

doi: 10.12029/gc20210607

姚春彦, 王天刚, 倪培, 姚仲友, 郭维民, 朱意萍, 王威. 2021. 铌钽矿床类型、特征与研究进展[J]. 中国地质, 48(6): 1748–1758.

Yao Chunyan, Wang Tiangang, Ni Pei, Yao Zhongyou, Guo Weimin, Zhu Yiping, Wang Wei. 2021. Metallogenic types, characteristics and research progress of Nb–Ta deposits[J]. *Geology in China*, 48(6): 1748–1758(in Chinese with English abstract).

铌钽矿床类型、特征与研究进展

姚春彦¹, 王天刚¹, 倪培², 姚仲友¹, 郭维民¹, 朱意萍¹, 王威³

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 3. 中国地质调查局郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450000)

摘要: 铌、钽矿产分布较广。内生铌钽矿成矿类型主要为伟晶岩型、稀有金属花岗岩型、碳酸岩型和碱性岩型; 外生矿床多为内生矿床经过风化和沉积等外生作用发生二次富集的风化壳型和残坡积、冲积砂矿型。从成矿时代来看, 伟晶岩型矿床成矿时代跨度较大, 从 3.08 Ga 到 0.19 Ga; 碱性岩型矿床主要成矿期分别在 2.25 ~ 1.35 Ga 和 0.75 ~ 0.19 Ga; 碳酸岩型矿床成矿期主要分布在 0.75 ~ 0.6 Ga 和 0.4 ~ 0.35 Ga; 花岗岩型主要分布在 0.75 ~ 0.19 Ga 的中晚期。碳酸岩型铌矿床和伟晶岩型钽矿床是目前勘探的主要目标。

关键词: 铌钽矿床; 成矿类型; 时空分布; 勘探目标; 矿产勘查工程

中图分类号: P618.79 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)06-1748-11

Metallogenic types, characteristics and research progress of Nb–Ta deposits

YAO Chunyan¹, WANG Tiangang¹, NI Pei², YAO Zhongyou¹,
GUO Weimin¹, ZHU Yiping¹, WANG Wei³

(1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China*; 2. *School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China*; 3. *Zhengzhou Institute of Comprehensive Utilization of Mineral Resources, China Geological Survey, Zhengzhou, 450000, Henan, China*)

Abstract: Niobium and tantalum resources are widely distributed in the world. Their endogenous metallogenic deposits are mainly hosted in pegmatite, rare-metal granite, carbonatite, and alkaline rocks. Their exogenous deposits are mostly the products of secondary enrichment through exogenous processes such as weathering and deposition from endogenous deposits. The metallogenic epoch of pegmatite-hosted deposits has a large span from 3.08 Ga to 0.19 Ga; alkaline rock-hosted deposits are at 2.25–1.35 Ga and 0.75–0.19 Ga respectively; carbonatite-hosted deposits are mainly in 0.75–0.6 Ga and 0.4–0.35 Ga; and granite-hosted deposits are mainly distributed in the middle and late stages of 0.75–0.19 Ga. At present, carbonatite-hosted niobium deposits and pegmatite-hosted tantalum deposits are the main exploration targets.

Key words: niobium and tantalum; metallogenic type; spatial and temporal distribution; exploration target; mineral exploration engineering

收稿日期: 2020-12-04; 改回日期: 2021-04-26

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20201155、DD20190441)资助。

作者简介: 姚春彦, 女, 1980 年生, 高级工程师, 从事矿产地质调查工作; E-mail: ycyan@126.com。

通讯作者: 王天刚, 男, 1983 年生, 高级工程师, 从事区域成矿规律研究; E-mail: wtiangang@mail.cgs.gov.cn。

About the first author: YAO Chunyan, female, born in 1980, senior engineer, doctor, engages in mineral resources and geochemical survey and study; E-mail: yecyan@126.com.

About the corresponding author: WANG Tiangan, male, born in 1983, senior engineer, engaged in the study of regional metallogenic law; E-mail: wtiangang@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey(No. DD20201155, No. DD20190441).

1 引言

铌和钽是过渡金属,由于物理化学性质相似,在自然界中常共、伴生产出。铌和钽不是天然的纯金属,而是赋存在各种相对稀有的氧化物和氢氧化物矿物以及少数稀有的硅酸盐矿物中。铌钽较好的耐高温、耐腐蚀、耐磨损性能等优点,使其在机械、能源、航空航天和医疗等高科技工业领域应用广泛(Schulz et al., 2017; 曹飞等, 2019)。本文重点介绍铌钽矿床的特征、成矿特点以及当前勘探现状及进展。

2 铌钽矿主要成矿类型

按成矿地质条件铌钽矿可分为内生矿床和外生矿床两大类:内生矿床包括稀有金属花岗岩型、含锂-铯-钽(LCT)伟晶岩型(钽成矿为主)、碱性岩型(Nb成矿为主)和碳酸岩型(Nb成矿为主)(Černý and Ercit, 2005)(表1)。外生矿床多为内生矿床经过风化和沉积等外生作用发生二次富集的风化壳

型和残坡积、冲积砂矿型(吴学敏等, 2016; 李健康等, 2019)。一般这种二次富集的铌钽矿的位置均靠近原岩,该类型矿床品位高,在钽铌生产中占有重要地位,目前开采的铌矿都以次生矿床和风化矿床为主。

2.1 碳酸岩型铌矿床

碳酸岩矿床以铌矿化为主,钽含量较低,是世界上大部分铌资源的来源(李健康等, 2019)。碳酸岩通常富含钡、氟、铌、磷、稀土元素、锶、钍、铀和锆。然而,并非所有的碳酸岩在所有元素上都显示出相似的富集。一般与碳氢热液流体(富含二氧化碳和氟的热液流体)有关的碳酸岩通常富含REE和锶,不含铌;而与碱性火成岩伴生的碳酸岩通常富含铌、磷和钽,但不含REE(Mitchell, 2005)。碳酸岩中最常见的含铌矿物包括烧绿石和钙钛矿组合,以及富含铌的硅酸盐,例如楣石。与碳酸岩相关的铌-稀土-(钽)矿床多形成于板块边缘或陆内的深大断裂带,显示了拉张的构造环境和成矿物质的深部来源(Wolley and Kjarsgaard, 2008; 李建康等,

表1 铌钽矿床类型划分(据 British Geological Survey, 2011)

Table 1 Classification of global Nb-Ta deposits(after British Geological Survey,2011)

