和 D3 构造变形的结果。随后,该带受 D3 构造变形晚期“陡构造”局部横切和变陡,这与该矿床北部约 150 km 的 Okiep 铜矿的典型特征一致。该独居石矿带在 1046±8 Ma 时侵入并形成,成矿时间为 D3 Klondikean 幕(1040~1020 Ma)(Basson et al.,2016)。

4 非洲稀土矿近十年勘查投资情况

2012 年以来,非洲主要稀土资源国稀土矿勘查投资规模呈现先降后升的趋势(S&P Global Market Intelligence,2022)。从年度勘查投资规模来看(图 12),2012 年非洲主要稀土资源国稀土矿勘查投资规模最大,约 5640 万美元,之后持续下降,2017 年降至谷底,投资规模约 170 万美元。2018 年,由于中国打击国内非法稀土生产,全球稀土供应出现缺口,以及美国重启稀土战略,美国国防部后勤局、美援署积极参与马拉维、布隆迪、坦桑尼亚等国稀土投资,澳大利亚、英国相关组织、企业尾随行动,使非洲稀土勘查投入又迎来新一轮的增长。2021 年非洲稀土矿勘查投资约 1860 万美元,同比上升 173.5%,增速明显。从 2021 年度非洲主要国家勘查投资情况看(表 4),纳米比亚、南非、乌干达和安哥拉等国同比增速快,纳米比亚、安哥拉、乌干达和

马拉维等国资金增长额大。2018 年以来,非洲新发现稀土矿较多,Pr、Nd 2 种关键稀土元素含量较高,部分国家也有可观的离子吸附型稀土,但是整体情况仍然不明,未来值得重点研究。

5 稀土资源价格的未来趋势

中国是全球稀土储量最丰富的国家,2019 年中国稀土矿产量约占全球总产量的 63%,冶炼分离产量约占全球总产量的 88%。中国的轻稀土生产拥有资源和技术优势,以白云鄂博为代表的北方稀土生产基地,利用选铁之后的尾矿浮选获得稀土精矿,赋予中国北方轻稀土生产绝对的成本优势;而

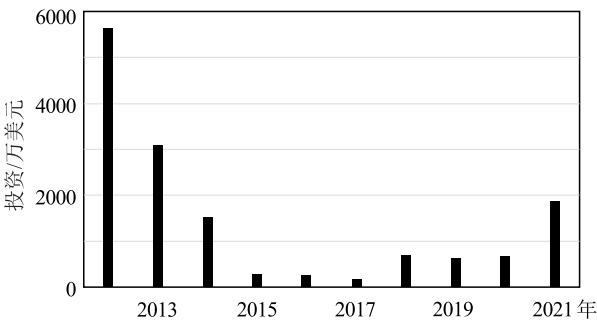


图 12 非洲稀土矿年度勘查投资规模
(S&P Global Market Intelligence,2022)

Fig. 12 Annual investment scale of rare earth element deposits exploration in Africa

表 4 非洲主要国家稀土矿勘查投资规模

Table 4 Investment scale of rare earth element deposits exploration in major African countries

国家	万美元									
	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
安哥拉	30	10	—	10	—	60	100	360	230	580
博茨瓦纳	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
布隆迪	—	—	—	—	—	10	100	100	100	80
加蓬	120	100	100	—	—	—	190	—	—	—
几内亚	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
肯尼亚	290	—	—	—	—	—	10	—	—	—
马达加斯加	—	—	—	—	—	—	—	60	30	50
马拉维	500	140	150	50	20	—	250	—	200	300
莫桑比克	350	240	30	—	—	—	20	—	—	—
纳米比亚	1050	810	470	20	80	40	—	50	20	540
南非	2260	1140	570	130	130	60	30	20	10	80
坦桑尼亚	1000	650	90	80	40	—	—	50	—	—
乌干达	—	—	—	—	—	—	—	—	90	230
赞比亚	0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
津巴布韦	—	—	100	—	—	—	—	—	—	—
合计	5640	3090	1510	290	270	170	700	640	680	1860

注:数据据 S&P Global Market Intelligence,2022;“—”代表未查询到数据

重稀土在中国南方、缅甸、布隆迪、马达加斯加等国家主要以离子吸附型稀土矿为主,矿床埋藏深度浅、开采难度小。因此,前期全球稀土市场开发格局主要由中国主导。未来10年稀土的应用主要集中在永磁材料和催化材料2个领域,新能源汽车、风力发电、智能机器人领域稀土永磁材料的用量非常大;另外传统能源暂时还不能被替代,石油催化材料也是稀土的一大应用领域。目前,市场关注度最高的品种是氧化镨、氧化钕、氧化镝和氧化铽。前2个品种是轻稀土的代表,后者是重稀土的代表,这4个品种的价格代表了稀土品种价格波动的趋势。总体看,氧化镨、氧化钕、氧化镝和氧化铽的价格有永磁产业支撑,均处于供不应求阶段。未来,随着国际上稀土矿的逐步投产,轻稀土的生产面临国际市场竞争,预计价格将稳中有降;重稀土供应受国内储备政策的影响,预计价格会逐步抬升(图13)。

