稀有金属花岗伟晶岩锆石、锡石与铌钽铁矿 U-Pb 和白云母^{40}Ar/^{39}Ar 测年对比研究——以阿尔金中段吐格曼北锂铍矿床为例*

李杭[1,2,3] 洪涛[1,2,3] 杨智全[4] 陈建中[4] 柯强[1,2,3] 王学海[1,2,3] 牛磊[1,2,3] 徐兴旺[1,2,3]**

LI Hang[1,2,3], HONG Tao[1,2,3], YANG ZhiQuan[4], CHEN JianZhong[4], KE Qiang[1,2,3], WANG XueHai[1,2,3], NIU Lei[1,2,3] and XU XingWang[1,2,3]**

1. 中国科学院地质与地球物理研究所,中国科学院矿产资源研究重点实验室,北京 100029
2. 中国科学院大学,北京 100049
3. 中国科学院地球科学研究院,北京 100029
4. 新疆地矿局第三地质大队,库尔勒 841000

1. *Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3. *Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
4. *No.*3 *Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Korla* 841000, *China*

2020-04-17 收稿,2020-06-02 改回.

Li H, Hong T, Yang ZQ, Chen JZ, Ke Q, Wang XH, Niu L and Xu XW. 2020. Comparative studying on zircon, cassiterite and coltan U-Pb dating and ^{40}Ar/^{39}Ar dating of muscovite rare-metal granitic pegmatites: A case study of the northern Tugeman lithium-beryllium deposit in the middle of Altyn Tagh. *Acta Petrologica Sinica*, 36(9):2869-2892, doi: 10.18654/1000-0569/2020.09.16

Abstract Geochronological dating is a vital part of the study of granitic pegmatite type rare-metal deposits. There are many dating methods; however, comparative study on dating results obtained by different methods hasn't been performed. In this study, we report new dating results of zircon, cassiterite, coltan (short for columbite-tantalite) and muscovite from three pegmatites of the northern Tugman lithium-beryllium deposit. The results show that: 1) the ρ31 muscovite-cassiterite pegmatite has a concordant U-Pb age of 468 ±8.7Ma (MSWD = 1.1, N = 39) of cassiterite, whereas the muscovite-albite-spodumene pegmatite has a concordant U-Pb age of 458.7 ±2.3Ma (MSWD = 7.2, N = 16) of zircon; 2) the deformed ρ38 muscovite-albite-spodumene pegmatite has a concordant U-Pb age of 454.7 ±4.0Ma (MSWD = 8.0, N = 10) of zircon and ^{40}Ar/^{39}Ar plateau age of 350.2 ±1.6Ma (MSWD = 4.7) of muscovite; and 3) the ρ87 coltan-bearing muscovite-quartz pegmatite has a concordant U-Pb age of 464.1 ±2.7Ma (MSWD = 5.2, N = 39) of coltan. The U-Pb ages of coltan and cassiterite are consistent within the error range, they may represent the crystallization age of granitic pegmatite at the magmatic stage. The U-Pb ages of the metamict zircons of the two samples can also be compared, they may represent the reset time of U-Pb isotope system caused by fluid metasomatism and recrystallization of magmatic zircon after metamictization. The ^{40}Ar/^{39}Ar plateau age of muscovite is obviously later than the U-Pb age of coltan, cassiterite, and zircon. Considering the strong deformation and alteration of muscovite and spodumene in the ρ38 muscovite-albite-spodumene pegmatite, it is suggested that the ^{40}Ar/^{39}Ar age of deformed muscovite may decipher the superposition deformation and alteration time. It is concluded that the lithium-beryllium granitic pegmatites in the northern Tugman area were formed in a period of 468 ~ 454Ma. Therefore, we consider that an intensive rare metal mineralization during the Middle-Late Ordovician might occur in the Altyn Tagh area. Moreover, it

* 本文受第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0802)和中国科学院地质与地球物理研究所重点部署项目(IGGCAS-201902)联合资助.

第一作者简介: 李杭,男,1992 年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: lh@mail.iggcas.ac.cn

** **通讯作者:** 徐兴旺,男,1966 年生,研究员,博导,主要从事构造-岩浆-流体过程与成矿,E-mail: xuxw@mail.iggcas.ac.cn

is also suggested that the U-Pb ages of coltan and cassiterite might represent the crystallization time of a pegmatite during the magmatic stage, whereas the U-Pb age of metamict zircon could record a reset time of U-Pb isotope system by fluid metasomatism and recrystallization, while the $^{40}Ar/^{39}Ar$ age of deformed potassium-bearing minerals might represent the deformation and alteration time of the pegmatites. The combination of different dating methods may constrain the integrated formation epoch of the rare-metal pegmatite deposit.

Key words Zircon U-Pb dating; Cassiterite U-Pb dating; Coltan U-Pb dating; Muscovite Ar-Ar dating; Pegmatite in Tugeman

摘 要 稀有金属花岗伟晶岩年代学是花岗伟晶岩型稀有金属矿床研究的重要内容。目前测年方法较多,但不同方法测试结果的对比研究亟待开展。我们选择吐格曼北花岗伟晶岩型锂铍矿床3条含矿伟晶岩开展锆石、锡石、铌钽铁矿及白云母四种矿物不同方法的测年对比研究。结果显示:1) ρ31 白云母-锡石伟晶岩中锡石$^{238}U/^{206}Pb$-$^{207}Pb/^{206}Pb$ 谐和年龄为 468 ± 8.7Ma (MSWD = 1.1, N = 39)、白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩中锆石$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和年龄为 458.7 ± 2.3Ma (MSWD = 7.2, N = 16);2) ρ38 白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩中锆石$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和年龄为 454.7 ± 4.0Ma (MSWD = 8.0, N = 10)、白云母$^{40}Ar/^{39}Ar$ 坪年龄为 350.2 ± 1.6Ma (MSWD = 4.7);3) ρ87 含铌钽铁矿-白云母-石英伟晶岩中铌钽铁矿$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和年龄为 464.1 ± 2.7Ma (MSWD = 5.2, N = 39)。可以看出,铌钽铁矿与锡石的 U-Pb 年龄在误差范围内一致,可能代表花岗伟晶岩岩浆结晶的年龄;2 件样品的蜕晶化锆石 U-Pb 年龄也可以对比,可能代表岩浆锆石蜕晶化后经流体交代作用及重结晶作用导致 U-Pb 同位素系统重置的时间。白云母 Ar-Ar 年龄明显晚于铌钽铁矿、锡石和锆石的 U-Pb 年龄,鉴于 ρ38 白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩脉中白云母与锂辉石发生了强烈变形与蚀变,认为变形的白云母记录的是叠加变形与热液蚀变的时间。由此推断吐格曼北锂铍花岗伟晶岩形成于 468 ~ 454Ma,这意味着阿尔金山地区中-晚奥陶世可能存在持续时间较长的稀有金属成矿事件。基于花岗伟晶岩矿物成因与吐格曼北锂铍花岗伟晶岩不同方法测年对比结果,可以得出以下结论:铌钽铁矿与锡石的 U-Pb 年龄可代表伟晶岩岩浆结晶的年龄,蜕晶化的锆石 U-Pb 年龄记录的是岩浆锆石蜕晶化后经流体交代作用及重结晶作用导致 U-Pb 同位素系统重置的时间,含钾矿物的$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄能够约束伟晶岩的变形与蚀变年龄;多种定年方法的联合约束可以更好地限定稀有金属花岗伟晶岩的各个阶段成矿事件时间。

关键词 锆石 U-Pb 定年;锡石 U-Pb 定年;铌钽铁矿 U-Pb 定年;白云母 Ar-Ar 定年;稀有金属伟晶岩

中图法分类号 P588.131; P597.3; P618.7

稀有金属(包括锂、铍、铌、钽、铯、锆、铪和铷)是重要的战略金属,广泛应用于国防、航天、航空等工业领域(Linnen *et al.*, 2014; Nassar, 2017; Kaeter *et al.*, 2018)。近年来,稀有金属因其重要战略意义而被中国和欧、美、日等国列入"战略与关键金属"清单中(Linnen *et al.*, 2012; 张辉等,2019)。其中稀有金属锂元素被称为"绿色高能金属"、"白色石油"。随着新能源汽车和储能技术的高速发展,未来世界对锂资源的需求将愈演愈烈,亟需在锂矿资源上找到突破(王秋舒和元春华,2019)。花岗伟晶岩是稀有金属的重要来源,花岗伟晶岩型稀有金属矿床也是目前矿床学研究的热点(Linnen *et al.*, 2012; Chakhmouradian *et al.*, 2015; Kaeter *et al.*, 2018; Yin *et al.*, 2020)。稀有金属花岗伟晶岩成岩成矿年龄的确定是此类矿床研究的重要内容(周振华等,2016;王倩等,2019)。

稀有金属花岗伟晶岩测年的方法较多,有锆石 U-Pb(任宝琴等,2011;Zhou *et al.*, 2015, 2018; 马占龙等,2015;杨红等,2017)、白云母和微斜长石 Ar-Ar (Zhou *et al.*, 2015, 2018; Chen *et al.*, 2000)、白云母和微斜长石 K-Ar (邹天人等,1986;)和全岩 Rb-Sr (Clark, 1982; 邹天人等,1986;朱永峰和曾贻善,2002;Zhu *et al.*, 2006)等定年方法。其中,锆石 U-Pb 年龄一般解释为岩浆岩结晶年龄,而蜕晶化的锆石 U-Pb 年龄记录的是岩浆锆石蜕晶化后经流体交代作用及重结晶作用导致 U-Pb 同位素系统重置的时间(杨红等,2017)。云母等含钾矿物的 K-Ar 和 Ar-Ar 法测定的年龄可能代表岩浆结晶结束的年龄或后期多期次热事件的年龄(Zhu *et al.*, 2006;李建康等,2006a, b)。铌钽铁矿 U-Pb 定年(Romer *et al.*, 1996b; Lupulescu *et al.*, 2011; 钟龙等,2011;Li *et al.*, 2019; Feng *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020)在近些年取得巨大进展,该方法不存在继承矿物影响,被认为是目前伟晶岩定年最可靠的方法。锡石 U-Pb 定年方法多用于确定锡多金属矿床的成矿时代,但近年来越来越多的含锡石稀有金属伟晶岩矿床用锡石 U-Pb 定年法来确定伟晶岩型稀有金属矿床的成矿时代(袁顺达等,2010;张东亮等,2011;Yan *et al.*, 2018; 代鸿章等,2018;Kendall-Langley *et al.*, 2020;费光春等,2020; 许家斌等,2020),如:松潘-甘孜造山带的李家沟(许家斌等,2020)、党坝(费光春等,2020)、甲基卡 308 号脉(代鸿章等,2018),西昆仑-喀喇昆仑成矿带的大红柳滩稀有金属矿床(Yan *et al.*, 2018)都使用了锡石 U-Pb 定年,且可与铌钽矿 U-Pb 定年结果相互验证。

然而,不同定年方法在同一个矿床中得出的定年结果往往差异很大。例如:可可托海 3 号脉中锆石 U-Pb 年龄为 180 ~ 220Ma (Wang *et al.*, 2007; 陈剑锋,2011;周起凤,2013),铀细晶石 U-Pb 年龄为 196.4Ma (邹天人等,1986),白云母 K-Ar 年龄为 160 ~ 292Ma (邹天人等,1986),微斜长石 K-Ar 年龄为 120Ma (邹天人等,1986),白云母 Ar-Ar 年龄为 160 ~ 292Ma (陈富文等,1999;周起凤,2013),钾长石 Ar-Ar 年龄

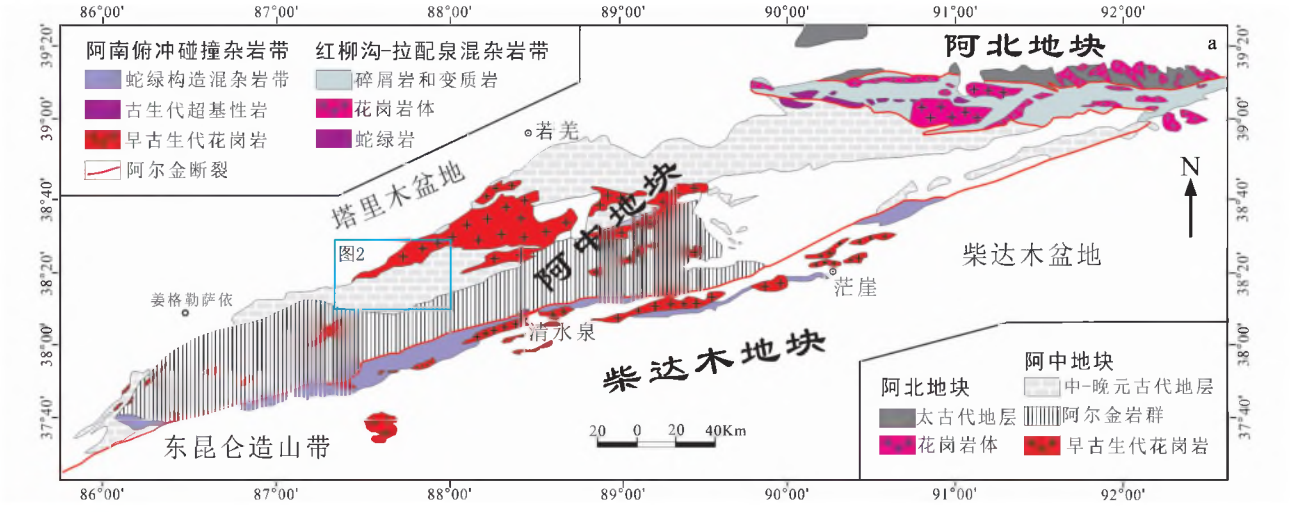


图 1 阿尔金中段地区地质简图(据康磊等,2016;徐兴旺等,2019 修编)

Fig. 1 Simplified geoogical map of the middle part of Altyn Tagh (after Kang *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2019)

为 148Ma(陈富文等,1999),铌钽铁矿 U-Pb 年龄为 218Ma(Che *et al.*, 2015)、205.6Ma(王倩等,2019),辉钼矿 Re-Os 年龄为 210~208Ma(Liu *et al.*, 2014)及 Rb-Sr 等时线年龄为 331.9Ma(邹天人等,1986)、238Ma(朱永峰和曾贻善,2002)、218.4Ma(Zhu *et al.*, 2006)。这可能和不同定年体系的适用条件有关。这些方法中哪种更合理、更可靠?哪些方法给出的结果是可以相互验证的?不同方法给出的结果出现差异的原因是什么?为了综合评价稀有金属伟晶岩不同定年方法,我们选择阿尔金中段吐格曼北锂铍矿床含矿伟晶岩分别开展锆石、锡石、铌钽铁矿及白云母不同方法的测年对比研究,以期了解不同测年方法的使用条件,同时也对获得的数据进行合理解释。

1 阿尔金中段吐格曼花岗伟晶岩型稀有金属矿床特征

1.1 区域地质背景

阿尔金造山带位于青藏高原北缘,地处塔里木板块、柴达木地块及祁连-昆仑造山带之间(图 1),是由早古生代板块(或地块)之间相互俯冲-碰撞形成的复杂构造带,在中、新生代又被走滑断裂所切割,整个造山带由不同时期、不同构造层次和形成于不同构造环境的地质体拼合而成(郑剑东,1991;车自成等,1995,1998;刘良等,1996,1999;郭召杰等,1998;Zhang *et al.*, 1999, 2001;周勇和潘裕生,1999;徐兴旺等,2019)。

阿尔金中段吐格曼地区位于新疆若羌县城南侧的阿尔金山,构造上属于阿中地块(图 1)。吐格曼地区出露的地层主要有新太古界米兰岩群($Ar_{1-2}M$)、中元古界阿尔金岩群(Pt_2A)与复理石建造(fw(Pt_2))、长城系贝壳滩组(Ch*b*)与蓟县系金雁山组(Jx*j*)(图 2)。其中,米兰岩群为一套强烈变形变质的碎屑岩、碳酸盐岩夹火山岩建造,普遍含有蓝晶石、石榴石、十字石、夕线石等变质矿物,主要岩石类型包括石榴黑云斜长片麻岩、蓝晶石榴黑云斜长片麻岩、十字夕线蓝晶黑云片岩、石榴斜长角闪岩、大理岩、石英岩与变粒岩等,分布于研究区的东南部;阿尔金岩群广泛出露于研究区的中部及西南部,主要为一套由变质碎屑岩、碳酸盐岩和变质火山(碎屑)岩组成的绿片岩相-角闪岩相变质岩系;中元古界复理石建造为英格里克构造蛇绿混杂岩的组成部分,呈北东-南西向分布于研究区西南、东北部,为主要由斜长二云石英片岩、石榴石十字石二云石英片岩、黑云斜长变粒岩与二云母片岩等构成的绿片岩相-角闪岩相变质岩系,其与南北两侧的米兰岩群和阿尔金岩群地层间为断层接触;长城系贝壳滩组由灰白、灰-深灰色中厚层状石英岩、黑云石英岩、二云石英片岩、变质粗粒长石岩屑砂岩与斜长白云母石英片岩等绿片岩相变质岩组成;区内蓟县系金雁山组分布于库木加克沟两侧,大致呈近东西向展布,岩性主要为一套大理岩(徐兴旺等,2019)。

吐格曼地区花岗岩发育,岩石类型主要有片麻状黑云二长花岗岩、二长花岗岩、二云母花岗岩与黑云斜长花岗岩,规模较大的岩体从北向南依次主要分布有库鲁赛、阿亚格、托巴、吐格曼、萨拉姆五个岩体。其中,吐格曼岩体是 2018 年野外地质调查过程新识别的大型层状岩体(徐兴旺等,2019),岩体产出于中元古界复理石建造中(图 2);岩体层状构造发育,包括不同矿物组成花岗岩的岩性层及其内部矿物分带而显示的层状构造;岩体岩石类型多样,有黑云母花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩、及钠长花岗岩;层状黑云母花岗岩分布于岩体的外侧与边缘(图 2),而其它岩性层构成的淡色层状花岗岩体是岩体的主体;层状淡色花岗岩中发育从二云母花岗岩到白云母花岗岩和钠长花岗岩的连续结晶分异与演化的多个韵律组合。钠长花岗岩层顶部可发育

