

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.01.008

柴北缘赛坝沟金矿床中英云闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义

吴洪彬^{1,2}, 王炜晓^{1,2}, 郑成龙^{1,2}, 朱德全^{1,2}, 唐名鹰^{1,2}, 辛真^{1,2}, 杨震^{1,2}

(1. 山东省第八地质矿产勘查院, 山东 日照 276826; 2. 山东省地矿局
有色金属找矿与资源评价重点实验室, 山东 日照 276826)

摘 要:对赛坝沟英云闪长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试及岩石地球化学分析。结果表明,英云闪长岩的形成年龄为 (470.4 ± 5.2) Ma, 属中奥陶世。英云闪长岩 SiO_2 含量为 62.46%~64.19%, 平均为 63.20%, Al_2O_3 含量为 14.39%~15.01%, 平均为 14.71%, 全碱含量 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) 为 2.32%~3.55%, 平均为 3.08%, 富 Na 贫 K, 铝饱和指数 A/CNK 值为 1.09~1.26, 属低钾钙碱性过铝质花岗岩。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 表现出 Ba、Th 等元素富集, Nb、P、Ti 等元素强烈亏损。英云闪长岩稀土元素总量 (ΣREE) 偏低, 轻重稀土分馏程度较低, Eu 基本无异常, 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上, 呈舒缓“右倾型”。结合区域构造演化史及英云闪长岩的形成年龄, 认为赛坝沟英云闪长岩为 I 型花岗岩, 形成于消减带陆缘弧构造环境。结合赛坝沟金矿的年代学研究, 认为赛坝沟金矿成矿作用与中奥陶世英云闪长岩的岩浆活动并无成因联系。

关键词:锆石 U-Pb 测年; 地球化学特征; 英云闪长岩; 赛坝沟金矿床; 柴北缘

中图分类号: P581; P597.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2022)01-0101-13

Zircon U-Pb Age, Geochemical Characteristics and Geological Significance of Tonalite in Saibagou Gold Deposit, the Northern Margin of Qaidam

WU Hongbin^{1,2}, WANG Weixiao^{1,2}, ZHENG Chenglong^{1,2}, ZHU Dequan^{1,2},
TANG Mingying^{1,2}, XIN Zhen^{1,2}, YANG Zhen^{1,2}

(1. No. 8 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Rizhao 276826, Shandong, China;

2. Key Laboratory of Non-ferrous Metals Mining and Resource Evaluation in Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Rizhao 276826, Shandong, China)

Abstract: This paper carried out the LA-ICP-MS zircon U-Pb age testing and analyzed the geochemical characteristics of Saibagou tonalite. The results show that the formation age of tonalite is (470.4 ± 5.2) Ma, belonging to the Middle Ordovician. The SiO_2 content of tonalite is between 62.46% and 64.19%, with an average of 63.20%; Al_2O_3 is between 14.39% and 15.01%, with an average of 14.71%; the total alkali content ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) is 2.32% to 3.55%, with an aver-

收稿日期: 2020-07-22; 修回日期: 2021-06-12; 网络发表日期: 2021-12-06; 责任编辑: 许英

基金项目: 国家自然科学基金项目“胶东新类型金矿成矿机理研究——“辽上式”黄铁矿碳酸盐型金矿床”(41973048), 山东省地矿局科技创新项目“青海省日龙沟-赛什唐成矿带找矿成果及找矿技术方法研究”(Y201924)资助。

作者简介: 吴洪彬(1988-), 男, 本科, 工程师, 主要从事区域地质调查与矿产勘查工作。E-mail: 823741071@qq.com。

age of 3.08%, rich in Na and poor in K; the aluminum saturation index A/CNK is between 1.09 and 1.26, being peraluminous granite of low potassium calcium-alkaline. In the original mantle standardized trace element cobweb diagram, Ba and Th are enriched, and Nb, P and Ti are strongly depleted. The total rare earth element (ΣREE) of tonalite is low and the degree of light and heavy rare earth fractionation is also low; Eu is no abnormal, the rare earth element distribution pattern is slightly “right-inclined” in the standardized spheroidal meteorite. Considering the regional tectonic evolution and the formation age of tonalite, it is believed that Saibagou tonalite is the I-type granite formed in the continental marginal arc tectonic environment of the subduction zone. Based on the chronological study of Saibagou gold deposit, it is concluded that there is no genetic relationship between the mineralization and the magmatism of tonalite in the middle Ordovician.

Keywords: zircon U-Pb dating; geochemical characteristics; tonalite; Saibagou gold deposit; northern margin of Qaidam

柴达木盆地北缘构造带(柴北缘构造带)位于青藏高原东北边缘,东起青海省都兰县的沙柳河,向西经德令哈、锡铁山、鱼卡、达肯大坂山,最远到阿尔金断裂带附近的小赛什腾山,东西延伸超过 700 km (潘桂堂等, 2009)。北侧为全吉地块(刘卫东, 2016),南侧为柴达木地块,由滩间山岛弧构造带、柴北缘韧性剪切带及鱼卡-沙柳河高压-超高压变质带等 3 个主要构造单元组成(孙矫鹏等, 2015; 王惠初, 2006)。而赛坝沟金矿床就发育在柴北缘构造区东段。该区域岩浆活动较频繁且强烈,断裂构造发育,区域构造方向以北西—南东向为主,次级断裂较发育,区域矿产丰富,成矿条件优越(张庆来等, 2014)。青海省地矿局地质六队于 1994~1995 年做水系沉积物异常检查时发现赛坝沟金矿床,并进行初步评价(丰成友等, 2002);山东省第八地质矿产勘查院自 2012 年开始进行勘查工作,随着矿床深部及外围找矿的突破,发现赛坝沟金矿床已达到中型岩金矿床,并具有成为大型规模的潜力(张庆来等, 2014; 唐名鹰等, 2020);付青元(1998)、丰成友(2002)、童海奎(2009)、张玉瑜(2018)等对该岩金矿床进行了初步研究,重点讨论了该矿床的地质特征、控矿条件及形成时代,但对赋矿围岩英云闪长岩的形成时代研究相对较少。本次研究通过采集赛坝沟金矿床赋矿围岩样品,利用锆石 U-Pb 定年技术,结合地球化学、岩相学特征等方面的研究,确定金矿围岩岩体侵位时代和初步判断岩浆来源,为进一步讨论赛坝沟地区构造演化及金矿成矿规律提供新的资料 and 依据。

1 区域地质背景

柴北缘构造带处于柴达木地块与南祁连地块的接触部位(辛后田等, 2006),沿柴达木盆地北缘呈北西西—南东东走向展布,为构造复杂、物质组成多样、时间跨度大的多单元复合构造带。北侧是欧龙布鲁克微陆块(全吉地块),南侧是柴达木地块,东接西秦岭造山带,西侧被阿尔金断裂所切(张德全等, 2007; 张贵宾等, 2012)(图 1a),由高压-超高压变质岩、增生杂岩、火山-岩浆弧、蛇绿岩及前寒武纪中-高级变质岩共同构成(曹泊等, 2019)。

研究区地层归属于华北地层大区,秦祁昆地层区,柴达木地层分区,柴达木北缘地层小区。区域内出露地层由老到新分别为:中元古代沙柳河岩群(辛后田等, 2004)、泥盆纪牦牛山组、早古生代滩间山岩群及第四纪地层。赛坝沟地区及周边分布有大量古生代侵入岩,为柴北缘岩浆带的组成部分;这些侵入岩形成于不同的时代,主要为柴北缘加里东期俯冲碰撞造山和海西期陆内岩浆活动的产物(唐名鹰等, 2016; 张德全等, 2005)。结合区域构造分区、岩浆活动构造混杂岩带和以夏乌日塔断裂为界,研究区内发育的侵入岩可划分为 3 个岩浆带。自北至南分别为早志留世同碰撞花岗岩带、中奥陶世岛弧-陆缘弧岩浆带和早石炭世陆内造山岩浆带。该区中奥陶世侵入岩主要包括绥力格根花岗岩闪长岩体和克错郭勒英云闪长岩体,岩体总体呈北西—南东向分布。赛坝沟金矿赋矿围岩以中奥陶世岛弧-陆缘弧岩浆带

