

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.07.013

莫桑比克上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带成矿规律及资源潜力

唐文龙^{1,2}, 付超^{1,2*}, 王杰^{1,2}, 孙宏伟^{1,2}, 黄超越³, 任军平^{1,2}, 滕菲^{1,2}, 古阿雷^{1,2}
TANG Wenlong^{1,2}, FU Chao^{1,2*}, WANG Jie^{1,2}, SUN Hongwei^{1,2}, HUANG Chaoyue³,
REN Junping^{1,2}, TENG Fei^{1,2}, GU Alei^{1,2}

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;
 2. 华北地质科技创新中心, 天津 300170;
 3. 内蒙古自治区赤峰市林西县金源矿业开发有限公司, 内蒙古 林西 025250
1. Tianjin Center, China Geology Survey, Tianjin 300170, China;
2. North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China;
3. Jinyuan Mining Development Co., Ltd., Linxi County, Chifeng City, Linxi 025250, Inner Mongolia, China

摘要:莫桑比克上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带位于中南部非洲达马拉-赞比亚巨型成矿域东段莫桑比克活动带内, 已发现钽-铌稀有元素矿床、矿点 149 处, 成矿类型均为伟晶岩型。成矿带内伟晶岩主要为泛非造山作用晚期岩浆结晶分异的产物, 成岩时代为 440~450 Ma 和 470~490 Ma, 已发现的伟晶岩可划分为 5 条伟晶岩带, 12 个伟晶岩田, 46 个伟晶岩群, 超过 100 个伟晶岩矿化区, 与成矿关系密切的 LCT(锂-铯-钽)型伟晶岩矿物分带性明显, 其中 Ta-Nb 等成矿元素主要赋存于长石带和锂化带中。钽-铌稀有元素矿床成矿时代与伟晶岩成岩时代相同, 主要集中于 440~450 Ma 和 470~480 Ma。矿床的产出受纳玛玛逆冲推覆带、穆格巴飞来峰控制作用明显, 矿体产于纳玛玛逆冲推覆带和穆格巴飞来峰边缘环状区南北两侧的 EW 向、NW 向断裂带内的 LCT 型伟晶岩中, 呈脉状、透镜状、板状产出。各矿区自 SE→NW 或 SEE→NWW 稀有金属矿化组合具有由简单向复杂, 成矿元素种类由单一向综合方向演化的趋势, 表明岩浆结晶分异程度在不断升高。结合已有资料, 将上利戈尼亚稀有元素成矿带筛选出 11 处成矿远景区, 其中重点远景区 6 处, 一般远景区 5 处, 对重点远景区开展了资源潜力分析, 指明了找矿方向。

关键词:稀有元素; Ta-Nb; 成矿时代; 控矿构造; 成矿规律; 资源潜力; 上利戈尼亚, 莫桑比克; 矿产勘查工程

中图分类号: P618.79; P618.86 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)07-1269-13

Tang W L, Fu C, Wang J, Sun H W, Huang C Y, Ren J P, Teng F, Gu A L. Metallogenic regularity and resources potential of Alto Ligonha Ta-Nb rare element metallogenic belt in Mozambique. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(7): 1269-1281

Abstract: Alto Ligonha Ta-Nb rare element metallogenic belt in Mozambique active belt is located in the eastern part of the Damara-Zambezia giant metallogenic domain in central and southern Africa. 149 Ta-Nb rare element deposits and occurrences have been found, and the metallogenic types are pegmatite type. The pegmatites in the metallogenic belt are mainly the product of magmatic crystallization differentiation in the late Pan African orogeny and the diagenetic ages are 440~450 Ma and 470~490 Ma. The pegmatites in the metallogenic belt can be divided into 5 pegmatite belts, 12 pegmatite fields, 46 pegmatite groups and more than 100 pegmatite mineralized areas. The LCT(Lithium-Cesium-Tantalum) pegmatites closely related to mineralization are obvious zoned. Among them,

收稿日期: 2020-04-09; 修订日期: 2021-05-30

资助项目: 中国地质调查局项目《莫桑比克-坦桑尼亚钽钨资源调查》(编号: DD20201150)

作者简介: 唐文龙(1979-), 男, 正高级工程师, 从事矿产勘查和成矿规律研究工作。E-mail: twl011562@126.com

* 通信作者: 付超(1986-), 男, 高级工程师, 从事矿产资源调查评价与矿床学研究。E-mail: fuchaocugb@163.com

Ta-Nb and other metallogenic elements mainly occur in feldspar belt and lithium belt. The metallogenic epoch of Ta-Nb rare element deposits are the same as pegmatites, mainly concentrated in 440 ~ 450 Ma and 470 ~ 480 Ma. The deposits are obviously controlled by Namama thrust belt and Mugeba klippe. The ore body occurs in the LCT type pegmatite of the Namama thrust belt and EW, NW fault zones in the south and north sides marginal ring area of Mugeba klippe, and occurs in vein, lenticular, and plate shapes. From SE to NW or SEE to NWW, the rare element mineralized association in each mining area has a trend from simple to complex, and the types of ore-forming elements have evolved from single to comprehensive, indicating that the degree of magmatic crystallization differentiation is increasing. Combined with the existing data, the Alto Ligonha rare element metallogenic belt can be divided into 11 metallogenic prospect areas, including 6 key prospect areas and 5 general prospect areas, which analyzed the resource potential of the key prospect areas and pointed out the prospecting direction.

Key words: rare element; Ta-Nb; metallogenic epoch; ore controlling structure; metallogenic regularity; resource potential; Alto Ligonha, Mozambique; mineral exploration engineering

钽是稀有金属矿产资源之一,是电子工业和空间技术发展不可缺少的战略原料。该金属主要存在于钽铁矿中,常与铌共生,以极高的抗腐蚀性、热膨胀系数小被广泛应用于化工、电子、电气及植入式医疗设备高端器材领域。铌作为一种带光泽的灰色金属,以高延展性、低温下呈超导性、对热中子捕获截面低等特性,被广泛应用于超导、高温合金、磁共振成像(MRI)和核磁共振仪器(NMRI)的超导磁体、粒子加速器、核工业等领域,受到世界上绝大多数国家的广泛重视。2021年,全球钽金属储量大于 13.4×10^4 t,主要集中于澳大利亚、巴西、埃及、泰国、尼日利亚和马来西亚。2021年,全球钽金属产量2100 t,刚果(金)、卢旺达、尼日利亚、中国、巴西、澳大利亚、埃塞俄比亚为主要产出国。截止到2021年,全球铌金属储量超过 1700×10^4 t,主要集中于巴西、加拿大、美国、俄罗斯、澳大利亚、肯尼亚等国,2020年全球铌金属产量75 kt,巴西、加拿大为主要产出国^[1]。

中国钽、铌矿产资源丰富,但对外依赖度高,国家“十三五”计划更是把钽、铌列为战略性矿产资源。截止到2020年,中国全年进口钽、铌等稀有金属精矿7.2 kt(图1),进口渠道主要来自非洲的尼日利亚、刚果(金)、卢旺达,东南亚的马来西亚及南美洲的巴西5个国家(图2),其中65%的进口量来自非洲。需要注意的是,2014—2019年,莫桑比克、美国、马来西亚、卢旺达4国大幅降低对中国钽铌出口量,降低比率分别为77%、54%、43%和16%(图3);而中国钽铌进口量自2006年达75.2 kt后总体呈下降趋势(图2)。为了稳定钽铌进口渠道,中国加大了对非洲国家布隆迪、尼日利亚和刚果(金)^①(图4)的进口量。

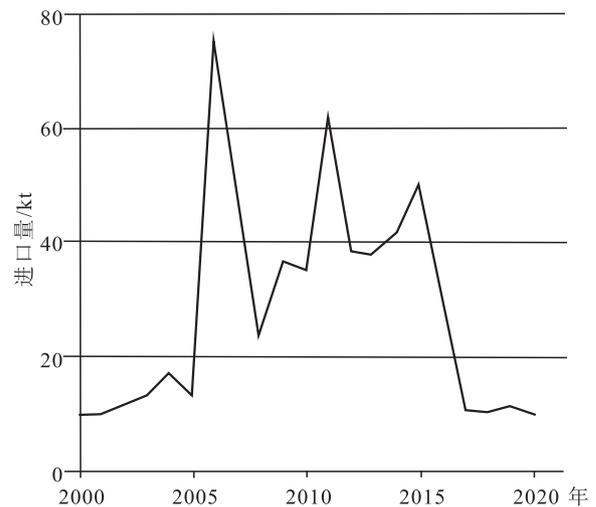


图1 中国2000—2020年钽-铌进口量
(数据据参考文献①)

