

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.05.005

北山白头山铷矿赋矿花岗岩锆石 U-Pb 年龄、分异演化过程及对铷成矿的约束

吴世保¹, 雷如雄^{1,2,3*}, 吴昌志^{1,2,3}

WU Shibao¹, LEI Ruxiong^{1,2,3*}, WU Changzhi^{1,2,3}

1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学成矿作用与动力学重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 西安市关键金属成矿与高效利用重点实验室, 陕西 西安 710054

1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. The Key Laboratory of Mineralization and Dynamics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. Xi'an Key Laboratory for Mineralization and Efficient Utilization of Critical Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:白头山铷矿位于北山造山带,为近年来新发现的超大型铷矿,含石榴子石白云母花岗岩是其重要的赋矿岩体,对于理解铷富集成矿机制具有重要意义。白头山含石榴子石白云母花岗岩具有高硅(SiO_2 为 73.56%~75.60%)、富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 8.84%~10.39%)、富铝(Al_2O_3 为 14.41%~15.01%),低 Mg、Fe、Ca、P 和 Ti 的特征,铝饱和指数较高($A/\text{CNK}=0.98\sim 1.14$)。微量元素方面,白头山含石榴子石白云母花岗岩富集 Rb、Th、U、Ta,相对亏损 Ba、Sr、P、Ti,具有明显的负 Eu 异常(Eu/Eu^* 为 0.02~0.03)。岩石学、矿物学和地球化学特征指示,白头山含石榴子石白云母花岗岩属于高分异 S 型花岗岩,在岩浆演化过程中该花岗岩体系可能发生了云母、斜长石、锆石等矿物的结晶分异作用。稀土元素总量较低($32.06\times 10^{-6}\sim 45.33\times 10^{-6}$),具有明显的四分组效应($\text{TE}_{1,3}=1.28\sim 1.31$),结合特征性元素对(Zr/Hf、Nb/Ta、Y/Ho、K/Rb)发育的 non-CHARAC(不受离子电荷半径控制)行为,反映其经历了强烈的分异演化与熔流体作用。高分异花岗岩的强烈分异演化和熔流体作用是白头山铷矿富集成矿的关键控制因素。锆石 U-Pb 测年显示,白头山含石榴子石白云母花岗岩形成年龄为 226 ± 3.8 Ma,结合前人资料,表明印支期是东天山—北山地区高分异花岗岩和伴生稀有金属形成的重要阶段,为研究区稀有金属找矿提供了新的方向。

关键词:北山造山带;锆石 U-Pb 年龄;高分异花岗岩;四分组效应;白头山铷矿

中图分类号:P588.12⁺1;P618.77 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)05-0714-16

Wu S B, Lei R X, Wu C Z. Zircon U-Pb age, differentiation process, and its constraints on Rb mineralization of the ore-bearing granites of the Baitoushan rubidium deposit in the Beishan area. Geological Bulletin of China, 2023, 42(5): 714-729

Abstract: The Baitoushan rubidium deposit is located in the Beishan orogenic belt, which is a newly discovered super-large rubidium deposit. The garnet-bearing leucogranite is the important ore-bearing rock and is crucial for understanding the mechanism of rubidium enrichment and mineralization of the deposit. The Baitoushan garnet-bearing leucogranite is enriched in silicon ($\text{SiO}_2 = 73.56\% \sim 75.60\%$), alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.84\% \sim 10.39\%$), and aluminum ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.41\% \sim 15.01\%$), lower in Mg, Fe, Ca, P, and Ti. The Al saturation index is high ($A/\text{CNK} = 0.98 \sim 1.14$). In terms of trace elements, the Baitoushan garnet-bearing leucogranite is enriched in Rb, Th, U, and Ta, relatively depleted in Ba, Sr, P, and Ti, with strong Eu negative anomalies ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.02 \sim 0.03$). The petrological,

收稿日期:2022-04-20;修订日期:2022-05-31

资助项目:国家自然科学基金重大项目《东天山富铷花岗岩及相关铷矿的地质特征与成矿机制》(批准号:91962214)和长安大学中央高校基本科研业务费项目《中国关键矿产成矿机制与成矿规律》(编号:300102271302)、《中天山新元古代岩浆作用及全球构造意义》(编号:300102272201)

作者简介:吴世保(1999-),男,在读硕士生,地质学专业。E-mail:wsbchd@163.com

* 通信作者:雷如雄(1987-),男,博士,教授,从事矿床学研究。E-mail:ruxionglei@chd.edu.cn

mineralogical, and geochemical characteristics of the Baitoushan garnet-bearing leucogranite indicate that it is a highly fractionated S-type granite. Fractional crystallization of mica, plagioclase, and zircon may have occurred in this granitic system during magmatic evolution. The total amount of rare earth elements is low ($REE = 32.06 \times 10^{-6} \sim 45.33 \times 10^{-6}$), with an obvious tetrad effect ($TE_{1,3} = 1.28 \sim 1.31$). Combined with the non-CHARAC (no radius-controlled) behavior of the characteristic element pairs (Zr/Hf, Nb/Ta, Y/Ho, K/Rb), it reflects that they also underwent a strong differentiation evolution with melt fluid interaction. The extensive magmatic differentiation of highly fractionated granites and F-rich fluid interaction are the key controlling factors for the enrichment and mineralization of rubidium and other rare metals. Zircon U-Pb dating shows that the crystallization age of the garnet-bearing leucogranite is 226 ± 3.8 Ma. Combined with previous studies, it is suggested that the Triassic is an important period for the formation of highly fractionated granites and associated rare metal mineralization in the Eastern Tianshan-Beishan region, which will provide a new direction for prospecting rare metals in the study area.

Key words: Beishan orogenic belt; zircon U-Pb dating; highly fractionated granite; tetrad effect; Baitoushan rubidium deposit

高分异花岗岩作为岩浆演化过程晚期的结晶产物,往往经历了强烈的岩浆分离结晶作用,矿物组合以较低的暗色矿物含量和较高的石英及长石含量为主要特征(Tao et al., 2013)。高分异花岗岩在矿物学上除以石英和长石为主外,通常还富含白云母、铁锂云母、萤石、黄玉、电气石等次要矿物,地球化学组成以高硅富碱、低 Sr 和 Ba,不同程度的稀土元素四分组效应,强烈的负 Eu 异常,高 K/Ba 和 Rb/Sr 值,低 Zr/Hf 和 Nb/Ta 值等为重要特征(Clarke, 1981; Bau, 1996; Chen et al., 2014; Wang et al., 2016; 吴福元等, 2017)。此外,高分异花岗岩往往富含挥发分组分(如 F、B 等),其在岩浆演化和矿化过程中的重要作用也备受关注(Keppler et al., 1991; 张天福等, 2019; 刘志超等, 2020b; 谭洪旗等, 2022)。实验岩石学证明, F 可以大幅降低花岗质熔体的粘度(Dingwell et al., 1985)、密度和固相线温度(Webster et al., 1998; Mysen et al., 2004),导致富 F 花岗质岩浆发生极端的分离结晶作用而形成高分异花岗岩。事实上,不同类型的高分异花岗岩具有一致的演化趋势,特别是其微量元素组成显著受晚期分离结晶的副矿物类型和组合,以及熔体-流体相互作用的控制(赵振华等, 1992; Bau, 1996; Jahn et al., 2001; 刘志超等, 2020a)。越来越多的证据表明,高分异花岗岩与稀有金属成矿关系密切,其岩石成因、分异演化过程及与伴生稀有金属矿化的关系一直备受关注(Burnham, 1979; 毛景文等, 1995; Linnen et al., 2005; Huang et al., 2012; Helmy et al., 2014)。

近年来,随着稀有金属矿产受重视程度的日益增长,位于新疆-甘肃交汇的东天山-北山地区陆续发现了国宝山、张宝山、刘家河、白头山等大型铷

矿床(李通国等, 2018)。已有研究表明,东天山地区的铷矿床多与高分异富氟天河石花岗岩密切相关,形成时代集中于印支期,矿体主要产于高分异花岗岩顶部或边部相带的天河石花岗岩和钠长花岗岩中(Zhi et al., 2021; 吴昌志等, 2021; Chen et al., 2022)。而位于北山地区的白头山铷矿主要产于花岗伟晶岩及相关含石榴子石白云母花岗岩中,其成岩成矿时代尚未得到精确厘定,赋矿的含石榴子石白云母花岗岩的成因类型、分异演化过程及其成矿意义尚不清楚,制约了对铷矿床成因和成矿规律的认识。

本文以白头山铷矿赋矿含石榴子石白云母花岗岩为研究对象,在详细的野外观察和岩相学研究的基础上,通过锆石 U-Pb 定年限定其形成时代,通过全岩主量、微量元素分析,探讨赋矿花岗岩的岩石成因、分异演化过程及其成矿意义,进而为北山地区铷矿的成矿机制研究和进一步的找矿勘探提供支撑。

1 地质背景

1.1 区域地质概况

北山造山带位于中亚造山带最南端的中段(图 1-a),处在西伯利亚、华北和塔里木三大板块的交汇处,其西由星星峡断裂与东天山构造带相隔,以东被巴丹吉林沙漠覆盖,南邻敦煌地块,北接蒙古增生造山带(左国朝等, 1990; 聂凤军等, 2000; 左国朝等, 2003; Xiao et al., 2011; He et al., 2018; 王鑫玉等, 2018; 任云伟等, 2019),其关键的构造位置对于认识中亚造山带南缘的构造演化历史具有特殊意义(袁禹, 2019)。北山造山带经历了多期次、多阶段的板块裂解-俯冲-碰撞-拼合的复杂地质