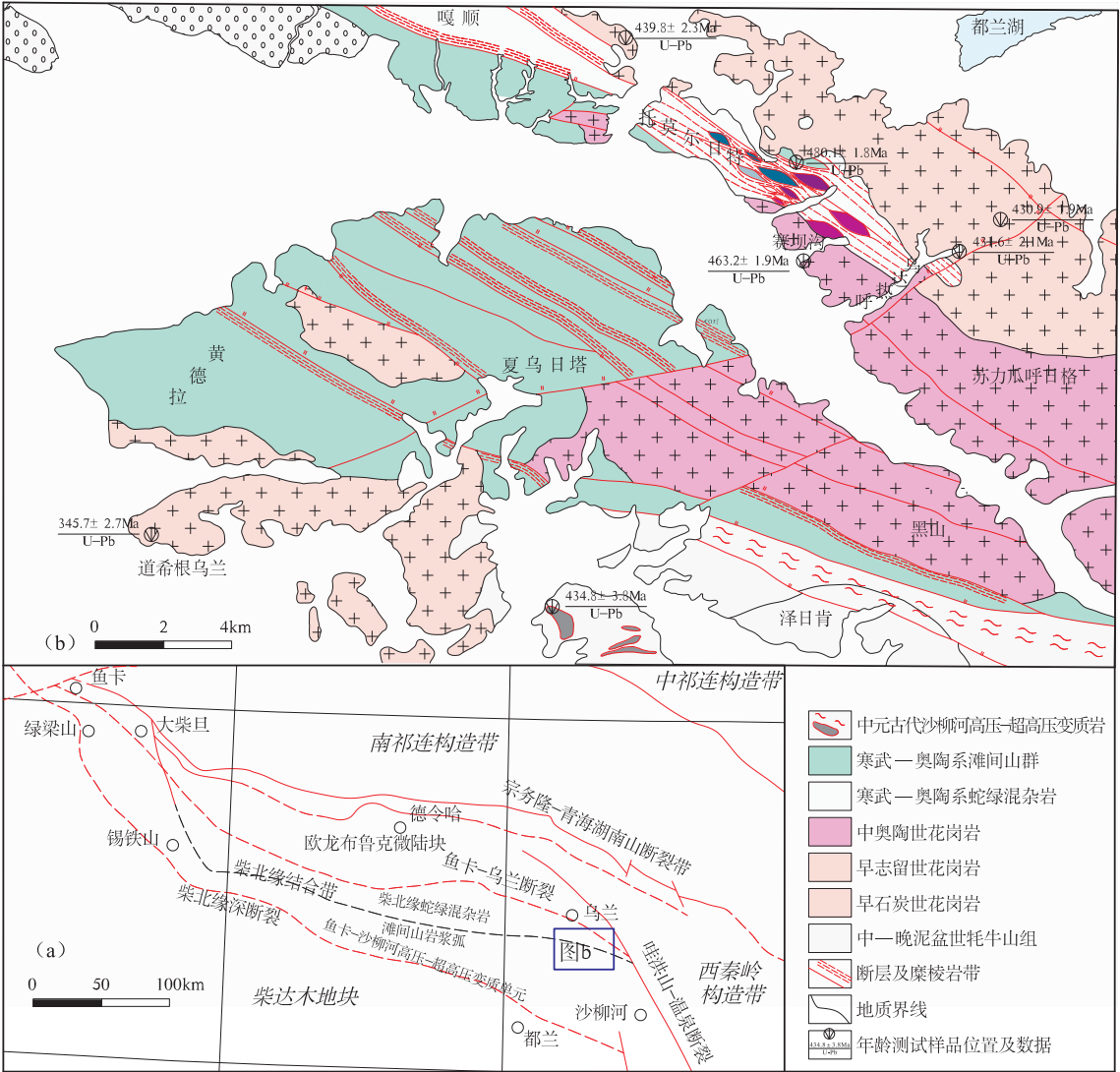


图 1 (a)研究区大地构造位置图和(b)赛坝沟地区花岗岩分布图(据王振强等,2017 修改)

Fig. 1 (a)Geotectonic location map of the study area and (b)granite distribution map of Saibagouarea

英云闪长岩为主(王振强等,2017)。

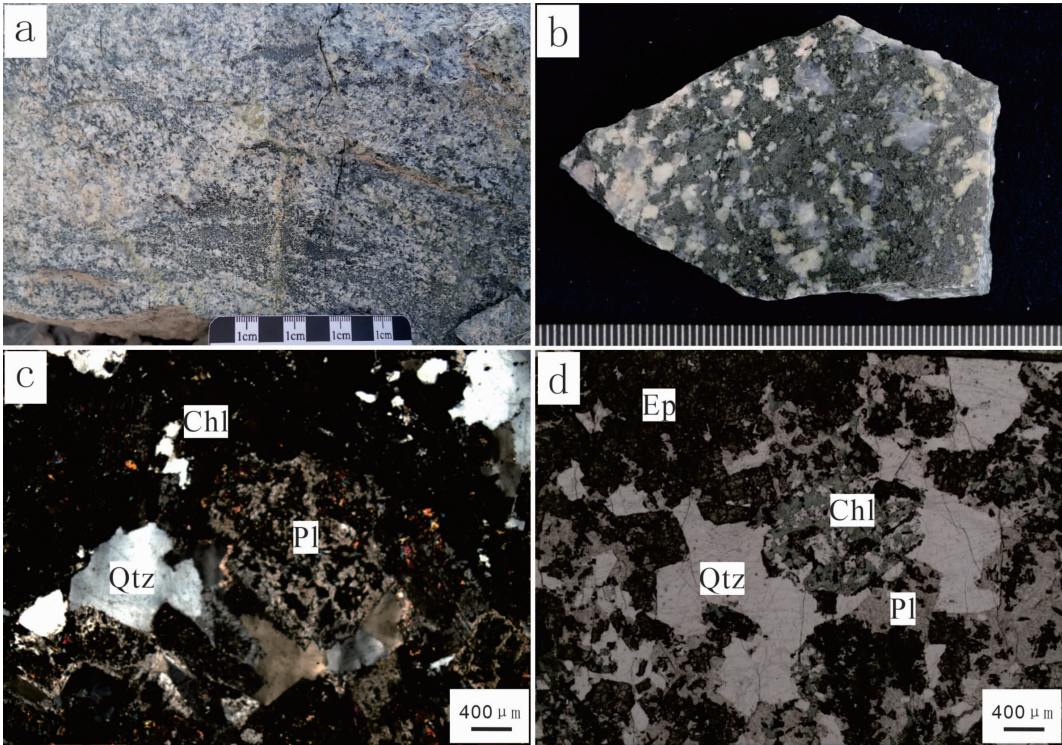
赛坝沟金矿床金矿体主要为含金石英脉型矿床,其次为含金构造蚀变岩型矿床。矿体多赋存于英云闪长岩脆-韧性断裂带中,与围岩界线清晰,并严格受构造控制。与成矿有关的蚀变主要有黄铁绢英岩化、黄铁矿化、硅化,其次为碳酸盐化、黄钾铁矾化等。矿体产状与矿区内断裂产状大体一致,以北西西向为主,是与脆-韧性剪切带有关的岩金矿床。而中奥陶世英云闪长岩有可能仅仅是矿体的围岩,其岩浆活动与成矿作用并无成因联系(王振强等,2017)。

2 岩相学特征

中奥陶世英云闪长岩在矿区大面积出露(图 1b),出露面积约 56.4 km²,主要分布在克错郭勒冲沟两侧,其西部和南部与滩间山群呈断层接触关系,北部后期被早志留世二长花岗岩侵入。大部分岩体不同程度发育绿泥石化、绿帘石化等蚀变现象,局部岩体中可见轻微糜棱岩化现象。同时大部分岩体内可见大量暗色微粒包体,局部暗色微粒包体富集,形成包体群,相比寄主岩石颜色较深,含量可达寄主岩石 10%以上,同时与捕虏体共生,暗色微粒包体与寄主岩体接触部位可见冷凝边、浅色边、暗色边。包体多呈椭球状、舌状、拉长透镜状,小部分为水滴状、不规则状,但是都具有塑性特征,小部分包体呈椭圆-透镜状,该类型包体是岩浆混合和流动的特殊标志,可指示岩浆流动方向。