Fig. 1 Chart of Ta-Nb import in 2000—2020, China

莫桑比克钽铌矿资源丰富,长期以来一直是中国钽铌精矿的主要进口国之一,已发现的钽-铌稀有元素矿床主要位于赞比亚省的上利戈尼亚稀有元素成矿带上。该带位于中南部非洲达马拉-赞比亚巨型成矿带东段,成矿地质条件优越,资源潜力巨大,是开展钽、铌稀有元素勘查的重要地段。前人对该带开展地质工作可追溯到20世纪60年代^[2-13]^{②③④},且主要集中于对莫拉(Morrua)、马罗比诺(Marropino)、穆伊安(Muiane)等大型稀有元素矿床的勘查、开采活动。近年来,受地质工作程度、选冶手段、价格因素等影响,该成矿带大部分钽铌稀有元素矿床开采处于停滞状态,对该国钽-铌等精矿出口产生了严重影响,同时,中国多家地勘单位将目光投向该带,并开始从事稀有元素矿产勘查

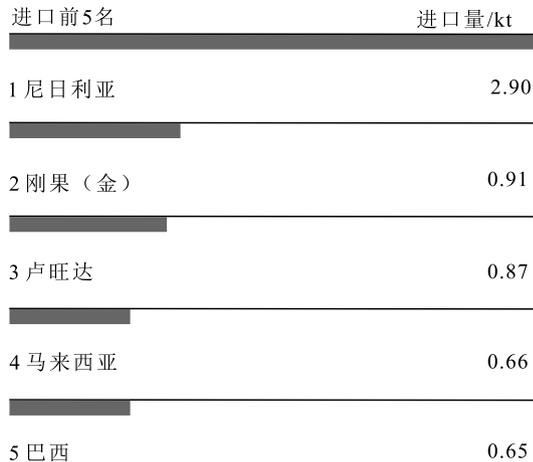


图 2 2020 年中国钽-铌主要进口国及进口量
(数据据参考文献①)

Fig. 2 Major Ta-Nb importers and import volume in 2020, China

工作^[14-15],急需了解该成矿带的成矿地质背景、成矿特征、区域成矿规律、钽-铌资源潜力及勘查方向。本文在前期工作的基础上,通过总结莫桑比克上利戈尼亚稀有元素成矿带的成矿规律,解剖资源禀赋特征,分析该区资源潜力,为中国地勘单位深入了解该区钽、铌矿开发利用现状、资源前景,开展稀有元素矿产勘查提供依据及技术支持。

1 成矿地质背景及资源状况

上利戈尼亚稀有元素成矿带位于中—新元古代莫桑比克活动带内,受古元古代乌本迪造山事件^[16]、中元古代基巴拉造山事件^[17]、新元古代—古生代泛非造山事件影响,该带大部分地质单元变形、变质作用强烈。研究区南以显生宙盖层为界,

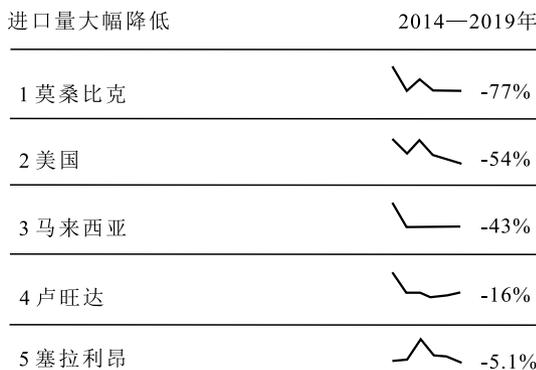


图 3 2014—2019 年中国钽-铌进口量大幅下滑国家
(数据据参考文献①)

Fig. 3 Ta-Nb import volume fell sharply in 2014—2019, China

北邻坦桑尼亚乌本迪造山带,西接纳毛里(Namorroi)麻粒岩区,东部面对莫桑比克海岸带。全区主要由两部分组成,南部楠普拉(Nampula)分区主要由角闪岩相正、副片麻岩及赋含稀有元素的伟晶岩组成,北部玛鲁帕(Marrupa)单元主要由混合岩化片麻岩和麻粒岩组成,二者被卢里奥(Lurio)带分开(图 5)。

研究区出露地层相对简单,主要为赞比亚(Zambezia)群基底岩石和莫罗奎(Molocue)群变质碎屑岩盖层。前者由马马拉(Mamala)组一套黑云片麻岩、片岩及角闪岩和莫库巴(Mocuba)杂岩组成;后者由里约尼波迪(Rio Nipodi)组中细粒条带状莫拉杂岩夹辉石岩、角闪片麻岩和中细粒浅色副片麻岩组成。

研究区花岗质岩石普遍发育,主要由穆鲁普拉(Murrupula)中细粒等粒花岗岩和马来马(Malema)石英二长花岗岩组成。穆鲁普拉中细粒等粒花岗岩以高 K_2O 、大离子石元素(LILE, Rb、Ba、Th、K 和 La)和高场强元素(HFSE, Nd、Zr、Hf、Y 和 Eu),低 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 MnO 、 P_2O_5 和过渡金属元素(Co、Cu、Ni、V、Cr 和 Zn)含量为特征, I_s 初始值较高^[19],为富钾长石(黑云母)的表壳岩低程度部分熔融形成,其成岩时代集中于 521~495 Ma 之间。马来马石英二长花岗岩以高 ΣREE 、 $TFeO/MgO$ 为特征,属 A 型花岗岩。伟晶岩在该区可分为 3 个成岩期,弱—中度变形伟晶岩成岩时代集中于 500~530 Ma,主要由石英-长石±黑云母±石榴子石脉组成,该类伟晶岩分布面积有限;泛非后期伟晶岩规模较大,与稀有元素矿床成矿关系密切,成岩时代集中于 470~490 Ma 和 440~450 Ma^[13]。

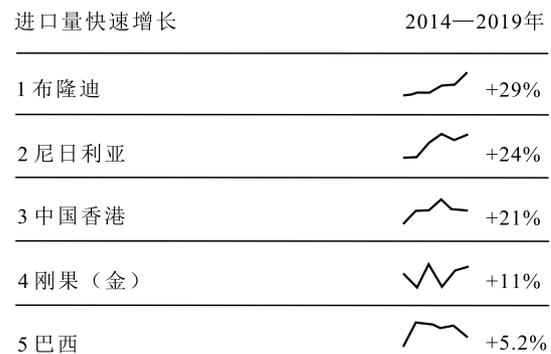


图 4 2014—2019 年中国钽-铌进口量大幅增长国家(地区)
(数据据参考文献①)

Fig. 4 Ta-Nb import increased significantly in 2014—2019, China

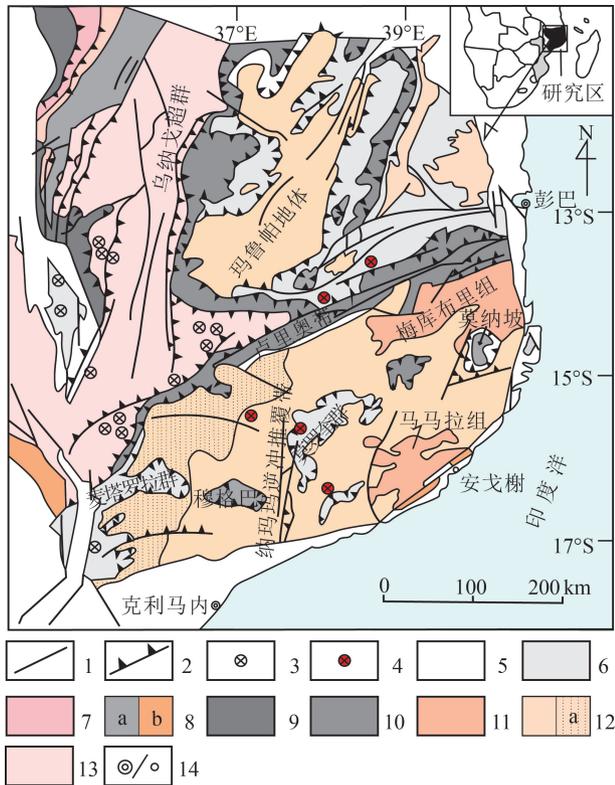


图5 上利戈尼亚区域地质简图(据参考文献[18]修改)

Fig. 5 The simplified geology of the Alto Ligonha

1—断裂;2—逆冲断层;3—中生代碱性侵入岩;4—泛非期花岗岩;5—第四系沉积物;6—智利(Chiure)超群(麦塔罗拉(Metalola)和莫罗奎群);7—加坦根(Katanguan)群;8—卡鲁(Karoo)超群(a—沉积物,b—火山岩);9—梅坦古拉(Metangula)超群;10—卢里奥超群(穆格巴和莫纳坡群);11—马马拉/卡瓦罗和梅库布里(Mecuburi)组;12—楠普拉超群(花岗岩类和莫库巴杂岩);13—乌纳戈(Unango)超群;14—城市