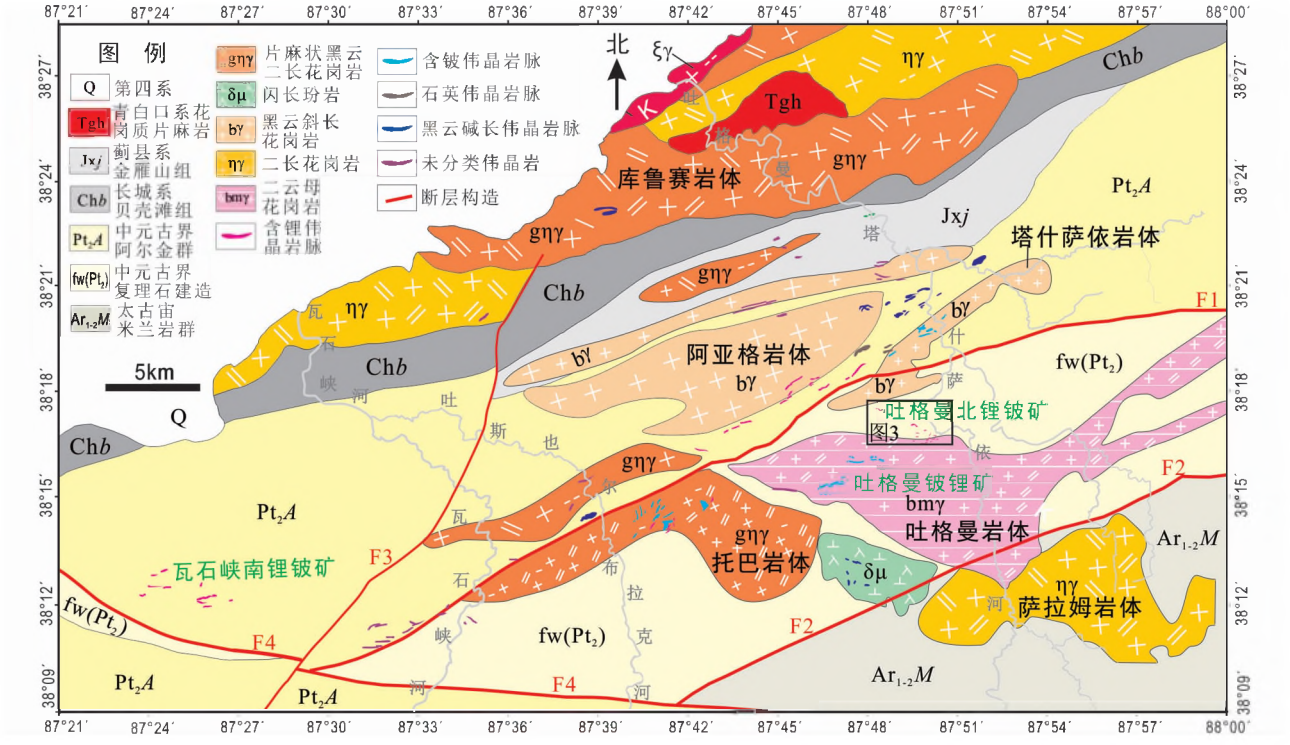


图 2 阿尔金中段吐格曼地区区域地质图(据徐兴旺等,2019)

Fig. 2 Geological map of the Tugeman area in the middle part of Altyn Tagh (after Xu *et al.*, 2019)

电气石与石榴子石相对富集的钠长花岗岩(徐兴旺等,2019)。

1.2 矿床地质特征

阿尔金中段吐格曼地区是稀有金属锂铍元素成矿的有利地区,是花岗伟晶岩型稀有金属矿床成矿与找矿研究的新区(徐兴旺等,2019)。近年来新发现了吐格曼铍锂矿、吐格曼北锂铍矿和瓦石峡南锂铍矿 3 个矿床(徐兴旺等,2019)。其中吐格曼铍锂矿和吐格曼北锂铍矿分别位于吐格曼岩体的中心地带和北接触带(图 2)。

吐格曼北锂铍矿位于吐格曼岩体的北接触带(图 2),为花岗伟晶岩型锂铍矿。锂铍花岗伟晶岩脉发育于二云母花岗岩及其北侧的石榴子石云母石英片岩中。区内发现 27 条锂铍花岗伟晶岩脉,脉带整体呈东西向展布,各脉体规模大小不一,长 50 ~ 700m,宽 1 ~ 35m,脉体呈透镜状和树枝状产出(图 3)。主要由钠长石、钾长石、白云母、石英、电气石、锂辉石和绿柱石等矿物组成,含少量铌钽铁矿、磷灰石、独居石和锆石等副矿物。根据矿物组成,矿区伟晶岩可分为钠长石-锂辉石伟晶岩、白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩、钾长石-绿柱石伟晶岩和白云母-锡石伟晶岩四种类型。下面重点介绍 ρ31、ρ38 与 ρ87 脉体的产出特征。

1) ρ31 花岗伟晶岩特征(图 4a,b):脉体呈北东向产出,产状 150° ∠53°,长 200m、宽 3 ~ 6m,脉体截切地层片理。ρ31 伟晶岩脉内部结构分带清楚,中心发育白云母-石英-锂辉石伟晶岩,两侧均为钠长花岗岩带,局部也有细长的锂辉石脉体,钠长花岗岩带。脉体整体向东延伸,锡石产出于脉体边部的上盘(图 4c)。

2) ρ38 花岗伟晶岩特征:ρ38 北段发育白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩,脉体产状 89° ∠80°,长 210m、宽 1.5m;ρ38 南段伟晶岩脉体产状 170° ∠35°,长 198m、宽约 2m,其形态为倒立树枝状(由上向下分叉)。该脉中部发育大量钾长石,为浅黄色的钾长石伟晶岩,上部和下部分别发育钾长石-绿柱石伟晶岩和钠长石-锂辉石伟晶岩(图 4d-f)。

3) ρ87 花岗伟晶岩特征:ρ87 号伟晶岩脉位于矿区南侧,脉体产状平缓、明显截切近直立的地层片理。花岗伟晶岩脉内部结构分带(图 5a,b)共分为四个带,包括白云母-石英带(Ⅰ)、文象带(Ⅱ)、钠长石-石英-锂辉石带(Ⅲ)、细晶岩带(Ⅳ)。在细晶花岗岩带中见交代的含铌钽铁矿-白云母-石英伟晶岩脉(图 5c, d)。

矿区发现的 27 条花岗伟晶岩型锂铍矿体,共生 Nb、Ta、Rb、Cs;Li_2O 品位 0.57% ~6.1%,平均品位 1.1%,资源量达 2 万吨;BeO 品位 0.04% ~2.6%,平均品位 0.47%,资源量达 0.37 万吨;Nb_2O_5 品位 0.014% ~0.029%;Ta_2O_5 品位 0.008% ~0.078%;Rb_2O 品位 0.051% ~0.27%;Cs_2O 品位 0.04% ~1.96%。初步估算锂铍金属资源量已达中型矿床规模。

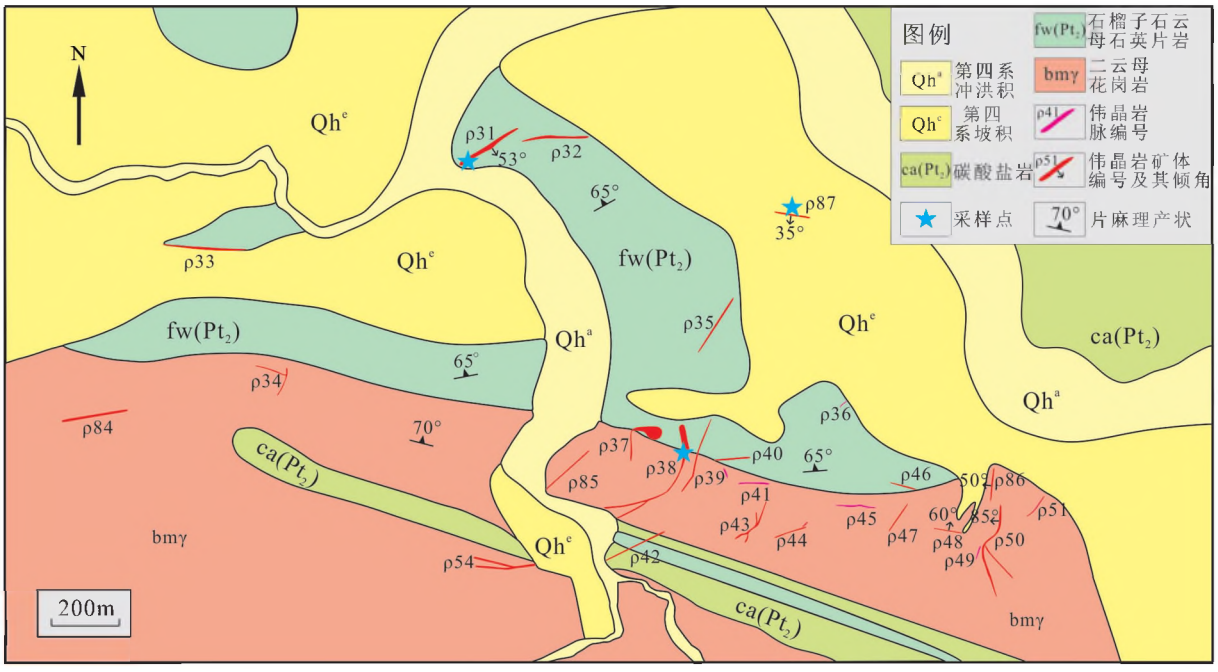


图 3 吐格曼北锂铍矿区地质图(据新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第三地质大队,2016①修编)

Fig. 3 Geological map of the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

表 1 样品及采样位置

Table 1 Geological features and the locations of the study samples

样品号	结构带	描述
18AE30	白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩	伟晶结构,块状构造;主要矿物组成为石英、锂辉石、钠长石和少量白云母
18AE18	白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩	伟晶结构,块状构造;主要矿物组成为石英、锂辉石、钠长石和少量白云母
19AE43	白云母-锡石伟晶岩	伟晶结构,块状构造;主要矿物组成为石英、白云母和锡石
19TC87	含铌钽铁矿-白云母-石英伟晶岩	细晶结构,块状构造;主要矿物组成为石英、白云母和铌钽铁矿

2 样品选择及岩石学特征

针对吐格曼北锂铍矿床伟晶岩样品开展了系统的同位素年代学研究。采集样品(表 1)后,对 38 号脉白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩样品进行锆石 U-Pb 测试(1 件:18AE18)和白云母$^{40}Ar/^{39}Ar$测试(1 件:18AE18)、对 31 号脉白云母-锡石伟晶岩样品进行锆石 U-Pb 测试(1 件:18AE30)、锡石 U-Pb 测试(1 件:19AE43)以及对 87 号脉含铌钽铁矿-白云母-石英伟晶岩样品进行铌钽铁矿 U-Pb 测试(1 件:19TC87)。具体采样位置见图 3。

白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩(18AE18、18AE30)为灰白色,伟晶结构,块状构造;主要矿物组成为石英(10% ~ 15%)、锂辉石(70% ~85%)、白云母(~5%)和钠长石(5% ~10%)(图 4f、图 6)。手标本中石英呈无色透明,他形粒状,粒径 1 ~ 2cm;锂辉石呈灰白色板状、柱状,长度为 1 ~ 13cm,镜下可见发生碎裂化锂辉石;白云母为亮白色片状,片状部分最长可达 2cm,白云母片状晶体发生构造变形与热液蚀变;钠长石白色板柱状,自形程度较好,长度为 1 ~ 2cm。

白云母-锡石伟晶岩(19AE43)为伟晶结构,块状构造;主要矿物组成为石英(50% ~60%)、白云母(15% ~25%)和锡石(15% ~25%)。其中锡石集合体长度范围为 1 ~4cm,呈短柱状、自形,表面光滑,呈铁黑色至褐黑色,多与白云母、石英共生(图 4c)。

含铌钽铁矿-白云母-石英伟晶岩(19TC87)为伟晶结构,块状构造;主要矿物组成为石英(50% ~65%)、白云母(20% ~30%)和铌钽铁矿(15% ~20%),其中铌钽铁矿集合体宽 1 ~2mm、长 1 ~2cm,呈长柱状,多与白云母、石英共生(图 5c)。

① 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第三地质大队. 2016. 新疆若羌县塔什萨依一带铅锌、锰矿调查评价报告. 1 -240

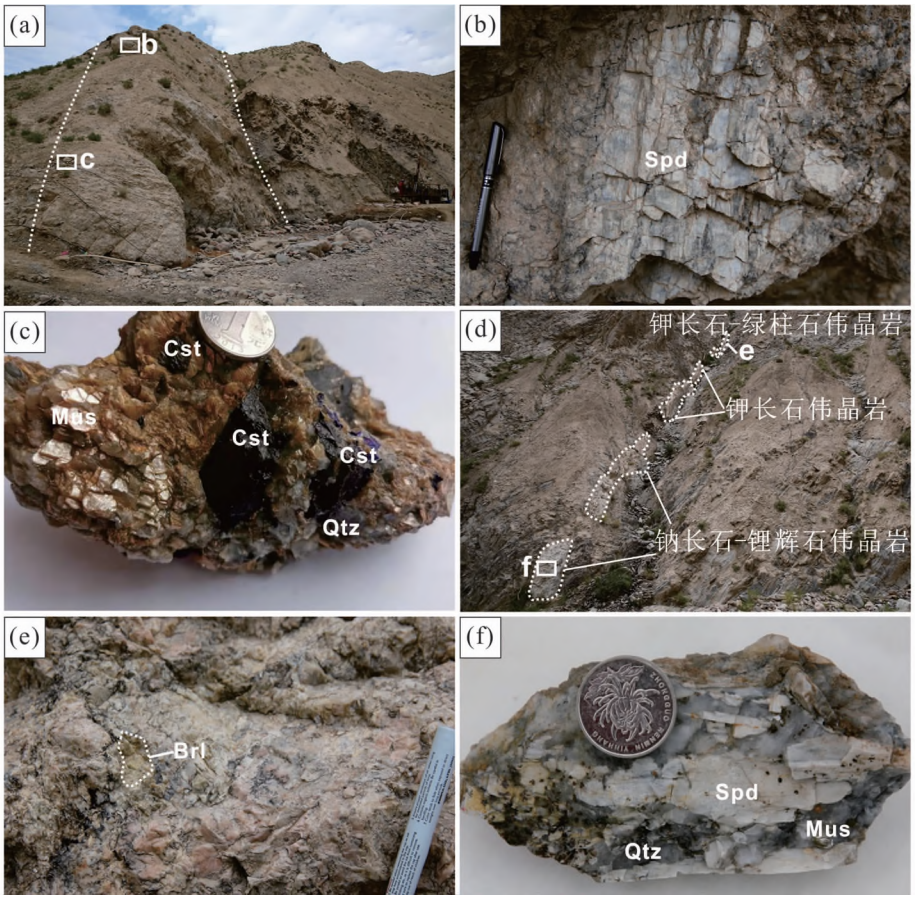


图 4 吐格曼北锂铍矿 ρ31(a-c)和 ρ38 南段(d-f)伟晶岩脉野外露头及手标本照片

(a) ρ31 伟晶岩脉体露头;(b) ρ31 锂辉石伟晶岩露头;(c) ρ31 白云母-锡石伟晶岩手标本;(d) ρ38 南段伟晶岩脉体露头;(e) ρ38 南段含绿柱石-钾长石伟晶岩露头;(f) ρ38 北段白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩手标本. Qtz-石英;Mus-白云母;Brl-绿柱石;Spd-锂辉石;Cst-锡石

Fig. 4 Photographs of outcrop and hand specimens of ρ31 (a-c) and in the south segment of ρ38 (d-f) pegmatite dyke in the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

(a) ρ31 pegmatite vein outcrop; (b) ρ31 spodumene pegmatite outcrop; (c) ρ31 muscovite-cassiterite pegmatite specimen; (d) outcrop of pegmatitic dyke body in the southern segment of ρ38; (e) outcrop of beryl-bearing potassium feldspar pegmatite in the southern segment of ρ38; (f) specimens of muscovite-albite-spodumene pegmatite in the northern segment of ρ38. Qtz-quartz; Mus-muscovite; Brl-beryl; Spd-spodumene; Cst-cassiterite

3 测试方法

3.1 锆石 U-Pb 测年

单颗粒锆石分选在河北区域地质矿产调查研究所实验室使用常规的重选和磁选技术完成。锆石制靶和 U-Pb 同位素定年分析在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 分析完成。将晶型较好的锆石样品颗粒和锆石标样粘贴在环氧树脂靶上,抛光使其曝露一半晶面。然后进行锆石透反射光显微照相和阴极发光图像分析,选择适宜的测试点位(图 7)。详细的仪器参数和分析流程见文献(Zong *et al.*, 2017)。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro102 ArF193nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。激光剥蚀过程中采用氩气为补偿气、氦气作载气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合,激光剥蚀系统配置有信号平滑装置(Hu *et al.*, 2015)。本次分析的激光束斑和频率分别为 32μm 和 5Hz。U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。每个时间分辨分析数据包括大约 20 ~ 30s 空白信号和 50s 样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010)完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3 (Ludwig, 2003)完成。