成矿类型	成矿地质特征	典型矿床	开采情况
碳酸岩型矿床	以铌矿化为主,钽含量较低;矿床多形成于板块边缘或陆内的深大断裂带,显示了拉张的构造环境,铌矿通常赋存在与碳酸岩接触的钾长花岗岩带内	加拿大纽北克矿床和奥卡矿床,巴西阿拉莎矿床和卡塔劳矿床;俄罗斯套木托矿床;刚果共和国罗什矿床	以开采强风化带或沉积带为主;加拿大魁北克的纽北克铌矿床是世界上唯一一个开采原生铌矿床的矿山
伟晶岩型矿床	钽矿的重要成矿类型,矿化主要集中在伟晶岩的中间带和钠长石带内,围岩为花岗岩	澳大利亚格林布什矿床和沃吉纳矿床;加拿大钽科矿床;巴西伏达格兰德矿床;埃塞俄比亚肯迪查矿床	钽的开采主要集中在风化后伟晶岩经过次生富集后的地区
稀有金属花岗岩型矿床	发育在造山带主要构造变形和区域变质区,后期受到强烈的热液蚀变作用,发育复杂的石英脉状系统	埃及阿布达巴布矿床和努韦比;中国宜春414矿床	主要开采原生矿床
碱性岩型矿床	矿化的过碱性花岗岩中通常含有富铌的烧绿石和钶铁矿矿物,成矿与岩浆和热液有关	加拿大的怪湖矿床和沙特阿拉伯的古里雅矿床	由于铌品位较低,因此该类型矿床目前不是钽铌资源的主要来源

2019)。碳酸岩风化壳型铌矿床在铌资源中占有重要的地位,常产出高品位的铌。原生碳酸岩型铌矿床通常赋存在与碳酸岩接触的钾长花岗岩带内,如加拿大纽北克(Niobec)矿床和奥卡(Oka)矿床。加拿大魁北克地区的纽北克铌矿床是唯一一个地下开采的铌矿床。碳酸岩风化壳型铌矿床通常位于碳酸岩强风化带内,如巴西的阿拉莎(Araxá)矿床和卡塔劳(Catalao)矿床,俄罗斯套木托(Tomotor)矿床和刚果的罗什(Lueshe)矿床(British Geological Survey, 2011)。

2.2 伟晶岩型铌矿床

含锂-铯-钽(LCT)伟晶岩型矿床是钽矿的重要成矿类型。含LCT伟晶岩通常以粗粒结构,同心且不规则的带状构造产出,且富含锂、铷、铯、铍、钽和铌(一般钽含量高于铌)等矿物,是高度分馏和富挥发分花岗岩岩浆的产物(Černý, 1991; Černý and Ercit, 2005),它们通常来源于稀有金属花岗岩。LCT伟晶岩通常出现在环绕其母体花岗岩岩体顶部的光环中,而矿化和分馏程度最高的伟晶岩分布在最远处(图1)。一般,钽的矿化主要集中在伟晶岩的中间带和钠长石带内,矿石矿物主要由钶铁矿、钽铁矿、锰钽矿、细晶石和锡锰钽矿组成。LCT

伟晶岩型钽矿床广泛分布,多产于板块活动大陆边缘褶皱带的深大断裂中,成矿年龄为太古宙到中生代(Bradley and McCauley, 2013)。近年来,澳大利亚已成为钽矿床的主要供应国。位于西澳的格林布什(Greenbushes)伟晶岩型矿床自1888年来一直露天开采次生富集的钽和锡矿,最近转入地下开采,除了钽和锡外,还开采高岭土和锂(Kendall-Langley et al., 2020)。南美洲巴西米纳斯吉拉斯州的伏达格兰德(Volta Grand)伟晶岩型矿床含有丰富的锂-铌-钽资源;加拿大马尼托巴湖(Manitoba)东南部的钽科(Tanco)矿床是北美洲唯一产钽的伟晶岩型矿床(Bleiwas et al., 2015)。另外,非洲的埃塞俄比亚、莫桑比克、刚果(金)等也是重要的钽产地。总的来说,目前钽的开采主要集中在伟晶岩风化后经过次生富集的地区。

2.3 稀有金属花岗岩型铌矿床

相比于伟晶岩型矿床,稀有金属花岗岩型矿床中钽的储量较大,但是品位较低、矿物颗粒较细(李健康等, 2019)。稀有金属花岗岩通常是高铝质、富含白云母和钠长石,代表了长英质岩浆演化的最后阶段,发育在造山带主要构造变形和区域变质区,并受到强烈的热液蚀变作用,常发育复杂的

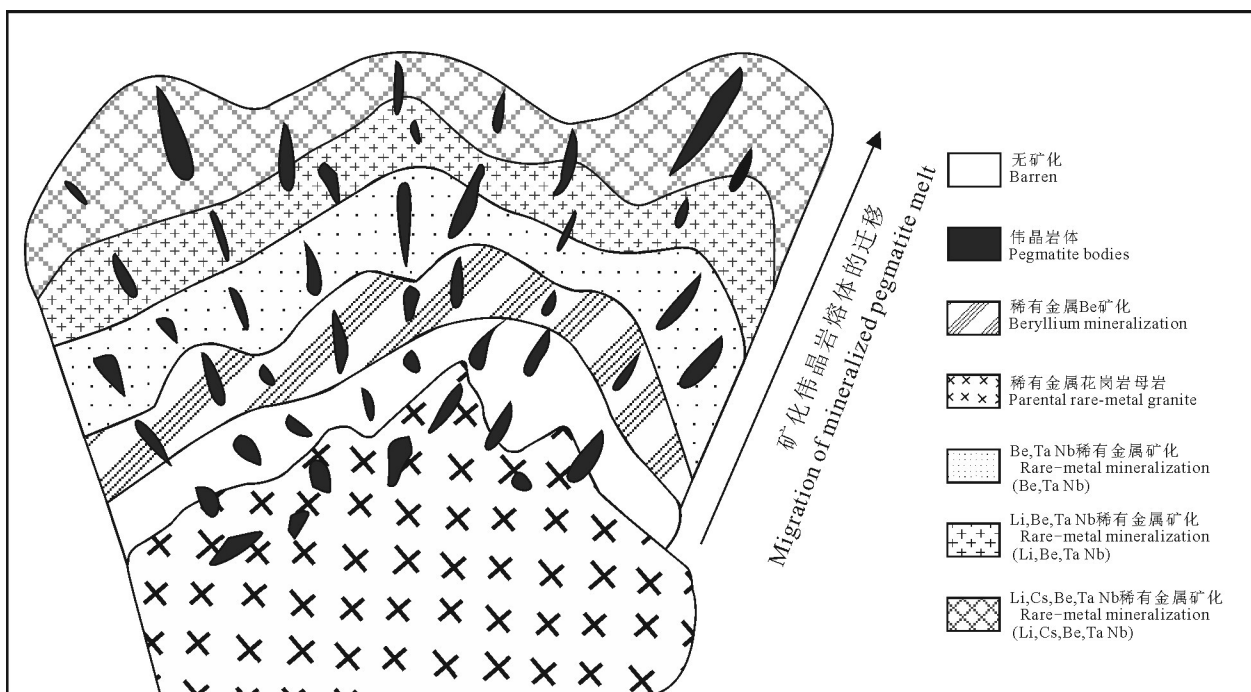


图1 稀有金属花岗岩母岩之上含LCT伟晶岩分带及矿化示意图(改自Černý, 1991)

Fig.1 Schematic representation of LCT pegmatite zoning and mineralization above a parental granite (modified from Černý, 1991)