研究区构造作用强烈,主要构造单元包括卢里奥带、纳玛玛(Namama)逆冲推覆带、穆格巴(Mugeba)飞来峰和莫纳坡(Monapo)飞来峰,其中卢里奥带和纳玛玛逆冲推覆带形成时代为650~460 Ma^[13]。前者西起马拉维南部,东至印度洋,走向NE,延伸超过400 km,主要由中元古代高级正片麻岩和副片麻岩组成,剪切变形强烈,其内线理倾向SW,倾角较缓,与该带的走向近于平行。后者南起莫库贝拉(Mocubela),北至印度洋,走向NNE—NE,延伸超过170 km。该带位于卢里奥带前陆,属于卢里奥带的次级分支并具有轻微向N俯冲的趋势,主要由一系列基底和逆冲盖层组成,内部岩石褶皱强烈,矿物线理拉伸方向显示出了顶部E—SE

向运移趋势。纳玛玛逆冲推覆带可将研究区局部地区分为东、西2段,分别对应上、下2盘,东段主要由莫罗奎群、马马拉组和卡瓦罗(Cavaro)组盖层组成,西段主要由基底岩石和穆格巴飞来峰组成^[13]。

穆格巴飞来峰和莫纳坡飞来峰通常被认为是卢里奥带推覆体的麻粒岩残留。这些飞来峰上部主要由麻粒岩序列组成,与卢里奥带岩石组成相似。其中,穆格巴飞来峰麻粒岩中变质锆石获得的变质时代与卢里奥带相同,进一步证实该飞来峰来源于卢里奥带。

上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带呈NNE—NE向展布,由5个成矿亚带组成:莫库贝拉-上利戈尼亚钽-铌-铍-锂稀有元素成矿亚带、莫库巴-穆格巴-蒙希巴(Munhiba)钽-铌-稀土-铀稀有元素成矿亚带、埃莱古(Errego)-里鲍伊(Ribaue)钽-铍-稀土稀有元素成矿亚带、纳坡萨(Nampossa)-莫里库(Mricue)钽-铍-铌-铍稀有元素成矿亚带和纳马里坡(Namarripo)-纳米沃(Namivo)钽-铌-铍-锂稀有元素成矿亚带,是莫桑比克钽-铌稀有元素矿床集中分布区。其他地区钽、铌矿床产出有限,以小型、矿点为主。由于地质工作程度较低,到目前为止,该带发现大型钽-铌矿床3处、中型9处、小型8处、矿(化)点129处,所有矿床(点)类型均为伟晶岩型,探获钽铁矿矿石量为7.5 Mt^[9,12],其中莫拉、马罗比诺和穆伊安3个超大型矿床资源储量占总储量的91.09%^[20]。

2 上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带成矿规律

2.1 成矿时间规律

上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带位于东非中—新元古代莫桑比克造山带上,元古宙—古生代,泛非期造山运动为该区稀有元素成矿提供了丰富的成矿物质和动力学机制。成矿带内伟晶岩主要为泛非作用晚期岩浆结晶分异的产物,成岩时代可划分为2个期次:490~470 Ma和450~440 Ma^[8,13,21-22]。钽-铌稀有元素矿床的类型均为伟晶岩型,成矿时代与成岩时代相同,主要集中于440~450 Ma和470~480 Ma。其中,穆伊安钽-铌矿床钽铁矿 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果为451.9±7.4 Ma,钽铁矿 TIMS U-Pb 测年结果为440.5±0.5 Ma^[23-24];莫拉钽-铌矿床钽铁矿 TIMS U-Pb 测年

结果为 479.7 ± 2.3 Ma、 480.0 ± 2 Ma^[23-24]; 马罗比诺钽-铌矿床单颗粒钽铁矿 TIMS U-Pb 测年结果为 473.8 ± 3.4 Ma、 472.9 ± 2.5 Ma, 多颗粒钽铁矿 TIMS U-Pb 测年结果为 465.1 ± 1.9 Ma, 钽铁矿 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果为 446.6 ± 4.4 Ma^[23-24]。

2.2 伟晶岩控矿规律

上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带由 5 条成矿亚带组成(图 6), 走向 NNE-NE, 从莫库贝拉向北延伸到上利戈尼亚地区, 稀有元素矿床类型均为伟晶岩型。成矿带内伟晶岩可细分为 5 个伟晶岩区, 12 个伟晶岩田, 46 个伟晶岩群, 超过 100 个伟晶岩矿化区。这些伟晶岩主要形成于低压(2~4 kbar)、角闪岩相-绿片岩相变质环境, 成岩温度介于 500~650℃之间^[26-27]。根据伟晶岩结构、构造、含矿性等特征, 可划分为均质伟晶岩、钠质伟晶岩、钾质伟晶岩。其中, 均质伟晶岩矿物学简单, 呈脉状、透镜状

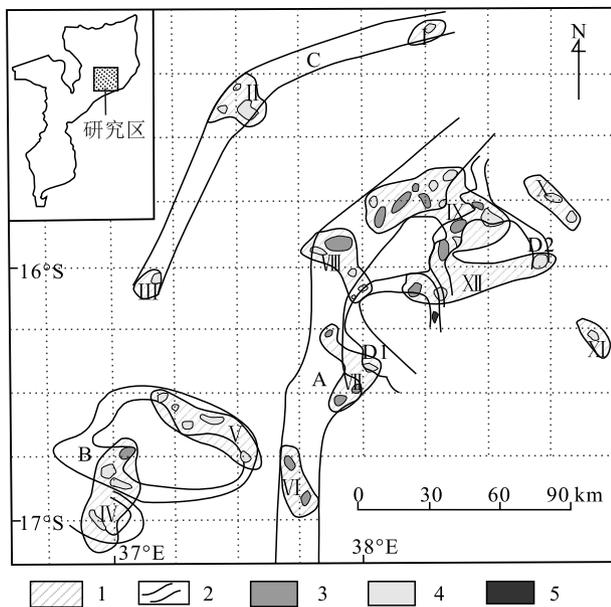


图 6 上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带伟晶岩分布图(据参考文献[25]修改)

Fig. 6 The distribution of pegmatites in the Alto Ligonha Ta-Nb rare element metallogenic belt

1—伟晶岩田; 2—伟晶岩区; 3—钠质伟晶岩群; 4—钾质伟晶岩群; 5—含绿柱石伟晶岩群。伟晶岩区: A—莫库贝拉-上利戈尼亚伟晶岩区; B—莫库巴-穆格巴-蒙希巴伟晶岩区; C—埃莱古-里鲍伊伟晶岩区; D1—纳坡萨-莫里库伟晶岩区; D2—纳马里坡-纳米沃伟晶岩区; 伟晶岩田: I—里鲍伊; II—纳韦拉; III—埃莱古; IV—莫库巴; V—穆格巴; VI—莫库贝拉; VII—梅莱拉(Melela); VIII—上莫罗奎; IX—上利戈尼亚; X—穆鲁普拉; XI—纳布里(Naburi); XII—吉莱(Gile)

产出, 矿化不发育^[4-5]。钽-铌矿物主要产于分馏程度较高的钠质伟晶岩中, 此类伟晶岩分带性良好, 钠长石带发育, 属于 LCT(锂-铯-钽)型伟晶岩, 为绿柱石、细晶石、电气石、锂云母、锂辉石的赋矿岩体, 研究区已发现的具有成矿规模的稀有元素矿床均赋存于 LCT 型伟晶岩中。钾质伟晶岩无钠长石带, 内部分带较弱, 分馏程度较低, 属于 NYF(铌-钇-氟)型伟晶岩, 为铀、钍和含稀土矿物的成矿母岩, 但在成矿带内, 铀、稀土矿床(点)不发育。

已有资料表明^[3], 钠质伟晶岩分带不完全相同, 有些区域不存在或发育不良或分带不连续。一般情况下, 分带不同, 成矿特征也不同。伟晶岩矿物分带由外向内依次为围岩接触带—均质带—细白云母带—长石带—锂化带—石英—白云母带—中心石英核区(图 7)。其中, 钽钽矿、绿柱石、黑稀金矿、钷钷矿、细晶石等矿物主要产于长石带中, 是钽钽矿的主要产出地带; 锂云母、锂辉石、锂磷铝石、铯榴石、绿柱石、碧玺、托帕石主要产于锂化带中; 石英核区主要产出芙蓉石、碧玺等宝石^[11, 28]。研究区伟晶岩风化作用强烈, 高岭土化蚀变严重, 导致野外伟晶岩识别和勘探困难。许多伟晶岩中的长石和锂辉石蚀变为高岭土^[2, 9], 受氧化铁的浸染, 其颜色变为红棕色, 成为该区明显的找矿标志。

2.3 构造控矿规律

上利戈尼亚地区自中元古代以来, 先后经历了基巴拉造山运动和泛非造山运动, 形成多期次岩浆活动和构造形变。尤其是泛非期造山运动形成的纳玛玛逆冲推覆带和穆格巴飞来峰环状构造, 为该

