

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.11.012

新疆西天山备战铁矿花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其构造成因

徐胜利

XU Shengli

中化地质矿山总局陕西地质勘查院,陕西 西安 710000

Shaanxi Geological Exploration Institute of Geology and Mine Bureau, Xi'an 710000, Shaanxi, China

摘要:西天山阿吾拉勒成矿带是中国重要的铁成矿带之一,但目前对该成矿带上的铁矿成因类型和成矿构造环境仍存在争议,主要原因是对赋铁矿火山岩和侵入其中的花岗岩缺乏深入研究,特别是对可能与成矿有关的花岗岩研究更少。通过对该成矿带中的备战铁矿区花岗岩进行锆石 U-Pb 测年和岩石地球化学研究,探讨其成因及构造环境,为西天山地区铁矿成因提供新信息。对备战矿区花岗岩进行 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,获得正长花岗岩年龄为 321.5 ± 3.6 Ma,花岗斑岩年龄为 308 ± 1.2 Ma,均形成于晚石炭世。岩石地球化学特征显示,该区花岗岩具有高钾钙碱性、准铝质特征;稀土元素球粒陨石标准化分布图表现为左陡右缓,Eu 强烈负异常;微量元素分析结果显示,富集 Rb、K、Th、Sr、U 等,亏损 Ba、Nb、Ta、Ti、P 等元素,结合构造环境判别图解,认为其形成于后碰撞环境。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别介于 5.7~13.3 和 7.5~12.5 之间,平均值为 10.91 和 10.06,为较高的正值,Hf 二阶段模式年龄分别介于 479~947 Ma 和 526~843 Ma 之间,平均值为 700 Ma 和 679 Ma。综合前人研究成果,认为晚石炭世西天山阿吾拉勒铁成矿带主要形成于由汇聚向伸展演化的后碰撞造山的构造转折期,此时由于岩石圈拆沉导致地幔物质底侵下地壳发生部分熔融作用,最终形成了晚石炭世备战铁矿花岗岩。

关键词:西天山;Hf 同位素;锆石 U-Pb 年龄;构造演化;备战铁矿;矿产勘查工程;新疆

中图分类号:P618.31;P588.12⁺¹ **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)11-1954-13

Xu S L. Zircon U-Pb age and tectonic genesis of the granite in the Beizhan iron ore deposit of western Tianshan, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(11): 1954-1966

Abstract: The Awulale Mineralization Belt in the Western Tianshan Mountains is one of the important iron mineralization belts in China, but there is still controversy over the genetic types and tectonic environment of iron deposits in this mineralization belt. The main reason for the inconsistency in understanding is the lack of in-depth research on the iron-bearing volcanic rocks and granites intruded into them, especially on the granites that may be related to mineralization. By studying the zircon U-Pb age and rock geochemical data of the granites in the Beizhan iron mining area of the Awulale Metallogenic Belt, this paper aims to explore their genesis and tectonic environment and provide new information on the genesis of iron deposits in the Western Tianshan. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of the granites in the Beizhan iron mining area represent that the age of the K-feldspar granite is 321.5 ± 3.6 Ma, and the age of the granite porphyry is 308 ± 1.2 Ma, which was formed in Late Carboniferous. The geochemical characteristics of the rock samples show that they have high $K_2O + CaO$ contents and are characterized by quasi-aluminous features; the chondrite normalized distribution pattern of rare earth elements shows steep left and gentle right, and δEu value is strongly negative; trace elements analysis show enrichment in Rb, K, Th, Sr, U, etc., and depletion in Ba, Nb, Ta, Ti, P and other elements. Combined with the tectonic environment discrimination diagrams, it is believed that they were formed in a post-collisional environment. The $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range between 5.7~13.3 and 7.5~12.5, with average values of 10.91 and 10.06 respectively, which are higher positive values. The Hf two-stage mode ages t_{MD2} are between 479~947 Ma and 526~843 Ma, with average ages of 700 Ma and 679 Ma, respectively. Based on comprehensive regional research results, it is

收稿日期:2021-08-25;修订日期:2021-10-21

资助项目:中国地质调查局项目《新疆和静县敦德-备战铁矿调查评价》(编号:1212011120494)

作者简介:徐胜利(1971-),男,高级工程师,从事区域地质矿产调查。E-mail:505040091@qq.com

believed that the Late Carboniferous Awulale Iron Metallogenic Belt of Western Tianshan was formed in a period of tectonic transition, and may be post-collision stage from convergence to extension evolution. During this period, granite in Beizhan region was formed.

Key words: western Tianshan; Hf isotope; zircon U-Pb age; tectonic evolution; Beizhan iron deposit; mineral exploration engineering; Xinjiang

中亚造山带(CAOB)位于西伯利亚克拉通、塔里木克拉通和华北克拉通之间(图 1-a),是世界上现存最复杂的复合增生型造山带之一(Xiao et al., 2015; Wang et al., 2017),也是显生宙大陆壳生长最显著的地区(Xiao et al., 2003; 高俊等,2009),明显区别于安第斯型和阿尔卑斯-喜马拉雅型造山带。中国境内的西天山位于中亚造山带的西南缘,是其重要的组成部分,从北至南以北天山断裂带、尼古拉耶夫-那拉提北坡断裂带、中天山南缘缝合带及塔里木北缘断裂带为界,将西天山划分为北天山构造带、伊犁地块、中天山地块和南天山构造带(图 1-b)。

西天山是中亚造山带的重要组成部分,也是中国重要的铁、铜成矿带(左国朝等,2008;董连慧等,2011; 汪帮耀等,2017, 潘鸿迪等,2022; 李凤明等,2023, 王盟等,2023),其中阿吾拉勒地区又是西天山最重要的次级铁成矿带(董连慧等,2011)。阿吾拉勒成矿带分布在伊犁地块的东北缘,东西长 380 km,南北宽 20~30 km,自东向西已发现备战、敦德、智博、查岗诺尔、尼新塔格、松湖、式可布台等中大型铁矿(图 2)。目前,关于这些铁矿的研究主要集中于赋存铁矿床的火山岩研究,对于该套火山岩形成的构造环境存在 2 种不同认识:一种观点认为形成于裂谷拉伸环境(Qian et al., 2009)或与地幔柱有关(夏林圻等,2004);另一种观点认为形成于岛弧构造环境(王博等,2007; 龙灵利等,2008)。对于铁矿床的成因类型,目前的认识也有 3 种:①火山沉积喷气改造型(赵仁夫等,2006; 郭新成等,2009);②岩浆-热液复合型(冯金星,2010; 董连慧等,2011; 汪帮耀等,2011; Jiang et al., 2014);③矽卡岩型(刘学良等,2013; Duan et al., 2014; 葛松胜等,2014)。究其原因主要是对赋铁矿火山岩和侵入其中的花岗岩缺乏深入研究,特别是对可能与成矿有关的花岗岩研究更少。因此,本文以备战铁矿区花岗岩为研究对象,通过岩相学、锆石 U-Pb 测年和元素地球化学特征研究,探讨区域构造背景演化,以期对该区铁矿床的成因研究提供新的佐证。

1 地质概况

研究区位于伊犁地块北缘阿吾拉勒地区东段

备战铁矿矿区,出露地层主要为下石炭统大哈拉军山组和第四系坡积物、冰碛物,下石炭统大哈拉军山组为一套滨海相火山-沉积岩组合,分为 4 段。备战铁矿出露的第三段和第四段,为一套熔岩-火山碎屑岩-砂岩、灰岩组合。

矿区侵入岩以花岗岩为主,分布在矿区西南部,沿 110°~290°方向展布,南北宽 1700 m,东西长逾 4000 m,岩性主要为正长花岗岩和花岗斑岩,其次为闪长岩,主要出露在矿区北部,以岩墙或岩床侵入下石炭统大哈拉军山组。此外,区内还存在少量辉绿岩,呈脉状近东西向展布,侵入早石炭世大哈拉军山组(图 3)。沿酸性岩体与大理岩接触带发育少量矽卡岩。其中,正长花岗岩出露面积较大,主要出露于矿区南部及西部。矿区正长花岗岩边缘局部相变为石英正长斑岩,东部与花岗斑岩为超动式侵入接触关系。正长花岗岩岩体边部近矿体处由于岩浆快速冷凝,矿物结晶细小,具隐晶-霏细结构;花岗斑岩小面出露于矿区南部冰川附近,呈脉状或岩枝状产出。侵入于正长花岗岩之中,宽 370~450 m。

正长花岗岩: 浅肉红色-灰白色,在矿区南部出露面积较大。岩石具有块状构造,半自形-他形粒状结构,局部为斑状结构。主要组成矿物为条纹长石(60%~65%)、石英(20%~25%)、少量更-中长石、黑云母等,且长英质矿物粒径多在 0.2~0.6 mm 之间。副矿物为磁铁矿、榍石、磷灰石等。岩石中条纹长石部分发生高岭土化(图 4-a,c)。

花岗斑岩: 浅肉红色-灰白色,似斑状结构,块状构造。斑晶成分为条纹长石、石英,少见微斜长石、角闪石、黑云母。其中长石呈板条状,粒径 1.3~3.2 mm,含量约 20%,石英溶蚀呈浑圆状。基质为细粒半自形粒状结构,主要由条纹长石、微斜长石和少量更-中长石组成(图 4-b,d)。