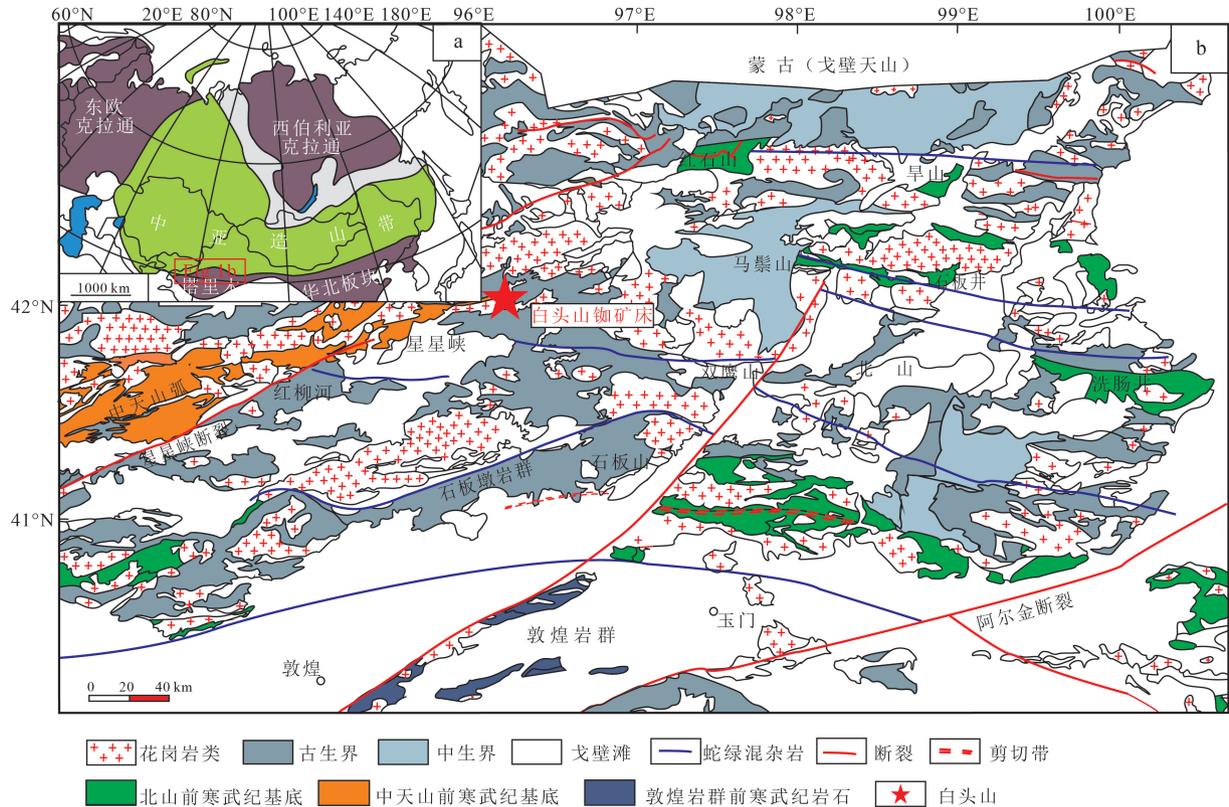


图1 中亚造山带简图(a,据 Sengör et al.,1993 修改)和北山地区区域地质简图(b,据 He et al.,2018;Xiao et al.,2011 修改)

Fig. 1 Map of the Central Asian Orogenic Belt(a) and regional geological map of the Beishan region(b)

过程。

北山北带最北侧是大南湖-雀儿山-孤狸山活动陆缘弧带,该带南部发育石炭纪—二叠纪岛弧—弧后盆地建造,再往南为星星峡—明水—旱山地块,发育大量花岗岩和片麻岩、大理岩等强烈变形变质的岩石。在中间地块的南侧发育早古生代马鬃山岛弧地体。北山南带基本上是被石炭纪—二叠纪裂谷盆地叠加的敦煌地块北边的元古宙—早古生代大陆边缘带。北山南带石炭纪—二叠纪裂谷西段呈北东向展布,以大角度叠覆于古大陆边缘建造带之上,而东段呈北东东向或近东西向,与区域构造线一致。区域地层区划隶属塔里木—南疆地层大区,中、南天山—北山地层区,觉罗塔格—黑鹰山地层分区。区域出露地层主要为敦煌岩群、第四系和新近系。敦煌岩群为一套层状无序的中深变质岩系,受后期岩浆活动影响,地层残缺不全,岩层呈近东西向断续不规则带状展布。新生代地层广泛分布,主要分布于明水、白头山等地及山间、山前

洼地和现代干河床中,其地层单位有新近纪苦泉组 and 第四纪更新统、全新统(苗来成等,2014;于俊博,2015)。

北山地区岩浆活动频繁,岩浆岩十分发育。基性—酸性岩石均有出露,其中以花岗岩类侵入体最发育,花岗岩类出露面积约占全区面积的30%,其次为基性岩及闪长岩类。北山地区花岗岩类的形成时间从前寒武纪一直延续到中生代,主要可分为3期:加里东期(460~370 Ma)、华力西期(330~260 Ma)及印支期(250~200 Ma)(李舳等,2010)。其中,印支期花岗岩主要为二长花岗岩、黑云母花岗岩等,多呈岩株或岩枝状分布。

白头山铷矿区位于北山北带明水地块附近,矿区出露地层单一,主要为太古宇敦煌岩群中浅变质岩及现代沉积物(图1-b)。矿区发育的岩浆岩主要为含石榴子石白云母花岗岩和花岗闪长岩,其中含石榴子石白云母花岗岩规模较大,近东西向带状展布,部分岩体呈岩脉状发育于敦煌岩群变质岩,此

外,岩体中也可见伟晶岩脉发育(左国朝等,1990)。花岗闪长岩大都呈较小侵入体分布在敦煌岩群的边部,岩体呈椭圆状、长条状和不规则状。白头山铷矿化主要赋存于敦煌岩群变质岩的花岗伟晶岩脉和细晶岩脉中,铷的赋存矿物主要为碱性长石和白云母(图 2)。

1.2 岩相学特征

白头山铷矿区含石榴子石白云母花岗岩为浅肉红色,具中细粒花岗结构,块状构造,由斜长石(约 30%)、正长石(约 30%)、石英(25%)、白云母(<10%)、石榴子石(≤5%)组成,偶见黑云母,含微

量副矿物磷灰石、锆石等。斜长石呈半自形宽板状,聚片双晶发育,表面见微弱的粘土化、绢云母化,周边见钠长石化,还见外围包裹较小的石英等矿物,正长石呈他形晶粒状,与斜长石呈近平直-锯齿状镶嵌分布。石英呈乳白色他形粒状,正交镜下可见波状消光,呈亚颗粒镶嵌分布(图 3-a、b),在石英中有少量长石呈旋涡式的对称排列,形成雪球结构(图 3-c、d)。白云母呈片状集合体,常穿插在其他矿物间,干涉色较丰富。局部黑云母已发生绿泥石化。石榴子石呈褐色粒状,正极高突起,正交镜下全消光。

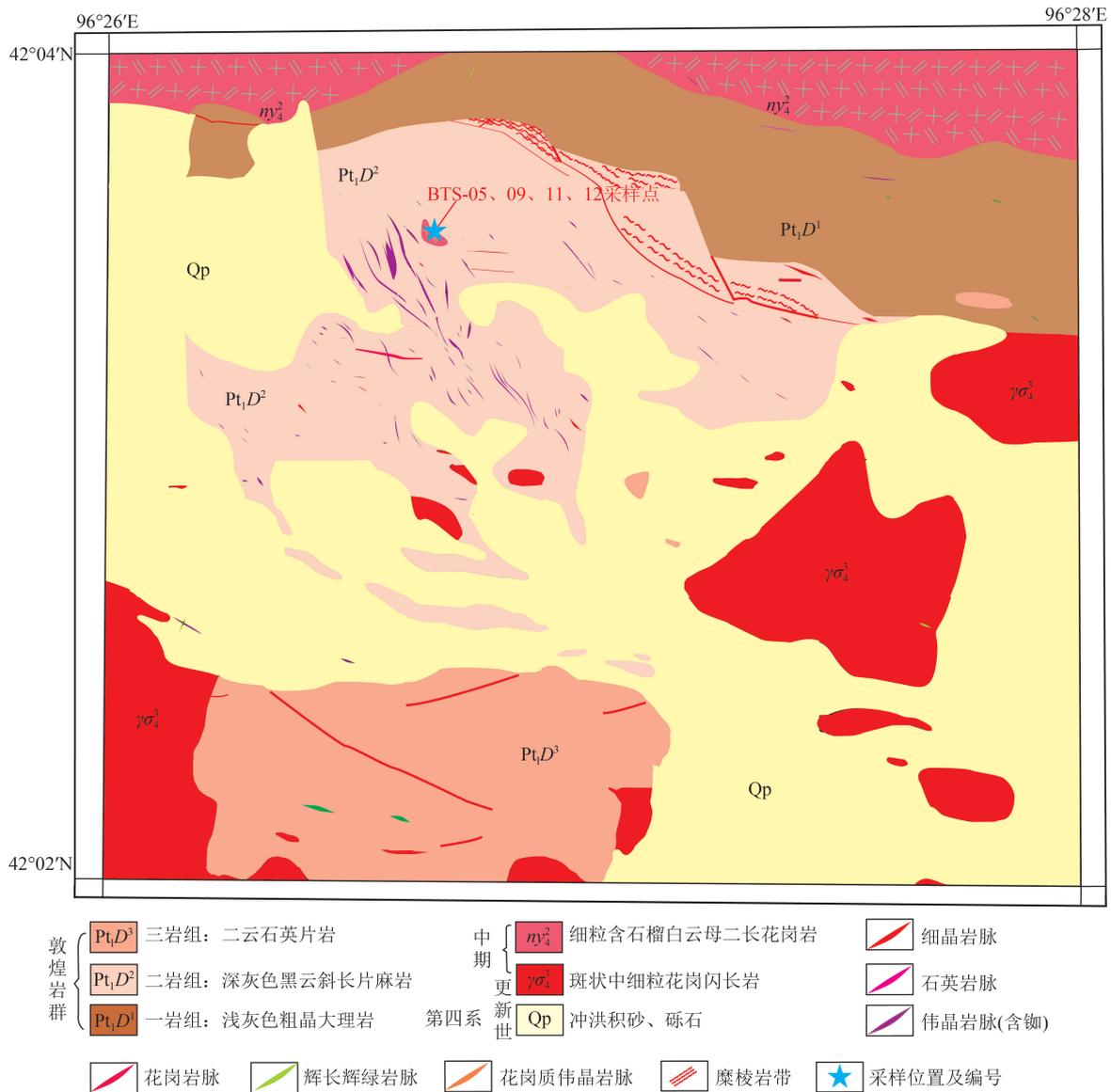


图 2 白头山铷矿区地质图(据参考文献①修改)

