

新疆阿尔泰造山带中伟晶岩型稀有金属矿床成矿规律、找矿模型及其找矿方向

张辉, 吕正航, 唐勇

(中国科学院地球化学研究所 地球内部物质高温高压重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要 文章对阿尔泰造山带中的主要伟晶岩类型、时空分布特征、形成物源以及稀有金属矿化类型、形成条件(包括温度、压力、侵位深度)、可能控制因素等进行了归纳和总结,进而提出了阿尔泰伟晶岩成因模式、稀有金属矿化机制、伟晶岩型稀有金属矿床找矿模型及其找矿方向。阿尔泰稀有金属伟晶岩显示2个期次(同造山和后造山)和4个阶段(泥盆纪—早石炭世、二叠纪、三叠纪、早侏罗世)的成岩成矿特征。其中,以后造山阶段的三叠纪伟晶岩成岩及其Be、Li成矿作用最为显著。不同期次和阶段的伟晶岩显示规律的时空分布特征,稀有金属伟晶岩的成岩成矿明显受“构造-变质-物源-岩浆”的控制,而伟晶岩与周边花岗岩存在时代或物源上的解耦,表明阿尔泰伟晶岩不是由花岗质岩浆分异演化晚期的残余岩浆固结形成,由此提出阿尔泰不同时代伟晶岩的成因模式,即造山过程中加厚的不成熟地壳物质在伸展减压背景下发生小比例部分熔融(深熔)形成独立伟晶岩。通过对形成伟晶岩初始岩浆中磷含量、伟晶岩分异演化程度的评价以及基于围岩蚀变过程中全岩及蚀变矿物电气石中稀有金属Li、Rb、Cs含量特征,建立了阿尔泰伟晶岩型稀有金属矿床找矿模型、地质-地球化学找矿指标体系,并提出不同尺度的找矿方向。

关键词 地质学;稀有金属;成矿规律;岩石成因;伟晶岩;阿尔泰

中图分类号:P618.6;P618.7;P618.81

文献标志码:A

Metallogeny and prospecting model as well as prospecting direction of pegmatite-type rare metal ore deposits in Altay orogenic belt, Xinjiang

ZHANG Hui, LÜ ZhengHang and TANG Yong

(Key Laboratory for High Temperature and High Pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China)

Abstract

The dominant type, temporal-spatial distribution and source of pegmatites as well as the mineralization type, formation conditions (temperature, pressure and emplacement depth) and potential controlling factors of the rare metal ore deposits in the Altay orogenic belt are summarized in this paper, and the petrogenesis model of pegmatites, mineralization mechanism of rare metals, and prospecting model as well as prospecting direction for rare metal ore deposits in China's Altay are further proposed. Rare metal pegmatites show two stages (syn- and post-orogeny) and four generations (Devonian—Early Carboniferous, Permian, Triassic and Early Jurassic) of petrogenesis and metallogenesis, with peak age and Be-Li mineralization in Triassic. Different generations of pegmatites show evident temporal-spatial distributions, and the petrogenesis and metallogenesis of rare metal pegmatites are

* 本文得到国家自然科学基金(编号:41307012,41403016)和新疆有色金属工业(集团)有限公司科研项目(编号:2011YSKY-02)联合资助
第一作者简介 张辉,男,1965年生,博士生导师,研究员,主要从事伟晶岩及相关的稀有金属矿床研究。Email: zhanghui@mail.gyig.ac.cn

收稿日期 2019-06-26;改回日期 2019-07-09。秦思婷编辑。

significantly controlled by “tectonism-metamorphism-source-magma”. The decoupling in temporal or source between pegmatites and neighboring granites indicate that pegmatites in China’s Altay were not derived from differentiated granitic melts. The authors therefore propose the petrogenesis model of pegmatites, i.e., low percentage partial melting of the thickened immature crust (anatexis) gave rise to the formation of isolated pegmatites in China’s Altay. Finally, the models, geological-geochemical indicators and the prospecting direction of rare metal ore deposits are built and proposed based on the phosphorus content in the initial pegmatite-forming melts, the differentiation degrees of pegmatites and the content of Li, Rb and Cs in the altered wall rocks and tourmaline minerals.

Key words: geology, rare metal, metallogeny, petrogenesis, pegmatite, Altay

近年来, Li、Be、Nb、Ta、Rb、Cs、Zr、Hf等稀有金属因其重要战略意义而列入中国和欧、美、日等国关键矿产资源目录。花岗伟晶岩作为赋存稀有金属矿产的重要岩石类型之一, 长期以来被认为是花岗质岩浆分异演化晚期固结的产物 (Cěrný, 1991a; Cěrný et al., 2005; 2012)。然而, 世界范围内的大多数伟晶岩的母岩并未得到证实, 其中包括世界著名的加拿大Tanco伟晶岩、澳大利亚Greenbush伟晶岩以及中国新疆的可可托海3号伟晶岩。此外, 伟晶岩与超大陆旋回具有明显的耦合关系 (Tkachev, 2011; McCauley et al., 2014), 但其形成的大陆动力学机制尚不清楚 (许志琴等, 2018)。因此, 开展伟晶岩岩石学和矿床学研究不但具有岩石成因学和大陆动力学研究的科学意义, 而且对指导稀有金属矿床的找矿勘查具有重要应用价值。

伟晶岩及相关稀有金属矿产广泛分布于中国的阿尔泰造山带、天山造山带、松潘-甘孜-甜水海造山带、秦岭-大别造山带、喜马拉雅造山带、三江造山带、武夷-云开造山带和江南造山带 (邹天人等, 2006)。其中, 阿尔泰造山带中伟晶岩数量众多, 矿化类型较丰富且出露条件较好, 为伟晶岩及相关矿床的研究提供了得天独厚的优势。基于近20年来的研究, 本文对阿尔泰伟晶岩岩石成因以及稀有金属矿床的时空分布特征、矿化类型、成矿物质来源、成矿机制等成矿规律及其控制因素进行归纳和总结, 以期引起国内岩石学家、矿床学家的重视, 同时为中国伟晶岩及其矿床的研究提供新的思路。

1 地质背景

1.1 区域地质

新疆阿尔泰位于中亚造山带西段, 其东南、北和

北西部分别与蒙古戈壁阿尔泰、俄罗斯山区阿尔泰和哈萨克斯坦矿区阿尔泰相连 (Windley et al., 2002; Xiao et al., 2004)。根据断层、地层和变质作用等特征, 前人将阿尔泰由北向南划分为北阿尔泰、中阿尔泰、琼库尔和南阿尔泰4个地体 (Yuan et al., 2007; Sun et al., 2008) (图1)。北阿尔泰地体位于红山嘴-诺尔特断裂以北, 主要由泥盆纪—石炭纪变火山岩和沉积岩 (Windley et al., 2002), 以及泥盆纪I型花岗岩 (袁峰等, 2001; 秦纪华等, 2016) 组成。中阿尔泰地体位于红山嘴-诺尔特断裂以南、阿巴宫-库尔提断裂以北, 主要由奥陶纪—志留纪的变质沉积岩 (Windley et al., 2002; Long et al., 2007; 2010; Jiang et al., 2011), 大量的早生代—中生代I型花岗岩 (Wang T et al., 2006; 2009; Sun et al., 2008; Zhang et al., 2016) 和部分S型花岗岩 (Cai et al., 2011; Zhang et al., 2017) 组成。此外, 在可可托海镇和阿斯喀尔特等地有少量中生代花岗岩出露 (Wang T et al., 2014; 刘文政, 2015; 陈有焯等, 2017)。琼库尔地体位于阿巴宫-库尔提断裂以南、特斯巴汗断裂以北, 主要由泥盆纪变沉积岩和火山岩 (Windley et al., 2002; 柴凤梅等, 2012), 以及中生代—晚古生代I型和A型花岗岩 (Yuan et al., 2007; Yang et al., 2010; Tong et al., 2014; Liu, 2017) 组成。南阿尔泰地体 (又称额尔齐斯构造带) 位于特斯巴汗断裂以南、额尔齐斯断裂以北, 其东南部出露泥盆纪和石炭纪沉积岩 (Windley et al., 2002), 局部出露晚古生代花岗岩。近年来的研究表明, 阿尔泰是发育于活动大陆边缘的岩浆弧, 为古生代长期俯冲-增生过程的产物 (Xiao et al., 2008; 2015; 2018)。其经历了寒武纪至石炭纪的俯冲造山阶段, 以早泥盆世 (约400 Ma) 洋脊俯冲导致的埃达克岩和玻安岩 (Niu et al., 2006; 牛贺才等, 1999) 和大量的I型花岗岩 (Wang T et al., 2006; 2009; Sun et al., 2008) 岩浆活动以及高温变质

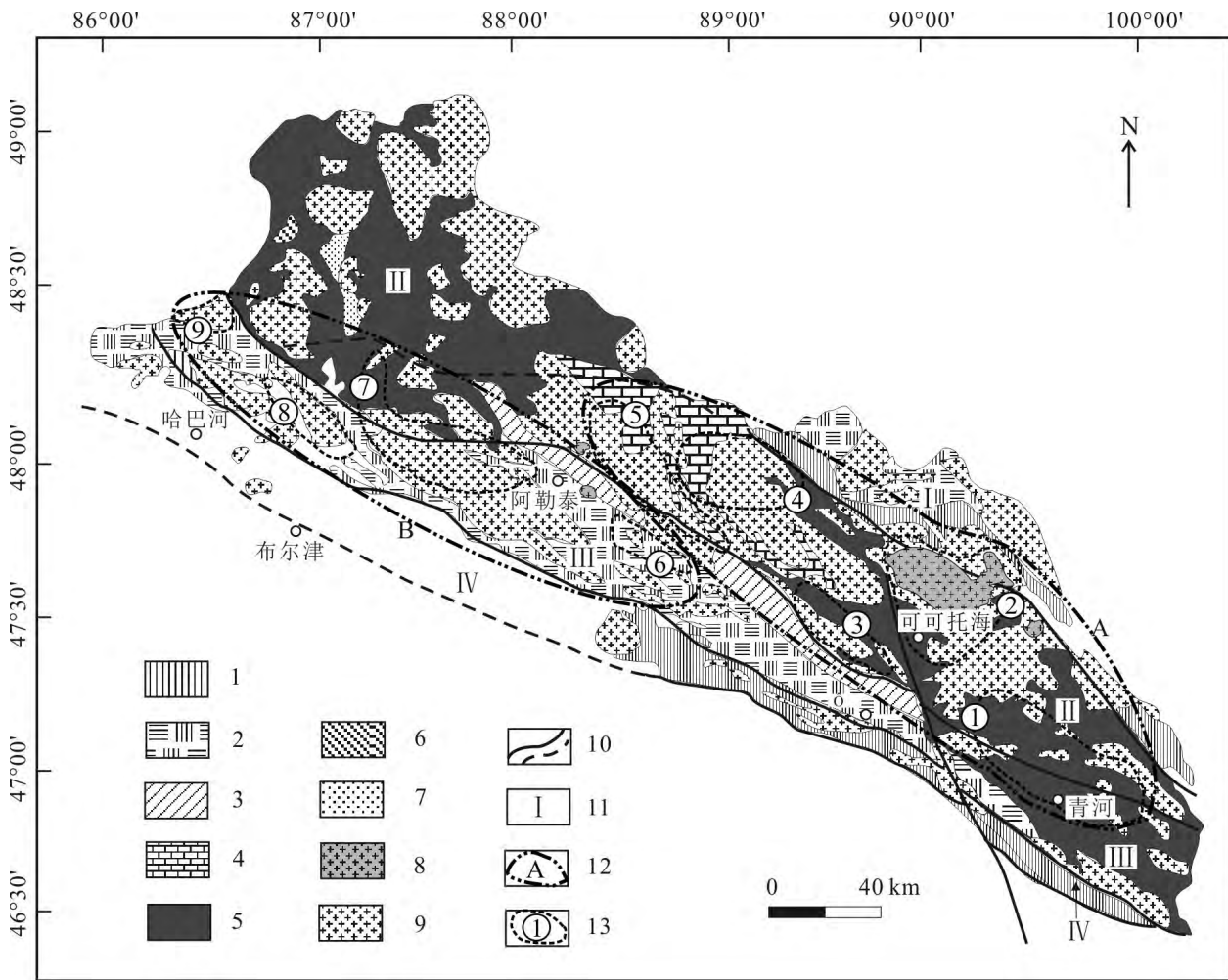


图1 阿尔泰造山带地质简图(据 Yuan et al., 2007 修改)

1—石炭系火山-沉积岩;2—泥盆系阿勒泰组火山-沉积岩;3—泥盆系康布铁堡组火山-沉积岩;4—志留系库鲁木提群变沉积岩;5—志留系—奥陶系哈巴河群变沉积岩;6—奥陶系白哈巴组变沉积岩;7—奥陶系东锡列克组变沉积岩;8—中生代花岗岩;9—古生代花岗岩;
 10—断裂及推测断裂;11—地体及编号;12—稀有金属成矿亚带及编号;13—伟晶岩矿集区及编号:①—青河伟晶岩矿集区;②—可可托海伟晶岩矿集区;③—库威-结别特伟晶岩矿集区;④—柯鲁木特-吉德克伟晶岩矿集区;⑤—卡拉额尔齐斯河上游伟晶岩矿集区;⑥—大喀拉苏-可可西尔伟晶岩矿集区;⑦—小喀拉苏-切别林伟晶岩矿集区;⑧—海流滩-也留曼伟晶岩矿集区;⑨—加曼哈巴伟晶岩矿集区
 I—北阿尔泰地体;II—中阿尔泰地体;III—琼库尔地体;IV—南阿尔泰地体;
 A—青河-哈龙稀有金属成矿亚带;B—加曼哈巴-大喀拉苏稀有金属成矿亚带

Fig. 1 Sketch geological map of the Altay orogenic belt (modified after Yuan et al., 2007)

1—Carboniferous volcanic-sedimentary rocks; 2—Devonian Altay Group volcanic-sedimentary rocks; 3—Devonian Kangbutiebao Group volcanic-sedimentary rocks; 4—Silurian metasedimentary rocks; 5—Silurian-Ordovician metasedimentary rocks; 6—Ordovician Baihaba Group metasedimentary rocks; 7—Ordovician Dongxilieke Group metasedimentary rocks; 8—Mesozoic granites; 9—Paleozoic granites;
 10—Measured and inferred faults; 11—Domain and its serial number; 12—Rare metal metallogenic subbelt and its serial number;
 13—Pegmatite ore centralization areas and its serial number: ①—Qinghe pegmatite ore centralization area; ②—Koktokay pegmatite ore centralization area; ③—Kuwei-Jiebierte pegmatite ore centralization area; ④—Kelumute-Jideke pegmatite ore centralization area;
 ⑤—Upstream of Kalaeerqisi River pegmatite ore centralization area; ⑥—Dakalasu-Kekexier pegmatite ore centralization area;
 ⑦—Xiaokalasu-Qiebielin pegmatite ore centralization area; ⑧—Hailiutan-Yeliuman pegmatite ore centralization area;
 ⑨—Jiamanhaba pegmatite ore centralization area
 I—North Altay domain; II—Central Altay domain; III—Qiongkuer domain; IV—South Altay domain;
 A—Qinghe-Halong rare metal metallogenic subbelt; B—Jiamanhaba-Dakalasu rare metal metallogenic subbelt

作用(Zheng et al., 2007; Jiang et al., 2010)为特征;二叠纪弧-弧碰撞的后增生造山阶段(Cai et al., 2016),以大量的I型和A型花岗岩(Tong et al., 2014; Liu et al., 2018)、基性岩(Wan et al., 2013; Cai et al., 2016)、高温变质作用(Wang W et al., 2009; 2014; 仝来喜等, 2013)和额尔齐斯断裂带走滑运动(Li et al., 2014)为特征;而后的三叠纪后造山伸展阶段,以少量花岗岩(Wang T et al., 2014; 刘文政, 2015; 陈有炘等, 2017)和大量稀有金属伟晶岩形成特征(Wang et al., 2007; Lü et al., 2012; Zhang et al., 2016; Zhou et al., 2018; 任宝琴等, 2011; 陈剑峰, 2011; 马占龙, 2015; 刘文政, 2015; 杨富全等, 2018)。

2.2 伟晶岩田分布及其地质特征

新疆阿尔泰是世界上最大的伟晶岩省之一。据统计,在全区20 000 km²范围内分布有100 000余条伟晶岩脉(邹天人等, 2006)。区内分布青河-哈龙和加曼哈巴-大喀拉苏2个伟晶岩型稀有金属成矿亚带。前者位于中阿尔泰可可托海复背斜褶皱带,由青河、可可托海、库威-结别特、柯鲁木特-吉德克和卡拉额尔齐斯上游5个伟晶岩矿集区组成;后者位于琼库尔地体克兰复向斜褶皱带,由大喀拉苏-可可西尔、小喀拉苏-切别林、海流滩-也留曼和加曼哈巴4个伟晶岩矿集区组成(邹天人等, 2006)。