2 测试方法

样品经过破碎、磁选和重选后,在双目镜下根据锆石颜色、自形程度、形态等特征初步分类,挑选具有代表性的锆石。将锆石样品分别用双面胶粘

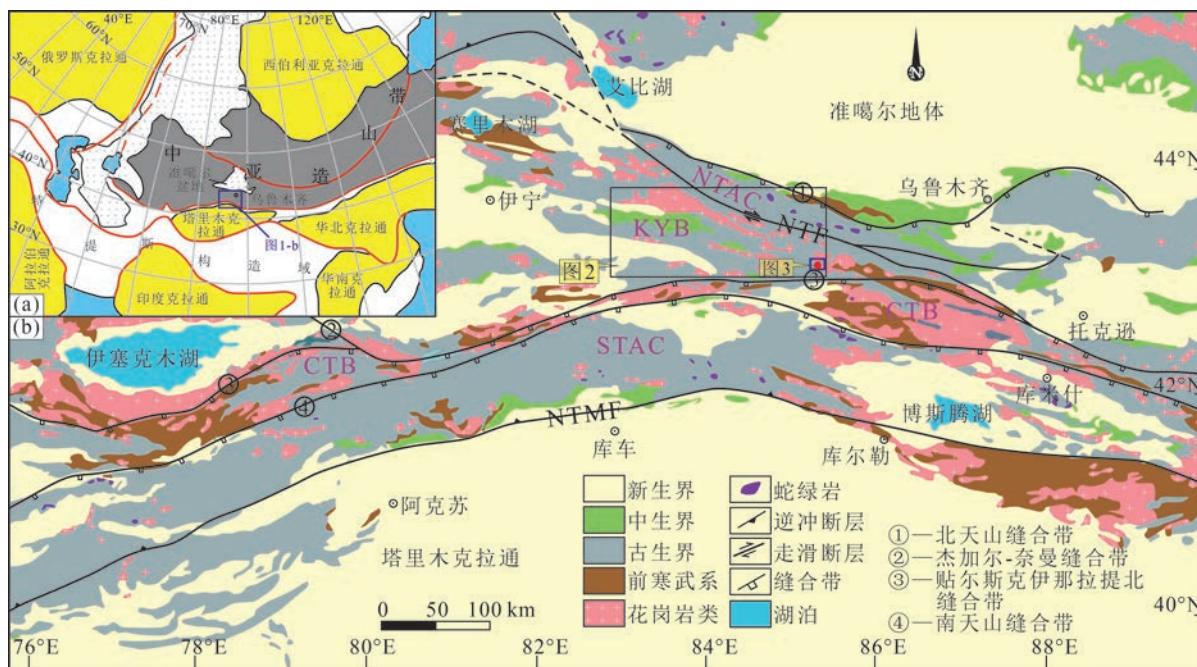


图1 西天山构造简图(据 Wang et al., 2017)

Fig. 1 Tectonic sketch of western Tianshan

NTAC—北天山增生杂岩带; CTB—中天山地块; KYB—伊犁地块; STAC—南天山增生杂岩带;

NTF—北天山断裂; NTMF—塔里木北缘主断裂

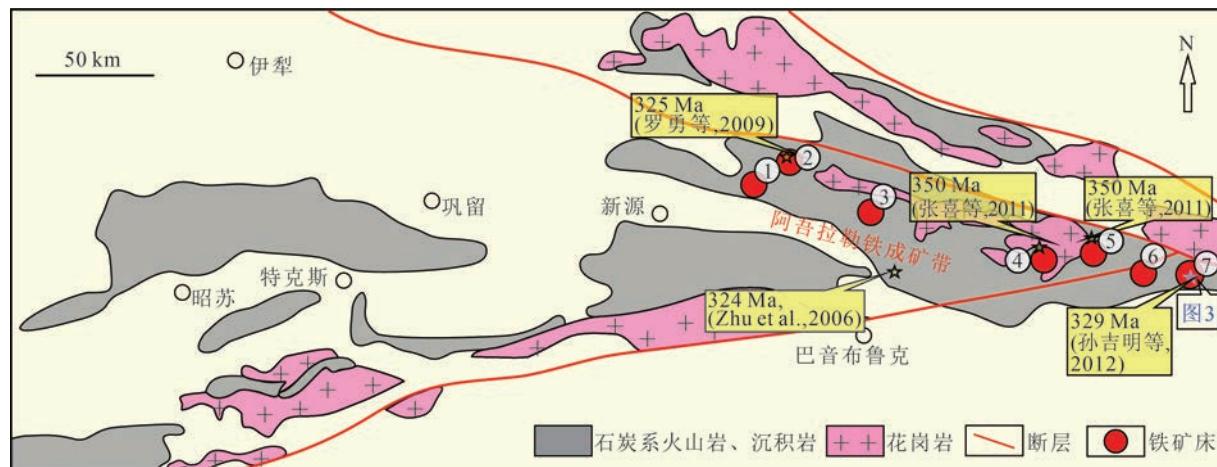


图2 西天山区域地质矿产简图

Fig. 2 Regional geological minerals map of western Tianshan

①—式可布台铁矿; ②—松湖铁矿; ③—尼新塔格铁矿; ④—查岗诺尔铁矿; ⑤—智博铁矿; ⑥—敦德铁矿; ⑦—备战铁矿

在载玻片上进行抛光, 直到样品露出一个光洁的平面, 使锆石充分暴露, 然后进行阴极发光(CL)图像和LA-ICP-MS分析。锆石微区原位U-Pb定年测试在中国地质科学院矿产资源研究所LA-MC-ICP-MS实验室完成, 所用仪器为 Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及与之配套的 New wave UP 213 激光剥蚀

系统。激光剥蚀所用斑束直径为 25 μm, 频率为 10 Hz, 能量密度约为 2.5 J/cm², 以氦为载气。分析原理和流程参考前人文献(Anderson, 2002; 侯可军等, 2009; 王岚等, 2012)。单次测量结果列于表 2, 使用 Isoplot 3.23 程序 (Ludwig, 1999) 处理数据和计算年龄, 年龄加权平均值具有 95% 的置信度。

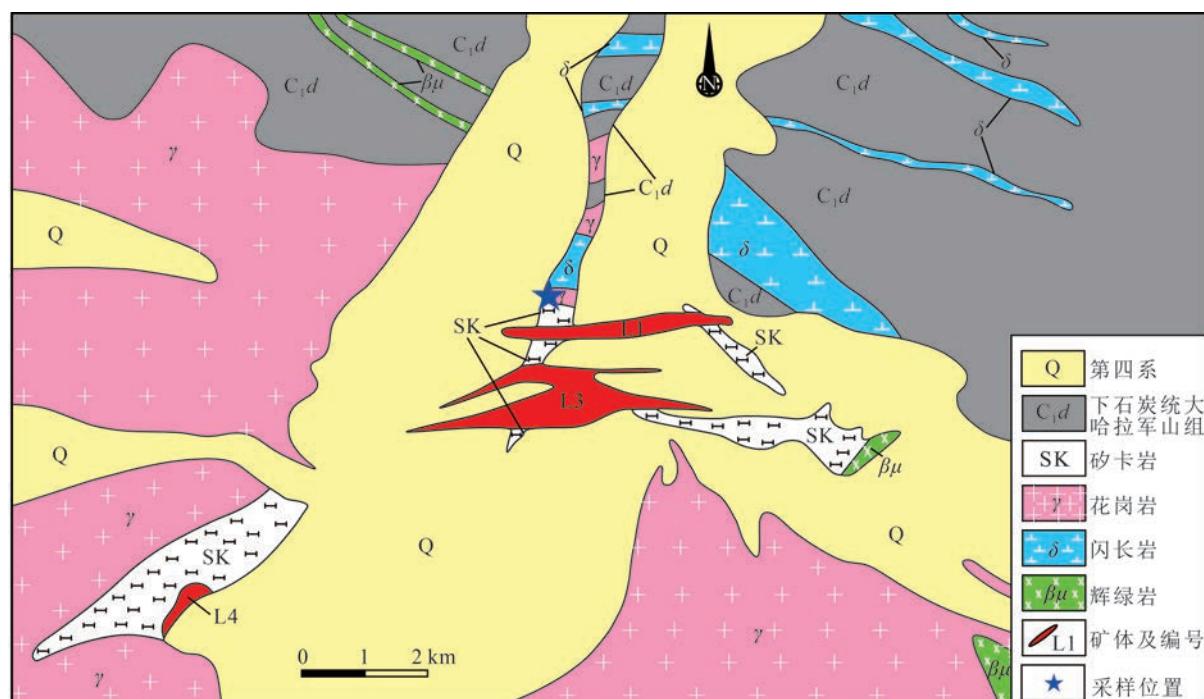


图 3 备战矿区地质矿产简图(据郭新成等,2009)

Fig. 3 Geological map of the Beizhan iron deposit

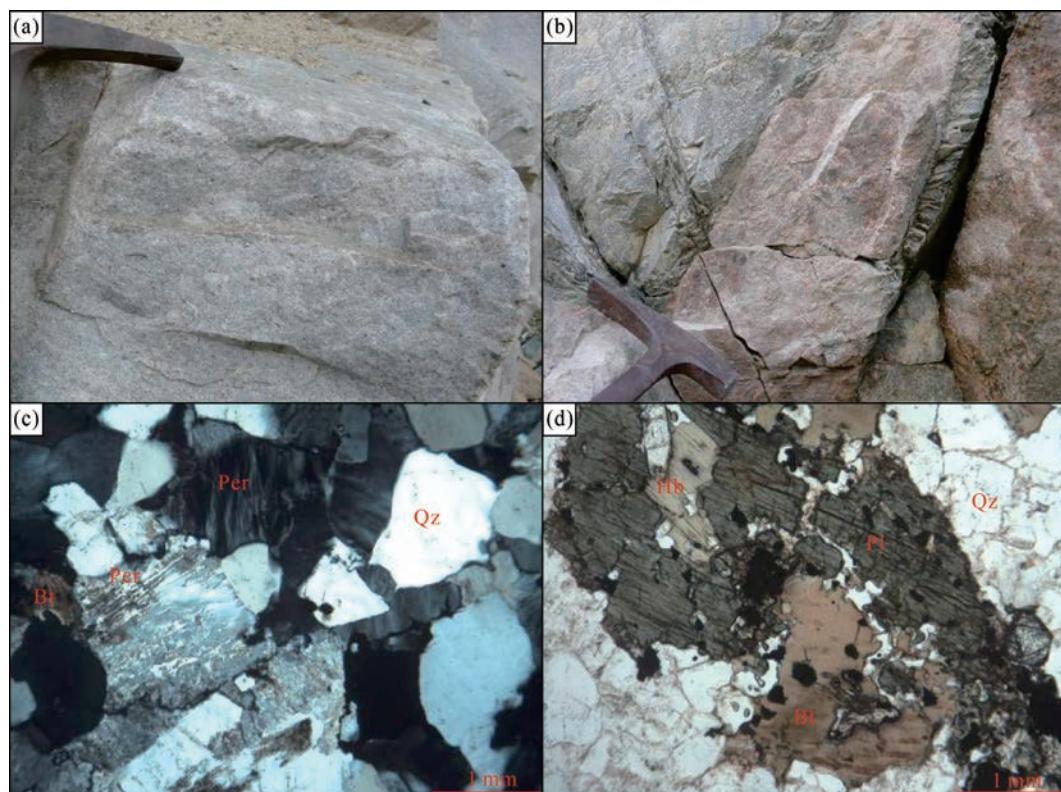


图 4 正长花岗岩(a,c)与花岗斑岩(b,d)野外露头和显微镜下照片

Fig. 4 Outcrop and microscopic photos of syenogranite (a, c) and granite-porphyry (b, d)