赛坝沟地区英云闪长岩主要特征为:岩石呈灰-灰白色,略带淡绿色,中-粗粒花岗结构,块状构造,主要由斜长石、石英、角闪石及少量黑云母、绿泥石等组成,浅色矿物粒径一般为 2~7 mm,深色矿物粒径一般为 1~5 mm,晶粒杂乱排列,多呈镶嵌状

分布。斜长石含量为 55%~60%,可见聚片双晶发育,具轻微绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化等蚀变现象;石英含量为 25%~30%,呈他形粒状,分散状不均匀填充于斜长石间隙中,具波状消光;角闪石含量为 5%~10%,颜色呈墨绿色,分布不均匀(图 2)。



Qtz. 石英;Chl. 绿泥石;Pl. 斜长石;Ep. 绿帘石

图 2 (a)、(b)赛坝沟英云闪长岩野外及(c)、(d)镜下特征图

Fig. 2 (a)、(b)Field and (c)、(d)microscopic characteristics of tonalite in Saibagou

3 分析方法

该研究所采集的年龄样品在南京宏创地质勘查技术服务有限公司实验室完成破碎、锆石挑选以及制靶。在湖北省地质实验测试中心岩石矿物研究室完成阴极发光(CL)图像,以及 LA-ICP-MS 定年。阴极发光图像所选用的仪器为 JSM-IT300 扫描电子显微镜,该系统采用自动版 193 nmArF 准分子激光剥蚀系统,由德国 Coherent 公司所生产。该系统剥蚀频率从 1~20 Hz 连续可调,束斑直径可从 9~160 μm 逐档变化,共分 9 个档位,能量密度最高可达 59.3 J/cm²,脉冲输出能量最高为 258 mJ。电

感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)采用 Agilent7700X 型电感耦合等离子体质谱仪,由美国 Agilent 公司生产(唐名鹰等,2020)。锆石定年测试分析采用点剥蚀方式,以 91500 为外标(Jackson S E et al.,2004),元素含量采用 Si 为内标,NIST 610 为外标。样品的同位素比值和元素含量采用 ICPMSDataCal10.1 程序(Liu Y S et al.,2010)处理分析。锆石 U-Pb 谐和图的绘制以及加权平均年龄的计算采用 Isoplot3.0(Ludwig K R.,2003)完成。所选样品岩石地球化学分析主量元素、微量元素及稀土元素均在山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队中心实验室完成。

4 分析结果

4.1 锆石特征及定年结果

由镜下鉴定结果可知,样品中锆石大部分自形程度较好,无色透明,较光滑,个别锆石中含有不透明包体,锆石呈短柱状、长柱状或者粒状,长度一般为 60~200 μm,长宽比为 2:1~3:1,阴极发光图像(图 3)显示清晰岩浆型锆石震荡环带。对样品 SBGWL1 测定了 23 颗锆石,测定结果见表 1。测点中 Th 为 $37.8\times10^{-6}\sim402\times10^{-6}$,U 含量为 84.2

$\times10^{-6}\sim762\times10^{-6}$,锆石 Th/U 值为 0.36~0.77,平均为 0.53。在 U-Pb 谐和图上出现了 2 个集中区(图 4):第一组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(470.4\pm5.2)\text{Ma}$ (置信度为 96%),该组锆石分别为 13、14、15、17、18、19、20、21、22、23 号,均显示岩浆锆石特征,震荡环带清晰,多呈条纹状,代表锆石形成年龄;第二组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(489.6\pm6.0)\text{Ma}$ (置信度为 98%),该组锆石分别为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、16 号,多呈长柱状,个别为粒状或断头晶,自形程度较差,局部透明度较差,多处颜色较深,代表捕获锆石的年龄。

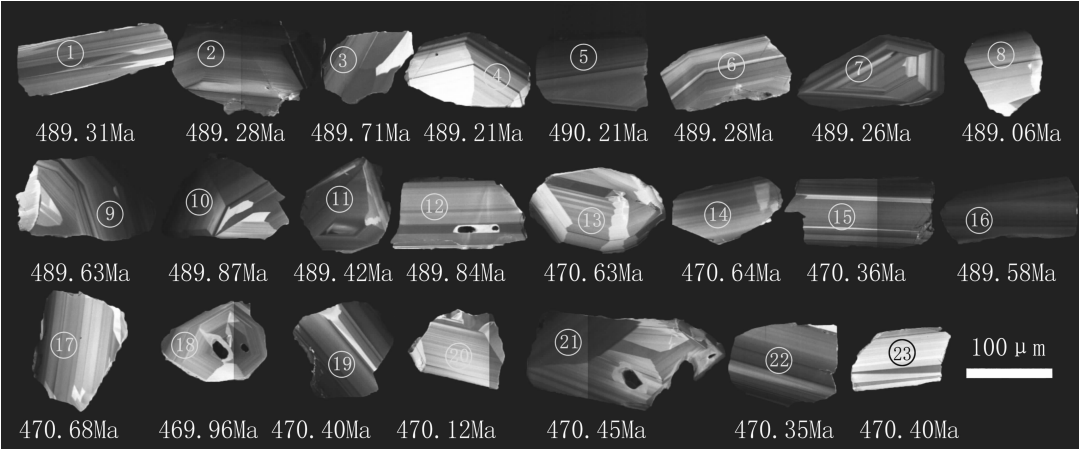


图 3 锆石阴极发光 (CL) 图像

Fig. 3 Zircon cathodoluminescence (CL) image

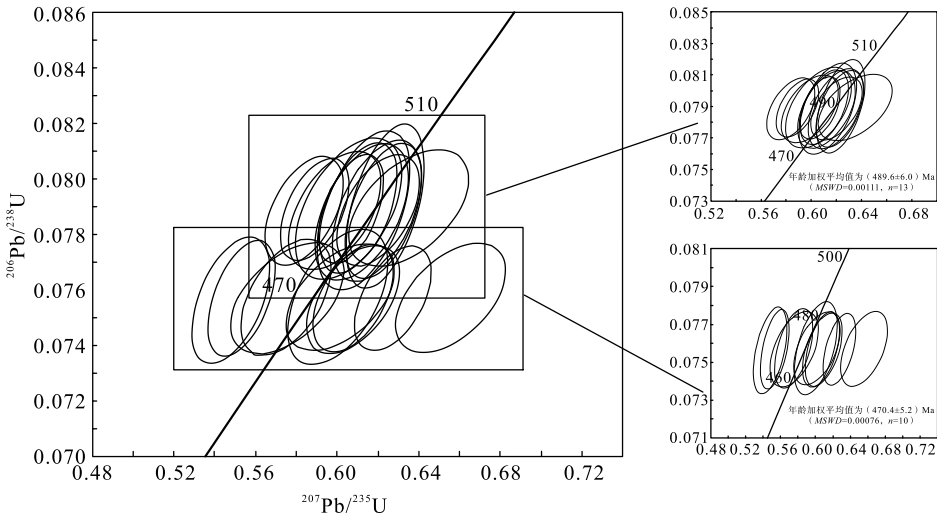


图 4 赛坝沟英云闪长岩锆石 U-Pb 谐和图及年龄加权平均值图

Fig. 4 Age-weighted mean values of zircon U-Pb from tonalite in Saibagou

表 1 赛坝沟英云闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果表
Tab. 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb age analysis results of tonalite in Saibagou