6 结 论

(1)非洲稀土矿床主要分布于卡普瓦尔克拉通、津巴布韦克拉通及坦桑尼亚克拉通周缘不同时期的构造带中,可划分为火成碳酸岩型、砂矿型、伟晶岩型、离子吸附型、花岗岩型、变质岩型、沉积岩型和不整合面型8种(成矿时代跨度大)。其中,火成碳酸岩型和离子吸附型稀土矿床是目前勘探及开发的重点。

(2)非洲稀土矿床主要集中于坦桑尼亚、安哥拉、肯尼亚、加蓬、南非、马达加斯加、马拉维、纳米比亚、乌干达、赞比亚、莫桑比克、布隆迪12个国家,稀土氧化物的储量及高级资源量分别为 195.6×10^4 t和 1014.4×10^4 t。其中,坦桑尼亚的稀土氧化物储量为 88.7×10^4 t,高级资源量为 333.9×10^4 t,均位居非洲首位。目前,中国已经从布隆迪、肯尼亚等国进口稀土资源。

(3)2012年非洲主要稀土资源国稀土矿勘查投资规模最大,之后持续下降,2017年到达低谷,2018年以来勘查投资增长迅速,未来中国主导的全球稀土市场价格将面临竞争。非洲稀土矿成矿条件优越,中资企业可利用中国对稀土的“采-选-冶”技术优势,积极引导并推动非洲稀土生产进入中国产业链。同时,为了进一步维护中国的稀土供应链安全,巩固中国稀土产业的全球优势地位,建议中国大型稀土企业主动走出去。

致谢:在成文过程中得到中国地质调查局成都矿产综合利用研究所熊文良研究员、中国稀土集团王冠南博士、中国地质调查局成都地质调查中心郭林楠高级工程师的大力支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

Andreoli M A G, Hart R J, Ashwal L D, et al. Correlations between U, Th content and metamorphic grade in the Western Namaqualand Belt,

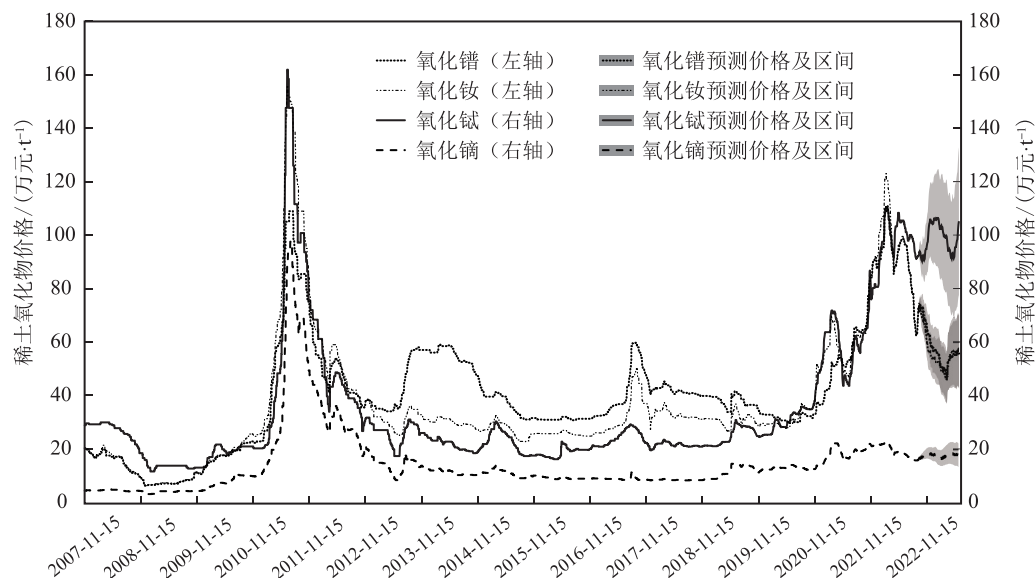


图13 2007年以来稀土氧化物价格走势及预测(据 Argus Media 网站,2022)