Bt—黑云母; Qz—石英; Hb—角闪石; Pl—斜长石; Per—条纹长石

Lu-Hf 同位素在锆石 U-Pb 定年的同一颗锆石相同部位测定,由中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室完成,利用 Thermo Finnigan Neptune 型多接收等离子质谱仪和 New wave UP 213 激光剥蚀系统对锆石进行 Lu-Hf 同位素原位测定。分析流程见侯可军等(2007)。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值计算采用的 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$,球粒陨石现今的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282772$ 、 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0332$,亏损地幔 Hf 模式年龄(t_{DM1})计算采用现今亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28325$ 、 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0384$;二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})采用平均大陆壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$ 进行计算。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

正长花岗岩(BZY-2)样品锆石大多呈无色透

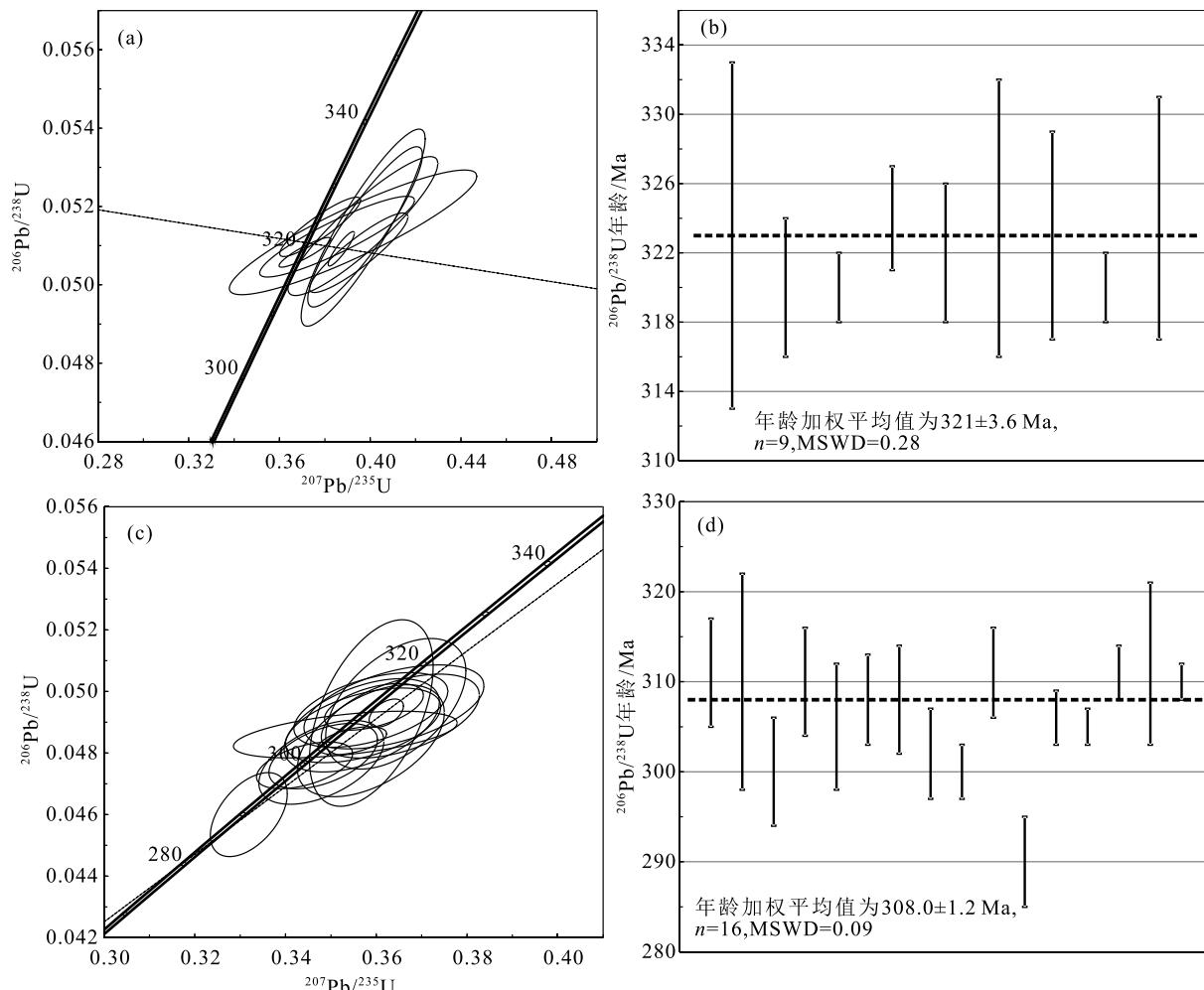


图 5 正长花岗岩(a,b)和花岗斑岩(c,d)锆石 U-Pb 谐和图和年龄频谱图

Fig. 5 Zircons U-Pb concordia diagrams of syenogranite(a,b) and granite porphyry(c,d)

明,自形短柱状,长宽比在 $1:1 \sim 1:1.5$ 之间。晶面光洁清晰,发育韵律环带, Th/U 值处于 $0.52 \sim 3.02$ 之间,平均值为 1.02(大于 0.4),属于典型的岩浆锆石。本次挑选 16 颗锆石,共分析 19 个点,分析结果见表 1。选取谐和度较高的 9 个点,获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $321.5 \pm 3.6 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.28$),代表了岩浆结晶年龄(图 5-a),为晚石炭世。

花岗斑岩(BZY-1)样品锆石大多呈无色透明—浅黄色,自形柱状,长宽比在 $1:1 \sim 1:1.5$ 之间。锆石发育清晰的韵律环带, Th/U 值处于 $0.54 \sim 1.01$ 之间,平均值为 0.82(大于 0.4),且 Th 、 U 之间具有良好的正相关性,说明它们与岩浆结晶作用有关,属于典型的岩浆锆石。共分析 20 个点,分析结果见表 1。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $308 \pm 1.2 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.09$),代表了岩浆结晶年龄(图 5-b),为晚石炭世。

表 1 正长花岗岩和花岗斑岩锆石 U-Th-Pb 测年分析结果
Table 1 Zircon U-Th-Pb dating results of syenogranite and granite porphyry

