

陈新凯 周振华. 2023. 大兴安岭锂-铍-铌-钽等关键金属矿床类型、成矿规律与资源展望. 岩石学报, 39(07): 1973–1991, doi: 10.18654/1000–0569/2023.07.06

# 大兴安岭锂-铍-铌-钽等关键金属矿床类型、成矿规律与资源展望<sup>\*</sup>

陈新凯 周振华<sup>\*\*</sup>  
CHEN XinKai and ZHOU ZhenHua<sup>\*\*</sup>

中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037  
MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China  
2022-10-01 收稿, 2023-02-08 改回.

Chen XK and Zhou ZH. 2023. Deposit types, metallogenesis and resource prospect of Li-Be-Nb-Ta deposits in the Great Xing'an Range. *Acta Petrologica Sinica*, 39(7): 1973–1991, doi: 10.18654/1000-0569/2023.07.06

**Abstract** The Great Xing'an Range (GXR) is one of the most important rare metal metallogenic belts in eastern China, which is characterized by large-scale Phanerozoic granites and multi-stage superposition metal mineralization. The rare metal mineralization in this belt is closely related to the highly fractionated granites, and mainly occurs in the Late Mesozoic. In this paper, the spatial-temporal distribution and metallogenies of Li-Be-Nb-Ta deposits in the GXR are systematically summarized, and by constructing an ore-forming model, the prospecting direction of these deposits is proposed. Moreover, some important scientific problems on the metallogenies of rare metals are discussed. This study showed that the Li-Be-Nb-Ta deposits in GXR are mainly concentrated in the southern part of GXR. Among them, the Li-Nb-Ta deposits have independent distribution characteristics, while the Be deposits are mainly distributed along the Linxi-Ganzhuermiao Fault. The metallogenic ages of these deposits are concentrated in 150 ~ 130Ma, showing the features of Late Jurassic Nb-Ta to the Early Cretaceous Li-Be mineralization. The Li-Be-Nb-Ta deposits in this region are mainly composed of granite-type, with some locally developed volcanic-, alkaline-, greisen- and skarn-types. We believe that there is a very high metallogenic potential for Li-Be-Nb-Ta-Sn-W in the GXR, and diverse mineralization is ascribed to the magmatic fractionation and late-stage hydrothermal metasomatism. Furthermore, water-rock reaction will also affect the composition and evolution of ore-forming fluids. Magmatic fluid exsolution, mantle material and fluid dissolution-reprecipitation process play a key role in the regional Li-Be-Nb-Ta mineralization. In the future, the key exploration direction should be focused on the Li-Sn polymetallic mineralization related to highly fractionated granites around the Xilingol complex, and the Be-Nb-Ta mineralization related to alkaline rock and volcanic rocks in the GXR.

**Key words** Li-Be-Nb-Ta; Magmatic fractionation; Fluid metasomatism; Metallogenic regularity; Great Xing'an Range

**摘 要** 大兴安岭地区是我国东部重要稀有金属成矿带之一, 以发育大规模显生宙花岗岩和多期次叠合金属成矿作用为主要特征。稀有金属成矿作用主要发生在晚中生代, 与高分异花岗岩密切相关。本文对大兴安岭地区锂铍铌钽矿床时空分布特征、成矿规律进行了系统总结, 构筑了矿床成矿模型, 指明了找矿方向, 探讨了有待解决的若干重要科学问题。研究表明, 大兴安岭锂铍铌钽矿床主要集中大兴安岭南段, 锂、铌钽矿具有独立分布特点, 而铍矿主要呈带状沿林西-甘珠尔庙断裂分布。矿化时代集中在 150 ~ 130Ma 之间, 呈现出晚侏罗世铌钽矿化-早白垩世铍铌矿化的特征。锂铍铌钽矿床类型丰富, 以花岗岩型为主, 兼有火山岩型、碱性岩型、云英岩型和矽卡岩型矿化。本次研究认为大兴安岭地区具有良好的锂铍铌钽(锡钨)成矿潜力, 不同矿化均与岩浆分异和后期热液交代作用相关, 同时水-岩反应也会影响流体的组成和演化。岩浆流体出溶、地幔物质参与、流体溶蚀-再沉淀过程对锂铍铌钽成矿起到关键作用。未来重点勘查方向应关注与锡林郭勒杂岩体周边的高分异花岗岩有关的锂锡多金属, 以及与大兴安岭火山岩和碱性岩有关的铍和铌钽矿化。

<sup>\*</sup> 本文受国家重点研发计划项目(2019YFC0605202)、中央公益性科研院所基本业务费项目(KK2208)、国家自然科学基金项目(41772084)和国家科技基础资源调查专项(2022FY101900、2022FY101901、2017FY101300、2017FY101302)联合资助。  
<sup>\*\*</sup> 第一作者简介: 陈新凯, 男, 1999 年生, 硕士生, 地球化学专业, E-mail: chenxkkk0821@163.com  
<sup>\*\*</sup> 通讯作者: 周振华, 男, 1981 年生, 研究员, 博士生导师, 从事关键金属成矿研究, E-mail: zhzhoucags@sina.com

**关键词** 锂铍铌钽;岩浆分异;流体交代;成矿规律;大兴安岭  
**中图法分类号** P612; P618.7

锂-铍-铌-钽等战略性金属具有极度耐热、难熔、耐腐蚀以及优良的光电磁等独特性能,在新能源、新材料、信息技术等新兴产业和国防军工等行业中具有不可替代的重大用途(侯增谦等,2020),其成因机制和勘查评价一直以来都是国际矿床学界研究的热点(毛景文等,2019;翟明国等,2019)。近年来,我国锂-铍-铌-钽等关键金属勘查和研究工作取得了重大突破,例如甲基卡新三号脉(Brown, 2007; 许志琴等, 2019)、大红柳滩等花岗-伟晶岩型锂铍铌钽矿、白杨河火山岩型铍铀矿(Zhu *et al.*, 2021b)等矿床的勘查发现与利用,极大地丰富了我国关键金属资源的勘查成果(王登红等, 2022)。甲基卡地区片麻岩穹窿与伟晶岩型锂矿的密切联系,特别是造山过程中变形-变质-岩浆(熔融)对后期成矿作用的重要制约已得到很好地研究;白杨河铍铀矿的成因机制可能是岩体出溶富铍流体后期与外部流体混合与水岩反应所致。尽管如此,目前在关键金属元素超常富集机理、重大地质事件和层圈物质循环过程与成矿的关系等方面仍存在较多争议,亟待进一步深入研究(蒋少涌等,2019)。

大兴安岭地区是中国东部重要的成矿带之一,区内产出多个大型-超大型银-铅-锌矿、稀土矿、锡矿、钼矿、铌钽矿等金属矿产(Mao *et al.*, 2019; Qiu *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2019)。近年来,随着关键金属找矿勘查的不断投入和成矿理论的发展,在大兴安岭地区陆续探明了多个锂-铍-铌-钽矿床(矿化点),如维拉斯托锂锡多金属矿(Gao *et al.*, 2019)、石灰窑铌钽钼矿(Zhou *et al.*, 2022a)、黄岗铍矿化点等,显示出巨大的关键金属找矿潜力。前人对大兴安岭地区钨锡、铜多金属成矿机制和成矿规律进行了较全面的总结(Ouyang *et al.*, 2015; Mao *et al.*, 2019; 周振华和毛景文,2022),相对而言,大兴安岭地区锂、铍、铌钽成矿的研究程度较低,缺乏系统的研究,严重制约了该区关键金属的找矿勘查突破。目前区内锂铍铌钽多作为其他稀有金属(锡、稀土等)的伴生资源,或仅有少量勘查工作成果报道,其成因机制和成矿规律研究较为薄弱。大兴安岭地区具有多类型锂铍铌钽矿化,对其系统研究有助于更好地理解区域锂铍铌钽成矿规律和成矿模型的建立。此外,大兴安岭地区分布有大面积的锂、铍、铌钽元素正异常,但近年来找矿勘查并未取得很大突破,亟待总结区域成矿规律,提出区域锂、铍、铌钽找矿方向。本文在前人工作的基础上,对大兴安岭锂-铍-铌-钽矿床的类型、时空分布特点、成矿机制和成矿规律等方面进行了全面总结,建立了成矿模型,进一步明确了锂铍铌钽矿化潜力和找矿方向。

## 1 地质背景

大兴安岭地区位于兴蒙造山带东段,北接蒙古-鄂霍茨

克造山带,南临西拉沐伦断裂,东以嫩江-八里罕断裂为界与松辽盆地相邻,向西以大兴安岭山脉为界(图1)。前人的研究表明,古生代期间微陆块拼合碰撞形成了大兴安岭的主体(Zhou *et al.*, 2011a, b),晚中生代壳-幔混源岩浆的侵入及后续深部物质上涌引起的垂向增生使得大兴安岭主脊在该阶段大致形成(邵济安等,2005,2010)。古生代期间受古亚洲洋俯冲影响,区内形成了大量近E-W向构造褶皱,而中生代期间受控于蒙古-鄂霍次克洋以及古太平洋叠合构造机制,发育了大量NE-NNE向断裂(许文良等,2013)。这些中生代断裂叠加于古生代断裂上,形成了大兴安岭地区复杂的构造格架。

大兴安岭地区地层从老至新大致可以分为5个序列:(1)被岩浆作用所改造或被新增生的地幔或地壳物质所置换的前寒武变质基底,主要出露在额尔古纳地块西北部(如兴华渡口群),少量可在兴安地块、松嫩地块中被识别(Wu *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2011b),主要为具有片麻状构造的花岗质侵入体;(2)早古生代火山-沉积岩序列,包括各类板片岩、砂岩、大理岩以及安山岩等,具有钙碱性、双峰式特征(许文良等,2019);(3)晚古生代火山-沉积序列,以二叠系火山-沉积建造为主,主要包括碳酸盐岩、砂砾岩类和中酸-中基性火山岩类,在大兴安岭南段广泛分布,是金属矿化的主要赋矿围岩(周振华和毛景文,2022);(4)中生代火山岩与花岗岩类,构成了区内的主要盖层,北段主要为早白垩世的中基性、中酸性火山碎屑岩,中南段地层岩性较为复杂,主体为晚侏罗世-早白垩世大规模中-酸性火山岩与花岗岩,可见砂岩、粉砂岩、泥岩局部出露(Zhang *et al.*, 2010);(5)新生界地层,包括新近纪与第四纪浮砂土,分布于沉积与拗陷盆地内,面积广泛(图1)。

大兴安岭地区发育强烈的显生宙构造-岩浆活动,岩浆作用可分为晚石炭世-早二叠世、晚三叠世-中侏罗世、晚侏罗世-早白垩世三个阶段。其中,晚石炭世-早二叠世岩体主要分布在大兴安岭南段西坡、兴安地块内部,呈岩基或岩株产出。岩性包括闪长岩、英云闪长岩和花岗闪长岩,为拉斑钙碱性-高钾钙碱性岩,被认为与古亚洲洋闭合密切相关(Wilde, 2015; Li *et al.*, 2018)或与多地块拼贴汇聚过程有关(Wu *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2017)。晚三叠世-中侏罗世火山岩主要分布在额尔古纳地块西侧,在大兴安岭中南段零星分布,花岗质侵入岩则主要分布在额尔古纳地块西部。岩性包括流纹岩、流纹质火山碎屑岩、闪长岩类、二云母花岗岩等(李锦轶等,2007)。出露于额尔古纳地块中的岩浆岩可能是蒙古-鄂霍次克洋向南俯冲的结果(Wu *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2016),大兴安岭中南段分布的晚三叠世-中侏罗世岩体则可能是岩石圈拆沉及后续软流圈上涌的结果(Wu *et al.*, 2002)。晚侏罗世-早白垩世岩浆活动在整个大兴安岭

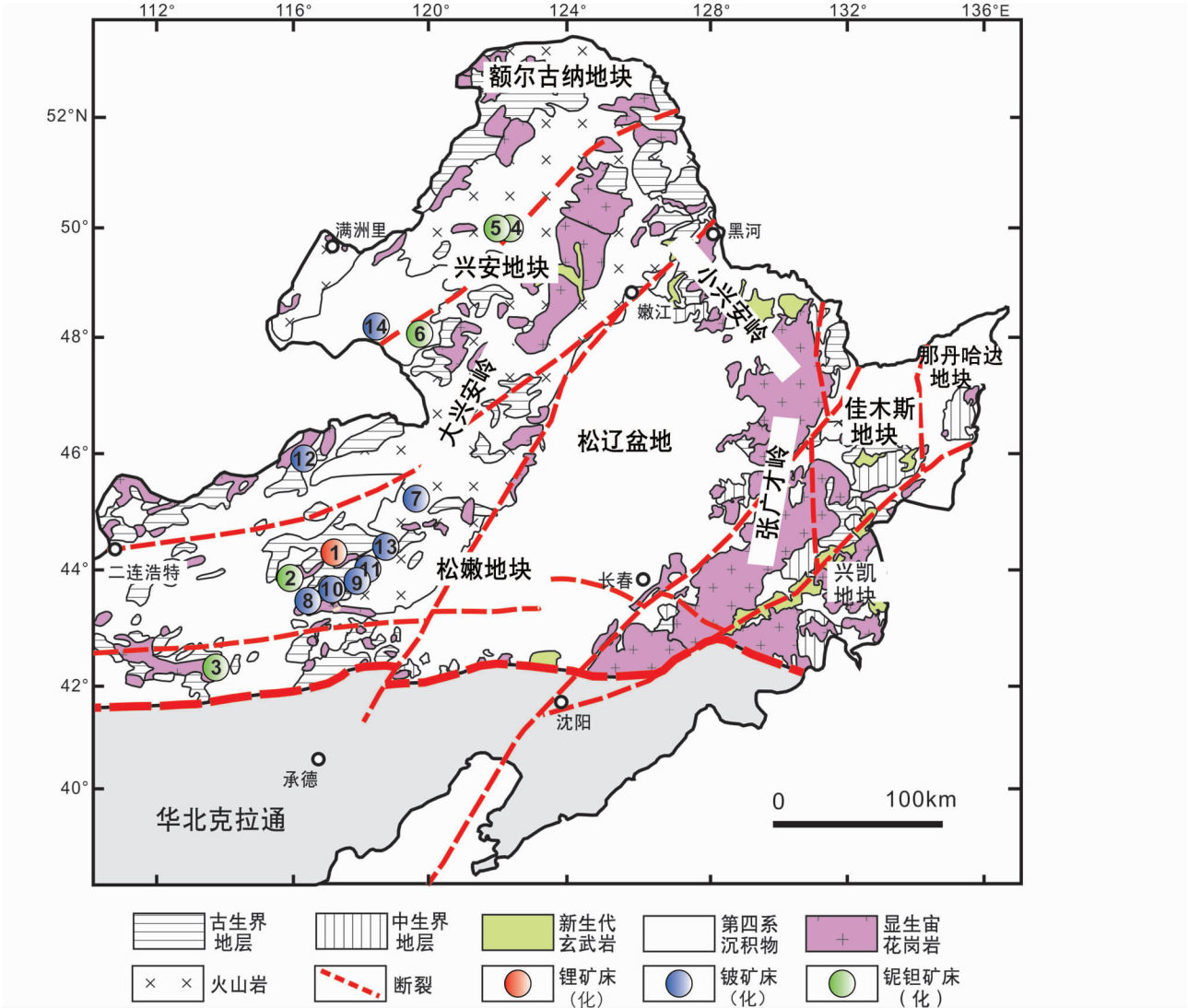


图1 大兴安岭锂铍铌钽矿床(化)分布图(据 Wu *et al.* ,2011;Liu *et al.* , 2021 修改)