石英脉系统。稀有金属花岗岩型矿床的稀有矿物主要为铌铁矿-钽铁矿、锂云母、细晶石、褐钨铌矿等(Kaeter et al., 2018)。典型矿床如埃及阿布达巴布(AbuDabbab)矿床和努韦比(Nuweibi)矿床, 钨铁矿和钽铁矿以浸染状分布在花岗岩的侵入岩内, 有研究显示钽主要来源于原始岩浆(Kuster, 2009)。稀有金属花岗岩型钽铌矿床是中国主要的钽铌资源来源地, 典型矿床包括江西宜春414矿床、湖南尖峰岭和香花岭矿床等(李健康等, 2019; 王伟等, 2020)。

2.4 碱性岩型钽铌矿床

碱性花岗岩或正长岩富含锆、铌、钽、铀和稀土等元素, 但钽含量较低。矿化的过碱性花岗岩中通常含有富铌的烧绿石和钨铁矿矿物。该类型矿床成矿与岩浆和热液有关(Mackay and Simanl, 2014)。目前正在开展勘探的矿床如加拿大的怪湖(Strange Lake)矿床和沙特阿拉伯的古里雅(Ghurayyah)矿床。虽然碱性花岗岩矿床规模较大, 但是品位较低, 因此该类型矿床目前不是钽铌资源的主要来源。

3 钽铌矿床时空分布规律

3.1 时代特征

钽铌成矿主要集中在前寒武纪(Niocolas, 1962; 蔡肖等, 2013), 主要成矿期可分为4期, 即 > 2.25 Ga、2.25~1.35 Ga、1.35~0.75 Ga 和 0.75~0.19 Ga (Tkachev et al., 2019)。

第一期(> 2.25 Ga), 以伟晶岩型钽铌矿成矿为主。目前已知最古老的含钽伟晶岩位于非洲斯威士兰的辛塞尼克拉通(Sinceni克拉通), 成矿时代为2.99~3.08 Ga(Trumbull, 1993)。该期伟晶岩中的钽和锂等稀有金属品位小、规模不大, 没有大的经济价值, 因此一般将该时期定义为钽矿化时代。具有可开发价值的伟晶岩型钽成矿始于中太古代, 如澳大利亚皮尔巴拉(Pilbara)地块的皮尔甘古拉(Pilgangura)矿床和沃伊纳(Wojina)矿床(Sweetapple and Collins, 2002; Collins, 2002; Jacobson et al., 2007; Sweetapple et al., 2017)。新太古代钽成矿较中太古代广泛, 最著名的矿床如澳大利亚的格林布什矿床(Partington et al., 1995; Fetherston, 2004; Jacobson et al., 2007), 以及南非的

锂波波(Limpopo)矿床和普马兰加(Mapumalanga)矿床(Tkachev et al., 2019)

第二期(2.25~1.35 Ga), 这一时期的成矿类型多样, 既有伟晶岩型也有碱性岩型和碳酸岩型成矿, 以碱性岩型成矿为主, 典型矿床如巴西的皮廷加(Pitinga)锡铌矿。这一时期碳酸岩型钽铌矿成矿较少, 少数矿床中典型的如澳大利亚伊尔岗克拉通的芒特维尔德(Mount Weld)稀有金属矿床(Pirajno et al., 2017)。加纳的科科宾(Kokobin)是该时期典型的伟晶岩型矿床。

第三期(1.35~0.75 Ga), 该时期以伟晶岩型成矿为主, 矿床主要集中分布在非洲, 如中非南部的卡马蒂维(Kamativi)矿床和刚果(金)的马诺诺-开钽劳(Manono-Kitoolo)矿床(Dewaele et al., 2015; Melcher et al., 2015)。

第四期(0.75~0.19 Ga), 钽铌成矿的高峰期, 成矿类型涉及伟晶岩型、花岗岩型、碱性岩型和碳酸岩型。该时期是碳酸岩型和碱性岩型矿床成矿的高峰期, 伟晶岩型矿床成矿相对较少, 典型碱性岩矿床如俄罗斯的乌鲁格·坦泽克(Ulug-Tanzek)矿床和埃塞俄比亚的瓜拉亚(Guraya)矿床(Tkachev et al., 2019)。碳酸岩型代表性矿床如加蓬的马布尼(Mabuni)矿床和埃塞俄比亚的肯迪查(Kenticha)矿床(Makanga et al., 2003; Küster, 2009)。

总体来看, 伟晶岩型钽铌矿时代分布广泛、跨度较大从3.08 Ga到0.19 Ga; 碱性岩型矿床成矿期主要在2.25~1.35 Ga和0.75~0.19 Ga; 碳酸岩型矿床成矿期主要分布在0.75~0.19 Ga的早期和中期; 花岗岩型矿床主要分布在0.75~0.19 Ga的中晚期(图2)。

3.2 空间特征

从空间分布来看, 钽铌分布在古老的克拉通内, 如中非克拉通、北美克拉通、南美克拉通和西澳克拉通。典型区如中非基巴拉(Kibara)褶皱带、加拿大格林维尔(Grenville)造山带、西澳克拉通和南美克拉通(Tassinari and Macambira, 1999; Fernandez-Alonso et al., 2012; Kendall-Langley et al., 2020; Saeidi et al., 2020)。

3.2.1 加拿大格林维尔造山带

加拿大格林维尔造山带由3个不同的岩性构造单元组成, 分别为片麻岩杂岩体、紫苏花岗岩岩基和圣-奥能瑞(Saint-Honoré)钙碱性杂岩体。钽铌

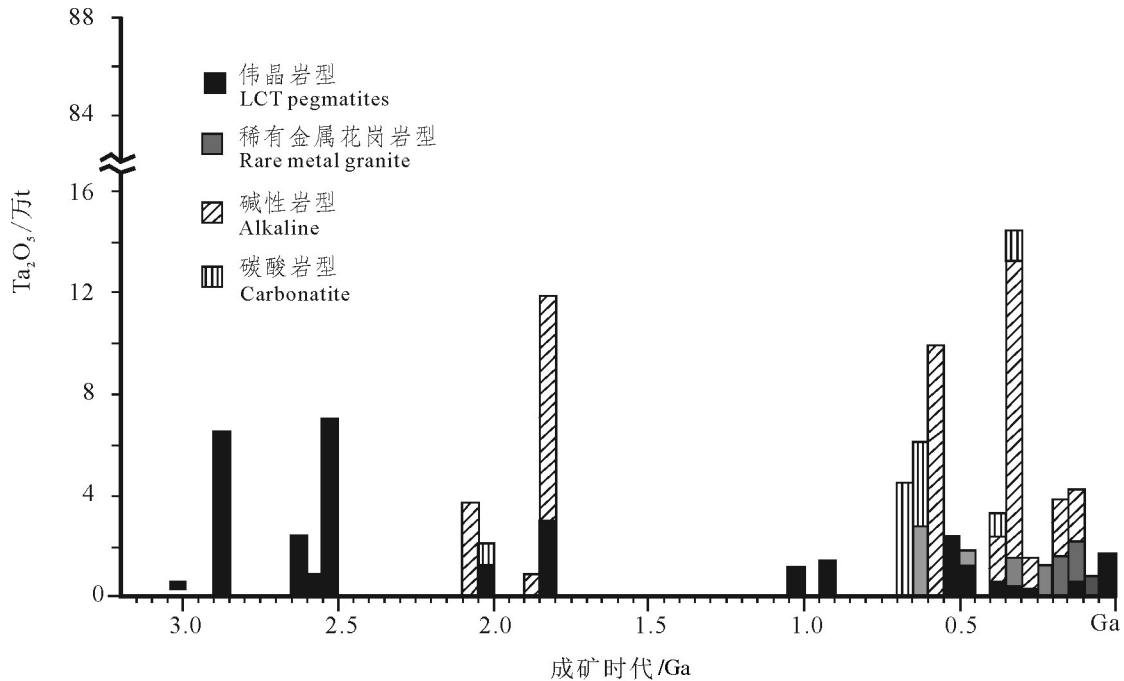


图2 不同成矿类型钽矿成矿时代分布图(改自Tkachev et al., 2019)