Fig. 2 Geological map of the Baitoushan Rubidium deposit area

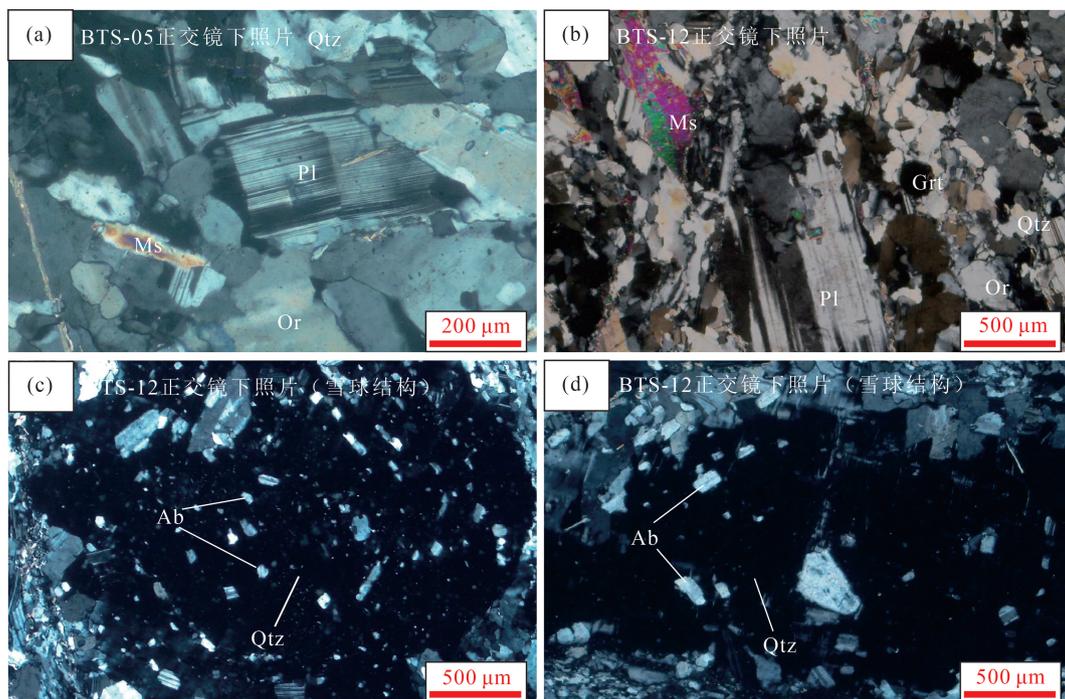


图3 白头山含石榴子石白云母花岗岩样品镜下照片(c和d显示石英中有少量钠长石呈旋涡式对称排列,形成雪球结构)

Fig. 3 Representative micrographs of the Baitoushan garnet-bearing muscovite granites

Qtz—石英;Pl—斜长石;Ms—白云母;Or—正长石;Grt—石榴子石;Ab—钠长石

2 分析方法

通过野外地质调查,采集了白头山铀矿区含石榴子石白云母花岗岩新鲜岩石样品,进行锆石分选和U-Pb年龄测试及全岩地球化学分析。首先采用重选和电磁方法进行锆石分选,并在双目镜下挑选出代表性的锆石颗粒,将待测锆石用双面胶粘在载玻片上,放上PVC环;然后将环氧树脂和固化剂充分混合后注入PVC环中,待树脂充分固化后将样品座从载玻片上剥离,并对其进行抛光,直到样品露出一个光洁的平面。对锆石样品进行透射光、反射光、阴极发光(CL)扫描电子显微镜观察和照相,并选择合适的测试区域。

锆石样品制备、测试、数据处理等均在长安大学成矿作用及其动力学实验室完成。实验使用的ICP-MS为美国Agilent公司7700X型四极杆等离子体质谱仪;激光剥蚀系统为美国PhotoMachines公司的Analyte Excite 193 nm气态准分子激光剥蚀系统。激光束斑直径为35 μm,频率5 Hz,能量密度5.9 J/cm²。测试时采用NIST 610 + 2个91500 + 1个Plešovice + 10个样品点 + NIST 610 + 2个

91500 + 1个Plešovice的测试流程。锆石U-Pb年龄采用91500为外标,锆石微量元素含量采用NIST 610为外标,⁹¹Zr为内标元素进行定量计算。对分析数据的离线处理采用ICPMSDataCal程序(Liu et al., 2008),包括对空白及锆石样品的信号选择、仪器灵敏度漂移校正、锆石元素含量及U-Th-Pb同位素比值和年龄计算等;锆石年龄加权平均值计算及谐和图绘制采用Isoplot 3.7(Ludwig, 2003)完成。

样品的全岩主量、微量和稀土元素分析在长安大学教育部西部工程与矿产资源实验室完成。全岩主量元素采用X荧光光谱(XRF)玻璃熔片法进行分析,使用仪器为日本岛津顺序扫描LAB CENTER XRF-1800型X射线荧光光谱仪,分析精度为2%~5%。全岩微量元素采用混合酸溶法液相分析,采用美国Agilent公司生产的Agilent 7700E型四级杆电感耦合等离子体质谱仪(ICPMS)完成测试,微量和稀土元素分析的精度和准确度大多优于10%。

3 锆石U-Pb测年

白头山含石榴子石白云母花岗岩中的锆石大

致可分为 2 类, I 型锆石大部分在光学显微镜下呈浅色, 自形棱柱状, 长轴为 70~250 μm , 短轴为 45~90 μm , 长宽比多为 1:2~1:3 (图 4-a), 阴极发光 (CL) 图像显示发育岩浆振荡环带 (图 4-c)。Th 含量为 $21.28 \times 10^{-6} \sim 734.76 \times 10^{-6}$, 平均值为 247.03×10^{-6} , U 含量为 $36.02 \times 10^{-6} \sim 816.62 \times 10^{-6}$, 平均值为 426.93×10^{-6} , Th/U 值为 0.21~0.90, 平均值为 0.50, 表明其为岩浆锆石。Zr/Hf 平均值为 40.7, 稀土元素总量为 $368.85 \times 10^{-6} \sim 2184.12 \times 10^{-6}$, 平均值为 1120.02×10^{-6} , 其稀土元素标准化配分型式与典型的岩浆锆石一致, 呈轻稀土元素亏损、重稀土元素富集及较强的负 Eu 异常特征 (图 5)。II 型锆石在光学显微镜下呈深棕色、浑浊, 颗粒长度一般为 150~300 μm , 长宽比为 1:1~1:2 (图 4-b)。在 CL 图像中, II 型锆石普遍暗淡、阴极发光较弱或不显示阴极发光, 发育多孔的泡沫状结构 (图 4-d)。

Th 含量介于 $22.2 \times 10^{-6} \sim 4019 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 1702.96×10^{-6} , U 含量介于 $1627 \times 10^{-6} \sim 4727 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 2443.02×10^{-6} , Th/U 值为 0.01~2.04, 平均值为 0.65; Zr/Hf 平均值为 26.07。稀土元素总量为 $64.24 \times 10^{-6} \sim 8171.31 \times 10^{-6}$, 平均值为 3282.76×10^{-6} , 其稀土元素标准化型式图呈现轻稀土元素异常富集和明显的四分组效应 (图 5), 结合锆石的内部结构特征, 表明 II 型锆石应属于热液改造锆石。

测试锆石中多数测试点偏离了谐和线, 表明锆石发生过铅丢失现象, 可能是因为蛻晶化作用和/或热液改造所致。剩余 5 颗具有谐和年龄的锆石给出的年龄加权平均值为 $226.6 \pm 3.8 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.16) (图 6), 表明白头山含石榴子石白云母花岗岩应该形成于三叠纪。此外, 测年结果显示, 花岗岩中存在大量继承锆石, 其年龄主要分布在 378 Ma 和 421 Ma 左右 (表 2)。

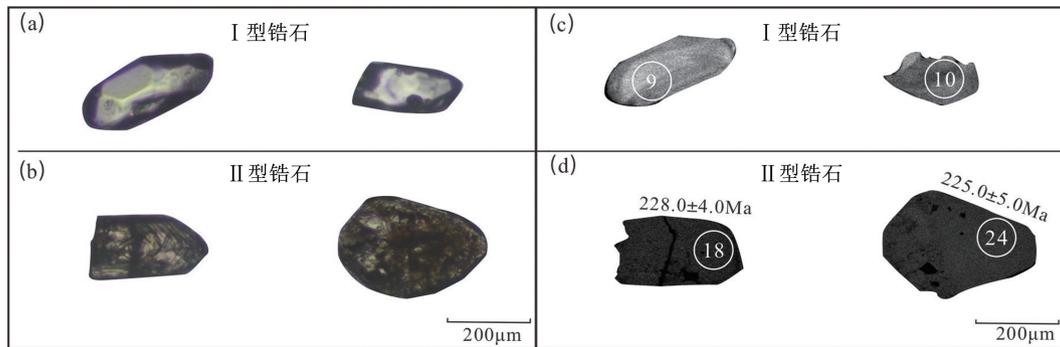


图 4 白头山含石榴子石白云母花岗岩代表性锆石透射光 (a,b) 和阴极发光 (CL) 图像 (c,d)

Fig. 4 Transmitted light images (a,b) and CL images (c,d) of representative zircon of the Baitoushang garnet-bearing muscovite granites

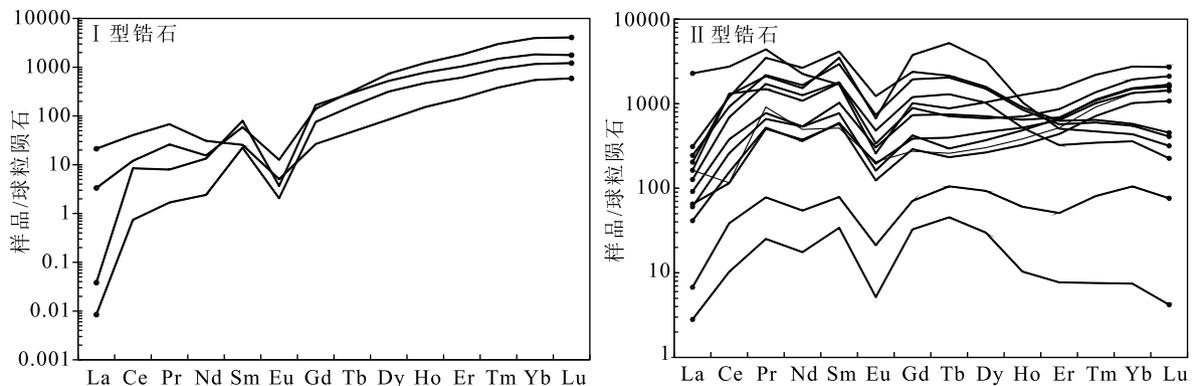


图 5 不同类型锆石球粒陨石标准化稀土元素配分模式 (标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns for different types of zircons

表1 白头山含石榴子石白云母花岗岩(BTS-13)锆石 LA-ICP-MS 主量和微量元素测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon major and trace elements of the Baitoushan garnet-bearing muscovite granites