数字序号对应的矿床见表1

Fig.1 Distribution of Li-Be-Nb-Ta deposits in the Great Xing'an Range (modified after Wu *et al.* , 2011; Liu *et al.* , 2021)

The numbers corresponding to the deposits are shown in Table 1

地区极为发育,构成了大兴安岭岩浆岩主体。火山岩组合为中-酸性火山岩及火山碎屑岩,侵入岩岩性组合同样为花岗岩类,成岩年龄峰值约150~130Ma(Wu *et al.* , 2011; Ouyang *et al.* , 2015)。该时期岩浆岩的形成可能与古太平洋板块俯冲及板片回撤事件相关(Wu *et al.* , 2011; 许文良等,2019)。Sr-Nd 同位素结果表明该时期岩浆岩存在较多亏损地幔或新生地壳物质的参与,与区内多金属矿化关系密切(Zhou *et al.* , 2012; Chen *et al.* , 2022)。特别地,区内发育数十个Sn多金属、Nb-Ta-Li 矿床及一系列Be 矿化,具有良好的关键金属矿化潜力。

## 2 锂-铍-铌-钽矿床时空分布特点

### 2.1 锂矿床时空分布

大兴安岭锂矿化主要集中在大兴安岭南段(图2),如维拉斯托大型锂锡多金属矿床、石灰窑铌钽矿中伴生的伟晶岩型锂矿化等(Gao *et al.* , 2019; Zhou *et al.* , 2022a)。同时,在大兴安岭邻区加布斯、赵井沟铌钽矿中也伴生有一定规模的锂矿化。维拉斯托Li-Sn 多金属成矿与浅成的石英斑岩有关,锂矿化主要分布在隐爆角砾岩筒中,呈北西向展布。矿区内成岩时代集中,含矿岩体年龄主要为135~140Ma(周振华和毛景文,2022 及其引文),成矿时代跨度较大,不同矿石

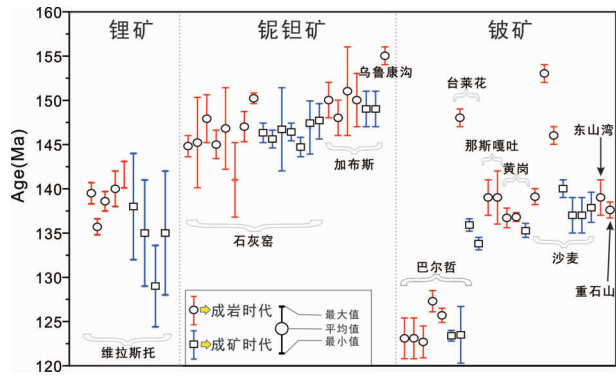


图2 大兴安岭地区锂铍铌钽矿床年代学框架(数据来源于表1)

Fig. 2 Chronological framework of Li-Be-Nb-Ta deposits in the Great Xing'an Range (data from Table 1)

矿物厘定了多期次矿化的特征。如锡石 U-Pb 显示出集中的年龄范围(135 ~ 138Ma, Jiang *et al.*, 2022), 基本与区内石英斑岩成岩时代一致。而辉钼矿 Re-Os 显示出极大的跨度范围(116.6 ~ 135Ma), 可能受到样品 Re、Os 含量较低影响(Gao *et al.*, 2019)。云母类矿物(白云母、铁锂云母) $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄与辉钼矿 Re-Os 年龄具有一定相似性, 分布在121.9 ~ 133.4Ma 的范围内(周振华等, 2019), 显示维拉斯托矿区可能存在多期次的矿化作用。副矿物地球化学特征(如铁锂云母、闪锌矿等)同样指示了区内锡-锂两期矿化特征(Shi *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2021a)。石灰窑含矿岩体淡色花岗岩独居石 U-Pb 年龄主要集中在145Ma 左右(Duan *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2022a), 而淡色花岗岩和含石英英脉中云母的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  坪年龄(146.3  $\pm$  1.1Ma), 接近于铌铁矿 U-Pb 年龄(146.7  $\pm$  4.7Ma)(Zhou *et al.*, 2022a), 揭示了石灰窑晚侏罗世岩浆-热液成矿事件。

在大兴安岭邻区同样有一定规模锂矿化的发现。如华北北缘加布斯 Nb-Ta 矿床目前已查明  $\text{Li}_2\text{O}$  资源量为41415t, 平均品位0.57%, 主要矿石矿物为锂云母, 矿体赋存在黄玉-锂云母花岗岩和锂云母花岗岩中。矿区内可能存在3期成矿作用, 晚侏罗世(~150Ma)、早白垩世早期(~127Ma)为铌钽锂多金属的主成矿阶段, 而早白垩世晚期(~100Ma)成矿作用较弱(Zhang *et al.*, 2022)。赵井沟铌钽锂矿位于内蒙古中部呼和浩特核杂岩体内, 初步估算  $\text{Li}_2\text{O}$  资源量约为21241t, 平均品位0.60%, 主要矿石矿物为锂云母、富锂白云母等(Wu *et al.*, 2020)。含矿岩体为钠长石花岗岩, 其锆石 U-Pb 年龄为125 ~ 127Ma, 独居石 U-Pb 年龄为121 ~ 124Ma, 黑云母 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  坪年龄为124Ma 与134Ma 左右(Wu *et al.*, 2020), 显示出早白垩世成岩成矿与多期次热液作用的特征。

此外, 化探结果显示黑龙江佳木斯地区煤系地层与酸性岩浆岩中锂平均含量为  $47 \times 10^{-6}$ , 可能存在沉积型或火山型锂矿; 内蒙古中东部二连盆地苏尼特左旗-苏尼特右旗锂平均含量达到  $95 \times 10^{-6}$ , 高值采样点显示出类似于盐湖卤水沉

积物的特点(王学求等, 2020); 脑木更苏木地区钠长石化晚侏罗世流纹斑岩内显示较高锂异常值( $800 \times 10^{-6} \sim 1360 \times 10^{-6}$ )(宝音乌力吉等, 2014), 表明大兴安岭地区存在良好的锂矿化潜力。

## 2.2 铍矿床时空分布

近年来对于大兴安岭地区铍资源勘探程度加大, 陆续发现一些铍矿床和矿化点, 例如台莱花、那斯嘎吐等云英岩型铍矿(矿化点)。台莱花含矿岩体二云母花岗岩中锆石 U-Pb 年龄为  $148.0 \pm 1.0\text{Ma}$ , 白云母 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  坪年龄为  $135.9 \pm 0.7\text{Ma}$  和  $133.8 \pm 0.7\text{Ma}$ , 显示了早白垩世成矿事件(孙艺, 2013)。那斯嘎吐铍矿化主要以绿柱石脉分布在云英岩中, 含矿岩体锆石和独居石的 U-Pb 年龄分别为  $140 \pm 1\text{Ma}$  和  $139 \pm 2\text{Ma} \sim 139 \pm 3\text{Ma}$ (吴浩然等, 2022)。碱性花岗岩型主要以巴尔哲 Zr-REE-Be-Nb 矿床为代表, 其岩浆-热液过程约在127 ~ 133Ma, 而成矿时代则集中于125 ~ 120Ma(Qiu *et al.*, 2019)。火山岩型矿化以东山湾、重石山地区为代表, 其赋矿围岩均为高铍含量的酸性火山岩(凝灰岩、流纹岩等), 含矿岩体锆石 U-Pb 年龄分别为  $139.0 \pm 2.0\text{Ma}$  与  $137.6 \pm 0.9\text{Ma}$ (李晓峰等, 2022)。

此外, 部分锡钨矿区岩体中也发现一些铍矿化现象, 有待进一步研究。例如, 沙麦钨矿石英脉中产出一定的绿柱石, 矿区内含矿岩体黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄为  $139.1 \pm 0.9\text{Ma}$ , 成矿时代约137 ~ 140Ma(Jiang *et al.*, 2016); 黄冈 Fe-Sn 矿中发现了日光榴石、绿柱石等富铍矿物(侯晓志等, 2017; 徐思涵, 2021), 其含矿岩体钾长花岗岩与花岗斑岩成岩年龄分别为  $136.7 \pm 1.1\text{Ma}$  和  $136.8 \pm 0.6\text{Ma}$ , 成矿年龄为  $135.3 \pm 0.8\text{Ma}$ (Zhou *et al.*, 2012)。

## 2.3 铌钽矿床时空分布

铌钽矿床在大兴安岭成矿带中零星分布, 矿化类型主要为花岗岩型, 包括过铝质花岗岩型和碱性岩型, 如石灰窑铌钽矿、巴尔哲铌-稀土-铍矿。主要矿物组合为铌钽铁矿-锂云母-锡石等。该类型矿床主要成岩成矿时代为晚侏罗世(图2), 石灰窑与过铝质花岗岩有关的 Nb-Ta 矿的成岩-成矿时代集中在144 ~ 150Ma, 加布斯 Nb-Ta 花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为  $144.3 \pm 0.7\text{Ma}$ (Zhang *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2022a)。此外, 区内台莱花铍矿、巴尔哲铌-稀土-铍矿中也发现了大规模的铌-钽矿化(表1)。巴尔哲碱性花岗岩中赋存  $\text{Na}_2\text{O}_3$  资源量可达30万t, 平均品位约0.24%, 具有较高的开发潜力, 其主要铌钽矿物组合为铌钽矿-烧绿石等, 成矿时代集中在早白垩世(ca. 122 ~ 136Ma)(Qiu *et al.*, 2019)。值得注意的是, 近年来在大兴安岭中北部地区也发现了一批火山岩型 Nb-Ta 矿化点, 如红花尔基、头道桥、防火站北山与乌鲁康沟等地区(毛朝霞等, 2016; 单子凌, 2020; 赵超等, 2021)。这些铌钽矿化点主要位于上侏罗统满克头鄂博组火山碎屑岩中, 主要岩性为碱性流纹岩, 富铌钽矿物主要为烧

表 1 大兴安岭锂-铍-钽矿床主要特征表  
Table 1 Main characteristics of the Li-Be-Nb-Ta deposits in the Great Xing'an Range

序号及矿床	元素组合	类型	主要矿石矿物	赋矿地层	同位素特征	参考文献
1-维拉斯托	Li-Sn-Rb	花岗岩型	铁锂云母、锡石、闪锌矿、黄铜矿	下古生界宝音图组黑云母斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩	硫化物： $\delta^{34}\text{S} = -4.16 \sim +6.09$ , $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.307 \sim 18.369$ , $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.572 \sim 15.589$ , $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.280 \sim 38.339$ ; 全岩： $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.389 \sim 18.862$ , $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.572 \sim 15.589$ , $^{206}\text{Pb}/^{234}\text{Pb} = 38.280 \sim 38.339$ 萤石： $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7090 \sim 0.7108$ ; 独居石： $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +1.6 \sim +2.6$ ; 全岩： $\delta^7\text{Li} = -0.86\text{‰} \sim +0.88\text{‰}$ , $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +0.34 \sim +3.4$	Gao <i>et al.</i> , 2019; 周振华等, 2019
2-石灰窑	Nb-Ta-Rb	花岗岩型	铌钽铁矿、烧绿石、锡石、锂云母	下二叠统林西组板岩	独居石： $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -5.1 \sim -3.2$ ; 全岩： $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.8 \sim -5.1$ , $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -4.7 \sim +5.5$	Zhou <i>et al.</i> , 2022a; Duan <i>et al.</i> , 2021
3-加布新	Nb-Ta-Li	花岗岩型	铌钽铁矿、锂云母	上白垩统白音高老组火山碎屑岩	/	Zhang <i>et al.</i> , 2022
4-防火站北山	Nb-Ta	火山岩型	烧绿石、铁金红石、钛铁矿、黑稀金矿、含钼锆石	下侏罗统满克头鄂博组流纹岩、流纹质晶屑岩屑凝灰岩	/	单子凌, 2020
5-乌鲁康沟	Nb-Ta	火山岩型	烧绿石、铁金红石、钛铁矿、黑稀金矿、含钼锆石	下侏罗统满克头鄂博组流纹质熔结凝灰岩	/	单子凌, 2020
6-头道桥	Nb-Ta	火山岩型	烧绿石	上侏罗统满克头鄂博组火山碎屑岩	/	赵超等, 2021
7-巴尔哲	Zn-REE-Be-Nb	碱性岩型	兴安石、钼钽铁矿、锌日光榴石	中侏罗统呼日格组碱性流纹质晶屑岩屑凝灰岩	全岩： $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.222 \sim 18.464$ , $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.536 \sim 15.549$ , $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.990 \sim 38.238$ , $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +2.25 \sim +3.28$	Su <i>et al.</i> , 2021
8-台莱花	Be-Ta	云英岩型	绿柱石、钼钽铁矿	下二叠统大石寨组安山质凝灰岩	/	孙艺, 2013
9-那斯嘎吐	Be	云英岩型	绿柱石	上二叠统林西组砂板岩、上侏罗统满克头鄂博组火山碎屑岩	独居石： $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.29 \sim +0.95$	吴浩然等, 2022
10-黄岗	Sn-Fe-(Be)	砂卡岩型	日光榴石、海蓝宝石、锡石、磁铁矿、闪锌矿	下二叠统黄岗梁组大理岩	硫化物： $\delta^{34}\text{S} = -6.7\text{‰} \sim +4.5\text{‰}$ , $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.307 \sim 18.369$ , $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.572 \sim 15.589$ , $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.280 \sim 38.339$ ; 全岩： $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.183 \sim 19.239$ , $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.331 \sim 15.583$ , $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.877 \sim 39.316$ , $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.8 \sim +0.9$ ; 锆石： $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +1.9 \sim +18.3$	Zhou <i>et al.</i> , 2012; Mei <i>et al.</i> , 2015
11-碧流汰	Be	伟晶岩型	绿柱石	/	/	/
12-沙麦	W-(Be)	石英脉型	黑钨矿、绿柱石	中-晚侏罗世火山-沉积岩	全岩： $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -1.9 \sim +7.4$ , $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +5.2 \sim +12.8$	Jiang <i>et al.</i> , 2016 及其引文
13-东山湾	W-Sn-Be	火山岩型	绿柱石、辉钼矿、锡石、黑钨矿	下二叠统黄岗梁组变质砂岩、凝灰质砂岩	/	李晓峰等, 2022
14-重石山	Mo-Be	火山岩型	绿柱石、辉钼矿	上侏罗统库力组流纹质凝灰岩	/	李晓峰等, 2022