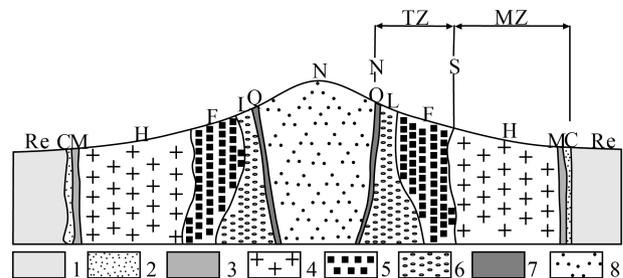


图 7 上利戈尼亚地区伟晶岩分带模式图(据参考文献[3]修改)

Fig. 7 Idealised cross section of the pegmatites within the Alto Ligonha area
1—Re(围岩); 2—C(接触带); 3—M(叶片状云母带); 4—H(均质带); 5—F(块状长石带); 6—L(钠长石带); 7—Q(石英-云母带); 8—N(石英核); TZ—转化区; MZ—边缘区

区成矿提供了充足的导矿通道和容矿空间。其中,纳玛玛逆冲推覆带横穿楠普拉分区中部,是上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带主要的控矿构造(图8),已发现的伟晶岩群主要分布于逆冲推覆带内。钽-铌稀有元素矿床严格受断裂控制,总体走向 NE—NNE 向,与推覆带走向一致。矿体呈脉状、带状、透镜状、板状,赋存于 LCT 型伟晶岩体中,延伸较稳定。其中,主断裂与次级断裂的交会部位,断裂构造倾角转折部位是成矿的有利地段。

穆格巴飞来峰位于纳玛玛逆冲推覆带南西侧,该卵形构造包含多种岩石类型,以浅色紫苏麻粒岩、片麻岩为主,其次为含石榴子石镁铁质麻粒岩

和高级沉积变质岩,被认为是卢里奥带的残留物^[8, 29-31]。根据 Sacchi 等^[29]报道,该构造边缘由具有明显 EW 向伸展线理的变晶糜棱质片麻岩和镁铁-超镁铁质片麻岩组成,SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 591 ± 4 Ma^[32]。受泛非期造山事件影响,该飞来峰边缘 EW、NW 向构造发育,与岩石线理方向一致。伟晶岩群出露于飞来峰边缘环状区南、北两侧 EW、NW 向展布的断裂带内,钽-铌稀有元素矿床均分布于伟晶岩群中,受断裂控制作用明显。该区矿床规模较小,以中小型及矿点为主,矿体呈囊状、板状、透镜状分布于断裂带内,北侧矿体倾向 S、SW,南侧矿体倾向 N、NW,深部延续性不明。

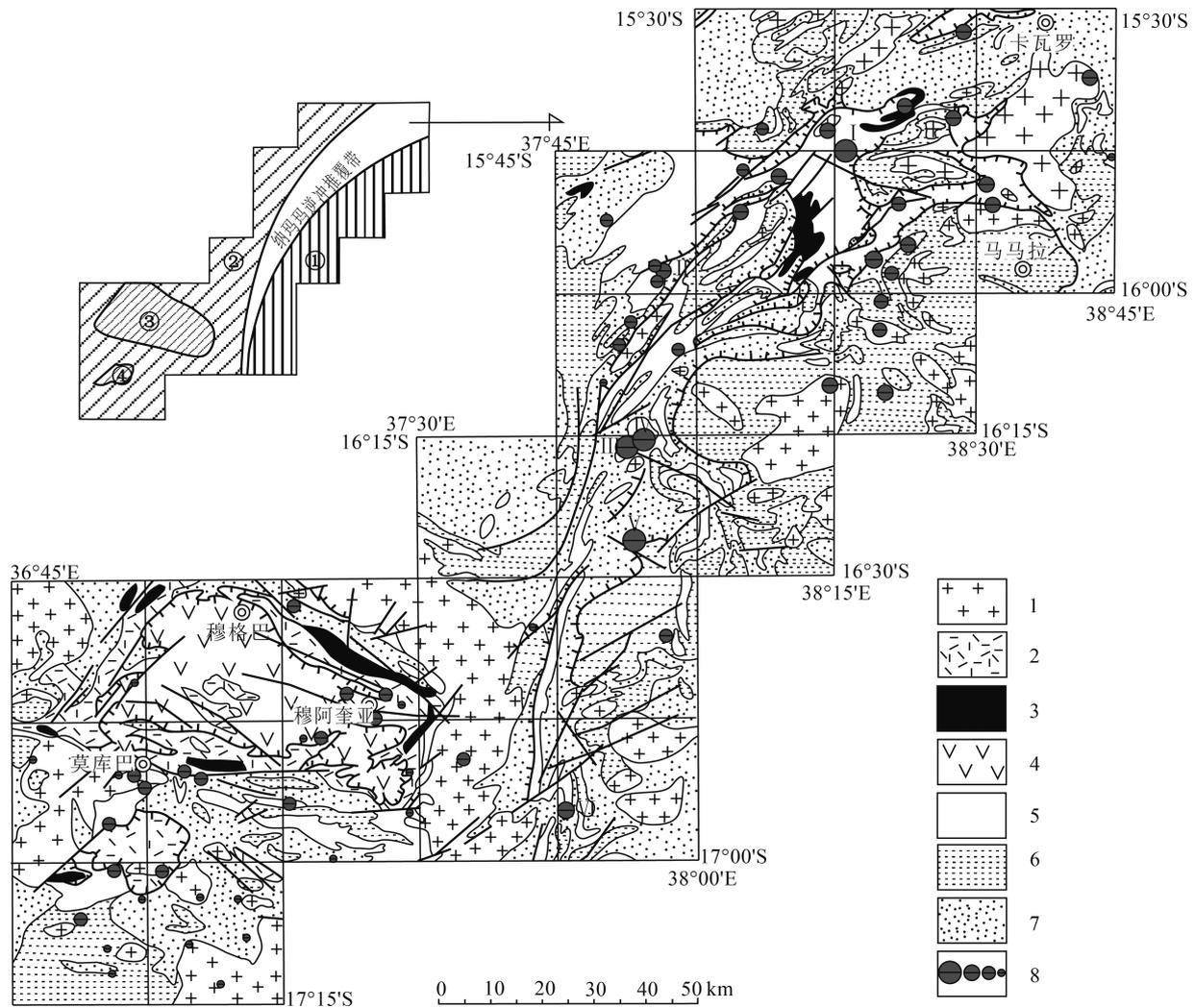


图8 上利戈尼亚成矿带构造略图(据参考文献[29]修改)

Fig. 8 The tectonic sketch map of Alto Ligonha metallogenic belt

- 1—花岗岩类;2—糜棱岩;3—超基性岩;4—麻粒岩;5—莫罗奎群盖层;6—马马拉和卡瓦罗盖层;
7—基底岩石;8—钽铌矿床;①—纳玛玛带前陆;②—内陆;③—穆格巴飞来峰;④—桑托斯飞来峰

2.4 成矿元素组合及空间分布规律

上利戈尼亚稀有元素成矿带钽-铌矿化也具有一定的规律性。从马罗比诺矿区、莫拉矿区、穆伊安矿区、穆塔拉矿区等均可以看出,矿床 SE→NW 向或 SEE→NWW 向稀有金属矿化组合由单一逐渐演化为复杂:绿柱石→绿柱石+钽铁矿(铌铁矿)→绿柱石+钽钽矿+锂云母→绿柱石+钽钽矿+锂云母+锂辉石+铯榴石;成矿元素种类由单一向综合方向演化:Be→Be+(Ta, Nb)→Be+(Ta, Nb)+Li→Be+(Ta, Nb)+Li+Cs。同时,矿集区自矿化体→矿体,云母也呈规律性变化:黑云母→二云母→白云母,说明岩浆分异程度在不断增高。

从已发现矿体的空间产状看,多呈脉状、透镜状、带状产出,说明伟晶岩矿体下部可能存在含矿碱性花岗岩,在该区矿产勘查中应重视此类岩体或锡石的找寻。

3 典型矿床解剖

3.1 莫拉矿床

莫拉钽-铌矿床位于上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带中部,梅莱拉河东岸,莫拉山北西约 5 km 处,地理坐标为南纬 16°16'13"、东经 37°51'56"。矿床有公路直通,与上莫罗奎,吉莱和穆勒瓦拉(Mulevala)市相连,南距马罗比诺钽铌矿床约 40 km。

莫拉钽铌矿床为露天矿床,剥采比为 0.7。在

20 世纪 50 年代末以前,该矿床是世界屈指可数的钽精矿供应地。1963 年以前,该矿床未做过系统的地质调查工作,仅在 1963—1964 年开展过钻探工作,1979—1983 年进行了详查,1995—1996 年进行了补充勘查工作。