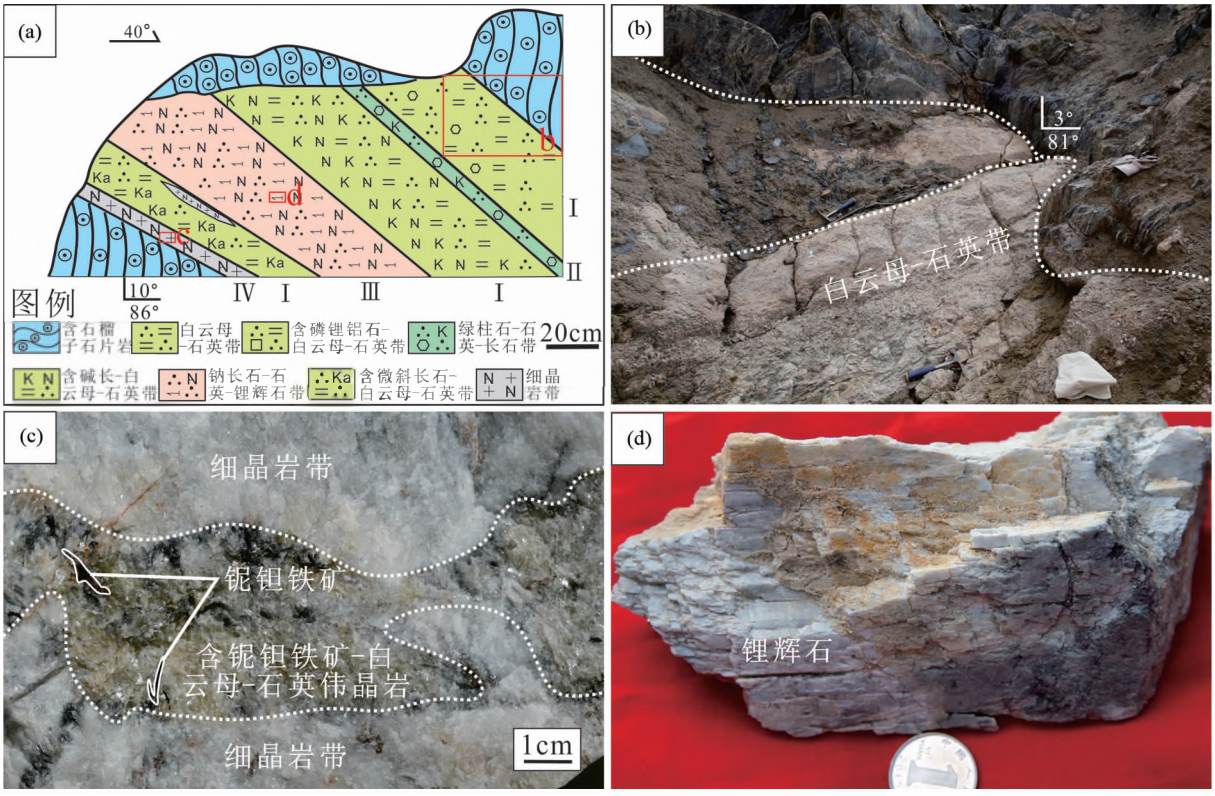


图 5 吐格曼北锂铍矿 ρ87 伟晶岩脉剖面素描图(a)、野外露头(b)及手标本(c、d)照片

(a)伟晶岩脉分带现象剖面;(b)白云母石英带剖面;(c)透镜状含铌钽铁矿-白云母-石英伟晶岩;(d)钠长石-石英-锂辉石带中锂辉石标本

Fig. 5 ρ87 pegmatite vein profile sketch (a), field outcrop (b) and hand specimen (c, d) photographs in the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

(a) pegmatitic vein zoning phenomenon profile; (b) section of muscovite-quartz belt; (c) lenticular coltan-bearing muscovite-quartz pegmatite; (d) spodumene specimen in albite-quartz-spodumene belt

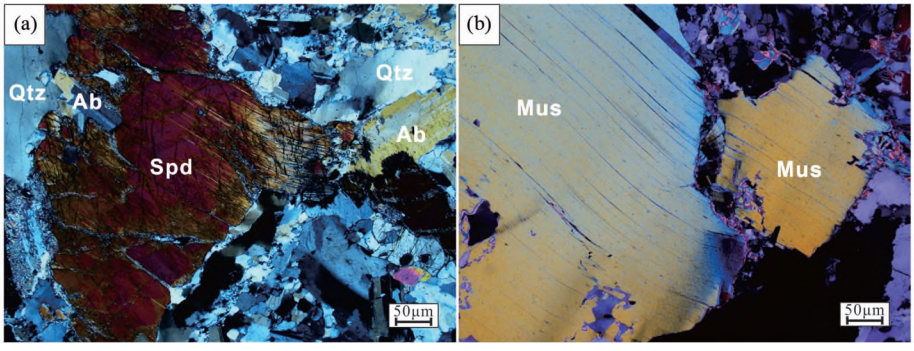


图 6 吐格曼北锂铍矿床白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩(18AE18)显微照片

(a)锂辉石受热液蚀变和后期构造影响发生破碎;(b)白云母受热液蚀变和后期构造影响发生变形. Ab-钠长石

Fig. 6 Microphotographs of muscovite-albite-spodumene pegmatite (18AE18) in the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

(a) spodumene was fractured by hydrothermal alteration and late structure; (b) muscovite deforms under the influence of hydrothermal alteration and later structure. Ab-albite

3.2 锡石 U-Pb 测年

锡石单矿物分选在中国科学院地质与地球物理研究所岩矿制样与分析实验室完成。选取新鲜的白云母-锡石伟晶岩样品进行机械破碎,经磁选、重选后在双目显微镜下挑选得到晶形较好的锡石。将挑选的锡石粘在环氧树脂上,待树

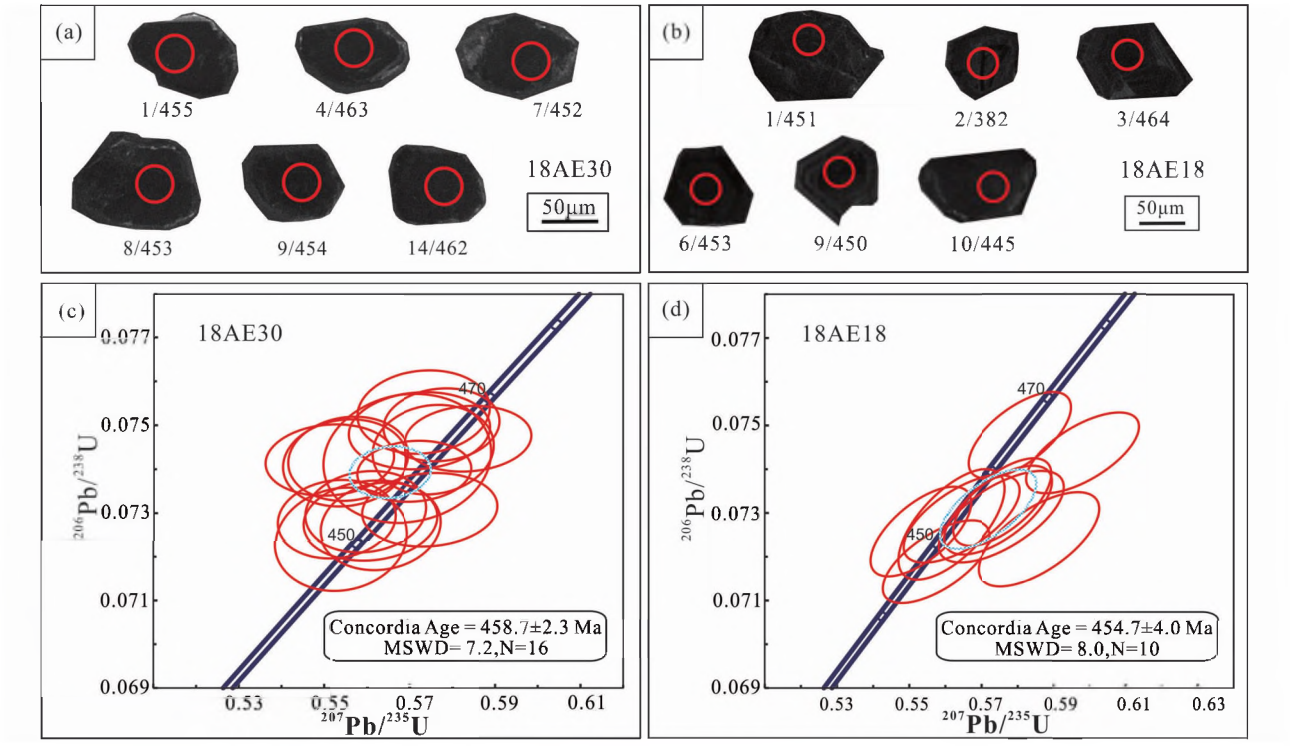


图 7 吐格曼北锂铍矿床白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩中锆石阴极发光(CL)图像(a、b)及锆石 U-Pb 年龄谐和图(c、d)

1/455 代表 1 号锆石测点^{206}Pb-^{238}U 年龄为 455Ma,实线圆表示 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析点位置

Fig. 7 Cathodoluminescence images (a, b) and U-Pb concordia diagrams (c, d) of zircon from the muscovite-albite-spodumene pegmatite the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

1/455 represents that the ^{206}Pb-^{238}U age of the No. 1 zircon is 455Ma, the solid circles indicate the location of LA-ICP-MS U-Pb analysis

脂固化后刨磨至大部分锡石颗粒露出。

锡石制靶和 U-Pb 同位素定年在天津地质调查中心分析测试室完成。所用仪器为 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 193nmArF 准分子激光取样系统(LA-MC-ICP-MS)。实验流程具体如下:根据反射光和透射光图像,避开包裹体和裂纹,选择锡石颗粒的合适区域,以减少普通铅的影响(李惠民等,2009; Yuan *et al.*, 2011)。利用 193nmFX 激光器对选择好的锡石区域进行剥蚀,激光斑束为 78μm,频率为 15Hz,样品信号采集时间为 26s,激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune (MC-ICP-MS),利用动态变焦扩大色散使质量数相差很大的 U-Pb 同位素可以同时接收,从而对 U-Pb 同位素进行测定(Yuan *et al.*, 2011)。数据处理采用 Isoplot 程序进行分析和作图(Ludwig, 2003)。通过 U-Pb Tera-Wasserburg 年龄谐和图的下交点来计算锡石年龄。Yuan *et al.* (2011)中标样 AY-4 数据为 159.9 ± 1.9Ma,本次测试时标样数据为 158.1 ±4.1Ma,二者在误差范围内一致,数据可靠。

3.3 铌钽铁矿 U-Pb 测年

铌钽铁矿单矿物分选在河北区域地质矿产调查研究所完成。选取新鲜的含铌钽铁矿-白云母-石英伟晶岩样品进行机械破碎,经磁选、重选后在双目显微镜下挑选得到晶形较好的铌钽铁矿。将挑选的铌钽铁矿粘在环氧树脂上,待树脂固化后刨磨至大部分铌钽铁矿颗粒露出。铌钽铁矿反射光、背散射(BSE)图像的拍摄在中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究院重点实验室完成。

铌钽铁矿的 U-Pb 年代学测定由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室电感耦合等离子体质谱 Thermo Fisher Scientific iCAP-Q 型 ICP-MS 与 RESOlution S155 型 193nm 的 ArF 准分子激光器联用完成,详细的分析步骤参见 Che *et al.* (2015)。铌钽矿定年采用铌铁矿 Coltan139 作为外部标准进行校正。激光束斑直径为 67μm,频率 4Hz,每个分析点的气体背景采集为 20s,信号采集时间 50s,^{204}Pb、^{206}Pb和^{208}Pb 驻留时间为 15ms,^{207}Pb 为 30ms,^{232}Th 和^{238}U 为 10ms,其他元素均为 6ms。每测定 8 个样品点,分析 2 次年龄标样(Coltan 139)和 1 次 NIST610。数据分馏和校正处理采用是 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2008)。处理后利用 Isoplot 4.15 对 U-Pb 同位素年龄进行计算和作图(Ludwig, 2003)。

3.4 白云母 Ar-Ar 测年

白云母单矿物分选在河北区域地质矿产调查研究所完成。将选定的样品(18AE18)清洗晒干并逐步粉碎至 40 ~ 60

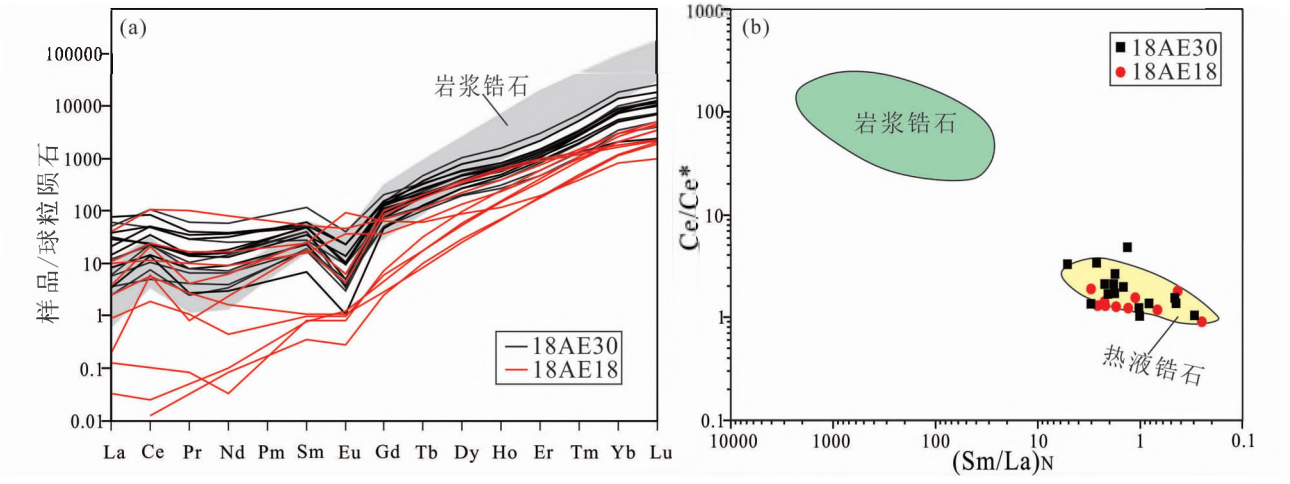


图 8 吐格曼北锂铍矿床白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩中锆石的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a,标准化值据 Sun and McDonough, 1989;岩浆锆石据 Xu *et al.*, 2014)及锆石 Ce/Ce^{*}-$(Sm/La)_N$ 图解(b,底图据 Hoskin, 2005)

Fig. 8 Chondrite-normalized rare earth element pattern (a, normalization values after Sun and McDonough, 1989; magma zircon after Xu *et al.*, 2014) and Ce/Ce^{*} vs. $(Sm/La)_N$ diagram (b, base map after Hoskin, 2005) of zircons from the muscovite-albite-spodumene pegmatite from the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

目,之后在双目镜下人工挑选白云母,在 40 ~ 60 目颗粒级别上获得均匀的样品。置于去离子水中超声清洗 5 次,每次 20min,之后置于丙酮中再超声清洗 3 次,每次 20min。

白云母 Ar-Ar 同位素定年在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。称取适量 40 ~ 60 目粒级的岩石或矿物样品进行清洗,用铝箔将每个样品单独包装,将多个样品用石英管融封,外面包裹厚 1mm 的镉皮,在中国原子能科学研究院快中子反应堆照射 24 小时。照射后的样品在超高真空析氩系统双真空炉中进行阶段升温融样,用含有锆铝泵的 NGP REP SYSTEM 型纯化系统纯化各阶段释放的气体。室温下^{40}Ar 本底小于 1.0E-15mol, 1300℃ 时,本底小于 1.0E-14mol。

用 Helix SFT 型惰性气体质谱仪静态测定氩的同位素比值。用阶段升温各温度段获得的年龄及累计^{39}Ar 百分比含量及 ArArCALC ver2.4 软件,绘制年龄谱图,并用加权法计算出坪年龄,用直线拟合方法计算出$^{40}Ar/^{39}Ar$ 的初始比值及等时线年龄。用于中子通量监测的标准样品为:GBW04418 角闪石,其 K = 0.729 ± 0.005%, Ar = 109.06 × 10^{-6} (CCSTP/g),年龄值为 2060 ± 8Ma。ZBH-25 黑云母,其 K = 7.599%, Ar = 1.8157 × 10^{-9} (mol/g),年龄值为 132.9 ± 1.3Ma。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

ρ31 白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩(18AE30)样品中锆石长度在 50 ~ 100μm 之间,宽度在 50 ~ 70μm 之间,长宽比为 1 ~ 1.5 之间,锆石主要以半自形-不规则次圆状为主。锆石多无色、透明,晶形较好,少数锆石具碎裂现象,锆石 CL 图像多呈灰黑色模糊海绵状(图 7a)。锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果显示:该伟晶岩锆石 U、Th 与 Pb 含量分别为:4148 × 10^{-6} ~ 10066 × 10^{-6}、9 × 10^{-6} ~ 29 × 10^{-6}、311 × 10^{-6} ~ 731 × 10^{-6},Th/U 值 0.002 ~ 0.003。16 个锆石的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄在 450.6 ~ 468Ma 之间,在误差范围内基本一致,$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和年龄为 458.7 ± 2.3Ma。数据置信度 95%,数据可信度高(表 2、图 7c)。

ρ38 白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩(18AE18)样品中锆石长度在 75 ~ 200μm 之间,宽度在 60 ~ 130μm 之间,长宽比为 1 ~ 1.7 之间,锆石主要以半自形、规则-次圆状为主。锆石多无色、透明,晶形较好。CL 图像多呈灰黑色模糊海绵状,少量锆石 CL 图像呈灰色、发育微弱环带构造(图 7b)。锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果显示:该伟晶岩锆石 U、Th 与 Pb 含量分别为:2219 × 10^{-6} ~ 14964 × 10^{-6}、6 × 10^{-6} ~ 72 × 10^{-6}、161 × 10^{-6} ~ 1129 × 10^{-6},Th/U 值 0.002 ~ 0.005。10 个锆石的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄在 447.5 ~ 464.9Ma 之间,在误差范围内基本一致,$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和年龄为 454.7 ± 4.0Ma。数据置信度 95%,数据可信度高(表 2、图 7d)。

2 个样品(18AE30 与 18AE18)中的锆石 Th/U 比值较低(分别为 0.002 ~ 0.003、0.002 ~ 0.005),平均值分别为 0.0026、0.0034,均小于 0.1。2 个样品中锆石具高的稀土总量,平均值分别为 2575 × 10^{-6}、739 × 10^{-6}(表 3)。球粒陨石标准化稀土元素配分曲线整体呈左倾趋势,重稀土明显富集、轻稀土相对亏损。2 个样品中除个别锆石外,稀土配分曲线具有的正 Ce 异常负 Eu 异常,其中样品 18AE30 稀土配分曲线具明显的正 Ce 异常(平均值为 2.05)和负 Eu 异常(图 8a)。与典型岩浆锆石相比,样品锆石的轻稀土含量升高、曲

表 2 吐格曼北锂铍矿床白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩样品(18AE30、18AE18)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 2 The LA-ICP-MS U-Pb ages results of zircons from the muscovite-albite-spodumene pegmatite sample (18AE30, 18AE18) from the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