Fig. 13 Price trend and forecast of rare earth element oxides since 2007

- South Africa, with implications for radioactive heating of the crust[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(6): 1095–1118.
- Argus Media.[EB/OL]. (2022-12-13) <https://www.argusmedia.com/metals-platform/dashboards/index/4>.
- Bao Z, Zhao Z. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 33: 519–535.
- Basson I J, Muntingh A, Jellicoe B C, et al. Structural interpretation of the Steenkampskraal monazite deposit, Western Cape, South Africa [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, 121: 301–315.
- Bodeving S, Williams-Jones A E, Swinden S. Carbonate-silicate melt immiscibility, REE mineralising fluids, and the evolution of the Lofdal Intrusive Suite, Namibia[J]. *Lithos*, 2017, 268: 383–398.
- Broom-Fendley S, Brady A E, Horstwood M S A, et al. Geology, geochemistry and geochronology of the Songwe Hill carbonatite, Malawi[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2017, 134: 10–23.
- Broom-Fendley S, Heaton T, Wall F, et al. Tracing the fluid source of heavy REE mineralisation in carbonatites using a novel method of oxygen-isotope analysis in apatite: the example of Songwe Hill, Malawi [J]. *Chemical Geology*, 2016, 440: 275–287.
- Buyse F, Dewaele S, Decrée S, et al. Mineralogical and geochemical study of the rare earth element mineralization at Gakara (Burundi) [J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 124: 103659.
- Cahen L, Snelling N J. The Geochronology of Equatorial Africa [M]. North Holland, Amsterdam, 1966: 195.
- Cucciniello C, Tucker R D, Jourdan F, et al. The age and petrogenesis of alkaline magmatism in the Ampasindava Peninsula and Nosy Be archipelago, northern Madagascar [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2016, 110: 309–331.
- Dawson J B, Hinton R W. Trace-element content and partitioning in calcite, dolomite and apatite in carbonatite, Phalaborwa, South Africa[J]. *Mineralogical Magazine*, 2003, 67(5): 921–930.
- De Toledo M C M, Lenharo S L, Ferrari V C, et al. The compositional evolution of apatite in the weathering profile of the Catalão I alkaline-carbonatitic complex, Goiás, Brazil [J]. *Canadian Mineralogist*, 2004, 42: 1139–1158.
- De Waele B, Johnson S P, Pisarevsky S A. Palaeoproterozoic to Neoproterozoic growth and evolution of the eastern Congo Craton: Its role in the Rodinia puzzle [J]. *Precambrian Research*, 2008, 180: 127–141.
- Decrée S, Cawthorn G, Deloule E, et al. Unravelling the processes controlling apatite formation in the Phalaborwa Complex (South Africa) based on combined cathodoluminescence, LA-ICPMS and in-situ O and Sr isotope analyses [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2020, 175: 34.
- Emsbo P, Mc Laughlin P I, Breit G N, et al. Rare earth elements in sedimentary phosphate deposits: Solution to the global REE crisis? [J]. *Gondwana Research*, 2015, 27: 776–785.
- Estrade G, Marquis E, Smith M, et al. REE concentration processes in ion adsorption deposits: Evidence from the Ambohimirahavavy alkaline complex in Madagascar [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 112: 103027.
- Estrade G, Salvi S, Béziat D. Crystallisation and destabilisation of eudialyte group minerals in peralkaline granite and pegmatite: a case study from the Ambohimirahavavy complex, Madagascar [J]. *Mineralogical Magazine*, 2018, 82(2): 375–399.
- Ganzev A A, Grechishchev O K. A new genetic type of rare-metal alkali granites of Madagascar [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2003, 44: 539–553.
- Giebel R J, Gauert C D, Marks M A, et al. Multistage formation of REE minerals in the Palabora Carbonatite Complex, South Africa [J]. *American Mineralogist*, 2017, 102: 1218–1233.
- Gómez-Arias A, Yesares L, Díaz J, et al. Mine waste from carbonatite deposits as potential rare earth resource: Insight into the Phalaborwa (Palabora) Complex [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2022, 232: 106884.
- Goodenough K M, Schilling J, Jonsson E, et al. Europe's rare earth element resource potential: an overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting [J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 72: 838–856.
- Goodenough K M, Wall F, Merriman D. The rare earth elements: demand, global resources, and challenges for resourcing future generations [J]. *Natural Resources Research*, 2018, 27: 201–216.
- Groves D I, Vielreicher N M. The Phalaborwa (Palabora) carbonatite-hosted magnetite-copper sulfide deposit, South Africa: An end-member of the iron-oxide copper-gold-rare earth element deposit groups? [J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36: 189–194.
- Harmer R E, Gittins J. The origin of dolomitic carbonatites: field and experimental constraints [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1997, 25(1): 5–28.
- Hawkesworth C J, Gledhill A R, Roddick J C, et al. Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ studies bearing on models for the thermal evolution of the Damara Belt, Namibia [C]// *Evolution of the Damara Orogen of South West Africa/Namibia*. Geological Society of South Africa, 1983, 11: 323–338.
- Hornig-Kjaarsgaard I. Rare earth elements in carbonatites and their mineral phases [J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39: 2105–2121.
- Ihlen P M, Schiellerup H, Gautneb H, et al. Characterization of apatite resources in Norway and their REE potential—a review [J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 58: 126–147.
- Jung S, Hoffer E, Hoernes S. Neo-Proterozoic rift-related syenites (northern Damara Belt, Namibia): geochemical and Nd-Sr-Pb-O isotope constraints for mantle sources and petrogenesis [J]. *Lithos*, 2007, 96: 514–535.
- Kanazawa Y, Kamitani M. Rare earth minerals and resources in the world [J]. *Journal of alloys and compounds*, 2006, 408: 1339–1343.
- Knoper M W. The mesoproterozoic Steenkampskraal rare-earth element deposit in Namaqualand, South Africa [C]// 2010 GSA, Denver Annual Meeting, 2010: 132–134.
- Kramm U, Körmér T, Kittel M, et al. Triassic emplacement age of the Kalkfeld complex, NW Namibia: implications for carbonatite magmatism and its relationship to the Tristan Plume [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2017, 106(8): 2797–2813.
- Kynicky J, Smith M P, Xu C. Diversity of rare earth deposits: the key example of China [J]. *Elements*, 2012, 8(5): 361–367.
- Lehmann B, Nakai S, Höhndorf A, et al. REE mineralization at Gakara, Burundi: Evidence for anomalous upper mantle in the western Rift Valley [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(2): 985–992.
- Li Y H M, Zhao W W, Zhou M F. Nature of parent rocks, mineralization