样品	SiO ₂	Ti	Y	ZrO ₂	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Pb	Th	U
1	32.7	104	1697	61.9	19.4	33.6	362	106	382	237	26.5	224	43.3	270	54.8	171	38.8	371	60.6	11504	3.75	570	221	932	1854
2	32.7	33.7	998	62.4	4.14	59.9	111	125	353	119	17.9	83.8	15.0	115	32.6	129	32.5	329	55.5	12320	3.65	160	147	610	1888
3	32.7	818	2964	48.4	772	89.7	878	298	1175	678	64.1	594	118	573	72.3	142	21.3	136	15.6	32178	219	3529	658	4019	1969
4	32.7	4.77	284	56.6	5.86	20.6	81.5	23.9	76.1	26.6	2.67	30.1	7.91	48.5	5.20	9.05	1.61	10.6	1.05	39921	7.36	40.3	136.4	207	3089
5	32.7	0.16	40.8	58.1	0.89	0.014	0.021	0.013	0.075	0.062	0.022	2.85	1.05	6.14	0.65	1.89	0.34	2.74	0.75	60803	9.27	15.1	32.9	10.3	1235
6	32.7	52.0	1197	55.6	21.6	22.2	249	90.3	381	178	14.1	129	17.1	141	41.2	166	39.8	378	63.9	10487	8.49	921	608	3798	4727
7	32.7	102	3045	61.1	10.2	838	2621	600	1600	389	22.5	310	51.0	395	108	374	78.1	682	103	9266	3.35	996	752	5119	3221
8	32.7	11.4	808	67.2	5.27	0.65	11.3	1.63	7.98	5.89	0.33	17.9	5.61	73.0	27.1	122	30.2	295	50.4	13770	4.59	40.2	169	548	2835
9	32.7	9.99	1227	67.0	0.60	0.003	0.71	0.23	1.71	5.17	0.18	23.1	9.29	121	40.4	153	32.9	288	46.2	13337	0.40	40.2	58.5	46.0	219
10	32.7	127	381	54.7	4.77	7.79	38.6	9.27	21.9	5.90	0.44	8.13	2.66	32.2	13.0	57.3	13.6	136	22.5	8823	0.99	0.00	26.7	21.3	36.0
11	32.7	20.3	3057	66.6	1.20	1.22	11.5	3.57	11.0	13.6	1.10	43.1	18.6	281	104	450	107	983	155	13974	0.99	62.5	81.1	186	636
12	32.7	3.06	1355	63.1	6.79	15.2	148	71.2	257	137	17.0	118	23.0	176	44.3	159	36.1	332	54.4	12405	4.58	475	214	714	1978
13	32.7	13.9	1850	68.3	1.66	0.00	5.17	0.13	5.10	7.19	0.42	34.5	12.5	173	63.3	265	61.9	583	93.1	12490	0.96	48.9	35.3	188	306
14	32.7	128	2048	53.4	268	59.9	1254	204	770	406	42.0	366	75.0	390	44.2	80.7	12.3	89.1	8.61	50583	46.6	928	225	1017	1966
15	32.7	44.5	829	64.6	5.26	23.9	110	69.0	267	134	10.8	88.7	13.5	101	27.7	109	25.5	252	41.0	13314	3.87	584	238	476	2372
16	32.7	9.39	952	66.7	7.14	2.26	46.8	10.3	43.7	24.7	2.13	26.0	7.30	88.2	31.7	141	36.9	334	58.8	13544	5.02	157	203	649	2869
17	32.7	6.91	638	58.8	1.330	0.098	11.7	0.073	0.20	0.73	0.30	10.0	3.10	46.9	20.8	102	27.2	272	51.7	9532	0.62	44.3	21.4	145	206
18	32.7	0.66	274	70.5	16.9	2.48	36.9	10.7	38.7	18.2	1.85	21.7	6.11	35.5	5.14	12.7	2.88	26.1	2.90	63704	83.7	73.6	42.4	79.7	1627
19	32.7	15.2	3260	69.1	1.88	0.011	11.3	0.48	4.92	12.1	1.71	56.1	22.0	299	113	493	116	1092	173	12358	1.06	31.3	21.1	131	212
20	32.7	415	4740	52.0	571	74.8	1213	289	1085	805	58.3	1150	302	1221	88.2	126	16.7	108	12.1	43221	439	1387	296	2610	2578
21	32.7	0.84	64.2	70.2	2.74	1.03	9.83	3.45	12.5	7.86	0.45	9.99	2.63	11.4	0.88	1.92	0.27	1.85	0.16	86959	20.2	129	46.2	22.2	2125
22	32.7	4.37	1043	67.6	1.37	0.17	11.2	1.35	11.6	12.7	0.78	32.8	9.62	110	36.2	148	33.5	310	49.3	11165	0.98	0.00	87.0	404	1125
23	32.7	583	1777	64.2	15.4	46.6	661	234	894	413	29.4	272	41.1	256	59.9	214	48.7	480	80.5	9793	6.21	918	334	1505	2769
24	32.7	23.5	3199	54.0	809	114	1144	477	1889	954	107	727	124	602	77.1	156	22.9	143	17.3	42864	162	1965	396	1236	2686
25	32.7	15.4	1847	60.3	3.97	0.014	8.10	1.09	9.52	18.4	0.32	51.0	17.3	200	66.5	258	53.0	454	67.3	10055	1.92	95.5	66.6	735	817

注:主量元素含量单位为%,微量元素含量单位为 10^{-6}

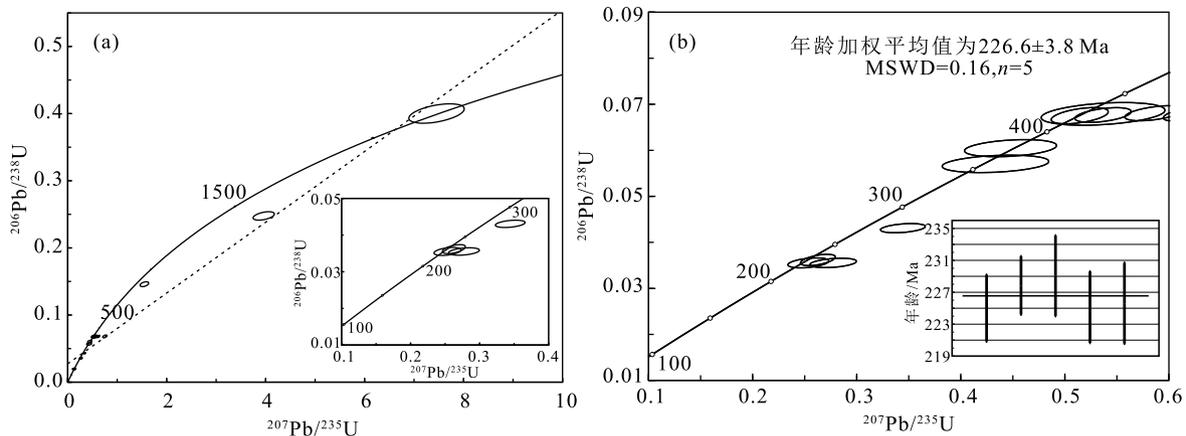


图6 白头山含石榴子石白云母花岗岩锆石 U-Pb 谐和图(a)和年龄加权平均值(b)

Fig. 6 U-Pb concordia(a) and weighted average age plots(b) of zircon grains from the Baitoushan garnet-bearing muscovite granites

4 地球化学特征

4.1 主量元素

白头山含石榴子石白云母花岗岩样品均呈高硅(73.56%~75.60%)、富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量为 8.84%~10.39%) 特征, TFe_2O_3 含量为 0.65%~0.80%, Na_2O 含量为 4.74%~6.11%, K_2O 含量为

3.06%~5.52%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.50~1.13。在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 7-a)中,样品点落入高钾钙碱性系列区域。 Al_2O_3 含量为 14.41%~15.01%, A/CNK 值为 0.98~1.14, A/NK 为 1.06~1.18, 在 $A/\text{CNK}-A/\text{NK}$ 图解中,样品点基本落入过铝质区域(图 7-b), 指示其属于过铝质花岗岩。此外,样品还具有低 Mg、Fe、Ca、P 和 Ti 的特征(表 3)。

表 2 白头山含石榴子石白云母花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 定年结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating results of the Baitoushan garnet-bearing muscovite granites

样号	类型	含量/ 10^{-6}			同位素比值						年龄/Ma					
		Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ
BTS-13																
1	II	932	1854	0.50	0.0917	0.0027	0.8544	0.0251	0.0674	0.0010	1461	57	627	14	420	6
2	II	610	1888	0.32	0.0660	0.0018	0.6216	0.0178	0.0681	0.0011	806	56	491	11	425	7
3	II	4019	1969	2.04	0.2821	0.0085	2.3886	0.1064	0.0601	0.0014	3376	47	1239	32	376	9
4	继承锆石	207	3089	0.07	0.0540	0.0023	0.4434	0.0622	0.0600	0.0087	372	96	373	44	375	53
5	/	10.3	1235	0.01	0.0577	0.0023	0.3444	0.0142	0.0431	0.0007	520	89	301	11	272	4
6	II	3798	4727	0.80	0.0795	0.0027	0.7509	0.0287	0.0682	0.0014	1187	66	569	17	425	8
7	II	5119	3221	1.59	0.0949	0.0027	0.8977	0.0279	0.0684	0.0012	1528	58	650	15	427	7
8	继承锆石	548	2835	0.19	0.0573	0.0018	0.5368	0.0179	0.0677	0.0010	506	69	436	12	422	6
9	I	46.0	219	0.21	0.1158	0.0038	3.9628	0.1424	0.2475	0.0041	1894	59	1627	29	1426	21
10	I	21.3	36.0	0.59	0.1367	0.0068	7.4552	0.3700	0.4001	0.0095	2187	86	2168	44	2170	44
11	I	186	636	0.29	0.0770	0.0026	1.5506	0.0576	0.1459	0.0024	1120	69	951	23	878	13
12	II	714	1978	0.36	0.0828	0.0034	0.7641	0.0275	0.0680	0.0011	1265	81	576	16	424	6
13	继承锆石	188	306	0.62	0.0580	0.0046	0.5368	0.0393	0.0679	0.0016	528	176	436	26	423	10
14	II	1017	1966	0.52	0.1524	0.0053	0.9316	0.0358	0.0441	0.0007	2373	54	668	19	278	5
15	II	476	2372	0.20	0.0872	0.0029	0.8333	0.0318	0.0687	0.0011	1365	64	615	18	428	7
16	继承锆石	649	2869	0.23	0.0621	0.0017	0.5859	0.0187	0.0680	0.0011	680	61	468	12	424	7
17	继承锆石	145	206	0.70	0.0549	0.0041	0.4334	0.0338	0.0571	0.0013	409	169	366	24	358	8
18	II	79.7	1627	0.05	0.0565	0.0030	0.2774	0.0148	0.0355	0.0007	472	119	249	12	225	4
19	继承锆石	131	212	0.62	0.0542	0.0038	0.4479	0.0293	0.0605	0.0012	376	157	376	21	378	7
20	II	2610	2578	1.01	0.1694	0.0091	0.8460	0.0479	0.0360	0.0006	2552	90	622	26	228	4
21	II	22.2	2125	0.01	0.0527	0.0022	0.2628	0.0111	0.0362	0.0008	317	94	237	9	229	5
22	继承锆石	404	1125	0.36	0.0552	0.0018	0.5144	0.0181	0.0675	0.0012	420	77	421	12	421	7
23	II	1505	2769	0.54	0.0952	0.0038	0.7696	0.0203	0.0600	0.0017	1532	74	580	12	376	10
24	II	1236	2686	0.46	0.2204	0.0073	1.0920	0.0486	0.0356	0.0008	2984	54	749	24	226	5
25	I	735	817	0.90	0.0524	0.0029	0.2536	0.0130	0.0355	0.0007	306	128	229	11	225	4