测试 点号	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		Th ²³² U ²³⁸		Th/U
	比值	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ	年龄 (Ma)	±1σ	年龄 (Ma)	±1σ	年龄 (Ma)	±1σ	(10 ⁻⁶)		
01	0.056 3	0.001 0	0.613 1	0.015 1	0.078 9	0.001 9	0.021 6	0.000 6	465	36.1	486	9.5	489.31	11.4	168	218	0.77
02	0.056 5	0.000 9	0.619 4	0.014 5	0.078 9	0.001 7	0.023 7	0.000 6	472	35.2	489	9.1	489.28	10.1	177	438	0.40
03	0.055 5	0.001 4	0.605 6	0.017 3	0.078 9	0.001 7	0.024 4	0.000 8	432	55.6	481	11.0	489.71	10.1	105	186	0.56
04	0.057 4	0.001 1	0.622 6	0.012 4	0.078 8	0.001 6	0.023 8	0.000 8	506	40.7	491	7.8	489.21	9.7	151	253	0.60
05	0.057 5	0.000 9	0.623 4	0.012 7	0.079 0	0.002 0	0.024 9	0.000 7	509	37.0	492	8.0	490.21	11.8	380	614	0.62
06	0.054 8	0.001 1	0.598 8	0.015 1	0.078 9	0.001 4	0.024 7	0.001 0	467	41.7	476	9.6	489.28	8.5	56.2	155	0.36
07	0.053 5	0.001 1	0.583 6	0.012 7	0.078 9	0.001 3	0.023 1	0.000 9	350	44.4	467	8.2	489.26	7.8	97.1	240	0.40
08	0.056 1	0.001 1	0.611 9	0.015 2	0.078 8	0.001 6	0.024 0	0.000 9	457	42.6	485	9.6	489.06	9.8	119	264	0.45
09	0.055 6	0.000 9	0.606 6	0.010 7	0.078 9	0.001 3	0.022 7	0.000 6	435	5.6	481	6.8	489.63	7.8	402	762	0.53
10	0.056 0	0.001 0	0.610 3	0.012 6	0.079 0	0.001 6	0.024 1	0.000 7	454	45.4	484	8.0	489.87	9.3	252	479	0.53
11	0.056 5	0.001 0	0.620 0	0.013 5	0.078 9	0.001 3	0.024 4	0.000 8	472	38.9	490	8.5	489.42	7.9	153	358	0.43
12	0.058 2	0.001 8	0.635 0	0.019 5	0.078 9	0.001 4	0.027 2	0.001 2	539	69.4	499	12.1	489.84	8.4	55.6	106	0.52
13	0.057 1	0.001 5	0.601 6	0.017 7	0.075 7	0.001 3	0.026 5	0.001 1	494	57.4	478	11.2	470.63	7.7	50.1	103	0.49
14	0.054 7	0.001 3	0.574 8	0.014 6	0.075 7	0.001 4	0.022 7	0.000 8	467	53.7	461	9.4	470.64	8.3	69.6	160	0.44
15	0.052 8	0.001 1	0.553 1	0.010 9	0.075 7	0.001 4	0.020 2	0.000 6	320	46.3	447	7.1	470.36	8.3	148	202	0.73
16	0.053 6	0.001 0	0.588 9	0.011 2	0.078 9	0.001 2	0.023 2	0.000 7	354	36.1	470	7.2	489.58	7.3	208	400	0.52
17	0.057 1	0.001 5	0.600 2	0.016 3	0.075 7	0.001 6	0.022 4	0.001 1	498	57.4	477	10.4	470.68	9.7	68.4	125	0.55
18	0.052 3	0.001 2	0.547 8	0.012 7	0.075 6	0.001 5	0.025 2	0.001 1	298	45.4	444	8.3	469.96	9.1	64.4	162	0.40
19	0.057 7	0.001 1	0.607 7	0.013 1	0.075 7	0.001 3	0.021 4	0.000 7	520	42.6	482	8.3	470.40	7.8	167	266	0.63
20	0.058 0	0.001 5	0.607 8	0.015 1	0.075 7	0.001 3	0.022 4	0.001 0	528	55.5	482	9.6	470.12	7.8	57.6	104	0.55
21	0.061 7	0.001 4	0.655 6	0.017 9	0.075 7	0.001 3	0.021 6	0.001 0	665	50.8	512	11.0	470.45	7.9	144	230	0.63
22	0.059 8	0.001 0	0.627 3	0.012 4	0.075 7	0.001 3	0.022 0	0.000 7	594	35.2	494	7.8	470.35	7.5	214	312	0.69
23	0.054 8	0.001 7	0.575 4	0.018 4	0.075 7	0.001 3	0.019 7	0.001 5	467	70.4	462	11.9	470.40	7.9	37.8	84.2	0.45

注:测试单位为湖北省地质实验测试中心(国土资源部武汉矿产资源监督检测中心)岩石矿物研究室,2019。

4.2 主量元素

所选样品英云闪长岩地球化学全分析结果见表 2。岩石样品中 SiO₂ 含量较高,为 62.46%~64.19%,平均为 63.20%,全碱含量(K₂O+Na₂O)为 2.32%~3.55%,平均为 3.08%,K₂O/Na₂O 为 0.09~0.38,平均为 0.25,富 Na 贫 K,在 AFM 图中具有钙碱性系列演化趋势,属于低钾钙碱性系列区间(图 5a)。Al₂O₃ 含量为 14.39%~15.01%,平均为 14.71%,铝饱和指数 A/CNK 为 1.09~1.26,为过铝质花岗岩(图 5b)。英云闪长岩具有元素含

量变化小和富 Na 贫 K 的主量元素化学特征。

4.3 微量元素

样品微量元素在原始地幔(Sun S S et al., 1989)标准化蛛网图(图 6a)上显示英云闪长岩微量元素的配分模式大体一致。微量元素质量分数均高于原始地幔值,岩石中大离子亲石元素(LILE)Rb、Sr、Ba 含量较高,分别为 10.84×10⁻⁶~31.35×10⁻⁶、200.87×10⁻⁶~249.29×10⁻⁶、95.82×10⁻⁶~393.25×10⁻⁶;放射性生热元素(RPH)Th、U 含量较低,分别为 0.24×10⁻⁶~0.28×10⁻⁶、0.71×

表 2 赛坝沟英云闪长岩主量、微量和稀土元素测试数据表
Tab. 2 Main, trace and rare earth elements test data of tonalite in Saibagou