Fig.2 Mineralization epoch distribution of different Ta metallogenic types (modified from Tkachev et al., 2019)

矿床主要产自圣—奥能瑞碱性杂岩体中白云质碳酸岩中,典型矿床如纽北克矿床和奥卡矿床。圣—奥能瑞碱性杂岩体是由同心的、亚垂直的各种碳酸岩层组成,从外环向内环分别为白云岩、铁白云岩(图3)(Tremblay et al., 2017)。圣—奥能瑞碱性杂岩体的K—Ar年龄为565 Ma (Doig and Barton, 1968),金云母的Ar—Ar年龄为(565±5)Ma (McCausland et al., 2009)。杂岩体被奥陶纪厚约80 m的灰岩和黑色页岩覆盖(Saeidi et al., 2020)。碳酸岩型钽矿床是加拿大钽的唯一来源(Saeidi et al., 2020),典型矿床如纽北克矿床、奥卡矿床和克里维尔(Crevier)矿床。纽北克钽矿位于加拿大魁北克沙格奈(Saguenay)市西北13 km,占地约1735 hm²,储量约为1700万t。自1976年,该矿开始生产五氧化二钽,是目前唯一地下开采钽矿的矿山,也是主要的钽来源之一(Dorion et al., 2013)

3.2.2 西澳克拉通区

澳大利亚钽资源主要分布在西澳克拉通,成矿类型以伟晶岩为主,其次也有少量的碳酸岩和碱性岩型矿床(图4)。因伟晶岩型钽、钽矿床伴生锂、

稀土等元素,因此随着近年来澳大利亚伟晶岩型钽资源勘探不断取得进展,伟晶岩型钽资源随之大幅度增加。西澳克拉通几乎所有的钽均作为锂资源的副产品产出,主要钽矿床位于伊尔岗地块(Yilgran)的格林布什、芒特卡林(Mount Cattlin)、芒特马里恩(Mt Marion)和秃头山(Bald Hill)等矿床;位于皮尔巴拉地块的皮尔甘古拉矿床和沃吉纳等矿床(Kendall—Langley et al., 2020)。格林布什钽矿床是最大的钽矿床之一,其位于西澳珀斯东南250 km处,钽矿化主要位于伊尔岗克拉通的太古宙伟晶岩内。该矿自1980年开始开采锂和钽矿,最初的采矿重点主要是钽,随着钽需求和价格的下降以及锂市场的兴起,在2000年中期逐渐转向锂的开采。皮尔甘古拉钽矿床位于西澳海德兰港口东南150 km,是典型的伟晶岩型矿床,钽主要赋存皮尔甘古拉伟晶岩内,它是区域一系列沿南北走向断层控制的伟晶岩群的一部分(Kendall—Langley et al., 2020)。在西澳也分布碱性岩型矿床如位于霍尔斯科里克(Halls Creek)东南18 km的布罗克曼(Brockman)矿床是典型的碱性岩矿床,以稀土、钽和

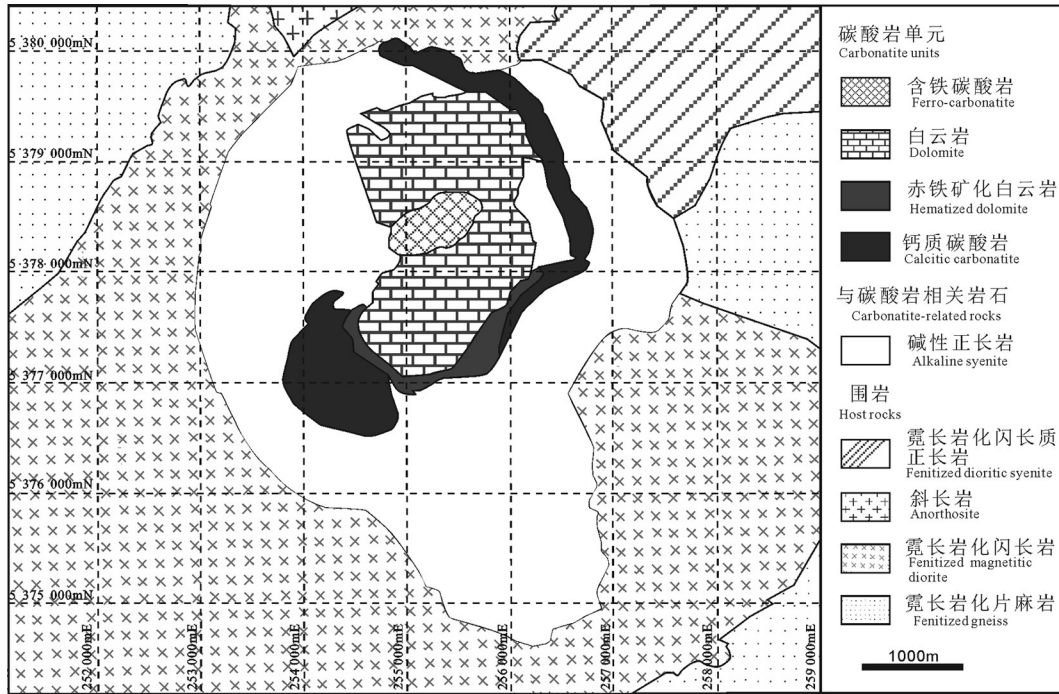


图3 圣—奥能瑞碱性杂岩体示意图(改自 Tremblay et al., 2017)
Fig.3 Schematic diagram of Saint-Honoré alkaline complex (modified from Tremblay et al., 2017)