莫拉钽-铌矿床为伟晶岩型稀有元素矿床,围岩主要为莫拉组角闪片岩、黑云角闪斜长片麻岩夹绿泥阳起片岩及条带状铁建造。出露的伟晶岩可划分为 5 种类型^⑥:微斜长石型、钠长石-微斜长石-锂辉石(5%~10%)型、含 5%~15% 锂辉石、5% 锂云母和局部含铯榴石的微斜长石钠长石型、含铯榴石锂辉石-钠长石型和伟晶岩脉中发育不完全的钠长石型(很少含锂辉石和锂云母)。其中,含 5%~15% 锂辉石、5% 锂云母和局部含铯榴石的微斜长石钠长石型伟晶岩中钽和锂的矿化程度最好、分馏程度最高,是主要的赋矿伟晶岩。该类型伟晶岩分带良好,矿石矿物锂云母、锂辉石、钽钽铁矿、钽铁矿、绿柱石、锂磷铝石等主要产于钠长石带中。不含钠长石带的微斜长石型伟晶岩分馏程度最低,钽铌含量在各类型伟晶岩中含量也最少。一些地表独立的伟晶岩可能在深部相连,因此,矿化不甚发育的微斜长石型伟晶岩深部也存在矿化现象^⑥。

莫拉钽-铌矿床由莫拉基岩矿和梅莱拉河砂矿两部分组成,前者由 6 个近似平卧、缓倾、垂直深度较浅的伟晶岩体(图 9、图 10)组成,其中矿区北部

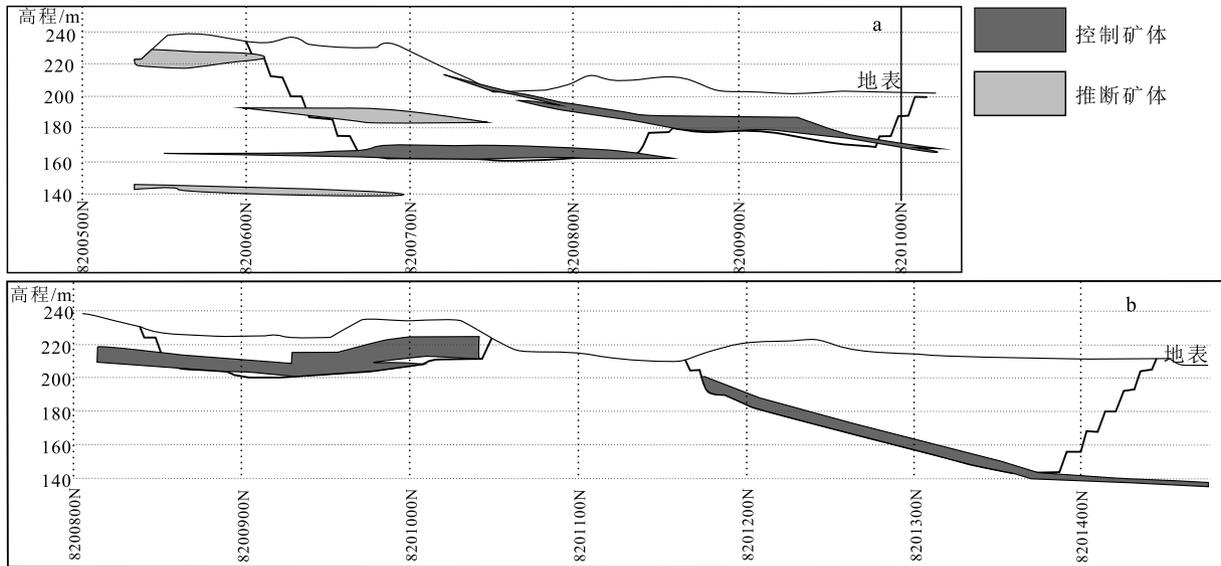


图 9 莫拉钽-铌矿床 SN 向矿体横切图(据参考文献[18]修改)
Fig. 9 Cross sections from north to south of Morrua Ta-Nb deposit

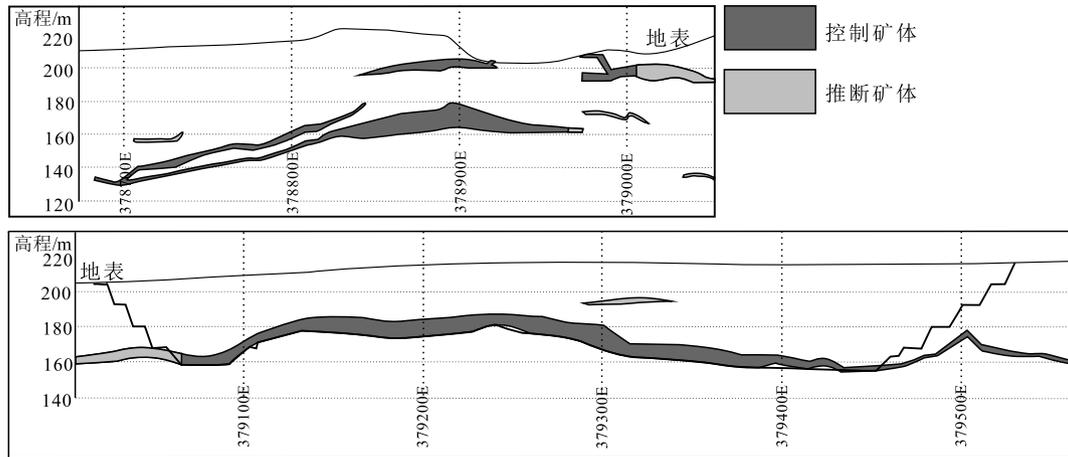


图 10 莫拉钽-铌矿床 EW 向矿体横切图(据参考文献[18]修改)

Fig. 10 Cross sections from east to west of Morrua Ta-Nb deposit

I、II号伟晶岩中已探明钽-铌储量占总储量的60%以上^{[18]⑦⑧}。出露的伟晶岩呈囊状、巢状、蜂窝状,总体长超过1000 m,宽800 m,矿床开采深度约100 m,主要由13条纺锤状矿体组成,走向NNE—NE,近水平状产出,局部最大倾角15°~20°,主要含钽矿物为钽铁矿、锰钽铁矿和细晶石,矿石量为3570 kt, Ta₂O₅、Nb₂O₅品位分别为804 g/t和99 g/t。围岩主要为莫拉组角闪片岩、黑云角闪斜长片麻岩夹绿泥阳起片岩^[12]。梅莱拉河砂矿矿石量119.60 kt, Ta₂O₅、Nb₂O₅品位分别为668 g/t和91 g/t。2处合计3668 t Ta₂O₅和462 t Nb₂O₅。该矿床成矿时代为480±2 Ma^[23-24, 33]。

3.2 马罗比诺矿床

马罗比诺钽-铌矿床位于上利戈尼亚钽铌稀有元素成矿带南段,莫拉矿床以南40 km的纳马卡拉(Namacra)河附近(梅莱拉河流的支流),从莫拉到佩班尼(Pebane)的公路经过该矿床,交通便利。1982—1984年,莱因霍尔德(Reinhold)在该区开展了一系列的地质工作,完成了1:10000地质图编制,在马罗比诺-梅莱拉地区先后发现了67处伟晶岩,并划分为3种类型:微斜长石型、钠长石-微斜长石型和锂辉石-微斜长石-钠长石型。其中,微斜长石型伟晶岩分带程度较弱,是矿区主要产出的类型,其核心带含块状、棱柱状绿柱石;钠长石-微斜长石型伟晶岩分带明显,钠长石化程度较弱,呈透镜体状产出,倾角较缓;锂辉石-微斜长石-钠长石型伟晶岩是马罗比诺钽-铌矿床主要的赋矿伟晶岩。

矿区出露的伟晶岩赋存于莫拉组角闪石岩和绿泥片岩中,长大于1000 m,宽80 m,走向NEE,倾向SE,倾角20°~35°,由一个主体和一个NE向延伸的楔形围岩分开的2个分支组成,与围岩接触关系截然。与主体相比,分支伟晶岩分异程度较弱,矿化程度较低,迄今为止只有主体区被开采。主体伟晶岩长550 m,露头宽250 m,厚约5 m,深部延展超过200 m,倾向SE,倾角20°。从矿区勘探线剖面简图(图11)可以看出,矿体南缘的伟晶岩最大厚度达60 m,并向东逐渐减薄。

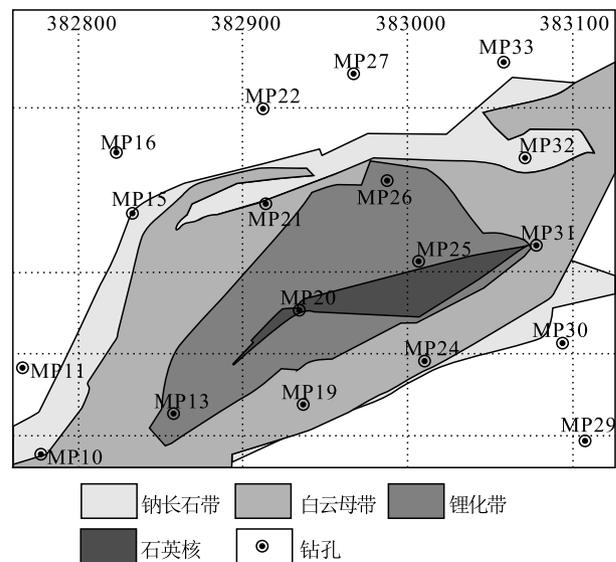


图 11 马罗比诺钽-铌矿床矿体平面略图

(据参考文献[18]修改)