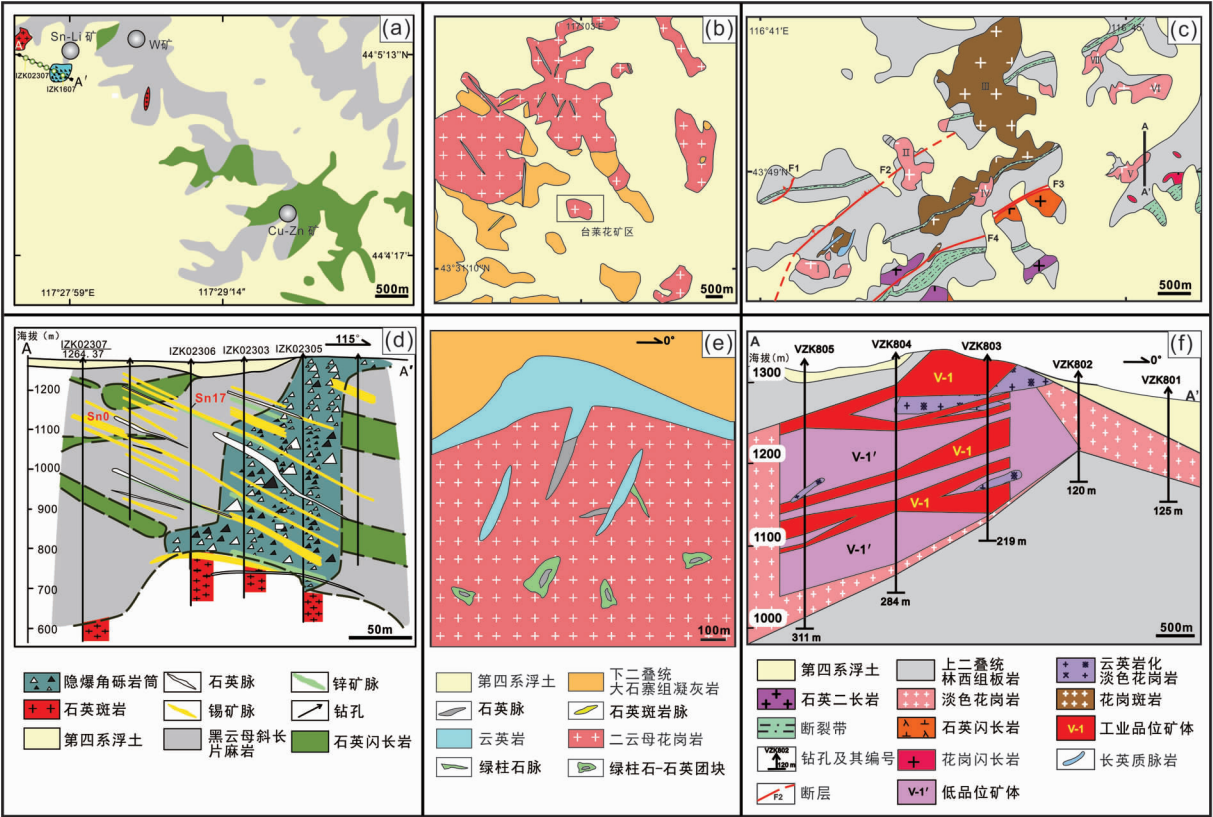


图3 大兴安岭典型锂铍铌钽矿床地质图(a-c)及其钻孔剖面图(d-e)  
(a,d)维拉斯托锂矿(据 Gao *et al.*, 2019 修改);(b,e)台菜花铍矿(据孙艺,2013 修改);(c,f)石灰窑铌钽矿(据 Zhou *et al.*, 2022a 修改)  
Fig. 3 Geological maps (a-c) and drill profiles (d-e) of typical Li-Be-Nb-Ta deposits in the Great Xing'an Range  
(a, d) Weilasituo Li deposit (modified after Gao *et al.*, 2019); (b, e) Tailaihua Be deposit (modified after Sun, 2013); (c, f) Shihuiyao Nb-Ta deposits (modified after Zhou *et al.*, 2022a)

绿石,并且在锡石、金红石和磁铁矿中极其富集铌钽元素,指示了该地区良好的勘探开发前景。年代学研究表明其成岩成矿时代为155Ma左右(单子凌,2020)。

总体上,大兴安岭成矿带上锂-铍-铌-钽矿床主要位于在大兴安岭南段西坡、中北段地区,成矿主要为三期:晚侏罗世(155~145Ma)、早白垩世早期(140~135Ma)、早白垩世中晚期(125~120Ma)(图2)。晚侏罗世矿化对应于古太平洋板块低角度俯冲背景下的大陆边缘弧后伸展背景,以发育于高分异I型或S型花岗岩中的矿化为特点;而早白垩世矿化与区域上大规模岩石圈减薄和克拉通破坏有关,以大量A型碱性花岗岩体及其有关Li-Nb-Ta矿化为特点(邵济安等,2010;许文良等,2019)。

### 3 典型矿床基本特征

#### 3.1 维拉斯托锂多金属矿床

维拉斯托花岗岩型Li-Sn多金属矿床的发现是近年来我国北方地区锂矿找矿的重大突破之一。目前已探明Li<sub>2</sub>O资源量35.7万t,平均品位1.25%;Sn金属量为8.98万t,平均

品位0.8%,其他伴生的矿产资源有锌(1.82万t,平均品位2.6%)与钨(1.27万t,平均品位1.42%)(Zhu *et al.*, 2021a)。矿区内褶皱和断裂构造发育,包括一系列NE向挤压褶皱构造,走向变化不大,沿倾向变化较大。近E-W向的压扭性断裂为区内主要的容矿构造,严格控制着矿区矿体的分布及矿体规模(Shi *et al.*, 2021)。主要出露的地层包括下古生界宝音图组与第四系沉积覆盖物,局部出露少量石炭纪石英闪长岩、二叠纪变质粉砂岩。其中下古生界宝音图组黑云斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩分布范围较广,为区内主要容矿围岩(Gao *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2021a)。矿区侵入岩主要包括石英闪长岩与石英斑岩(图3a),其中石英斑岩为主要含矿岩体,其主体隐伏于矿区深部。石英斑岩顶部与似伟晶岩壳接触,向上发育隐爆角砾岩筒(图3d),其内部极为发育铁锂云母(祝新友等,2016;Gao *et al.*, 2019;周振华等,2019)。维拉斯托矿床中锂主要呈:(1)与浅部石英脉型锡矿共(伴)生产出;(2)以胶结物形式分布在隐爆角砾岩筒中(李泊洋等,2018)。尤以后者为锂资源主要赋存形式,其矿体边界不明显,基本由品位圈定,角砾岩筒内伴生Sn-Mo等成矿元素。矿区内矿石矿物包括锂云母、铁锂云母、锡石、黑钨矿、闪锌矿、铁闪锌矿和斜方砷铁矿,含有少量黄铜矿、

黝铜矿、磁铁矿、辉钼矿、方铅矿等。

### 3.2 台菜花铍多金属矿床

台菜花云英岩型矿床位于内蒙古克什克腾旗境内, 铍矿体主要以不规则绿柱石脉产出, 其 BeO 资源量为 2600t, 平均品位约 0.4%, 同时该矿床同时伴有少量 Nb-Ta 矿化 ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$  约 59.4t,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  约 77.4t, 平均品位 0.014%)。含矿岩体主要为二云母花岗岩, 呈椭圆形展布, 出露面积约 0.3km<sup>2</sup> (图 3b)。矿区内主要发育两组断裂构造, 分别为 NE 向压扭性断裂与 NW 向张扭性断裂, 它们控制着区内岩浆岩与矿体的形态展布。区内地层主要为大石寨组安山质凝灰岩与第四系。岩浆岩主要包括二云母花岗岩、斑状花岗岩与云英岩, 其中二云母花岗岩出露面积广, 主要矿物包括黑云母、白云母、钾长石、钠长石与石英, 副矿物包括少量钛铁矿、锆石、锡石等, 岩体内部可见少量暗色镁铁质包体。斑状花岗岩产于岩体中心顶部, 斑晶为碱性长石与石英, 基质主要为钠长石、白云母, 副矿物可见锡石、萤石、石榴石等。云英岩呈厚壳状产出二云母花岗岩顶部, 少量呈脉状产于斑状花岗岩岩体内 (图 3e)。三种岩相呈过渡的接触关系 (孙艺, 2013)。蚀变类型主要包括钠长石化、白云母化、电气石化等, 其中铌钽矿化与钠长石化关系密切, 整个岩体自东向西钠长石化与铌钽矿化均呈现由弱至强的趋势。铍矿化集中于整个岩体东南部, 根据绿柱石脉穿插于钠长石化的铌钽矿体上判断出铍矿化晚于铌钽矿化。矿石矿物较为单一, 包括铌铁矿与绿柱石 (孙艺等, 2012; 孙艺, 2013)。

### 3.3 石灰窑铌钽多金属矿床

石灰窑花岗岩型 Nb-Ta-Rb 多金属矿床位于大兴安岭南段西坡地区, 目前已探明  $\text{Rb}_2\text{O}$  资源量 87 万 t, 平均品位 0.55%,  $\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Ta}_2\text{O}_5$  资源约 12400t, 其中  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  与  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  平均品位分别为 0.01% 与 0.013% (杜青松等, 2018)。矿区出露地层简单, 主要为下二叠统林西组粉砂质板岩、变质粉砂质泥岩与第四系覆盖物 (图 3c)。矿区褶皱和断裂构造发育, 表现为大型 NE 向断裂 (F1、F2、F4) 与小型 NW 向断裂 (F3)。控矿构造主要为 3 条 NE 向平行挤压断裂带 (长 0.5 ~ 9.7km, 宽 30 ~ 220m), 侵入岩体沿着这些断裂带展布 (Zhou *et al.*, 2022a)。矿区内侵入岩主要为二叠纪花岗闪长岩与侏罗纪石英二长岩、石英闪长岩、花岗斑岩、淡色花岗岩。它们的分布和产出形态严格受 NE 向断裂带控制, 呈现为岩株状、岩脉状。与成矿有密切关联的岩体为花岗斑岩与淡色花岗岩, 其中花岗斑岩 (#III) 出露面积较大, 但其矿化较弱, 而淡色花岗岩出露面积小、矿化规模强, 尤以 #V 岩体为代表, 其铌钽矿体长 94.5 ~ 1140m, 延深 40 ~ 590m (图 3f)。矿区内脉岩较发育, 主要出露于岩浆岩体周围。其规模一般长 10 ~ 500m, 宽 1 ~ 20m, 主要岩脉有石英脉、伟晶岩脉、花岗细晶岩脉、辉绿岩脉、正长斑岩脉等, 形态同样受断裂构造控制, 呈现为 NE 向、NNE 向与 NW 向, 多数沿裂隙贯入

(Duan *et al.*, 2021)。主要矿石矿物有铌钽铁矿、铁锂云母、黑钨矿、锡石等, 脉石矿物包括石英、萤石、钠长石等。

## 4 大兴安岭锂铍铌钽矿床成矿规律

### 4.1 成矿机制

#### 4.1.1 花岗岩型

花岗岩与成矿的关系历来是最受关注的重要科学问题之一, 在稀有金属花岗岩中关键金属矿物常呈浸染状或细脉状分布, 岩体中关键金属含量达到工业品位即可开采与利用。因而具有岩体即为矿体的独有特征, 如法国中央地块北部的 Beauvoir 岩体、我国华南地区的雅山复式岩体等 (Pollard, 2021)。目前对于该类型矿床关键金属元素的富集机制仍存在争议。一方面, 锂铍铌钽作为不相容元素逐渐富集在岩浆演化晚期乃至热液阶段 (Linnen *et al.*, 2014), 高分异花岗岩通常显示出这些关键金属元素的成矿专属性 (吴福元等, 2017)。而另一方面, 热液流体的蚀变交代作用同样对关键金属元素有着决定性作用, 如雅山岩体在分异晚期出溶的岩浆流体在 Nb、Ta 成矿, 乃至铌钽铁矿的溶解-再沉淀过程中扮演着不可替代的角色 (Huang *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2015)。因而对于该类型矿化的主要成因仍需进一步探究。

大兴安岭地区花岗岩型矿化以锂、铌钽矿化为主, 其成矿岩体组合为淡色花岗岩-锂云母花岗岩等, 暗色矿物含量低, Li-Nb-Ta-Sn-W 矿化发生在岩体顶部。地球化学特征上, 这些成矿岩体具有较低的 Nb/Ta 比、Zr/Hf 比与较高的 Rb/Sr 比 (图 4a, b), 类似于华南与喜马拉雅地区稀有金属花岗岩, 具有高分异演化特征。另外, 在这些花岗岩型稀有金属矿床中可见大量云母类 (白云母、铁锂云母) 矿物, 显示原始熔体富集的  $\text{F}^-$  与  $\text{OH}^-$  等助熔剂特征, 不仅有利于岩浆进一步分异演化 (Manning, 1981; London *et al.*, 1993), 也有助于熔体中非桥氧数增加, 提高了熔体中铌钽等金属阳离子的溶解度 (Mysen *et al.*, 1981)。并且鉴于铌、钽在流体与花岗质熔体中极低的分配系数与锂的强流体活动性特征, 这些关键金属元素易于富集在晚期熔流体中 (London *et al.*, 1988)。

然而, 这些花岗岩型矿床的成矿岩体都显示出一定程度的热液作用。大部分含矿岩体 Nb/Ta 比低于 5, 指示可能经历了热液过程的发生 (Ballouard *et al.*, 2016)。维拉斯托萤石微量元素与锡石 LA-ICP-MS 微区扫描结果均显示出多期流体出溶作用或水-岩反应过程 (Zhou *et al.*, 2022b; Gao *et al.*, unpublished data), 尤其是水岩反应过程不仅促成了区内大面积铁锂云母的形成, 也同时促进了锡石的沉淀析出 (Zhou *et al.*, 2022b)。同样, 石灰窑铌钽矿中发现有产于热液萤石和伊利石-蒙脱石混层中的铌钽铁矿, 为富钽流体随热液迁移提供了最直接的矿物学证据 (Zhou *et al.*, 2022a), 表明富钽流体交代作用对石灰窑铌钽矿化起到了重要作用。华南雅山花岗岩型铌钽矿体中也有着类似的现象, 雅山岩体中岩浆成因的铌钽锰矿受到了外部流体的交代, 在片状白云

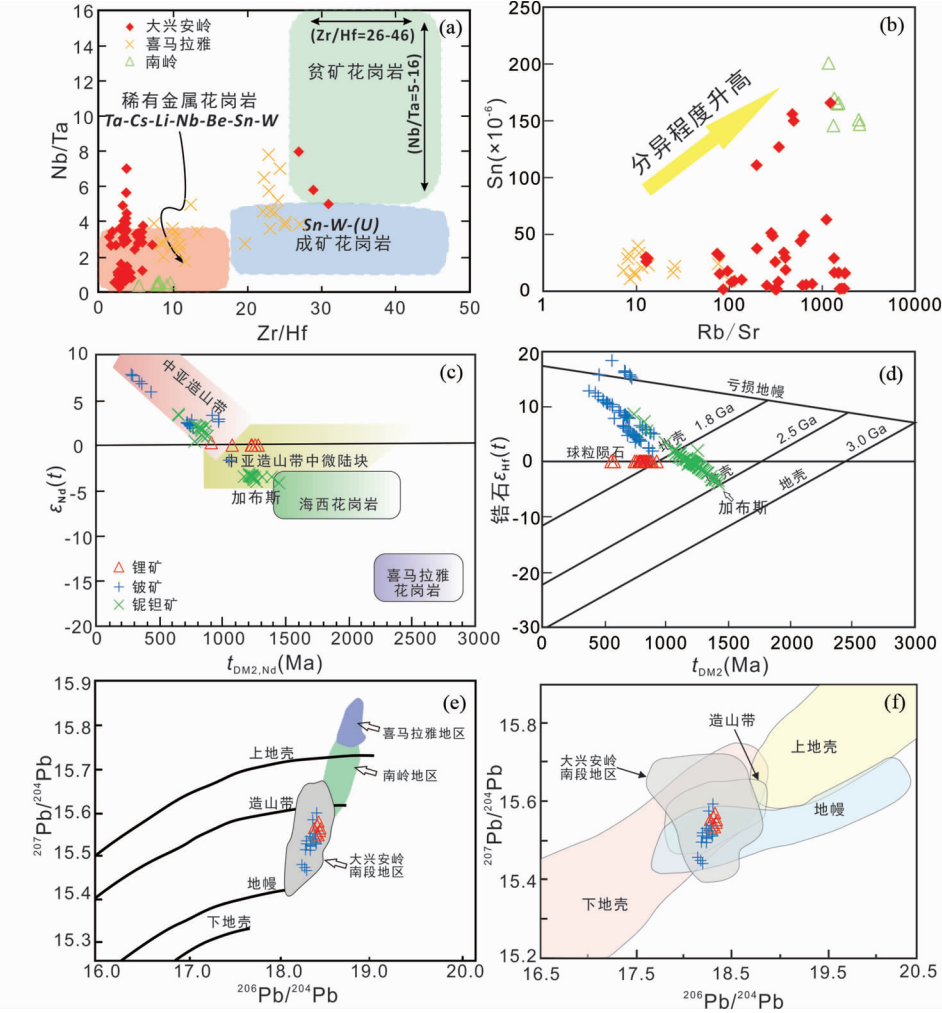


图4 成矿岩浆特征与成矿物质来源图解  
(a,b)花岗岩型矿床岩浆分异演化;(c,d)大兴安岭锂铍铌钽矿床物质来源图解;(e,f)硫化物 Pb 同位素图解. 数据来源: Ouyang *et al.* , 2015;Gao *et al.* , 2019;张天福等,2019;高利娥等,2021;赵俊兴等,2021;Su *et al.* , 2021;Duan *et al.* , 2021;Pollard, 2021;Zhang *et al.* , 2022 及其引文