青河伟晶岩矿集区位于青河县中部、青格里复背斜倾伏端,由阿木拉宫、布鲁克特-纳林萨拉、阿拉捷克-塔拉提、和米尔根特4个主要伟晶岩矿田组成(邹天人等, 2006)。区内广泛出露早古生代哈巴河群变沉积岩和少量的早古生代—中生代花岗质岩类。大多数伟晶岩岩体较小,呈透镜状、板状或脉状侵入到哈巴河群变沉积岩中。伟晶岩主要类型是微斜长石型,内部分带简单;少数为锂辉石型伟晶岩,仅在塔拉提、拜城和阿木拉宫产出小型的Li-Be-Ta-Nb矿床。

可可托海伟晶岩矿集区位于卡依尔特河与额尔齐斯河之间、巴拉额尔齐斯复背斜的东南倾伏端,由可可托海、琼湖-道儿久、阿拉尔和阿拉依格尔4个主要的伟晶岩矿田组成(邹天人等, 2006),是阿尔泰最重要的稀有金属产区。区内花岗岩广泛出露,包括古生代的可可托海片麻状黑云母花岗岩和中生代阿拉尔似斑状黑云母花岗岩2个岩基。地层出露于矿田西南部,主要为早古生代哈巴河群。基性岩仅出

露于可可托海镇周边。区内伟晶岩以可可托海3号脉为代表,呈岩钟状侵入于早泥盆世斜长角闪岩中,以其岩体规模大、分异程度高和矿种齐全而闻名于世。其余脉体多呈脉状或板状侵入于哈巴河群变沉积岩或古生代花岗岩中。伟晶岩主要类型为微斜长石型、锂辉石型和磷铝锂石型伟晶岩,矿床类型丰富,如阿斯道恰Be矿床、可可托海3号脉超大型Be-Li-Ta-Nb-Cs-Rb-Hf矿床、小虎斯特91号脉Li-Be-Ta-Nb矿床、库吉尔特碧玺矿以及可可托海1号脉Li-Be-Ta-Nb矿床等。

库威-结别特伟晶岩矿集区位于库威河与结别特河流域之间、巴拉额尔齐斯背斜的西南翼,主要由库威-结别特、柯布卡尔、丘曲拜和蒙库4个伟晶岩矿田组成(邹天人等, 2006)。区内出露地层主要为早古生代哈巴河群、库鲁木提群以及中古生代康布铁堡组。侵入岩以中古生代的塔木别勒斜尔花岗岩基为主,花岗闪长岩以及角闪岩及斜长角闪岩小岩株局部出露。区内伟晶岩岩体规模较小,伟晶岩常以脉状或透镜状侵入到沉积岩或花岗岩中。内部结构分带和矿物组合亦较为简单,主要为微斜长石型和白云母型伟晶岩,以白云母和Be矿化为主。

柯鲁木特-吉德克伟晶岩矿集区位于角儿特河上游地区、巴拉额尔齐斯背斜的北西倾伏端,由阿拉山、柯鲁木特-吉德克、卡鲁安、阿祖拜和群库尔5个伟晶岩矿田组成(邹天人等, 2006)。区内花岗岩广泛出露,主要为早古生代花岗闪长岩、黑云母花岗岩和片麻状二云母花岗岩,以及中生代哈龙和琼库尔花岗岩基。地层出露于伟晶岩田西部,为早古生代库鲁木提群。伟晶岩岩体规模不一,最大者延长千余米,呈板状或分支复合脉状侵入。伟晶岩主要类型为微斜长石型、钠长石-锂辉石型、锂辉石型,部分伟晶岩分异程度较高,稀有金属矿化类型丰富,如柯鲁木特112号脉中型Li-Be-Ta-Nb矿床、卡鲁安大型Li矿床、阿祖拜Be矿床以及群库Be-Ta-Nb矿床等。

卡拉额尔齐斯河上游伟晶岩矿集区位于卡拉额尔齐斯中上游地区,受乌里齐复背斜控制,由阿巴宫、胡鲁宫、巴塞、吐尔贡和切伯罗依-阿克贡盖特等5个伟晶岩矿田组成(邹天人等, 2006)。区内花岗岩广泛出露,主要为早古生代乌里齐花岗岩基和中古生代布克萨拉花岗岩基。早古生代库鲁木提群和中古生代康布铁堡组地层局部出露。伟晶岩岩体大多

较小,内部结构分带简单,呈板状或脉状侵入到花岗岩中。伟晶岩主要类型为微斜长石型、锂辉石型,稀有金属矿化以小型Be矿和Li-Be-Ta-Nb矿为主。

大喀拉苏-可可西尔伟晶岩矿集区位于阿勒泰市东南40 km的山前丘陵地带、卡尔巴-锡伯渡晚古生代深成岩浆弧东端,由大喀拉苏和可可西尔2个伟晶岩矿田组成(邹天人等,2006)。区内出露中、晚古生代花岗岩和中古生代阿勒泰组。伟晶岩大多规模较小,内部结构分带和矿物组合简单,呈板状或脉状侵入于地层或花岗岩。伟晶岩主要类型为微斜长石型,稀有金属矿化程度较低,仅在大喀拉苏1号脉中发现小型的Be-Nb-Ta矿床。

小喀拉苏-切别林伟晶岩矿集区位于克兰河与布尔津河之间,受切别林复背斜及断裂控制,由切木尔切克、小喀拉苏、塔尔郎、切别林、阿拉尕克、阿克赛依-阿克苏、阿克巴斯塔乌、萨尔加克和乌鲁克特9个伟晶岩矿田组成(邹天人等,2006)。区内广泛出露塔尔郎、切木尔切克和阿苇滩3个早古生代—中古生代花岗岩基,局部出露晚古生代花岗岩株、早古生代哈巴河群以及中古生代阿勒泰组。伟晶岩大多规模较小,内部结构分带简单,呈板状或脉状侵入。伟晶岩主要类型为微斜长石型、白云母型,矿化多以白云母和Be为主,仅在小喀拉苏和磨什尕地区发现小型Li-Be-Ta-Nb和碧玺矿床,少数脉体可能存在REE矿化。

海流滩-也留曼伟晶岩矿集区位于布尔津河中游,受齐里木塔勒复背斜控制,由海流滩、冲乎尔和也留曼3个伟晶岩矿田组成。区内岩浆岩主要为中古生代齐里木塔勒花岗岩基,片麻岩和阿勒泰组沉积岩局部出露。伟晶岩脉体规模较小,内部结构分带和矿物组合简单,呈脉状或板状侵入。伟晶岩主要类型为微斜长石型、白云母型,矿化简单,以Be±Ta-Nb和白云母矿化为主,少数脉体可能存在REE矿化。

加曼哈巴伟晶岩矿集区位于加曼哈巴河上游、卡尔巴-锡伯渡古生代岩浆弧西段、包古图拜复背斜的北翼(邹天人等,2006)。区内花岗岩广泛分布,主要为早古生代—中古生代加曼哈巴花岗岩基,是伟晶岩的主要围岩。矿田内伟晶岩数量较少,分异程度低,呈板状或脉状侵入。伟晶岩主要类型为微斜长石型,稀有金属矿化程度低,以Be矿化为主,少量脉体显示Be-Ta-Nb矿化。

3 阿尔泰伟晶岩成因及其成矿特征

3.1 成岩成矿时代

对近年来利用锆石和铌钽矿U-Pb定年以及辉钼矿Re-Os年龄所获得的伟晶岩成岩成矿时代的统计结果表明,阿尔泰伟晶岩形成主要有4个期次,包括泥盆纪—早石炭世(403~333 Ma)、二叠纪(275~250 Ma)、三叠纪(248~200 Ma)和侏罗纪(199~157 Ma)(Wang et al., 2007; Lü et al., 2012; 2018; 2019; Liu et al., 2014; Che et al., 2015; Zhang et al., 2016; Zhou et al., 2018; 任宝琴等, 2011; 陈剑峰, 2011; 吕正航等, 2015; 马占龙等, 2015; 刘文政, 2015; 课题组近年来未发表数据)(表1)。除少量的早古生代(476~426 Ma)变质伟晶岩外(王登红等, 2001; 任宝琴等, 2011),稀有金属伟晶岩的形成始于泥盆纪(403 Ma; Lü et al., 2018)。显然,与伟晶岩成岩相对应的是从古生代至中生代伟晶岩型稀有金属成矿作用显著增强,矿床规模也逐渐增大,并于三叠纪达到成岩成矿峰值(图2),以可可托海3号脉超大型Be-Li-Nb-Ta-Cs-Rb-Hf矿床(220~198 Ma)、卡鲁安大型Li矿床(225~216 Ma)、柯鲁木特中型Li-Be-Nb-Ta矿床(239~210 Ma)和库卡拉盖中型Li-Be-Nb-Ta矿床(早期钠长石伟晶岩形成于228 Ma,晚期锂辉石-钠长石伟晶岩形成于211 Ma)为代表。因此,与伟晶岩有关的稀有金属成矿事件也可划分出以下4期:①泥盆纪—石炭纪小型Be-Nb-Ta±Li和白云母矿,以青河塔拉提、阿木拉宫和铁木勒特伟晶岩为代表;②二叠纪

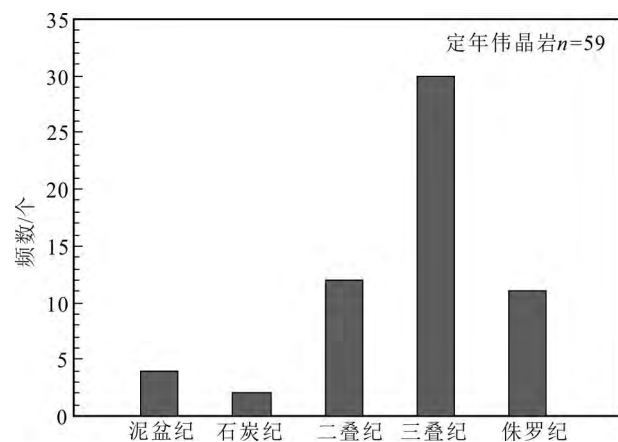


图2 阿尔泰造山带稀有金属伟晶岩年龄统计
Fig. 2 Age statistics of rare metal pegmatites in the Altay orogenic belt

表 1 阿尔泰造山带伟晶岩矿化类型、规模及年龄统计

Table 1 Statistics of mineralization type, size and age of pegmatites in the Altay orogenic belt

地体及伟晶岩矿集区	伟晶岩田	样品编号	矿化类型	规模	年龄/Ma	定年方法	数据来源	
加曼哈巴	大萨孜	DSZ01	Be	矿化点	239.0±2.6	锆石 U-Pb	未发表	
	加曼哈巴	JMHB02	Be-Nb-Ta	小型	394.8±4.0	锆石 U-Pb	Lü et al., 2018	
	加曼哈巴	HB08-6	Be-Nb-Ta	小型	269.4±1.6	锆石 U-Pb	任宝琴等, 2011	
	加曼哈巴	HB08-6	Be-Nb-Ta	小型	260.4±4.0	锆石 U-Pb	Lü et al., 2019	
	加曼哈巴	HB08-7	Be	小型	237.5±2.6	锆石 U-Pb	任宝琴等, 2011	
海流滩-也留曼	也留曼	BRJ08-13	Be、白云母	小型	476±12	锆石 U-Pb	任宝琴等, 2011	
	也留曼	BRJ08-15	REE	矿化点	263.8±1.6	锆石 U-Pb	任宝琴等, 2011	
	也留曼	BRJ08-15	REE	矿化点	262.9±3.8	锆石 U-Pb	Lü et al., 2019	
	冲乎尔	CHE01	Be	矿化点	234.2±2.4	锆石 U-Pb	未发表	
	海流滩	HLT01	REE	矿化点	253.8±4.1	锆石 U-Pb	Lü et al., 2019	
琼库尔	切别林	QBL02	Be-Nb-Ta	小型	402±5.5	锆石 U-Pb	Lü et al., 2018	
	切别林	BRJ08-7	Be	小型	240.5±1.4	锆石 U-Pb	任宝琴等, 2011	
	阿克巴斯塔乌	BRJ08-10	Be	小型	249.7±0.7	锆石 U-Pb	任宝琴等, 2011	
	小喀拉苏	12XKLS-9/12	Li-Nb-Ta	小型	258-263	铌钽矿 U-Pb	Zhou et al., 2018	
	小喀拉苏	No. 208	Li-Be-Nb-Ta	小型	241.5±3.1	锆石 U-Pb	未发表	
	磨什尕	MSG01	Li-Ta-Nb、碧玺	小型	249.2±2.9	锆石 U-Pb	未发表	
	塔尔朗	TEL-1	无矿化	-	248.2±2.2	锆石 U-Pb	Zhou et al., 2018	
	塔尔朗	TEL01	Be、白云母	小型	255.5±2.7	锆石 U-Pb	Lü et al., 2019	
	萨尔加克	SEJK01	Li-Be-Nb-Ta	矿化点	252.7±2.1	锆石 U-Pb	Lü et al., 2019	
	阿克巴斯塔乌	AKB01	Be-Nb-Ta	小型	253.0±3.0	锆石 U-Pb	Lü et al., 2019	
	切木尔切克	QME01	REE	矿化点	255.3±2.4	锆石 U-Pb	Lü et al., 2019	
	切木尔切克	QME02	Li-Be-Nb-Ta	矿化点	253.5±3.2	锆石 U-Pb	Lü et al., 2019	
	大喀拉苏-可可西尔	大喀拉苏	FH08-5	Be	矿化点	272.5±1.4	锆石 U-Pb	任宝琴等, 2011
		大喀拉苏	No.1	Be-Nb-Ta	小型	258.0±3.8	锆石 U-Pb	Lü et al., 2019
大喀拉苏		No.1	Be-Nb-Ta	小型	239.6±3.8	铌钽矿 U-Pb	Zhou et al., 2018	
将军山		JJS13-1	REE	矿化点	250.1±8.1	锆石 U-Pb	刘云龙, 2017	
两棵树		jg01	次生 Fe 矿?	矿化点	376.7±1.3?	锆石 U-Pb	姜丽萍, 2012	
青河	塔拉提	TKT01	Li-Be-Nb-Ta	小型	385.9±3.5	锆石 U-Pb	Lü et al., 2018	
	阿拉捷克	ALJK01	无矿化	-	368.0±4.0	锆石 U-Pb	Lü et al., 2018	
	阿木拉宫	AMLG01	Li-Be-Nb-Ta	小型	358.3±4.6	锆石 U-Pb	Lü et al., 2018	
	铁木勒特	TMLT01	Be、白云母	小型	333.0±3.0	锆石 U-Pb	Lü et al., 2018	
	拜城	No. 40	Li-Be-Nb-Ta	小型	275.5±4.2	锆石 U-Pb	任宝琴等, 2011	
拜城	No. 40	Li-Be-Nb-Ta	小型	274.0±5.3	锆石 U-Pb	Lü et al., 2019		
青河	阿斯喀尔特	AKG06	Be-Mo	中型	220.6±1.6	锆石 U-Pb	刘文政, 2015	
中阿尔泰	可可托海	No. 3	Li-Be-Ta-Nb-Cs-Rb-Hf	超大型	220~198	SHRIMP 锆石 U-Pb	Wang T et al., 2007	
	可可托海	No. 3	Li-Be-Ta-Nb-Cs-Rb-Hf	超大型	218±2	铌钽矿 U-Pb	Che et al., 2015	
	可可托海	No. 3	Li-Be-Ta-Nb-Cs-Rb-Hf	超大型	210~208	辉钨矿 Re-Os	Liu et al., 2014	
	可可托海	No. 3	Li-Be-Ta-Nb-Cs-Rb-Hf	超大型	215~212	LAICPMS 锆石 U-Pb	陈剑峰, 2011	
	可可托海	No. 1	Li-Be-Nb-Ta	小(中)型	208.1±0.8	锆石 U-Pb	任宝琴等, 2011	
	可可托海	KP08-11	Li-Be-Nb-Ta	小型	212.7±2.5	锆石 U-Pb	任宝琴等, 2011	
	小虎斯特	No. 91	Li-Be-Nb-Ta	小(中)型	190.6±1.2	锆石 U-Pb	任宝琴等, 2011	
	库儒尔特	KP4-08-6	Li-Be-Nb-Ta	小型	180.7±0.5	锆石 U-Pb	任宝琴等, 2011	