表3 白头山含石榴子石白云母花岗岩主量、微量和稀土元素组成

Table 3 Major, trace and rare earth element compositions of the Baitoushan garnet-bearing muscovite granites

送样编号	20BTS-05	20BTS-09	20BTS-11	20BTS-12	送样编号	20BTS-05	20BTS-09	20BTS-11	20BTS-12
SiO ₂	74.07	74.30	73.71	75.43	Hf	2.9	2.9	2.9	2.3
TiO ₂	0.01	0.01	0.01	0.01	Ta	39.2	53.2	54.1	26.0
Al ₂ O ₃	14.64	15.05	14.88	14.38	Th	4.16	3.45	3.71	3.90
TFe ₂ O ₃	0.80	0.65	0.71	0.75	U	2.41	1.41	1.76	1.31
MnO	0.19	0.14	0.16	0.12	La	5.6	3.5	4.7	6.1
MgO	0.05	0.03	0.02	0.02	Ce	13.6	9.8	12.1	14.5
CaO	0.86	0.37	0.28	0.23	Pr	1.80	1.38	1.57	1.80
Na ₂ O	6.11	5.85	4.88	4.73	Nd	7.6	5.8	6.6	7.8
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.02	Sm	3.58	3.05	3.47	3.73
K ₂ O	3.05	3.83	5.52	4.09	Eu	0.04	0.02	0.04	0.03
总计	99.80	100.25	100.20	99.78	Gd	3.60	3.80	3.82	3.83
K ₂ O+Na ₂ O	9.17	9.66	10.39	8.84	Tb	0.58	0.62	0.63	0.68
K ₂ O/Na ₂ O	0.50	0.65	1.13	0.86	Dy	2.88	2.65	2.96	3.35
A/NK	1.10	1.09	1.06	1.18	Ho	0.41	0.28	0.36	0.47
ASI	0.98	1.04	1.02	1.14	Er	0.95	0.53	0.80	1.18
刚玉	0.30	1.05	0.70	2.22	Tm	0.15	0.07	0.12	0.18
分异指数(DI)	95.10	96.88	97.43	96.24	Yb	1.09	0.48	0.75	1.44
固结指数(SI)	0.50	0.29	0.18	0.21	Lu	0.16	0.08	0.11	0.24
Li	2.1	1.5	1.5	2.9	K/Rb	27.65	24.92	35.40	25.11
Sc	2.1	1.5	1.5	2.9	Nb/Ta	2.02	1.69	1.55	3.21
Ga	40.3	40.9	40.8	39.7	Zr/Hf	7.93	6.90	7.24	9.57
Rb	933	1280	1305	1390	Y/Ho	37.80	46.43	40.28	39.57
Sr	19.7	11.0	13.4	12.2	TE _{1,3}	1.28	1.31	1.30	1.29
Y	15.5	13.0	14.5	18.6	LREE/HREE	1.50	0.91	1.21	1.51
Zr	23	20	21	22	ΣREE	42.04	32.06	38.03	45.33
Nb	79.1	90.1	84.1	83.4	Eu/Eu*	0.03	0.02	0.03	0.02
Sn	58	47	28	76	(La/Lu) _N	3.63	4.54	4.44	2.64
W	1.9	1.7	1.4	2.1	10000×Ga/Al	5.72	5.54	5.31	5.32
Cs	23.6	34.4	37.1	39.2	Zr+Nb+Ce+Y	131.2	132.9	131.7	138.5
Ba	20.7	22.6	22.5	16.5					

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10^{-6}

4.2 微量和稀土元素

白头山含石榴子石白云母花岗岩样品富集Rb、Th、U、Ta等元素,而亏损Ba、Sr、P、Ti等元素(图7-c),其中Rb平均含量高达 1227×10^{-6} ,Sr平均含量仅为 14.1×10^{-6} ,Ba平均含量为 20.6×10^{-6} ,特征性元素对平均比值 $Y/Ho=41.0$, $Nb/Ta=2.1$, $Zr/Hf=7.9$, $K/Rb=28.2$ (表3)。稀土元素总量为

$32.1 \times 10^{-6} \sim 45.3 \times 10^{-6}$,稀土元素配分模式表现为轻稀土元素相对富集的右倾型(图7-d),其中轻、重稀土元素比值(LREE/HREE)为 $0.9 \sim 1.5$, $(La/Sm)_N$ 值为 $0.72 \sim 1.93$, $(Gd/Lu)_N$ 值为 $2.8 \sim 5.91$,反映了轻稀土元素分馏程度较低,而重稀土元素分馏程度高。样品具有强烈的负Eu异常, Eu/Eu^* 值为 $0.02 \sim 0.03$ 。此外,样品呈现出明显的四分组效应($TE_{1,3}=1.28 \sim 1.31$)。

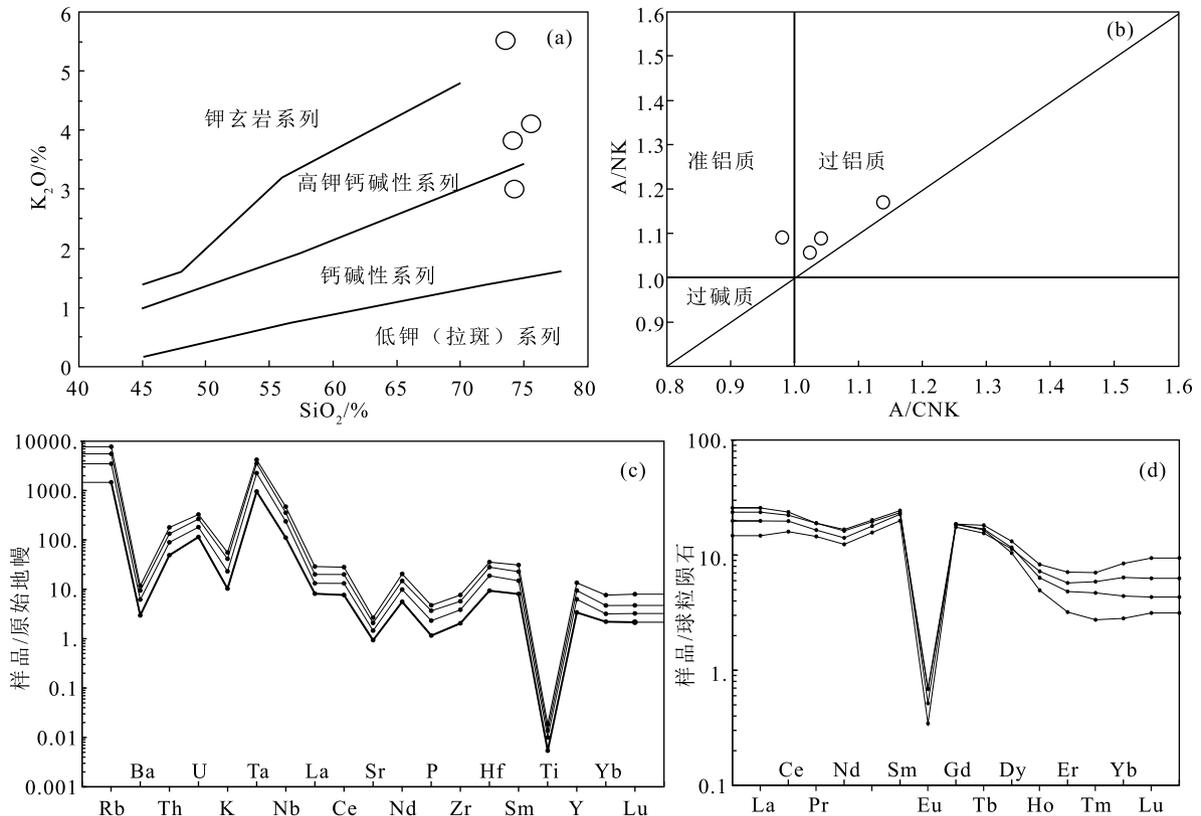


图 7 白头山含石榴子石白云母花岗岩相关图解

Fig. 7 Relevant diagrams of the Baitoushan garnet-bearing muscovite granites

a— SiO_2 - K_2O 图解(底图据 Peccerillo et al., 1976); b— A/CNK - A/NK 图解(底图据 Maniar et al., 1989); c—微量元素原始地幔标准化蛛网图(标准化值据 Sun et al., 1989); d—稀土元素球粒陨石标准化稀土元素配分模式(标准化值据 Sun et al., 1989)

5 讨论

5.1 花岗岩成因类型

白头山含石榴子石白云母花岗岩具有高硅($\text{SiO}_2 > 73.56\%$),富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量为 $8.84\% \sim 10.39\%$),低 Mg、Fe、Ca、Ti 的特征,暗示其经历了结晶分异作用。花岗岩的分异指数(DI)与固结指数(SI)是指示岩浆分离结晶程度的标志,DI 越大,SI 越小,岩浆分离结晶作用越强烈。白头山花岗岩样品的分异指数 DI 均大于 95.0,固结指数 SI 不高于 0.5(表 3),反映其经历了强烈的分离结晶作用。在微量元素特征方面,白头山含石榴子石白云母花岗岩具有 Sr 含量低(14.1×10^{-6})、Rb 含量极高(1227×10^{-6})、Rb/Sr 值高($47.36 \sim 113.93$)的特征。由于单阶段的部分熔融无法产生如此高 Rb、低 Sr 含量的花岗岩,结合其强烈的负 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.02 \sim 0.03$),认为白头山含石榴子石白云母花岗岩经历了