Fig.4 Diagrams of characteristics and sources of ore-forming magmas  
(a, b) magmatic fractionation and evolution of granitic-type rare metal deposits; (c, d) source diagrams of diagenetic materials of Li-Be-Nb-Ta deposits in the Great Xing'an Range; (e, f) diagrams of lead isotopic compositions of sulfides. Data source: Ouyang *et al.* , 2015;Gao *et al.* , 2019; Zhang *et al.* , 2019;Gao *et al.* , 2021;Zhao *et al.* , 2021;Su *et al.* , 2021;Duan *et al.* , 2021;Pollard, 2021;Zhang *et al.* , 2022 and references therein

母中形成成分环带,显示可能存在富 Cs 流体的交代影响 (Wang *et al.* , 2004)。大吉山 W-Ta-Nb 矿床中可见次生热液成因的铌锡矿化同样指示了热液交代作用的重要性 (Wu *et al.* , 2018)

综上所述,本文认为大兴安岭地区花岗岩型稀有金属矿床是岩浆极端分异演化与后期热液流体作用 (交代、水-岩反应等) 共同作用的结果,并且热液作用可能发挥更为关键的作用。

4.1.2 火山岩型

火山岩型稀有金属矿床近年来得到了较多重视与研究。Yardley (1994) 提出火山岩型稀有金属矿化可能是稀有金属

矿床的一种重要类型。大兴安岭地区存在多矿种组合的火山岩型矿化,以铍为主,并在中北段可见一定规模的铌钽矿化。火山岩型矿化具有区别于其他类型矿化的显著特点,具体如:(1)赋矿岩石主要为火山-次火山岩,稀有金属元素在火山作用、岩浆作用以及火山-热液过程富集;(2)岩体产于拉张环境,如大陆裂谷、后碰撞等陆内伸展背景;(3)受后期富挥发分热液交代蚀变作用,赋矿岩石具有良好的地球化学蚀变晕;(4)矿化点周围可见萤石矿床,说明热液流体富氟特征及其对成矿的关键影响;(5)与关键金属元素共伴生其他元素同样具有较高的利用价值等一系列特征 (Foley *et al.* , 2012; 李晓峰等,2022)。以著名的火山岩型铍矿 Spor Mountain 为例,主要含铍矿物羟硅铍石赋存于黄玉流纹岩之



下的含碳酸盐岩角砾蚀变流纹质凝灰岩层位中,与萤石紧密共生。铍主要经历岩浆过程与热液过程两阶段富集,尤以后期热液过程对金属元素富集起着关键作用(Foley *et al.*, 2017; 饶灿等, 2022b)。流纹岩火山玻璃中铍含量可达  $40 \times 10^{-6} \sim 43 \times 10^{-6}$ , 暗示岩浆阶段铍已具有较高的初始含量(Dailey *et al.*, 2018), 而热液蚀变火山岩局部铍含量可高达  $3600 \times 10^{-6}$  (饶灿等, 2022a), 表明后期热液过程使得铍数倍乃至数十倍的富集, 这些蚀变热液活动可能是多期次、具有不同来源的(Zhu *et al.*, 2021b)。

最近, 李晓峰等(2022)报道了大兴安岭地区东山湾、重石山等钨锡铍矿床(矿化点), 尽管其赋矿层位并不是火山岩, 但矿体周围可见一系列火山岩出露, 表明了火山岩型矿化的可能。此外, 在大兴安岭北段海拉尔-额尔古纳地区显示出极为良好的铍地球化学异常(王学求等, 2020), 尤其在海拉尔盆地北缘与钨矿、萤石矿和铀矿有关的蚀变流纹质凝灰岩中发现羟硅铍石等富铍矿物。岩浆型铍矿床中铍含量与氟含量显示出近似的正相关性(Barton and Young, 2002 及其引文), 暗示两者络合运移的可能性。这些火山岩型铍矿化与富氟流体的蚀变交代有着紧密联系。在这些酸性火山岩岩浆中铍以阳离子与  $F^-$  等阴离子结合运移, 并逐渐富集在晚期热液流体中。在成矿阶段, 热液与围岩反应导致萤石等富氟矿物结晶析出, 而该过程中铍氟络合物失稳分解使得其释放出与硅酸盐离子结合, 形成羟硅铍石、硅铍石等硅酸盐铍矿物。这样的溶解-再分配过程是火山岩型铍矿的主要形成机制(Lindsey, 1977; Foley *et al.*, 2012)。

火山岩型铌钽矿化是较为少见的铌钽矿化类型, 在大兴安岭中北段防火站北山及周边地区可见该类型部分发育。主要赋矿岩石为流纹质熔结凝灰岩、碱性流纹岩, 其中  $Nb_2O_5$  品位可达 0.03% 以上, 最高可达 0.06% 以上, 达到或超过了 0.02% 的工业品位(单子凌, 2020)。除了烧绿石外, 磁铁矿、铁金红石和锆石中铌钽含量较高, 铌钽主要以类质同象形式赋存在矿物晶格中(晋瑞香, 2018; 单子凌, 2020)。目前对其研究较少, 对该类型矿化的成因有待进一步研究。

#### 4.1.3 云英岩型

云英岩型矿化在大兴安岭地区以台菜花、那斯嘎吐等铍矿化为代表, 该类型矿化主要产出矿石矿物为绿柱石, 它们呈脉状分布在云英岩中。含矿岩体具有高分异、强烈的稀土元素四分组效应等特征, 表明岩浆高分异演化与熔体-流体相互作用是云英岩型铍矿化超常富集的重要因素。这也得到了流体包裹体(孙艺等, 2012)和独居石微区组成(吴浩然等, 2022)的佐证。此外, 野外地质现象可见该类型矿床中云英岩矿化与萤石化有着密切联系, 表明含氟流体在铍元素富集运移过程中可能发挥了重要作用(孙艺, 2013; 吴浩然等, 2022)。在酸性的花岗质岩浆中, 铍主要以阳离子形式存在, 与  $F^-$  结合以铍氟络合物在熔体中运移与富集(Černý *et al.*, 2005)。而后期热液蚀变如萤石化、沸石化和蒙脱石化使得岩浆中氟以黄玉、萤石等形式沉淀, 残余流体中的氟活度降

低, 引起体系中铍氟络合物失稳, 进而造成富铍矿物的形成与铍的异常富集(Foley *et al.*, 2012)。

#### 4.1.4 其它类型

大兴安岭南段发育大规模的锡钨和稀土矿化(Ouyang *et al.*, 2015; Mao *et al.*, 2019), 在这些矿床中伴生一定规模的铍、铌钽矿化, 主要类型为碱性岩型与矽卡岩型。碱性岩型矿化以巴尔哲 Be-REE-Zr 矿为代表, 铍、铌与矿区内稀土元素同时富集和沉淀, 与含矿岩浆分异演化有着密切关联(Yang *et al.*, 2020)。牛贺才等(2008)和杨武斌等(2011)通过熔流体包裹体研究指出, 碱性花岗质岩浆高度分异演化控制着稀有稀土元素的成矿。早期形成的含铍矿物在熔体-流体的相互作用下释放出铍, 在碱性环境中, 铍常与碱性(土)金属结合成络阴离子在熔体中运移, 而晚期热液蚀变过程使得铍络合物富集成矿(Qiu *et al.*, 2019), 矿石矿物以碱性的铍硅酸盐矿物为主, 如兴安石、硅铍钨矿等。岩相学观察同样显示出晚期结晶的钠长石交代早期结晶的钾长石、钠铁闪石交代霓辉石、独居石交代兴安石、兴安石与次生霓石共生等一系列现象, 均指示了晚期富钠流体交代作用对于成矿的重要作用(Yang *et al.*, 2020; Weng *et al.*, 2021)。类似的情况在美国科罗拉多地区的过碱性 Pikes Peak 岩基与加拿大 Strange Lake 均普遍存在(饶灿等, 2022b)。因此, 热液交代过程同样是碱性岩型矿化的主要原因。

矽卡岩型矿化是花岗质岩浆与围岩碳酸盐岩的高温蚀变交代过程而导致成矿元素的富集。成矿过程与花岗岩分异的热液性质与所侵入的碳酸盐岩关系密切, 成矿矽卡岩常分布在侵入体周围。大兴安岭地区矽卡岩型铍矿化以黄岗铍矿化点为代表(表 1), 其富铍矿物种类繁多, 已报道发现的有海蓝宝石、符山石、日光榴石等。铍主要以类质同象替换的形式赋存在矿物晶格中, 如符山石、日光榴石中铍替代硅。此外, 矿区中靠近矽卡岩矿化带的砂岩铍含量较高(约  $31.7 \times 10^{-6}$ ), 表明铍的形成不仅与侵入岩浆有关, 砂岩也可能作为物源提供部分成矿物质(侯晓志等, 2017)。但是, 矽卡岩型铍矿中铍矿物较分散, 开发利用难度大(饶灿等, 2022a)。如黄岗的日光榴石, 其内含有细粒胶状铁的混染影响(含量可高达 20.48%), 在分选过程中极难筛选出铍, 类似的情况在黄岗锡石中同样可见。目前黄岗仍主要作为铁矿开采利用。

#### 4.2 物质来源

晚古生代以来大兴安岭地区经历了复杂的多重板块构造体制, 广泛发育 A 型花岗岩与高分异 I 型花岗岩(Wu *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2018)。这些花岗岩普遍具有较低的  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 、正  $\epsilon_{Nd}(t)$  值与年轻的 Nd 模式年龄, 与中亚造山带的花岗岩非常相似, 表明区内大部分晚中生代花岗岩可能是新生陆壳部分熔融的产物, 并且幔源岩浆的影响十分明显(Wu *et al.*, 2002, 2003; 邵济安等, 2010), 显著区别于具有负  $\epsilon_{Nd}(t)$  值、古老 Nd 模式年龄的海

西花岗岩和喜马拉雅稀有金属花岗岩。相比于中亚造山带内其他花岗岩类,稀有金属花岗岩具有更老的 Nd 模式年龄与更低的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值,部分样品(如维拉斯托)甚至具有负  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(图 4c),显示可能存在少量古老地壳的混染作用(邵济安等,2010)。此外,全岩 Nd 同位素数据指示了巴尔哲和石灰窑成矿花岗岩具有较高的幔源比例,显示了该区晚中生代强烈的壳幔相互作用(Duan *et al.*, 2021; Su *et al.*, 2021)。

由于在热液流体作用过程具有稳定性,独居石 Nd 同位素和锆石 Hf 同位素常被用作示踪岩浆来源。大兴安岭地区锂铍铌钽矿床独居石  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于  $-0.3 \sim +2.6$ , 暗示其源区具有古老地壳与新生地壳的混合的特征(Wu *et al.*, 2003)。锆石 Hf 同位素的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值大部分介于  $0 \sim +12$ , 位于球粒陨石和亏损地幔演化线之间(图 4d), 一般来说,正  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值被认为是亏损地幔或亏损地幔源新生陆壳部分熔融的特征。这些样品显示出较大跨度范围的二阶段 Hf 模式年龄(377 ~ 921 Ma), 多数集中在新元古代。综上,本文认为大兴安岭地区的锂铍铌钽成矿花岗岩是新元古代的新生地壳物质部分熔融的产物,在随后的岩浆侵位运移过程中经历了强烈的分异作用。

锆同位素是探讨成矿物质来源的有效手段,大兴安岭锂铍铌钽矿床硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  大致位于  $-5\text{‰} \sim +5\text{‰}$ (表 1), 显示出与花岗质岩浆有着密切联系。类似地,通过对矿石铅同位素组成的分析可以逆推源区的 U-Th-Pb 体系特征,从而获得有关成矿物质来源的信息。在  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  与  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  关系图解中投影点也分布于地幔与上地壳演化线之间,整体位于壳幔混合或造山带的构造环境,且与大兴安岭南段其他矿床铅同位素范围一致(图 4e,f), 显示出幔源物质在大兴安岭南段晚中生代成矿过程中发挥的重要作用(Ouyang *et al.*, 2015)。He-Ar 同位素的研究结果显示,大兴南岭地区稀有金属矿床成矿流体的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值(平均值为 4.16 Ra)远高于华南地区(平均值为 1.23 Ra)与喜马拉雅地区(平均值小于 0.1 Ra), 同样显示出强烈的地幔流体参与比例(翟伟等, 2018; 周振华和毛景文, 2022)。在晚中生代伸展背景下,幔源岩浆底侵作用使得大兴安岭地区成岩成矿过程中均有幔源物质的混入。并且这些幔源组分在稀有金属花岗岩的形成过程中可能有着重要作用(Jahn *et al.*, 2000; Su *et al.*, 2021)。

#### 4.3 成矿模式

如前所述,大兴安岭锂矿的形成与高分异岩浆和水-岩反应相关,维拉斯托锂矿化主要产于热液隐爆角砾岩筒内。因而理解与流体作用有密切关联的隐爆角砾岩筒的形成过程,对阐明矿区内锂矿的成矿机制有着重要作用。从高分异含矿熔体中分离出的富挥发分流体逐渐向上运移,并逐渐聚集于围岩裂隙与岩体破碎带中,当压力达到临界时发生爆裂形成局部破碎带。在多次反复的作用下最终形成了大规模

的隐爆角砾岩筒(李泊洋等, 2018; Shi *et al.*, 2021)。而岩筒内大量黄玉、萤石与铁锂云母共同产出暗示含矿热液富氟特征。围岩锡林郭勒杂岩的主要组分为黑云母片麻岩、斜长角闪片麻岩(Li *et al.*, 2017), 其铁锂云母富集 Sn、Li、Rb、Cs 等金属元素( $\text{Li}_2\text{O}$  平均含量为 4.36%, Sn 平均含量达到  $136 \times 10^{-6}$ , Gao *et al.*, 2019)。倘若锡林郭勒杂岩作为深部成矿源岩,其部分熔融产生的初始成矿岩浆即具有较高的 Li、Sn 含量(如王京彬等, 2005); 若深部并不存在这样的源区,那么此时锡林郭勒杂岩作为围岩,通过流体交代、水岩反应等过程使得成矿热液得以萃取成矿元素。正如 Zhou *et al.* (2022b) 所述,水岩反应可能是黑云母转换为铁锂云母的重要方式。因而在大兴安岭这样锂地球化学背景值较低的区域,通过水岩反应产生的锂矿化可能是锂矿主要的成矿模式。