- styles and ore genesis of regolith-hosted REE deposits in South China: an integrated genetic model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 148: 65–95.
- Madugalla T, Pitawala H, Karunaratne D. Use of carbonatites in the production of precipitated calcium carbonate: a case study from Eppawala, Sri Lanka[J]. *Natural resources research*, 2014, 23(2): 217–229.
- Melluso L, Morra V, Brotzu P, et al. The Cenozoic alkaline magmatism in central – northern Madagascar: a brief overview [J]. *Periodico di Mineralogia*, 2007, 76: 169–180.
- Milani L, Bolhar R, Frei D, et al. Light rare earth element systematics as a tool for investigating the petrogenesis of phoscorite – carbonatite associations, as exemplified by the Phalaborwa Complex, South Africa[J]. *Mineral Deposita*, 2017, 52: 1105–1125.
- Miller R. M. Neoproterozoic and early Paleozoic rocks of the Damara Orogen[C]//Miller R. M. *The Geology of Namibia*. Geological Survey Windhoek, 2008: 13–1–114–1.
- Moldoveanu G A, Papangelakis V G. An overview of rare –earth recovery by ionexchange leaching from ion –adsorption clays of various origins[J]. *Mineralogical Magazine*, 2016, 80: 63–76.
- Nakai S, Masuda A, Lehmann B. La –Ba dating of bastnaesite[J]. *American Mineralogist*, 1988, 73: 1111–1113.
- Packey D J, Kingsnorth D. The impact of unregulated ionic clay rare earth mining in China[J]. *Resources Policy*, 2016, 48: 112–116.
- Read D, Andreoli M A G, Knoper M, et al. The degradation of monazite: implications for the mobility of rare –earth and actinide elements during low –temperature alteration[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2002, 14: 487–498.
- Reischmann T. Precise U/Pb age determination with baddeleyite (ZrO₂), a case study from the Phalaborwa igneous complex, South Africa [J]. *South African Journal of Geology*, 1995, 98: 1–4.
- S&P Global Market Intelligence. Commodities, Countries, Screener [EB/OL]. (2022 –09–08). <https://www.capitaliq.spglobal.2022>.
- Sanematsu K, Watanabe Y. Characteristics and genesis of ion adsorption –type rare earth element deposits[C]//Verplanck P L, Hitzman M W. *Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits*. Society of Economic Geologists, 2016.
- Siedner G, Miller J A. K –Ar age determination on basaltic rocks from South West Africa and their bearing on continental drift[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1968, 4: 451–458.
- Sitnikova M A, Cabo V D, Wall F, et al. Burbankite and pseudomorphs from the Main Intrusion calcite carbonatite, Lofdal, Namibia: association, mineral composition, Raman spectroscopy[J]. *Mineralogical Magazine*, 2021, 85: 496–513.
- Smithies R H, Marsh J S. The Marinkas Quellen Carbonatite Complex, southern Namibia: carbonatite magmatism with an uncontaminated depleted mantle signature in a continental setting [J]. *Chemical Geology*, 1998, 148: 201–212.
- Snelling N J. Age determinations on three African carbonatites[J]. *Nature*, 1965, 205: 492.