| 测点 | 含量/ 10^{-6} | | | 同位素比值 | | | | | | 表面年龄/Ma | | | | | | |
|--------------------|---------------|------|--------|-------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|
| | Pb | Th | U | Th/U | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1σ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1σ |
| 正长花岗岩 BZY-2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BZY-2-01 | 109 | 310 | 102.7 | 3.02 | 0.0865 | 0.0008 | 0.5543 | 0.0061 | 0.0465 | 0.0002 | 1350 | 19 | 448 | 4 | 293 | 1 |
| BZY-2-02 | 40 | 67 | 77.4 | 0.86 | 0.0751 | 0.0139 | 0.3680 | 0.0193 | 0.0490 | 0.0024 | 1072 | 374 | 318 | 14 | 309 | 15 |
| BZY-2-03 | 1047 | 1235 | 2390.4 | 0.52 | 0.1081 | 0.0018 | 0.4260 | 0.0058 | 0.0293 | 0.0004 | 1769 | 30 | 360 | 4 | 186 | 3 |
| BZY-2-05 | 136 | 68 | 95.4 | 0.71 | 0.1415 | 0.0014 | 1.0457 | 0.0151 | 0.0536 | 0.0003 | 2256 | 17 | 727 | 7 | 336 | 2 |
| BZY-2-06 | 56 | 77 | 124.9 | 0.62 | 0.0635 | 0.0133 | 0.3645 | 0.0344 | 0.0477 | 0.0007 | 724 | 453 | 316 | 26 | 301 | 4 |
| BZY-2-07 | 108 | 103 | 77.3 | 1.34 | 0.1120 | 0.0012 | 0.8209 | 0.0122 | 0.0532 | 0.0005 | 1832 | 19 | 609 | 7 | 334 | 3 |
| BZY-2-08 | 60 | 83 | 107.5 | 0.77 | 0.0639 | 0.0143 | 0.3551 | 0.0214 | 0.0485 | 0.0007 | 739 | 488 | 309 | 16 | 305 | 4 |
| BZY-2-09 | 77 | 91 | 111.8 | 0.81 | 0.0554 | 0.0006 | 0.3969 | 0.0181 | 0.0515 | 0.0017 | 428 | -8 | 339 | 13 | 323 | 10 |
| BZY-2-10 | 54 | 52 | 73 | 0.71 | 0.0553 | 0.0011 | 0.3949 | 0.0143 | 0.0508 | 0.0007 | 433 | 38 | 338 | 10 | 320 | 4 |
| BZY-2-11 | 101 | 107 | 109.8 | 0.97 | 0.0550 | 0.0004 | 0.3872 | 0.0038 | 0.0509 | 0.0003 | 413 | 15 | 332 | 3 | 320 | 2 |
| BZY-2-12 | 66 | 73 | 106.5 | 0.68 | 0.0532 | 0.0014 | 0.3779 | 0.0118 | 0.0515 | 0.0005 | 345 | 59 | 326 | 9 | 324 | 3 |
| BZY-2-14 | 88 | 102 | 101.9 | 1.00 | 0.1107 | 0.0387 | 0.4842 | 0.0933 | 0.0639 | 0.0169 | 1813 | 676 | 401 | 64 | 399 | 103 |
| BZY-2-15 | 74 | 85 | 103.3 | 0.82 | 0.0576 | 0.0053 | 0.3854 | 0.0226 | 0.0512 | 0.0007 | 522 | 206 | 331 | 17 | 322 | 4 |
| BZY-2-16 | 44 | 42 | 38.6 | 1.08 | 0.0872 | 0.0162 | 0.3978 | 0.0167 | 0.0515 | 0.0014 | 1365 | 364 | 340 | 12 | 324 | 8 |
| BZY-2-17 | 39 | 38 | 72.1 | 0.52 | 0.0662 | 0.0120 | 0.3925 | 0.0360 | 0.0513 | 0.0011 | 813 | 387 | 336 | 26 | 323 | 6 |
| BZY-2-18 | 50 | 49 | 37.2 | 1.31 | 0.0530 | 0.0010 | 0.3712 | 0.0075 | 0.0508 | 0.0003 | 328 | 44 | 321 | 6 | 320 | 2 |
| BZY-2-19 | 95 | 87 | 109.7 | 0.79 | 0.1116 | 0.0568 | 0.3968 | 0.0218 | 0.0515 | 0.0012 | 1825 | 1038 | 339 | 16 | 324 | 7 |
| 花岗斑岩 BZY-1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BZY-1-01 | 50 | 85 | 109.7 | 0.78 | 0.0524 | 0.0005 | 0.3639 | 0.0131 | 0.0495 | 0.0009 | 302 | 20 | 315 | 10 | 311 | 6 |
| BZY-1-02 | 64 | 45 | 65.1 | 0.69 | 0.0572 | 0.0046 | 0.3589 | 0.0090 | 0.0493 | 0.0020 | 502 | 206 | 311 | 7 | 310 | 12 |
| BZY-1-03 | 52 | 71 | 84.9 | 0.84 | 0.0809 | 0.0260 | 0.3479 | 0.0091 | 0.0477 | 0.0009 | 1220 | 669 | 303 | 7 | 300 | 6 |
| BZY-1-04 | 91 | 90 | 90.7 | 0.99 | 0.0557 | 0.0032 | 0.3653 | 0.0115 | 0.0492 | 0.0009 | 439 | 126 | 316 | 9 | 310 | 6 |
| BZY-1-05 | 38 | 33 | 47.4 | 0.70 | 0.0562 | 0.0042 | 0.3588 | 0.0107 | 0.0484 | 0.0012 | 461 | 165 | 311 | 8 | 305 | 7 |
| BZY-1-06 | 85 | 88 | 93.2 | 0.95 | 0.0943 | 0.0226 | 0.3571 | 0.0113 | 0.0489 | 0.0008 | 1514 | 467 | 310 | 8 | 308 | 5 |
| BZY-1-07 | 111 | 107 | 112.3 | 0.95 | 0.0586 | 0.0051 | 0.3568 | 0.0113 | 0.0489 | 0.0010 | 550 | 193 | 310 | 8 | 308 | 6 |
| BZY-1-08 | 52 | 44 | 48.2 | 0.90 | 0.0564 | 0.0048 | 0.3483 | 0.0079 | 0.0479 | 0.0007 | 465 | 195 | 303 | 6 | 302 | 5 |
| BZY-1-09 | 97 | 67 | 79 | 0.85 | 0.0707 | 0.0184 | 0.3442 | 0.0070 | 0.0476 | 0.0005 | 950 | 554 | 300 | 5 | 300 | 3 |
| BZY-1-10 | 96 | 70 | 80.5 | 0.87 | 0.1862 | 0.1276 | 0.3724 | 0.0180 | 0.0486 | 0.0004 | 2708 | 1493 | 321 | 13 | 306 | 3 |
| BZY-1-11 | 89 | 66 | 96.9 | 0.68 | 0.0523 | 0.0007 | 0.3588 | 0.0112 | 0.0494 | 0.0008 | 298 | -1 | 311 | 8 | 311 | 5 |
| BZY-1-12 | 117 | 99 | 116.5 | 0.85 | 0.0549 | 0.0022 | 0.3658 | 0.0211 | 0.0483 | 0.0008 | 409 | 89 | 316 | 16 | 304 | 5 |
| BZY-1-13 | 74 | 61 | 60.4 | 1.01 | 0.0722 | 0.0110 | 0.3319 | 0.0056 | 0.0460 | 0.0009 | 992 | 312 | 291 | 4 | 290 | 5 |
| BZY-1-14 | 52 | 53 | 72.1 | 0.74 | 0.0516 | 0.0011 | 0.3532 | 0.0163 | 0.0486 | 0.0005 | 333 | 50 | 307 | 12 | 306 | 3 |
| BZY-1-15 | 33 | 24 | 29.5 | 0.83 | 0.0586 | 0.0052 | 0.3547 | 0.0050 | 0.0484 | 0.0003 | 550 | 201 | 308 | 4 | 305 | 2 |
| BZY-1-16 | 88 | 89 | 113 | 0.79 | 0.0524 | 0.0006 | 0.3595 | 0.0072 | 0.0495 | 0.0005 | 302 | 28 | 312 | 5 | 311 | 3 |
| BZY-1-17 | 62 | 48 | 82.3 | 0.58 | 0.0806 | 0.0176 | 0.3643 | 0.0102 | 0.0496 | 0.0014 | 1213 | 441 | 315 | 8 | 312 | 9 |
| BZY-1-18 | 66 | 58 | 61.3 | 0.94 | 0.0550 | 0.0009 | 0.3703 | 0.0070 | 0.0488 | 0.0003 | 409 | 42 | 320 | 5 | 307 | 2 |
| BZY-1-19 | 45 | 46 | 85.3 | 0.54 | 0.1173 | 0.0556 | 0.3770 | 0.0299 | 0.0495 | 0.0011 | 1917 | 961 | 325 | 22 | 312 | 6 |
| BZY-1-20 | 90 | 94 | 104.3 | 0.91 | 0.0533 | 0.0002 | 0.3622 | 0.0025 | 0.0493 | 0.0003 | 343 | 9 | 314 | 2 | 310 | 2 |

3.2 锆石 Hf 同位素组成

正长花岗岩(BZY-2)和花岗斑岩(BZY-1)Hf 同位素分析结果见表 2。所测锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.001069~0.010482 和 0.00654~0.00215, 表明锆石形成后没有放射成因 Hf 的积累(或是放射性成因的 Hf 含量很少, 不影响分析结果), 测得的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值可以代表锆石结晶时岩浆体系的同位素组成(吴福元等, 2007)。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.282765~0.282962 和 0.282804~0.282942, 以 2 个样品锆石的年龄加权平均值 321.5 Ma 和 308 Ma 计算出的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 分别介于 5.7~13.3 和 7.5~12.5 之间, 平均值为 9.84 和 10.06(图 6), 为较高的正值。Hf 的单阶段模式年龄 t_{MD} 分别介于 423~720 Ma 和 446~651 Ma 之间, 平均值为 561 Ma 和 544 Ma; 二阶段模式年龄 t_{MD2} 分别介于 479~947 Ma 和 526~843 Ma 之间, 平均值为 700 Ma 和 679 Ma。

3.3 岩石地球化学特征

3.3.1 主量元素

11 个样品的主量元素分析结果见表 3。 SiO_2 含量介于 70.83%~75.88% 之间, 平均为 74.59%。全碱含量($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)介于 4.30%~8.65% 之间, 平均为 6.44%。在侵入岩 TAS 分类图解(图 7-a)中, 样品点主要落于花岗岩区。 MgO 、 CaO 含量分别介于 0.12%~1.02%、0.52%~3.57% 之间。 Al_2O_3 含量介于 11.22%~13.01% 之间, 平均为 12.53%, 整体含量较低, A/CNK 值介于 0.87~1.1 之间, 平均为 0.97, 在 $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$ 图解(图 7-b)上, 样品点主要

落于准铝质区域, 少量落在弱过铝质区域。里特曼指数 σ 介于 0.57~2.29(0~3.3) 之间, 在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 7-c)中, 样品点均落入高钾钙碱性区域, 属高钾钙碱系列。

3.3.2 稀土元素

样品的稀土元素分析结果见表 3。稀土元素总量 $\Sigma\text{REE}=84.32\times 10^{-6} \sim 241.19\times 10^{-6}$, 平均为 169.98×10^{-6} 。 $\text{LREE/HREE}=2.58 \sim 12.02$, $(\text{La/Yb})_N=1.81 \sim 13.73$, 反映轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, 轻、重稀土元素分馏非常明显。 $(\text{La/Sm})_N=1.31 \sim 5.72$, $(\text{Gd/Yb})_N=5.92 \sim 11.13$, 表明轻稀土元素内部分馏中等, 重稀土元素内部分馏明显。 δEu 值处于 0.07~0.30 之间, 具有强烈的负 Eu 异常。稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 8-a)显示, 所有曲线的变化规律一致, 呈右倾近平行的曲线簇。

3.3.3 微量元素

样品的微量元素分析结果(表 3)显示, 花岗岩具有大离子亲石元素(LILE) Rb 、 K 、 Th 、 Sr 、 U 等富集, Ba 亏损, 高场强元素(HFSE) Nb 、 Ta 、 Ti 、 P 等强烈亏损, Zr 、 Hf 等轻微富集的特征。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 8-b)上, 呈锯齿状配分形式。