续表 1
Continued Table 1

地体及伟晶岩矿集区	伟晶岩田	样品编号	矿化类型	规模	年龄/Ma	定年方法	数据来源	
卡拉额尔齐斯	阿巴宫	ALT10-1	Be-Nb-Ta	小型	246.8±1.2	锆石 U-Pb	任宝琴等,2011	
	虎斯特	FH08-8	Be-Nb-Ta	小型	244.3±1.1	锆石 U-Pb	任宝琴等,2011	
	虎斯特	HST-P	Be	小型	198.5±2.5	锆石 U-Pb	任宝琴等,2011	
	尚克兰	SKL01	Be	小型	约 208	锆石 U-Pb	未发表	
库威-结别特	库威	KWP-07	Be	小型	200.2±1.9	锆石 U-Pb	未发表	
	库威	No. 554	Be	小型	197.3±1.3	锆石 U-Pb	未发表	
	库威	KWP-10	Be	小型	194.2±1.8	锆石 U-Pb	未发表	
	库威	KWP-09	Be	小型	192.9±1.5	锆石 U-Pb	未发表	
中阿尔泰	柯鲁木特	No. 112	Li-Be-Nb-Ta	中型	238-210	锆石 U-Pb	Lü et al., 2012	
	柯鲁木特	FH08-11	Be-Nb-Ta	小型	202.9±0.8	锆石 U-Pb	任宝琴等,2011	
	佳木开	JMK10-2	Be-Nb-Ta-Cs	小型	212.2±1.7	锆石 U-Pb	任宝琴等,2011	
	佳木开	JMK10-A	Li-Be-Nb-Ta、碧玺	小型	199.1±1.0	锆石 U-Pb	任宝琴等,2011	
	佳木开	JMK09	Nb-Ta	小型	192.0±2.3	锆石 U-Pb	Zhang et al., 2016	
	群库	QK10-2	Be-Nb-Ta	小型	206.8±1.6	锆石 U-Pb	任宝琴等,2011	
	群库	QKE-2-1	Be-Nb-Ta	小型	194.3±1.6	锆石 U-Pb	Zhou et al., 2018	
	柯鲁木特-吉德克	库卡拉盖	No. 650	Li-Be-Nb-Ta	中型	211-228	锆石 U-Pb	马占龙等,2015
	卡鲁安	No. 805	Li	大型	216.0±2.6	锆石 U-Pb	马占龙等,2015	
	卡鲁安	No. 806	Li	大型	223.7±1.8	锆石 U-Pb	马占龙等,2015	
	卡鲁安	No. 807	Li	大型	221±1.5	锆石 U-Pb	马占龙等,2015	
	卡鲁安	No. 803	Li	大型	224.6±2.3	锆石 U-Pb	Zhang et al., 2016	
	阿祖拜	AZB01	Be	小型	191.6±2.0	锆石 U-Pb	Zhang et al., 2016	
	阿祖拜	No.328	Be、海蓝	小型	215.6±0.9	锆石 U-Pb	周天怡, 2015	
阿祖拜	No.528	Be、海蓝	小型	201.0±1.3	锆石 U-Pb	周天怡, 2015		
北阿尔泰	别也萨麻斯	No. L1	Li-Be-Nb-Ta	小(中)型	157.2±0.5	锆石 U-Pb	吕正航等,2015	

小-中型 Be-Nb-Ta±Li 矿和 REE 矿化,以大喀拉苏、萨尔加克和海流滩伟晶岩为代表;③ 三叠纪中-超大型 Li±Be-Nb-Ta±Cs 矿和小-中型海蓝宝石矿,以卡鲁安、可可托海、柯鲁木特、阿祖拜和阿斯喀尔特伟晶岩为代表;④ 侏罗纪小-中型 Be±Li±Nb-Ta 矿床和碧玺宝石矿,以库威、别也萨麻斯和库吉尔特伟晶岩为代表。

3.2 空间分布特征

不同期次的稀有金属伟晶岩显示出规律的空间分布特征,其中同碰撞成因的泥盆纪一早石炭世伟晶岩分布于琼库爾地体中,尤其集中分布于青河伟晶岩田内;后碰撞成因的二叠纪伟晶岩同样分布于琼库爾地体,主要集中于加曼哈巴-大喀拉苏伟晶岩成矿亚带范围;后碰撞成因的三叠纪伟晶岩分布较广,在琼库爾和中阿尔泰地体中皆有产出,而侏罗纪伟晶岩则主要产出于中阿尔泰地体中,少量产于北

阿尔泰地体中(表 1, 图 3)。

3.3 矿化类型

阿尔泰伟晶岩矿化类型多样,稀有金属(Li、Be、Nb、Ta、Cs)矿床、白云母矿床、海蓝和碧玺宝石矿床均有产出。Li 的矿石矿物主要为锂辉石,其次为锂云母,锂电石、锂霞石和磷铁锂矿-磷锰锂矿偶有发育。Be 的矿石矿物主要为绿柱石,金绿宝石和硅铍石鲜有发育。Nb 和 Ta 的矿石矿物以铌铁矿、铌锰矿、钽锰矿和重钽铁矿为主,细晶石和烧绿石次之。Cs 的矿石矿物主要为铯榴石,富 Cs 绿柱石和云母偶有发育。

分布于琼库爾地体中的同碰撞成因伟晶岩和后碰撞成因的二叠纪伟晶岩主要稀有金属矿化类型为 Be、Be-Nb-Ta、Li-Be-Nb-Ta;分布于琼库爾和中阿尔泰地体中的后碰撞三叠纪伟晶岩主要稀有金属矿化类型为 Be、Li-Nb-Ta、Li-Be-Nb-Ta、Be-Li-Nb-Ta(-Cs-

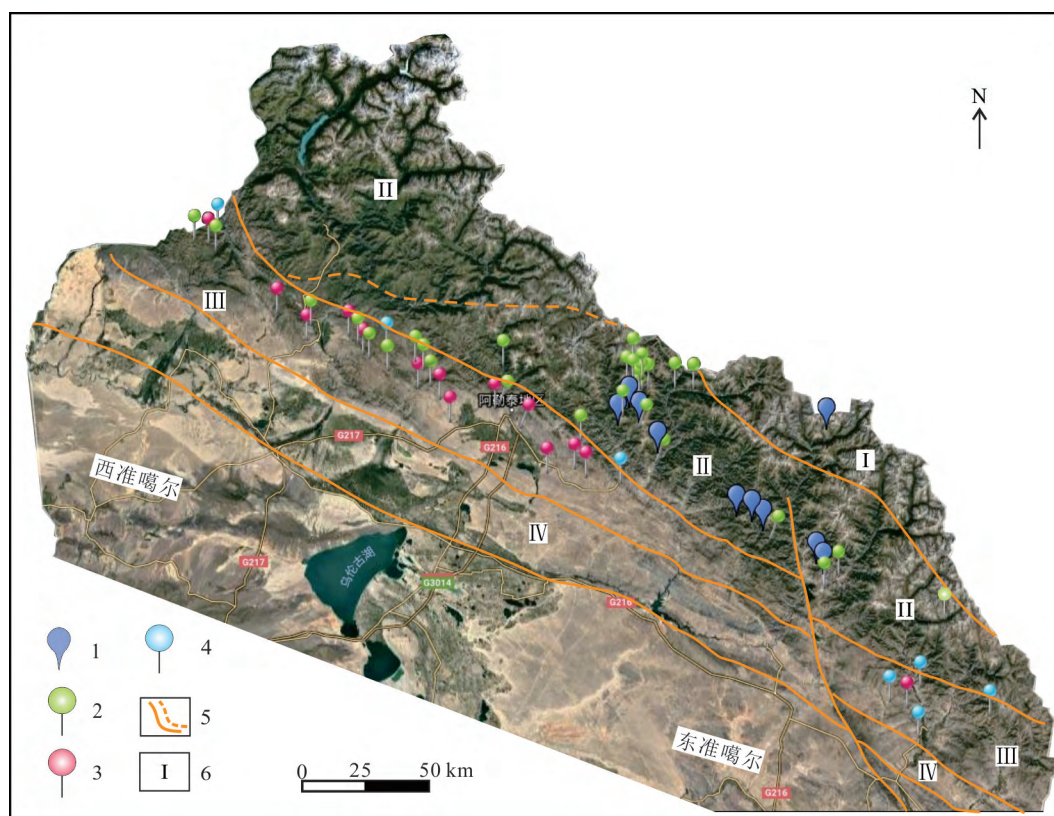


图3 阿尔泰造山带不同时代伟晶岩的空间分布图

1—侏罗纪伟晶岩;2—三叠纪伟晶岩;3—二叠纪伟晶岩;4—石炭纪—泥盆纪伟晶岩;5—断裂及推测断裂;6—地体及编号

Fig. 3 Spatial distribution of various generations of pegmatites in the Altay orogenic belt

1—Jurassic pegmatites; 2—Triassic pegmatites; 3—Permian pegmatites; 4—Carboniferous-Devonian pegmatites;

5—Measured and inferred faults; 6—Domain and its serial number

Rb-Hf)。显然,区内主要的 $Li\pm Be\pm Nb-Ta\pm Cs$ 稀有金属矿床主要产出于中阿尔泰地体中,而琼库尔地体中仅发育一些小型稀有金属矿床或矿化点(表1)。区内伟晶岩Be矿床从古生代至中生代均有发育, Li矿床主要形成于中生代三叠纪伟晶岩中, Nb-Ta矿化大多在 $Li\pm Be$ 矿化的伟晶岩中以伴生形式产出。相较松潘-甘孜-甜水海的Li成矿带以及华南的Nb-Ta成矿带而言, Be矿是阿尔泰稀有金属成矿带中的优势矿种。除阿斯喀尔特、柯鲁木特112号脉和可可托海3号脉等已探明的中-超大型Be矿床外(邹天人等, 2006), 在阿祖拜-佳木开-群库尔伟晶岩分布区内发育有大量的微斜长石型伟晶岩, 在早期的文象带中含有大量的绿柱石矿物, 预示着发生Be的矿化。由于这些脉体大多未进行过详细的地质勘查工作, 因此, 上述伟晶岩集中分布区对实现Be资源量增储具有很好的前景。此外, 近年来笔者在琼库尔地体

中的海流滩-也留曼和小喀拉苏-切别林伟晶岩矿田中发现一些二叠纪伟晶岩脉体含有较多的独居石和磷钇矿等稀土元素磷酸盐矿物, 暗示可能具有伟晶岩型稀土元素成矿的潜力。

3.4 控制因素

3.4.1 构造

阿尔泰伟晶岩区位于哈纳斯-青河布格重力异常梯度带内(邹天人等, 2006), 由西南至北东, 布格重力异常呈逐渐增加的趋势, 表明加厚的地壳更有利于伟晶岩的成岩成矿。在2011~2014年执行新疆有色集团科研项目《新疆阿尔泰成矿带哈龙-青河一带稀有金属成矿规律及找矿靶区预测研究》(张辉等, 2014)期间, 本课题组开展了对哈拉额尔齐斯河上游、库威-结别特和别也萨麻斯-阿斯喀尔特伟晶岩分布区1:5万遥感光谱提取伟晶岩及构造信息的研究, 研究结果表明, 哈拉额尔齐斯河上游伟晶岩田总

体线性构造以EW向为主,过滤后的平均长度53 m的953条伟晶岩脉的平均方位为NW 312°;库威-结别特伟晶岩田总体线性构造为NNW向,过滤后的平均长度33 m的1027条伟晶岩脉的平均方位为NW 311°;而别也萨麻斯-阿斯喀尔特花岗岩伟晶岩分布区总体线性构造为NWW向,过滤后的平均长度39 m的1911条伟晶岩脉的平均方位为NW318°。

对哈龙-青河稀有金属成矿亚带中800余条伟晶岩脉走向的实际测量发现,伟晶岩走向以NW 320°~330°为主,NE向的次之,近EW向、SN向的伟晶岩相对较少(图4)。显然,阿尔泰造山带伟晶岩长轴方向与区域主构造线方向总体一致,因此,阿尔泰伟晶岩分布明显受造山运动形成的区域性构造(断裂和背斜)所控制,这些构造为伟晶岩岩浆提供了运移通道和侵位空间。

3.4.2 变质作用

世界范围内的稀有金属伟晶岩主要产于绿片岩相至低角闪岩相变质带内(Cěrný, 1991b)。阿尔泰哈龙-青河稀有金属成矿亚带和加曼哈巴-大喀拉苏稀有金属成矿亚带中以发育绿片岩至角闪岩相变质为主,局部可达麻粒岩相。具体到单个伟晶岩矿田,其变质程度略有差别。其中青河伟晶岩伟晶岩田由南至北分布有红柱石-十字石带、黑云母带(为主)和夕线石带;可可托海伟晶岩伟晶岩田由中心至外部依次分布黑云母带、石榴子石-堇青石带、蓝晶石带和夕线石带;库威-结别特和柯鲁木特-吉德克伟晶岩伟晶岩田主要分布有夕线石带和蓝晶石带;卡拉额尔齐斯河上游和大喀拉苏-可可西尔伟晶岩伟晶岩田主要分布蓝晶石带,局部发育绿泥石带和石榴子

石-堇青石带;小喀拉苏-切别林伟晶岩伟晶岩田西南侧和北东侧分别为石榴子石-堇青石带和蓝晶石带;海流滩-也留曼伟晶岩伟晶岩田由南向北西依次发育蓝晶石带、红柱石-十字石带和黑云母带;加曼哈巴伟晶岩伟晶岩田由内而外分布有红柱石-十字石带和石榴子石-十字石带(图5)。诚然,区域变质作用因变质脱水可形成变质伟晶岩(王登红等, 2001; 邹天人等, 2006; Dill, 2015a; 2015b),但不会形成具有一定规模的稀有金属伟晶岩。已有研究显示,变质伟晶岩主要分布于也留曼、那森恰和拜兴等地,形成于早古生代—中古生代(476~426 Ma, 王登红等, 2001; 任宝琴等, 2011);这类伟晶岩以工业白云母矿化和富含变质矿物(如蓝晶石、绿泥石等)而区别于其他稀有金属伟晶岩。

泥质岩/云母片岩的低压高温变质作用形成麻粒岩相,因白云母、黑云母、堇青石等脱挥发分(B、P、F)、脱水以及释放出稀有金属(Li、Be、Rb、Cs)、高场强元素(Sn、Nb、Ta、U)并转入到含水相中,含水流体的向上迁移降低中-上地壳的熔点,促使部分熔融形成稀有金属花岗岩和伟晶岩(Cěrný, 1991b; Cuney et al., 2002; 2014)。已有的研究显示,新疆阿尔泰以超高温(UHT)麻粒岩相为特征的2次变质作用发生于377~391 Ma(650~720 °C, Zheng et al., 2007; Jiang et al., 2010)和270~290 Ma (Wang W et al., 2009; 2014; Li et al., 2014; 胡霁琴等, 2006; 全来喜等, 2013),分别归因于约390 Ma洋脊俯冲诱导的软流圈上涌(Jiang et al., 2010)和约277 Ma的板片拆离并沿着额尔齐斯构造带左旋走滑引起的伸展减压所致(Li et al., 2014)。显然,分布于琼库尔地体中的同(碰撞)造山伟晶岩主要形成时代略晚于377~391 Ma的超高温麻粒岩相变质作用的时间,而同样分布于琼库尔构造单元中的二叠纪伟晶岩(280~250 Ma)形成时代介于或稍晚于270~290 Ma超高温麻粒岩相变质作用时间;650~720 °C超高温变质温度与200~300 MPa条件下花岗岩低共熔温度((680±20) °C)、伟晶岩液相线温度((700±50) °C)吻合,可以使泥质岩发生小比例部分熔融直接形成独立的伟晶岩岩浆。

尽管没有证据表明阿尔泰三叠纪伟晶岩的形成也与超高温(UHT)麻粒岩相变质作用存在耦合关系,但从空间分布特征看,它主要分布于琼库尔和中阿尔泰地体中较大的范围(纵深>60~80 km),而同碰撞成因的泥盆纪—早石炭世伟晶岩、后碰撞成因的二叠纪伟晶岩呈线状分布于额尔齐斯断裂带北侧弧

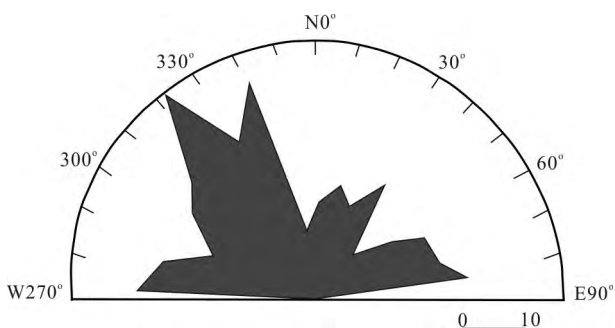


图4 哈龙-青河稀有金属成矿亚带中800余条伟晶岩脉的走向玫瑰花图

Fig. 4 Rose diagram of the strikes of ca. 800 pegmatites in Qinghe-Halong rare metal metallogenic subbelt