此外,在石灰窑、加布斯铌钽矿内也可见伟晶岩型锂矿化,它们是岩浆演化至最晚期的结果,呈脉状沿断层、裂隙等构造贯入或侵入。一般认为 LCT 型伟晶岩型矿化是钙碱性花岗岩高度演化的产物,是来自于深部熔体向上运移分异的结果,逐步产生黑云母花岗岩-二云母花岗岩-白云母花岗岩-伟晶岩的岩相分带,也因此产生相应的 Be-Be/Nb-Ta-Be/Nb-Ta/Li 矿化分带与演化轨迹(Shearer *et al.*, 1992)。因而在大兴安岭地区锂矿成矿模式主要为两种:(1)隐爆角砾岩型;(2)伟晶岩型。它们都与高分异岩浆演化及热液流体交代作用相关(图 5a)。前者成因与围岩条件有着密切联系,先存围岩富 Li 为后续的运移活化提供重要条件;而后者则在区域内较为少见,可能受控于多因素(详见下文讨论)。

大兴安岭地区发育多类型铍矿化,其中岩浆高分异演化、晚期富 Na、F 热液蚀变及引发的含铍矿物溶解-再沉淀是铍元素得以富集运移的主要原因。富铍岩浆及热液在不同构造位置,或与围岩作用,或由于原岩浆性质差异而形成不同类型铍矿化(图 5b)。多数铍矿与长英质岩浆出溶热液作用相关,如云英岩型、矽卡岩型与火山岩型等。这几类矿化最显著的特点是与富氟、硼热液蚀变相关,矿石矿物以绿柱石、硼酸盐矿物与铍氧化物为主,可见一定规模萤石与矿化共生(Barton and Young, 2002; 饶灿等, 2022a)。大兴安岭地区已探明铍矿化以云英岩型为代表(台莱花、那斯嘎吐),而伟晶岩型、花岗岩型铍矿化则与岩浆作用有密切联系。简单地说,在深侵位部位经过快速冷却易于形成花岗伟晶岩,通常作为 LCT 型稀有金属花岗岩伴生矿产;如若侵位深度较浅,并且岩浆经历了长期的分异演化,则易于形成花岗岩型铍矿(李建康等, 2017)。此外,火山岩型与碱性岩型矿化同样是区内主要矿化类型,地球化学背景值显示出大量地球化学异常,具有良好的勘探前景(王学求等, 2020)。火山岩型铍矿床受控于酸性火山岩和火山机构,与火山岩的内外接触带是矿化的主要产出部位。如前所述,矿化主要经历岩浆-热液两阶段富集。而碱性岩型矿化主要产于地台区边缘的深大断裂周围,主要作为 NYF 型稀有金属花岗岩伴生矿产。

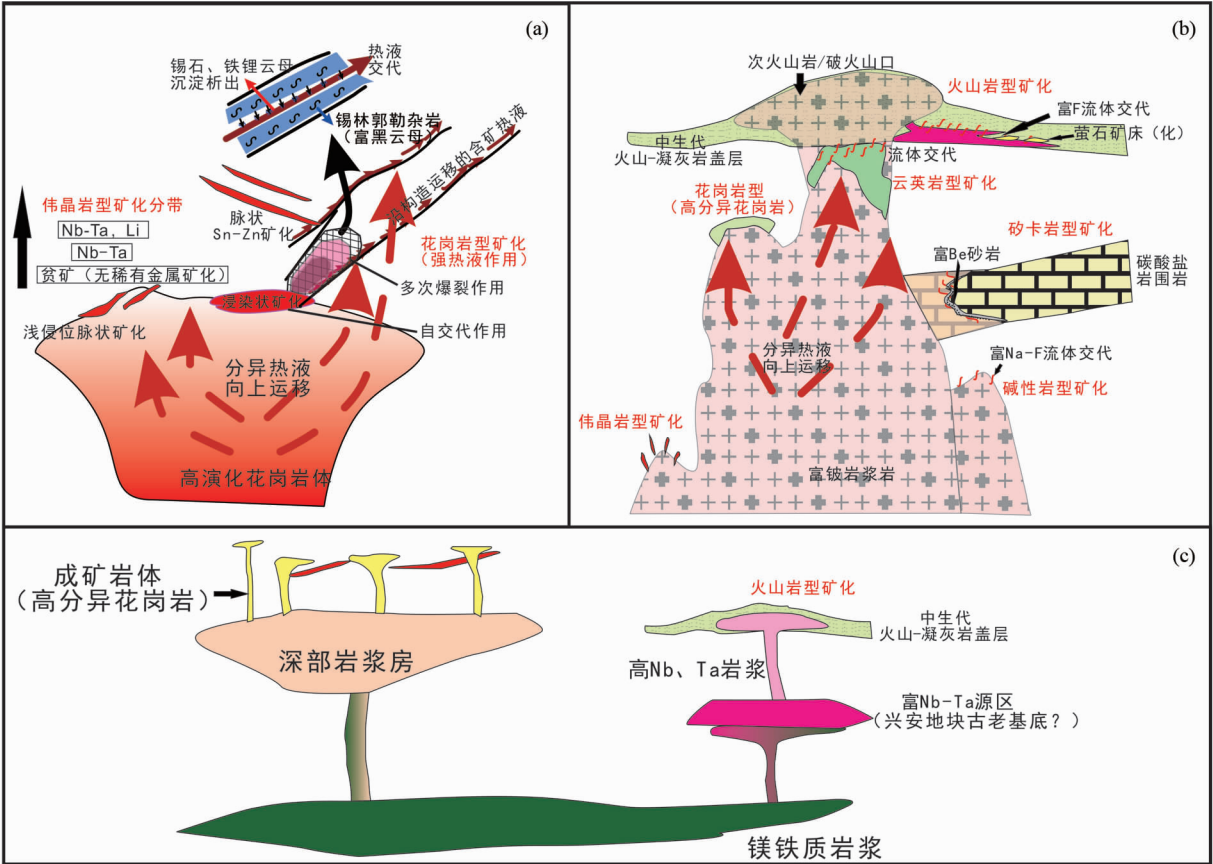


图5 大兴安岭地区锂铍钽铌成矿模式图(据 Gao *et al.* , 2019; Barton and Young, 2002 修改)

(a) 锂矿; (b) 铍矿; (c) 钽铌矿

Fig. 5 Metallogenic models of Li-Be-Nb-Ta deposits in the Great Xing'an Range (modified after Gao *et al.* , 2019; Barton and Young, 2002)

(a) lithium deposit; (b) beryllium deposit; (c) niobium-tantalum deposit

岩浆的高分异、后期流体的交代作用对矿化形成有着关键作用(饶灿等,2022b)。

钽铌矿化在大兴安岭地区同样具有多类型特征,以花岗岩型与火山岩型为主要代表。花岗岩型钽铌矿主要是由于岩浆极端分异演化(图4a)与后期富钽含水硅酸盐流体交代作用共同制约(图5c)。而对火山岩型钽铌矿相关报道较少,目前仍在勘查阶段,对其成因机制仍认识不足。含矿岩体碱性流纹岩中富钽铌矿物主要为金红石、磁铁矿、钛铁矿等,岩石  $Ce_N/Ce_N^*$  的正异常也暗示其源岩可能为陆源的变砂岩或是泥岩(晋瑞香,2018),在早期风化过程中 Nb、Ta 趋向富集于水解沉积物中,富钽铌的源区部分熔融形成的岩浆喷出可能是形成高钽铌火山岩的重要原因。

5 资源展望与找矿方向

最近,杨文采等(2020<sup>①</sup>)通过地球物理探测,发现大兴安岭中南段多金属矿矿集区深部地幔内存在低速、高导异常体等深部地球物理新证据,暗示区域内强烈的壳幔相互作用。

用。上涌的软流圈物质引起先存锡林郭勒富锂复理石盆地基底部分熔融,使得大兴安岭南段地区为锂等稀有矿床成矿有利地区。如前所述,维拉斯托超大型锂锡矿的形成与含矿岩浆的高分异演化、围岩为富锂、锡等成矿元素的锡林郭勒杂岩有密切联系。因而,区域上锂矿找矿勘察应围绕锡林郭勒杂岩体及其周边地区,特别是已有高分异花岗岩出露的地区有较好的稀有金属矿化潜力。Duan *et al.* (2020)在维拉斯托锂锡多金属矿外围的磨盘山、北大山岩体中均发现其具有稀有金属成矿的潜力,其中,磨盘山岩体电气石显示出高钽特征( $918 \times 10^{-6} \sim 2172 \times 10^{-6}$ ),并且可见多条锡石-硫化物脉与锡石-石英脉;北大山岩体与维拉斯托成矿斑岩体相似,同样具有高分异演化与壳幔混源特征(武广等,2021),并且在岩体顶部发现一定规模的富云母云英岩脉、含电气石-萤

① 杨文采,苏美霞,杨波,吴艳君,王勤燕,郭广飞,颜萍,孟晓玲,王华军,李新仁,许立权,武利文,张梅,郭灵俊,刘颖. 2020. 内蒙古北山-西拉木伦构造带深部构造与成矿预测研究. 内蒙古自治区地质调查院. 内部报告

石-绿柱石-石英脉、含锡电气石隐爆角砾岩等,具有良好的稀有金属矿化潜力(管育春等,2017)。章培春等(2022)最近报道大兴安岭南段的海流特岩体具有高分异演化与明显的熔-流体相互作用特征,表现出一定规模的伟晶岩型、云英岩型的Li-Nb-Sn矿化,岩体具有一定成矿远景。

大兴安岭南段目前已发现的铍矿化包括碱性岩型、矽卡岩型、云英岩型、伟晶岩型、火山岩型,相对而言,碱性岩型与火山岩型铍矿可能是区内今后更需要关注的重点。碱性岩型铍矿并不需要岩浆经过高分异演化,晚期熔流体作用使得铍的活化再分配是其主要富集成矿机制(Barton and Young, 2002; 饶灿等,2022a),广泛大规模的热液蚀变可能是碱性岩体富铍的标志。我国碱性岩靠近深大断裂带呈线型展布,主要赋存于裂谷、或地幔隆起的拉张环境(饶灿等,2022b),与被深大断裂所围起来的大兴安岭南段地区极为符合。因而本研究认为大兴安岭地区,尤其是南段周围具有良好的碱性岩型矿化。另外,鉴于大兴安岭地区火山岩与Spor Mountain火山岩具有一定相似性,因而该地区也可能具有较高的火山岩型矿化潜力。大兴安岭晚中生代期间处于古太平洋板片俯冲回撤的伸展环境中,大量发育的中生代高分异花岗岩-碱性火山岩和次火山岩(高硅流纹岩-花岗斑岩),构成典型的花岗质火山-侵入杂岩,具有与富Be花岗岩/流纹岩类似的地球化学成分,并显示出良好的Be、Nb、Y等火山岩型铍矿床特有的地球化学异常组合(王学求等,2020)。铍高值产于围岩接触带或热液蚀变带周围,相关中生代火山-沉积序列(满克头鄂博组、玛尼吐组、白音高老组与梅勒图组)(Zhang *et al.*, 2008, 2010)被认为是火山岩型铍矿有利的赋矿层位,与冀北窟窿山火山岩铍矿床的张家口组有一定相似,可作为未来重点勘察方位(李晓峰等,2022)。基于有利的成矿构造背景,利用含铍岩石组合和蚀变模式、磁场、重力和地震等数据是铍矿找矿勘查的重要手段(Foley *et al.*, 2012)。

近年来,在大兴安岭地区发现了多处高铌-钽火山岩出露,有的已超过钽铌矿的工业品位,为潜在的铌-钽矿化类型(毛朝霞等,2016;晋瑞香,2018;单子凌,2020)。前人在大兴安岭北段开展的1:20万水系沉积物测量和地球化学分析结果基础上,圈定了红花尔基、莫力达瓦、呼中、四五牧场、乌努格吐山、高基高尔等6个钽成矿远景区,其赋矿围岩主要为白音高老组和玛尼吐组火山岩,均表现出大面积的Nb正异常,具有进一步工作的价值(毛朝霞等,2016)。此外,鉴于锡与钽的共生性,高分异锡钨矿化岩体或外围共(伴)生钽铌矿化也可能是未来找矿突破方向,其中锡石中的钽含量是矿化的潜在指标(李建康等,2019),在钽铌矿床找矿勘查中应以高阻低极化异常作为找矿的地球物理标志,综合利用地质、地球化学方法开展钽铌矿床找矿评价。

## 6 未来研究重点

相对于其它成矿带,大兴安岭成矿带的锂铍钽矿床研

究较为薄弱,未来对大兴安岭稀有金属成矿作用的研究应注重以下几个方面:

(1)大兴安岭贫伟晶岩型矿化的关键因素。与西部地区广泛发育伟晶岩型稀有金属矿化不同(如可可托海3号脉、阿尔金伟晶岩成矿带等)(Wang *et al.*, 2020;王核等,2022),大兴安岭南段鲜有花岗伟晶岩及相关矿产产出。伟晶岩常常以脉状产于花岗质岩体的顶部,被认为是花岗质岩体分异的最终产物,因其及其富集锂铍而具有极高的研究价值(London, 2018)。基于实验岩石学研究,London (1992)提出伟晶岩形成的过度冷却模型,即快速冷却是形成富锂伟晶岩的必要条件之一。热模拟实验表明(Zhou *et al.*, 2021),富锂的伟晶岩脉往往产于远离伟晶岩区的热场中心的低温围岩中( $\sim 200^{\circ}\text{C}$ ),而靠近侵入岩体的伟晶岩脉的区域由于其围岩具有高温特征( $\sim 300^{\circ}\text{C}$ ),岩浆侵入后冷却缓慢,不利于稀有金属成矿。因而岩浆的过度冷却不仅会影响伟晶岩的形成与否,同样是制约形成的伟晶岩是否具有成矿潜力的重要指标(Černý *et al.*, 1985; Zhou *et al.*, 2021)。此外,鉴于伟晶岩的低温特征( $< 750^{\circ}\text{C}$ )(London, 2014),难以与围岩同化,因而侵入并结晶后常与围岩间形成清晰的接触面(如阿尔泰伟晶岩)。大兴安岭地区岩浆-热液型稀有金属矿床的成矿岩体与围岩多呈渐变接触关系(Gao *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2022a),指示了岩体侵入时围岩的高温特征(凤永刚等,2021),使得伟晶岩与之接触时快速冷却难以发生。并且根据热传导模型(London, 2008),不利于伟晶岩的形成乃至后续的锂铍钽矿化。

另外,侵入岩体的就位深度可能也是大兴安岭并未形成大规模伟晶岩的原因之一。Černý *et al.* (2005)提出稀有金属伟晶岩形成压力大多集中在200~300MPa,倘若以大陆地压梯度26.5MPa/km计算(Anderson, 1989)可得侵位深度约7.5~11.3km,这也与Tanco伟晶岩和Harding伟晶岩所计算出的岩体结晶深度相一致(分别为8~9km和11km左右)(Brisbin, 1986; London, 1986)。大兴安岭南段稀有金属成矿带中石灰窑与加布斯钽铌矿含矿岩体具有较浅的侵位深度(分别约0.3~8.7km与3.2km)(Zhang *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2022a)并不有利于伟晶岩的发育。伟晶岩型矿化作为锂铍钽资源的主要产出类型,从现代成矿理论入手,通过实验模拟和热力学估算等手段可能为破解大兴安岭地区贫伟晶岩型矿化提供有力证据。

(2)锡林郭勒杂岩体对稀有金属成矿的贡献。研究表明,锡林郭勒杂岩体出露面积较大,主要分布在锡林浩特-巴林左旗一带,为一套高成熟度、富集稀有金属元素的黑云母斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪片岩(Li *et al.*, 2017),其云母的Li、Sn含量较高( $\text{Li}_2\text{O}$ 平均含量为4.36%,Sn平均含量达到 $136 \times 10^{-6}$ )(Gao *et al.*, 2019)。如前所述,维拉斯托大型锂锡矿床的形成与熔-流体反应有密切关系。早白垩世期间,深部镁铁质岩浆分异、脱气过程不仅提供了巨量成矿元素,也携带了大量S、Cl、F等重要配体元素