4 讨论

4.1 岩石成因

目前花岗岩研究的前沿问题是花岗岩的分类和构造环境(董亮琼等, 2016)。西天山南北两侧发育 2 条巨型的花岗岩带(徐学义等, 2007; 童英等,

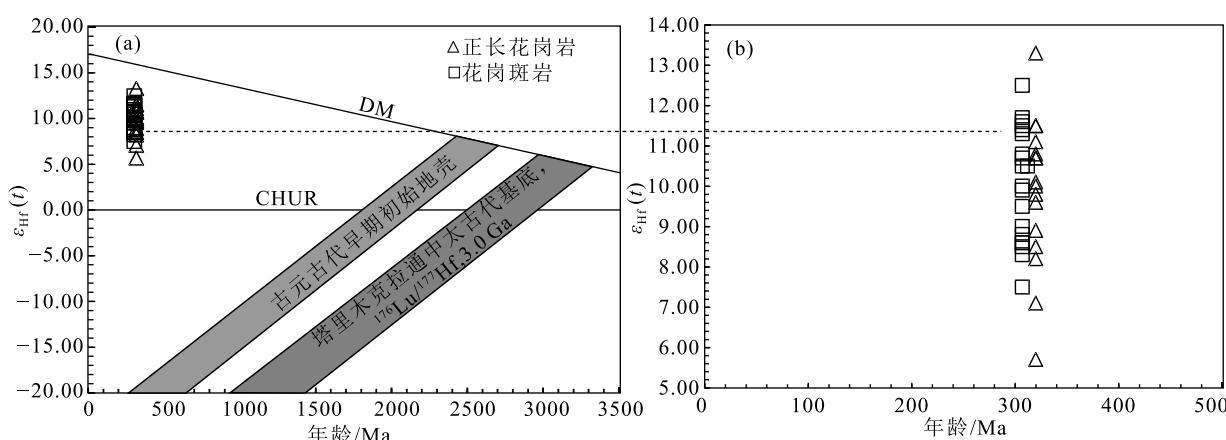


图 6 正长花岗岩和花岗斑岩 Hf 同位素组成图
(塔里木克拉通中太古代基底据 Long et al., 2010, 2011; Jiang et al., 2015)

Fig. 6 Hf isotope composition plot of syenogranite and granite porphyry

表 2 正长花岗岩和花岗斑岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果
Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic results of syenogranite and granite porphyry

| 测点号 | 年龄/Ma | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | 2σ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | 2σ | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | 2σ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | 2σ | T_{DM} /Ma | T_{DM2} /Ma | $f_{\text{Lu/Hf}}$ |
|--------------------|-------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|------------------------------|------------------------------|-----------|------------------------|-------------------------|--------------------|
| 正长花岗岩 BZY-2 | | | | | | | | | | | | | |
| BZY-2-01 | 321.5 | 0.282765 | 0.000029 | 0.002539 | 0.000069 | 0.136377 | 0.004328 | -0.3 | 5.7 | 1 | 720 | 947 | -0.92 |
| BZY-2-02 | 321.5 | 0.282915 | 0.000023 | 0.001747 | 0.000016 | 0.091866 | 0.000933 | 5.1 | 11.5 | 0.8 | 487 | 588 | -0.95 |
| BZY-2-05 | 321.5 | 0.282884 | 0.000025 | 0.001207 | 0.000007 | 0.066893 | 0.000558 | 4 | 11.1 | 0.9 | 524 | 634 | -0.96 |
| BZY-2-06 | 321.5 | 0.282844 | 0.000024 | 0.001378 | 0.000025 | 0.07475 | 0.001715 | 2.6 | 8.9 | 0.9 | 584 | 748 | -0.96 |
| BZY-2-07 | 321.5 | 0.282774 | 0.000026 | 0.001338 | 0.000044 | 0.074512 | 0.002885 | 0.1 | 7.1 | 0.9 | 684 | 888 | -0.96 |
| BZY-2-08 | 321.5 | 0.282893 | 0.000023 | 0.00112 | 0.00002 | 0.05824 | 0.001038 | 4.3 | 10.8 | 0.8 | 511 | 633 | -0.97 |
| BZY-2-09 | 321.5 | 0.282885 | 0.000021 | 0.001561 | 0.000032 | 0.076874 | 0.00133 | 4 | 10.7 | 0.8 | 528 | 648 | -0.95 |
| BZY-2-10 | 321.5 | 0.282907 | 0.000024 | 0.001396 | 0.000021 | 0.076773 | 0.001407 | 4.8 | 11.5 | 0.9 | 495 | 596 | -0.96 |
| BZY-2-11 | 321.5 | 0.282883 | 0.000025 | 0.001535 | 0.000012 | 0.084811 | 0.000996 | 3.9 | 10.7 | 0.9 | 531 | 651 | -0.95 |
| BZY-2-12 | 321.5 | 0.282868 | 0.000025 | 0.001827 | 0.000024 | 0.103022 | 0.001672 | 3.4 | 10.1 | 0.9 | 556 | 689 | -0.94 |
| BZY-2-13 | 321.5 | 0.283 | 0.000033 | 0.003125 | 0.000064 | 0.182547 | 0.003371 | 8.1 | 16.9 | 1.2 | 378 | 346 | -0.91 |
| BZY-2-14 | 321.5 | 0.283 | 0.000029 | 0.002271 | 0.000011 | 0.128923 | 0.00075 | 8.1 | 16.3 | 1 | 369 | 353 | -0.93 |
| BZY-2-15 | 321.5 | 0.282854 | 0.000028 | 0.001687 | 0.000007 | 0.094333 | 0.000633 | 2.9 | 9.6 | 1 | 574 | 718 | -0.95 |
| BZY-2-16 | 321.5 | 0.282962 | 0.000031 | 0.002089 | 0.000025 | 0.118464 | 0.000886 | 6.7 | 13.3 | 1.1 | 423 | 479 | -0.94 |
| BZY-2-17 | 321.5 | 0.282856 | 0.000031 | 0.001069 | 0.000004 | 0.057141 | 0.000385 | 3 | 9.8 | 1.1 | 563 | 707 | -0.97 |
| BZY-2-18 | 321.5 | 0.282813 | 0.000031 | 0.001381 | 0.000009 | 0.073136 | 0.00075 | 1.5 | 8.2 | 1.1 | 628 | 807 | -0.96 |
| BZY-2-19 | 321.5 | 0.282863 | 0.00003 | 0.001209 | 0.000039 | 0.06635 | 0.002053 | 3.2 | 10 | 1.1 | 555 | 693 | -0.96 |
| BZY-2-20 | 321.5 | 0.282823 | 0.000026 | 0.001535 | 0.000062 | 0.082531 | 0.003815 | 1.8 | 8.5 | 0.9 | 617 | 787 | -0.95 |
| 花岗斑岩 BZY-1 | | | | | | | | | | | | | |
| BZY-1-01 | 308 | 0.282834 | 0.00003 | 0.001551 | 0.000007 | 0.082217 | 0.000491 | 2.2 | 8.6 | 1 | 602 | 771 | -0.95 |
| BZY-1-02 | 308 | 0.282838 | 0.000027 | 0.00136 | 0.000006 | 0.070091 | 0.000164 | 2.3 | 8.8 | 1 | 592 | 758 | -0.96 |
| BZY-1-03 | 308 | 0.282833 | 0.000026 | 0.001459 | 0.000027 | 0.076273 | 0.001724 | 2.1 | 8.6 | 0.9 | 602 | 772 | -0.96 |
| BZY-1-04 | 308 | 0.282888 | 0.000028 | 0.001925 | 0.000017 | 0.105189 | 0.000772 | 4.1 | 10.5 | 1 | 529 | 653 | -0.94 |
| BZY-1-05 | 308 | 0.28291 | 0.000031 | 0.001738 | 0.000004 | 0.091954 | 0.000558 | 4.9 | 11.3 | 1.1 | 494 | 600 | -0.95 |
| BZY-1-06 | 308 | 0.282804 | 0.000028 | 0.001909 | 0.000005 | 0.10319 | 0.000521 | 1.1 | 7.5 | 1 | 651 | 843 | -0.94 |
| BZY-1-07 | 308 | 0.282895 | 0.00003 | 0.001751 | 0.000008 | 0.094028 | 0.000818 | 4.3 | 10.7 | 1.1 | 517 | 636 | -0.95 |
| BZY-1-08 | 308 | 0.28291 | 0.00003 | 0.001121 | 0.000008 | 0.055543 | 0.000221 | 4.9 | 11.4 | 1.1 | 487 | 593 | -0.97 |
| BZY-1-09 | 308 | 0.282824 | 0.000026 | 0.001367 | 0.000012 | 0.071788 | 0.00049 | 1.8 | 8.3 | 0.9 | 612 | 790 | -0.96 |
| BZY-1-10 | 308 | 0.282859 | 0.000029 | 0.001623 | 0.000014 | 0.086199 | 0.000602 | 3.1 | 9.5 | 1 | 567 | 716 | -0.95 |
| BZY-1-11 | 308 | 0.282891 | 0.000026 | 0.001051 | 0.000002 | 0.057108 | 0.000332 | 4.2 | 10.8 | 0.9 | 512 | 635 | -0.97 |
| BZY-1-12 | 308 | 0.282942 | 0.000031 | 0.001604 | 0.000025 | 0.089076 | 0.001684 | 6 | 12.5 | 1.1 | 446 | 526 | -0.95 |
| BZY-1-13 | 308 | 0.282886 | 0.000031 | 0.001759 | 0.000012 | 0.096912 | 0.000456 | 4 | 10.5 | 1.1 | 529 | 652 | -0.95 |
| BZY-1-14 | 308 | 0.282925 | 0.00003 | 0.00215 | 0.000005 | 0.119728 | 0.00045 | 5.4 | 11.7 | 1.1 | 478 | 573 | -0.94 |
| BZY-1-15 | 308 | 0.282913 | 0.000035 | 0.001448 | 0.000015 | 0.07644 | 0.000648 | 5 | 11.5 | 1.2 | 486 | 590 | -0.96 |
| BZY-1-16 | 308 | 0.282869 | 0.000032 | 0.001571 | 0.000006 | 0.084799 | 0.00063 | 3.4 | 9.9 | 1.1 | 551 | 691 | -0.95 |
| BZY-1-17 | 308 | 0.282829 | 0.000032 | 0.001386 | 0.000015 | 0.07257 | 0.000576 | 2 | 8.5 | 1.1 | 606 | 779 | -0.96 |
| BZY-1-18 | 308 | 0.282914 | 0.000032 | 0.000654 | 0.000013 | 0.035347 | 0.000835 | 5 | 11.6 | 1.2 | 475 | 577 | -0.98 |
| BZY-1-19 | 308 | 0.282845 | 0.000032 | 0.001438 | 0.000003 | 0.080016 | 0.000363 | 2.6 | 9 | 1.1 | 584 | 745 | -0.96 |
| BZY-1-20 | 308 | 0.282873 | 0.000035 | 0.0019 | 0.000029 | 0.106904 | 0.001858 | 3.6 | 10 | 1.2 | 550 | 686 | -0.94 |