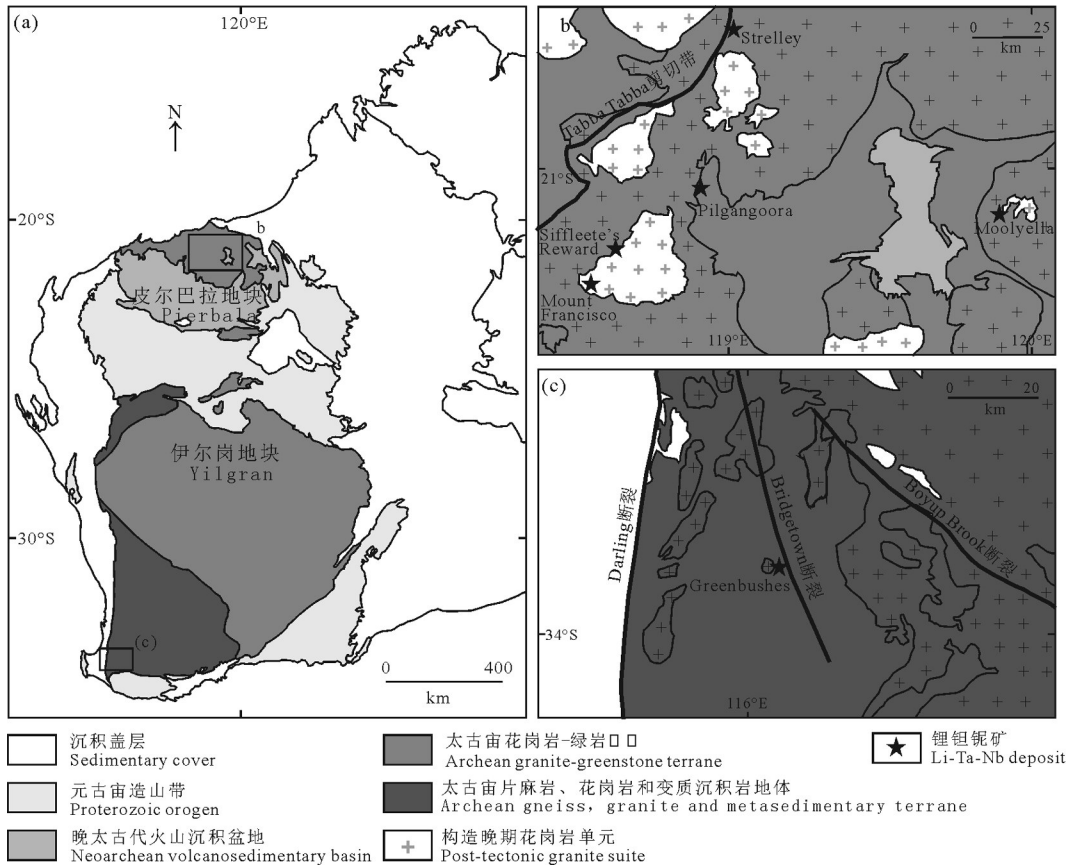


图4 西澳克拉通伟晶岩型锂矿地质概况(据 Kendall-Langley et al., 2020)
Fig.4 Distribution of lithium pegmatite deposits in Western Australia Craton (after Kendall-Langley et al., 2020)

锆成矿为主, 铌钽赋存在铌铁矿、铌钽矿内。

3.2.3 南美地台铌钽成矿区

南美地台铌矿资源储量居世界首位, 主要分布在圭亚那地盾、大西洋地盾和巴西利亚造山带内。铌钽资源成矿类型多样, 既有伟晶岩型、花岗岩型、碱性岩型也有碳酸岩型。位于巴西玛纳斯(Manaus)市北 300 km, 圭亚那地盾南部(Tassinari and Macambira 1999)的皮廷加锡铌钽矿床是最大的云英岩型锡矿基地, 铌钽资源也非常丰富。区域发育古元古代 Agua Branca 岩套的钙碱性花岗岩, Iricoume 群(Uatuma 超群)的 A 型或钙碱性富硅火山岩以及 Mapuera 侵入岩。古元古代晚期到新元古代早期环斑花岗岩套侵入古元古代钙碱性花岗岩和 Iricoume 群火山岩中。锡主要赋存在富钠长石的花岗岩中, 成矿与 Agua Boa 花岗岩和 Madeira 花岗岩有关(图 5)。该矿床铌钽与锡共同赋存在古元古代富钠长石的花岗岩中, 是典型的碱性岩型矿床。

巴西 75% 的铌产自米纳斯吉拉斯州南部, 另

外, 在戈亚斯州也有分布。铌钽成矿主要与晚白垩世侵入的碱性碳酸岩杂岩体有关, 该套杂岩体主要分布在巴拉那盆地周边。铌成矿类型以碳酸岩型为主, 典型矿床如阿拉莎矿床和卡塔劳矿床。阿拉莎矿床产于阿拉莎碱性杂岩体中心部位的碳酸岩中。洛阳栾川钼业集团股份有限公司在巴西戈亚斯州持有的戈亚斯卡塔劳(Catalao de Goias)铌矿床和查帕多(Chapadao)铌磷矿床均为碳酸岩型矿床。

在巴西利亚造山带, 含有 Nb、Ta、Be、Li 的伟晶岩主要分布在巴西东北部北里奥格兰德的赛里多地区、巴西东南沿海的曼帝盖拉(Mantiqueira)地区和巴西东部南美大草原(Pampean)地区, 典型矿床如伏达格兰德矿床(曾勇等, 2020)。

3.2.4 中非基巴拉褶皱带

中非基巴拉褶皱带由东北部中元古代卡拉吉耶—安科莱(Karagewe—Ankole)造山带(KAB)和西南部基巴拉造山带(KIB)以及北西走向的古元古代基底组成(图 6; Fernandez—Alonso et al., 2012), 是中非地区重要的 W—Sn—Nb—Ta 成矿带。

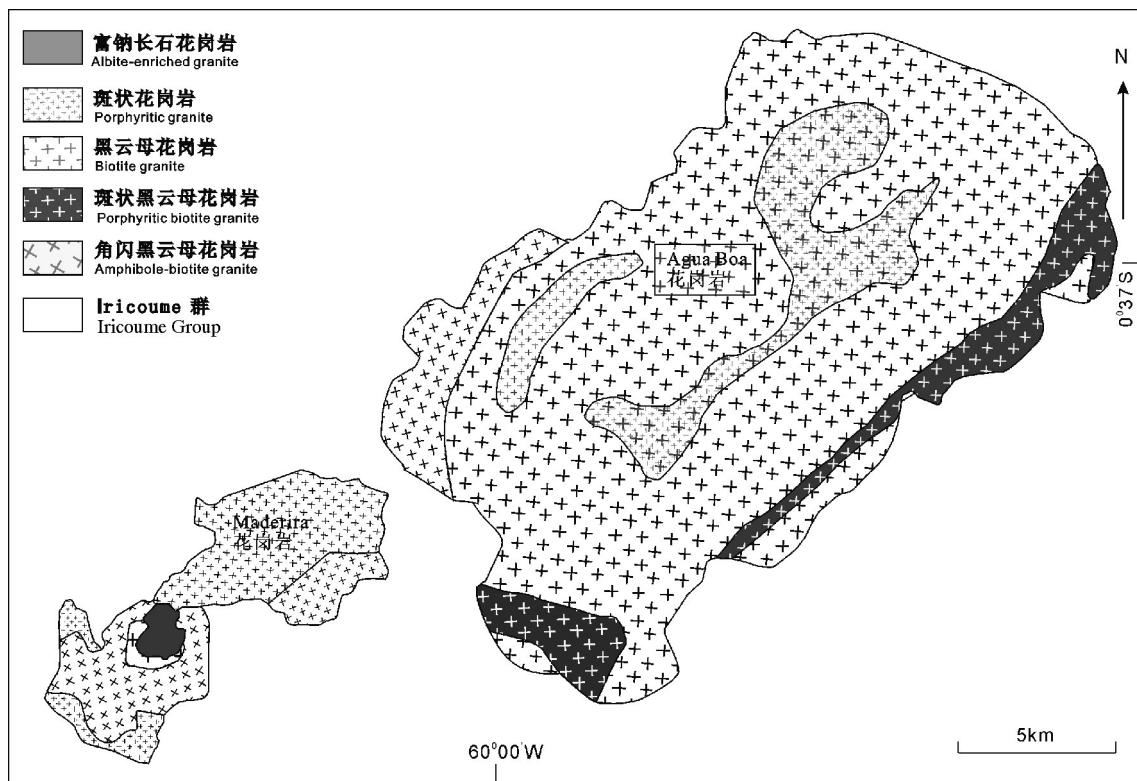


图 5 皮廷加成矿省 Madeira 花岗岩和 Agua Boa 花岗岩地质图(据 Costi et al., 2002)