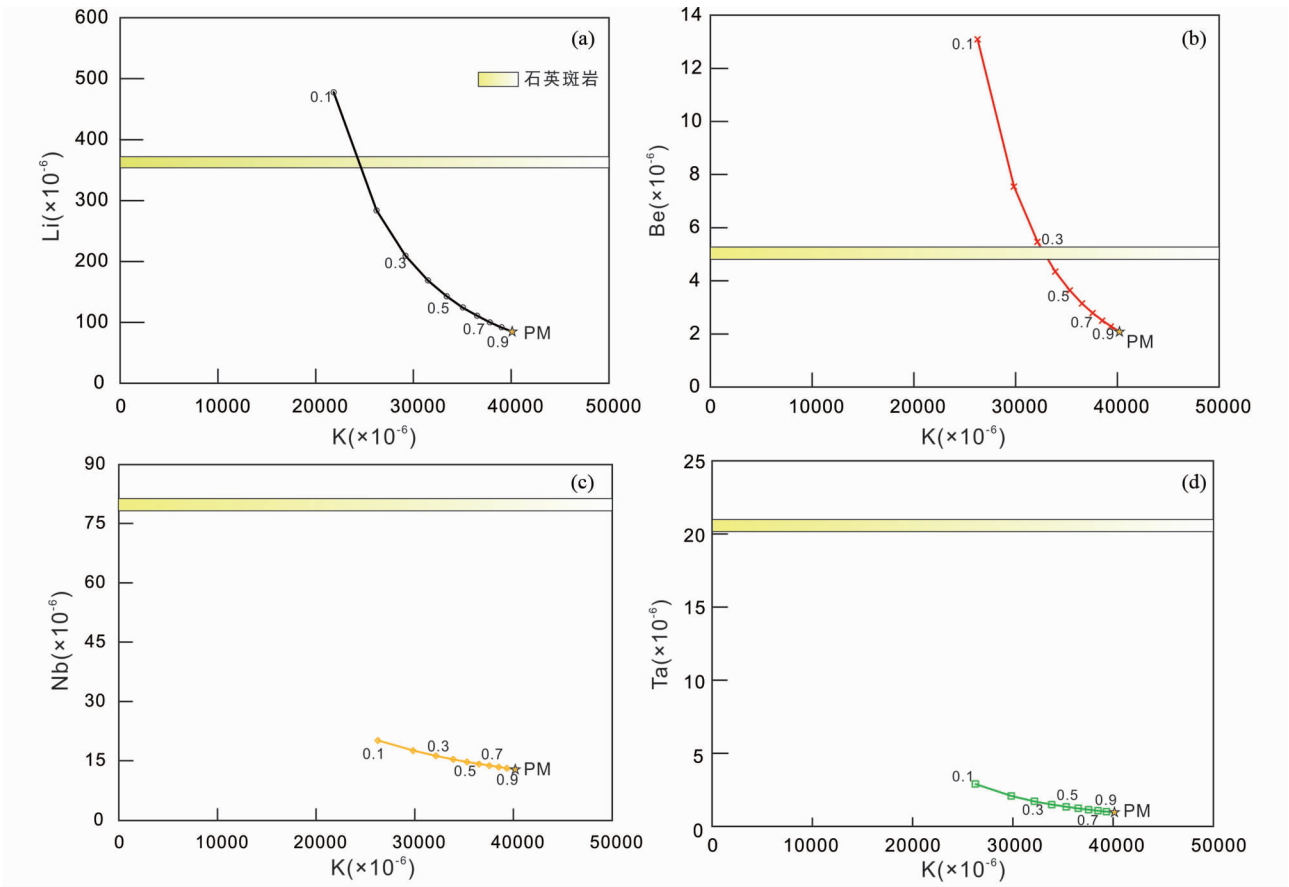


图6 锡林郭勒杂岩瑞利分馏模拟图

Fig. 6 Variation diagrams showing modeled Rayleigh fractionation of the Xilingol Complex

和挥发分进入下地壳 (Hunter *et al.* , 2020)。稀有气体同位素分析和模拟计算结果指示深部地幔岩浆通过岩浆-热液界面向地壳传递热量, 导致地壳原岩部分熔融以及流体混合, 最终形成富稀有金属元素的花岗质岩浆和矿化 (Zhou *et al.* , in press)。因此, 本文认为锡林郭勒杂岩可能为区域稀有金属矿化提供了重要的成矿物质来源。

岩浆分异结晶过程中, 锂铍铌钽作为不相容元素会逐渐富集已被广泛认同。高分异岩浆中出溶流体的关键金属含量 (如锂-铍-铌-钽-钨-锡) 是成矿潜力的直接指标 (Audétat, 2019; Zhao *et al.* , 2022)。本文使用瑞利分馏模型 ( $C_i = C_i^0 \times F^{D-1}$ , 其中  $C_i$  为分离相微量元素  $i$  含量,  $C_i^0$  为微量元素  $i$  初始含量,  $F$  为分离相所占比例,  $D$  为分配系数), 对与矿化密切相关的锡林郭勒杂岩进行部分关键金属元素的模拟 (图 6)。在本次研究中不考虑溶解-再结晶过程在锡林郭勒杂岩中的作用。本研究中选择低分异、蚀变较弱的黑云母片麻岩样品作为初始熔体含量 (PM), 其矿物组成主要包括黑云母 (40%)、石英 (30%)、斜长石 (20%) 与钾长石 (10%) (Gao *et al.* , 2019)。全岩平均分配系数  $D$  通过  $D = \sum_{i=1}^n D_i \times X_i$  得出, 其中  $n$  为岩体中矿物组合数目,  $D_i$  为矿物/熔体间分配系数, 其参考值见 Pollard (2021) 及 Zhao *et al.* (2022),  $X_i$  为矿

物所占体积百分数。本研究的结果表明, 岩浆分异过程会一定程度上使得锂铍逐渐富集, 但需要极高的分异演化程度 ( $>70\%$ ) 才能达到维拉斯托石英斑岩中锂铍含量。倘若需要达到伟晶岩/花岗-伟晶岩成矿岩体中锂铍含量 ( $Li > 5000 \times 10^{-6}$ ,  $Be > 205 \times 10^{-6}$ ), 仅依靠岩浆分异并不可行, 因此, 晚期热液流体交代作用极为关键。而铌钽含量随着分离结晶并未显示出较大的变化, 相较于含矿岩体石英斑岩仍处于较低的含量。因而, 本文认为可能同样是后续热液作用使得其得到进一步富集。正如 Zhao *et al.* (2022) 所述,  $Li$  在黑云母/熔体中极高的分配系数使其是赋存锂资源的重要来源, 对富黑云母的锡林郭勒杂岩体的研究仍是未来找矿的潜在方向。

(3) 大兴安岭火山岩型铍-铌-钽成矿潜力。研究表明大兴安岭地区具有良好的火山岩型铍-铌钽矿化潜力。李晓峰等 (2022) 提出大兴安岭地区的白音高老组、上库力组、玛尼吐组和满克头鄂博组可能是火山岩型铍矿有利的赋矿层位, 具有良好的火山岩型铍钽矿床的成矿潜力, 中酸性火山岩沿北北东向大兴安岭主脊断裂展布。这些火山岩普遍具有高硅、高碱特征, 富集大离子亲石元素 (Zhang *et al.* , 2010)。富氟和铍的火山岩、角砾岩中碳酸盐岩捕虏体、火山口构造



及有利的赋矿围岩及 Be、Ce、F、Ga、Li、Nb 和 Y 等元素地球化学异常可以作为火山岩型铍矿重要的找矿标志 (Lindsey, 1975)。值得注意的是,在大兴安岭中南段泉突盆地内可见多处铀矿床(点),其赋矿岩性主要为玛尼吐组凝灰岩和凝灰质砂岩及满克头鄂博组火山碎屑岩。盆地内构造断层发育,有利于铀运移富集,可见萤石化蚀变带发育在铀矿化周围(李杨,2020),具有类似于 Spor Mountain 及白杨河火山岩型铍矿矿化组合特征,可能具有良好的铍矿化前景。另一方面,大兴安岭中北段具有大面积正铋异常的火山岩区,主要含矿岩石为花岗斑岩、流纹岩及流纹质火山碎屑岩,以烧绿石为主要含铋矿物(赵超等,2021)。不同于火山岩型铍矿,火山岩型铋钽矿富集高场强元素,尤其是近期报道的岩体中 Nb、Ta 含量分别高达  $153 \times 10^{-6} \sim 178 \times 10^{-6}$  与  $144 \times 10^{-6} \sim 343 \times 10^{-6}$  (晋瑞香,2018),应当予以重视。

## 7 结论

(1)大兴安岭地区锂铍矿主要形成在早白垩世,铋钽矿主要形成于晚侏罗世。矿化的形成与区域上构造体制转变一致。

(2)大兴安岭发育多类型锂铍铋钽矿化,含矿岩浆分异演化对使成矿元素初始富集,而后期热液作用(水岩反应、溶解-再沉淀等)对进一步富集与成矿有着关键作用,与瑞利分馏模拟结果相一致。强烈的壳幔相互作用以及上涌的幔源组分对成矿具有一定贡献。

(3)大兴安岭地区具有良好的锂铍铋钽矿化前景,锡林郭勒杂岩体周边出露高分异花岗岩区域可作为未来锂矿重点找矿勘查靶区,中北段火山岩中铍、铋钽均显示了良好的地球化学异常特征,可作为未来进一步找矿方向。

**致谢** 在资料收集与野外工作期间得到了内蒙古自治区自然资源厅、地矿集团、地勘公司等单位各级领导和技术人员的大力支持,在此表示感谢。江思宏研究员和葛文春教授悉心审稿,并提出宝贵意见,使论文质量得以提高,在此致以诚挚的谢意。

## References

Anderson DL. 1989. Theory of the Earth. Boston: Blackwell Scientific Publications, 1–360  
 Audétat A. 2019. The metal content of magmatic-hydrothermal fluids and its relationship to mineralization potential. *Economic Geology*, 114 (6): 1033–1056  
 Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, Branquet Y, Tartèse R and Vigneresse JL. 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition. *Geology*, 44(3): 231–234  
 Baoyinlujij, Zhao WT, Wang XK, Cui LW, Li XR and Bao FQ. 2014. Geochemical anomaly and metallogenic potential of the Naomugengsumu lithium mineralization area in Inner Mongolia.

*Geology and Resources*, 23 (6): 531–534 (in Chinese with English abstract)  
 Barton MD and Young S. 2002. Non-pegmatitic deposits of beryllium: Mineralogy, geology, phase equilibria and origin. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 50(1): 591–691  
 Brisbin WC. 1986. Mechanics of pegmatite intrusion. *American Mineralogist*, 71(3–4): 644–651  
 Brown M. 2007. Crustal melting and melt extraction, ascent and emplacement in orogens: Mechanisms and consequences. *Journal of the Geological Society*, 164(4): 709–730  
 Černý P, Meintzer RE and Anderson AJ. 1985. Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites: Selected examples of data and mechanisms. *The Canadian Mineralogist*, 23(3): 381–421  
 Černý P, Blevin PL, Cuney M and London D. 2005. Granite-related ore deposits. In: Hedenquist JW, Thompson JFH, Goldfarb RJ and Richards JP (eds.). *Economic Geology, One Hundredth Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, 337–370  
 Chen XK, Zhou ZH, Zhao JQ and Gao X. 2022. Chronology and geochemical composition of cassiterite and zircon from the Maodeng Sn-Cu deposit, northeastern China: Implications for magmatic-hydrothermal evolution and ore-forming process. *Ore Geology Reviews*, 150: 105159  
 Dailey SR, Christiansen EH, Dorais MJ, Kowallis BJ, Fernandez DP and Johnson DM. 2018. Origin of the fluorine- and beryllium-rich rhyolites of the Spor Mountain Formation, Western Utah. *American Mineralogist*, 103(8): 1228–1252  
 Du QS, Zhao LY and Li ZH. 2018. Ore characteristics and prospecting marks of granite type rare metal deposits in the middle of the Inner Mongolia Autonomous Region. *China Molybdenum Industry*, 42 (2): 8–14 (in Chinese with English abstract)  
 Duan ZP, Jiang SY, Su HM and Zhu XY. 2020. Tourmaline as a recorder of contrasting boron source and potential tin mineralization in the Mopanshan pluton from Inner Mongolia, northeastern China. *Lithos*, 354–355: 105284  
 Duan ZP, Jiang SY, Su HM, Zhu XY, Zou T and Cheng XY. 2021. Geochronological and geochemical investigations of the granites from the giant Shihuiyao Rb-(Nb-Ta-Be-Li) deposit, Inner Mongolia: Implications for magma source, magmatic evolution, and rare metal mineralization. *Lithos*, 400–401: 106415  
 Feng YG, Liang T, Lei RX, Ju MH, Zhang ZL, Gao JG, Zhou Y and Wu CZ. 2021. Relationship between undercooling and emplacement of rare-element pegmatites: Thinking based on field observations and pegmatite geochronology. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43(1): 100–116 (in Chinese with English abstract)  
 Foley NK, Hofstra AH, Lindsey DA, Seal II RR, Jaskula BW and Piatak NM. 2012. Occurrence model for volcanogenic beryllium deposits. Chapter F of *Mineral Deposit Models for Resource Assessment*. Reston: U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2010–5070–F  
 Foley NK, Jaskula BW, Piatak NM and Schulte RF. 2017. Beryllium. In: Schulz KJ, DeYoung JH Jr, Seal II RR and Bradley DC (eds.). *Critical Mineral Resources of the United States: Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. Reston: U. S. Geological Survey, 1–32  
 Gao LE, Zeng LS, Yan LL, Gao JH and Zhao LH. 2021. Enrichment mechanisms of Sn-Cs-Tl in the Himalaya leucogranite. *Acta Petrologica Sinica*, 37(10): 2923–2943 (in Chinese with English abstract)  
 Gao X, Zhou ZH, Breiter K, Ouyang HG and Liu J. 2019. Ore-formation mechanism of the Weilasituo tin-polymetallic deposit, NE China: Constraints from bulk-rock and mica chemistry, He-Ar isotopes, and Re-Os dating. *Ore Geology Reviews*, 109: 163–183  
 Guan YC, Yang ZF, Zhu XY, Zou T, Cheng XY, Tang L and Deng HH. 2017. Petrogenesis and geological significance of the Beidashan complex rockmass, Inner Mongolia. *Mineral Exploration*, 8(6): 1054–1068 (in Chinese with English abstract)  
 Hou XZ, Liu ZN, Han W and Wang WC. 2017. The occurrence state of