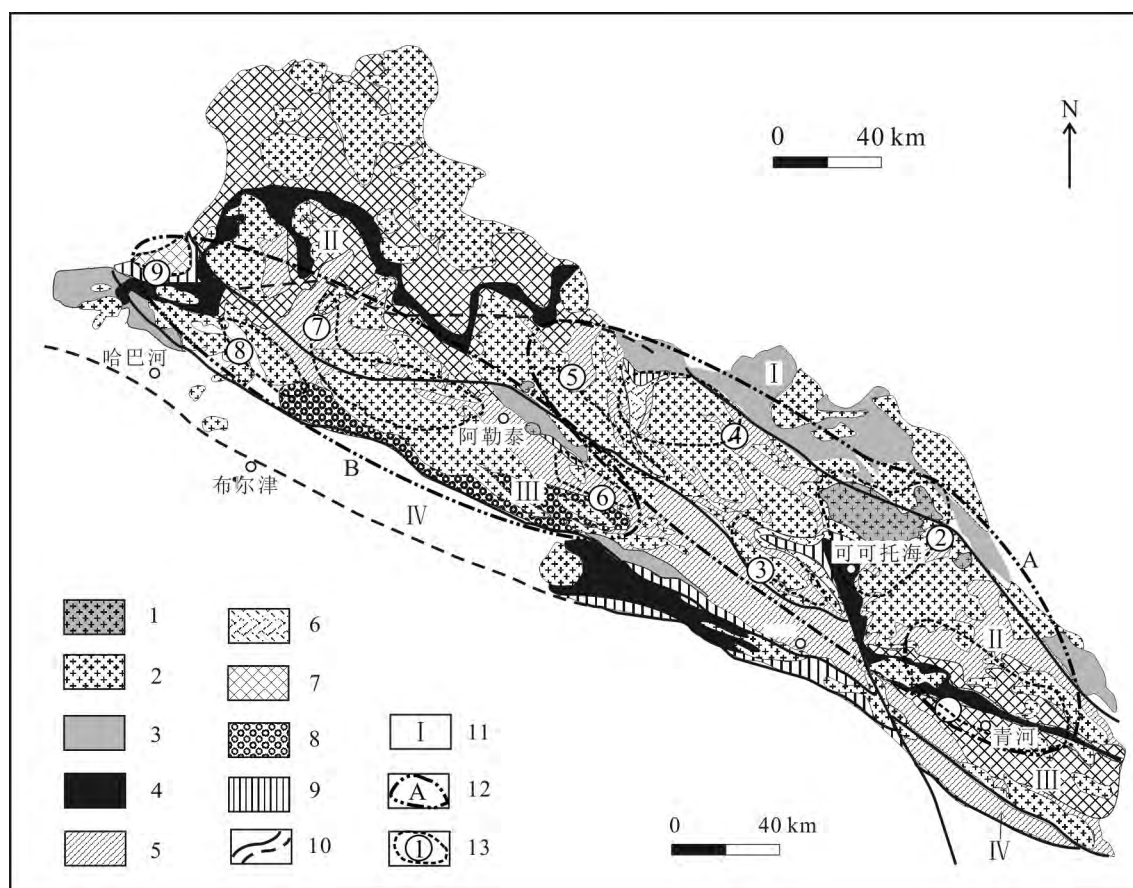


图5 阿尔泰造山带中主要变质带的分布特征(据 Li et al., 2014 修改)

1—中生代花岗岩;2—古生代花岗岩;3—绿泥石带;4—黑云母带;5—夕线石带;6—蓝晶石带;7—红柱石(蓝晶石)-十字石带;8—石榴子石-堇青石带;9—石榴子石-十字石带;10—断裂及推测断裂;11—地体及编号;12—稀有金属成矿亚带及编号;13—伟晶岩矿集区及编号:①—青河伟晶岩矿集区;②—可可托海伟晶岩矿集区;③—库威-结别特伟晶岩矿集区;④—柯鲁木特-吉德克伟晶岩矿集区;⑤—卡拉额尔齐斯河上游伟晶岩矿集区;⑥—大喀拉苏-可可西尔伟晶岩矿集区;⑦—小喀拉苏-切别林伟晶岩矿集区;⑧—海流滩-也留曼伟晶岩矿集区;⑨—加曼哈巴伟晶岩矿集区

I—北阿尔泰地体;II—中阿尔泰地体;III—琼库尔地体;IV—南阿尔泰地体;A—青河-哈龙稀有金属成矿亚带;B—加曼哈巴-大喀拉苏稀有金属成矿亚带

Fig. 5 Distribution of the major metamorphic zones in the Altay orogenic belt (modified after Li et al., 2014)

1—Mesozoic granite; 2—Paleozoic granite; 3—Chlorite zone; 4—Biotite zone; 5—Sillimanite zone; 6—Kyanite zone; 7—Andalusite (kyanite)-staurolite zone; 8—Garnet-cordierite zone; 9—Garnet-staurolite zone; 10—Measured and inferred faults; 11—Domain and its serial number; 12—Rare metal metallogenic subbelt and its serial number; 13—Pegmatite ore centralization area and its serial number: ①—Qinghe pegmatite ore centralization area; ②—Koktokay pegmatite ore centralization area; ③—Kuwei-Jiebielte pegmatite ore centralization area; ④—Kelumute-Jideke pegmatite ore centralization area; ⑤—Upstream of Kalaeerqisi River pegmatite ore centralization area; ⑥—Dakalasu-Kekexier pegmatite ore centralization area; ⑦—Xiaokalasu-Qiebielin pegmatite ore centralization area; ⑧—Hailiutan-Yeliuman pegmatite ore centralization area; ⑨—Jiamanhaba pegmatite ore centralization area

I—North Altay domain; II—Central Altay domain; III—Qiongkuer domain; IV—South Altay domain; A—Qinghe-Halong rare metal metallogenic subbelt; B—Jiamanhaba-Dakalasu rare metal metallogenic subbelt

前盆地中的狭长地带(纵深<20~40 km),因此有理由推测三叠纪伟晶岩侵入规模及其强度更大。

3.4.3 温度和压力

温度和压力是制约伟晶岩岩浆分异演化的重要

因素。London(2008)认为不含矿伟晶岩的形成压力为500~300 MPa,高分异稀有金属伟晶岩和晶洞伟晶岩形成压力则为300~200 MPa。伟晶岩分离结晶作用的开始与液相线过冷状态密切相关(London,

2014; 2018a; 2018b), 晶体成核延迟、晶体生长速率、晶体成核密度取决于液相线过冷程度 ($\Delta t = \text{液相线温度} - \text{伟晶岩结晶环境温度}$)。当 $\Delta t = 150 \sim 200^\circ\text{C}$, 熔体具有最小的晶体成核延迟时间和最大的晶体生长速率、晶体成核密度, 促使形成细晶岩; 大的过冷程度 ($\Delta t \geq 250^\circ\text{C}$) 将导致的伟晶岩的外带(边缘带、文象壁带)的形成; 随着结晶作用的进行, 总的熔体组成发生变化, 过冷程度逐渐降低, 而小的过冷程度 ($\Delta t = 50 \sim 130^\circ\text{C}$) 有利于伟晶岩内带(中间带和核部带)的形成。已有的研究显示, 在 $200 \sim 300 \text{ MPa}$ 下, H_2O 饱和的人造花岗岩体系 ($\text{Ab}_{38}\text{Or}_{29}\text{Qz}_{33}$) 的低共熔温度为 $(680 \pm 20)^\circ\text{C}$ (Tuttle et al., 1958)。伟晶岩熔体组成类似于含 H_2O 花岗岩组成, 其液相线温度为 $(700 \pm 50)^\circ\text{C}$ (London, 2014), 其中 750°C 对应于 H_2O 不饱和或含有少量 Ca 的含水花岗质熔体, 而 650°C 对应于富助熔组分 (H_2O 、B、P 或 F) 的花岗质熔体。已报道的 200 MPa 下富挥发分的类似于高度演化的 Li 伟晶岩的最低固相线温度为 450°C (London, 1989), 与长石固溶体溶离温度计记录的伟晶岩中碱性长石结晶温度 $(450 \pm 50)^\circ\text{C}$ (Colombo et al., 2012; London, 2018a; 2018b) 一致。

对阿尔泰二叠和三叠纪的稀有金属伟晶岩中石英矿物捕获的流体包裹体显微测温结果表明, 前者的侵位温压范围分别为 $580 \sim 430^\circ\text{C}$ 和 $398 \sim 334 \text{ MPa}$, 后者分别为 $600 \sim 416^\circ\text{C}$ 和 $350 \sim 266 \text{ MPa}$, 二者对应的侵位深度分别为 $11.4 \sim 14.5 \text{ km}$ 和 $8.4 \sim 11.8 \text{ km}$ (吕正航, 2013; 黄永胜等, 2016)。上述伟晶岩形成的温压条件与 London (2008) 所提出的温压范围有所不同, 侵位深度也明显大于 Ginsburg 等 (1979) 提出的稀有金属伟晶岩侵位深度 ($3.5 \sim 7.0 \text{ km}$), 表明初始岩浆来源较深。三叠纪伟晶岩侵位深度明显浅于二叠纪伟晶岩, 这有利于挥发分的富集, 降低了岩浆的液相线、固相线温度, 从而促进岩浆充分的分异演化, 以及稀有金属元素在残余熔体中的富集成矿。

3.4.4 矿化机制

稀有金属 Li、Be、Nb、Ta、Rb、Cs、Zr 和 Hf 在伟晶岩中的矿化, 一方面受控于初始岩浆中的稀有金属含量, 另一方面则与侵位后岩浆的温度和成分变化密切相关。Be 的成矿广泛发生于低分异至高分异伟晶岩中, 原因在于绿柱石溶解度受熔体中 Be 含量控制, 而熔体中 Be 又受控于温度和铝饱和指数 (ASI), 随温度和/或 ASI 降低, 绿柱石饱和和所需的 Be 含量阈值显著降低 (Evensen et al., 1999; 2002)。国

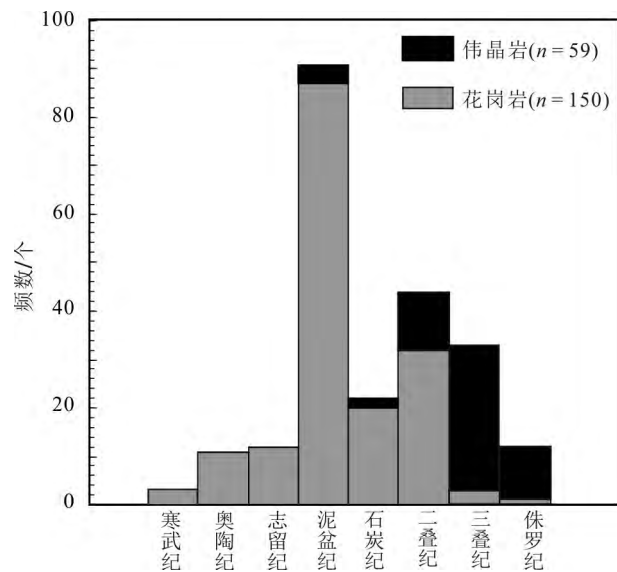


图6 阿尔泰造山带伟晶岩和花岗岩的形成年龄统计
Fig. 6 Age statistics of pegmatites and granites in the Altay orogenic belt

外 12 条富绿柱石的伟晶岩中 $w(\text{Be})$ 平均 205×10^{-6} , 其绿柱石饱和的 $w(\text{Be})$ 阈值为 35×10^{-6} (London, 2015)。在 $490 \sim 580^\circ\text{C}$ 的过铝质体系中 (HGS5Q, ASI=1.3 的石英饱和的人造花岗岩组成; Evensen et al., 2002), 实验获得的绿柱石饱和的 $w(\text{Be})$ 阈值仅为 30×10^{-6} (London, 2015)。绿柱石在高度过冷熔体中很低的溶解度可以很好解释伟晶岩早期边缘带、壁带中绿柱石的结晶 (London, 2018a; 2018b), 如阿祖拜-佳木开-群库尔伟晶岩田中早期文象结构带中大量绿柱石析出。然而, 在可可托海 3 号脉中, Be 成矿主要发生在文象带与块体微斜长石带之间的糖粒状钠长石带中, 绿柱石的大量晶出难以用过冷和 ASI 降低来解释。由于绿柱石与氟磷灰石密切共生, 推测富 P、F 相与硅酸盐相的液态不混溶可能是导致该带 Be 的矿化原因 (张辉, 2001)。

Li 的矿化主要受控于岩浆中 Li 的含量, 透锂长石、锂辉石、锂霞石饱和的花岗质熔体需 $w(\text{Li}_2\text{O})$ 约为 1.5% (Maneta et al., 2015) 或者 $w(\text{Li}_2\text{O})$ 为 2% (London, 2008)。如果初始岩浆中 Li 含量足够高, 可在早期结构带甚至全脉矿化, 形成卡鲁安式的全脉 Li 矿化型伟晶岩。而在高分异的富 Li 伟晶岩中且硅饱和的情况下, 受温压条件控制, 可形成高温透锂长石 ($\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$)、高压 α -锂辉石 ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) 型或低温低压锂霞石 (LiAlSiO_4) 型伟晶岩 (London, 2008)。如前

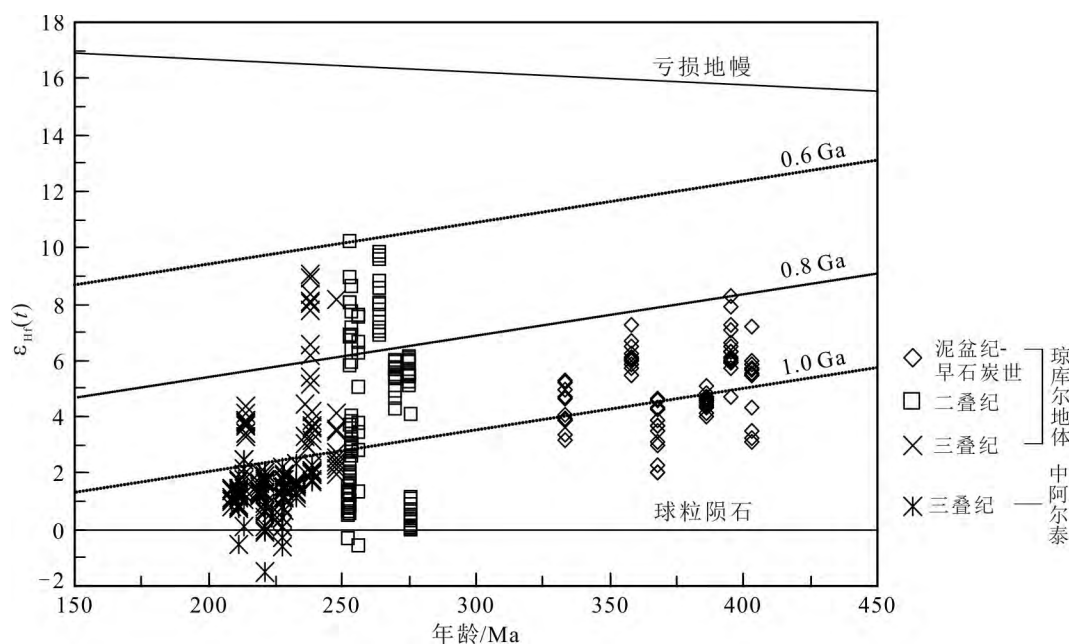


图7 阿尔泰造山带中不同时代稀有金属伟晶岩的锆石 Hf 同位素组成

Fig. 7 Zircon Hf isotopes of various rare metal pegmatites in the Altay orogenic belt

所述,阿尔泰伟晶岩形成于相对较高的压力条件下,更利于形成 α -锂辉石型Li矿。London(2018a; 2018b)提出组成带状纯化(CZR, constitutional zone refining)的机制可有效解释锂辉石、锂云母和锂电气石在伟晶岩演化晚期富含助熔组分(H_2O 、B、P、F)的边界层熔体相中的富集过程。

Cs作为强不相容元素只在高度分异岩浆体系中成矿。不同于Be,在硅酸盐熔体中Cs是高度可溶解的,铯沸石饱和的熔体中 $w(Cs)$ 可达百分含量级($10^4 \times 10^{-6}$)。以Tanco伟晶岩为例,估算的岩体中 $w(Cs)$ 为 3036×10^{-6} ,而700℃时液相线饱和值 $w(Cs)$ 为 $51\ 880 \times 10^{-6}$ 。当体系中只要含量足够高Cs时才形成独立矿物铯沸石,否则它将分散进入碱性长石、白云母或绿柱石矿物中(Wang et al., 2006; London, 2017)。可可托海3号脉中铯沸石主要形成于晚期的VIII带,最大的晶体重达9 t(邹天人等, 2006),是伟晶岩岩浆极端分异的亚固相线结晶的产物(Wang et al., 2006)。

Nb与Ta、Zr与Hf是离子半径很相似的等价不相容元素对,它们之间可以完全置换,形成的铌铁矿-钽铁矿、锆石-铪石族矿物显示极度变化的化学组成。Nb、Zr在最小分异的岩石中富集,而Ta、Hf在高度分异的伟晶岩中占优势(Černý et al., 1985)。Nb和