强烈的分离结晶作用。花岗岩 K/Rb、Zr/Hf、Nb/Ta 等地球化学行为一致元素的比值通常用来指示岩浆分异演化程度,高度分异花岗岩的上述比值会偏离正常花岗岩的 K/Rb (304)、Zr/Hf (35.5) 和 Nb/Ta (12.4) 平均值。白头山含石榴子石白云母花岗岩的 K/Rb (28.3)、Zr/Hf (7.9) 和 Nb/Ta (2.1) 值均偏离正常花岗岩,表明其具有高分异花岗岩的特征。此外,白头山花岗岩样品显示出明显的 M 型四分组效应($\text{TE}_{1,3} = 1.28 \sim 1.31$),一般来讲,四分组效应往往伴随着许多微量元素反常的地球化学行为(即 non-CHARAC 行为:高场强元素 Zr、Hf、Nb、Ta 等可以与各种配体如 F、B 等形成配合物,配合物的稳定性不再受单个元素的电荷和离子半径的限制,其比值会偏离离子电荷半径控制一定范围内的数值),而这些行为通常只发生在高度演化的岩浆系统中,表明其为典型的高分异花岗岩。

锆石是花岗岩中最重要的副矿物,在未分异/弱分异的花岗岩中,锆石属于早期结晶矿物,但在高分异花岗岩中,锆石为晚结晶矿物(Breiter et al., 2014)。发育富 Hf 锆石或低 Zr/Hf 值的锆石被认为是高分异花岗岩最重要的副矿物标志(Huang et al., 2002; Černý et al., 2012; Breiter et al., 2014)。此外,高分异花岗岩中的锆石经常具有较高的 U、Th 等含量和轻稀土元素富集特征,显示出与热液锆石类似的特征(Wang et al., 2016)。高分异花岗岩通常还含有较多的继承/捕获锆石。白头山含石榴子石白云母花岗岩中发育富 Hf(平均含量 30661.25×10^{-6})、较低 Zr/Hf 值(Zr/Hf=26.07)的锆石,锆石具有较高的 U、Th 等含量(Th = 1702.96×10^{-6} , U = 2443.02×10^{-6})和轻稀土元素富集的特征,且含有较多的继承/捕获锆石,表现出明显的高分异花岗岩锆石的特征。样品的锆石饱和温度为 612 ~ 635 °C(Gervasoni et al., 2016),平均温度为 621 °C,低于正常花岗岩的锆石饱和温度,也符合高分异花岗岩晚期结晶的特征。此外,白头山含石榴子石白云母花岗岩中发育富 Rb 的花岗伟晶岩脉,而花岗伟晶岩的发育常被认为是花岗岩浆高度分异作用的重要岩石学标志之一(London, 2008; Dill, 2015)。综上,野外地质、地球化学、矿物学、岩石学等特征均指示白头山花岗岩属于高分异花岗岩。

对于高分异花岗岩成因类型的判别,由于其化学成分都趋近于最低共熔点成分,因此不适合简单地通过矿物学和地球化学特征进行分类(吴福元等, 2007)。但是,考虑到白头山含石榴子石白云母花岗岩具有过铝质特征(A/CNK=1.05),CIPW 标准矿物中出现了刚玉分子(平均含量=1.07%,大于1%),发育石榴子石、白云母等富铝矿物,样品的 P₂O₅与 SiO₂没有明显的相关关系,Th 和 Y 含量低并随着 Rb 增加而降低,锆石饱和温度也远低于 I 型花岗岩(781°C)与 A 型花岗岩的平均温度(839°C)(King et al., 1997),结合存在继承锆石等特征,综合推测,白头山花岗岩应该属于高分异 S 型花岗岩。

5.2 花岗岩分异演化过程

尽管花岗岩经过高度分异后很难通过其现有的特征反演整个岩浆演化历史,但是根据一些关键元素的变化特征,仍可以揭示其晚期分异演化

过程。在微量元素蛛网图中,白头山含石榴子石白云母花岗岩呈现 P、Ti 和 Nb 亏损的特征,可能与磷灰石及含钛矿物(如钛铁矿、榍石等)的分离结晶作用有关(邱检生等, 2005)。Sr、Eu 含量及 Eu/Eu* 值随 DI 的增加而明显降低及 Eu 的负异常进一步表明,其经历了斜长石的分离结晶作用(图 8-a、b、c); CaO 含量随着 DI 的增加而降低(图 8-d),指示了斜长石和/或磷灰石的分离结晶作用;随着 DI 的增高,Th 含量显著降低,可能指示了独居石的分离结晶作用(图 8-e);而 P₂O₅ 含量很低,且在不同样品之间几乎没有差别,因此,磷灰石不应是岩浆演化晚期阶段的重要分离相矿物。Zr 含量随着分异指数增大而降低(图 8-f),以及 Zr 与 A/NK 呈正相关关系(图 8-g),指示了锆石的分离结晶;Ta 与 Ta/Nb 呈正相关关系(图 8-h),表明白头山花岗岩经历了云母的分离结晶。

白头山含石榴子石白云母花岗岩样品呈现出明显的四分组效应($TE_{1,3} = 1.28 \sim 1.31$)。通常认为,只有流体存在的多元体系条件下演化的岩浆经历熔体-流体的分离、流体-气体的分离,并发生岩石-流体的相互作用才能形成具有稀土元素四分组效应的高分异花岗岩(吴福元等, 2017)。此外,白头山含石榴子石白云母花岗岩中的 Zr/Hf、Nb/Ta、Y/Ho、K/Rb 等特征性元素对比值也发生了显著分异,均偏离大陆地壳平均值(Rudnick et al., 2014)。Zr/Hf 值介于 6.9~9.57 之间,低于大陆地壳的平均值 35.5; Nb/Ta 值介于 1.6~3.2 之间,低于大陆地壳的平均值 12.4; Y/Ho 值介于 37.8~46.4 之间,高于大陆地壳平均值 24.7; K/Rb 值介于 24.9~39.4 之间,远低于大陆地壳平均值 304,表现出明显的 non-CHARAC 特征(图 9)。花岗岩中的上述特征性元素对分配系数相近,在正常的岩浆体系中不会发生显著分异,只有因岩浆强烈分异演化而发生性质上的明显改变时,特征性元素对比值才会发生显著变化。

白头山含石榴子石白云母花岗岩具有稀土元素四分组效应特征,以及微量元素的上述 non-CHARAC 行为,结合极强的负 Eu 异常,表明微量元素地球化学行为在岩浆分异演化晚期已不受价态和离子半径控制。通常认为,这是岩浆体系中含水流体相作用的结果(Bau, 1996; Jahn et al., 2001),指示白头山含石榴子石白云母花岗岩在分

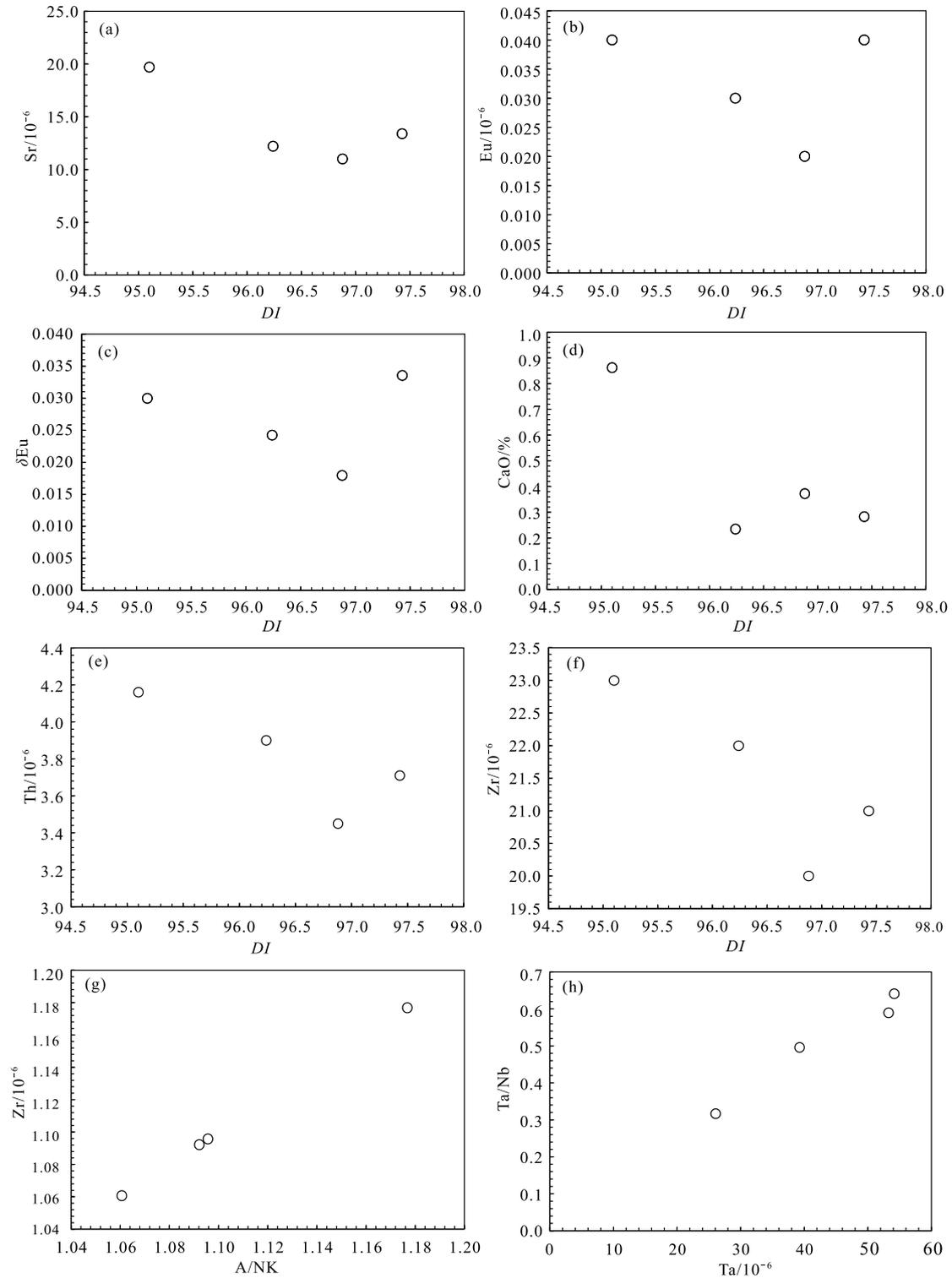


图 8 白头山含石榴子石白云母花岗岩元素特征相关性图

Fig. 8 Correlation diagrams of element characteristics in the Baitoushan garnet-bearing muscovite granites