测点号	含量($\times10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)			
	Th	U	Pb		$^{207}Pb/^{206}Pb$	σ	$^{207}Pb/^{235}U$	σ	$^{206}Pb/^{238}U$	σ	$^{206}Pb/^{238}U$	σ	$^{207}Pb/^{235}U$	σ
样品 18AE30														
1	11	4335	313	0.003	0.0568	0.0010	0.5746	0.0105	0.0731	0.0006	454.6	3.3	461.0	6.8
2	9	4148	311	0.002	0.0565	0.0009	0.5837	0.0098	0.0747	0.0005	464.4	3.0	466.8	6.3
3	12	4944	364	0.002	0.0557	0.0008	0.5710	0.0089	0.0740	0.0005	459.9	2.8	458.6	5.8
4	18	5664	416	0.003	0.0557	0.0008	0.5754	0.0095	0.0744	0.0007	462.9	4.1	461.5	6.1
5	12	4672	349	0.003	0.0555	0.0009	0.5773	0.0091	0.0750	0.0005	466.3	3.3	462.7	5.8
6	27	8960	640	0.003	0.0552	0.0009	0.5539	0.0102	0.0724	0.0008	450.6	4.7	447.5	6.7
7	14	5289	383	0.003	0.0559	0.0008	0.5631	0.0093	0.0727	0.0007	452.4	4.0	453.6	6.1
8	29	10066	731	0.003	0.0556	0.0010	0.5607	0.0104	0.0728	0.0006	453.2	3.6	452.0	6.8
9	12	5087	367	0.002	0.0553	0.0009	0.5596	0.0094	0.0730	0.0006	454.4	3.7	451.3	6.1
10	12	4458	322	0.003	0.0548	0.0009	0.5527	0.0091	0.0729	0.0006	453.4	3.6	446.8	5.9
11	15	5625	423	0.003	0.0553	0.0010	0.5693	0.0130	0.0742	0.0010	461.7	5.8	457.6	8.4
12	10	4247	313	0.002	0.0536	0.0009	0.5511	0.0099	0.0742	0.0005	461.5	3.2	445.7	6.5
13	14	5228	383	0.003	0.0539	0.0009	0.5546	0.0096	0.0741	0.0007	461.1	3.9	448.0	6.3
14	11	4404	321	0.002	0.0540	0.0009	0.5555	0.0093	0.0742	0.0006	461.6	3.8	448.6	6.1
15	12	4528	334	0.003	0.0549	0.0010	0.5731	0.0103	0.0753	0.0006	468.0	3.8	460.0	6.7
16	17	6244	460	0.003	0.0550	0.0011	0.5722	0.0110	0.0749	0.0006	465.5	3.5	459.4	7.1
样品 18AE18														
1	72	14964	1129	0.005	0.0549	0.0009	0.5532	0.0092	0.0726	0.0007	451.6	4.1	447.1	6.0
2	29	10713	827	0.003	0.0560	0.0008	0.5807	0.0094	0.0748	0.0007	464.9	3.9	464.9	6.0
3	48	12889	921	0.004	0.0567	0.0009	0.5747	0.0099	0.0731	0.0007	454.6	4.0	461.0	6.4
4	6	2426	173	0.002	0.0585	0.0011	0.5859	0.0110	0.0724	0.0007	450.6	4.3	468.3	7.1
5	27	10440	748	0.003	0.0557	0.0008	0.5618	0.0098	0.0727	0.0008	452.7	5.0	452.7	6.4
6	6	2219	161	0.003	0.0568	0.0008	0.5758	0.0090	0.0733	0.0007	455.7	4.0	461.8	5.8
7	10	4302	318	0.002	0.0560	0.0009	0.5576	0.0099	0.0719	0.0006	447.5	3.8	450.0	6.4
8	36	9717	755	0.004	0.0560	0.0010	0.5646	0.0107	0.0729	0.0007	453.4	4.0	439.8	6.5
9	23	6513	476	0.004	0.0581	0.0009	0.5980	0.0102	0.0744	0.0006	462.5	3.7	454.5	6.9
10	45	9103	670	0.005	0.0569	0.0010	0.5755	0.0115	0.0729	0.0007	453.7	4.2	476.0	6.5

线左倾趋势变缓(Hoskin and Ireland, 2000; Belousova *et al.*, 2002; Rubatto, 2002; Hoskin and Schaltegger, 2003; Liu and Liou, 2011)。2 个样品的锆石具异常高的 P(分别为 $613\times10^{-6}\sim2463\times10^{-6}$、$665\times10^{-6}\sim1239\times10^{-6}$)、Y($1215\times10^{-6}\sim4844\times10^{-6}$、$171\times10^{-6}\sim1344\times10^{-6}$)、Yb($424\times10^{-6}\sim3841\times10^{-6}$、$167\times10^{-6}\sim634\times10^{-6}$)与 Hf($10237\times10^{-6}\sim50286\times10^{-6}$、$11427\times10^{-6}\sim60387\times10^{-6}$)含量、及高的 $(Sm/La)_N$ 值与低的 Ce/Ce^* 值(表 3),显示出典型的热液锆石特征(图 8b;Hoskin, 2005)。

4.2 锡石 U-Pb 年龄

白云母-锡石伟晶岩样品(19AE43)中锡石为深褐色-黑色、半透明、自形-半自形晶体,透反射图像显示其内部结构较简单,环带不发育,少见矿物包裹体(图 9a,b)。测点共 39 个,$^{238}U/^{206}Pb$ 值变化范围为 2.73 ~ 13.04,$^{238}U/^{207}Pb$ 值变化范围为 4.90 ~ 176.1,$^{206}Pb/^{207}Pb$ 值变化范围为 1.82 ~ 14.24(表 4),锡石 $^{238}U/^{206}Pb$-$^{207}Pb/^{206}Pb$ 谐和年龄为 468 ± 8.7Ma(图 9c;MSWD = 1.1,N = 39)。

4.3 铌钽铁矿 U-Pb 年龄

含铌钽铁矿-白云母-石英伟晶岩样品(19TC87)中铌钽铁矿为黑色、半透明、自形-半自形晶体,反射光和背散射图像显示其内部结构较简单,环带不发育(图 10a,b)。铌钽铁矿 $^{206}Pb/^{238}U$ 值变化范围为 0.072 ~ 0.078,$^{207}Pb/^{235}U$ 值变化

表 3　吐格曼北锂铍矿床白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩(18AE30、18AE18)样品单颗粒锆石微量元素($\times10^{-6}$)分析结果

Table 3　The LA-ICP-MS trace elemental results ($\times10^{-6}$) of zircons from the muscovite-albite-spodumene pegmatite sample (18AE30, 18AE18) from the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

测点号	P	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Ta	Hf	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	δCe	$(Sm/La)_N$
18AE30																							
1	1068	1.69	2530	115	2.57	11.7	0.94	5.33	4.55	344	30404	0.28	19.1	8.67	127	48.2	284	96.6	1560	322	2491	1.85	1.82
2	736	4.97	2414	111	4.44	28.6	1.74	9.29	7.77	221	31717	0.37	23.7	8.95	124	40.3	228	73.7	1161	230	1942	2.52	1.80
3	613	2.19	1215	33.1	1.87	18.5	0.97	4.33	4.87	70.0	26994	0.46	12.3	4.74	63.0	19.6	99	35.2	617	126	1008	3.34	2.67
4	1202	0.17	2409	61.5	1.13	4.07	0.50	2.31	3.33	203	28398	0.22	21.1	11.2	158	52.9	311	112	1915	405	2998	1.32	3.01
5	2463	2.17	4844	45.9	0.75	6.15	0.30	2.05	3.75	122	26668	0.36	37.7	22.0	325	110	639	226	3841	810	6024	3.19	5.10
6	897	29.1	3672	216	15.5	86.5	7.30	34.4	22.1	410	50286	2.99	51.3	15.9	177	54.3	289	108	2045	473	3382	1.99	1.46
7	842	1.52	1507	41.2	1.74	8.57	0.80	3.83	3.43	116	29558	0.32	13.0	5.75	84.2	27.9	167	62.0	1081	233	1693	1.77	2.03
8	1360	1.32	1714	50.8	18.7	39.2	3.49	14.9	5.46	99.2	25104	0.71	18.8	5.84	66.5	22.4	124	41.4	714	162	1237	1.11	0.30
9	1273	2.37	3021	102	3.72	17.9	1.29	8.70	7.73	455	24687	0.25	31.8	11.2	147	50.9	300	98.4	1585	337	2601	2.00	2.14
10	1680	5.79	3784	107	3.43	19.0	1.66	7.81	6.87	364	30393	1.00	33.7	17.4	245	79.2	455	165	2836	584	4455	1.94	2.05
11	1271	5.51	2696	45.7	9.67	18.1	1.78	9.36	9.74	140	23689	0.70	33.6	12.4	147	44.9	243	88.0	1525	329	2472	1.00	1.03
12	1316	3.01	2712	76.1	9.13	19.5	1.81	11.0	9.27	211	22742	0.72	28.2	8.87	105	34.9	214	87.1	1655	397	2582	1.11	1.04
13	870	0.31	1764	56.8	1.04	11.3	0.33	1.79	1.36	289	27067	0.08	11.7	5.93	86.6	32.2	187	64.5	1040	218	1662	4.70	1.34
14	1426	7.19	3746	94.7	23.4	66.2	4.80	23.3	10.34	232	25472	1.71	35.8	12.3	151	48.5	269	91.9	1555	326	2619	1.45	0.45
15	1042	6.25	1341	1.81	11.6	40.9	4.23	22.0	9.30	0.72	10237	0.78	34.7	10.2	121	44.3	205	41.7	424	76	1046	1.43	0.82
16	1530	8.76	4202	113	6.56	41.3	3.59	18.9	11.74	224	24636	1.70	39.9	15.1	190	58.1	309	106	1815	376	2993	2.06	1.84
18AE18																							
1	693	3.02	340	20.3	0.27	1.49	0.13	0.27	0.19	27.0	33035	0.07	1.57	0.83	17.1	10.5	74.8	29.2	426	110	672	1.63	3.13
2	1239	290	1320	587	12.4	85.1	12.1	47.2	10.2	107	38950	3.41	18.4	5.25	70.7	27.8	158	47.8	634	133	1265	1.90	1.12
3	674	17.6	1344	5.80	1.16	17.0	0.49	3.82	4.84	2.64	11719	0.45	26.6	9.69	121	45.6	202	41.6	371	73.0	918	1.51	1.32
4	681	12.0	1212	4.90	0.06	4.86	0.10	1.38	3.60	1.87	11427	0.32	21.9	8.26	107	41.4	188	38.2	346	70.8	832	1.59	2.17
5	714	4.02	178	7.12	0.01	0.01	0.01	0.05	0.07	38.4	32877	0.02	0.64	0.48	9.36	5.03	37.6	14.5	233	59.5	360	1.45	0.68
6	826	0.48	389	7.01	0.01	0.02	0.01	0.06	0.15	50.2	34881	0.09	1.19	0.83	19.0	10.8	87.0	34.5	533	144	831	1.11	0.25
7	665	11.0	416	15.5	3.32	19.0	1.98	9.85	4.67	31.0	35118	6.72	16.6	2.84	28.8	8.25	40.5	12.4	167	31.9	354	1.56	1.72
8	665	10.5	171	20.6	0.78	4.65	0.33	0.98	0.21	65.0	33089	0.08	0.72	0.39	8.15	4.78	38.2	15.8	249	64.9	389	1.75	2.22
9	750	5.17	705	32.8	3.02	9.28	1.23	5.37	3.03	62.0	32454	2.72	9.56	3.21	42.3	17.0	98.8	31.4	429	109	765	2.2	0.43
10	911	1.28	561	3.36	0.04	0.04	0.01	0.02	0.16	70.2	60387	0.06	1.85	1.51	31.2	17.1	124	44.5	625	159	1004	1.16	1.59

注:δCe 代表铈异常系数

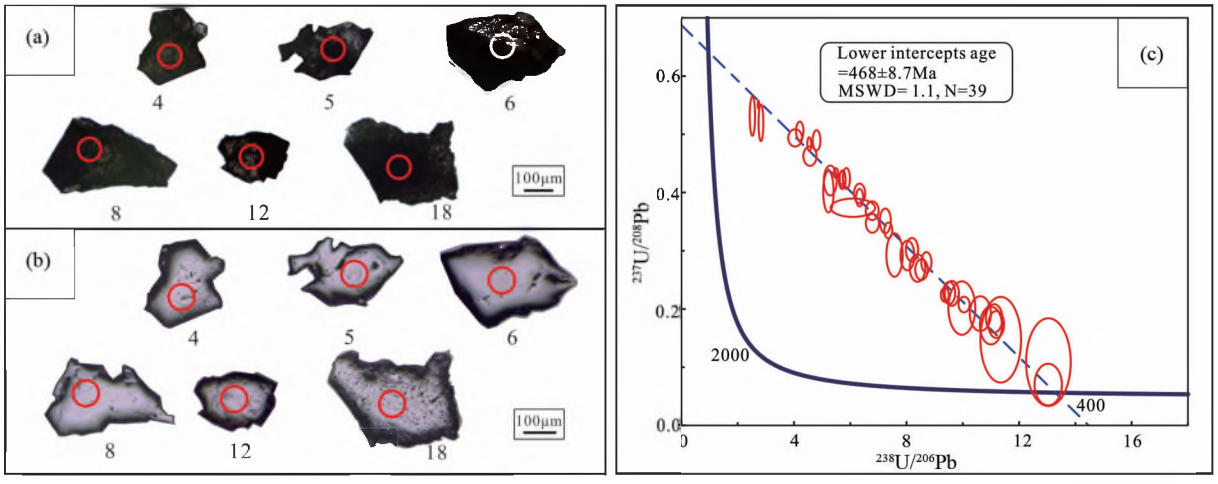


图 9 吐格曼北锂铍矿床白云母-锡石伟晶岩(19AE43)样品中代表性锡石透反射图像(a、b)和 U-Pb T-W 图解(c)

Fig. 9 Transmission-reflected images (a, b) and U-Pb Tera-Wasserburg diagram (c) of cassiterite from the muscovite-cassiterite pegmatite sample (19AE43) from the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

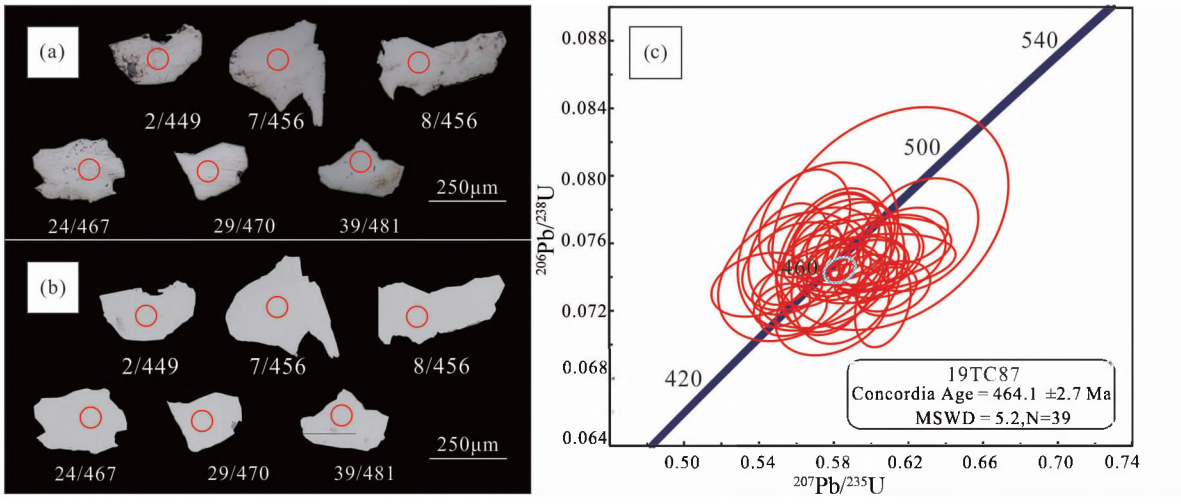


图 10 吐格曼北锂铍矿床含铌钽铁矿-白云母-石英伟晶岩(19TC87)样品中铌钽铁矿反射光、背散射(BSE)图像(a、b)和 U-Pb 年龄谐和图(c)

2/449 代表 2 号测点^{206}Pb-^{238}U 年龄为 449Ma,实线圆表示 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析点位置

Fig. 10 Reflected and back-scattered electron (BSE) images (a, b) and concordia diagram (c) of coltan from the coltan-bearing muscovite-quartz pegmatite sample (19TC87) from the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

2/449 represents that the ^{206}Pb-^{238}U age of the No. 2 is 449Ma, the solid circles indicate the location of LA-ICP-MS U-Pb analysis

范围为 0.541 ~ 0.625,$^{207}Pb/^{206}Pb$ 值变化范围为 0.048 ~ 0.073,铌钽铁矿颗粒具有较低的 U 含量($38 \times 10^{-6} \sim 527 \times 10^{-6}$)、较低的 Th 含量($0.02 \times 10^{-6} \sim 0.27 \times 10^{-6}$),Th/U 的范围为 0.0003 ~ 0.0012(表 5)。铌钽铁矿共 39 个测点产生的$^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和年龄为 464.1 ±2.7Ma(图 10c,MSWD = 5.2,N = 39),数据可靠。

4.4 白云母 Ar-Ar 年龄

白云母样品的$^{40}Ar/^{39}Ar$ 阶段升温加热分析结果见表 6,图 11 给出了坪年龄谱图、等时线年龄图,所有的误差置信水平为 2σ。采用 Isoplot3.0 软件(Ludwig, 2003)进行数据处理与作图,由表 6 和图 11 可知,白云母样品 9 个阶段加热分析过程中,^{39}Ar 在(0% ~100%)的释放区域内呈现一条平坦的 Ar-Ar 坪年龄谱图(图 11a),坪年龄为 350.2 ±1.6Ma,这表明样品 K 和放射性$^{40}Ar^{*}$ 分布均匀,且自矿物生成以来保持良好的封闭状态,没有受到明显的后期热扰动。对参与坪年龄计算的数据进行$^{39}Ar/^{36}Ar$-$^{40}Ar/^{36}Ar$ 等时线拟合处理,结果构成了线性关系较好的等时线(图 11b),等时线年龄为 351.4 ±2.7Ma (MSWD = 5.1),和坪年龄在误差范围内一致,证实白云母定年结果可靠且具有地质意义。

表 4 吐格曼北锂铍矿床白云母-锡石伟晶岩样品(19AE43)锡石微区原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 4 In-situ LA-MC-ICP-MS U-Pb dating results of the muscovite-cassiterite pegmatite sample (19AE43) cassiterite from the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