项目	赛坝沟英云闪长岩			赛坝沟英云闪长岩(引自王振强等,2017)							赛坝沟花岗闪长岩 (引自丰成友等,2002)		
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3
SiO ₂	62.46	62.94	64.19	75.35	69.59	67.77	74.76	72.65	72.31	74.1	66.09	56.39	62.59
Al ₂ O ₃	14.74	15.01	14.39	12.35	13.82	14.06	10.83	11.7	12.09	11.98	14.73	16.78	16.3
Fe ₂ O ₃	8.1	6.46	7.16	0.85	2.29	2.29	1.79	2.12	1.06	1.34	3.02	3.29	2.68
FeO	5.13	3.85	4.28	2.14	2.45	2.56	3.02	2.89	4.21	1.98	3.13	5.04	3.62
MgO	2.76	2.26	2.27	0.89	1.4	2.1	0.64	0.8	0.99	1.22	1.9	3.95	2.54
CaO	4.51	4.66	3.61	1.13	4.47	3.06	2.69	2.77	1.86	1.26	6.02	7.37	5.33
Na ₂ O	1.83	2.57	3.1	5.23	3.61	3.36	3.66	4.6	4.49	5.25	2.64	2.96	3.18
K ₂ O	0.49	0.98	0.28	0.23	0.41	1.31	0.3	0.46	0.51	0.66	0.33	0.74	0.88
MnO	0.14	0.14	0.14	0.89	1.4	2.1	0.64	0.8	0.99	1.22	0.17	0.15	0.15
TiO ₂	0.43	0.38	0.44	0.24	0.29	0.34	0.25	0.29	0.29	0.28	0.35	0.65	0.5
P ₂ O ₅	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07	0.09	0.03	0.06	0.07	0.09	0.14	0	0
烧失量	0.6	0.69	0.07	0.15	0.22	0.28	0.18	0.24	0.4	0.66	1.4	0	0
Σ	101.26	100	100	99.51	100.02	99.32	98.79	99.38	99.27	100.04	99.92	97.32	97.77
ALK	2.32	3.55	3.38	5.46	4.02	4.67	3.96	5.06	5	5.91	2.97	3.7	4.06
A/CNK	1.26	1.09	1.20	1.13	0.95	1.12	0.96	0.89	1.07	1.03	0.94	0.88	1.03
La	4.86	4.23	3.98	7.66	4.98	18.8	5.78	5.57	4.82	10.6	4.38	—	—
Ce	16.4	24.02	14.97	16.9	10.3	32.2	11.5	12.3	11.2	24.2	10.27	—	—
Pr	1.57	1.26	1.18	2.23	1.27	3.32	1.21	1.65	1.49	3.32	1.34	—	—
Nd	7.67	6.11	5.73	11.6	6.5	13.2	5.74	8.37	7.42	16.2	6.27	—	—
Sm	2.53	1.93	1.87	3.11	1.78	2.52	1.36	2.21	2.19	4.14	1.85	—	—
Eu	0.87	0.73	0.76	0.68	0.61	0.74	0.58	0.67	0.62	0.85	0.78	—	—
Gd	2.88	2.16	2.1	4.12	1.84	2.06	1.57	3.24	2.77	4.74	2.62	—	—
Tb	0.66	0.46	0.5	0.8	0.34	0.32	0.3	0.59	0.5	0.81	0.47	—	—
Dy	4.78	3.32	3.5	5.51	2.28	1.72	2.2	4.15	3.6	5.41	2.81	—	—
Ho	1.05	0.76	0.78	1.23	0.46	0.32	0.45	0.87	0.73	1.1	0.68	—	—
Er	3.09	2.16	2.3	3.85	1.47	1.02	1.53	2.83	2.24	3.37	2.07	—	—
Tm	0.54	0.41	0.39	0.71	0.26	0.16	0.26	0.48	0.37	0.58	0.31	—	—
Yb	3.42	2.53	2.54	4.59	1.67	1.02	1.66	2.92	2.4	3.69	2.13	—	—
Lu	0.52	0.41	0.4	0.73	0.26	0.15	0.24	0.45	0.34	0.54	0.3	—	—
ΣREE	50.84	50.49	41	63.72	34.02	77.55	34.38	46.3	40.69	79.55	36.28	—	—
LREE	33.9	38.28	28.49	42.18	25.44	70.78	26.17	30.77	27.74	59.31	24.89	—	—
HREE	16.94	12.21	12.51	21.54	8.58	6.77	8.21	15.53	12.95	20.24	11.39	—	—
La _N /Yb _N	0.96	1.13	1.06	1.13	2.01	12.43	2.35	1.29	1.35	1.94	1.39	—	—

续表 2

项目	赛坝沟英云闪长岩			赛坝沟英云闪长岩(引自王振强等,2017)							赛坝沟花岗闪长岩 (引自丰成友等,2002)		
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3
δEu	0.98	1.09	1.17	0.58	1.02	0.96	1.21	0.76	0.77	0.59	1.08	—	—
Ba	393.25	311.1	95.82	154	324	270	78.8	156	140	190	330	—	—
Rb	18.2	31.35	10.84	4.62	7.13	41	3.98	5.5	6.04	9.36	16.21	—	—
Th	0.95	0.83	0.71	3.74	1.43	4.9	1.65	2.2	1.79	2.71	1	—	—
Nb	1.6	1.29	1.23	2.3	2.43	6.25	1.85	1.95	2.04	2.16	2.1	—	—
Ta	0.21	0.17	0.19	0.21	0.27	0.5	0.2	0.22	0.2	0.24	1.19	—	—
Sr	200.87	218.95	249.29	123	178	368	204	172	157	121	228	—	—
P	309.86	270.58	318.59	257.49	309.86	401.51	130.93	279.31	283.67	379.69	496.9	—	—
Zr	47.72	40.29	44.68	104	81.9	114	56.2	76.6	60	99.2	21.34	—	—
Hf	2.2	2.8	2.1	2.58	2.84	4.22	1.82	2.82	2.47	3.86	—	—	—
Ti	2 571.18	2 247.54	2 619.13	1 438.42	1 738.09	2 037.77	1 498.36	1 738.09	1 738.09	1 678.16	2 075	—	—
Y	24.59	17.67	19.05	33.3	13	8.81	12.8	23.2	20.1	30.3	20.41	—	—
U	0.26	0.28	0.24	0.56	0.26	0.73	0.58	0.51	0.51	0.63	—	—	—

注:主量元素含量为 10⁻²,微量及稀土元素含量为 10⁻⁶;测试单位:山东省第八地质矿产勘查院中心实验室,2019。

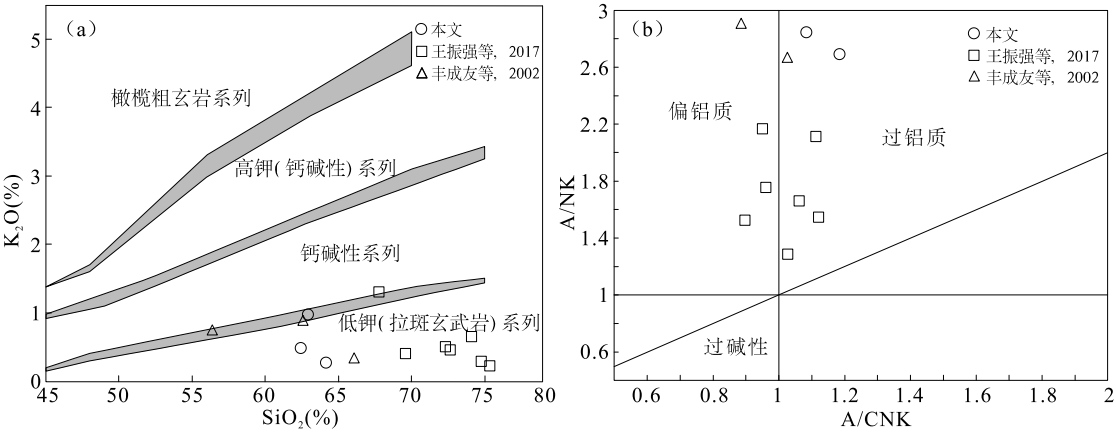


图 5 (a)赛坝沟英云闪长岩 SiO₂-K₂O 和(b)A/CNK-A/NK 图解

Fig. 5 SiO₂-K₂O (a) and A/CNK-A/NK diagrams of tonalite in Saibagou

10⁻⁶~0.95×10⁻⁶;高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Zr、Hf 含量分别为 1.23×10⁻⁶~1.6×10⁻⁶、0.17×10⁻⁶~0.21×10⁻⁶、40.29×10⁻⁶~47.72×10⁻⁶、2.1×10⁻⁶~2.8×10⁻⁶。

蛛网图上表现出 Ba、Th 等元素富集,Nb、P、Ti 等元素强烈亏损。Nb 亏损可能是受大陆壳混染;P 亏损是由岩浆存在磷灰石分离结晶导致;Ti 亏损可能与岩浆分异过程中富钛矿物分离结晶作用有很大关系。

4.4 稀土元素

据表 2 可知,岩石样品稀土元素总量(ΣREE)偏低,为 41×10⁻⁶~50.84×10⁻⁶,平均为 47.44×10⁻⁶,低于花岗质岩石的平均值(ΣREE=254.3×10⁻⁶, Vinogradov, 1962)。其中,轻稀土元素(LREE)总量为 24.49×10⁻⁶~38.28×10⁻⁶,重稀土元素(HREE)总量为 12.21×10⁻⁶~16.94×10⁻⁶,轻重稀土分馏程度较低;La_N/Yb_N值为 0.96~1.13,

平均值为 1.05,在球粒陨石(Masuda A et al. ,1973) 6b); $\delta\text{Eu}=0.98\sim1.17$,平均值为 1.08,Eu 基本无异常。