Fig. 11 Plan sketch map of orebodies in the Marropino Ta-Nb deposit

含矿伟晶岩分带性良好,自内向外可分为 12 条带:中心石英核-锂化带夹粗粒钠长石-中粗粒钠长石带夹白云母-锂辉石-石英-白云母带-中细粒均质糖粒状钠长石带夹白云母-锂云母云英岩带-金云母云英岩带-中粗粒钠长石-微斜长石带夹白云母-中巨粒微斜长石伟晶岩带-中粗粒花岗质伟晶岩带-混合岩化花岗质片麻岩-中粒正长花岗岩、二长花岗岩。勘探线剖面简图(图 12)中,伟晶岩划分为 4 个带:外部为石英/钠长石带,中部为石英/钠长石/白云母,内部为石英/钠长石/锂云母带,中心为石英核区。矿体赋存于该主体伟晶岩锂化带中,主要矿石矿物为钽(铌)铁矿、细晶石和锰钽矿,同时还伴生有辉钼矿。

矿区内高岭土化蚀变发育,蚀变深度约 180 m,以往钽-铌矿开采主要集中于高岭土化蚀变区,近年才开始对原生伟晶岩矿区进行开采活动,其中,前者矿石量为 7360 kt, Ta_2O_5 、 Nb_2O_5 品位分别为 240 g/t 和 118 g/t;后者矿石量为 14420 kt, Ta_2O_5 和 Nb_2O_5 品位分别为 273 g/t 和 104 g/t,合计 Ta_2O_5 、 Nb_2O_5 储量分别为 5542 t 和 2363 t。该矿床成矿时代为 465~481 Ma(TIMS)、 446.6 ± 4.4 Ma(LA-ICP-MS) [23-24, 33]。

3.3 穆伊安矿床

穆伊安钽铌矿床是上利戈尼亚稀有元素成矿带最古老的伟晶岩矿之一,该矿床位于成矿带北段,上利戈尼亚市北约 45 km,穆伊安-楠普拉、穆伊安-吉莱、穆伊安-上莫罗奎等公路经过矿区附近。

区内出露的伟晶岩呈板状、透镜状产出于莫拉组角闪岩和绿泥石片岩中,长约 1200 m,宽约 100 m,走向 NE,倾向 SE,倾角 $20^\circ \sim 25^\circ$,形成一座高约 115 m 的低山 [12, 25],岩石地表风化严重,高岭土化蚀变发育,风化层厚达 30~50 m。伟晶岩内部分带明显,局部被高岭土所掩盖。其中,中心带的石英核剥蚀殆尽。

厚达 23 m 的锂化带由 3 个亚带组成,分别为块状锂云母-锂霞石-透锂长石,石英-锂辉石(蚀变)和放射状锂云母-叶钠长石-锂辉石。该带含有大量稀有金属矿化,包括铌钽矿、微晶石和少量锰钽矿、铋钽矿。与该带密切相关的还有铯榴石 [34]。厚达 53 m 的内部带由块状长石带、石英-云母带组成。该带的长石广泛蚀变为白色高岭土。稀有金属矿化以钽铌矿形式存在。厚达 13 m 的外部带由石英-微斜长石-钠长石-白云母-电气石±黑云母组成,长石中等蚀变为高岭土。边界带由于其零星发育和出露程度低,特征不明显。

主矿体赋存于伟晶岩中,长约 1000 m,倾向 SE,倾角 $20^\circ \sim 45^\circ$,主要矿石矿物为铌铁矿、细晶石和锂辉石等。该矿床分为风化伟晶岩和原生伟晶岩:风化伟晶岩矿石量为 6657 kt, Ta_2O_5 和 Nb_2O_5 金属氧化物量分别为 1045 t 和 1046 t;原生矿石量为 7041 kt, Ta_2O_5 和 Nb_2O_5 金属氧化物量分别为 272 t 和 856 t,合计 Ta_2O_5 和 Nb_2O_5 金属氧化物量分别为 1317 t 和 1900 t [25]。

该矿床成矿时代为 440.5 ± 0.5 Ma(TIMS 法)、

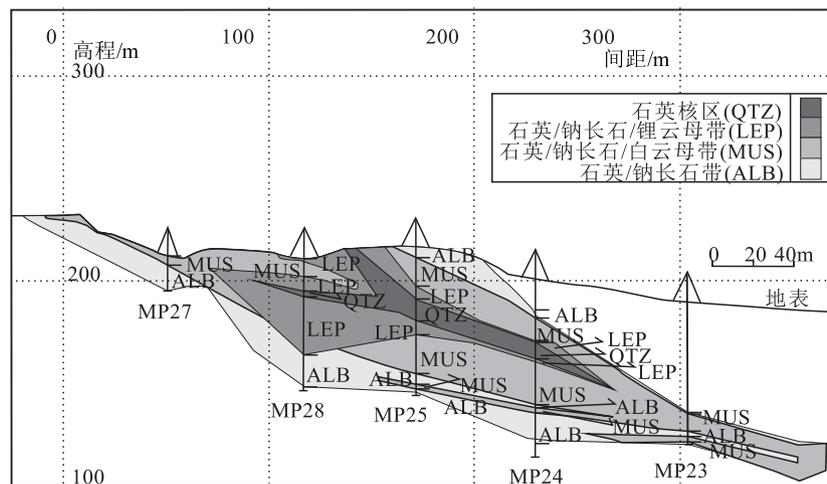


图 12 马罗比诺钽-铌矿床勘探线剖面简图(据参考文献[18]修改)

Fig. 12 Prospecting line profile sketch map in the Marropino Ta-Nb deposit

451.9±7.4 Ma(LA-ICP-MS法)^[23-24, 33]。

4 资源潜力分析

4.1 成矿远景区筛选

本次在莫桑比克-坦桑尼亚钽铌资源调查项目成果的基础上,综合利用莫桑比克成矿地质背景、矿产地质特征、区域成矿地质条件、航磁测量和航放测量成果及相关文献资料,以典型矿床深入剖析为基础,以伟晶岩型为主攻成矿类型,以泛非晚期花岗岩、LCT型伟晶岩、纳玛玛逆冲推覆带或穆格巴飞来峰南、北两侧边缘EW向、NW向断裂带三者叠加地段为条件,以低缓的正磁异常梯级带、高放射性K道异常梯级带为地球物理标志(本文略),以地表强高岭土化蚀变为找矿标志,从上利戈尼亚稀有元素成矿带筛选出11个成矿远景区(图13),其中重点远景区6处,一般远景区5处。

4.2 重点远景区及其潜力

根据上利戈尼亚稀有元素成矿带远景区资源潜力,进一步厘定出5个重点成矿远景区,其主攻矿种及资源潜力如下。

(1) 马罗比诺成矿远景区

该远景区位于马罗比诺大型钽-铌-锂-铯矿床南北两侧,上利戈尼亚稀有元素主成矿带中南段,主攻矿种为Ta、Nb、Li、Be,远景区已发现大型矿床1处,中型2处,小型4处,矿点1处。远景区赋矿围岩为莫拉组超镁铁质岩和片麻岩,梅莱拉伟晶岩

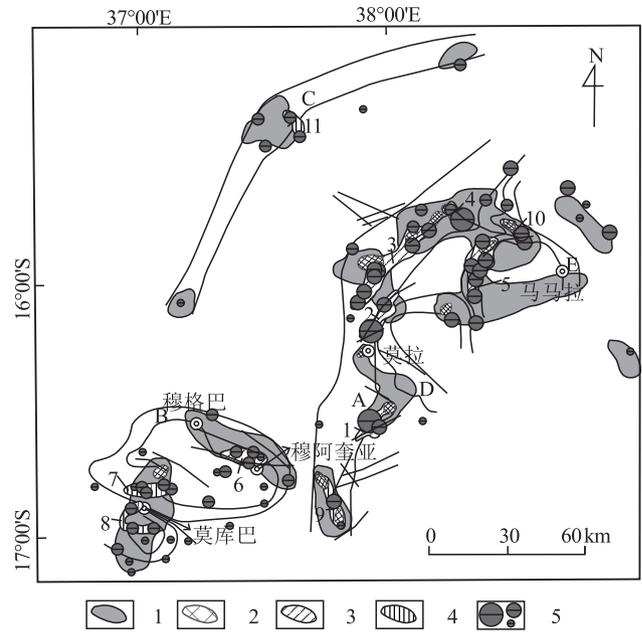


图13 上利戈尼亚稀有元素成矿带成矿远景区分布图

Fig. 13 Distribution map of metallogenic prospect areas in Alto Ligonha metallogenic belt