测点号	U-Pb 谐和年龄(T-W)(Ma)				U-Pb 等时线年龄(Ma)			
	$^{238}U/^{206}Pb$	Err (%)	$^{207}Pb/^{206}Pb$	Err (%)	$^{238}U/^{207}Pb$	Err (%)	$^{206}Pb/^{207}Pb$	Err (%)
1	7.573	2.53	0.293	8.41	26.2	7.9	3.4	8.4
2	5.222	2.33	0.401	5.86	13.1	5.7	2.5	5.9
3	9.965	3.16	0.202	15.00	49.1	14.2	5.0	15.0
4	13.03	2.46	0.070	33.62	176.1	30.4	14.2	33.6
5	6.139	5.64	0.334	32.90	18.7	17.5	3.0	32.9
6	5.561	2.16	0.381	4.18	14.6	4.1	2.6	4.2
7	5.806	1.06	0.381	2.39	15.1	2.4	2.6	2.4
8	3.599	1.86	0.449	2.35	7.9	2.9	2.2	2.4
9	11.19	1.64	0.173	8.78	64.0	8.8	5.8	8.8
10	7.351	1.27	0.335	2.68	21.8	2.6	3.0	2.7
11	9.516	1.47	0.228	5.55	41.5	5.5	4.4	5.5
12	6.784	2.27	0.347	3.06	19.2	4.1	2.9	3.1
13	4.204	2.06	0.506	2.09	8.2	3.0	2.0	2.1
14	5.992	2.84	0.348	4.25	17.0	5.0	2.9	4.3
15	5.861	1.42	0.424	2.80	13.7	2.7	2.4	2.8
16	9.359	1.00	0.224	3.50	41.1	3.8	4.5	3.5
17	11.35	4.20	0.147	32.99	73.4	24.3	6.8	33.0
18	6.331	1.34	0.391	2.53	16.1	2.5	2.6	2.5
19	8.705	1.36	0.280	4.13	30.7	4.3	3.6	4.1
20	7.266	2.87	0.269	10.05	26.4	9.9	3.7	10.1
21	11.11	1.74	0.184	8.75	59.1	9.2	5.4	8.7
22	8.965	2.16	0.206	9.83	44.2	9.6	4.9	9.8
23	4.580	2.90	0.365	7.64	12.9	7.1	2.7	7.6
24	2.733	0.57	0.551	0.84	4.9	0.8	1.8	0.8
25	4.788	2.73	0.383	5.25	12.4	5.7	2.6	5.2
26	8.191	1.76	0.302	4.40	26.9	4.7	3.3	4.4
27	13.04	4.01	0.109	45.75	137.9	38.1	9.2	45.8
28	5.490	0.95	0.433	1.29	12.5	1.7	2.3	1.3
29	9.608	1.73	0.227	6.20	42.0	6.2	4.4	6.2
30	6.330	2.07	0.398	2.81	15.7	3.7	2.5	2.8
31	4.541	1.00	0.483	1.61	9.3	1.5	2.1	1.6
32	5.713	1.36	0.421	2.36	13.5	2.4	2.4	2.4
33	11.00	2.36	0.172	12.46	63.8	12.4	5.8	12.5
34	4.801	1.89	0.490	2.34	9.7	3.0	2.0	2.3
35	4.541	1.00	0.483	1.61	9.3	1.5	2.1	1.6
36	8.029	2.01	0.292	5.78	27.5	5.5	3.4	5.8
37	5.713	1.36	0.421	2.36	13.5	2.4	2.4	2.4
38	11.00	2.36	0.172	12.46	63.8	12.4	5.8	12.5
39	4.801	1.89	0.490	2.34	9.7	3.0	2.0	2.3

表 5 吐格曼北锂铍矿床 LA-ICP-MS 铌钽铁矿微区原位 U-Pb 年龄测试结果

Table 5 In-situ LA-ICP-MS U-Pb ages of coltan from the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

测点号	含量($\times10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)			
	Pb	Th	U		$^{207}Pb/^{206}Pb$	σ	$^{207}Pb/^{235}U$	σ	$^{206}Pb/^{238}U$	σ	$^{207}Pb/^{235}U$	σ	$^{206}Pb/^{238}U$	σ
1	10.28	0.08	160	0.0005	0.0562	0.0010	0.5584	0.0119	0.0720	0.0010	450	7.7	448	5.9
2	11.47	0.08	160	0.0005	0.0727	0.0142	0.5792	0.0200	0.0721	0.0018	464	12.9	449	10.7
3	13.97	0.10	216	0.0005	0.0556	0.0009	0.5523	0.0099	0.0723	0.0008	447	6.5	450	5.1
4	28.37	0.24	427	0.0006	0.0621	0.0010	0.6063	0.0098	0.0724	0.0017	481	6.2	450	10.0
5	10.00	0.07	151	0.0005	0.0550	0.0010	0.5552	0.0123	0.0732	0.0009	448	8.1	455	5.6
6	10.41	0.18	155	0.0012	0.0604	0.0009	0.6081	0.0108	0.0733	0.0009	482	6.8	456	5.2
7	10.88	0.10	165	0.0006	0.0606	0.0010	0.6119	0.0130	0.0733	0.0011	485	8.2	456	6.4
8	6.78	0.06	96	0.0006	0.0526	0.0033	0.5747	0.0228	0.0734	0.0016	461	14.7	456	9.4
9	9.59	0.07	141	0.0005	0.0530	0.0015	0.5405	0.0171	0.0736	0.0013	439	11.3	458	7.5
10	9.52	0.07	141	0.0005	0.0591	0.0011	0.5972	0.0110	0.0739	0.0009	475	7.0	460	5.7
11	15.51	0.08	221	0.0004	0.0517	0.0032	0.5571	0.0257	0.0740	0.0025	450	16.7	460	15.1
12	5.20	0.03	74	0.0004	0.0558	0.0025	0.5876	0.0199	0.0742	0.0028	469	12.7	462	16.6
13	9.49	0.05	142	0.0004	0.0569	0.0011	0.5828	0.0147	0.0743	0.0011	466	9.4	462	6.6
14	30.99	0.20	471	0.0004	0.0555	0.0007	0.5692	0.0132	0.0744	0.0014	457	8.5	462	8.4
15	8.11	0.06	121	0.0005	0.0578	0.0013	0.5928	0.0180	0.0744	0.0013	473	11.5	463	7.8
16	10.01	0.08	153	0.0005	0.0567	0.0010	0.5817	0.0120	0.0744	0.0010	466	7.7	463	6.2
17	8.57	0.05	119	0.0004	0.0568	0.0023	0.5594	0.0186	0.0746	0.0017	451	12.1	464	10.3
18	5.81	0.05	88	0.0006	0.0582	0.0012	0.5981	0.0134	0.0747	0.0010	476	8.5	464	6.1
19	15.27	0.12	217	0.0006	0.0570	0.0018	0.5801	0.0185	0.0748	0.0028	465	11.9	465	16.7
20	8.94	0.06	131	0.0005	0.0578	0.0024	0.5993	0.0303	0.0748	0.0012	477	19.2	465	6.9
21	22.49	0.18	329	0.0005	0.0580	0.0008	0.5988	0.0106	0.0748	0.0009	476	6.7	465	5.5
22	35.50	0.27	527	0.0005	0.0561	0.0006	0.5793	0.0088	0.0749	0.0009	464	5.7	466	5.4
23	14.24	0.09	200	0.0005	0.0542	0.0014	0.5803	0.0203	0.0750	0.0028	465	13.1	466	16.9
24	7.68	0.06	114	0.0005	0.0587	0.0012	0.6053	0.0150	0.0752	0.0013	481	9.5	467	7.8
25	5.12	0.06	77	0.0008	0.0583	0.0015	0.6000	0.0171	0.0752	0.0013	477	10.9	468	8.0
26	11.05	0.08	153	0.0005	0.0528	0.0058	0.6090	0.0204	0.0752	0.0016	483	12.9	468	9.7
27	11.23	0.07	154	0.0005	0.0600	0.0070	0.5562	0.0144	0.0754	0.0020	449	9.4	468	11.9
28	11.73	0.10	175	0.0006	0.0565	0.0014	0.5979	0.0297	0.0755	0.0013	476	18.9	469	8.0
29	34.83	0.26	522	0.0005	0.0550	0.0005	0.5709	0.0086	0.0756	0.0011	459	5.6	470	6.8
30	7.03	0.05	99	0.0005	0.0520	0.0033	0.5716	0.0283	0.0758	0.0033	459	18.3	471	19.7
31	8.45	0.05	122	0.0004	0.0569	0.0011	0.5905	0.0131	0.0758	0.0013	471	8.4	471	7.6
32	19.66	0.13	291	0.0004	0.0558	0.0008	0.5809	0.0102	0.0759	0.0010	465	6.5	471	6.0
33	15.40	0.12	218	0.0006	0.0554	0.0015	0.5852	0.0181	0.0762	0.0016	468	11.6	474	9.5
34	9.58	0.07	135	0.0005	0.0547	0.0020	0.5727	0.0182	0.0763	0.0012	460	11.7	474	7.2
35	13.55	0.08	185	0.0004	0.0545	0.0012	0.5815	0.0151	0.0764	0.0017	465	9.7	474	10.1
36	6.70	0.03	99	0.0003	0.0588	0.0013	0.6186	0.0148	0.0764	0.0011	489	9.3	475	6.7
37	7.49	0.06	103	0.0006	0.0569	0.0023	0.6253	0.0211	0.0765	0.0022	493	13.2	475	13.2
38	9.47	0.07	129	0.0005	0.0512	0.0015	0.5645	0.0160	0.0772	0.0021	454	10.4	479	12.6
39	3.68	0.02	38	0.0005	0.0482	0.0031	0.6103	0.0416	0.0775	0.0044	484	26.3	481	26.1

表 6 吐格曼北锂铍矿床白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩(18AE18)样品中白云母$^{40}Ar/^{39}Ar$阶段升温加热分析结果

Table 6 Step wise heating $^{40}Ar/^{39}Ar$ age data of muscovite from the muscovite-albite-spodumene pegmatite sample (18AE18) from the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

阶段	温阶(℃)	$(^{40}Ar/^{39}Ar)_m$	$(^{36}Ar/^{39}Ar)_m$	$(^{37}Ar/^{39}Ar)_m$	^{40}Ar(%)	F $(^{40}Ar^*/^{39}Ar)$	^{39}Ar ($\times10^{-14}$mol)	^{39}Ar (Cum)(%)	视年龄(Ma)	±1σ(Ma)
1	850	40.0627	0.0130	0.0033	90.36	36.2022	0.98	10.86	345.8	1.7
2	900	37.5687	0.0040	0.0020	96.84	36.3812	2.96	32.85	347.3	1.6
3	950	36.9933	0.0026	0.0018	97.86	36.2020	3.13	34.78	345.8	1.6
4	1000	37.4601	0.0027	0.0025	97.81	36.6390	0.93	10.33	349.6	1.6
5	1050	37.7947	0.0041	0.0047	96.74	36.5627	0.33	3.66	348.9	1.6
6	1100	38.2008	0.0043	0.0043	96.63	36.9119	0.34	3.82	352.0	1.6
7	1150	38.4559	0.0044	0.0055	96.59	37.1429	0.21	2.32	354.0	1.6
8	1200	38.2461	0.0038	0.0067	97.02	37.1068	0.09	1.03	353.6	1.7
9	1300	39.1314	0.0062	0.0223	95.28	37.2839	0.03	0.35	355.2	1.7

注:表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值;重量 W = 13.69mg,辐照参数 J = 0.005777

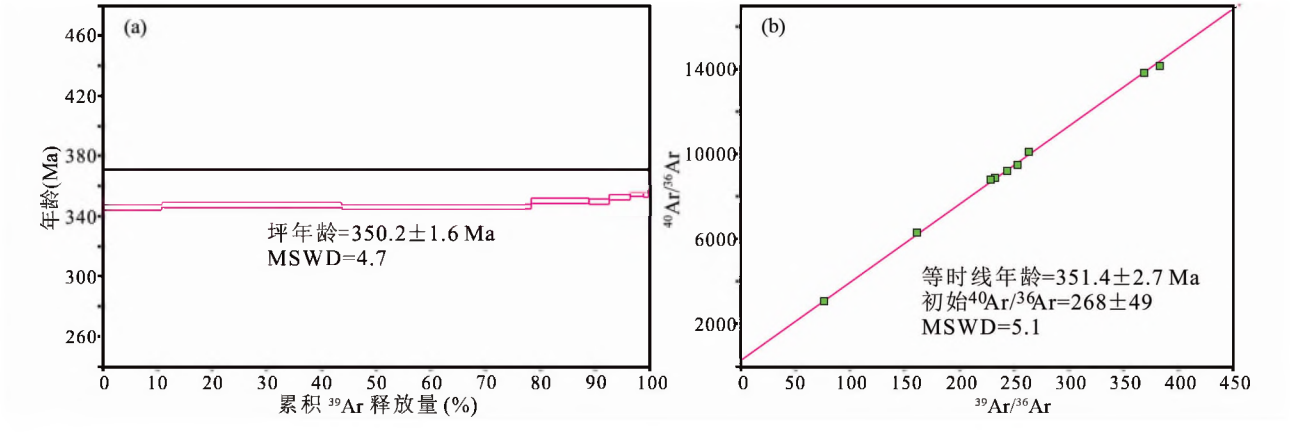


图 11 吐格曼北锂铍矿床白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩(18AE18)样品中白云母$^{40}Ar/^{39}Ar$坪年龄谱图(a)和等时线年龄图(b)

Fig. 11 $^{40}Ar/^{39}Ar$ plateau age diagram (a) and isochron diagram (b) of muscovite from the muscovite-albite-spodumene pegmatite sample (18AE18) from the northern Tugeman lithium-beryllium deposit

5 讨论

5.1 花岗伟晶岩矿物成因及其年代学意义

稀有金属花岗伟晶岩的成因目前存在是形成于花岗岩浆的结晶分异还是形成于地壳深熔成因的争论(Černy, 1992; Shaw *et al.*, 2016; 张辉等,2019)。基于大部分花岗伟晶岩与花岗岩在空间和成因上有一定联系的因素(Černy *et al.*, 2012; Grew, 2002; London and Evensen, 2002),绝大多数研究者认为花岗伟晶岩为花岗岩结晶分异成因(Jahns and Burnham, 1969; London and Morgan, 2012; Simmons and Webber, 2008)。即花岗伟晶岩浆为花岗岩分异结晶的残余岩浆(Simmons and Webber, 2008),是经历了二云母花岗岩、白云母花岗岩和钠长花岗岩浆分异结晶后的残余岩浆(London and Evensen, 2002; London, 2008;王汝成等,2017;吴福元等,2017;Liu *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020; Xie *et al.*, 2020)。

花岗伟晶岩中的矿物按成因划分可分为两种:新生矿物和残留矿物。前者指由于花岗伟晶岩浆结晶过程新形成的矿物,花岗伟晶岩中绝大多数矿物为新生矿物,包括钾长石、钠长石、白云母、石英、磷灰石、及锂辉石、锂云母、绿柱石、金绿宝石与铌钽铁矿等稀有金属矿物。这些新生矿物由于结晶温度与元素在熔体中溶解度的不同可在花岗伟晶岩内部分带产出(Jahns and Burnham, 1969; Jahns, 1982; Burnham and Nekvasil, 1986; London, 2008; Simmons *et al.*, 2012)。

这些新生矿物记录了花岗伟晶岩的形成与演化信息,可用于研究与测定花岗伟晶岩的形成时代。

花岗伟晶岩中锆石、夕线石、蓝晶石、堇青石和红柱石可能多为残留矿物(Wu *et al.*, 2020)。花岗伟晶岩中的残留锆石由于高的 U、Th 含量多表现出显著的蜕晶化。Zhou *et al.* (2015)、徐兴旺等(2019)、王倩等(2019)研究结果显示这种蜕晶化的残留锆石部分具有热液锆石的特征,其可能是岩浆锆石蜕晶化后经流体交代作用及重结晶作用导致 U-Pb 同位素系统重置的结果。

近年来,除了锆石以外,大量与成矿有关的含 U 副矿物被用来直接进行 U-Pb 定年,如锡石、独居石、磷灰石、石榴子石、黑钨矿、铌钽矿等,对相关矿床的研究有了更深入的认识。自 Marini and Botelho (1986)最早尝试利用锡石 U-Pb 同位素体系对锡矿床进行年龄测定以来,该方法先后被国内外学者应用于不同锡矿床的成矿年代学研究(Gulson and Jones, 1992; 刘玉平等,2007; Yuan *et al.*, 2008, 2011)。其中锡石属于金红石族矿物,具有比较稳定的化学结构,其晶格内一般可容纳高含量的 U 并且不易受后期热液作用的影响(Jiang *et al.*, 2004; 刘玉平等,2007)。锡石作为伟晶岩型稀有金属矿床的矿石矿物,其结晶年龄直接代表了锡石结晶的年龄和伟晶岩的形成时代,以其同位素年龄来确定稀有金属矿床的形成时代,与脉石矿物、蚀变矿物(如云母、闪石)以及全岩同位素数据相比具有优越性。因此比较适合作为伟晶岩型稀有金属矿床的直接定年矿物。据前人研究,在冷却速率为 10℃/Myr 的体系中、非超高温条件下,锡石封闭温度为 600~800℃(张东亮等,2011)。锡石 U-Pb 法是一种准确测定锡石结晶年龄的有效方法(McNaughton *et al.*, 1993; 刘玉平等,2007; Yuan *et al.*, 2008, 2011; 袁顺达等,2010; 张东亮等,2011)。

铌钽铁矿族矿物普遍存在于各种稀有金属伟晶岩矿床(Černy and Lenton, 1995; Selway *et al.*, 2005)、花岗岩有关的热液型钨锡(Lerouge *et al.*, 2007)及稀土(Möller, 1989)矿床中。确定铌钽铁矿族矿物的年龄可以为多种矿床类型提供重要的年龄限制,特别是与富含稀有元素的花岗岩和伟晶岩有关的矿床(Melleton *et al.*, 2012)。自 Aldrich *et al.* (1956)建立铌钽铁矿 U-Pb 定年方法以来,一些学者开始尝试使用同位素稀释热电离质谱法(ID-TIMS, Romer and Wright, 1992; Romer and Smeds, 1994, 1996, 1997; Romer and Lehmann, 1995; Romer *et al.*, 1996b)和多接收电感耦合等离子体质谱法(LA-MC-ICP-MS, Smith *et al.*, 2004; Dill *et al.*, 2007; Melcher *et al.*, 2008; Dewaele *et al.*, 2011; Deng *et al.*, 2013; Che *et al.*, 2015)测定铌钽铁矿 U-Pb 年龄,并取得了可靠的年龄数据。例如,Camacho *et al.* (2012)对加拿大东南部著名的 Tanco 和 Silverleaf 稀有金属矿床进行了年代学研究,获得花岗伟晶岩中钽铁矿 U-Pb 年龄为 2641±3Ma,与磷灰石 Pb-Pb 年龄 2657±18Ma、白云母和钠长石 Rb-Sr 等时线年龄~2630Ma 在误差范围内一致。