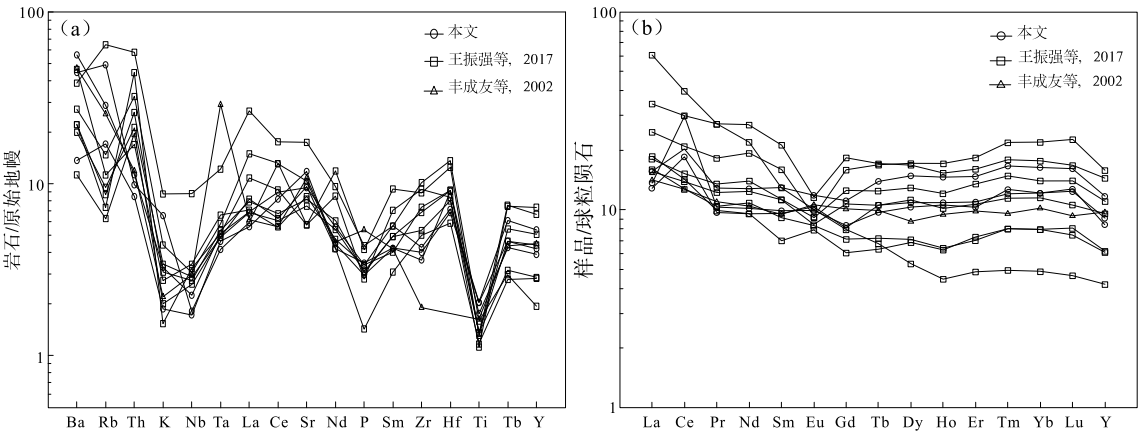


图 6 (a)赛坝沟英云闪长岩微量元素原始地幔标准化蛛网图和 (b)稀土元素球粒陨石标准化稀土元素配分模式图

Fig. 6 (a)Diagram of trace element protomantle standardized cobweb and (b)Rare earth element chondritic meteorite standardized rare earth element partitioning model of tonalite in Saibagou

5 讨论

5.1 岩浆侵位时代

赛坝沟英云闪长岩通过 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 定年,其数据结果明显可分为 2 类,与阴极发光图结果一致,通过对锆石 Th - U 之间相关性分析,第一类锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为(470.4±5.2)Ma,锆石震荡环带清晰,Th 和 U 之间具有很好的相关性($R^2=0.9153$),分布比较集中(图 7),代表岩浆结晶年龄,即赛坝沟英云闪长岩形成于加里东期中奥陶世;第二类锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为(489.6±6.0)Ma,Th 和 U 之间具有良好的相关性($R^2=0.9371$),锆石分布较分散,不均匀,可能受流体作用时间较长的原因,代表捕获锆石的年龄。根据野外实地调查,英云闪长岩岩体中有大量的暗色微粒包体,多呈椭球状、舌状、拉长透镜状等,为岩浆混合作用的重要标志,此类锆石代表上一期岩浆活动的时代信息。王惠初等(2001)在鱼卡沟滩间山群下部变玄武岩辉长岩侵入岩体中获得了(496.3±6.2)Ma 的单颗粒锆石 U - Pb 年龄;李怀坤等(2003)在青海省锡铁山地区滩间山群中酸性火山岩中获得锆石 U - Pb 年龄为(486±13)Ma;朱小辉(2011)在乌兰县托莫尔日特蛇绿岩带辉长岩中获

得锆石 U - Pb 年龄为(480±1)Ma;王振强等(2017)在青海省赛坝沟地区蛇绿混杂岩带变玄武岩中获得锆石 U - Pb 年龄为(480.1±1.8)Ma,与本次确定的锆石年龄较接近,属早奥陶世。

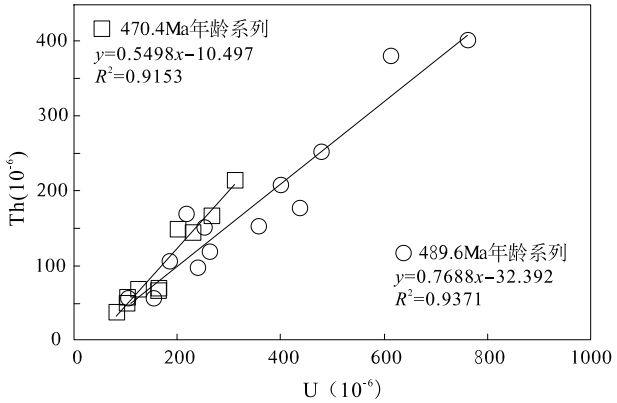


图 7 锆石 Th - U 之间的相关性图

Fig. 7 Correlation of Zircons Th - U

5.2 源区分析

前述赛坝沟英云闪长岩样品中发育大量的暗色微粒包体,表明岩体中存在幔源基性物质。岩石地球化学特征表明,英云闪长岩属低钾钙碱性过铝质系列岩石,岩石微量元素相对于原始地幔明显富集了 Ba、Sr、Rb 等大离子亲石元素,相对亏损 Ti、P、Nb 等高场强元素,具有俯冲幔源岩石的成分特点。

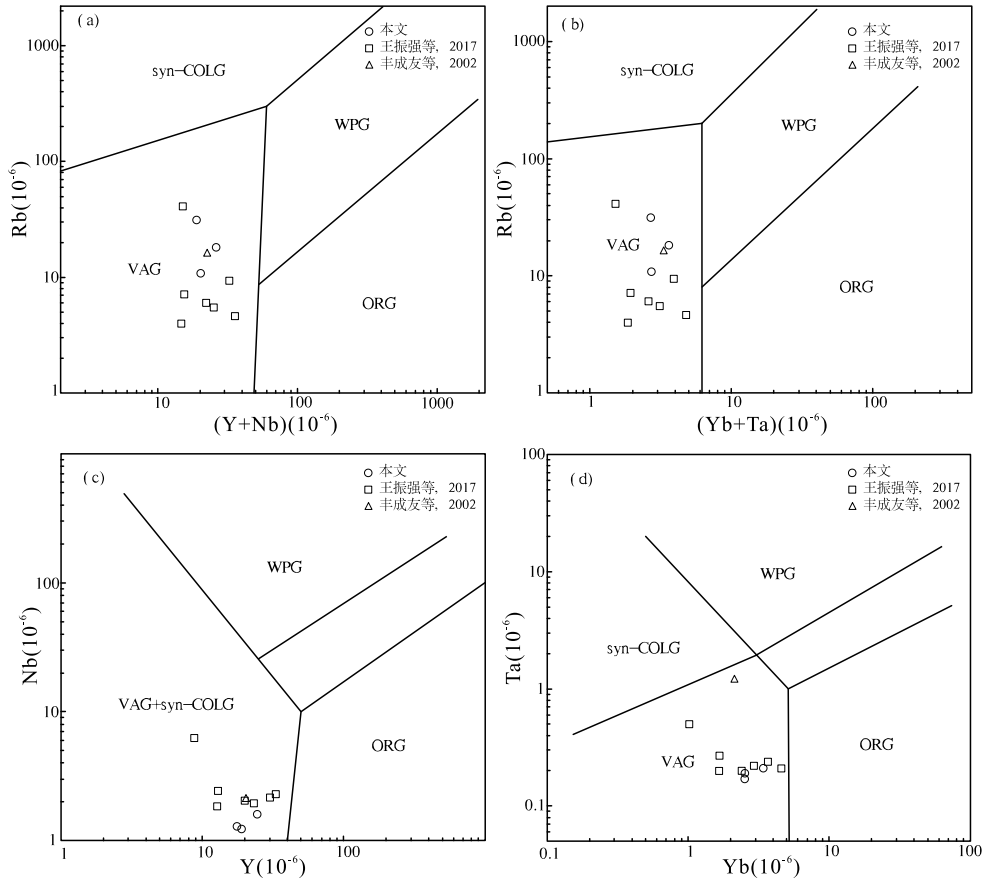
其中, Ti、Ta、Nb 负异常明显反映出消减带岩浆岩的基本特征,具 I 型花岗岩特征。微量元素比值也较好地反映了源区特点,岩石 Rb/Sr 值为 0.04~0.14(平均),介于上地幔值(0.034)与地壳值(0.35)之间(Taylor S R et al., 1995),但更偏向于地壳端元;Nb/Ta 值为 6.47~7.62(平均),小于大陆地壳值(11)含量比值(Sun S S et al., 1989),二者比值均显示岩石来自于地壳物质,并有部分上地幔物质参与。由此表明赛坝沟金矿区英云闪长岩物质来源具有壳幔混合的特点。