异演化过程中有流体相出溶,其经历了熔流体相互作用。事实上,高度演化的岩浆系统通常会大量富

集含 H₂O 及 B、F、Cl 等挥发分元素的流体,岩浆中各组分相互作用使稀土元素等特征性元素发生特

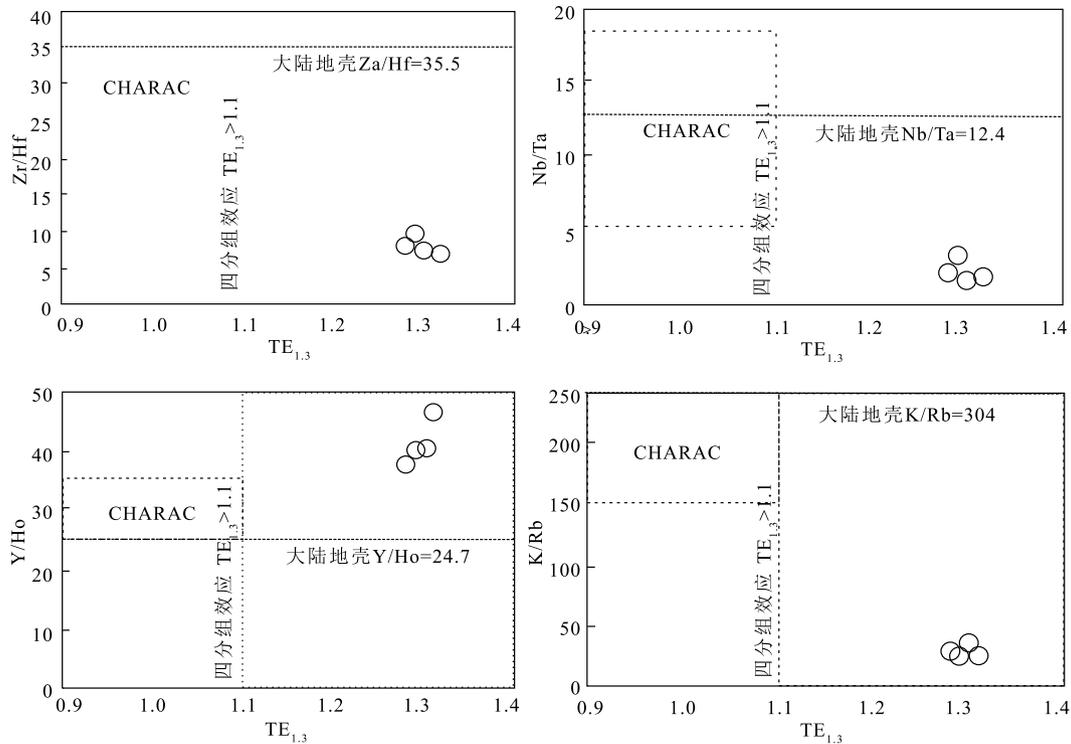


图9 白头山含石榴子石白云母花岗岩四分组效应与特征性元素对比值图解

(CHARAC(受离子电荷半径控制的)范围据 Bau, 1996; Ballouard et al., 2016; 大陆地壳范围据 Rudnick et al., 2014)

Fig. 9 Diagrams of tetrad effect and the ratio of characteristic element pairs of the Baitoushan garnet-bearing muscovite granites and continental rocks

殊配位作用,从而导致它们发生显著分异,并显示出稀土元素四分组效应和特征性元素 non-CHARAC 行为(Bau, 1996; Irber, 1999)。结合白头山花岗岩发育萤石等富氟矿物,暗示其演化晚期经历了富 F 流体的出溶和熔体相互作用。

5.3 对稀有金属铷富集成矿的启示

大量研究证明,随着花岗质岩浆结晶分异作用的进行,由于无水或少水矿物的晶出,残余熔体中的水含量会逐渐增多,在达到饱和或过饱和后,会发生液相分离,出现富含 H_2O 及其他挥发性组分的独立流体相,从而进入一种以熔体相、晶体相和流体相三相平衡为主要特征的岩浆-热液过渡阶段(朱金初等, 2000)。白头山含石榴子石白云母高分异花岗岩的岩石学、矿物学和全岩主量和微量元素特征等表明,在其形成过程中不仅经历了高度的结晶分异作用,还经历了有流体相活动的岩浆-热液过渡阶段。花岗质岩浆的高度分异造成残余岩浆中 K、Rb 等大离子亲石元素的逐步富集,而 F、Cl、 H_2O 等挥发分存在,则降低了残余岩浆的固相线

温度,使残余岩浆演化时间延长。F 与高场强元素 (Ta、Nb、Zr、Hf 及 HREE) 的络合作用,延迟了它们在花岗质岩浆中的晶出时间并向晚期的残余岩浆聚集(Ballouard et al., 2016)。

对于花岗岩(包括花岗伟晶岩)型铷矿中铷的富集和成矿机制,目前研究较少。通常认为,岩浆分离结晶、岩浆-热液转换(过渡)及流体作用是稀有金属富集成矿的重要过程(Linnen et al., 2012)。高分异花岗岩经过高度演化而形成,在演化过程中会在熔体中不断地富集稀有金属元素。随着岩浆结晶分异作用的进行,岩浆流体也越来越富集稀有金属元素,后期富集的流体将熔体中稀有金属元素带出聚集形成稀有金属矿床(黄春梅等, 2018)。稀有金属花岗岩的形成通常反映出多元体系条件下分离结晶作用和岩浆期后的热液作用。高分异花岗质岩浆的结晶分异作用导致 Rb 在残余岩浆中富集,当晚期的富钾矿物(钾长石和白云母)结晶时, Rb 替代这些矿物中的 K, 出现富 Rb 钾长石(天河石)和富 Rb 白云母(铁锂云母),从而形成富 Rb 花

岗岩(吴昌志等,2021)。此外,白头山含石榴子石白云母花岗岩不仅经历了强烈结晶分异作用,还经历了晚期熔流体相互作用,而强烈的岩浆/流体分异演化过程对于白头山铷矿的富集成矿具有重要作用。因此,铷等稀有金属富集成矿是强烈分离结晶作用和富氟等流体作用的共同结果。

Nb/Ta 值被认为是区分无矿和矿化过铝质花岗岩的重要指标(Ballouard et al.,2016),采用 Nb/Ta 值临界值 5 作为过铝质花岗岩岩浆-热液转换的标志,判别稀有金属成矿作用有关的花岗岩,有助于确定过铝质花岗岩的成矿潜力(周延庆,2020)。白头山含石榴子石白云母花岗岩的 Nb/Ta 值均小于 5, K/Rb 值小于 100, Sr/Ba 均低于 80×10^{-6} , 并且具有明显的负 Eu 异常和稀土元素四分组效应,与岩浆-热液系统下的稀有金属矿化花岗岩一致(王楠等,2020)(图 10)。这进一步说明,具有 Nb/Ta 值小于 5 和稀土元素四分组效应等特殊标志的高分异花岗岩,具有良好的稀有金属成矿潜力,是稀有金属找矿勘探的重要目标。

随着近年来的研究深入,越来越多的东天山—北山地区印支期岩浆活动和成矿事件被报道(李华芹等,2004;朱永峰,2007;王清利,2008;Li et al.,2012;Zhu et al.,2012)。本次研究发现,白头山高分异花岗岩亦形成于三叠纪,表明印支期是东天山—北山地区高分异花岗岩和伴生稀有金属形成的重要阶段(Zhi et al.,2021),该时期高分异花岗岩是研究区稀有金属找矿勘探的重要目标。

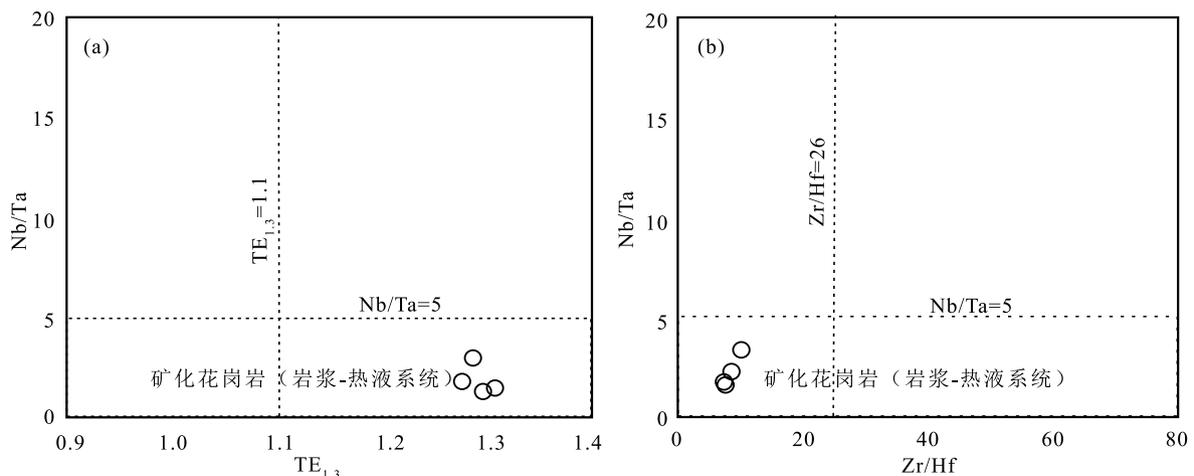


图 10 白头山含石榴子石白云母花岗岩 $TE_{1,3}$ -Nb/Ta 图解(a)和 Zr/Hf-Nb/Ta 图解(b)

(据 Ballouard et al.,2016;Sami et al.,2018)

Fig. 10 $TE_{1,3}$ -Nb/Ta diagram(a) and Zr/Hf-Nb/Ta diagram(b) of the Baitoushan garnet-bearing muscovite granites

6 结论

(1)北山白头山含石榴子石白云母花岗岩的形成时代为 226.6 ± 3.8 Ma,即为印支期,该时期是东天山—北山地区高分异花岗岩和伴生稀有金属形成的重要阶段。

(2)白头山含石榴子石白云母花岗岩具有高硅富碱,低 Mg、Fe、Ca、P、Ti 的特征,呈过铝质,富集 Rb、Th、U、Ta,具有明显的 Ba、Sr、P、Ti 和 Eu 负异常,以及明显的稀土元素四分组效应。

(3)岩石学、矿物学和地球化学特征指示,白头山含石榴子石白云母花岗岩属于高分异 S 型花岗岩,在岩浆演化过程中该花岗岩体系可能发生了云母、斜长石、锆石等矿物的结晶分异作用。

(4)稀土元素四分组效应及伴随的特征性元素对的 non-CHARAC 行为,反映该岩体经历了溶体流体相互作用,而强烈的岩浆/流体分异演化过程对于铷的富集成矿具有重要作用。

致谢:感谢甘肃省地质调查院李通国和张有奎工程师在资料收集和野外工作中提供的帮助,感谢长安大学张凯硕士和南京大学陈博洋硕士在样品采集和处理过程中提供的帮助,两位审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

注释

①甘肃省地质调查院.甘肃省肃北县白头山铷矿普查报告[R].2017.