白云母 Ar-Ar 定年已发展为同位素地质年代学主要的研究手段之一,也是矿床年代学研究的主要技术手段。白云母 Ar-Ar 定年也应用到了稀有金属矿床的年代学研究(陈郑辉等,2006; 李建康等,2006a, b,2009,2013; 李建康,2006; 张泽等,2019),如 Wang *et al.* (2003)通过对伟晶岩型稀有金属矿床中白云母的 Ar-Ar 法同位素定年研究,首次在阿尔泰中部的大喀拉苏大型稀有金属矿床和小喀拉苏稀有金属矿床获得了新的同位素年龄数据,其坪年龄分别为 248.4±2.1Ma 和 233.8±0.4Ma,从而证实了印支期稀有金属成矿作用的存在,提出了伟晶岩型矿床形成于多个时代,且稀有金属成矿作用主要发生在海西期造山运动之后的看法。陈富文等(1999)对可可托海Ⅰ带和Ⅴ带中白云母进了 Ar-Ar 年龄测试,分别获得 $^{39}Ar/^{36}Ar$-$^{40}Ar/^{36}Ar$ 等时线年龄 177.9±0.03Ma、176.9±1.8Ma,认为是由花岗质岩浆在地下深处封闭体系中经过漫长的岩浆结晶分异形成。Zhang *et al.* (2014)通过对雪宝顶 Sn-W-Be 矿床中白云母和锡石分别进行了 Ar-Ar 和 U-Pb 年龄测试,获得白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为 194.5±1.0Ma、锡石 U-Pb 谐和年龄为 193.6±6Ma,李建康等(2007)获得了白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为 189.9±1.8Ma,锡石 U-Pb 与白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄在误差范围内基本一致。但有学者指出大喀拉苏(任宝琴等,2011; Liu *et al.*, 2018)伟晶岩形成时代是二叠纪,而可可托海 3 号脉形成于三叠纪(Zhu *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007; 陈剑锋,2011; Che *et al.*, 2015)。无论是大喀拉苏、小喀拉苏还是可可托海 3 号脉,利用含钾矿物的 Ar-Ar 定年结果比锆石、铌钽矿 U-Pb 定年结果至少年轻数十百万年。

综上所述:不同定年体系因为封闭条件不一样,测年对象的差异性,导致了对年龄数据没有很好的、合理的解释。此外,多数伟晶岩利用含钾矿物的 Ar-Ar 定年结果比锆石、铌钽矿 U-Pb 定年结果至少年轻数十百万年,这可能是由于这些伟晶岩经历过后期热液活动的改造,但在区域内没有发现伟晶岩经历过后期热液活动的岩相学证据,造成了含钾矿物 Ar-Ar 定年不足为信的假象。

5.2 吐格曼北锂铍矿床成矿时代及其区域成矿学意义

吐格曼北锂铍矿床 ρ31 白云母-锡石伟晶岩样品中锡石 U-Pb 测年的 T-W 图解中下交点的年龄为 468±8.7Ma(图 9c, MSWD=1.1, N=39),该结果能代表锡石结晶年龄。由于锡石封闭温度较高(600~800℃,张东亮等,2011),所以锡石结晶年龄可代表伟晶岩浆结晶阶段的年龄。

ρ87 含铌钽铁矿-白云母-石英伟晶岩中铌钽铁矿物,常与白云母和石英共生。铌钽铁矿 U-Pb 年龄 464.1±2.7Ma (MSWD=5.2, N=39)可约束稀有金属伟晶岩的岩浆结晶年龄。

2 条脉体(ρ31、ρ38)白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩样品中锆石 U-Pb 年龄分别为 458.7±2.3Ma (MSWD=7.2, N=16)、454.7±4.0Ma (MSWD=8.0, N=10)。锆石的 CL 图

像(图 7a, b)表明样品中的锆石多呈黑色模糊海绵状,仅部分颗粒见弱的薄边,这些特征表明其在岩浆阶段由于高 U 含量和晚期流体的作用,锆石经历了蜕晶化和重结晶(Dickin, 1995; Romer *et al.*, 1996a)。另外,锆石$(Sm/La)_N$-Ce/Ce^*图解(图 8b)显示 2 个样品中锆石(18AE18、18AE30)均为热液成因,说明该锆石为岩浆锆石在伟晶岩热液阶段 U-Pb 同位素系统重置的锆石(杨红等,2017),意味着锆石谐和年龄记录的是岩浆锆石蜕晶化后经流体交代作用及重结晶作用导致 U-Pb 同位素系统重置的时间。

吐格曼北锂铍矿床白云母-锡石伟晶岩中锡石 U-Pb 年龄、含铌钽铁矿-白云母-石英伟晶岩中铌钽铁矿 U-Pb 年龄(分别为 468 ±8.7Ma、464.1 ±2.7Ma)在误差范围内一致;2 条伟晶岩脉(ρ31、ρ38)锆石 U-Pb 年龄相近,并可与该矿床南侧的吐格曼铍锂矿花岗伟晶岩的年龄 459.9 ±3.7Ma 对比(徐兴旺等,2019)。鉴于锡石封闭温度较高、可代表伟晶岩浆早期结晶阶段的年龄,铌钽铁矿可能为岩浆-热液过渡阶段的产物,而蜕晶化的锆石记录的是岩浆锆石蜕晶化后经流体交代作用及重结晶作用导致 U-Pb 同位素系统重置的时间。

由此可以认为,吐格曼北锂铍矿床稀有金属伟晶岩的形成年龄为 468 ~454Ma (图 12),持续时间为 14Myr。这与许多伟晶岩结晶时间持续 10 ~ 20Myr (Chen *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2007; Lv *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2015)的特征是一致的,尽管模拟实验结果显示一个花岗岩体与花岗伟晶岩脉的结晶成岩时间一般小于几个百万年(Coleman *et al.*, 2004; Matzel *et al.*, 2006; Michel *et al.*, 2008; Sirbescu *et al.*, 2008; London *et al.*, 2020)。

ρ38 白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩中白云母 Ar-Ar 测年的测试结果显示:白云母$^{40}Ar/^{39}Ar$ 坪年龄为 350.2 ±1.6Ma (MSWD = 4.7),$^{39}Ar/^{36}Ar$-$^{40}Ar/^{36}Ar$ 等时线年龄为 351.4 ±2.7Ma (MSWD = 5.1),该年龄较含矿伟晶岩中锆石、锡石与铌钽铁矿的 U-Pb 年龄年轻约 110Ma。由于吐格曼北锂铍矿床中白云母褶曲变形强烈(图 6),本文认为该期白云母可能与含矿伟晶岩脉遭受到后期的构造运动有关,研究区在早石炭世时可能存在构造运动叠加的热事件。

5.3 不同方法结果对比与启示

如上所述,吐格曼北锂铍矿床不同矿物记录了不同岩浆-热液阶段的时间,其中锡石年龄代表伟晶岩浆早期结晶阶段的年龄,铌钽铁矿可能为岩浆-热液过渡阶段的产物,而蜕晶化的锆石记录的是岩浆锆石蜕晶化后经流体交代作用及重结晶作用导致 U-Pb 同位素系统重置的时间。这些年龄在误差范围内是一致的,综合考虑分析结果的误差可以确定伟晶岩矿床形成的时间;而白云母 Ar-Ar 年龄记录的是最晚期的构造叠加热事件时间。前人关于稀有金属花岗伟晶岩的定年结果(表 7)也能佐证我们的观点:(1)稀有金属花岗伟晶岩的锆石 U-Pb 与铌钽铁矿 U-Pb 法所测得年龄基本一致,如 Bohemian 伟晶岩(捷克)锆石 U-Pb 年龄(480Ma, Glodny *et al.*, 1998)与铌钽铁矿 U-Pb 年龄(480Ma, Glodny *et al.*, 1998)、小秦岭伟晶岩锆石 U-Pb 年龄(143 ±1Ma, Deng *et al.*, 2013)与铌钽铁矿 U-Pb 年龄(143 ±1Ma, Deng *et al.*, 2013);但多数伟晶岩的锆石 U-Pb 与铌钽铁矿 U-Pb 法所测得年龄不一致,如阿尔泰 3 号脉 I 带锆石 U-Pb 年龄(220 ±9Ma, Wang *et al.*, 2007)与铌钽铁矿年龄(205.6 ±2.6Ma, 王倩等,2019)、大喀拉苏 1 号脉锆石 U-Pb 年龄(270.1 ±1.7Ma/272.5 ±1.4Ma, 任宝琴等,2011)与铌钽铁矿 U-Pb 年龄(239.6 ±3.8Ma, Zhou *et al.*, 2018);(2)白云母的 Ar-Ar 年龄是否与锆石和铌钽铁矿的 U-Pb 年龄一致取决于花岗伟晶岩是否存在后期热液活动叠加改造。多数伟晶岩的锆石及铌钽铁矿 U-Pb 与白云母 Ar-Ar 法所测得年龄不一致,如可可托海 3 号脉Ⅱ、Ⅶ带,阿祖拜伟晶岩(邹天人等,1986;王登红等,2000; Wang *et al.*, 2007; 周起凤,2013; Zhang *et al.*, 2016)。广泛的对比研究可以发现白云母 Ar-Ar 法比锆石、铌钽矿 U-Pb 法所测得年龄偏年轻,如 Gatumba(卢旺达)、阿祖拜、虎斯特、群库尔、Bohemian、Dalan (索马里)、小喀拉苏 208 号脉伟晶岩(表 7),可能是由于白云母的封闭温度(400 ± 50℃, Dallmeyer and VanBreeman, 1981; Hames and Bowring, 1994; Dunlap, 1997; Ortega-Rivera *et al.*, 1997; Möller *et al.*, 2000; Chakungal *et al.*, 2004; Wang and Li, 2008; Meinhold, 2010)略低于伟晶岩中白云母的形成温度(350 ~ 550℃)所致(Küster, 1995; Glodny *et al.*, 1998; 王登红等,2000; Dewaele *et al.*, 2011; 任宝琴等,2011; Zhang *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2018),这也可以说明本文的白云母 Ar-Ar 年龄记录的是最晚期叠加改造热事件时间。

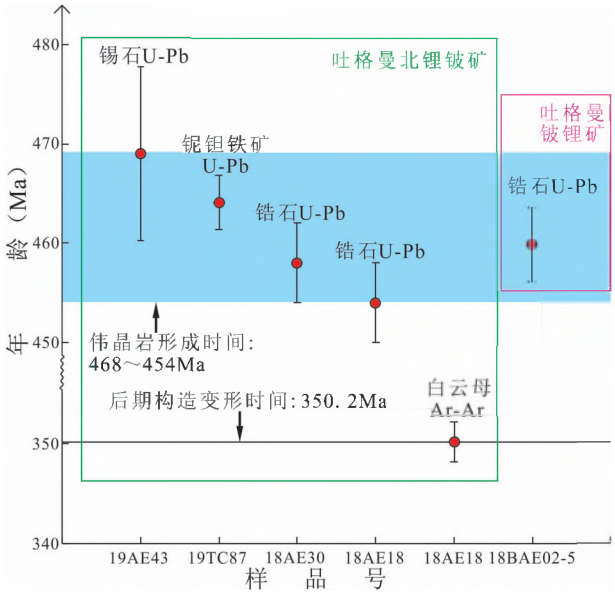


图 12 吐格曼稀有金属花岗伟晶岩不同测年方法对比

Fig. 12 Comparison of different dating methods of Tugeman rare metal granite pegmatites

表 7 一些花岗伟晶岩不同方法测年结果对比表

Table 7 Comparison of dating results of different methods in some granitic pegmatites

伟晶岩脉	锆石 U-Pb (Ma)	白云母 Ar-Ar (Ma)	锡石 U-Pb (Ma)	铌钽铁矿 U-Pb (Ma)	伟晶岩矿集区	文献
Gatumba		592.2±0.8		930~975	Rwanda	Dewaele *et al.*, 2011
小秦岭	143±1			143±1	小秦岭	Deng *et al.*, 2013
卡鲁安 No. 803				198.3±2.0		Feng *et al.*, 2019
卡鲁安 No. 805				224.3±2.9		Feng *et al.*, 2019
卡鲁安 No. 805	216.0±2.6					马占龙等,2015
卡鲁安 No. 806	223.7±1.8					马占龙等,2015
卡鲁安 No. 807	221±15					马占龙等,2015
卡鲁安 No. 803	224.6±2.3				科鲁木特-吉德克	Zhang *et al.*, 2016
阿祖拜	191.6±2.0					Zhang *et al.*, 2016
阿祖拜		154.1±0.1				王登红等,2000
群库尔	194.3±1.6	162.2±0.9				Zhou *et al.*, 2018
群库尔	206.8±1.6					任宝琴等,2011
科鲁木特 112 号脉	238~210					Lv *et al.*, 2012
虎斯特	244.3±1.1				卡拉额尔齐斯	任宝琴等,2011
虎斯特	198.5±2.5	178.8±1.0				Zhou *et al.*, 2018
Bohemian	480	371~376		480	Czech	Glodny *et al.*, 1998
Dalan		465		530	Majayahan	Küster, 1995
大红柳滩			218±12	211.9±2.4	大红柳滩	Yan *et al.*, 2018
白龙山				208.1		Wang *et al.*, 2020
小喀拉苏 208 号脉		233.8±0.4				Wang *et al.*, 2003
小喀拉苏 208 号脉		237.7±1.3		258.1~262.3	小喀拉苏	Zhou *et al.*, 2018
塔尔郎	248.2±2.2	237.4±1.2、231.9±1.2				Zhou *et al.*, 2018
大喀拉苏 1 号脉		248.4±2.1				Wang *et al.*, 2003
大喀拉苏 1 号脉	272.5±1.4、270.1±1.7				喀拉苏	任宝琴等,2011
大喀拉苏 1 号脉				239.6±3.8		Zhou *et al.*, 2018
3 号脉Ⅰ带		177.9±0.03				陈富文等,1999
3 号脉Ⅰ带		246				邹天人等,1986
3 号脉Ⅰ带		177.9				陈富文等,1999
3 号脉Ⅰ带				205.6±2.6		王倩等,2019
3 号脉Ⅰ带	220±9					Wang *et al.*, 2007
3 号脉Ⅱ带		179.7±1.1				周起凤,2013
3 号脉Ⅱ带	186.2±1.4					周起凤,2013
3 号脉Ⅱ带		194~292				邹天人等,1986
3 号脉Ⅴ带		199、275			可可托海	邹天人等,1986
3 号脉Ⅴ带		176.9±1.8				陈富文等,1999
3 号脉Ⅴ带	198±7					Wang *et al.*, 2007
3 号脉Ⅵ带		211				邹天人等,1986
3 号脉Ⅵ带	186.9±2.8	181.8±1.1				周起凤,2013
3 号脉Ⅶ带	213±6					Wang *et al.*, 2007
3 号脉Ⅶ带		160、175				邹天人等,1986
矿区内东南侧	208.1±0.8					任宝琴等,2011
矿区内东北侧	180.7±0.5					任宝琴等,2011
甲基卡				214±2	川西	Li *et al.*, 2019
甲基卡		199.4±2.3				Li *et al.*, 2015

另外,阿尔泰可可托海 3 号脉年龄数据多样,从外向内Ⅰ~Ⅶ结构带的年龄数据分布范围为 160~246Ma(表 7)。从所测各带年龄数据看,不仅分布范围大,而且同一个带年龄有很大差别,如文象伟晶岩带(Ⅰ带)178~246Ma,糖粒状钠长石带(Ⅱ带)180~292Ma。这种年龄值差别一方面可能与 20 世纪 80 年代测试水平有关(钟龙等,2011);另一方面,

巨型伟晶岩脉形成通常需经历较长时间,样品经受较强热液作用,造成不同程度的氩丢失(钟龙等,2011)。因此,在开展花岗伟晶岩白云母 Ar-Ar 测年分析时开展岩石结构构造与热液活动分析是必要的。

6 结论

(1)采用不同方法对吐格曼北锂铍矿床进行年代学研究,结果显示:白云母-锡石伟晶岩中锡石 U-Pb 年龄与含铌钽铁矿-白云母-石英伟晶岩中铌钽铁矿 U-Pb 年龄分别为 468±8.7Ma、464.1±2.7Ma,2 件白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩样品中锆石 U-Pb 年龄分别为 458.7±2.3Ma、454.7±4.0Ma,1 件白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩中白云母$^{40}Ar/^{39}Ar$坪年龄为 350.2±1.6Ma。综合分析测试年龄的误差与伟晶岩可能的持续结晶时间,推断吐格曼北锂铍花岗伟晶岩形成于 468~454Ma,这表明吐格曼北锂铍矿床成矿作用主要发生在中-晚奥陶世。花岗伟晶岩脉在早石炭世时经历了一次变形与热液叠加改造事件。

(2)稀有金属花岗伟晶岩中不同矿物记录了不同岩浆-热液阶段的时间,其中锡石年龄代表伟晶岩浆早期结晶阶段的年龄,铌钽铁矿可能为岩浆-热液过渡阶段的产物,蜕晶化的锆石记录的是后期流体作用下锆石 U-Pb 同位素系统重置的时间,多种方法结果的综合可以更好地约束稀有金属伟晶岩的成矿过程;而白云母 Ar-Ar 年龄记录的可能是最晚期叠加改造热事件时间。

致谢 野外考察与采样工作中,得到了新疆地矿局第三地质大队刘建兵、张笋、宋俊华工程师等地质同行的支持与帮助;中国地质调查局天津地质调查中心分析实验室涂家润、郝爽、肖志斌老师帮助完成了 LA-MC-ICP-MS 法锡石同位素测年;两位审稿人对本文的审阅并提出建设性问题及建议,使得本文能更加规范、完整,内容上也更加严谨、充实;在此一并表示衷心的感谢!