Fig.5 Geology map of Madeira granite and Agua Boa granite in Pitinga (after Costi et al., 2002)

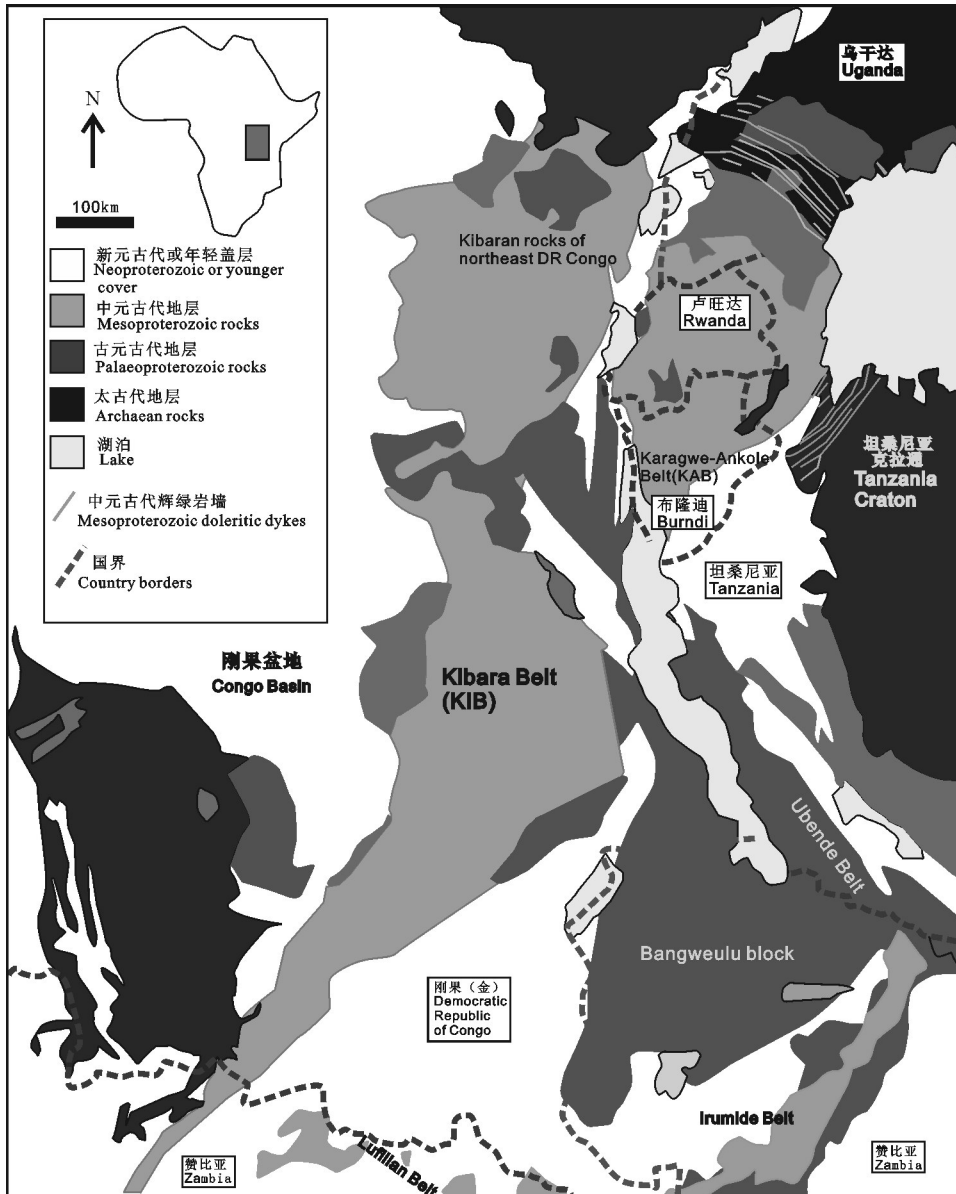


图6 基巴拉褶皱带地质略图(改自 Fernandez-Alonso et al., 2012)

Fig.6 Simplified geological map of Kibara fold belt(modified from Fernandez-Alonso et al., 2012)

基巴拉褶皱带在中元古代发生了4期构造作用,区域上主要形成北东向褶皱和断裂构造,在花岗岩分布区,呈断裂棋盘格式,相互交切错动(杨远东等,2020)。Nb-Ta-Sn的成矿与区域新元古代“基巴拉锡”花岗岩有关,铌钽成矿类型为伟晶岩型。有研究显示,该区“基巴拉”花岗岩、伟晶岩和石英脉成矿系统时空上可整合为一个成矿体系(980 ± 20 Ma) (Pohl et al.,2013; Hulsbosch et al., 2014, 2016; Lehmann et al., 2014)。伟晶岩型铌钽矿化主要经历2个阶段(Dewaele et al., 2008, 2011)。第一

阶段:在伟晶岩岩浆结晶早期的铌钽和部分锡石的矿化阶段;第二阶段后期热液交代叠加作用发生的绢云母化和白云母化阶段。该成矿省内分布众多典型伟晶岩型矿床如刚果(金)马诺诺(Manono)矿床,卢旺达的鲁伦博(Rurembo)矿床等(杨远东等,2020)。

4 铌钽矿找矿勘探现状及进展

钽资源主要赋存在与伟晶岩有关的矿床,如澳大利亚的Wodgina 锂钽矿,巴西Mibra的钽锡矿;稀

有金属花岗岩型矿床,如中国宜春和法国的Beauvoir矿床;碱性岩型矿床,如加拿大的Nechalacho稀土、铌钽和锆矿床以及沙特阿拉伯Al Ghurayyah铌钽矿床。高品位矿床主要产自上述硬岩型矿床的风化壳、残坡积层中。铌矿床主要赋存在碳酸岩型矿床以及碱性岩型矿床中。由于赋存在碳酸岩型矿床,尤其经过风化作用后二次富集的铌矿床中的铌具有品位高和冶金方法简单的优点,因为目前铌主要开采该类型的矿床。但俄罗斯Kola Peninsula的伟晶岩型铌矿是个特例,该矿床铌的品位达到8%~12%。