Ta在伟晶岩中成矿作用,归因于分离结晶作用以及铌-钽氧化物的溶解度随熔体的温度、碱度降低以及磷含量增大而显著降低(Linnen et al., 2005; Tang et al., 2016)。已有研究表明,Nb/Ta降低的演化趋势源于铌铁矿比钽铁矿在花岗质熔体中更低的溶解度(Linnen et al., 2005)以及黑云母、白云母在花岗岩和伟晶岩熔体中的结晶作用(Stepanov et al., 2014)。相同条件下,铌铁矿的溶解度小于钽铁矿,从而导致Nb成矿早于Ta成矿(Linnen et al., 2005)。此外,铌铁矿和钽铁矿的溶解度与Li含量具正相关性(Linnen, 1998),因此,富Li伟晶岩岩浆形成的早期更易富集Nb、Ta,而在侵位后因温度降低和长石晶出导致更显著的Nb-Ta成矿。Zr和Hf的矿化受锆石和铪石溶解度影响(Linnen, 1998),在伟晶岩岩浆中随着分异程度进行,依次以锆石、铪质锆石和铪石矿物顺序晶出,显示Zr/Hf比值逐渐降低的演化趋势。柯鲁木特112号脉、可可托海3和1号脉中锆石-铪石固溶体的 $w(HfO_2)$ 分别为5.5%~29.5%(吕正航, 2013)、5.5%~35.2%(Zhang et al., 2004)和4.2%~58.9%(Yin et al., 2013)。

3.4.5 形成物源

传统观点认为,LCT(富Li、Cs和Ta)和NYF(富Nb、Y和F)型伟晶岩分别为S型、A型花岗质

岩浆高度分异的产物(Cěrný, 1991b)。NYF型伟晶岩通常分布于母岩A型花岗岩边缘或周边不远的范围内,且不显示区域分带。而LCT型伟晶岩通常分布于以稀有金属花岗岩母岩为中心的10 km半径范围内(Selway et al., 2005),随距离和分异程度增加,显示无矿化→Be矿化→Be-Nb-Ta矿化→Li-Be-Nb-Ta矿化→Li-Be-Nb-Ta-Cs矿化的区域分带。对阿尔泰伟晶岩及周边花岗岩的研究表明,先前被认为具有成因关系的花岗岩与伟晶岩之间存在着显著的时间或物源上的解耦,如哈龙花黑云母和二云母花岗岩(401~403 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=+7.85\sim+14.95$)与其周边的阿祖拜Be矿化伟晶岩(215~192 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-0.6\sim+6.3$)、佳木开Be-Nb-Ta矿化伟晶岩(212~192 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=+0.4\sim+3.3$)和卡鲁安Li矿化伟晶岩(228~211 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=+0.65\sim+2.50$)存在时代与物源上的明显差异(Zhang et al., 2016; 任宝琴等, 2011; 马占龙等, 2015);柯鲁木特-吉德克黑云母和二云母花岗岩(455~445 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-1.41\sim+4.13$)与周边Li±Be-Nb-Ta伟晶岩(238~203 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=+0.03\sim+2.35$)在时

代上显著差异(Lü et al., 2012; 任宝琴等, 2011);别也萨麻斯矿区2期二云母花岗岩(462 Ma和377 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=+6.0\sim+12.9$)与L1号Li-Be-Nb-Ta伟晶岩(157 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=+0.02\sim+0.62$)在时代和物源上明显不同(吕正航等, 2015)。可可托海3号脉与阿拉尔花岗岩虽然具有相似的年龄(220~212 Ma和219~218 Ma)和Hf同位素组成($\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分别为+1.25~+2.39和+1.0~+4.0)(陈剑峰, 2011; 刘宏, 2013; 陈剑峰等, 2018),但后者以高的Zr/Hf和Nb/Ta比值(平均分别为33.3和16.2)、低的稀有金属含量($w(\text{Li})$ 、 $w(\text{Be})$ 、 $w(\text{Nb})$ 、 $w(\text{Ta})$)平均分别为 40.7×10^{-6} 、 4.1×10^{-6} 、 17.9×10^{-6} 和 1.2×10^{-6})和钾长石高的K/Rb比值(246~181)区别于世界范围内的高分异花岗岩;并且瑞利分馏计算表明,阿拉尔花岗岩需经由>99.99%的分离结晶才能形成可可托海3号脉,由此可以否定二者间存在成因关系(刘宏, 2013)。

阿尔泰同碰撞成因的泥盆纪-石炭纪的伟晶岩周边缺乏同时代的高分异花岗岩,而且其锆石Hf同位素组成($\epsilon_{\text{Hf}}(t)$)和 $T_{\text{DM}2}$ 模式年龄分别为+2.06~+8.28和860~

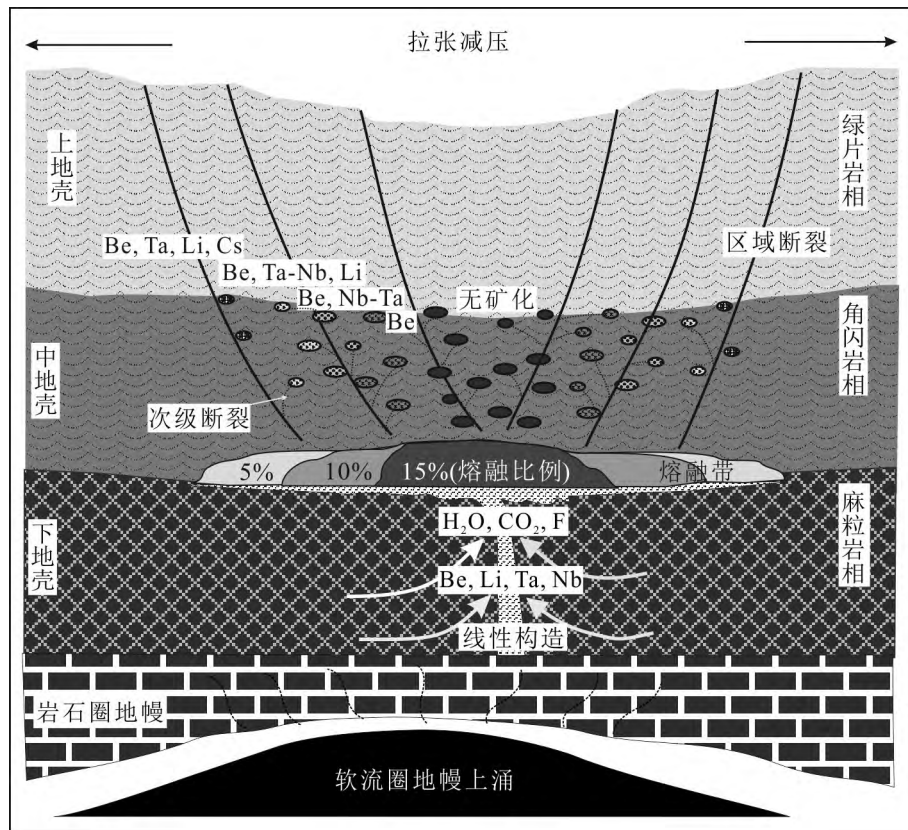


图8 阿尔泰造山带独立伟晶岩的深熔成因模式示意图

Fig. 8 Sketch map of anatexis petrogenesis model of the isolated pegmatites in the Altay orogenic belt

1234 Ma)区别于同时代的I型花岗岩(+15.1~+2.44和430~1820 Ma)和S型花岗岩(+6.69~-6.73和964~1827 Ma)(Lü et al., 2018)。后碰撞成因的二叠纪伟晶岩形成时代为275~250 Ma(峰值为260~250 Ma),且主要分布于琼库尔地体的西北段,而二叠纪花岗岩形成时代为299~265 Ma(峰值为280~275 Ma),以I型和A型花岗岩为主,且主要分布于南阿尔泰和琼库尔地体的东南段。另外,二叠纪伟晶岩锆石的Hf同位素($\epsilon_{\text{Hf}}(t)$)和 T_{DM2} 模式年龄分别为-0.61~+10.19和1316~629 Ma也区别于I型花岗岩($\epsilon_{\text{Hf}}(t)$)和 T_{DM2} 分别为+12.9~+6.1和472~933 Ma)、A型花岗岩(+5.6~-7.0和1602~2498 Ma)和S型花岗岩(+2.6~-7.9和843~1770 Ma)(Lü et al., 2019)。由于同一母岩浆分异出的不同矿化伟晶岩应该具有相似的同位素组成,因此,阿尔泰伟晶岩矿化类型与物源之间关系难以用花岗岩岩浆分异结晶模式来解释。对阿尔泰伟晶岩和花岗岩形成年龄统计结果显示,伟晶岩主要形成于晚古生代—早中生代,并于三叠纪达到成岩峰值,而花岗岩主要形成于古生代,于泥盆纪达到成岩峰值(图6)。将阿尔泰古生代—中生代的花岗岩与国内外典型的伟晶岩母岩花岗岩进行对比,发现这些花岗岩皆属于低分异的贫瘠花岗岩(barren granite),不具备形成稀有金属伟晶岩的潜力(Lü et al., 2018; 2019)。

阿尔泰造山带中不同时代伟晶岩的稀有金属矿化类型明显受物源控制。分布于中阿尔泰地体中的三叠纪伟晶岩显示低而窄的锆石Hf同位素组成($\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-1.5\sim+2.5$),显著不同于分布在琼库尔地体中的不同时代的伟晶岩的锆石Hf同位素组成。但不难看出,分布于琼库尔地体中不同时代的伟晶岩显示相似的锆石Hf同位素组成,其中泥盆纪—石炭纪伟晶岩、二叠纪伟晶岩与三叠纪伟晶岩对应的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分别为+2.1~+8.2、-0.61~+10.2和+2.0~+9.1(图7)。上述特征表明,分布于不同地体中的伟晶岩在形成物源上存在显著的不同。

泥盆纪—石炭纪Be-Nb-Ta±Li矿化伟晶岩(如塔拉提和阿木拉宫)的主要Hf同位素组成($\epsilon_{\text{Hf}}(t)=+3.99\sim+8.26$)和模式年龄($T_{\text{DM2}}=1166\sim 860$ Ma)与二叠纪Be-Nb-Ta矿化伟晶岩(如大喀拉苏和加曼哈巴)的Hf同位素($\epsilon_{\text{Hf}}(t)=+2.37\sim+5.87$)和模式年龄($T_{\text{DM2}}=1126\sim 910$ Ma)相似。三叠纪—侏罗纪的Li±Be-Nb-Ta±Cs矿化的伟晶岩(如可可托海3号脉、柯鲁木特112号脉和卡鲁安Li矿化伟晶岩),其Hf同位素组成

($\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-1.0\sim+2.5$)和模式年龄($T_{\text{DM2}}=1298\sim 1090$ Ma)与二叠纪Li-Be-Nb-Ta矿化伟晶岩(如拜城40号脉和萨尔加克1号脉)的Hf同位素组成($\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-0.32\sim+3.2$)和模式年龄($T_{\text{DM2}}=1286\sim 1074$ Ma)相似(图7)。由此可见,复杂稀有金属矿化的伟晶岩,无论是泥盆纪—早石炭世、二叠纪还是三叠纪,也无论其分布于琼库尔地体还是中阿尔泰地体中的,可能显示相似的形成物源。

近年来的研究表明,阿尔泰地壳缺乏前寒武系基底,而早古生代沉积岩(如哈巴河群)被认为是阿尔泰地壳的主要组成部分(Long et al., 2007; 2008; 2010; Jiang et al., 2011; 2015; 2016)。对哈巴河群全岩Hf同位素和碎屑锆石的U-Pb定年研究表明,其为奥陶纪—志留纪于活动大陆边缘形成的复理石建造,物源以加里东造山带的火成岩剥蚀物为主,其次为图瓦—蒙古地块的新元古代沉积岩和新生地壳的剥蚀物,以及少量的来自西伯利亚南缘的古元古代—新太古代的沉积岩剥蚀物(Long et al., 2007; 2010; Jiang et al., 2011)。与哈巴河群Hf同位素对比发现,以Be-Nb-Ta矿化为主伟晶岩中锆石Hf同位素组成相似于哈巴河群中的角闪岩—片麻岩的Hf同位素组成,而Li-Be-Nb-Ta矿化伟晶岩中锆石Hf同位素近似于均一后的哈巴河群Hf同位素组成,推测其物源以哈巴河群中的海相沉积物为主,并混合了部分其他岩石。

3.5 伟晶岩成因

阿尔泰稀有金属伟晶岩成岩成矿受区域构造、变质、物源和岩浆物理化学条件控制,而伟晶岩与周边和区域花岗岩存在形成时代、物源上的解耦,因此,由花岗质岩浆分异形成伟晶岩的成因模式并不适用于阿尔泰伟晶岩,由此提出由变质沉积岩小比例部分熔融(深熔)形成独立伟晶岩的成因模式。深熔模型认为在接近花岗岩低共熔的温度条件下,富集稀有金属的浅变质沉积岩经小比例部分熔融形成的长英质岩浆经聚集、迁移后侵入到浅部的岩石节理、层理或裂隙中,最后形成伟晶岩(图8)。近年来,伟晶岩的深熔成因模型在中亚造山带(Zagorsky et al., 2014; Lü et al., 2018; 2019)、美国阿利根尼造山带(Simmons et al., 2016)、欧洲海西造山带(Dill, 2015a; 2015b; 2016)和格林威尔造山带(Müller et al., 2016; 2017)中都有所证实。深熔模型不但可以解释世界范围内与花岗岩无关的伟晶岩成因以及局部地区出现的伟晶岩区域分带,而且可以解释阿尔泰伟晶岩

的多期和多种矿化类型。结合阿尔泰的构造-岩浆-变质作用研究,笔者提出阿尔泰不同造山阶段中不同时期伟晶岩的成因模式:泥盆纪一早石炭世伟晶岩,是洋脊俯冲、软流圈地幔上涌导致阿尔泰南缘弧前拉张背景下,变沉积岩小比例部分熔融的产物(图 9a; Lü et al., 2018);二叠纪伟晶岩,是准噶尔-阿尔泰弧-弧碰撞导致的俯冲板片折断、软流圈地幔沿板片窗上涌的伸展背景下,不成熟地壳物质小比例部分熔融的产物(图 9b; Lü et al., 2019);三叠纪—侏罗纪伟晶岩,形成于哈萨克斯坦与西伯利亚板块陆-陆碰撞、增厚地壳发生岩石圈拆沉导致软流圈地幔上涌的后造山拉张伸展背景下,由减压作用诱发增厚地壳小比例部分熔融所形成(图 9c; Zhang et al., 2016)。

4 伟晶岩型稀有金属矿床找矿地质-地球化学标志及其找矿方向

4.1 围岩蚀变

稀有金属伟晶岩侵入到变火山岩或变沉积岩围岩中,岩浆演化晚期分异出的富含稀有元素的流体相将与围岩发生水-岩相互作用,从而形成交代晕(蚀变晕)或分散晕,以富集高度活动的碱金属元素(Li、Rb、Cs)、挥发组分(H_2O 、B、F)为特征。因此,利用蚀变围岩的全岩化学组成是寻找隐伏稀有金属伟晶岩的有效的找矿工具(Selway et al., 2006)。此外,电气石化、白云母化是普遍发生的围岩蚀变类型,其中电气石结构中存在广泛的类质同相置换(Foit et al., 1979; Novak et al., 1999),其组成可反映形成环境的 $p-t-x-f(O_2)$ 条件、岩浆-热液体系的演化过程(London et al., 1995; Federico et al., 1998)、成矿作用的指示剂(Sillitoe et al., 1971; Jiang et al., 2002)。

根据对可可托海3号脉、卡鲁安807号脉相关的围岩蚀变中稀有金属元素Li、Rb、Cs、Be分布特征及其迁移量的计算,初步提出对于侵入于哈巴河群、库鲁姆提群的石英-云母片岩类中伟晶岩,近脉围岩50 cm处, $w(Li) > 800 \times 10^{-6}$ 、 $w(Rb) > 1000 \times 10^{-6}$ 、 $w(Cs) > 550 \times 10^{-6}$ 可作为伟晶岩内部发生稀有金属矿化的地球化学指标;而对侵入于斜长角闪岩中的伟晶岩,其近脉围岩0 cm处, $w(Li) > 700 \times 10^{-6}$ 、 $w(Rb) > 160 \times 10^{-6}$ 、 $w(Cs) > 80 \times 10^{-6}$ 可以作为伟晶岩内部发生稀有金属矿化的地球化学指标(Zhao et

al., 2017; 陈阳等, 2016)。

根据对可可托海3号脉、卡鲁安Li矿区807号脉、库卡拉盖650号脉、库儒尔特19号脉以及拜城40号脉相关的蚀变围岩中电气石中Li含量特征分析,初步确定蚀变围岩电气石中 $w(Li) > 180 \times 10^{-6}$ 可以作为伟晶岩内部发生Li矿化的地球化学指标(Zhao et al., 2017)。