References

Aldrich LT, Davis GL, Tilton GR and Wetherill GW. 1956. Radioactive ages of minerals from the Brown Derby mine and the Quartz Creek granite near Gunnison, Colorado. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 61(2): 215-232

Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY and Fisher NI. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143(5): 602-622

Burnham CW and Nekvasil H. 1986. Equilibrium properties of granite pegmatite magmas. American Mineralogist, 71(3-4): 239-263

Camacho A, Baadagaard H, Davis DW and Černy P. 2012. Radiogenic isotope systematics of the Tanco and Silverleaf granitic pegmatites, Winnipeg River pegmatite district, Manitoba. The Canadian Mineralogist, 50(6): 1775-1792

Černý P. 1992. Geochemical and petrogenetic features of mineralization in rare-element granitic pegmatites in the light of current research. Applied Geochemistry, 7(5): 393-416

Černý P and Lenton PG. 1995. The Buck and Pegli lithium deposits, southeastern Manitoba: The problem of updip fractionation in subhorizontal pegmatite sheets. Economic Geology, 90(3): 658-675

Černý P, London D and Novák M. 2012. Granitic pegmatites as reflections of their sources. Elements, 8(4): 289-294

Chakhmouradian AR, Smith MP and Kynicky J. 2015. From "strategic" tungsten to "green" neodymium: A century of critical metals at a glance. Ore Geology Reviews, 64: 455-458

Chakungal J, Reynolds PH, Jamieson RA and Corrigan D. 2004. Slow post-orogenic cooling in a deeply eroded orogen: Reindeer Zone, Trans-Hudson Orogen, Saskatchewan. Canadian Journal of Earth Sciences, 41(7): 867-880

Che XD, Wu FY, Wang RC, Gerdes A, Ji WQ, Zhao ZH, Yang JH and Zhu ZY. 2015. In situ U-Pb isotopic dating of columbite-tantalite by LA-ICP-MS. Ore Geology Reviews, 65: 979-989

Che ZC, Liu L, Liu HF and Luo JH. 1995. Discovery and occurrence of high-pressure metapelitic rocks from Altun Mountain areas, Xinjiang Autonomous Region. Chinese Science Bulletin, 40(23): 1988-1991

Che ZC, Liu L, Liu HF and Luo JH. 1998. The constituents of the Altun fault system and genetic characteristics of related Meso-Cenozoic petroleum-bearing basin. Regional Geology of China, 17(4): 377-384 (in Chinese with English abstract)

Chen FW, Li HQ, Wang DH, Cai H and Chen W. 2000. New chronological evidence for Yanshanian diagenetic mineralization in China's Altay orogenic belt. Chinese Science Bulletin, 45(2): 108-114

Chen JF. 2011. Geochemistry of the plate part in Altai No. 3 pegmatite and its formation and evolution. Master Degree Thesis. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 1-87 (in Chinese)

Chen ZH, Wang DH, Gong YF, Chen YC and Chen SP. 2006. ^{40}Ar-^{39}Ar isotope dating of muscovite from Jingerquan pegmatite rare metal deposit in Hami, Xinjiang, and its geological significance. Mineral Deposits, 25(4): 470-476 (in Chinese with English abstract)

Clark GS. 1982. Rubidium-strontium isotope systematics of complex granitic pegmatites. In: Černý P (ed.). Granitic Pegmatites in Science and Industry. Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook, Toronto, 8: 347-371

Coleman DS, Gray W and Glazner AF. 2004. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California. Geology, 32(5): 433-436

Dai HZ, Wang DH, Liu LJ, Yu Y, Dai JJ and Fu XF. 2018. Geochronology, geochemistry and their geological significances of No. 308 pegmatite vein in the Jiajika deposit, western Sichuan, China. Earth Science, 43(10): 3664-3681 (in Chinese with English abstract)

Dallmeyer RD and VanBreeman O. 1981. Rb-Sr whole-rock and $^{40}Ar/^{39}Ar$ mineral ages of the Togus and Hallowell quartz monzonite and Three Mile Pond granodiorite plutons, south-central Maine: Their bearing on post-Acadian cooling history. Contributions to Mineralogy and Petrology, 78(1): 61-73

Deng XD, Li JW, Zhao XF, Hu ZC, Hu H, Selby D and de Souza ZS. 2013. U-Pb isotope and trace element analysis of columbite-(Mn) and zircon by laser ablation ICP-MS: Implications for geochronology of pegmatite and associated ore deposits. Chemical geology, 344: 1-11

Dewaele S, Henjes-Kunst F, Melcher F, Sitnikova M, Burgess R, Gerdes A, Fernandez MA, de Clercq F, Muchez P and Lehmann B. 2011. Late Neoproterozoic overprinting of the cassiterite and columbite-tantalite bearing pegmatites of the Gatumba area, Rwanda (Central Africa). Journal of African Earth Sciences, 61(1): 10-26

Dickin AP. 1995. Radiogenic Isotope Geology. Cambridge: Cambridge

University Press, 101 - 135
Dill HG, Gerde A and Weber B. 2007. Cu-Fe-U phosphate mineralization of the Hagendorf-Pleystein pegmatite province, Germany: With special reference to laser-ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) of limonite-cored torbernite. Mineralogical Magazine, 71(4): 371 - 387
Dunlap WJ. 1997. Neocrystallization or cooling? $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages of white micas from low-grade mylonites. Chemical Geology, 143(3 - 4): 181 - 203
Fei GC, Yang Z, Yang JY, Luo W, Deng Y, Lai YT, Tao XX, Zheng L, Tang WC and Li J. 2020. New precise timing constraint for the Dangba granitic pegmatite type rare-metal deposits, Markam, Sichuan Province: Evidence from cassiterite LA-MC-ICP-MS U-Pb dating. Acta Geologica Sinica, 94(3): 836 - 849 (in Chinese with English abstract)
Feng YG, Liang T, Zhang Z, Wang YQ, Zhou Y, Yang XQ, Gao JG, Wang H and Ding K. 2019. Columbite U-Pb geochronology of Kalu'an lithium pegmatites in northern Xinjiang, China: Implications for genesis and emplacement history of rare-element pegmatites. Minerals, 9(8): 456
Feng YG, Liang T, Linnen RL, Zhang Z, Zhou Y, Zhang ZL and Gao JG. 2020. LA-ICP-MS dating of high-uranium columbite from No. 1 pegmatite at Dakalasu, the Chinese Altay orogen: Assessing effect of metamictization on age concordance. Lithos, 362 - 363: 105461
Glodny J, Grauert B, Fiala J, Vejnar Z and Krohe A. 1998. Metapegmatites in the western Bohemian massif: Ages of crystallisation and metamorphic overprint, as constrained by U-Pb zircon, monazite, garnet, columbite and Rb-Sr muscovite data. Geologische Rundschau, 87(1): 124 - 134
Grew ES. 2002. Beryllium in metamorphic environments (emphasis on aluminous compositions). Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 50(1): 487 - 549
Gulson BL and Jones MT. 1992. Cassiterite: Potential for direct dating of mineral deposits and a precise age for the Bushveld Complex granites. Geology, 20(4): 355 - 358
Guo ZJ, Zhang ZC and Wang JJ. 1999. Sm-Nd isochron age of ophiolite along northern margin of Altun Tagh Mountain and its tectonic significance. Chinese Science Bulletin, 44(5): 456 - 458
Hames WE and Bowring SA. 1994. An empirical evaluation of the argon diffusion geometry in muscovite. Earth and Planetary Science Letters, 124(1 - 4): 161 - 169
Hoskin PWO and Ireland TR. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. Geology, 28(7): 627 - 630
Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 27 - 62
Hoskin PWO. 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. Geochimica et Cosmochimica Acta, 69(3): 637 - 648
Hu ZC, Zhang W, Liu YS, Gao S, Li M, Zong KQ, Chen HH and Hu SH. 2015. "Wave" signal-smoothing and mercury-removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS analysis: Application to lead isotope analysis. Analytical Chemistry, 87(2): 1152 - 1157
Jahns RH and Burnham CW. 1969. Experimental studies of pegmatite genesis: I. A model for the derivation and crystallization of granitic pegmatites. Economic Geology, 64(8): 843 - 864
Jahns RH. 1982. Internal evolution of pegmatite bodies. In: Černý P (ed.). Granitic Pegmatites in Science and Industry. Mineral Association of Canada Short Course Handbook, 8: 293 - 327
Jiang SY, Yu JM and Lu JJ. 2004. Trace and rare-earth element geochemistry in tourmaline and cassiterite from the Yunlong tin deposit, Yunnan, China: Implication for migmatitic-hydrothermal fluid evolution and ore genesis. Chemical Geology, 209(3 - 4): 193 - 213
Kaeter D, Barros R, Menuge JF and Chew DM. 2018. The magmatic-hydrothermal transition in rare-element pegmatites from Southeast Ireland: LA-ICP-MS chemical mapping of muscovite and columbite-tantalite. Geochimica et Cosmochimica Acta, 240: 98 - 130
Kang L, Xiao PX, Gao XF, Xi RG and Yang ZC. 2016. Early Paleozoic magmatism and Collision orogenic process of the South Altyn. Acta Geologica Sinica, 90(10): 2527 - 2550 (in Chinese with English abstract)
Kendall-Langley LA, Kemp AIS, Grigson JL and Hammerli J. 2020. U-Pb and reconnaissance Lu-Hf isotope analysis of cassiterite and columbite group minerals from Archean Li-Cs-Ta type pegmatites of western Australia. Lithos, 352 - 353: 105231
Küster D. 1995. Rb-Sr isotope systematics of muscovite from Pan-African granitic pegmatites of western and northeastern Africa. Mineralogy and Petrology, 55(1 - 3): 71 - 83
Lerouge C, Deschamps Y, Piantone P, Gilles C and Breton J. 2007. Metal-carrier accessory minerals associated with W ± Sn mineralization, La Chataigneraie tungsten ore district, massif central, France. The Canadian Mineralogist, 45(4): 875 - 889
Li HM, Hao S, Geng JZ, Li HK, Zhang YQ and Zhou HY. 2009. Direct dectermination of cassiterite U-Pb isotope age in the tin polymentallic deposit by laser ablation multiple collector plasma mass spectrometry (LA-MC-ICP-MS). Acta Mineralogica Sinica, 29(Suppl.): 313 (in Chinese)
Li JK. 2006. Mineralizing mechanism and continental geodynamics of typical pegmatite deposits in western Sichuan, China. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1 - 225 (in Chinese with English summary)
Li JK, Wang DH and Fu XF. 2006a. $^{40}Ar-^{39}Ar$ ages of the Keeryin pegmatite type rare metal deposit, western Sichuan, and its tectonic significances. Acta Geologica Sinica, 80(6): 843 - 848 (in Chinese with English abstract)
Li JK, Wang DH and Fu XF. 2006b. Metallogenic epoch and tectonic implications of Danba pegmatite type muscovite deposit in Sichuan Province, China. Mineral Deposits, 25(1): 95 - 100 (Chinese with English abstract)
Li JK, Liu SB, Wang DH and Fu XF. 2007. Metallogenic epoch of Xubaoding W-Sn-Be deposit in Northwest Sichuan and its tectonic tracing significance. Mineral Deposits, 26(5): 557 - 562 (in Chinese with English abstract)
Li JK, Yang XJ, Wang DH, Xiong CL and Fu XF. 2009. Cooling process of granite in northwestern Sichuan Province and its constraint to regional mineralization. Acta Geologica Sinica, 83(8): 1141 - 1149 (in Chinese with English abstract)
Li JK, Wang DH, Li HQ, Chen ZH and Mei YP. 2013. Late Jurassic-Early Cretaceous mineralization in the Laojunshan ore concentration area, Yunnan Province. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 38(5): 1023 - 1036 (in Chinese with English abstract)
Li JK, Zou TR, Liu XF, Wang DH and Ding X. 2015. The metallogenetic regularities of lithium deposits in China. Acta Geologica Sinica, 89(2): 652 - 670
Li P, Li JK, Chou IM, Wang DH and Xiong X. 2019. Mineralization epochs of granitic rare-metal pegmatite deposits in the Songpan-Garzê orogenic belt and their implications for orogeny. Minerals, 9(5): 280
Linnen RL, Van Lichtervelde M and Černý P. 2012. Granitic pegmatites as sources of strategic metals. Elements, 8(4): 275 - 280
Linnen RL, Trueman DL and Burt R. 2014. Tantalum and niobium. In: Gunn G (ed.). Critical Metals Handbook. Chicester, UK: Wiley, 361 - 384
Liu F, Zhang ZX, 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. Ore Geology Reviews, 56: 209 - 219
Liu FL and Liou JG. 2011. Zircon as the best mineral for *P-T*-time history of UHP metamorphism: A review on mineral inclusions and U-Pb SHRIMP ages of zircons from the Dabie-Sulu UHP rocks. Journal of Asian Earth Sciences, 40(1): 1 - 39
Liu L, Che ZC, Luo JH, Wang Y and Gao ZJ. 1997. Recognition and

implication of eclogite in the western Altun Mountains, Xinjiang. Chinese Science Bulletin, 42(11): 931 - 934

Liu L, Che ZC, Wang Y, Luo JH and Chen DL. 1999. The petrological characters and geotectonic setting of high-pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains. Acta Petrologica Sinica, 15(1): 57 - 64 (in Chinese with English abstract)

Liu YL, Zhang H, Tang Y, Zhang X, Lv ZH and Zhao JY. 2018. Petrogenesis and tectonic setting of the Middle Permian A-type granites in Altay, northwestern China: Evidences from geochronological, geochemical, and Hf isotopic studies. Geological Journal, 53(2): 527 - 546

Liu YP, Li ZX, Li HM, Guo LG, Xu W, Ye L, Li CY and Pi DH. 2007. U-Pb geochronology of cassiterite and zircon from the Dulong Sn-Zn deposit: Evidence for cretaceous large-scale granitic magmatism and mineralization events in southeastern Yunnan Province, China. Acta Petrologica Sinica, 23(5): 967 - 976 (in Chinese with English abstract)

Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. Chemical Geology, 257(1 - 2): 34 - 43

Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51(1 - 2): 537 - 571

Liu ZC, Wu FY, Liu XC, Wang JG, Yin R, Qiu ZL, Ji WQ and Yang L. 2019. Mineralogical evidence for fractionation processes in the Himalayan leucogranites of the Ramba Dome, southern Tibet. Lithos, 340 - 341: 71 - 86

London D and Evensen JM. 2002. Beryllium in silicic magmas and the origin of beryl-bearing pegmatites. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 50(1): 445 - 486

London D. 2008. Pegmatites. Ottawa: Mineralogical Association of Canada, 10 - 347

London D and Morgan GB VI. 2012. The pegmatite puzzle. Elements, 8(4): 263 - 268

London D, Hunt LE and Duval CL. 2020. Temperatures and duration of crystallization within gem-bearing cavities of granitic pegmatites. Lithos, 360 - 361: 105417

Ludwig KR. 2003. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 1 - 39

Lupulescu MV, Chiarenzelli JR, Pullen AT and Price JD. 2011. Using pegmatite geochronology to constrain temporal events in the Adirondack Mountains. Geosphere, 7(1): 23 - 39

Lv ZH, Zhang H, Tang Y and Guan SJ. 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. Lithos, 154: 374 - 391

Ma ZL, Zhang H, Tang Y, Lv ZH, Zhang X and Zhao JY. 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. Geochimica, 44(1): 9 - 26 (in Chinese with English abstract)

Marini OJ and Botelho NF. 1986. A província de granitos estaníferos de Goiás. Revista Brasileira De Geociencias, 16(1): 119 - 131

Matzel JEP, Bowring SA and Miller RB. 2006. Time scales of pluton construction at different crustal levels: Examples from the Mount Stuart and Tenpeak intrusions, North Cascades, Washington. Geological Society of America Bulletin, 118(11 - 12): 1412 - 1430

McNaughton NJ, Pollard PJ, Gulson BL and Jones MT. 1993. Cassiterite: Potential for direct dating of mineral deposits and a precise age for the Bushveld Complex granites: Comment and Reply. Geology, 21(3): 285 - 286

Meinhold G. 2010. Rutile and its applications in earth sciences. Earth-Science Reviews, 102(1 - 2): 1 - 28

Melcher F, Sitnikova MA, Graupner T, Martin N, Oberthür T, Henjes-Kunst F, Gäbler E, Gerdes A, Brätz H, Davis DW and Dewaele S. 2008. Fingerprinting of conflict minerals: Columbite-tantalite ("coltan") ores. SGA News, 23: 1 - 14

Melleton J, Gloaguen E, Frei D, Novak M and Breiter K. 2012. How are the emplacement of rare-element pegmatites, regional metamorphism and magmatism interrelated in the Moldanubian domain of the Variscan Bohemian Massif, Czech republic? The Canadian Mineralogist, 50(6): 1751 - 1773

Michel J, Baumgartner L, Putlitz B, Schaltegger U and Ovtcharova M. 2008. Incremental growth of the Patagonian Torres del Paine laccolith over 90k. y. Geology, 36(6): 459 - 462

Möller P. 1989. REE(Y), Nb, and Ta enrichment in pegmatites and carbonatite-alkalic rock complexes. In: Möller P, Černý P and Saupé F (eds.). Lanthanides, Tantalum and Niobium. Berlin, Heidelberg: Springer, 103 - 144

Möller A, Mezger K and Schenk V. 2000. U-Pb dating of metamorphic minerals: Pan-African metamorphism and prolonged slow cooling of high pressure granulites in Tanzania, East Africa. Precambrian Research, 104(3 - 4): 123 - 146

Nassar NT. 2017. Shifts and trends in the global anthropogenic stocks and flows of tantalum. Resources, Conservation and Recycling, 125: 233 - 250

Ortega-Rivera A, Farrar E, Hanes JA, Archibald DA, Gastil RG, Kimbrough DL, Zentilli M, López-Martinez M, Féraud G and Ruffet G. 1997. Chronological constraints on the thermal and tilting history of the Sierra San Pedro Mártir pluton, Baja California, México, from U/Pb, $^{40}Ar/^{39}Ar$ and fission-track geochronology. GSA Bulletin, 109(6): 728 - 745

Ren BQ, Zhang H, Tang Y and Lv ZH. 2011. LA-ICPMS U-Pb zircon geochronology of the Altai pegmatites and its geological significance. Acta Mineralogica Sinica, 31(3): 587 - 596 (in Chinese with English abstract)

Romer RL and Wright JE. 1992. U-Pb dating of columbites: A geochronologic tool to date magmatism and ore deposits. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56(5): 2137 - 2142

Romer RL and Smeds SA. 1994. Implications of U-Pb ages of columbite-tantalites from granitic pegmatites for the Palaeoproterozoic accretion of 1.90 ~ 1.85Ga magmatic arcs to the Baltic Shield. Precambrian Research, 67(1 - 2): 141 - 158

Romer RL and Lehmann B. 1995. U-Pb columbite age of Neoproterozoic Ta-Nb mineralization in Burundi. Economic Geology, 90(8): 2303 - 2309

Romer RL and Smeds SA. 1996. U-Pb columbite ages of pegmatites from Sveconorwegian terranes in southwestern Sweden. Precambrian Research, 76(1 - 2): 15 - 30