就目前铌钽供应格局来讲,碳酸岩型铌矿床和伟晶岩型钽矿床供应了世界绝大部分的铌钽需求(Simandl et al.,2018),因此碳酸岩型铌矿床和伟晶岩型钽矿床是目前勘探的主要目标。但也有特例,以澳大利亚为例,钽的勘探钽在很大程度上扮演着其他战略性矿种如锂、稀土和铌的伴生矿种。过去几年中,由于澳大利亚对锂资源的勘探,致使与锂伴生的钽的资源量大幅度攀升。而相对的碳酸岩型和碱性岩型的钽资源却没有太大的变化。铌的勘探得益于澳大利亚对稀土和锆的勘探。在过去的6年间澳大利亚只有Dubbo和Brockman两个矿床的资源量有更新,无新发现矿床及资源量更新。

5 结 论

(1)铌钽按成矿地质条件可分为内生矿床和外生矿床两大类。内生矿床包括稀有金属花岗岩型、含锂-铯-钽(LCT)族伟晶岩型、碱性岩型和碳酸岩型。外生矿床多为内生矿床经过风化和沉积等外生作用发生二次富集的风化壳型和残坡积、冲积砂矿型。

(2)铌钽矿床分布广泛,从空间上看,主要分布在克拉通地区,典型区如中非基巴拉褶皱带、加拿大格林维尔造山带、西澳克拉通和南美克拉通;从时间上看,成矿主要集中在前寒武纪,伟晶岩型矿床成矿时代跨度较大,从3.08 Ga到0.19 Ga;碱性岩型矿床主要成矿期分别在2.25~1.35 Ga和0.75~0.19 Ga;碳酸岩型矿床成矿期主要分布在0.75~0.19 Ga的早期和中期;花岗岩型主要分布在0.75~0.19 Ga的中晚期。

(3)碳酸岩型铌矿床和伟晶岩型钽矿床供应了世界绝大部分的铌钽需求,是目前勘探的主要目标。

致谢:南京地质调查中心陈世忠研究员对文稿进行了认真审阅和修改;审稿专家和编辑提出了宝贵修改意见。在此一并表示诚挚的感谢。

References

- Bleiwis D I, Papp J F, Yager T R. 2015. Shift in Global Tantalum Mine Production, 2000–2014: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2015–3079[R]. 6.
- Bradley D, McCauley A. 2013. A Preliminary Deposit Model for Lithium–Cesium–Tantalum (LCT) Pegmatites [R]. U.S. Geological Survey Open–File Report.
- British Geological Survey. 2011. Nature environment research council[R]. Nottingham.
- Cai Xiao, Song Yang, Wang Denghong, Li Jiankang, Zhou Wei, Ding Haiyang. 2013. Distribution rules and metallogenic geological characteristics of important foreign niobium–tantalum deposits[J]. Acta Mineralogica Sinica(Supp.),193–194(in Chinese).
- Cao Fei, Yang Huipan, Zhang Liang, Wang Wei. 2019. Current situation and trend analysis of global tantalum and niobium mineral resources [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(5):56–89 (in Chinese with English abstract).
- Černý P. 1991. Rare–element granitic pegmatites, part II–Regional to global environments and petrogenesis [J]. Geoscience Canada, 18 (2): 68–81.
- Černý P, Ercit T S. 2005. The classification of granitic pegmatites revisited [J]. The Canadian Mineralogist, 43: 2005–2026.
- Costi H T, Dall Agnol R, Borges R M K, Minuzzi O R R. 2002. Tin–bearing sodic episyenites associated with the Proterozoic, A–type Agua Boa granite, Pitinga Mine, Amazonian Craton, Brazil[J]. Gondwana Research, 5(2): 435–451.
- Costi H T. 2009. The peralkaline tin–mineralized madeira cryolite albite–rich granite of Pitinga, Amazonian Craton, Brazil: Petrography, mineralogy, and crystallization processes [J]. Canadian Mineralogist, 47: 1301–1327.
- Dewaele S, Tack L, Fernandez Alonso M, Boyce A J. 2008. Geology and mineralisation of the Gatumba area, Rwanda: Present state of knowledge[J]. Etudes Rwandaises, 16: 6–24.
- Dewaele S, Henjes–Kunst F, Melcher F, Sitnikova M, Burgess R, Gerdes A, Fernandez M A, Clercq F D, Muchez P, Lehmann B. 2011. Late Neoproterozoic overprinting of the cassiterite and columbite–tantalite bearing pegmatites of the Gatumba area, Rwanda (Central Africa) [J]. Journal of African Earth Sciences, 61 (1): 10–26.
- Dewaele S, Hulsbosch N, Cryns Y, Boyce A J. 2015. Geological setting