表3 正长花岗岩和花岗斑岩主量、微量元素分析结果

Table 3 Major, trace and rare earth element compositions of syenogranite and granit porphyry

| 元素 | BZY-3 | BZY-4 | BZY-5 | ZK406-ZWX1 | ZK408-ZWX6 | ZK706-ZWX12 | ZWX1 | ZWX1 | BZY-6 | BZY-7 | BZY-8 |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|
| | 正长花 岗岩 | 正长花 岗岩 | 正长花 岗岩 | 正长花 岗岩 | 正长花 岗岩 | 正长花 岗岩 | 正长花 岗岩 | 正长花 岗岩 | 花岗 斑岩 | 花岗 斑岩 | 花岗 斑岩 |
| SiO ₂ | 75.78 | 75.88 | 75.44 | 71.26 | 75.80 | 70.83 | 75.80 | 75.46 | 74.24 | 75.65 | 74.36 |
| TiO ₂ | 0.17 | 0.15 | 0.17 | 0.43 | 0.16 | 0.12 | 0.19 | 0.27 | 0.23 | 0.24 | 0.29 |
| Al ₂ O ₃ | 12.19 | 11.92 | 13.01 | 13.97 | 12.39 | 11.22 | 11.86 | 12.19 | 12.97 | 13.01 | 13.05 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.86 | 1.2 | 1.94 | 3.35 | 1.21 | 1.74 | 1.06 | 0.79 | 0.83 | 1.94 | 0.38 |
| FeO | 0.69 | 0.59 | 0.11 | 0.35 | 0.35 | 0.73 | 0.27 | 0.35 | 0.75 | 0.77 | 1.03 |
| MnO | 0.07 | 0.05 | 0.07 | 0.05 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.06 | 0.04 |
| MgO | 0.12 | 0.22 | 0.12 | 0.89 | 0.21 | 1.53 | 0.12 | 1.02 | 0.32 | 0.22 | 0.32 |
| CaO | 0.52 | 1.73 | 0.52 | 1.27 | 1.23 | 3.59 | 2.05 | 3.57 | 1.2 | 0.83 | 1.48 |
| Na ₂ O | 3.63 | 2.8 | 3.66 | 3.38 | 2.53 | 2.56 | 2.82 | 3.46 | 3.96 | 3.86 | 4.04 |
| K ₂ O | 4.79 | 5.52 | 4.83 | 4.00 | 4.82 | 3.98 | 3.99 | 0.83 | 4.49 | 4.79 | 4.38 |
| P ₂ O ₅ | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.11 | 0.01 | 0.05 | 0.03 | 0.06 | 0.042 | 0.04 | 0.04 |
| 烧失量 | 0.15 | 0.43 | 0.15 | 0.62 | 0.50 | 2.90 | 0.60 | 1.05 | 0.53 | 0.15 | 0.40 |
| 总量 | 99.99 | 100.51 | 100.04 | 99.69 | 99.24 | 99.32 | 98.80 | 99.08 | 99.59 | 101.56 | 99.79 |
| A/CNK | 1.01 | 0.87 | 1.07 | 1.15 | 1.07 | 0.75 | 0.94 | 0.93 | 0.96 | 1.00 | 0.93 |
| σ | 2.16 | 2.11 | 2.22 | 1.93 | 1.65 | 1.54 | 1.41 | 0.57 | 2.29 | 2.29 | 2.26 |
| Sr | 31.46 | 75.93 | 260.1 | 178.50 | 119.90 | 57.92 | 185.20 | 253.90 | 44.85 | 90.39 | 85.12 |
| Ba | 169.94 | 159 | 101.4 | 185.50 | 292.20 | 94.32 | 326.90 | 102.90 | 180 | 270.7 | 334.2 |
| Ga | 12.99 | 14.95 | 20.52 | 14.74 | 6.85 | 7.49 | 6.93 | 4.86 | | 13.65 | 20.27 |
| Nb | 22.57 | 17.65 | 34.36 | 18.47 | 13.79 | 14.15 | 14.18 | 6.50 | 15.74 | 16.36 | 18.29 |
| Ta | 1.38 | 1.63 | 1 | | | | | | 1.22 | 1.6 | 1.46 |
| Zr | 177.7 | 115.9 | 182 | 159.59 | 94.89 | 182.19 | 130.84 | 167.45 | 193 | 149 | 164.9 |
| Hf | 4.38 | 4.41 | 4.32 | | | | | | 6.57 | 4.88 | 3.39 |
| Th | 9.51 | 10.66 | 6.44 | 10.02 | 4.13 | 5.03 | 3.92 | 2.66 | 13.89 | 8.72 | 9.54 |
| V | 5.22 | 6.78 | 148.4 | 56.03 | 6.53 | 1.55 | 12.15 | 32.82 | | 9.35 | 247 |
| Cr | 8.38 | 39.87 | 125.4 | 0.66 | 0.00 | 3.05 | 1.31 | 0.00 | 6.18 | 7.77 | 75.7 |
| Co | 0.9 | 1.36 | 14.79 | 18.16 | 20.86 | 3.46 | 43.14 | 13.33 | | 2.16 | 29.19 |
| Ni | 6.36 | 3.98 | 43.93 | 0.76 | 0.00 | 1.16 | 5.08 | 4.26 | | 6.4 | 42.11 |
| Li | 0.15 | | 4.42 | 3.05 | 1.28 | 3.94 | 0.71 | 2.00 | | 0.081 | 10.86 |
| Sc | 0.51 | 1.49 | 21.96 | 10.46 | 4.05 | 3.39 | 3.49 | 6.57 | 3.8 | 1.04 | 22.33 |
| U | 3.19 | 4.66 | 5.41 | | | | | | 5.7 | 2.49 | 3.53 |
| Y | 16.35 | 34.14 | 22.2 | | | | | | 35.6 | 37.53 | 40.28 |
| La | 31.02 | 27.21 | 19.11 | 48.21 | 46.27 | 42.63 | 43.89 | 10.02 | 44 | 38.31 | 41.78 |
| Ce | 72.6 | 46.37 | 20.37 | 98.96 | 99.62 | 94.95 | 90.74 | 24.20 | 80.8 | 43.7 | 52.05 |
| Pr | 6.75 | 5.24 | 4.13 | 11.87 | 12.01 | 11.77 | 11.04 | 4.01 | 8.9 | 6.88 | 7.77 |
| Nd | 21.48 | 23.44 | 27.22 | 38.41 | 37.83 | 37.48 | 34.16 | 17.03 | 31.9 | 23.86 | 28.38 |
| Sm | 3.5 | 5.3 | 5.7 | 7.98 | 7.45 | 7.89 | 6.83 | 4.94 | 5.9 | 4.65 | 5.56 |
| Eu | 0.13 | 0.12 | 0.17 | 0.76 | 0.48 | 0.30 | 0.68 | 0.60 | 0.54 | 0.31 | 0.49 |
| Gd | 3.82 | 5.57 | 5.41 | 7.69 | 7.10 | 7.77 | 6.91 | 4.99 | 5.2 | 4.67 | 5.66 |
| Tb | 0.49 | 0.89 | 0.52 | 1.43 | 1.26 | 1.42 | 1.18 | 1.02 | 0.98 | 0.59 | 0.68 |

续表 3

| 元素 | BZY-3 | BZY-4 | BZY-5 | ZK406-ZWX1 | ZK408-ZWX6 | ZK706-ZWX12 | ZWX1 | ZWX1 | BZY-6 | BZY-7 | BZY-8 |
|----------------------|--------|--------|--------|------------|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 正长花岗岩 | 正长花岗岩 | 正长花岗岩 | 正长花岗岩 | 正长花岗岩 | 正长花岗岩 | 正长花岗岩 | 正长花岗岩 | 花岗斑岩 | 花岗斑岩 | 花岗斑岩 |
| | | | | | | | | | | | |
| Dy | 2.72 | 6.58 | 4.88 | 9.41 | 7.90 | 9.46 | 7.58 | 6.69 | 5.7 | 3.76 | 4.32 |
| Ho | 0.55 | 1.23 | 1.04 | 2.02 | 1.70 | 2.10 | 1.67 | 1.42 | 1.3 | 1.66 | 1.75 |
| Er | 1.6 | 3.73 | 3.91 | 6.06 | 5.07 | 6.45 | 5.06 | 4.07 | 3.8 | 1.82 | 2.02 |
| Tm | 0.24 | 0.55 | 0.36 | 1.07 | 0.89 | 1.16 | 0.89 | 0.70 | 0.65 | 0.25 | 0.27 |
| Yb | 1.62 | 2.92 | 3.24 | 6.23 | 5.26 | 6.91 | 5.29 | 3.98 | 4.4 | 5.55 | 6.63 |
| Lu | 0.23 | 0.53 | 0.32 | 1.08 | 0.92 | 1.22 | 0.92 | 0.66 | 0.7 | 0.54 | 0.66 |
| Σ REE | 146.75 | 129.68 | 96.38 | 241.19 | 233.77 | 231.48 | 216.83 | 84.32 | 194.77 | 136.55 | 158.02 |
| LREE | 135.48 | 107.68 | 76.70 | 206.19 | 203.65 | 195.00 | 187.34 | 60.80 | 172.04 | 117.71 | 136.03 |
| HREE | 11.27 | 22.00 | 19.68 | 35.00 | 30.11 | 36.48 | 29.49 | 23.53 | 22.73 | 18.84 | 21.99 |
| LREE/HREE | 12.02 | 4.89 | 3.90 | 5.89 | 6.76 | 5.35 | 6.35 | 2.58 | 7.57 | 6.25 | 6.19 |
| (La/Yb) _N | 13.73 | 6.68 | 4.23 | 5.55 | 6.30 | 4.43 | 5.95 | 1.81 | 7.17 | 4.95 | 4.52 |
| (La/Sm) _N | 5.72 | 3.31 | 2.16 | 3.90 | 4.01 | 3.49 | 4.15 | 1.31 | 4.81 | 5.32 | 4.85 |
| (Gd/Yb) _N | 11.13 | 9.00 | 7.88 | 5.82 | 6.37 | 5.31 | 6.16 | 5.92 | 5.58 | 3.97 | 4.03 |
| δ Eu | 0.11 | 0.07 | 0.09 | 0.29 | 0.20 | 0.11 | 0.30 | 0.36 | 0.29 | 0.20 | 0.26 |
| δ Ce | 1.17 | 0.89 | 0.54 | 0.98 | 1.01 | 1.02 | 0.98 | 0.94 | 0.95 | 0.61 | 0.66 |
| T _{zr} /°C | 796.07 | 759.49 | 798.19 | 785.22 | 741.92 | 796.85 | 768.25 | 789.41 | 803.44 | 780.68 | 788.07 |