参考文献

- Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, et al. Nb - Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic - hydrothermal transition[J]. *Geology*, 2016, 44(3): 231-234.
- Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, 123(3): 323-333.
- Breiter K, Lamaso C N, Kras Borges R M, et al. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites[J]. *Lithos*, 2014, 192: 208-225.
- Burnham C W. Magmas and hydrothermal fluids [J]. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 1979: 71-136.
- Černý P, Halden N M, Ferreira K, et al. Extreme fractionation and deformation of the leucogranite - pegmatite suite at Red Cross lake, Manitoba, Canada. II. Petrology of the leucogranites and pegmatites [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2012, 50(6): 1807-1822.
- Chen B, Ma X, Wang Z. Origin of the fluorine-rich highly differentiated granites from the Qianlishan composite plutons (South China) and implications for polymetallic mineralization [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 93: 301-314.
- Chen B Y, Wu C Z, Brzozowski M J, et al. Geochronology and tectonic setting of the giant Guobaoshan Rb deposit, Central Tianshan, NW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 141.
- Clarke D B. The mineralogy of peraluminous granites; a review [J]. *The Canadian Mineralogist*, 1981, 19(1): 3-17.
- Dill H G. Pegmatites and aplites: Their genetic and applied ore geology [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 69: 417-561.
- Dingwell D B, Scarfe C M, Cronin D J. The effect of fluorine on viscosities in the system $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$: implications for phonolites, trachytes and rhyolites [J]. *GeoScience World*, 1985, 70(1/2): 80-87.
- Gervasoni F, Klemme S, Rocha-Junior E R V, et al. Zircon saturation in silicate melts: a new and improved model for aluminous and alkaline melts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2016, 171(3): 21.
- He Z Y, Klemd R, Yan L L, et al. The origin and crustal evolution of microcontinents in the Beishan orogen of the southern Central Asian Orogenic Belt [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 1-14.
- Helmy H M, Kaindl R, Shibata T. Genetically related Mo-Bi-Ag and U-F mineralization in A-type granite, Gabal Gattar, Eastern Desert, Egypt [J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 62: 181-190.
- Huang L, Jiang S. Zircon U - Pb geochronology, geochemistry and petrogenesis of the porphyric-like muscovite granite in the Dahutang tungsten deposit, Jiangxi Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(12): 3887-3900.
- Huang X L, Wang R C, Chen X M, et al. Vertical variations in the mineralogy of the Yichun topaz - lepidolite granite, Jiangxi Province, southern China [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2002, 40(4): 1047-1068.
- Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(3/4): 489-508.
- Jahn B M, Wu F, Capdevila R, et al. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China [J]. *Lithos*, 2001, 59(4): 171-198.
- Keppler H, Wyllie P J. Partitioning of Cu, Sn, Mo, W, U, and Th between melt and aqueous fluid in the systems haplogranite - $\text{H}_2\text{O} - \text{HCl}$ and haplogranite - $\text{H}_2\text{O} - \text{HF}$ [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1991, 109(2): 139-150.
- King P L, White A, Chappell B W, et al. Characterization and Origin of Aluminous A-type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(3): 371-391.
- Linnen, R L, Lichtervelde V, et al. Granitic pegmatites as sources of strategic metals [J]. *Elements*, 2012, 8(4): 275-280.
- Linnen R L, Cuney M. Granite - related rare - element deposits and experimental constraints on Ta - Nb - W - Sn - Zr - Hf mineralization [C] // Linnen R L, Samson I M. Rare - element geochemistry and mineral deposits. Geological Association of Canada, GAC, Short Course, 2005.
- Li S, Wang T, Wilde S A, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Triassic granitoids from Beishan, NW China [J]. *Lithos*, 2012, 134/135: 123-145.
- Liu Y, Hu Z, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA - ICP - MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1): 34-43.
- London D. Pegmatites [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2008, 10: 1-347.
- Ludwig K R. ISOPLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication [J]. *US Geol. Sur. Open File Rep.*, 2003, 39: 91-445.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635-643.
- Mysen B O, Cody G D. Solubility and solution mechanism of H_2O in alkali silicate melts and glasses at high pressure and temperature [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(24): 5113-5126.
- Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc - alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58: 63-81.
- Rudnick R L, Gao S. 4.1 - Composition of the Continental Crust [C] // Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*. Oxford; Elsevier, 2014: 1-51.
- Sami M, Ntaflou T, Farahat E S, et al. Petrogenesis and geodynamic implications of Ediacaran highly fractionated A-type granitoids in the north Arabian - Nubian Shield (Egypt): constraints from whole - rock geochemistry and Sr - Nd isotopes [J]. *Lithos*, 2018, 304: 329-346.
- Sengör M C A, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364(6435): 299-307.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.

- Tao J H, Li W X, Li X H, et al. Petrogenesis of early Yanshanian highly evolved granites in the Longyuanba area, southern Jiangxi Province: Evidence from zircon U-Pb dating, Hf-O isotope and whole-rock geochemistry[J]. Science China(Earth Sciences), 2013, 56(6): 922-939.
- Wang X, Chen J, Ren M. Hydrothermal zircon geochronology: Age constraint on Nanling Range tungsten mineralization(Southeast China)[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 74: 63-75.
- Webster J D, Rebbert C R. Experimental investigation of H₂O and Cl-solubilities in F-enriched silicate liquids; implications for volatile saturation of topaz rhyolite magmas[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1998, 132(2): 198-207.
- Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage[J]. American Journal of Science, 2011, 310(10): 1553-1594.
- Zhi J, Lei R X, Chen B Y, et al. Zircon genesis and geochronology for the Zhangbaoshan super-large rubidium deposit in the eastern Tianshan, NW China: Implication to magmatic-hydrothermal evolution and mineralization processes[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9. DOI: 10.3389/feart.2021.682720.
- Zhu J, Lü X, Cao X, et al. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and kinetics of the Huaniushan A-type granite in Northwest China[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2012, 31(1): 85-94.
- 黄春梅, 李光明, 张志, 等. 藏南错那洞淡色花岗岩成因: 来自全岩地球化学和锆石 U-Pb 年龄的约束[J]. 地学前缘, 2018, 25(6): 182-195.
- 李华芹, 陈富文. 中国新疆区域成矿作用年代学[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1-391.
- 李舫, 王涛, 童英. 中亚造山系中南段早中生代花岗岩类时空分布特征及构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 642-662.
- 李通国, 梁明宏, 余君鹏, 等. 甘肃省稀有(稀土)金属成矿地质背景研究[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- 刘志超, 刘小驰, 俞良军, 等. 喜马拉雅康巴淡色花岗岩的高分异成因及岩浆-热液演化特征[J]. 南京大学学报(自然科学), 2020a, 56(6): 800-814.
- 刘志超, 吴福元, 刘小驰, 等. 喜马拉雅淡色花岗岩结晶分异机制概述[J]. 岩石学报, 2020b, 36(12): 3551-3571.
- 毛景文, 李红艳, 裴荣富. 湖南千里山花岗岩体的 Nd-Sr 同位素及岩石成因研究[J]. 矿床地质, 1995, 3: 235-242.
- 苗来成, 朱明帅, 张福勤. 北山地区中生代岩浆活动与成矿构造背景分析[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1190-1204.
- 聂凤军, 江思宏, 赵省民, 等. 北山北带古生代岩浆活动与金矿床的形成[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 4: 228.
- 邱检生, 胡建, 王孝磊, 等. 广东河源白石岗岩体: 一个高分异的 I 型花岗岩[J]. 地质学报, 2005, 4: 503-514.
- 任云伟, 任邦方, 牛文超, 等. 内蒙古哈珠地区石炭纪白山组火山岩: 北山北部晚古生代活动陆缘岩浆作用的产物[J]. 地球科学, 2019, 44(1): 312-327.
- 谭洪旗, 吕富强, 李超, 等. 川西滴雍山高分异花岗岩与辉钼矿的成因联系[J/OL]. 地球科学. 2022: 1-23.
- 王楠, 刘治博, 宋扬, 等. 西藏班戈地区早白垩世高分异花岗岩年代学及岩石成因[J]. 岩石学报, 2020, 36(2): 409-425.
- 王清利. 天山及邻区古生代构造-岩浆-成矿事件年代学研究[D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2008.
- 王鑫玉, 袁超, 龙晓平, 等. 北山造山带尖山和石板井花岗岩年代学、地球化学研究及其地质意义[J]. 地球化学, 2018, 47(1): 63-78.
- 吴昌志, 贾力, 雷如雄, 等. 中亚造山带天河石花岗岩及相关铷矿床的主要特征与研究进展[J]. 岩石学报, 2021, 37(9): 2604-2628.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 6: 1217-1238.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(7): 745-765.
- 于俊博. 甘肃北山成矿带白头山地球化学特征研究[D]. 中国地质科学院硕士学位论文, 2015.
- 袁禹. 北山造山带大陆地壳的形成与演化[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2019.
- 张天福, 郭硕, 辛后田, 等. 大兴安岭南段维拉斯托高分异花岗岩体的成因与演化及其对 Sn-(Li-Rb-Nb-Ta) 多金属成矿作用的制约[J]. 地球科学, 2019, 44(1): 248-267.
- 赵振华, 增田彰正, 夏巴尼. M.B. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应[J]. 地球化学, 1992, (3): 221-233.
- 周延庆. 西藏虾别错地区花岗岩的地球化学特征及地质意义[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2020.
- 朱金初, 吴长年, 刘昌实, 等. 新疆阿尔泰可可托海 3 号伟晶岩脉岩浆——热液演化和成因[J]. 高校地质学报, 2000, (1): 40-52.
- 朱永峰. 新疆的印支运动与成矿[J]. 地质通报, 2007, (5): 510-519.
- 左国朝, 张淑玲, 何国琦, 等. 北山地区早古生代板块构造特征[J]. 地质科学, 1990, (4): 305-314.
- 左国朝, 刘义科, 刘春燕. 甘新蒙北山地区构造格局及演化[J]. 甘肃地质学报, 2003, (1): 1-15.