- Tulibonywa T, Many S, Maboko M A H. Palaeoproterozoic volcanism and granitic magmatism in the Ngualla area of the Ubendian Belt, SW Tanzania: Constraints from SHRIMP U –Pb zircon ages, and Sm –Nd isotope systematic[J]. *Precambrian Research*, 2015, 256: 120–130.
- USGS. Mineral commodity summaries 2022: Mineral Commodity Summaries[Z]. Reston: 202202.2022.
- Vartiainen H, Paarma H. Geological characteristics of the Sokli Carbonatite Complex, Finland[J]. *Economic Geology*, 1979, 74: 1296–1306.
- Wall F, Niku –Paavola V N, Storey C, et al. Xenotime – (Y) from carbonatite dykes at Lofdal, Namibia: unusually low LREE: HREE ratio in carbonatite, and the first dating of xenotime overgrowths on zircon[J]. *Canadian Mineralogist*, 2008, 46(4): 861–877.
- Wall F, Rollat A, Pell R S. Responsible sourcing of critical metals [J]. *Elements*, 2017, 13: 313–318.
- Walter A V, Nahon D, Flicoteaux R, et al. Behaviour of major and trace elements and fractionation of REE under tropical weathering of a typical apatite –rich carbonatite from Brazil [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 136: 591–602.
- Witt W K, Hammond D P, Hughes M. Geology of the Ngualla carbonatite complex, Tanzania, and origin of the Weathered Bastnaesite Zone REE ore[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 105: 28–54.
- Wu F Y, Yang Y H, Li Q L, et al. In situ determination of U –Pb ages and Sr –Nd –Hf isotopic constraints on the petrogenesis of the Phalaborwa carbonatite Complex, South Africa[J]. *Lithos*, 2011, 127(1/2): 309–322.
- Zambezi P, Hale M, Voncken J H L, et al. Bastnaesite –(Ce) at the Nkombwa Hill carbonatite complex, Isoka District, northeast Zambia [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1997, 59(3): 239–250.
- Zirner A L, Marks M A, Wenzel T, et al. Rare earth elements in apatite as a monitor of magmatic and metasomatic processes: The Ilímaussaq complex, South Greenland[J]. *Lithos*, 2015, 228: 12–22.
- 工业和信息化部. 自然资源部关于下达 2021 年第一批稀土开采、冶炼分离总量控制指标的通知 [EB/OL]. (2022 –12 –13) [2021 –02 –19]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/ycls/gzdt/art/2021/art_b7d3333-a8db441e29083a94f00e662d4.html.
- 胡鹏, 任军平, 向鹏, 等. 非洲大陆构造单元划分[J]. *地质通报*, 2022, 41(1): 1–18.
- 任军平, 胡鹏, 王杰, 等. 非洲矿业发展概况[J]. *地质学报*, 2021, 95(4): 945–961.
- 盛和资源控股股份有限公司. 盛和资源控股股份有限公司关于控股公司盛和资源(新加坡)有限公司与 Peak Rare Earths Limited 签署谅解备忘录的公告 [EB/OL]. (2022 –12 –13) [2022 –10 –19]. <http://data.eastmoney.com/notices/detail/600392/AN202210191579269359.html>.
- 斯廷坎普斯克拉克独居石矿业公司网站 [EB/OL]. (2022 –12 –13). <https://www.steenkampskraal.com.2022>.
- 王登红, 郑绵平, 王成辉, 等. 大宗紧缺矿产和战略性新兴产业矿产调查工程进展与主要成果[J]. *中国地质调查*, 2019, 6(6): 1–11.
- 王杰, 刘晓阳, 任军平, 等. 坦桑尼亚前寒武纪成矿作用[J]. *华北地质*, 2022, 45(1): 101–110.
- 吴兴源, 刘晓阳, 任军平, 等. 坦桑尼亚 Panda 山碳酸岩地球化学特征及岩石成因研究进展[J]. *地质调查与研究*, 2019, 42(2): 86–95.
- 张培善. 中国稀土矿床成因类型[J]. *地质科学*, 1989, 24: 26–32.
- 中国海关. 海关统计数据在线查询平台 [EB/OL]. (2022 –05 –04). <http://43.248.49.97/>. 2022.