注: 主要元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10^{-6}

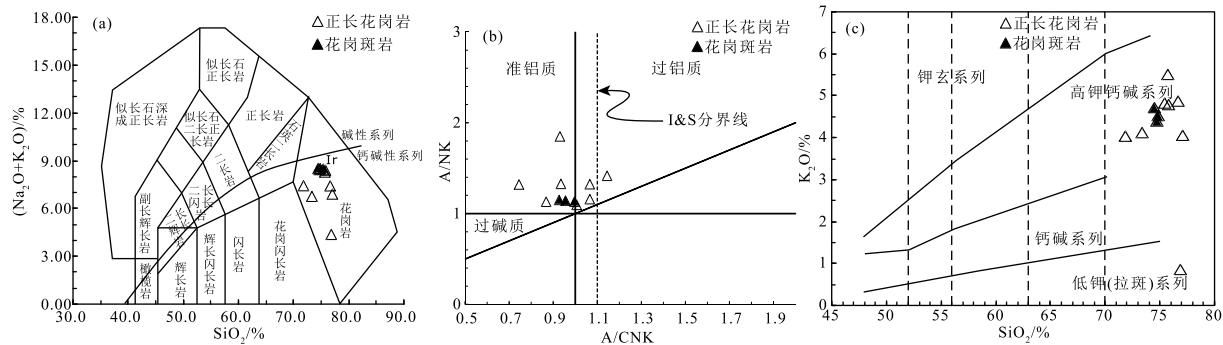


图 7 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (a), 底图据 Middlemost, 1994)、 $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ (b, 底图据 Peccerillo et al., 1976) 与 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解 (c, 底图据 Rickwood, 1989)

Fig. 7 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (a), $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ (b) and $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ diagrams (c)

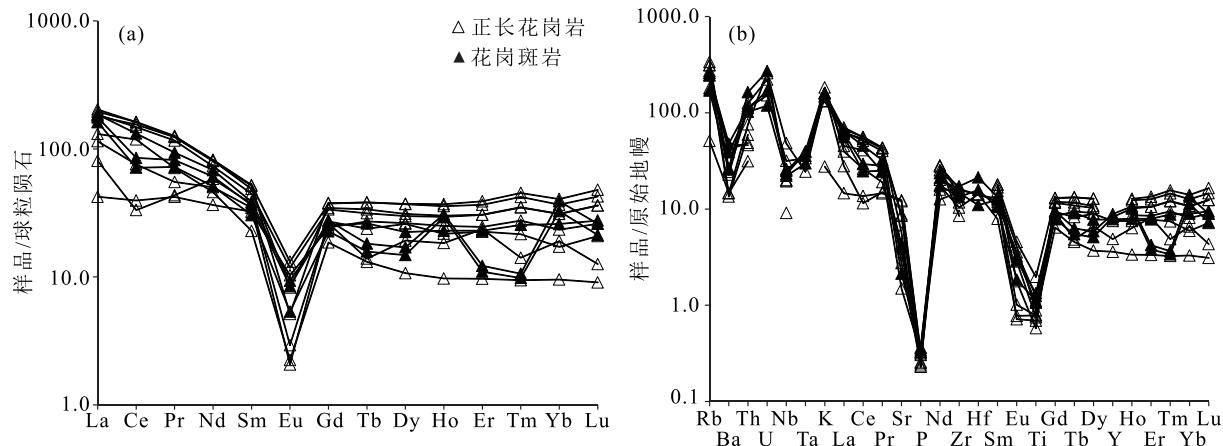


图 8 稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(标准化数据据 Sun et al., 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spidergrams (b)

2010),这些花岗岩的时代大多为石炭纪—二叠纪,其中二叠纪花岗岩最发育(张招崇等,2009)。花岗岩的形成时代大致可以划分为早石炭世早期、早石炭世晚期—晚石炭世和二叠纪3期,关于其形成环境目前还存在较大争议。本次研究样品的主量元素显示高钾钙碱性、准铝质—弱过铝质特征,而高钾钙碱性岩石组合为构造环境转折机制下中酸性岩浆活动的主要产物。稀土元素球粒陨石标准化配分模式图表现为左陡右缓,Eu强烈亏损;微量元素

特征显示高场强元素Nb、Ta、Ti、P等亏损。岩石地球化学特征显示具有典型岛弧花岗岩特征。主量元素可以有效判别岩石的构造环境。 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2-\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ 构造环境判别图解(图9)显示,样品点均落入后碰撞(POG)区域,考虑到主量元素易风化蚀变而造成误差,进一步通过 $\text{Y}-\text{Nb}$ 、 $(\text{Nb}+\text{Y})-\text{Rb}$ 构造环境判别图解(图10)判断,样品点均落入后碰撞区域。综上认为,花岗岩形成于后碰撞环境。

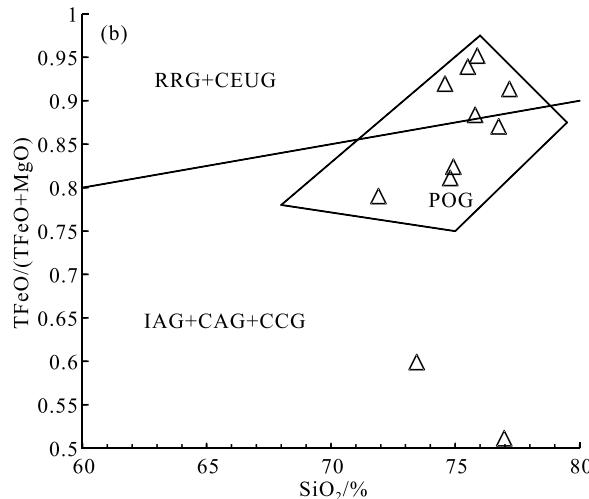
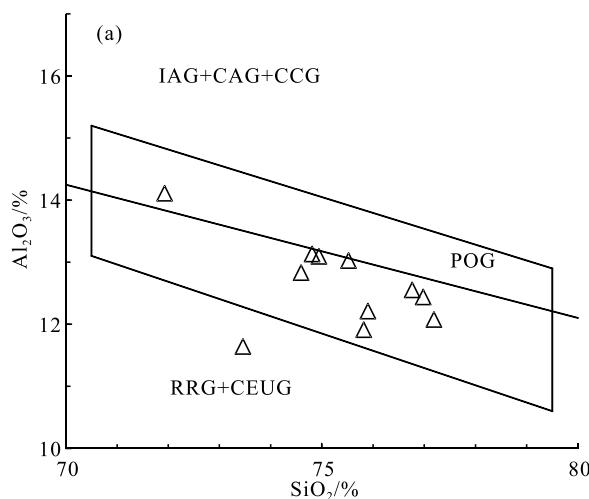


图9 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ (a) 和 $\text{SiO}_2-\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ (b) 图解(底图据 Maniar et al., 1989)

Fig. 9 Diagrams of $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ (a) and $\text{SiO}_2-\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ (b)

IAG—岛弧花岗岩;CAG—大陆弧花岗岩;CCG—大陆碰撞花岗岩;POG—造山后花岗岩;

RRG—裂谷花岗岩;CEUG—大陆造山隆起花岗岩

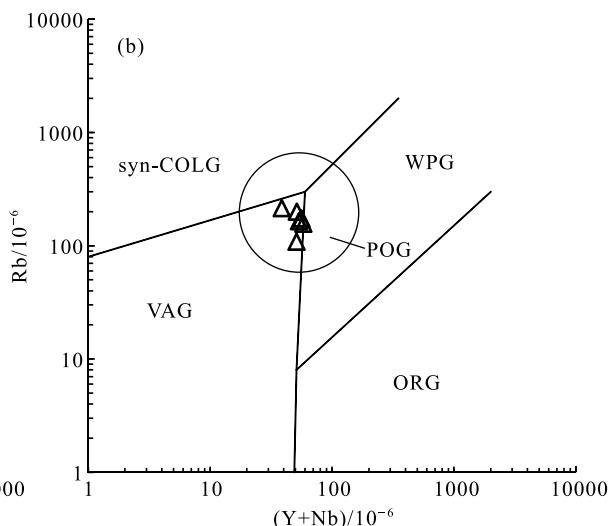
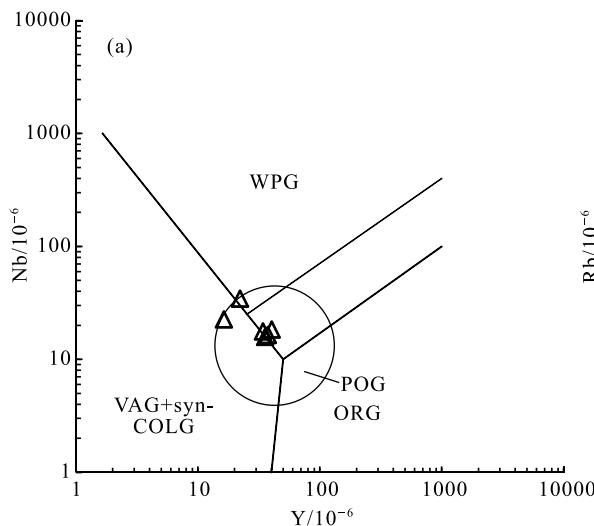


图10 $\text{Y}-\text{Nb}$ (a) 和 $(\text{Y}+\text{Nb})-\text{Rb}$ (b) 图解(底图据 Pearce et al., 1984)