- tin and beryllium in polymetallic ore from Huanggangliang area, Hexigten County, Inner Mongolia, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(6): 807–812 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Chen J and Zhai MG. 2020. Current status and frontiers of research on critical mineral resources. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3651–3652 (in Chinese)
- Huang XL, Wang RC, Chen XM, Hu H and Liu CS. 2002. Vertical variations in the mineralogy of the Yichun topaz-lepidolite granite, Jiangxi Province, southern China. *The Canadian Mineralogist*, 40(4): 1047–1068
- Hunter EAO, Hunter JR, Zajacz Z, Keith JD, Hann NL, Christiansen EH and Dorais MJ. 2020. Vapor transport and deposition of Cu-Sn-Co-Ag alloys in vesicles in mafic volcanic rocks. *Economic Geology*, 115(2): 279–301
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23(2): 82–92
- Jiang SH, Bagas L, Hu P, Han N, Chen CL, Liu Y and Kang H. 2016. Zircon U-Pb ages and Sr-Nd-Hf isotopes of the highly fractionated granite with tetrad REE patterns in the Shamao tungsten deposit in eastern Inner Mongolia, China: Implications for the timing of mineralization and ore genesis. *Lithos*, 261: 322–339
- Jiang SY, Wen HJ, Xu C, Wang Y, Su HM and Sun WD. 2019. Earth sphere cycling and enrichment mechanism of critical metals: Major scientific issues for future research. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 112–118 (in Chinese with English abstract)
- Jiang SY, Su HM, Zhu XY, Zhu KY and Duan ZP. 2022. A new type of Li deposit: Hydrothermal crypto-explosive breccia pipe type. *Journal of Earth Science*, 33(5): 1095–1113
- Jin RX. 2018. Mineralogy, petrochemistry, and petrogenesis of Nb-Ta-rich alkaline rhyolite of the Tuohetuo forest farm in the northern Da Hinggan Mountains. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 1–46 (in Chinese with English abstract)
- Li J, Huang XL, He PL, Li WX, Yu Y and Chen LL. 2015. In situ analyses of micas in the Yashan granite, South China: Constraints on magmatic and hydrothermal evolutions of W and Ta-Nb bearing granites. *Ore Geology Reviews*, 65: 793–810
- Li JK, Zou TR, Wang DH and Ding X. 2017. A review of beryllium metallogenetic regularity in China. *Mineral Deposits*, 36(4): 951–978 (in Chinese with English abstract)
- Li JK, Li P, Wang DH and Li XJ. 2019. A review of niobium and tantalum metallogenetic regularity in China. *Chinese Science Bulletin*, 64(15): 1545–1566 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, Gao LM, Sun GH, Li YP and Wang YB. 2007. Shuangjingzi Middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565–582 (in Chinese with English abstract)
- Li PY, Jiang DW, Fu X, Wang L, Gao SQ, Fan ZY, Wang KX and Huge JLT. 2018. Geological characteristics and prospecting significance of Weilasituo Li polymetallic deposit, Inner Mongolia. *Mineral Exploration*, 9(6): 1185–1191 (in Chinese with English abstract)
- Li S, Chung SL, Wang T, Wilde SA, Chu MF, Pang CJ and Guo QQ. 2018. Water-fluxed crustal melting and petrogenesis of large-scale Early Cretaceous intracontinental granitoids in the southern Great Xing'an Range, North China. *GSA Bulletin*, 130(3–4): 580–597
- Li XF, Wu FY, Wei XL, Che XD, Rao C, Chen ZY, Ge WC and Zhu YT. 2022. Metallogenetic potential and prospecting prospect of volcanic-hosted beryllium-uranium deposits in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 1861–1878 (in Chinese with English abstract)
- Li Y. 2020. Uranium metallogenetic conditions and prospecting direction in Tuquan basin, Inner Mongolia. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 1–80 (in Chinese with English abstract)
- Li YL, Brouwer FM, Xiao WJ, Wang KL, Lee YH, Luo BJ, Su YP and Zheng JP. 2017. Subduction-related metasomatic mantle source in the eastern Central Asian Orogenic Belt: Evidence from amphibolites in the Xilingol Complex, Inner Mongolia, China. *Gondwana Research*, 43: 193–212
- Lindsey DA. 1975. Mineralization halos and diagenesis in water-laid tuff of the Thomas Range, Utah. Washington: U. S. Geological Survey Professional Paper, 818: 1–59
- Lindsey DA. 1977. Epithermal beryllium deposits in water-laid tuff, western Utah. *Economic Geology*, 72(2): 219–232
- Linnen RL, Samson IM, Williams-Jones AE and Chakhmouradian AR. 2014. Geochemistry of the rare-earth element, Nb, Ta, Hf, and Zr deposits. 2<sup>nd</sup> Edition. *Treatise on Geochemistry*, 13: 543–568
- Liu YJ, Li WM, Feng ZQ, Wen QB, Neubauer F and Liang CY. 2017. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 43: 123–148
- Liu YJ, Li WM, Ma YF, Feng ZQ, Guan QB, Li SZ, Chen ZX, Liang CY and Wen QB. 2021. An orocline in the eastern Central Asian orogenic belt. *Earth-Science Reviews*, 221: 103808
- London D. 1986. Magmatic-hydrothermal transition in the Tanco rare-element pegmatite: Evidence from fluid inclusions and phase-equilibrium experiments. *American Mineralogist*, 71(3–4): 376–395
- London D, Hervig RL and Morgan VI GB. 1988. Melt-vapor solubilities and elemental partitioning in peraluminous granite-pegmatite systems: Experimental results with Macusani glass at 200MPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99(3): 360–373
- London D. 1992. The application of experimental petrology to the genesis and crystallization of granitic pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, 30(3): 499–540
- London D, Morgan VI GB, Babb HA and Loomis JL. 1993. Behavior and effects of phosphorus in the system Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-H<sub>2</sub>O at 200MPa (H<sub>2</sub>O). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(4): 450–465
- London D. 2008. Pegmatites. Ottawa: Mineralogical Association of Canada
- London D. 2014. A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites. *Lithos*, 184–187: 74–104
- London D. 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites. *Ore Geology Reviews*, 101: 349–383
- Manning DAC. 1981. The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1kb. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 76(2): 206–215
- Mao JW, Ouyang HG, Song SW, Santosh M, Yuan SD, Zhou ZH, Zheng W, Liu H, Liu P, Cheng YB and Chen MH. 2019. Geology and metallogeny of tungsten and tin deposits in China. *Economic Geology (Special Publication)*, 22: 411–482
- Mao JW, Yang ZX, Xie GQ, Yuan SD and Zhou ZH. 2019. Critical minerals: International trends and thinking. *Mineral Deposits*, 38(4): 689–698 (in Chinese with English abstract)
- Mao ZX, Zheng CQ, Bi ZW, Yang YJ, Chai L and Zhang CP. 2016. Preliminary study on the prospecting potential of niobium-tantalum deposits in Daxinganling region. *Geology and Resources*, 25(3): 269–274 (in Chinese with English abstract)
- Mei W, Lü XB, Cao XF, Liu Z, Zhao Y, Ai ZL, Tang RK and Abfaua MM. 2015. Ore genesis and hydrothermal evolution of the Huanggang skarn iron-tin polymetallic deposit, southern Great Xing'an Range: Evidence from fluid inclusions and isotope analyses. *Ore Geology Reviews*, 64: 239–252
- Mysen BO, Ryerson FJ and Virgo D. 1981. The structural role of phosphorus in silicate melts. *American Mineralogist*, 66(1–2): 106–117
- Niu HC, Shan Q, Luo Y, Yang WB and Yu XY. 2008. Study on the crystal-rich fluid inclusions from the Baerzhe super-large rare elements and REE deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2149–2154 (in Chinese with English abstract)
- Ouyang HG, Mao JW, Zhou ZH and Su HM. 2015. Late Mesozoic metallogeny and intracontinental magmatism, southern Great Xing'an

- Range, northeastern China. *Gondwana Research*, 27(3): 1153 – 1172
- Pollard PJ. 2021. The Yichun Ta-Sn-Li deposit, South China: Evidence for extreme chemical fractionation in F-Li-P-rich magma. *Economic Geology*, 116(2): 453 – 469
- Qiu KF, Yu HC, Wu MQ, Geng JZ, Ge XK, Gou ZY and Taylor RD. 2019. Discrete Zr and REE mineralization of the Baerzhe rare-metal deposit, China. *American Mineralogist*, 104(10): 1487 – 1502
- Rao C, Wang RC, Wu FY, Che XD, Li XF, Wang Q, Zhang ZQ and Wu RQ. 2022a. A preliminary study on the volcanic intrusive complex type beryllium metallogenic belt from the southeast coast of China. *Science China (Earth Sciences)*, 65(8): 1586 – 1600
- Rao C, Wang RC, Che XD, Li XF, Wang Q, Zhang ZQ and Wu RQ. 2022b. Metallogenic mechanism and prospect of key metal beryllium. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 1848 – 1860 (in Chinese with English abstract)
- Shan ZL. 2020. The occurrence and availability of Nb-Ta-rich volcanic rock elements in Keyihe, Da Hinggan Mountains. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 1 – 56 (in Chinese with English abstract)
- Shao JA, Zhang LQ, Xiao QH and Li XB. 2005. Rising of Da Hinggan Mts in Mesozoic: A possible mechanism of intracontinental orogeny. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 789 – 794 (in Chinese with English abstract)
- Shao JA, Mu BL, Zhu HZ and Zhang LQ. 2010. Material source and tectonic settings of the Mesozoic mineralization of the Da Hinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 649 – 656 (in Chinese with English abstract)
- Shearer CK, Papike JJ and Jolliff BL. 1992. Petrogenetic links among granites and pegmatites in the Harney Peak rare-element granite-pegmatite system, Black Hills, South Dakota. *The Canadian Mineralogist*, 30(3): 785 – 809
- Shi RZ, Zhao JX, Evans NJ, Qin KZ, Wang FY, Li ZZ, Han R and Li XH. 2021. Temporal-spatial variations in Li-Fe mica compositions from the Weilasituo Sn-polymetallic deposit (NE China): Implications for deposit-scale fluid evolution. *Ore Geology Reviews*, 134: 104132
- Su HM, Jiang SY, Zhu XY, Duan ZP, Huang XK and Zou T. 2021. Magmatic-hydrothermal processes and controls on rare-metal enrichment of the Baerzhe peralkaline granitic pluton, Inner Mongolia, northeastern China. *Ore Geology Reviews*, 131: 103984
- Sun Y, Lai Y and Shu QH. 2012. Study on the relationship between the degree of magmatic crystallization and Be mineralization of magmatic fluid: A case study of the Tailaihua granite Be-Ta deposit in the southern Great Xing'an Range. *Mineral Deposits*, 31(Suppl. 1): 345 – 346 (in Chinese)
- Sun Y. 2013. Study on magmatic fluid evolution and mineralization of rare metal granites in the middle-southern Great Xing'an Range. Master Degree Thesis. Beijing: Peking University, 1 – 76 (in Chinese with English abstract)
- Tang J, Xu WL, Wang F, Zhao S and Wang W. 2016. Early Mesozoic southern subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic plate: Evidence from geochronology and geochemistry of Early Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China. *Gondwana Research*, 31: 218 – 240
- Wang DH, Dai HZ, Liu SB, Wang CH, Yu Y, Dai JJ, Liu LJ, Yang YQ and Ma SA. 2020. Research and exploration progress on lithium deposits in China. *China Geology*, 3: 137 – 152
- Wang DH, Dai HZ, Liu SB, Li JK, Wang CH, Lou DB, Yang YQ and Li P. 2022. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 743 – 764 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Huang L, Bai HY, Wang KY, Wang ZH, Gao H, Zhou JS, Qin Y and Wang Y. 2022. Deposit types, distribution, development and utilization of lithium mineral resources in China: Review and perspective. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(5): 848 – 866 (in Chinese with English abstract)
- Wang JB, Wang YW and Wang LJ. 2005. Tin-polymetallic metallogenic series in the southern part of da Hinggan mountains, China. *Geology and Exploration*, 5(6): 15 – 20 (in Chinese with English abstract)
- Wang RC, Hu H, Zhang AC, Huang XL and Ni P. 2004. Pollucite and the cesium-dominant analogue of polythionite as expressions of extreme Cs enrichment in the Yichun topaz-lepidolite granite, southern China. *The Canadian Mineralogist*, 42(3): 883 – 896
- Wang T, Guo L, Zheng YD, Donskaya T, Gladkochub D, Zeng LS, Li JB, Wang YB and Mazukabzov A. 2012. Timing and processes of Late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes. *Lithos*, 154: 315 – 345
- Wang XQ, Liu HL, Wang W, Zhou J, Zhang BM and Xu SF. 2020. Geochemical abundance and spatial distribution of lithium in China: Implications for potential prospects. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(6): 797 – 806 (in Chinese with English abstract)
- Weng Q, Yang WB, Niu HC, Li NB, Shan Q, Fan GQ and Jiang ZY. 2021. Two discrete stages of fenitization in the Lizhuang REE deposit, SW China: Implications for REE mineralization. *Ore Geology Reviews*, 133: 104090
- Wilde SA. 2015. Final amalgamation of the Central Asian Orogenic Belt in NE China: Paleo-Asian Ocean closure versus Paleo-Pacific plate subduction: A review of the evidence. *Tectonophysics*, 662: 345 – 362
- Wu FY, Sun DY, Li HM, Jahn BM and Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1–2): 143 – 173
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67(3–4): 191 – 204
- Wu FY, Sun DY, Ge WC, Zhang YB, Grant ML, Wilde SA and Jahn BM. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 1 – 30
- Wu FY, Liu XC, Ji WQ, Wang JM and Yang L. 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research. *Science China (Earth Sciences)*, 60(7): 1201 – 1219
- Wu G, Liu RL, Chen GZ, Li TG, Li RH, Li YL, Yang F and Zhang T. 2021. Mineralization of the Weilasituo rare metal-tin-polymetallic ore deposit in Inner Mongolia: Insights from fractional crystallization of granitic magmas. *Acta Petrologica Sinica*, 37(3): 637 – 664 (in Chinese with English abstract)
- Wu HH, Huang H, Zhang ZC, Wang T, Guo L, Zhang YH and Wang W. 2020. Geochronology, geochemistry, mineralogy and metallogenic implications of the Zhaojinggou Nb-Ta deposit in the northern margin of the North China Craton, China. *Ore Geology Review*, 125: 103692
- Wu HR, Yang H, Ge WC, Ji Z, Wang KY, Jing JH and Jing Y. 2022. Formation age and genesis of the Nasigatu greisen-type beryllium mineralization in the southern Great Xing'an Range: Monazite chronological and geochemical evidence. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 1915 – 1936 (in Chinese with English abstract)
- Wu MQ, Samson IM and Zhang DH. 2018. Textural features and chemical evolution in Ta-Nb oxides: Implications for deuteric rare-metal mineralization in the Yichun granite-marginal pegmatite, southeastern China. *Economic Geology*, 113(4): 937 – 960
- Xu SH. 2021. Study of mineralogical characteristics of helvite and similar minerals from Huanggangliang, Inner Mongolia. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1 – 57 (in Chinese with English abstract)
- Xu WL, Wang F, Pei FP, Meng E, Tang J, Xu MJ and Wang W. 2013. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China: Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 339 – 353 (in Chinese with English abstract)
- Xu WL, Sun CY, Tang J, Luan JP and Wang F. 2019. Basement nature and tectonic evolution of the Xing'an-Mongolian orogenic belt. *Earth*