1—伟晶岩田;2—LCT型伟晶岩分布区;3—重点远景区;
4—一般远景区;5—钽-铌矿床

田呈楔形产出,2处钠质含矿伟晶岩在远景区伟晶岩田内呈NE向展布,马罗比诺稀有元素矿床即产于其中。区内NE向构造发育,在NW向次级断裂的交会部位,为含矿热液运输、富集、沉积成矿提供了运输通道及赋矿空间,矿体与构造产状相同,

表1 上利戈尼亚稀有元素成矿带成矿远景区

Table 1 List of metallogenic prospect areas of Alto Ligonha rare element metallogenic belt

序号	远景区名称	矿种	典型矿床	远景区级别
1	马罗比诺成矿远景区	Ta、Nb、Li、Be	马罗比诺	重点远景区
2	莫拉成矿远景区	Ta、Nb、Li、Be、Cs	莫拉	重点远景区
3	穆塔拉成矿远景区	Ta、Nb、Rb、Cs	穆塔拉、纳马切奇、 穆纳莫拉、蒙乃亚-A	重点远景区
4	穆伊安成矿远景区	Ta、Nb、Li、Cs	穆伊安、马贾马拉、穆哈诺	重点远景区
5	吉莱成矿远景区	Ta、Li、Be	纳希里、莫科恰亚、纳霍拉、梅拉潘	重点远景区
6	穆阿奎亚(Moaquiua)成矿远景区	Ta、Li、Be	莫坎加内、恩鲁马	重点远景区
7	莫库巴成矿远景区	Ta、Nb、Be	毛洛纳、库尼亚	一般远景区
8	莫库巴南成矿远景区	Ta、Nb、Be	伊加罗、比夫	一般远景区
9	莫库贝拉成矿远景区	Ta、Nb、Li、Cs	吉娜玛、伊奥多	一般远景区
10	卢鲁提(Luluti)西成矿远景区	Ta、Li、Be	皮提亚、纳希亚、米里丘	一般远景区
11	上莫罗奎东成矿远景区	Ta、Nb、Be	埃希亚洛、穆埃蒂亚、马拉帕、圭赫米	一般远景区

倾向 SE, 倾角平缓。远景区伟晶岩高岭土化蚀变发育, 受褐铁矿化浸染, 颜色变为红棕色, 找矿标志明显。

自 2010 年以来, 诺文塔 (Noventa) 矿业公司持续在该区开展工作, 在马罗比诺钽铌矿床进行探勘、开发, 2006 年以前该矿床累计开采 Ta_2O_5 80 t; 2011 年, 诺文塔矿业公司在该矿产出 Ta_2O_5 45 t^[35], 至今仍在开采, 已探明钽铌矿矿石储量 7400 kt, Ta_2O_5 品位为 223 g/t。而该矿床两侧仍有伟晶岩脉产出, 显示出了巨大的找矿潜力。

(2) 莫拉成矿远景区

该远景区位于莫拉大型钽-铌-锂-铯矿床北部, 上利戈尼亚稀有元素主成矿带中段, 主攻矿种为 Ta、Nb、Li、Be、Rb、Cs, 远景区已发现大型矿床 1 处, 小型矿床 9 处。远景区伟晶岩带沿纳玛玛逆冲断层展布, 长度超过 1 km, 宽 600 m, 厚超过 6 m, 含矿伟晶岩主要赋存于莫拉组角闪片岩和黑云角闪斜长片麻岩夹绿泥阳起片岩中^[12], 区内 NE 向构造控制已知矿床的产出方向, NNE 向次级断裂控制矿体的空间展布。1957—1979 年, 区内产出的莫拉大型钽铌矿床累计产出钽铁矿 1300 t, 细晶石 119 t^[13]。近年来, 该区开展钻探工程验证, 对伟晶岩带中的 6 个厚度超过 3 m 的含矿伟晶岩体累计评价出资源储量达 7800 kt, Ta_2O_5 品位为 463 g/t^[35], 资源潜力巨大。

(3) 穆塔拉成矿远景区

该远景区位于穆塔拉钽-铌-铯矿床东部, 上利戈尼亚稀有元素主成矿带中段, 主攻矿种为 Ta、Nb、Li、Be、Cs, 远景区已发现中型矿床 5 处, 小型矿床 3 处。远景区走向 NE, 与纳玛玛逆冲推覆构造带走向相同, 而该构造带控制稀有元素矿床的分布及矿体的空间展布, 是区内主要的控矿构造。远景区分布有 2 处伟晶岩田, 3 处钠质含矿伟晶岩在伟晶岩田内呈 NE 向产出, 厚度超过 50 m, 已发现的稀有元素矿床大部分产于该钠质伟晶岩中, 是上利戈尼亚稀有元素成矿带钽矿储量最大地区, 其中, 穆塔拉钽铌矿已探明资源储量达 1030 kt, 品位为 236 g/t, 显示出巨大的资源潜力, 找矿前景优越。

(4) 穆伊安成矿远景区

该远景区位于穆伊安大型钽-铌-锂-铯矿床两侧, 上利戈尼亚稀有元素主成矿带北段, 主攻矿种为 Ta、Nb、Li、Cs, 远景区已发现大型矿床 1 处, 小型

矿床 8 处。远景区位于上利戈尼亚伟晶岩田内, 大体可分为东、西两部分, 西部受 NE 向逆冲断层控制作用明显, 钠质含矿伟晶岩在断层带内呈板状、囊状、透镜状赋存于马马拉变质中基性火山岩、钙碱性长英质片麻岩中。东部远景区受面向 SE 的穹隆影响, 呈 NEE 向分布, 钠质伟晶岩分布于穹隆的顶部, 是穆伊安大型钽铌矿的主要含矿伟晶岩, 赋矿围岩主要为角闪片麻岩及其他基性片麻岩, 矿床探明资源储量 1400 kt, 品位 250 g/t。该区伟晶岩分布广泛, 资源潜力巨大, 是上利戈尼亚稀有元素成矿带取得找矿突破的重要地段。

(5) 吉莱成矿远景区

该远景区位于上利戈尼亚稀有元素主成矿带东侧, 主攻矿种为 Ta、Li、Be, 预测区已发现中型矿床 1 处, 小型矿床 5 处。远景区位于吉莱穹窿区顶部, 走向 NE, 受 NE 向、NNE 向构造控制, 区内伟晶岩均沿断裂方向分布, 2 处钠质含矿伟晶岩呈 NE 向、NNE 向出露于伟晶岩带的南、北两侧, 已知矿床大部分产于该伟晶岩中。长期受物理风化和化学风化作用的交替出现, 导致区内伟晶岩高岭土化、褐铁矿化蚀变强烈, 形成了明显的找矿标志。已发现的矿床具有连片好、埋藏浅、直接裸露地表、矿物组合简单等特征, 而伟晶岩带在区内广泛出露, 显示了较大的找矿潜力。

(6) 穆阿奎亚成矿远景区

该远景区位于穆格巴飞来峰北东侧, 主攻矿种为 Ta、Nb、Be, 远景区已发现中型矿床 1 处, 小型矿床 2 处, 矿点 4 处。远景区位于上利戈尼亚稀有元素成矿带西侧的穆格巴飞来峰外围, 该飞来峰主要由新元古代晚期各种高级片麻岩组成, 并被碱性超镁铁质、镁铁质和长英质深成岩侵入, 外围被糜棱化片麻岩包围, 泛非期花岗岩类和伟晶岩所侵入其中。受 NW 向、NWW 向逆冲断层影响, 伟晶岩带产状与构造带方向相同, 已发现矿床、矿点均产于伟晶岩带当中。远景区伟晶岩广泛出露, 成矿地质条件优越, 具有良好的找矿潜力。

5 结 论

(1) 莫桑比克上利戈尼亚成矿带钽-铌稀有元素矿床成矿类型均为伟晶岩型, 成矿时代主要集中于 440~450 Ma 和 470~480 Ma。

(2) 上利戈尼亚成矿带伟晶岩可划分为 12 个

伟晶岩田,46个伟晶岩群,超过100个伟晶岩矿化区,与成矿关系密切的LCT型伟晶岩矿物分带性明显,其中Ta、Nb等成矿元素主要赋存于长石带和锂化带中。

(3)矿床的产出受纳玛玛逆冲推覆带、穆格巴飞来峰控制作用明显,矿体产于纳玛玛逆冲推覆带和穆格巴飞来峰边缘环状区南、北两侧的EW向、NW向断裂带内的LCT型伟晶岩中。各矿区SE→NW向或SEE→NWW向稀有金属矿化组合具有由简单向复杂,成矿元素种类由单一向综合方向演化的趋势。