Fig. 10 Diagrams of $\text{Y}-\text{Nb}$ (a) and $(\text{Y}+\text{Nb})-\text{Rb}$ (b)

WPG—板内花岗岩;ORG—洋中脊花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;syn-COLG—同碰撞花岗岩;POG—后碰撞花岗岩

4.2 构造与成矿

西天山备战铁矿区花岗岩形成于晚石炭世(正长花岗岩 321.5 ± 3.6 Ma, 花岗斑岩 308 ± 1.2 Ma), 岩石地球化学特征显示其形成于后碰撞环境, 正长花岗岩和花岗斑岩 Hf 同位素特征($\epsilon_{\text{Hf}}(t)$)值分别介于 $5.7 \sim 16.9$ 和 $7.5 \sim 12.5$ 之间, 为较高的正值, 揭示其形成于新生地壳的部分熔融。已有研究表明, 在晚石炭世西天山阿吾拉勒成矿带发生了岩石圈的拆沉作用, 引起地幔物质隆升, 玄武质岩浆底侵下地壳(刘睿等, 2017)。玄武质岩浆的持续底侵, 使该地区的地壳持续垂向生长, 不断加厚。而本次研究表明, 晚石炭世, 西天山阿吾拉勒处在构造转折关键期, 汇聚向伸展的过渡期—后碰撞, 而此时岩石圈拆沉, 导致地幔物质底侵下地壳形成花岗岩。

孙吉明等(2012)在备战铁矿赋矿层位的英安岩中获得 329 Ma 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 汪帮耀(2017)等通过西天山阿吾拉勒东段火山岩研究认为, 成矿地质背景为活动大陆边缘型火山岩组合与伸展构造环境, 基性和中性火山熔浆活动与铁矿化密切相关。笔者获得的赋矿层位基性火山年龄为 325.3 Ma, 中性火山岩年龄为 325.1 Ma(未发表数据), 而侵入矿体和赋矿围岩中的花岗岩脉无明显矿化蚀变, 形成时代为晚石炭世($308 \sim 321$ Ma)。因此, 笔者推测, 备战铁矿应该形成于早石炭世的火山岩, 与本次研究的花岗岩体同期形成的砂卡岩无关。

5 结 论

(1) 新疆西天山备战矿区花岗岩的锆石 U-Pb 测年结果显示, 区内正长花岗岩年龄为 321.5 ± 3.6 Ma, 花岗斑岩年龄为 308 ± 1.2 Ma, 均形成于晚石炭世。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别介于 $5.7 \sim 13.3$ 和 $7.5 \sim 12.5$ 之间, 平均值为 10.91 和 10.06 , 为较高的正值, Hf 二阶段模式年龄 t_{MD2} 分别介于 $479 \sim 947$ Ma 和 $526 \sim 843$ Ma 之间, 平均值为 700 Ma 和 679 Ma, 表明其来源于新元古代新生地壳的部分熔融。

(2) 岩石地球化学特征显示, 研究区花岗岩具有高钾钙碱性、准铝质特征; 稀土元素球粒陨石标准化分布图表现为左陡右缓, Eu 强烈负异常; 微量元素显示富集 Rb、K、Th、Sr、U 等, 亏损 Ba、Nb、Ta、Ti、P 等元素, 结合区域构造特征认为, 阿吾拉勒山部分晚石炭世花岗岩类形成于后碰撞环境。

(3) 晚石炭世西天山阿吾拉勒处在构造转折的后碰撞造山阶段, 由于岩石圈拆沉作用, 地幔物质底侵, 诱发下地壳熔融形成该地区大范围的晚石炭世中酸性侵入岩。

致谢:成文过程中得到中国地质调查局西安地质调查中心教授级高工李建星的指导和帮助, 审稿专家提出建设性的建议, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1): 59–79.
- Duan S, Zhang Z, Jiang Z, et al. Geology, geochemistry, and geochronology of the Dunde iron-zinc ore deposit in western Tianshan, China[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57(57): 441–461.
- Jiang T, Gao J, Klemd R, et al. Genetically and geochronologically contrasting plagiogranites in South Central Tianshan ophiolitic mélange: Implications for the breakup of Rodinia and subduction zone processes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113(DEC. 1PT. 1): 266–281.
- Jiang Z, Zhang Z, Wang Z, et al. Geology, geochemistry, and geochronology of the Zhibo iron deposit in the Western Tianshan, NW China: Constraints on metallogenesis and tectonic setting [J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57(3): 406–424.
- Long X, Yuan C, Sun M, et al. Archean crustal evolution of the northern Tarim craton, NW China: Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints[J]. Precambrian Research, 2010, 180(3): 272–284.
- Long X, Yuan C, Sun M, et al. Reworking of the Tarim Craton by underplating of mantle plume – derived magmas: Evidence from Neoproterozoic granitoids in the Kuluketage area, NW China [J]. Precambrian Research, 2011, 187(1): 1–14.
- Ludwig K R. Using isoplot/EX, version 2, a geochronological toolkit for Microsoft excel[J]. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 1999, 47: 151–181.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rocks system[J]. Earth Science Reviews, 1994, 37(3): 215–224.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635–643.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956–983.
- 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(1): 63–81.
- Qian Q, Gao J, Klemd R, et al. Early Paleozoic tectonic evolution of the Chinese South Tianshan Orogen: constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and dioritic rocks from Xiate, NW China[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(3): 551–569.

- Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247–263.
- 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.
- Wang X S, Gao J, Klemd R, et al. The Central Tianshan Block: A microcontinent with a Neoarchean–Paleoproterozoic basement in the southwestern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Precambrian Research*, 2017, 295: 130–150.
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, et al. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion [C]//Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2015, 43: 477–507.
- Xiao W J, Qin K Z, Sun S, et al. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Chinese Tianshan: implications for crustal growth of central Asia[J]. EGS – AGU – EUG Joint Assembly, 2003.
- 董连慧, 冯京, 庄道泽, 等. 新疆地质矿产勘查回顾与展望[J]. 新疆地质, 2011, 29(1): 1–6.
- 董亮琼, 董国臣, 黄慧, 等. 东昆仑土鲁音花岗岩的地球化学, 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1737–1749.
- 冯金星. 西天山阿吾拉勒成矿带火山岩型铁矿[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- 高俊, 钱青, 龙灵利, 等. 西天山的增生造山过程[J]. 地质通报, 2009, 28(12): 1804–1816.
- 郭新成, 张建收, 余元军, 等. 新疆和静县备战铁矿地质特征及找矿标志[J]. 新疆地质, 2009, 27(4): 341–345.
- 葛松胜, 杜杨松, 王树星, 等. 新疆西天山敦德铁矿区矽卡岩成因: 矿物学和稀土元素地球化学约束[J]. 现代地质, 2014, 28(1): 61–72.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2595–2604.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481–492.
- 龙灵利, 高俊, 钱青, 等. 西天山伊犁地区石炭纪火山岩地球化学特征及构造环境[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 699–710.
- 李凤明, 赵同阳, 高奇, 等. 新疆阿吾拉勒铁矿带成矿系列和找矿重大突破[J]. 地球学报, 2023, 44(5): 849–866.
- 刘学良, 弓小平, 尹得功, 等. 新疆备战铁矿矽卡岩矿床地球化学特征及其成因意义[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2013, (4): 469–475.
- 刘睿, 王历星, 陈根文. 西天山阿吾拉勒成矿带群吉 A 型花岗岩成因、地质意义及成矿潜力评价[J]. 岩石学报, 2017, 33(6): 1741–1754.
- 罗勇, 牛贺才, 单强等. 西天山玉希莫勒盖达坂玄武安山岩—高钾玄武安山岩—粗安岩组合的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(4): 934–943.
- 潘鸿迪, 申萍, 李昌昊, 等. 新疆备战火山岩型铁矿床大哈拉军山组碳酸盐岩中铁矿体的发现及成因意义[J]. 岩石学报, 2022, 38(10): 3104–3124.
- 孙吉明, 马中平, 徐学义, 等. 新疆西天山备战铁矿流纹岩的形成时代及其地质意义[J]. 地质通报, 2012, 31(12): 1973–1982.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 北疆及邻区石炭—二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 619–641.
- 王博, 舒良树, Cluzel D, 等. 伊犁北部博罗霍努岩体年代学和地球化学研究及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1885–1900.
- 汪帮耀, 胡秀军, 王江涛, 等. 西天山查岗诺尔铁矿床地质特征及矿床成因研究[J]. 矿床地质, 2011, 30(3): 385–402.
- 汪帮耀, 荆德龙, 姜常义, 等. 西天山阿吾拉勒火山岩型铁矿带东段成矿地质背景与成矿机理[J]. 岩石学报, 2017, 33(2): 385–397.
- 王岚, 杨理勤, 王亚平, 等. 锆石 LA-ICP-MS 原位微区 U-Pb 定年及微量元素的同时测定[J]. 地球学报, 2012, 33(5): 763–772.
- 王盟, 裴先治, 张进江, 等. 伊犁地块北缘早石炭世阿拉斯坦闪长岩成因及其对北天山洋俯冲过程的启示[J]. 地质通报, 2023, 42(5): 771–787.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185–220.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. 地质通报, 2004, 23(9): 903–910.
- 徐学义, 王洪亮, 马国林等. 西天山那拉提地区古生代花岗岩的年代学和锆石 Hf 同位素研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 691–706.
- 赵仁夫, 程晓红, 王庆明, 等. 西天山—西南天山成矿带勘查新发现及找矿远景[J]. 西北地质, 2006, 39(2): 34–56.
- 张招崇, 董书云, 黄河, 等. 西南天山二叠纪中酸性侵入岩的地质学和地球化学: 岩石成因和构造背景[J]. 地质通报, 2009, 28(12): 1827–1839.
- 张喜, 高俊, 董连慧, 等. 新疆中天山乔霍特铜矿区 I 型花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1637–1648.
- 左国朝, 张作衡, 王志良, 等. 新疆西天山地区构造单元划分、地层系统及其构造演化[J]. 地质论评, 2008, 54(6): 748–767.
- 朱永峰, 周晶, 宋彪, 等. 新疆“大哈拉军山组”火山岩的形成时代问题及其解体方案[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 487–497.