4.2 富磷伟晶岩

与稀有金属W、Sn、Nb、Ta成矿在时空上密切相关的是一套富磷过铝质岩浆岩(包括花岗岩、伟晶岩和流纹岩),其全岩中的 $w(P_2O_5)$ 可高达 $> 1\%$ (Kontak, 1990; London, 1992; Bea et al., 1994; Raimbault et al., 1995; 1998; Yin et al., 1995; Lentz, 1997; 张辉, 2001; Broska et al., 2004)。

实验研究表明,P在碱性长石/熔体间分配系数是岩浆体系中ASI(铝饱和指数)的函数,其 $D^{afs/melt} = 2.05 \times ASI - 1.75$ (afs—碱性长石, melt—熔体; London et al., 1993)。由于由泥质岩部分熔融形成的熔体,其ASI大约在1.3~1.4之间(Wolf et al., 1994; London et al., 1999)。简化上式,可获得熔体中磷含量: $C^{melt} \gg C^{afs}$; 由此可知,由泥质岩部分熔融形成的伟晶岩,其结晶的碱性长石中的磷含量近似可代表与之平衡的岩浆中的磷含量。

通过对500余条伟晶脉岩进行了碱性长石中磷含量的系统分析,发现稀有金属Li-Be-Nb-Ta矿化伟晶岩是富磷伟晶岩,以其早期形成结构带中碱性长石含有较高的磷含量为特征($w(P_2O_5) > 0.1\%$),如可可托海3号脉(钾长石 $w(P_2O_5)$ 平均为0.30%)、柯鲁木特112号脉(钾长石 $w(P_2O_5)$ 平均为0.19%)、库卡拉盖650号脉(钠长石 $w(P_2O_5)$ 平均为0.14%)、佳木开(钾长石 $w(P_2O_5)$ 平均为0.31%)、群库尔(钾长石 $w(P_2O_5)$ 平均为1.09%)、阿巴宫(钠长石 $w(P_2O_5)$ 平均为0.26%)、哈拉特(钠长石 $w(P_2O_5)$ 平均为0.44%)、大喀拉苏(钠长石 $w(P_2O_5)$ 平均为0.12%)、哈木斯泰(钠长石 $w(P_2O_5)$ 平均为0.25%)等稀有金属伟晶岩;而无矿化或简单Be矿化伟晶岩是贫磷伟晶岩,其碱性长石中 P_2O_5 含量相对较低($w(P_2O_5) < 0.1\%$) (Tang et al., 2013; 2018; 吕正航等, 2018)。

伟晶岩脉早期结构带中含有较多磷灰石矿物是形成伟晶岩初始岩浆中富磷的指示,而且伟晶岩早期边缘带、壁带中绿柱石的结晶代表初始岩浆中含有较高的Be含量(London, 2018a; 2018b),由此,笔者认为早期结构带中磷灰石、绿柱石矿物存在,以及早

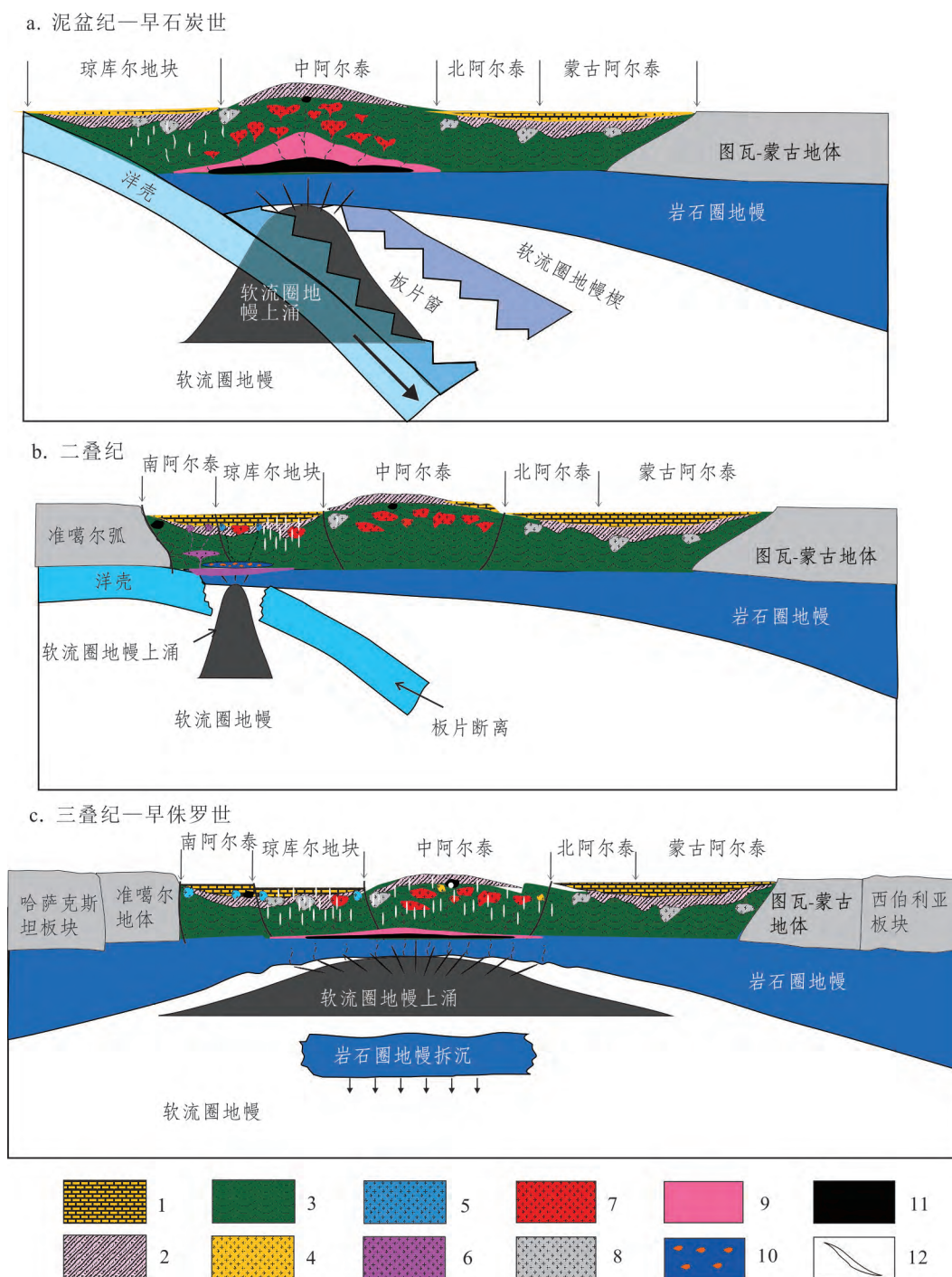


图9 阿尔泰造山带不同时代伟晶岩的形成构造背景

a. 洋脊俯冲; b. 俯冲板片断离; c. 岩石圈地幔拆沉

- 1—泥盆系(变)沉积岩; 2—志留系变沉积岩; 3—奥陶系变沉积岩; 4—三叠纪花岗岩; 5—二叠纪A型花岗岩; 6—二叠纪I型花岗岩;
7—石炭纪—泥盆纪花岗岩; 8—志留纪—奥陶纪花岗岩; 9—玄武岩浆底侵; 10—麻粒岩相部分熔融; 11—基性岩; 12—伟晶岩

Fig. 9 Tectonic setting of pegmatites of various ages in the Altay orogenic belt

a. Subduction of ocean ridge; b. break-off of subducted slab; c. delamination of lithospheric mantle

- 1—Devonian (meta)sedimentary rocks; 2—Silurian metasedimentary rocks; 3—Ordovician metasedimentary rocks; 4—Triassic granites;
5—Permian A-type granites; 6—Permian I-type granites; 7—Carboniferous-Devonian granites; 8—Silurian-Ordovician granites;
9—Underplating of basalt magma; 10—Partial melting of granulite facies; 11—Mafic rocks; 12—Pegmatites

期形成结构带中碱性长石中含有 $w(\text{P}_2\text{O}_5) > 0.1\%$, 是伟晶岩型稀有金属矿床的找矿地球化学标志(Tang Y et al., 2013; 2018)。

4.3 高分异伟晶岩

已有的研究表明,不同地质背景下形成的石英其晶格中的微量元素类型及含量存在显著的差异,可以对成岩、成矿作用起很好的指示作用(Müller et al., 2000; Götze et al., 2001; 2004)。近年来,石英作为一种可靠标型矿物用于火成岩物源示踪、伟晶岩岩浆-热液演化以及热液矿床的成矿过程(Monecke et al., 2002; Larsen et al., 2004; 2009; Götze et al., 2005; Breiter et al., 2009; Jourdan et al., 2009)。伟晶岩中石英中微量元素研究表明,高分异伟晶岩发育石英具有 $w(\text{Al}) > 300 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Li}) > 50 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Ge}) > 5 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{B}) > 4 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Ti}) \leq 4 \times 10^{-6}$ 的特征,而低分异伟晶岩石英具有 $w(\text{Al}) < 300 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Li}) < 50 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Ti}) = (5 \sim 25) \times 10^{-6}$ 的特征(Beurlen et al., 2014)。

对阿尔泰6条伟晶岩脉中石英中微量元素含量研究表明,在Li-Al-Ti三角图解中,可可托海3号脉、卡鲁安806号脉、库卡拉盖650号脉数据点落在高分异演化伟晶岩区,阿祖拜528号脉、328号脉基本落于低分异演化伟晶岩区域,而卡鲁安807号脉位于高分异与低分异伟晶岩的分界线附近。由于可可托海3号脉是大型Li矿化伟晶岩,库卡拉盖650号脉和卡鲁安806号脉属于卡鲁安大型Li矿床,而阿祖拜328号脉、528号脉是典型Be矿化伟晶岩(周天怡, 2015),因而对比6条伟晶岩脉中石英中Li、Al、Ge、Ti、P含量,初步确定伟晶岩石英中 $w(\text{Li}) > 28 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Al}) > 104 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Ge}) > 3.5 \times 10^{-6}$ 以及 $w(\text{P}) < 50 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Ti}) < 1 \times 10^{-6}$ 可作为伟晶岩型Li矿床找矿的地球化学指标(唐宏等, 2018)。

4.4 找矿方向

(1) 区域尺度上,侵位于志留纪库鲁姆提群($\text{S}_{2-4}\text{K}^{1-2}$)中的伟晶岩是寻找伟晶岩型稀有金属矿床的一个重要的找矿方向二叠纪伟晶岩侵位深度为11.4~14.5 km,三叠纪伟晶岩的侵位深度为8.4~11.0 km,即二叠纪伟晶岩侵位深度显著大于三叠纪伟晶岩的侵位深度。根据阿尔泰富蕴-可可托海地区地层柱状图,在不考虑剥蚀情况下,可以估算出侵入于志留纪的库鲁姆提群($\text{S}_{2-4}\text{K}^{1-2}$)的三叠纪伟晶岩可能上覆地层厚度为6300~8800 m,对应的静岩压力为220~310 MPa;侵位于奥陶纪哈巴河群的三叠纪伟晶岩,则上覆地层厚度为11 600~14 000 m,对应的静岩压力为410~500 MPa。

考虑到可可托海3号脉与柯鲁木特112号脉形成压力在300~350 MPa范围以及新近发现的潜在的大型-超大型卡鲁安锂矿床侵位于志留纪的库鲁姆提群($\text{S}_{2-4}\text{K}^{1-2}$)而不是奥陶纪哈巴河群,由此推测侵位于志留纪的库鲁姆提群中伟晶岩比侵位于奥陶纪哈巴河群中伟晶岩具备更合适的深度(压力),更有利于伟晶岩岩浆-热液体系内部分异、演化及其成矿作用。

(2) 通过开展区域尺度和矿田尺度上的富磷伟晶岩填图,确定伟晶岩富磷是圈定稀有金属矿化伟晶岩行之有效的途径

在世界范围内,已发现的稀有金属Li-Be-Nb-Ta矿化伟晶岩均是富磷伟晶岩,以其早期形成结构带中碱性长石含有较高的P含量为特征($w(\text{P}_2\text{O}_5) > 0.1\%$),如加拿大Tanco伟晶岩(钾长石中 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为0.29%~0.39%)、可可托海3号脉(钾长石中 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为0.12%~0.62%)、柯鲁木特112号脉(钾长石中 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为0.18%~0.20%);而无矿化或简单Be矿化伟晶岩是贫磷伟晶岩,其碱性长石中 P_2O_5 含量相对较低($w(\text{P}_2\text{O}_5) < 0.1\%$)。由此,可以认为找到富磷伟晶岩很可能意味着找到稀有金属Li-Be-Nb-Ta矿化伟晶岩。

(3) 在矿脉尺度上,确定围岩蚀变中稀有金属元素Li、Rb、Cs、Be含量及其迁移量以及蚀变矿物——电气石中Li含量特征,是寻找隐伏稀有金属伟晶岩的有效的找矿指标。

5 结 论

(1) 阿尔泰造山带中伟晶岩可划分为同造山和后造山阶段伟晶岩,从形成时代上可划分为泥盆纪一早石炭世伟晶岩、二叠纪伟晶岩、三叠纪伟晶岩和侏罗纪伟晶岩4期;不同时代伟晶岩显示明显时空分布特征,其中泥盆纪一早石炭世伟晶岩、二叠纪伟晶岩及相关的稀有金属矿床分布于琼库尔地体中,三叠纪伟晶岩及相关的稀有金属矿床广泛分布于琼库尔和中阿尔泰地体中,而侏罗纪伟晶岩则分布于中阿尔泰和北阿尔泰地体中。

(2) 阿尔泰伟晶岩矿化类型多样,稀有金属(Li、Be、Nb、Ta、Cs)矿床、白云母矿床、海蓝和碧玺宝石矿床均有产出。分布于琼库尔地体中的同碰撞成因伟晶岩和后碰撞成因的二叠纪伟晶岩主要稀有金属矿化类型为Be、Be-Nb-Ta、Li-Be-Nb-Ta;分布于琼库尔+中阿尔泰地体中的后碰撞成因的三叠纪伟晶岩主要稀有金属矿化类型为Be、Li-Nb-Ta、Li-Be-Nb-

Ta、Be-Li-Nb-Ta(-Cs-Rb-Hf)。

(3) 阿尔泰伟晶岩的空间展布受区域线性构造控制,形成时间与区域中-高温变质作用耦合,矿化类型明显受物源制约,矿化机制多样且与温压和成分变化密切相关,显示出“构造-变质-物源-岩浆”的多元控制特征。

(4) 阿尔泰稀有金属伟晶岩与周边花岗岩存在时代、物源上的解耦,表明伟晶岩的形成于花岗岩无关。由此提出在造山运动过程中加厚的不成熟地壳物质因伸展背景下减压熔融(小比例熔融)形成独立伟晶岩的成因模式。

(5) 初步确定围岩蚀变中Li、Rb、Cs含量,蚀变围岩中电气石矿物中Li含量,伟晶岩早期形成结构带中碱性长石中 P_2O_5 含量以及石英矿物中Li、Al、Ge、Ti、P含量可作为伟晶岩型Li矿床找矿的地球化学指标。

致 谢 感谢匿名审稿人提出的中肯的修改建议!