- Science, 44(5): 1620–1646 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Fu XF, Zhao ZB, Li GW, Zheng YL and Ma ZL. 2019. Discussion on relationships of gneiss dome and metallogenic regularity of pegmatite-type lithium deposits. *Earth Science*, 44(5): 1452–1463 (in Chinese with English abstract)
- Yang WB, Su WC, Liao SP, Niu HC, Luo Y, Shan Q and Li NB. 2011. Melt and melt-fluid inclusions in the Baerzhe alkaline granite: Information of the magmatic-hydrothermal transition. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1493–1499 (in Chinese with English abstract)
- Yang WB, Niu HC, Li NB, Hollings P, Zurevinski S and Xing CM. 2020. Enrichment of REE and HFSE during the magmatic-hydrothermal evolution of the Baerzhe alkaline granite, NE China: Implications for rare metal mineralization. *Lithos*, 358 – 359: 105411
- Yardley BWD. 1994. Rocks of rare refinement. *Nature*, 369(6475): 17
- Zhai MG, Wu FY, Hu RZ, Jiang SY, Li WC, Wang RC, Wang DH, Qi T, Qin KZ and Wen HJ. 2019. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 106–111 (in Chinese with English abstract)
- Zhai W, Zheng SQ, Sun XM, Wei HX, Mo RW, Zhang LY, Zhou F and Yi JZ. 2018. He-Ar isotope compositions of orogenic Mazhala Au-Sb and Shalagang Sb deposits in Himalayan orogeny, southern Tibet: Constrains to ore-forming fluid origin. *Acta Petrologica Sinica*, 34(12): 3525–3538 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JH, Ge WC, Wu FY, Wilde SA, Yang JH and Liu XM. 2008. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, northeastern China. *Lithos*, 102(1–2): 138–157
- Zhang JH, Gao S, Ge WC, Wu FY, Yang JH, Wilde SA and Li M. 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination. *Chemical Geology*, 276(3–4): 144–165
- Zhang PC, Peng B, Zhao JZ, Zhang ZF, Zhao J, Guo GF, Zuo YS, He J and Wang X. 2022. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and mineralization significance of Hailiute highly fractionated granites in the Southern Da Hinggan Mountains. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1029–1046 (in Chinese with English abstract)
- Zhang TF, Guo S, Xin HT, Zhang Y, He P, Liu WG, Zhang K, Liu CB, Wang KX and Zhang C. 2019. Petrogenesis and magmatic evolution of highly fractionated granite and their constraints on Sn-(Li-Rb-Nb-Ta) mineralization in the Weilasituo deposit, Inner Mongolia, southern Great Xing'an Range, China. *Earth Science*, 44(1): 248–267 (in Chinese with English abstract)
- Zhang TF, Hou ZQ, Zheng YC, Cheng XY, Wang SY and Teng XM. 2022. Geochronology and geochemistry of the granites from the Jiabusi Ta-Nb-(Li-Rb-Cs) deposit at the northern margin of the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 147: 104969
- Zhao C, Qin KZ, Song GX, Li GM and Li ZZ. 2019. Early Palaeozoic high-Mg basalt-andesite suite in the Duobaoshan porphyry Cu deposit, NE China: Constraints on petrogenesis, mineralization, and tectonic setting. *Gondwana Research*, 71: 91–116
- Zhao C, Xu CB, Zhang YC, Liu C and Ma J. 2021. Geophysical and geochemical characteristics and prospecting indicators in Toudaoqiao Nb-Ta district, Greater Khingan Mountains. *Gold*, 42(3): 19–24 (in Chinese with English abstract)
- Zhao JX, He CT, Qin KZ, Shi RZ, Liu XC, Hu FY, Yu KL and Sun ZH. 2021. Geochronology, source features and the characteristics of fractional crystallization in pegmatite at the Qongjiagang giant pegmatite-type lithium deposit, Himalaya, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3325–3347 (in Chinese with English abstract)
- Zhao PL, Chu, X, Williams-Jones AE, Mao JW and Yuan SD. 2022. The role of phyllosilicate partial melting in segregating tungsten and tin deposits in W-Sn metallogenic provinces. *Geology*, 50(1): 121–125
- Zhou JB, Wilde SA, Zhang XZ, Ren SM and Zheng CQ. 2011a. Early Paleozoic metamorphic rocks of the Erguna block in the Great Xing'an Range, NE China: Evidence for the timing of magmatic and metamorphic events and their tectonic implications. *Tectonophysics*, 499(1–4): 105–117
- Zhou JB, Wilde SA, Zhang XZ, Zhao GC, Liu FL, Qiao DW, Ren SM and Liu JH. 2011b. A >1300km Late Pan-African metamorphic belt in NE China: New evidence from the Xing'an block and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 509(3–4): 280–292
- Zhou JS, Wang Q, Xu YG, Cempirek J, Wang H, Ma JL, Wei GJ, Huang TY, Zhu GH and Zhang L. 2021. Geochronology, petrology and lithium isotope geochemistry of the Bailongshan granite-pegmatite system, northern Tibet: Implications for the ore-forming potential of pegmatites. *Chemical Geology*, 584: 120484
- Zhou ZH, Mao JW and Lyckberg P. 2012. Geochronology and isotopic geochemistry of the A-type granites from the Huanggang Sn-Fe deposit, southern Great Hinggan Range, NE China: Implication for their origin and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 272–286
- Zhou ZH, Gao X, Ouyang HG, Liu J and Zhao JQ. 2019. Formation mechanism and intrinsic genetic relationship between tin-tungsten-lithium mineralization and peripheral lead-zinc-silver-copper mineralization: Exemplified by Weilasituo tin-tungsten-lithium polymetallic deposit, Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 38(5): 1004–1022 (in Chinese with English abstract)
- Zhou ZH and Mao JW. 2022. Metallogenic patterns and ore deposit model of the tin polymetallic deposits in the southern segment of Great Xing'an Range. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 176–199 (in Chinese with English abstract)
- Zhou ZH, Breiter K, Wilde SA, Gao X, Burnham AD, Ma XH and Zhao JQ. 2022a. Ta-Nb mineralization in the shallow-level highly-evolved P-poor Shihuiyao granite, Northeast China. *Lithos*, 416–417: 106655
- Zhou ZH, Mao JW, Zhao JQ, Gao X, Weyer S, Horn I, Holtz F, Sossi PA and Wang DC. 2022b. Tin isotopes as geochemical tracers of ore-forming processes with Sn mineralization. *American Mineralogist*, 107(11): 2111–2127
- Zhu KY, Jiang SY, Su HM and Duan ZP. 2021a. In situ geochemical analysis of multiple generations of sphalerite from the Weilasituo Sn-Li-Rb-Cu-Zn ore field (Inner Mongolia, northeastern China): Implication for critical metal enrichment and ore-forming process. *Ore Geology Reviews*, 139: 104473
- Zhu XY, Zhang ZH, Fu X, Li BY, Wang YL, Jiao ST and Sun YL. 2016. Geological and geochemical characteristics of the Weilasituo Sn-Zn deposit, Inner Mongolia. *Geology in China*, 43(1): 188–208 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YT, Li XF, Zhang L, Zhang D and Wang CZ. 2021b. Chemical and boron isotopic compositions of tourmaline at the Baiyanghe Be-U deposit, Northwest China: Implications for Be-U mineralization. *Chemical Geology*, 569: 120146

## 附中文参考文献

- 宝音乌力吉, 赵文涛, 王喜宽, 崔来旺, 李新仁, 包凤琴. 2014. 内蒙古脑木更苏木锂矿化区化探异常特征及成矿潜力分析. *地质与资源*, 23(6): 531–534
- 杜青松, 赵力颖, 李志华. 2018. 内蒙古中部花岗岩型稀有金属矿床特征与找矿标志. *中国铝业*, 42(2): 8–14
- 凤永刚, 梁婷, 雷如雄, 鞠明辉, 张忠利, 高景刚, 周义, 吴昌志. 2021. 稀有金属伟晶岩过度冷却与侵位之关系——基于野外地质观察及年代学的思考. *地球科学与环境学报*, 43(1): 100–116
- 高利娥, 曾令森, 严立龙, 高家昊, 赵令浩. 2021. 喜马拉雅淡色花岗岩——关键金属 Sn-Cs-Tl 的富集机制. *岩石学报*, 37(10): 2923–2943
- 管育春, 杨宗锋, 祝新友, 邹滔, 程细音, 唐雷, 邓海辉. 2017. 内蒙

古北大山杂岩体成因及其地质意义. 矿产勘查, 8(6): 1054 – 1068

侯晓志, 刘占宁, 韩炜, 王文才. 2017. 内蒙古克什克腾旗黄岗梁多金属矿锡、铍的赋存状态. 矿物学报, 37(6): 807 – 812

侯增谦, 陈骏, 翟明国. 2020. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿. 科学通报, 65(33): 3651 – 3652

蒋少涌, 温汉捷, 许成, 王焰, 苏慧敏, 孙卫东. 2019. 关键金属元素的多圈层循环与富集机理: 主要科学问题及未来研究方向. 中国科学基金, 33(2): 112 – 118

晋瑞香. 2018. 大兴安岭北部托河林场高铌钽碱性流纹岩矿物、岩石地球化学特征及岩石成因. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 1 – 46

李泊洋, 姜大伟, 付旭, 王磊, 高树起, 樊志勇, 王可祥, 胡格吉乐吐. 2018. 内蒙古维拉斯托矿区锂多金属矿床地质特征及找矿意义. 矿产勘查, 9(6): 1185 – 1191

李建康, 邹天人, 王登红, 丁欣. 2017. 中国铍矿成矿规律. 矿床地质, 36(4): 951 – 978

李建康, 李鹏, 王登红, 李兴杰. 2019. 中国铌钽矿成矿规律. 科学通报, 64(15): 1545 – 1566

李锦轶, 高立明, 孙桂华, 李亚萍, 王彦斌. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 23(3): 565 – 582

李晓峰, 吴福元, 韦星林, 车旭东, 饶灿, 陈振宇, 葛文春, 朱艺婷. 2022. 中国东部火山岩型铍铀矿床成矿潜力与找矿远景. 岩石学报, 38(7): 1861 – 1878

李杨. 2020. 内蒙古突泉盆地铀成矿条件与找矿方向. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 1 – 80

毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 袁顺达, 周振华. 2019. 关键矿产——国际动向与思考. 矿床地质, 38(4): 689 – 698

毛朝霞, 郑常青, 毕中伟, 杨雅军, 柴璐, 张春鹏. 2016. 大兴安岭地区铌钽矿找矿潜力的初步分析. 地质与资源, 25(3): 269 – 274

牛贺才, 单强, 罗勇, 杨武斌, 于学元. 2008. 巴尔哲超大型稀有稀土矿床富晶体的流体包裹体初步研究. 岩石学报, 24(9): 2149 – 2154

饶灿, 王汝成, 吴福元, 车旭东, 李晓峰, 王琪, 张志琦, 吴润秋. 2022a. 中国东南沿海火山-侵入杂岩型铍成矿带初步研究. 中国科学(地球科学), 52(8): 1547 – 1561

饶灿, 王汝成, 车旭东, 李晓峰, 王琪, 张志琦, 吴润秋. 2022b. 关键金属铍的成矿机制与找矿前景. 岩石学报, 38(7): 1848 – 1860

单子凌. 2020. 大兴安岭克-河高铌、钽火山岩元素赋存状态及可利用性研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 1 – 56

邵济安, 张履桥, 肖庆辉, 李晓波. 2005. 中生代大兴安岭的隆起——一种可能的陆内造山机制. 岩石学报, 21(3): 789 – 794

邵济安, 牟保磊, 朱慧忠, 张履桥. 2010. 大兴安岭中南段中生代成矿物质的深部来源与背景. 岩石学报, 26(3): 649 – 656

孙艺, 赖勇, 舒启海. 2012. 岩浆结晶程度与岩浆流体 Be 成矿关系研究——以大兴安岭南段台来花花岗岩型 Be-Ta 矿床为例. 矿床地质, 31(增1): 345 – 346

孙艺. 2013. 大兴安岭中南段稀有金属花岗岩岩浆-流体演化及成矿

作用研究. 硕士学位论文. 北京: 北京大学, 1 – 76

王登红, 代鸿章, 刘善宝, 李建康, 王成辉, 娄德波, 杨岳清, 李鹏. 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势. 地质力学学报, 28(5): 743 – 764

王核, 黄亮, 白洪阳, 王望宇, 王振宏, 高昊, 周金胜, 秦艳, 王焰. 2022. 中国锂资源的主要类型、分布和开发利用现状: 评述和展望. 大地构造与成矿学, 46(5): 848 – 866

王京彬, 王玉往, 王莉娟. 2005. 大兴安岭南段锡多金属成矿系列. 地质与勘探, 5(6): 15 – 20

王学求, 刘汉粮, 王玮, 周建, 张必敏, 徐善法. 2020. 中国锂矿地球化学背景与空间分布: 远景区预测. 地球学报, 41(6): 797 – 806

吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究. 中国科学(地球科学), 47(7): 745 – 765

武广, 刘瑞麟, 陈公正, 李铁刚, 李睿华, 李英雷, 杨飞, 张彤. 2021. 内蒙古维拉斯托稀有金属-锡多金属矿床的成矿作用: 来自花岗质岩浆结晶分异的启示. 岩石学报, 37(3): 637 – 664

吴浩然, 杨浩, 葛文春, 纪政, 王可勇, 井佳浩, 景妍. 2022. 大兴安岭南段那斯嘎吐云英岩型铍矿化的形成时代和成因探讨: 独居石年代学和地球化学证据. 岩石学报, 38(7): 1915 – 1936

徐思涵. 2021. 内蒙古黄岗梁日光榴石及相似矿物的矿物学特征研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 1 – 57

许文良, 王枫, 裴福萍, 孟恩, 唐杰, 徐美君, 王伟. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约. 岩石学报, 29(2): 339 – 353

许文良, 孙晨阳, 唐杰, 栾金鹏, 王枫. 2019. 兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程. 地球科学, 44(5): 1620 – 1646

许志琴, 付小方, 赵中宝, 李广伟, 郑艺龙, 马泽良. 2019. 片麻岩穹窿与伟晶岩型锂矿的成矿规律探讨. 地球科学, 44(5): 1452 – 1463

杨武斌, 苏文超, 廖思平, 牛贺才, 罗勇, 单强, 李宁波. 2011. 巴尔哲碱性花岗岩中的熔体和熔体-流体包裹体: 岩浆-热液过渡的信息. 岩石学报, 27(5): 1493 – 1499

翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. 中国科学基金, 33(2): 106 – 111

翟伟, 郑思琦, 孙晓明, 韦慧晓, 莫儒伟, 张凌宇, 周峰, 易建洲. 2018. 藏南喜马拉雅造山带造山型马扎拉 Au-Sb 矿床和沙拉岗 Sb 矿床流体包裹体 He-Ar 同位素组成: 对成矿流体来源的制约. 岩石学报, 34(12): 3525 – 3538

张天福, 郭硕, 辛后田, 张云, 何鹏, 刘文刚, 张阔, 刘传宝, 王可祥, 张超. 2019. 大兴安岭南段维拉斯托高分异花岗岩体的成因与演化及其对 Sn-(Li-Rb-Nb-Ta) 多金属成矿作用的制约. 地球科学, 44(1): 248 – 267

章培春, 彭勃, 赵金忠, 张占飞, 赵静, 郭广飞, 左玉山, 贺吉, 王鑫. 2022. 大兴安岭南段海流特高分异花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成矿意义. 岩石矿物学杂志, 41(06): 1029 – 1046

赵超, 徐传波, 张艳昌, 刘超, 马俊. 2021. 大兴安岭头道桥铌钽矿床地球物理、地球化学特征及找矿标志. 黄金, 42(3): 19 – 24

赵俊兴, 何畅通, 秦克章, 施睿哲, 刘小驰, 胡方泱, 余可龙, 孙政



浩. 2021. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩锂矿的形成时代、源区特征及分异特征. 岩石学报, 37(11): 3325 – 3347

周振华, 高旭, 欧阳荷根, 刘军, 赵家齐. 2019. 锡钨锂矿化与外围脉状铅锌银铜矿化的内在成因关系和形成机制——以内蒙古维拉斯托锡钨锂多金属矿床为例. 矿床地质, 38(5): 1004 – 1022

周振华, 毛景文. 2022. 大兴安岭南段锡多金属矿床成矿规律与矿床模型. 地学前缘, 29(1): 176 – 199

祝新友, 张志辉, 付旭, 李柏阳, 王艳丽, 焦守涛, 孙雅琳. 2016. 内蒙古赤峰维拉斯托大型锡多金属矿的地质地球化学特征. 中国地质, 43(1): 188 – 208