(4)上利戈尼亚稀有元素成矿带筛选出11个成矿远景区,其中重点远景区6处,一般远景区5处。

致谢:本文完成过程中得到中国地质调查局天津地质调查中心吴兴源、周佐民高级工程师的指导;卢宜冠、张航等博士给予了诸多帮助并进行了有益探讨,审稿专家给论文提出了许多宝贵意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Chad A. Friedline [C]//U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries, 2022: 648-703.
- [2] Hutchinson R W, Claus R J. Pegmatite deposits, Alto Ligonha, Portuguese East Africa[J]. Economic Geology, 1956, 51(8): 757-780.
- [3] Barros R M, Vicente C A M. Estudo dos campos pegmatíticos da Zambézia relatório da missão de estudos em Mozambique campanha de 1963[M]. Junta de Energia Nuclear, 1963: 1-133.
- [4] Correia Neves J M, Lopes Nunes J E, Lucas D B. Mineralogy and geochemistry of pegmatites from Mozambique [J]. Rev. Ciênc. Geológicas, Lourenço Marques, 1971, 4: 1-11.
- [5] Correia Neves J M, Lopes Nunes J E, Lucas D B. Mineralogy and structure of some pegmatites from Mozambique (P.E.A.). Rev. Ciênc. Geológicas [J]. Lourenço Marques, 1971, 4: 34-42.
- [6] Kondratiev A. Esboço geológico area de Morrui [M]. Direcção Nacional de Geologia Moçambique, 1982: 1-45
- [7] Kombinat V E B. Relatório Final Projecto Pematito Marropino [C]// Geologische Forshung and Erkundig. Geological Survey of German Democratic Republic, 1983: 102.
- [8] Aquater. Relatório final da cartografia geológica e prospecção mineira e geoquímica nas províncias de Nampula e Zambézia [M]. Cartografia Geológica, Instituto Nacional de Geologia, Maputo, 1983: 1-450.
- [9] Čílek V. Industrial Minerals of Mozambique [M]. National Geological Institute of Mozambique and Czech Geological Office, Prague, 1989: 1-326.
- [10] 吴兴源, 刘晓阳, 周佐民, 等. 卢旺达 Gatumba 地区花岗岩伟晶岩的地质、地球化学特征及其成因研究综述 [J]. 地质调查与研究, 2020, 43(1): 42-54.
- [11] Dias M B, Wilson W E. The Alto Ligonha pegmatites, Mozambique [J]. The Mineralogical Record, 2000, 31: 459-497.
- [12] Lächelt S. Geology and mineral resources of Mozambique [M]. Ministério dos Recursos Minerais e Energia, Direcção Nacional de Geologia, Maputo and Council for Geoscience, Pretoria. 2004: 1-515.
- [13] Cronwright M S. A Review of the Rare-element Pegmatites of the Alto Ligonha Pegmatite Province, Northern Mozambique and Exploration Guidelines [M]. Rhodes University, Grahamstown, South Africa, 2005.
- [14] 王西荣, 李绍侠, 王哲, 等. 莫桑比克穆塔拉地区铌钽矿地质特征及找矿方向的探讨 [J]. 资源环境与工程, 2016, 30(1): 55-59.
- [15] 徐涛, 王亮, 周强. 上利戈尼亚矿集区伟晶岩型矿床地质特征及成矿规律 [J]. 吉林地质, 2016, 35(2): 60-63.
- [16] 许康康, 刘晓阳, 孙凯, 等. 坦桑尼亚乌本迪带内花岗岩类的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. 地质调查与研究, 2020, 43(1): 55-62.
- [17] 许康康, 刘晓阳, 何胜飞, 等. 非洲中部基巴拉带的地质及构造演化特征 [J]. 地质论评, 2019, 65(4): 993-1006.
- [18] Donald H, Hains, Mark Mounde. Technical report on the Marropino project and associated properties, Zambézia Province, Mozambique [M]. Scott Wilson Roscoe Postle Associates Inc. Noventa Limited. 2010: 1-252.
- [19] Costa M, Ferrara G, Sacchi R, et al. Rb/Sr dating of the upper Proterozoic basement of Zambézia, Mozambique [J]. Geologische Rundschau, 1992, 81(2): 487-500.
- [20] 商俊伟. 莫桑比克钽铌资源概述 [J]. 中国金属通报, 2008, 18: 1-3.
- [21] Jamal D L, Zartman R E, De Wit M J. U-Pb single zircon dates from the Lúrio Belt, northern Mozambique: Kibaran and Pan-African orogenic events highlighted [J]. Journal of African Earth Sciences, 1999, 28: 32
- [22] Fernandez A, Schreurs G, Villa I M, et al. Age constraints on the tectonic evolution of the Itremo region in central Mozambique [J]. Precambrian Research, 2003, 123: 87-110.
- [23] Melcher F, Sitnikova M A, Graupner T, et al. Fingerprinting of conflict minerals: columbite-tantalite ("coltan") ores [J]. SGA News, 2008, 23: 1-14.
- [24] Melcher F, Graupner T, Sitnikova M, et al. Ein Herkunftsnachweis für Niob-Tantalminerale am Beispiel afrikanischer Selten-Element-Pegmatite. Mitt [J]. Österr. Mineral. Ges., 2009, 155: 231-267.
- [25] Macey P H, Ingram B A, Cronwright M S, et al. Notícia Explicativa/map explanation: folhas/sheets 1537, 1538, 1539, 1540, 1637, 1638 AND 1639-40 [M]. National Directorate of Geology, Republic of Mozambique, 2007: 1-458.
- [26] Černý Petr. Rare-element granitic pegmatites, part I—Regional to global environments and petrogenesis [J]. Geoscience Canada, 1991, 18(2): 49-67.
- [27] Černý Petr. Rare-element granitic pegmatites, part II—Regional to global environments and petrogenesis [J]. Geoscience Canada, 1991, 18(2): 68-81.

- [28] Von Knorring O, Condliffe E. Mineralized pegmatites in Africa [J]. *African Geology Reviews*, 1987, 22: 253-270.
- [29] Sacchi R, Marques J, Costa M, et al. Kibaran events in the southernmost Mozambique belt [J]. *Precambrian Research*, 1984, 25: 141-159.
- [30] Sacchi R, Cadoppi P, Costa M. Pan-African reactivation of the Lúrio segment of the Kibaran Belt system: a reappraisal from recent age determinations in northern Mozambique [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2000, 30(3): 629-639.
- [31] Pinna P, Jourde G, Calvez J Y, et al. The Mozambique Belt in northern Mozambique: Neoproterozoic (1100 - 850 Ma) crustal growth and tectogenesis, and superimposed Pan-African (800 - 550 Ma) tectonism [J]. *Precambrian Research*, 1993, 62: 1-59.
- [32] Kröner A, Sacchi R, Jaekel P, et al. Kibaran magmatism and Pan-African granulite metamorphism in northern Mozambique: single zircon ages and regional implications [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1997, 25(3): 467-484.
- [33] Melcher M, Graupner T, Henjes-Kunst F, et al. Analytical fingerprint of columbite-tantalite (coltan) mineralization in pegmatites: focus on Africa [C] // Proceedings, Ninth International Congress for Applied Mineralogy (ICAM) 2008, Brisbane, Qld. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2008: 615-624.
- [34] Teertstra D K, Cern P. The compositional evolution of pollucite from African granitic pegmatites [J]. *Journal of African Earth Science*, 1997, 25(2): 317-331.
- [35] Bernd Lehmann. Tantalum: Market Outlook to 2016 [J]. *Miner Deposita*, 2012, 47: 957-958.
- ① 英国皇家国际事务研究所. <https://resourcetrade.earth/?year=2020&importer=156&category=1521&units=weight&autozoom=1>. 2020.
- ② Jasper M J U. Geological Report of the Marropino Tantalum Pegmatite Mine, Zambezia Province, Mozambique. Technical Note No.10/1999, report prepared for Sub-Saharan Resources Ltd by Geology and Resources Development Business Unit, Fountainbleau, South Africa. 1999: 1-89.
- ③ Jasper M J U. The Marropino Tantalum Project, The Geological Component of the Validation of the Ore Resources and Ore Reserves. report prepared for Highland Africa Mining Company. 2002.
- ④ A&B Global Mining, Marropino Open Pit Optimisation and Life-of-Mine Production Schedule. prepared for Highland Africa Mining Company Limited, A&B Global Mining, Johannesburg, South Africa, 2010
- ⑤ Pedro A M A. The Alto Ligonha pegmatites. Mineral Exploration Guidelines. Thesis, Imperial College of Science and Technology, London, 1986: 1-190
- ⑥ Hunting. Gold deposits in Mozambique - Mineral Development Study. Internal report, Instituto Nacional de Geologica, Mozambique, 1985: 1-140.
- ⑦ SRK. Report on the Material properties of Highland Africa Mining Company Limited. prepared for Highland Africa Mining Company Limited and Investec banking, a division of Investec UK Limited; SRK Consulting(S.A.) (Pty) Limited, March, 2007.
- ⑧ SRK. Geology, Mining, Tailings Disposal and Environmental Inputs into the Morrua Tantalite Project Feasibility Study. Prepared for Highland Africa Mining Company by SRK Consulting(S.Africa), 2004.