References

- Bea F, Pereira M D, Corretge L G and Fershtater G B. 1994. Differentiation of strongly peraluminous, perphosphorus granites: The pedrobernardo pluton, Central Spain[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 2609-2627.
- Beurlen H, Thomas R, da Silva M R R, Müller A, Rhede D and Soares D R. 2014. Perspectives for Li-and Ta-mineralization in the Borborema pegmatite Province, NE-Brazil: A review[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 56: 110-127.
- Breiter K and Müller A. 2009. Evolution of rare-metal granitic magmas documented by quartz chemistry[J]. *European Journal of Mineralogy*, 21(2): 335-346.
- Broska I, Williams C T, Uher P, konecny P and leichmann J. 2004. The geochemistry of phosphorus in different granite suites of the western Carpathians, Slovakia: The role of apatite and P-bearing feldspar[J]. *Chemical Geology*, 205: 1-15.
- Cai K D, Sun M, Yuan C, Zhao G C, Xiao W J, Long X P and Wu F Y. 2011. Geochronology, petrogenesis and tectonic significance of peraluminous granites from the Chinese Altai, NW China[J]. *Lithos*, 127: 261-281.
- Cai K, Sun M, Jahn B M, Xiao W, Long X, Chen H, Xia X, Chen M and Wang X. 2016. Petrogenesis of the permian intermediate-mafic dikes in the Chinese Altai, northwest China: Implication for a postaccretion extensional scenario[J]. *Journal of Geology*, 124: 481-500.
- Černý P, Meintzer R E and Anderson A J. 1985. Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites; selected examples of data and mechanisms[J]. *The Canadian Mineralogist*, 23(3): 381-421.
- Černý P. 1991a. Rare-element granite pegmatites. Part I: Anatomy and internalevolution of pegmatite deposits[J]. *Geoscience Canada*, 18: 49-67.
- Černý P. 1991b. Rare-element granitic pegmatites. Part II: Regional to globalenvironments and petrogenesis[J]. *Geoscience Canada*, 18: 68-81.
- Černý P and Ercit T S. 2005. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. *The Canadian Mineralogist*, 43: 2005-2026.
- Černý P, London D and Novák M. 2012. Granitic pegmatites as reflections of theirsources[J]. *Elements*, 8: 289-294.
- Chai F M, Yang F Q, Liu F, Geng X X, Zhang Z X and Chen B. 2012. Geochronology and genesis of the meta-felsic volcanic rocks in the Kangbutiebao Formation from the Maizi Basin at the southern margin of the Altay, Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geology*, 47 (1): 221-239.
- Che X D, Wu F Y, Wang R C, Gerdes A, Ji W Q, Zhao Z H, Yang J H and Zhu Z Y. 2015. In situ U-Pb isotopic dating of columbite-tantalite by LA-ICP-MS[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 979-989.
- Chen J F. 2011. Geochemistry of the plate part in Altai No. 3 pegmatite and its formation and evolution (Mater dissertation research paper)[D]. Supervisor: Zhang H. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences. 86P(in Chinese with English abstract).
- Chen Y, Zhang H and Zhao J Y. 2016. Altered country rocks of No. 807 pegmatite vein in the Kalu' an ore area, Xinjiang: Ore-forming element diffusion model and its influencing factors[J]. *Geochimica*, 45(3): 268-280 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y X, Gao F, Pei X Z, Tian H B, Li Z C, Li R B, Wang M and He J L. 2017. Chronology, geochemistry and tectonic implication of the Huiteng granitic pluton in the Altay area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3076-3090(in Chinese with English abstract).
- Chow T Y. 2015. Study of the genesis of Azubai pegmatitic aquamarines, Xinjiang, China (Doctor dissertation research paper)[D]. Supervisor: Chen Y J. Beijing: Peking University. 124p(in Chinese with English abstract).
- Colombo F and Sfragulla J. 2012. The garnet-phosphate buffer in peraluminous granitic magmas: A case study from pegmatites in the Pocho district, Córdoba, Argentina[J]. *The Canadian Mineralogist*, 50(6): 1555-1571.
- Cuney M, Alexandrov P, de Veslud C L C, Cheilletz A, Raimbault L, Ruffet G and Scaillet S. 2002. The timing of W-Sn-rare metals mineral deposit formation in the western Variscan chain in their orogenic setting: The case of the Limousin area (Massif Central, France)[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 204 (1): 213-228.
- Cuney M and Barbey P. 2014. Uranium, rare metals, and granulite-facies metamorphism[J]. *Geoscience Frontiers*, 5(5): 729-745.
- Dill H G. 2015a. The Hagendorf-Pleystein Province: The center of peg-

- matites in an ensialicorogen[M]. Germany: Springer Publication. 1-465.
- Dill H G. 2015b. Pegmatites and aplites: Their genetic and applied ore geology[J]. *Ore Geology Reviews*, 69: 417-561.
- Dill H G. 2016. The CMS classification scheme (Chemical composition-Mineral assemblage-Structural geology) - linking geology to mineralogy of pegmatitic and aplitic rocks[J]. *Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 193: 231-263.
- Evensen J M, London D and Wendlandt R F. 1999. Solubility and stability of beryl in granitic melts[J]. *American Mineralogist*, 84(5-6): 733-745.
- Evensen J M and London D. 2002. Experimental silicate mineral/melt partition coefficients for beryllium and the crustal Be cycle from migmatite to pegmatite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(12): 2239-2265.
- Federico M, Andreozzi G B, Lucchesi S, Graziani G and Cesar Mendes J. 1998. Compositional variation of tourmaline in the granitic pegmatite dykes of the Cruzeiro mine, Minas Gerais, Brazil[J]. *The Canadian Mineralogist*, 36(2): 415-431.
- Foit F F, Jr. and Rosenberg P E. 1979. The structure of vanadium-bearing tourmaline and its implications regarding tourmaline solid solutions[J]. *American Mineralogist*, 64: 788-798.
- Ginsburg A I, Timofeyev I N and Feldman L G. 1979. Principles of geology of the granitic pegmatites[M]. Moscow: Nedra Publishing House. 1-296.
- Götze J, Plötze M and Habermann D. 2001. Origin, spectral characteristics and practical applications of the cathodoluminescence (CL) of quartz-A review[J]. *Mineralogy and Petrology*, 71: 225-250.
- Götze J, Plötze M, Graupner T, Hallbauer D K and Bray C J. 2004. Trace element incorporation into quartz: A combined study by ICP-MS, electron spin resonance, cathodoluminescence, capillary ion analysis, and gas chromatography[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 3741-3759.
- Götze J, Plötze M and Trautmann T. 2005. Structure and luminescence characteristics of quartz from pegmatites[J]. *American Mineralogist*, 90(1): 13-21.
- Hu A Q, Wei G J, Deng W F and Chen L L. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating and its significance for gneisses from the southeast area to Qinghe Country in the Altai, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 1-10(in Chinese with English abstract).
- Huang Y S, Zhang H, Lü Z H, Tang Y and Tang H. 2016. Research on emplacement depths of Permian and Triassic pegmatites in Altai, Xinjiang, China: Indications from fluid inclusions[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 36(4): 571-585(in Chinese with English abstract).
- Jiang L P. 2012. The study on fluid inclusion of Liangkeshu pegmatite iron deposit in Altai(Master dissertation)[D]. Supervisor: Chai F M. Urumchi: University of Xinjiang. 50p(in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Palmer M R and Yeats C J. 2002. Chemical and boron isotopic compositions of tourmaline from the Archean Big Bell and Mount Gibson gold deposits, Murchison Province, Yilgarn Craton, western Australia[J]. *Chemical Geology*, 188(3-4): 229-247.
- Jiang Y, Sun M, Zhao G, Yuan C, Xiao W, Xia X, Long X and Wu F. 2010. The ~390 Ma high-T metamorphic event in the Chinese Altai: A consequence of ridge-subduction[J]. *American Journal of Science*, 310: 1421-1452.
- Jiang Y, Sun M, Zhao G, Yuan C, Xiao W, Xia X, Long X and Wu F. 2011. Precambrian detrital zircons in the Early Paleozoic Chinese Altai: Their provenance and implications for the crustal growth of Central Asia[J]. *Precambrian Research*, 189: 140-154.
- Jiang Y, Štípská P, Sun M, Schulmann K, Zhang J, Wu Q, Long X, Yuan C, Racek M, Zhao G and Xiao W. 2015. Juxta position of Barrovian and migmatite domains in the Chinese Altai: A result of crustal thickening followed by doming of partially molten lower crust[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 33: 45-70.
- Jiang Y, Schulmann K, Sun M, Štípská P, Guy A, Janoušek V, Lexa O and Yuan C. 2016. Anatexis of accretionary wedge, Pacific-type magmatism, and formation of vertically stratified continental crust in the Altai Orogenic Belt[J]. *Tectonics*, 35(12): 3095-3118.
- Jourdan A L, Vennemann T W, Millis J, et al. 2009. Evidence of growth and sector zoning in hydrothermal quartz from Alpine veins[J]. *European Journal of Mineralogy*, 21(1): 219-231.
- Kontak D J. 1990. The East Kemptville topaz-Mucovite Leucogranite, Nova Scotia 1, Geological setting and whole rock geochemistry[J]. *The Canadian Mineralogist*, 28: 787-825.
- Larsen R B, Henderson I, Ihlen P M, et al. 2004. Distribution and petrogenetic behaviour of trace elements in granitic pegmatite quartz from South Norway[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147(5): 615-628.
- Larsen R B, Jacamon F and Kronz A. 2009. Trace element chemistry and textures of quartz during the magmatic hydrothermal transition of Oslo Rift granites[J]. *Mineralogical Magazine*, 74(4): 691-707.
- Lentz D R. 1997. Phosphorus-enriched, S-type Middle River Rhyolite, Tetagouche Group, northeastern New Brunswick; petrogenetic implications[J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 673-690.
- Li Z, Yang X, Li Y, Santosh M, Chen H and Xiao W. 2014. Late Paleozoic tectonometamorphic evolution of the Altai segment of the Central Asian Orogenic Belt: Constraints from metamorphic *P-T* pseudosection and zircon U-Pb dating of ultrahigh-temperature granulite[J]. *Lithos*, 204: 83-96.
- Linnen R L. 1998. The solubility of Nb-Ta-Zr-Hf-W in granitic melts with Li and Li + F: Constraints for mineralization in rare metal granites and pegmatites[J]. *Econ. Geol.*, 93(7): 1013-1025.
- Linnen R L and Cuney M. 2005. Granite-related rare-element deposits and experimental constraints on Ta-Nb-W-Sn-Zr-Hf mineralization[A]. In: Linnen R L and Samson I M, eds. Rare-element geochemistry and mineral deposit[C]. Geological Association of Canada. 45-68.
- Liu F, Zhang Z X, Li Q, Zhang C and Li C. 2014. New precise timing constraint for the Keketuohai No. 3 pegmatite in Xinjiang, China, and identification of its parental pluton[J]. *Ore Geology Reviews*,

- 56: 209-219.
- Liu H. 2013. Geochemical study on petrogenesis of Aral granite and the Keketuohai No.3 pegmatite vein, Altay Xinjiang (Master dissertation research paper)[D]. Supervisor: Zhang H and Wen X P. Kunming: Kunming University of Science and Technology. 62p (in Chinese with English abstract).
- Liu W Z. 2015. The geochemical evolution of the Asikaertegranite-pegmatite system and its implication for the metallogenesis of Be and Mo, Xinjiang, China (Master dissertation research paper)[D]. Supervisor: Zhang H and Tang H F. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences. 71p(in Chinese with English abstract).
- Liu Y L. 2017. Petrogenesis and continental dynamics of Permian pegmatites and post-collision granites in the Chinese Altay orogenic belt(Doctor dissertation)[D]. Supervisor: Zhang H. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences. 110p(in Chinese with English abstract).
- Liu Y L, Zhang H, Tang Y, Zhang X, Lü Z H and Zhao J Y. 2018. Petrogenesis and tectonic setting of the Middle Permian A-type granites in Altay, northwestern China: Evidences from geochronological, geochemical, and Hf isotopic studies[J]. *Geological Journal*, 53(2): 527-546.
- London D, Morgan G B and Hervig R L. 1989. Vapor-undersaturated experiments with Macusani glass+H₂O at 200 MPa, and the internal differentiation of granitic pegmatites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 102(1): 1-17.
- London D. 1992. Phosphorus in S-type magmas: The P₂O₅ content of feldspars from peraluminous granites, pegmatites, and rhyolites[J]. *American Mineralogist*, 77: 126-145.
- London D, Morgan G B V I, Babb H A and Loomis J L. 1993. Behavior and effects of phosphorus in the system Na₂O-K₂O-Al₂O₃-SiO₂-P₂O₅-H₂O at 200 MPa(H₂O)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113: 450-465.
- London D and Manning D A. 1995. Chemical variation and significance of tourmaline from southwest England[J]. *Econ. Geol.*, 90(3): 495-519.
- London D, Wolf D, Morgan G B V I and Garrido M G. 1999. Experimental silicate-phosphate equilibria in Peraluminous granitic magmas, with a case study of the alburquerque batholith at Tres Arroyos, Badajoz, Spain[J]. *Journal of Petrology*, 40: 215-240.
- London D. 2008. Pegmatites[M]. Canada: Canadian Mineralogist Special Publication. 1-347.
- London D. 2014. A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites[J]. *Lithos*, 184: 74-104.
- London D. 2015. Reading pegmatites: Part 1-What beryl says[J]. *Rocks & Minerals*, 90(2): 138-153.
- London D. 2017. Reading pegmatites: Part 3-What lithium minerals say[J]. *Rocks & Minerals*, 92(2): 144-157.
- London D. 2018a. Reading pegmatites: Part 4-What quartz and feldspars say[J]. *Rocks & Minerals*, 93(4): 320-336.
- London D. 2018b. Ore-forming processes within granitic pegmatites[J]. *Ore Geology Reviews*, 101: 349-383.
- Long X P, Sun M, Yuan C, Xiao W J, Lin S F, Wu F Y, Xia X P and Cai K D. 2007. Detrital zircon age and Hf isotopic studies for metasedimentary rocks from the Chinese Altai: Implications for the Early Paleozoic tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Tectonics*, 26 TC5015, doi:10.1029/2007TC002128.
- Long X P, Sun M, Yuan C, Xiao W J and Cai K D. 2008. Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Altai: Implications for its tectonic evolution[J]. *Sedimentary Geology*, 208: 88-100.
- Long X P, Yuan C, Sun M, Xiao W J, Zhao G C, Wang Y J and Cai K D. 2010. Detrital zircon ages and Hf isotopes of the Early Paleozoic Flysch sequence in the Chinese Altai, NW China: New constraints on depositional age, provenance and tectonic evolution[J]. *Tectonophysics*, 480: 213-231.
- Lü Z H, Zhang H, Tang Y and Guan S J. 2012. Petrogenesis and magmatic-hydrothermal evolution time limitation of Kelumute No. 112 pegmatite in Altay, northwestern China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopes[J]. *Lithos*, 154: 374-391.
- Lü Z H. 2013. Magmatic-hydrothermal evolution and implications for origin of Kelumute No. 112 pegmatite, Xinjiang (Doctor dissertation research paper)[D]. Supervisor: Zhang H. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences. 199p(in Chinese with English abstract).
- Lü Z H, Zhang H and Tang Y. 2015. The study of genetic relationship between Bieyesamasi No. L1 pegmatite Li-Nb-Ta ore deposits and wall rock granites, Xinjiang[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35: 323(in Chinese).
- Lü Z H, Zhang H, Tang Y, Liu Y L and Zhang X. 2018. Petrogenesis of syn-orogenic rare metal pegmatites in the Chinese Altai: Evidences from geology, mineralogy, zircon U-Pb age and Hf isotope[J]. *Ore Geology Review*, 95: 161-181.
- Lü Z H, Zhang H, Tang Y, Zhao J Y, Liu Y L and Guo L. 2018. The distribution of phosphorus in various types of pegmatites from Altai, Xinjiang and its implication[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(2): 260-270(in Chinese with English abstract).
- Lü Z H, Zhang H and Tang Y. 2019. Anatexis origin of rare metal/earth pegmatites: Evidences from the Permian pegmatites from the Chinese Altai[J]. *Lithos*, (under review).
- Ma Z L, Zhang H, Tang Y, Lü Z H, Zhang X and Zhao J Y. 2015. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of pegmatites from the Kaluan mining area in the Altay, Xinjiang and their genetic relationship with the Halong granite[J]. *Geochimica*, 44(1): 9-26(in Chinese with English abstract).
- Maneta V, Baker D R and Minarik W. 2015. Evidence for lithium-aluminosilicate supersaturation of pegmatite-forming melts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170(1): 4.
- McCauley A and Bradley D C. 2014. The global age distribution of granitic pegmatites[J]. *The Canadian Mineralogist*, 52(2): 183-190.
- Monecke T, Kempe J and Götze J. 2002. Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: A reconnaissance study[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 202:

- 709-724.
- Müller A, Seltmann R and Behr H J. 2000. Application of cathodoluminescence to magmatic quartz in a tin granite-case study from the Schellerhau granite complex, eastern Erzgebirge, Germany[J]. *Mineralium Deposita*, 35: 169-189.
- Müller A, Romer R L, Szuszkiewicz A, Ilnicki S and Szeleg, E. 2016. Can pluton-related and pluton-unrelated granitic pegmatites be distinguished by their chemistry[C]? Colorado, Second Eugene E. Foord Pegmatite Symposium. 67-69.
- Müller A, Romer R L and Pedersen R B. 2017. The Sveconorwegian pegmatite province-thousands of pegmatites without parental granites[J]. *The Canadian Mineralogist*, 55: 283-315.
- Niu H C, Xu J F, Yu X Y, Chen F R and Zheng Z P. 1999. Discovery of the Mg-rich volcanics in Altai, Xinjiang, and its geological implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(9): 1002-1004.
- Niu H C, Sato H, Zhang H X, Ito J, Yu X Y, Nagao T, Terada K and Zhang Q. 2006. Juxtaposition of adakite, boninite, high-TiO₂ and low-TiO₂ basalts in the Devonian southern Altai, Xinjiang, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 439-456.
- Novak M, Selway J B, Cerny P, Hawthorne F C and Ottolini L. 1999. Tourmaline of the elbaite-dravite series from an elbaite-subtype pegmatite at Blizna, southern Bohemia, Czech Republic[J]. *European Journal of Mineralogy*, 11(3): 557-568.
- Qin J H, Geng X X, Wen C Q, Guo J X and Ren Y C. 2016. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of intrusion from Xiaotuergen copper deposit in Altai, Xinjiang, and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 35(1): 18-32(in Chinese with English abstract).
- Raimbault L, Cuney M, Azencott C, Duthou J L and Joron J L. 1995. Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta-Sn-Li mineralization in the granite at Beauvoir, French Massif Central[J]. *Econ. Geol.*, 90: 548-576.
- Raimbault L and Buroil L. 1998. The Richemont rhyolite dike, massif central, France: A subvocalic equivalent of rare-metal granite[J]. *The Canadian Mineralogist*, 36: 265-282.
- Ren B Q, Zhang H, Tang Y and Lü Z H. 2011. LA-ICPMS U-Pb zircon geochronology of the Altai pegmatites and its geological significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 587-596 (in Chinese with English abstract).
- Selway J B, Breaks F W and Tindle A G. 2005. A review of rare-element (Li-Cs-Ta) pegmatite exploration techniques for the Superior Province, Canada, and large worldwide tantalum deposits[J]. *Exploration and Mining Geology*, 14: 1-30.
- Sillitoe R H and Sawkins F J. 1971. Geologic, mineralogic and fluid inclusion studies relating to the origin of copper-bearing tourmaline breccia pipes, Chile[J]. *Econ. Geol.*, 66(7): 1028-1041.
- Simmons W B and Falster A U. 2016. Evidence for an anatectic origin of an LCT type pegmatite[C]. Colorado, Second Eugene E. Foord Pegmatite Symposium. 103.
- Stepanov A S, Hermann J, Korsakov A V and Rubatto D. 2014. Geochemistry of ultrahigh-pressure anatexis: Fractionation of elements in the Kokchetav gneisses during melting at diamond-facies conditions[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 167(5): 1002.
- Sun M, Yuan C, Xiao W J, Long X P, Xia X P, Zhao G C, Lin S F, Wu F Y and Kroner A. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai: Progressive accretionary history in the Early to Middle Palaeozoic[J]. *Chemical Geology*, 247: 352-383.
- Tang H and Zhang H. 2018. Characteristics of trace elements in quartz from No. 3 pegmatite, Koktokay area, Xinjiang autonomous region, China and implication for magmatic-hydrothermal evolution[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 38(1): 15-24 (in Chinese with English abstract).
- Tang Y, Zhang H and Sun G Z. 2013. Phosphorus in alkali feldspars as an indicator for prospecting for pegmatite-type rare-metal ore deposits in Altai, NW China[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 13(1): 3-10.
- Tang Y, Zhang H and Rao B. 2016. The effect of phosphorus on mangano-columbite and mangantantalite solubility in peralkaline to peraluminous granitic melts[J]. *American Mineralogist*, 101(2): 415-422.
- Tang Y, Wang H, Zhang H and Lü Z H. 2018. K-feldspar composition as an exploration tool for pegmatite-type rare metal deposits in Altai, NW China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 185: 130-138.
- Tkachev A V. 2011. Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geological time[J]. *Geological Society London Special Publications*, 350: 7-23.
- Tong L X, Chen Y B, Xu Y G, Zhou X and Liu Z. 2013. Zircon U-Pb ages of the ultrahigh-temperature metapelitic granulite from the Altai orogen, NW China, and geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3435-3445(in Chinese with English abstract).
- Tong Y, Wang T, Jahn B M, Sun M, Hong D W and Gao J F. 2014. Post-accretionary Permian granitoids in the Chinese Altai orogen: Geochronology, petrogenesis and tectonic implications[J]. *American Journal of Science*, 314: 80-109.
- Tuttle O F and Bowen N L. 1958. Origin of granite in the Light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O[J]. *Geological Society of America*, 74.
- Wan B, Xiao W J, Windley B F and Yuan C. 2013. Permian hornblende gabbro in the Chinese Altai from a subduction-related hydrous parent magma, not from the Tarim mantle plume[J]. *Lithosphere*, 5: 290-299.
- Wang D H, Chen Y C and Xu Z G. 2001. Chronological study of Caledonian metamorphic pegmatite muscovite deposits in the Altai Mountains, northwestern China, and its significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75: 419-425(in Chinese with English abstract).
- Wang R C, Hu H, Zhang A C, Fontan F, Zhang H and De Parseval P. 2006. Occurrence and late re-equilibration of pollucite from the Koktokay No. 3 pegmatite, Altai, northwestern China[J]. *American Mineralogist*, 91: 729-739.

- Wang T, Hong D W, Jahn B M and Tong Y. 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen[J]. *Journal of Geology*, 114: 735-751.
- Wang T, Tong Y, Jahn B M, Zou T R, Wang Y B, Hong D W and Han B F. 2007. SHRIMP U-Pb Zircon geochronology of the Altai No. 3 pegmatite, NW China, and its implications for the origin and tectonic setting of the pegmatite[J]. *Ore Geology Reviews*, 32: 325-336.
- Wang T, Jahn B M, Kovach V P, Tong Y, Hong D W and Han B F. 2009. Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 110: 359-372.
- Wang T, Jahn B M, Kovach V P, Tong Y, Wilde S A, Hong D W, Li S and Salnikova E B. 2014. Mesozoic intraplate granitic magmatism in the Altai accretionary orogen, NW China: Implications for the orogenic architecture and crustal growth[J]. *American Journal of Science*, 314: 1-42.
- Wang W, Wei C, Wang T, Lou Y X and Chu H. 2009. Confirmation of polydeformed granulite in the Altai orogen and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54: 2543-2548.
- Wang W, Wei C, Zhang Y, Chu H, Zhao Y and Liu X. 2014. Age and origin of sillimanite schist from the Chinese Altai metamorphic belt: Implications for late Palaeozoic tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *International Geology Review*, 56: 224-236.
- Windley B F, Kroener A, Guo J, Qu G, Li Y and Zhang C. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai Orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution[J]. *Journal of Geology*, 110: 719-737.
- Wolf M B and London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(19): 4127-4145.
- Xiao W J, Windley B F, Badarch G, Sun S, Li J, Qin K and Wang Z. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: Implications for the growth of Central Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, 161(3): 339-342.
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, Sun M, Lin S F, Chen H L, Li Z L, Li J L and Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 102-117.
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, Li J, Huang B, Han C, Yuan C, Sun M and Chen H. 2015. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 43: 477-507.
- Xiao W J, Windley B F, Han C, Liu W, Wan B, Zhang J E, Ao S J, Zhang Z Y and Song D. 2018. Late Paleozoic to Early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 94-128.
- Xu Z Q, Wang R C, Zhao Z B and Fu X F. 2018. On the structural backgrounds of the large-scale "Hard-rock Type" lithium ore belts in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 1091-1106(in Chinese with English abstract).
- Yang F, Mao J, Liu F, Chai F, Guo Z, Zhou G, Geng X and Gao J. 2010. Geochronology and geochemistry of the granites from the Mengku iron deposit, Altay Mountains, northwest China: Implications for its tectonic setting and metallogenesis[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57: 803-818.
- Yang F Q, Zhang Z L, Wang R, Li Q, Ding J G, Su Z H and Ma K. 2018. Geological characteristics and metallogenesis of rare metal deposits in Altay, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(6): 1010-1025.
- Yin L, Pollard P J, Shouxi H and Taylor R G. 1995. Geologic and geochemical characteristics of the Yichun Ta-Nb-Li deposit, Jiangxi Province, South China[J]. *Econ. Geol.*, 90: 577-585.
- Yin R, Wang R C, Zhang A C, Hu H, Zhu J C, Rao C and Zhang H. 2013. Extreme fractionation from zircon to hafnium in the Koktokay No. 1 granitic pegmatite, Altai, northwestern China[J]. *American Mineralogist*, 98: 1714-1724.
- Yuan C, Sun M, Xiao W J, Li X H, Chen H L, Lin S F, Xia X P and Long X P. 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids[J]. *Chemical Geology*, 242:22-39.
- Yuan F, Zhou T F and Yue S C. 2001. The ages and genetic types of the granites in the Nurt area, Altai[J]. *Xinjiang Geology*, 19(4): 292-296 (in Chinese with English abstract).
- Zagorsky V Y, Vladimirov A G, Makagon V M, Kuznetsova L G, Smirnov S Z, D'yachkov B A, Annikova I Y, Shokalsky S P and Uvarov A N. 2014. Large fields of spodumene pegmatites in the settings of rifting and postcollisional shear-pull-apart dislocations of continental lithosphere[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 55: 237-251.
- Zhang A C, Wang R C, Hu H, Zhang H, Zhu J C and Chen X M. 2004. Chemical evolution of Nb-Ta oxides and zircon from the Koktokay No. 3 granitic pegmatite, Altai, northwestern China[J]. *Mineralogical Magazine*, 68(5): 739-756.
- Zhang C, Liu L F, Santosh M, Luo Q and Zhang X. 2017. Sediment recycling and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Sr-Nd-Hf isotopes and trace elements in granitoids of the Chinese Altai[J]. *Gondwana Research*, 47: 142-160.
- Zhang H. 2001. The geochemical behaviors and mechanisms of incompatible trace elements in the magmatic-hydrothermal transition system: A case study of Altay No. 3 pegmatite, Xinjiang (Doctor dissertation research paper)[D]. Supervisor: Liu C Q. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science. 172p(in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Tang Y, Lü Z H and Wen X P. 2014. Studies of metallogeny and prediction of prospecting targets on rare metal ore deposits from the Halong-Qinghe zone in Altay Orogenic Belt, Xinjiang[R].

- Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1-154 (in Chinese).
- Zhang X, Zhang H, Ma Z L, Tang Y, Lü Z H, Zhao J Y and Liu Y L. 2016. A new model for the granite-pegmatite genetic relationships in the Kaluan-Azubai-Qiongkuer pegmatite-related ore fields, the Chinese Altay[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 124: 139-155.
- Zhao J Y, Zhang H, Tang Y, Lü Z H and Chen Y. 2017. Ore-forming elements diffusion and distribution in the altered host rock surrounding the Koktokay No. 3 pegmatite in the Chinese Altay[J]. *Acta Geochimica*, 36(2): 151-165.
- Zheng C Q, Kato T, Enami M and Xu X C. 2007. CHIME monazite ages of metasediments from the Altai orogen in northwestern China: Devonian and Permian ages of metamorphism and their significance[J]. *Island Arc*, 16: 598-604.
- Zhou Q F, Qin K Z, Tang D M and Wang C L. 2018. LA-ICP-MS U-Pb zircon, columbite-tantalite and ^{40}Ar - ^{39}Ar muscovite age constraints for the rare-element pegmatite dykes in the Altai orogenic belt, NW China[J]. *Geological Magazine*, 155(3): 707-728.
- Zou T R and Li Q C. 2006. Rare and rare earth metallic deposits in Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-284 (in Chinese with English abstract).
- Be-Mo成矿作用(硕士论文)[D]. 导师: 张辉, 唐红峰. 北京: 中国科学院大学. 71页.
- 刘云龙. 2017. 新疆阿尔泰造山带二叠纪伟晶岩及后碰撞花岗岩岩石成因及其大陆动力学研究(博士论文)[D]. 导师: 张辉. 北京: 中国科学院大学. 110页.
- 吕正航. 2013. 新疆阿尔泰柯鲁木特112号伟晶岩岩浆-热液演化及成因初探(博士论文)[D]. 导师: 张辉. 北京: 中国科学院大学. 199页.
- 吕正航, 张辉, 唐勇. 2015. 新疆别也萨麻斯L1号伟晶岩脉Li-Nb-Ta矿床与围岩花岗岩成因关系研究[J]. *矿物学报*, S1: 323.
- 吕正航, 张辉, 唐勇, 赵景宇, 刘云龙, 郭柳. 2018. 新疆阿尔泰不同矿化类型伟晶岩中磷的分布特征及其找矿指示[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 37(2): 260-270.
- 马占龙, 张辉, 唐勇, 吕正航, 张鑫, 赵景宇. 2015. 新疆卡鲁安矿区伟晶岩锆石U-Pb定年、铪同位素组成及其与哈龙花岗岩成因关系研究[J]. *地球化学*, 44(1): 9-26.
- 牛贺才, 许继锋, 于学元, 陈繁荣, 郑作平. 1999. 新疆阿尔泰富镁火山岩系的发现及其地质意义[J]. *科学通报*, 44(9): 1002-1004.
- 秦纪华, 耿新霞, 温超权, 郭建新, 任宇晨. 2016. 阿尔泰小土尔根铜矿区岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及地质意义[J]. *矿床地质*, 35(1): 18-32.
- 任宝琴, 张辉, 唐勇, 吕正航. 2011. 阿尔泰造山带伟晶岩年代学及其地质意义[J]. *矿物学报*, 31(3): 587-596.
- 唐宏, 张辉. 2018. 可可托海3号伟晶岩脉石英中微量元素组成特征与岩浆-热液演化[J]. *矿物学报*, 38(1): 15-24.
- 全来喜, 陈义勇, 徐义刚, 周信, 刘兆. 2013. 阿尔泰超高温变泥质麻粒岩的锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 29(10): 3435-3445.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚. 2001. 阿尔泰加里东期变质成因伟晶岩型白云母矿床的成矿年代证据及其意义[J]. *地质学报*, 75(3): 419-425.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 付小方. 2018. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景[J]. *地质论评*, 92(6): 1091-1106.
- 杨富全, 张忠利, 王蕊, 李强, 丁建刚, 苏振华, 麻坤. 2018. 新疆阿尔泰稀有金属矿地质特征及成矿作用[J]. *大地构造与成矿学*, 42(6): 1010-1025.
- 袁峰, 周涛发, 岳书仓. 2001. 阿尔泰诺尔特地区花岗岩形成时代及成因类型[J]. *新疆地质*, 19(4): 292-296.
- 张辉. 2001. 岩浆-热液过渡阶段体系中不相容元素地球化学行为及其机制——以新疆阿尔泰3号伟晶岩脉研究为例(博士论文)[D]. 导师: 刘丛强. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所. 1-171.
- 张辉, 唐勇, 吕正航, 温兴平. 2014. 新疆阿尔泰成矿带哈龙-青河一带稀有金属成矿规律及找矿靶区预测研究[R]. 中国科学院地球化学研究所. 1-154.
- 周天怡. 2015. 中国新疆阿祖拜伟晶岩型海蓝宝石成因研究(博士论文)[D]. 导师: 陈衍景. 北京: 北京大学. 124页.
- 邹天人, 李庆昌. 2006. 中国新疆稀有及稀土金属矿床[M]. 北京: 地质出版社. 1-284.

附中文参考文献

- 柴凤梅, 杨富全, 刘锋, 耿新霞, 张志欣, 陈斌. 2012. 阿尔泰南缘麦兹盆地康布铁堡组变质酸性火山岩年龄及岩石成因[J]. *地质科学*, 47(1): 221-239.
- 陈剑锋. 2011. 阿尔泰3号伟晶岩脉缓倾斜部分岩浆的形成与演化(硕士论文)[D]. 导师: 张辉. 北京: 中国科学院研究生院. 87页.
- 陈阳, 张辉, 赵景宇. 2016. 新疆卡鲁安矿区807号伟晶岩脉近围岩蚀变中成矿元素扩散模型及其影响因素[J]. *地球化学*, 45(3): 268-280.
- 陈有妍, 高峰, 裴先治, 田红彪, 李佐臣, 李瑞保, 王盟, 何峻岭. 2017. 新疆阿尔泰地区辉腾花岗岩体年代学、地球化学特征及构造意义[J]. *岩石学报*, 33(10): 3076-3090.
- 胡霭琴, 韦刚健, 邓文峰, 陈林丽. 2006. 阿尔泰地区青河县西南片麻岩中锆石SHRIMP U-Pb定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 22(1): 1-10.
- 黄永胜, 张辉, 吕正航, 唐勇, 唐宏. 2016. 新疆阿尔泰二叠纪、三叠纪伟晶岩侵位深度研究: 来自流体包裹体的指示[J]. *矿物学报*, 36(4): 571-585.
- 姜丽萍. 2012. 阿尔泰两棵伟晶岩型铁矿床包裹体特征研究(硕士论文)[D]. 导师: 柴凤梅. 乌鲁木齐: 新疆大学. 50页.
- 刘宏. 2013. 新疆阿尔泰阿拉尔花岗岩与可可托海3号伟晶岩脉成因关系地球化学研究(硕士论文)[D]. 导师: 张辉, 温兴平. 昆明: 昆明理工大学. 62页.
- 刘文政. 2015. 新疆阿斯喀尔特花岗岩-伟晶岩地球化学演化及其