5.3 构造环境

赛坝沟矿区出露地层主要为潍间山岩群,主要岩性为二云石英片岩组合及斜长角闪片岩组合。这 2 类岩石组合走向基本一致,均呈北西—南东向展布。测区内加里东时期岩浆活动极为强烈,岩浆岩出露面积约占测区总面积的 2/3,岩性从酸性岩到超基性岩均可见。岩石类型有正长花岗岩、二长花

岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩、闪长岩、辉石岩和橄榄岩等,脉岩也较发育。岩体长轴均沿北西向分布;区内构造较为发育,总体表现为一系列紧密排列的韧性变形带,总体走向为 290°~330°,与区域构造线方向基本一致,倾向多为北东向,倾角多较陡,力学性质多表现为压性、压扭性。赛坝沟金矿床矿体赋存在英云闪长岩中,矿体空间延伸严格受北西向韧性剪切带所控制。金矿体赋存规模及品位是由破碎蚀变带规模、矿化蚀变强度以及后期石英脉活动程度所决定的。一般小型裂隙小型构造密集发育,矿化蚀变程度高,而且伴有后期石英脉活动的部位金矿化程度较好,并具一定规模。

依据前述岩石地球化学分析结果,里特曼指数 $\sigma=0.28\sim0.63$, 小于 3.3, 岩石属钙碱性系列。在英云闪长岩形成环境微量元素 Rb-(Y+Nb)、Rb-(Yb+Ta)、Nb-Y、Ta-Yb 等判别图(图 8)中,岩体投影点全部落入 VAG 区域,即火山弧花岗岩区。

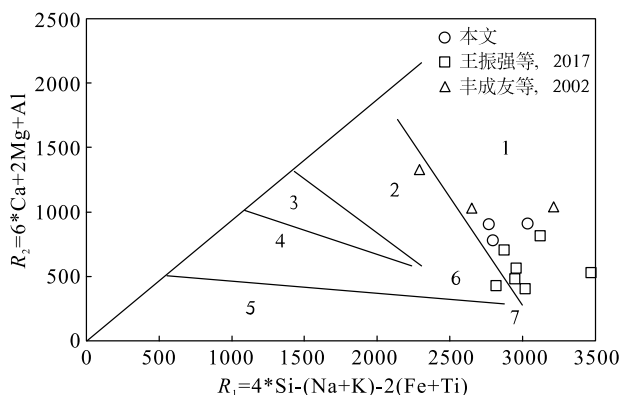


VAG. 火山弧;syn-CLOD. 同碰撞;WPG. 板内;ORG. 洋脊

图 8 (a)赛坝沟英云闪长岩 Rb-(Y+Nb)、(b)Rb-(Yb+Ta)、(c)Nb-Y 和 (d)Ta-Yb 判别图解

Fig. 8 (a)Rb-(Y+Nb), (b) Rb-(Yb+Ta), (c) NB-Y and (d) TA-YB discriminant diagram of tonalite in Saibagou

研究表明 (Sylvester P J., 1988), 过铝质花岗岩中 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值可以作为源区岩石部分熔融温度的指示剂, 当岩石的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值小于 100 时, 源区部分熔融温度大于 875°C ; 当岩石 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值大于 100 时, 源区部分熔融温度小于 875°C , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值与形成温度呈反消长关系。赛坝沟英云闪长岩 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值为 $32.93 \sim 40.03$, 平均值为 35.77, 表明赛坝沟英云闪长岩岩浆形成温度较高。在 R_1-R_2 判别图解 (图 9) 中, 岩石投于地幔分离岩浆岩区, 与前述暗色包体大量存在于岩体中一致, 而且暗色微粒包体微量元素和稀土元素组成也反映出消减带地幔楔岩浆明显受到俯冲板片流体影响, 富集大离子亲石元素。



1. 地幔分异产物; 2. 板块碰撞前; 3. 碰撞后隆起; 4. 造山晚期;
5. 非造山; 6. 同碰撞; 7. 造山后

图 9 赛坝沟英云闪长岩主量元素 R_1-R_2 判别图解

Fig. 9 R_1-R_2 discrimination diagram of tonalite in Saibagou

根据刘彬等 (2013) 研究可知, 东昆仑早古生代构造旋回分 4 个阶段: ① 洋盆打开与扩张阶段 ($579 \sim 515$ Ma), 岩浆岩多以辉长岩为主。② 洋壳俯冲阶段 ($515 \sim 436$ Ma), 岩浆岩以具岛弧岩浆岩特征的闪长岩、玄武岩、安山岩、流纹岩和辉长岩为主。③ 陆-陆碰撞阶段 ($436 \sim 428$ Ma), 多为高压榴辉岩相变质作用, 岩浆岩多以辉绿岩、流纹岩和 A 型花岗岩为主。④ 后碰撞伸展阶段 ($428 \sim 391$ Ma), 岩浆岩以 A 型花岗岩、过铝质-强过铝质花岗岩、富镁闪长岩和辉长岩为主。结合本次获得赛坝沟英云闪长岩形成的年龄为 (470.4 ± 5.2) Ma, 应该是洋壳俯冲晚期陆缘弧发育阶段。

综上所述, 认为赛坝沟英云闪长岩形成于消减带陆缘弧构造环境。丰成友等 (2002)、张德全等

(2005) 分别对赛坝沟金矿进行了年代学研究, 测得绢云母样品年龄值分别为 (426 ± 2) Ma、 (425.5 ± 2.1) Ma。而本次获得英云闪长岩锆石 U-Pb 年龄与之相差较远, 说明赛坝沟金矿成矿作用与中奥陶世英云闪长岩的岩浆活动并无成因联系。

6 结论

(1) 笔者用 LA-ICP-MS 方法对赛坝沟英云闪长岩进行锆石 U-Pb 测年, 获得 2 组年龄, 分别为 (489.6 ± 6.0) Ma 和 (470.4 ± 5.2) Ma。其中, (489.6 ± 6.0) Ma 代表捕获锆石的年龄, 反映上一期早奥陶世岩浆活动的时代信息; (470.4 ± 5.2) Ma 代表英云闪长岩岩浆锆石结晶年龄, 即英云闪长岩侵位于中奥陶世。

(2) 据地球化学结果及岩体中暗色微粒包体特征, 表明岩石来自于地壳, 并有部分上地幔物质的参与, 说明赛坝沟英云闪长岩物质来源具有壳幔混合的特点。

(3) 构造环境判别表明, 赛坝沟英云闪长岩属于火山弧花岗岩区, 为 I 型花岗岩, 岩浆侵位过程中存在大量来自地幔的基性岩浆注入; 暗色微粒包体微量元素和稀土元素组成反映出消减带地幔楔岩浆明显受到俯冲板片流体影响; 结合赛坝沟英云闪长岩形成时代及区域构造演化阶段, 表明赛坝沟英云闪长岩形成于消减带陆缘弧的构造环境。

(4) 结合赛坝沟金矿年代学研究和赛坝沟英云闪长岩的形成年龄, 表明赛坝沟金矿成矿作用与中奥陶世英云闪长岩的岩浆活动并无成因联系。

致谢: 感谢中国地质调查局西安地调中心高永宝高级工程师在本文写作过程中给予的指导、建议, 感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见, 在此表示诚挚的谢意。

参考文献 (References):

- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分 [J]. 中国地质, 2009, 36(1): 1-28.
- PAN Guitang, XIAO Qinghui, LU Songnian, et al. Subdivision of tectonic units in China [J]. Chinese Geology, 2009, 36(1): 1-28.
- 刘卫东. 柴达木盆地北缘全吉地块构造演化特征 [J]. 山东