- and timing of the world-class Sn, Nb-Ta and Li mineralization of Manono-Kitotolo (Katanga, Democratic Republic of Congo) [J]. *Ore Geology Review*, 72:373-390.
- Doig R, Barton J M. 1968. Ages of carbonatites and other alkaline rock in Québec [J]. *Canada Journal of Earth Science*, 7:22-28.
- Dorion J F, Hosseini Z. 2013. Implementation of a seismic system at Niobec Mine[C]//47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco, California.
- Fernandez-Alonso M, Cutten H, De Waele B De, Tack L, Tahon A, Baudet D, Barritt S D. 2012. The Mesoproterozoic Karagwe-Ankole Belt (formerly the NE Kibara Belt): The result of prolonged extensional intracratonic basin development punctuated by two short-lived far-field compressional events [J]. *Precambrian Research*, 216-219: 63-86.
- Fetherston J M. 2004. Tantalum in western Australia [J]. *Mineral Resources Bulletin*, 22:63-89.
- Hulsbosch N, Hertogen J, Dewaele S, Andre L, Muchez P. 2014. Alkali metal and rare earth element evolution of rock-forming minerals from the Gatumba area pegmatites (Rwanda): Quantitative assessment of crystal-melt fractionation in the regional zonation of pegmatite groups [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 132: 349-374.
- Hulsbosch N, Boiron M C, Dewaele S, Muchez P. 2016. Fluid fractionation of tungsten during granite-pegmatite differentiation and the metal source of peribatholithic W quartz veins: Evidence from the Karagwe-Ankole Belt (Rwanda) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 175: 299-318.
- Jacobson M I, Calderwood M A, Grguric B A. 2007. Guidebook to the Pegmatites of Western Australia [M]. Carlisle W A: Heliparian Press.
- Kaeter D, Barros R, Menuge J F, Chew D M. 2018. The magmatic-hydrothermal transition in rare-element pegmatites from southeast Ireland: LA-ICP-MS chemical mapping of muscovite and columbite-tantalite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 240: 98-130.
- Kendall-Langley L A, Kemp A I S, Grigson J L, Hammerli J. 2020. U-Pb and reconnaissance Lu-Hf isotope analysis of cassiterite and columbite group minerals from Archean Li-Cs-Ta type pegmatites of Western Australia [J]. *Lithos*, 352-353: 105-231.
- Küster D. 2009. Granitoid-hosted Ta mineralization in the Arabian-Nubian Shield-ore deposit types, tectono-metallogenetic setting and petrogenetic framework [J]. *Ore Geology Review*, 35: 68-86.
- Lehmann B, Halder S, Ruzindana Munana J, Ngizimana J P, Biryabarema M. 2014. The geochemical signature of rare-metal pegmatites in Central Africa: Magmatic rocks in the Gatumba tin-tantalum mining district, Rwanda [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 144 (Part C):528-538.
- Li Jiankang, Li Peng, Wang Denghong, Li Xiangjie. 2019. A review of niobium and tantalum metallogenic regularity in China [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 64 (15): 1545-1566 (in Chinese with English abstract).
- Mackay D A R, Simandl G J. 2014. Geology, market and supply chain of niobium and tantalum—A review [J]. *Mineralium Deposita*, 49: 1025-1047.
- Makanga J F, Edou-Minko A. 2003. Etude pétrographique et géochimique du complexe annulaire de Mabounie (Ga-bon) [J]. *African Journal of Science and Technology*, 4(1):67-77.
- McCausland P J, Pisarevsky S, Jourdan F, Higgins M. 2009. Laurentia at 571 Ma: Preliminary paleomagnetism and Ar-Ar age of the Ediacaran St Honore alkali intrusion, Quebec [C]//Proceedings, American Geophysical Union-Geological Association of Canada-Mineralogical Association of Canada-Canadian Geophysical Union, Joint Assembly, Toronto, Abstract GA12A-01.
- Melcher F, Graupner T, Gäbler H-E, Sitnkova M, Henjes-Kunst F, Oberthaus T, Gerdes A, Dewaele S. 2015. Tan-talum-(niobium-tin) mineralization in African pegmatites and rare metal granites: Constraints from Ta-Nb oxide mineralogy, geochemistry and U-Pb geochronology [J]. *Ore Geology Review*, 64: 667-719.
- Mitchell R H. 2005. Mineralogical and experimental constraints on the origins of niobium mineralization in carbonatites [G]//Linnen R L, Samson I M (eds.). Rare-element Geochemistry and Mineral Deposits: Geological Association of Canada Short Course Notes.
- Nicolas D K. 1962. The economic geology of columbium (Niobium) and of tantalum [J]. *Economic Geology*, 57(3): 377-404.
- Partington G A, McNaughton N J, Williams I S. 1995. A review of the geology, mineralization, and geochronology of the Greenbushes pegmatite, Western Australia [J]. *Economic Geology*, 90: 616-635.
- Pirajno F, González-Álvarez I, Border A, Porter M. 2017. Mount Weld and Gifford Creek Rare Earth Elements Carbon-Arites [R]. Australian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM), Monograph, 32:163-166.
- Pohl W L, Biryabarema M, Lehmann B. 2013. Early Neoproterozoic rare metal (Sn, Ta, W) and gold metallogeny of the Central Africa Region: A review [J]. *Applied Earth Science*, 122(2): 66-82.
- Saeidi A, Heidarzadeh S, Lalancette S, Rouleau A. 2020. The effects of in situ stress uncertainties on the assessment of open stope stability: Case study at the Niobec Mine, Quebec (Canada) [J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 25:1-13.
- Schulz K J, Piatak N M, Papp J F. 2017. Niobium and tantalum, chapter M of critical mineral resources of the United States: economic and environmental geology and prospects for future supply [R]. USGS Professional Paper 1802, M1-M34.
- Simandl G J, Burr R O, Trueman D L, Paradis S. 2018. Tantalum and niobium: Deposits, resources, exploration methods and market - a primer for geoscientists [J]. *Journal of the Geological Association of Canada*, 85-96.
- Sweetapple M T, Holmes J, Young J, Grigson M W. 2017. Pilgangoora Lithium-Tantalum Pegmatite Deposit [R]. Australian Institute of

- Mining and Metallurgy (AusIMM), Monograph 32:339–342.
- Sweetapple M T, Collins P L F. 2002. Genetic framework for the classification and distribution of Archean rare metal pegmatites in the North Pilbara craton, western Australia [J]. *Economic Geology*, 97: 873–895.
- Tkachev A V, Rundqvist D V, Vishnevskaya N A. 2019. Global metallogeny of tantalum through geological time [J]. *Geology of Ore Deposits*, 61(6):512–529.
- Tassinari C C G, Macambira M J B. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian craton [J]. *Episodes*, 22: 174–182.
- Tremblay J, Bedard L P, Matton G. 2017. Columbitization of fluorcalcioepidote by hydrothermalism at the Saint–Honore alkaline complex, Quebec (Canada): new insights on halite in carbonatites [J]. *Ore Geology Review*, 91: 695–707.
- Trumbull R B. 1993. A petrological and Rb/Sr isotopic study of an early Archean fertile granite–pegmatite system: the Sinceni Pluton in Swaziland [J]. *Precambrian Research*, 61:89–116.
- Wang Wei, Hou Kejun, Wang Denghong, Yuan Linping, Liu Lijun, Lu Bingting. 2020. Columbite–Tantalite U–Pb dating of Yanshanina rare metal mineralization in western Sichuan [J]. *Geology in China*, 47(3):890–891 (in Chinese with English abstract).
- Woolley A R, Kjarsgaard B A. 2008. Carbonatite occurrences of the world–Map and database [R]. Geological Survey of Canada Open File, 579–628.
- Wu Xuemin, Zhou Minjuan, Luo Xicheng, Zhou Jianting. 2016. The metallogenic conditions and prospecting potential of lithium and rare metals in northwestern Jiangxi [J]. *East China Geology*, 37(4): 275–283 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yuandong, Li Jiye, Zhu Yongping, Liu Junyuan. 2020. Geological characteristics of a pegmatite niobium and tantalum deposit in the east of Manono, Congo [J]. *Mineral Exploration*, 11(7):1428–1435 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Yong, Guo Weiming, Yao Chunyan, Zheng Di, Liu Junan, Xu Ming, Shen Mangting, Shen Xuehua. 2020. The Characteristics and Mineralization Potential of South American Craton Mineral Resources [M]. Beijing: Geological Publishing House, 203–205 (in Chinese).

附中文参考文献

- 曹飞, 杨卉, 张亮, 王威. 2019. 全球钽铌矿产资源开发利用现状及趋势 [J]. *矿产保护与利用*, 39(5): 56–89.
- 蔡肖, 宋扬, 王登红, 李健康, 周伟, 丁海洋. 2013. 国外重要钽铌矿床分布规律及成矿地质特征 [J]. *矿物学报(增刊)*, 193–194.
- 李健康, 李鹏, 王登红, 李兴杰. 2019. 中国钽铌矿成矿规律 [J]. *科学通报*, 64(15): 1545–1566.
- 王伟, 侯可军, 王登红, 袁瀚平, 刘丽君, 吕秉廷. 2020. 川西燕山期稀有金属钽铌铁矿 U–Pb 年龄报道 [J]. *中国地质*, 47(3): 890–891.
- 吴学敏, 周敏娟, 罗喜成, 周建廷. 2016. 江西西北部锂及稀有金属成矿条件及找矿潜力分析 [J]. *华东地质*, 37(4): 275–283.
- 杨远东, 李继业, 祝永平, 刘均沅. 2020. 刚果(金)马诺诺(Manono)东部某伟晶岩型钽铌矿地质特征 [J]. *矿产勘查*, 11(7): 1428–1435.
- 曾勇, 郭维民, 姚春彦, 郑镛, 刘君安, 徐鸣, 沈莽庭, 沈雪华. 2020. 南美克拉通矿产资源特征与成矿潜力 [M]. 北京: 地质出版社, 203–205.