Romer RL, Schärer U and Steck A. 1996a. Alpine and pre-Alpine magmatism in the root-zone of the western Central Alps. Contributions to Mineralogy and Petrology, 123(2): 138 - 158

Romer RL, Smeds SA and Černý P. 1996b. Crystal-chemical and genetic controls of U-Pb systematics of columbite-tantalite. Mineralogy and Petrology, 57(3 - 4): 243 - 260

Romer RL and Smeds SA. 1997. U-Pb columbite chronology of post-kinematic Palaeoproterozoic pegmatites in Sweden. Precambrian Research, 82(1 - 2): 85 - 99

Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. Chemical Geology, 184(1 - 2): 123 - 138

Selway JB, Breaks FW and Tindle AJ. 2005. A review of rare-element (Li-Cs-Ta) pegmatite exploration techniques for the Superior Province, Canada, and large worldwide tantalum deposits. Exploration and Mining Geology, 14(1 - 4): 1 - 30

Shaw RA, Goodenough KM, Roberts NMW, Horstwood MSA, Chenery SR and Gunn AG. 2016. Petrogenesis of rare-metal pegmatites in high-grade metamorphic terranes: A case study from the Lewisian Gneiss Complex of north-west Scotland. Precambrian Research, 281: 338 - 362

Simmons WB, Pezzotta F, Shigley JE and Beurlen H. 2012. Granitic pegmatites as sources of colored gemstones. Elements, 8(4): 281 - 287

Simmons WBS and Webber KL. 2008. Pegmatite genesis: State of the art. European Journal of Mineralogy, 20(4): 421 – 438

Sirbescu MLC, Hartwick EE and Student JJ. 2008. Rapid crystallization of the Animikie Red Ace pegmatite, Florence County, northeastern Wisconsin: Inclusion microthermometry and conductive-cooling modeling. Contributions to Mineralogy and Petrology, 156(3): 289 – 305

Smith SR, Foster GL, Romer RL, Tindle AG, Kelley SP, Noble SR, Horstwood M and Breaks FW. 2004. U-Pb columbite-tantalite chronology of rare-element pegmatites using TIMS and Laser Ablation-Multi Collector-ICP-MS. Contributions to Mineralogy and Petrology, 147(5): 549 – 564

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 – 345

Wang DH, Chen YC, Zou TR, Xu ZG, Li HQ, Chen W, Chen FW and Tian F. 2000. ^{40}Ar-^{39}Ar dating for the Azubai rare metal-gem deposit in Altay, Xinjiang: New evidence for Yanshanian mineralization of rare metals. Geological Review, 46(3): 307 – 311 (in Chinese with English abstract)

Wang DH, Chen YC and Xu ZG. 2003. $^{40}Ar/^{39}Ar$ isotope dating on muscovites from Indosinian rare metal deposits in central Altay, northwestern China. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 22(1): 14 – 17

Wang H, Gao H, Zhang XY, Yan QH, Xu YG, Zhou KL, Dong R and Li P. 2020. Geology and geochronology of the super-large Bailongshan Li-Rb-(Be) rare-metal pegmatite deposit, West Kunlun orogenic belt, NW China. Lithos, 360 – 361: 105449

Wang Q, Hou KJ and Zou TR. 2019. Isotopic dating method suitable for rare-metal deposits and its application. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1523 – 1532 (in Chinese with English abstract)

Wang QS and Yuan CH. 2019. The global supply situation of lithium ore and suggestions on resources security in China. China Mining Magazine, 28(5): 1 – 6 (in Chinese with English abstract)

Wang RC, Wu FY, Xie L, Liu XC, Wang JM, Yang L, Lai W and Liu C. 2017. A preliminary study of rare-metal mineralization in the Himalayan leucogranite belts, South Tibet. Science China (Earth Sciences), 60(9): 1655 – 1663

Wang T, Tong Y, Jahn BM, Zou TR, Wang YB, Hong DW and Han BF. 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. Ore Geology Reviews, 32(1 – 2): 325 – 336

Wang Y and Li HM. 2008. Initial formation and Mesozoic tectonic exhumation of an intracontinental tectonic belt of the northern part of the Taihang Mountain Belt, eastern Asia. Journal of Geology, 116(2): 155 – 172

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 FY, Liu XC, Liu ZC, Wang RC, Xie L, Wang JM, Ji WQ, Yang L, Liu C, Khanal GP and He SX. 2020. Highly fractionated Himalayan leucogranites and associated rare-metal mineralization. Lithos, 352 – 353: 105319

Xie L, Tao XY, Wang RC, Wu FY, Liu C, Liu XC, Li XK and Zhang RQ. 2020. Highly fractionated leucogranites in the eastern Himalayan Cuonadong dome and related magmatic Be-Nb-Ta and hydrothermal Be-W-Sn mineralization. Lithos, 354 – 355: 105286

Xu JB, Fei GC, Qin LY, Yang JY, Zheng L and Tang WC. 2020. LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of cassiterite from the Lijiagou pegmatite-type rare-metal deposit in the Ke'eryin orefield, Sichuan Province and its geological implication. Geology and Exploration, 56(2): 346 – 358 (in Chinese with English abstract)

Xu XW, Mao Q, Li XH, Pirajno FM, Qu X, Deng G, Chen DZ, Zhang BL and Dong LH. 2014. Copper-zinc albite porphyry in the Hersai porphyry copper deposit, East Junggar, China: A transition between late magmatic and hydrothermal porphyry copper deposit. Ore Geology Reviews, 61: 141 – 156

Xu XW, Li H, Shi FP, Yao FJ, Chen JZ, Yang ZQ, Hong T and Ke Q. 2019. Metallogenic characteristics and prospecting of granitic pegmatite-type rare metal deposits in the Tugeman area, Middle part of Altyn Tagh. Acta Petrologica Sinica, 35(11): 3303 – 3316 (in Chinese with English abstract)

Yan QH, Qiu ZW, Wang H, Wang M, Wei XP, Li P, Zhang RQ, Li CY and Liu JP. 2018. Age of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, West Kunlun, Xinjiang (NW China): Constraints from LA-ICP-MS U-Pb dating of columbite-(Fe) and cassiterite. Ore Geology Reviews, 100: 561 – 573

Yang H, Wang W and Liu JH. 2017. Zircon U-Pb dating and its geological significance of granitic pegmatites from the Kuandian and Sanjiazi area in eastern Liaoning Province. Acta Petrologica Sinica, 33(9): 2675 – 2688 (in Chinese with English abstract)

Yin R, Huang XL, Xu YG, Wang RC, Wang H, Yuan C, Ma Q, Sun XM and Chen LL. 2020. Mineralogical constraints on the magmatic-hydrothermal evolution of rare-elements deposits in the Bailongshan granitic pegmatites, Xinjiang, NW China. Lithos, 352 – 353: 105208

Yuan SD, Peng JT, Hu RZ, Li HM, Shen NP and Zhang DL. 2008. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China). Mineralium Deposita, 43(4): 375 – 382

Yuan SD, Li HM, Hao S, Geng JZ and Zhang DL. 2010. Situ LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of cassiterite and its significance in giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China. Mineral Deposits, 29 (Suppl.): 543 – 544 (in Chinese)

Yuan SD, Peng JT, Hao S, Li HM, Geng JZ and Zhang DL. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization. Ore Geology Reviews, 43(1): 235 – 242

Zhang DL, Peng JT, Hu RZ, Yuan SD and Zheng DS. 2011. The closure of U-Pb isotope system in cassiterite and its reliability for dating. Geological Review, 57(4): 549 – 554 (in Chinese with English abstract)

Zhang DL, Peng JT, Coulson IM, Hou LH and Li SJ. 2014. Cassiterite U-Pb and muscovite ^{40}Ar-^{39}Ar age constraints on the timing of mineralization in the Xuebaoding Sn-W-Be deposit, western China. Ore Geology Reviews, 62: 315 – 322

Zhang H, Lü ZH and Tang Y. 2019. Metallogeny and prospecting model as well as prospecting direction of pegmatite-type rare metal ore deposits in Altay orogenic belt, Xinjiang. Mineral Deposits, 38(4): 792 – 814 (in Chinese with English abstract)

Zhang JX, Zhang ZM, Xu ZQ, Yang JS and Cui JW. 1999. The ages of U-Pb and Sm-Nd for eclogite from the western segment of Altyn Tagh tectonic belt. Chinese Science Bulletin, 44(24): 2256 – 2259

Zhang JX, Zhang ZM, Xu ZQ, Yang JS and Cui JW. 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. Lithos, 56(2 – 3): 187 – 206

Zhang X, Zhang H, Ma ZL, Tang Y, Lv ZH, Zhao JY and Liu YL. 2016. A new model for the granite-pegmatite genetic relationships in the Kaluan-Azubai-Qiongkuer pegmatite-related ore fields, the Chinese Altay. Journal of Asian Earth Sciences, 124: 139 – 155

Zhang Z, Liang T, Feng YG, Yang XQ, Li K, Ding K and Wang YQ. 2019. Geological feature and chronology study of Kangxiwar beryl-bearing muscovite pegmatite in Weste Kunlun Orogen, Xinjiang. Northwestern Geology, 52(1): 75 – 88 (in Chinese with English abstract)

Zheng JD. 1991. Tectonics and evolution of the Altun Tagh Mountain. Geoscience, 5(4): 347 – 354 (in Chinese with English abstract)

Zhong L, Wang ZH and Liu YL. 2011. The geochronology research status of Altai pegmatite, NW China: The confusion of the conventional dating methods used in granitic pegmatite. Xinjiang Geology, 29(4): 412 – 415 (in Chinese with English abstract)

Zhou QF. 2013. The geochronology, mineralogy, melt-fluid evolution and

metallogenesis of the Koktokay No. 3 pegmatitic rare-element deposit, Altai, China. Ph. D. Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 1 - 222 (in Chinese with English summary)

Zhou QF, Qin KZ, Tang DM, Tian Y, Cao MJ and Wang CL. 2015. Formation age and evolution time span of the Koktokay No. 3 pegmatite, Altai, NW China: Evidence from U-Pb zircon and ^{40}Ar-^{39}Ar muscovite ages. Resource Geology, 65(3): 210 - 231

Zhou QF, Qin KZ, Tang DM, Wang CL and Sakyi PA. 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. Geological Magazine, 155(3): 707 - 728

Zhou Y and Pan YS. 1999. The initial shear sense of the Altun fault and its timing. Geological Review, 45(1): 1 - 9 (in Chinese with English abstract)

Zhou ZH, Che HW, Ma XH and Gao X. 2016. A preliminary discussion on some important advances of the rare metal deposit. Geology and Exploration, 52(4): 614 - 626 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF and Zeng YS. 2002. Rb-Sr isochron age of Keketuohai No. 3 pegmatite. Mineral Deposits, 21 (Suppl. 1): 1110 - 1111 (in Chinese)

Zhu YF, Zeng YS and Gu LB. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, northwest China. Journal of Asian Earth Sciences, 27(1): 61 - 77

Zong KQ, Klemd R, Yuan Y, He ZY, Guo JL, Shi XL, Liu YS, Hu ZC and Zhang ZM. 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of Early Neoproterozoic (ca. 900Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). Precambrian Research, 290: 32 - 48

Zou TR, Zhang XC, Jia FY, Wang RC, Cao HZ and Wu BQ. 1986. The origin of No. 3 pegmatite in Altay Shan, Xinjiang. Mineral Deposits, 5(4): 34 - 48 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

车自成, 刘良, 刘洪福, 罗金海. 1995. 阿尔金山地区高压变质泥质岩石的发现及其产出环境. 科学通报, 40(14): 1298 - 1300

车自成, 刘良, 刘洪福, 罗金海. 1998. 阿尔金断裂系的组成及相关中新生代含油气盆地的成因特征. 中国区域地质, 17(4): 377 - 384

陈富文, 李华芹, 王登红, 蔡红, 陈文. 1999. 中国阿尔泰造山带燕山期成岩成矿同位素年代学新证据. 科学通报, 44(11): 1142 - 1148

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. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 1 - 87

陈郑辉, 王登红, 龚羽飞, 陈毓川, 陈世平. 2006. 新疆哈密镜儿泉伟晶岩型稀有金属矿床^{40}Ar-^{39}Ar年龄及其地质意义. 矿床地质, 25(4): 470 - 476

代鸿章, 王登红, 刘丽君, 于扬, 代晶晶, 付小方. 2018. 川西甲基卡308号伟晶岩脉年代学和地球化学特征及其地质意义. 地球科学, 43(10): 3664 - 3681

费光春, 杨岭, 杨继忆, 罗伟, 邓运, 赖宇涛, 陶鑫鑫, 郑硌, 唐文春, 李剑. 2020. 四川马尔康党坝花岗伟晶岩型稀有金属矿床成矿时代的限定: 来自 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年的证据. 地质学报, 94(3): 836 - 849

郭召杰, 张志诚, 王建君. 1998. 阿尔金山北缘蛇绿岩带的 Sm-Nd 等时线年龄及其大地构造意义. 科学通报, 43(18): 1981 - 1984

康磊, 校培喜, 高晓峰, 奚仁刚, 杨再朝. 2016. 阿尔金南缘早古生代岩浆作用及碰撞造山过程. 地质学报, 90(10): 2527 - 2550

李惠民, 郝爽, 耿建珍, 李怀坤, 张永清, 周红英. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱(LA-MC-ICPMS)直接原位测定锡多金属矿床中的锡石 U-Pb 同位素年龄. 矿物学报, 29(增刊): 313

李建康. 2006. 川西典型伟晶岩型矿床的形成机理及其大陆动力学背景. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 1 - 225

李建康, 王登红, 付小方. 2006a. 川西可尔因伟晶岩型稀有金属矿床的$^{40}Ar/^{39}Ar$年代及其构造意义. 地质学报, 80(6): 843 - 848

李建康, 王登红, 付小方. 2006b. 四川丹巴伟晶岩型白云母矿床的成矿时代及构造意义. 矿床地质, 25(1): 95 - 100

李建康, 刘善宝, 王登红, 付小方. 2007. 川西北雪宝顶钨锡铍矿床的成矿年代及其构造示踪意义. 矿床地质, 26(5): 557 - 562

李建康, 杨学俊, 王登红, 熊昌利, 付小方. 2009. 川西北花岗岩的冷却过程及其对区域成矿的制约. 地质学报, 83(8): 1141 - 1149

李建康, 王登红, 李华芹, 陈郑辉, 梅玉萍. 2013. 云南老君山矿集区的晚侏罗世-早白垩世成矿事件. 地球科学(中国地质大学学报), 38(5): 1023 - 1036

刘良, 车自成, 罗金海, 王焰, 高章鉴. 1996. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义. 科学通报, 41(16): 1485 - 1488

刘良, 车自成, 王焰, 罗金海, 陈丹玲. 1999. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义. 岩石学报, 15(1): 57 - 64

刘玉平, 李正祥, 李惠民, 郭利果, 徐伟, 叶霖, 李朝阳, 皮道会. 2007. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件. 岩石学报, 23(5): 967 - 976

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. 地球化学, 44(1): 9 - 26

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. 矿物学报, 31(3): 587 - 596

王登红, 陈毓川, 邹天人, 徐志刚, 李华芹, 陈文, 陈富文, 田锋. 2000. 新疆阿尔泰阿祖拜稀有金属-宝石矿床的成矿时代——燕山期稀有金属成矿的新证据. 地质论评, 46(3): 307 - 311

王倩, 侯可军, 邹天人. 2019. 适合于稀有金属矿床的同位素定年方法及其应用. 地质学报, 93(6): 1523 - 1532

王秋舒, 元春华. 2019. 全球锂矿供应形势及我国资源安全保障建议. 中国矿业, 28(5): 1 - 6

王汝成, 吴福元, 谢磊, 刘小驰, 王佳敏, 杨雷, 赖文, 刘晨. 2017. 藏南喜马拉雅淡色花岗岩稀有金属成矿作用初步研究. 中国科学(地球科学), 47(8): 871 - 880

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

许家斌, 费光春, 覃立业, 杨继忆, 郑硌, 唐文春. 2020. 四川可尔因矿田李家沟伟晶岩型稀有金属矿床锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年及地质意义. 地质与勘探, 56(2): 346 - 358

徐兴旺, 李杭, 石福品, 姚佛军, 陈建中, 杨智全, 洪涛, 柯强. 2019. 阿尔金中段吐格曼地区花岗伟晶岩型稀有金属成矿特征与找矿预测. 岩石学报, 35(11): 3303 - 3316

杨红, 王伟, 刘建辉. 2017. 辽东宽甸和三家子地区花岗伟晶岩的

锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 岩石学报, 33(9): 2675-2688

袁顺达, 李惠民, 郝爽, 耿建珍, 张东亮. 2010. 湘南芙蓉超大型锡矿锡石原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年及其意义. 矿床地质, 29(增刊): 543-544

张东亮, 彭建堂, 胡瑞忠, 袁顺达, 郑德顺. 2011. 锡石 U-Pb 同位素体系的封闭性及其测年的可靠性分析. 地质论评, 57(4): 549-554

张辉, 吕正航, 唐勇. 2019. 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. 矿床地质, 38(4): 792-814

张泽, 梁婷, 凤永刚, 杨秀清, 李侃, 丁坤, 王艺茜. 2019. 新疆西昆仑造山带康西瓦含绿柱石白云母伟晶岩的地质特征与年代学研究. 西北地质, 52(1): 75-88

郑剑东. 1991. 阿尔金山大地构造及其演化. 现代地质, 5(4): 347-354

钟龙, 王政华, 刘玉琳. 2011. 阿尔泰花岗伟晶岩年代学研究现状——兼谈常规年代学方法在花岗伟晶岩定年中之困惑. 新疆地质, 29(4): 412-415

周起凤. 2013. 阿尔泰可可托海 3 号脉伟晶岩型稀有金属矿床年代学、矿物学、熔-流体演化与成矿作用. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 1-222

周勇, 潘裕生. 1999. 阿尔金断裂早期走滑运动方向及其活动时间探讨. 地质论评, 45(1): 1-9

周振华, 车合伟, 马星华, 高旭. 2016. 初论稀有金属矿床研究的一些重要进展. 地质与勘探, 52(4): 614-626

朱永峰, 曾贻善. 2002. 可可托海 3 号脉伟晶岩铷-锶同位素等时线年龄. 矿床地质, 21(增 1): 1110-1111

邹天人, 张相宸, 贾富义, 王汝聪, 曹惠志, 吴柏青. 1986. 论阿尔泰 3 号伟晶岩脉的成因. 矿床地质, 5(4): 34-48