- 国土资源, 2016, 32(11): 1-6.
- LIU Weidong. Geological Evolution Characteristics of Quanji Block in the Northern Margin of Qaidam Basin [J]. Shandong Land Resources, 2016, 32(11): 1-6.
- 孙娇鹏, 陈世悦, 彭渊, 等. 柴北缘构造带泥盆纪构造属性研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(2): 23-30.
- SUN Jiaopeng, CHEN Shiyue, PENG Yuan, et al. Research on Northern Qaidam tectonic attributes during Devonian [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2015, 39(2): 23-30.
- 王惠初. 柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山带及岩浆作用[D]. 北京: 中国地质大学地球科学与资源学院, 2006.
- WANG Huichu. Early Paleozoic Collision Orogeny and Magmatism on Northern Margin of the Qaidam Basin [D]. Beijing: School of Earth Science and Resources, China University of Geoscience, 2006.
- 张庆来, 唐名鹰, 张广庆, 等. 青海省乌兰县赛坝沟金矿生产探矿报告[R]. 日照: 山东省第八地质矿产勘查院, 2014.
- 丰成友, 张德全, 李大新, 等. 青海赛坝沟金矿地质特征及成矿时代[J]. 矿床地质, 2002, 21(1): 45-52.
- FENG Chengyou, ZHANG Dequan, LI Daxin, et al. Geological Characteristics and Oreforming Age of Saibagou Gold Deposit, Qinghai Province [J]. Mineral Deposits, 2002, 21(1): 45-52.
- 唐名鹰, 吴洪彬, 朱德全, 等. 青海省乌兰县赛坝沟金矿外围金多金属矿详查报告[R]. 日照: 山东省第八地质矿产勘查院. 2020.
- 付青元, 李宝林. 赛坝沟金矿成矿特征及控矿条件[J]. 青海地质, 1998, (1): 43-49.
- FU Qingyuan, LI Baolin. Metallogenetic Features and Ore-controlling Conditions of Saibagou Gold Deposit [J]. Qinghai Geology, 1998, (1): 43-49.
- 童海奎, 张顺桂, 许国武, 等. 乌兰县赛坝沟韧性剪切带型金矿特征及成因[J]. 西北地质, 2009, 42(1): 88-94.
- TONG Haikui, ZHANG Shungui, XU Guowu, et al. Characteristic and Genesis of Ductile-Shear Zone Related Gold Deposits in Saibagou of Wulan County [J]. Northwestern Geology, 2009, 42(1): 88-94.
- 张玉瑜, 王启蒙, 任瑞鹏, 等. 青海省乌兰县赛坝沟地区金成矿地质特征及找矿方向[J]. 地质调查与研究, 2018, 41(3): 191-197.
- ZHANG Yuyu, WANG Qimeng, REN Ruipeng, et al. Metallogenic geological characteristics and prospecting direction of the Saibagou area in Wulan county, Qinghai province [J]. Geological Survey and Research, 2016, 41(3): 191-197.
- 辛后田, 王惠初, 周世军. 柴北缘的大地构造演化及其地质事件群[J]. 地质调查与研究, 2006, 29(4): 311-320.
- XIN Houtian, WANG Huichu, ZHOU Shijun. Geological Events and Tectonic Evolution of the North Margin of the Qaidam Basin [J]. Geological Survey and Research, 2006, 29(4): 311-320.
- 张德全, 王富春, 余宏全, 等. 柴北缘-东昆仑地区造山型金矿床的三级控矿构造系统[J]. 中国地质, 2007, 34(1): 92-100.
- ZHANG Dequan, WANG Fuchun, SHE Hongquan, et al. Three-order ore-controlling structural system of orogenic gold deposits in the northern Qaidam margin-East Kunlun region [J]. Chinese Geology, 2007, 34(1): 92-100.
- 张贵宾, 张立飞, 宋述光. 柴北缘超高压变质带: 从大洋到大陆的深俯冲过程[J]. 高校地质学报, 2012, 18(1): 28-40.
- ZHANG Guibin, ZHANG Lifei, SONG Shuguang. An Overview of the Tectonic Evolution of North Qaidam UHPM Belt: from Oceanic Subduction to Continental Collision [J]. Geological Journal of China Universities, 2012, (1): 28-40.
- 曹泊, 闫臻, 付长垒, 等. 柴北缘赛坝沟增生杂岩组成与变形特征[J]. 岩石学报, 2019, 35(4): 1015-1032.
- CAO Bo, YAN Zhen, FU Changlei, et al. Component and formation of the Saibagou accretionary complex in the northern margin of the Qaidam block [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(4): 1015-1032.
- 辛后田, 周世军, 王惠初, 等. 柴达木盆地北缘“沙柳河岩群”的重新启用[J]. 西北地质, 2004, 37(1): 26-33.
- XIN Houtian, ZHOU Shijun, WANG Huichu, et al. On Re-use of Shaliuhe Group in the Northern Margin of Qaidam Basin [J]. Northwestern Geology, 2004, 37(1): 26-33.
- 唐名鹰, 董振昆, 彭永和, 等. 青海赛坝沟金矿床深部矿体地质特征及找矿远景分析[J]. 山东国土资源, 2016, 32(4): 7-11, 16.
- TANG Mingying, DONG Zhenkun, PENG Yonghe, et al. Geological Characteristics and Prospecting Analysis of Deep Ore Bodies in Saibagou Gold Deposit in Qinghai Province [J]. Shandong Land and Resources, 2016, 32(4): 7-11, 16.
- 张德全, 党兴彦, 余宏全, 等. 柴北缘-东昆仑地区造山型金矿床的 Ar-Ar 测年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2005, 24(2): 87-98.

- ZHANG Dequan, DANG Xingyan, SHE Hongquan, et al. Ar-Ar dating of orogenic gold deposits in northern margin of Qaidam and East Kunlun Mountains and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 2005, 24(2): 87-98.
- 赖绍聪, 邓晋福, 赵海玲. 柴达木北缘奥陶纪火山作用与构造机制[J]. *西安地质学院学报*, 1996, 18(3): 8-14.
- LAI Shaocong, DENG Jinfu, ZHAO Hailing. Volcanism and tectonic setting during ordovician period on north margin of Qaidam [J]. *Journal of Xi'an Collegegeology*, 1996, 18(3): 8-14.
- 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 等. 柴达木盆地北缘大柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8): 1861-1875.
- WU Cailai, GAO Yuanhong, WU Suoping, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from the Da Qaidam area in the north margin of Qaidam basin, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8): 1861-1875.
- 王振强, 王启蒙, 冯建之, 等. 青海省乌兰县赛坝沟地区 J47E020009、J47E020010 两幅 1:5 万区域地质矿产调查报告[R]. 洛阳: 河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院, 2017.
- 唐名鹰, 高振华, 董振昆, 等. 新疆西昆仑盼水河地区晚三叠世花岗闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和岩石地球化学特征[J]. *地质通报*, 2020, 39(2~3): 206-214.
- TANG Mingying, GAO Zhenhua, DONG Zhenkun, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and petrogeochemical characteristics of Late Triassic granite porphyry in Panshuihe area, West Kunlun Mountains, Xinjiang [J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(2~3): 206-214.
- 刘彬, 马昌前, 蒋红安, 等. 东昆仑早古生代洋壳俯冲与碰撞造山作用的转换: 来自胡晓钦镁铁质岩石的证据[J]. *岩石学报*, 2013, 29(6): 2093-2106.
- LIU Bin, MA Changqian, JIANG Hong'an, et al. Early Paleozoic tectonic transition from ocean subduction to collisional orogeny in the Eastern Kunlun region: Evidence from Huxiaoqin mafic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(6): 2093-2106.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1/2): 47-69.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 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 of mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51: 537-571.
- Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: A Geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4: 1-70.
- 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.
- Masuda A, Nakamura N, Tanaka T. Fine structures of mutually normalized rare-earth patterns of chondrites [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1973, 37(2): 239-248.
- Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 241-265.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes [A]. In: Saunders A D, Norry M J eds. *Magmatism in ocean basins [C]*. Geol. Soc. Special Publ., 1989, (42): 313-345.
- Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. *Lithos*, 1998, (45): 29-44.