



www.
geojournals.cn/georev

藏东巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入岩 序列锆石年龄及地球化学特征

孟会明^{1,2)}, 李文昌³⁾, 李超²⁾, 祝向平³⁾, 江小均¹⁾, 杨富成³⁾, 杨后斌⁴⁾

1) 昆明理工大学国土资源工程学院地球科学系, 昆明, 650093;

2) 国家地质实验测试中心, 北京, 100037; 3) 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都, 610081;

4) 云南省地质矿产勘查院, 昆明, 650000

内容提要: 巴达 Cu—Au 矿床位于玉龙成矿带南段, 为新近发现的碰撞型斑岩 Cu—Au 矿床, 具有独特的板内构造背景和较大的找矿潜力, 引起了地质学家的广泛关注。然而, 矿区岩浆岩岩性组合复杂, 厘定该区火山—岩浆的侵位时序及其岩石组合类型, 有利于精细刻画矿区的 Cu—Au 成矿作用, 丰富碰撞型斑岩成矿理论模型。本文基于详细的野外剖面实测及相关岩体侵位关系厘定, 认为矿区存在同期 2 阶段岩浆事件: ① 始新世早阶段富碱火山—侵入岩喷发—侵位事件; ② 始新世晚阶段云煌岩侵位事件。并对早阶段凝灰岩、粗面岩和晚阶段云煌岩进行锆石 U—Pb 年代学研究, 分别获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 34.47 ± 0.60 Ma、 34.88 ± 0.59 Ma 和 34.18 ± 0.53 Ma, 代表巴达火山—岩浆岩的喷发—侵位时代为始新世末期。岩石地球化学及 Sr—Nd—Hf 同位素研究显示, 巴达富碱火山杂岩体富集大离子亲石元素 (LILE) Rb、Sr、Ba 和轻稀土元素, 而亏损高场强元素 (HFSE) Nb、Ta、Hf 和重稀土元素, 并表现出弱的 Eu 负异常 ($0.68 \sim 0.88$); 岩石的 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值介于 $0.70629 \sim 0.70851$ 之间, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-6.41 \sim -1.57$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $0 \sim 4.4$, 两阶段 Nd 模式年龄和两阶段 Hf 模式年龄分别为 $0.98 \sim 1.37$ Ga、 $0.72 \sim 1.09$ Ga, 表明巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体主要来源于受流体交代的富集地幔, 并混染了少量地壳物质。综合上述特征, 认为巴达富碱火山—岩浆杂岩体形成于青藏高原后碰撞岩石圈折沉伸展环境。

关键词: 锆石 U—Pb 年代学; 岩石地球化学; Sr—Nd—Hf 同位素; 火山—侵入岩序列; 巴达 Cu—Au 矿床

三江特提斯构造域是我国重要的成矿带, 东西延伸的特提斯构造带向东至扬子陆块后转向东南, 该转折部位构造复杂, 岩浆活动频繁, 成矿作用强烈, 是解剖特提斯地质构造形成演化的重要“窗口”。位于该转折部位的玉龙斑岩型铜(钼)矿带(以下简称“玉龙矿带”)是金沙江—哀牢山—红河富碱侵入岩带的重要组成部分, 同时也是我国最大的斑岩铜矿带找矿远景区之一。在该带上已发现 1 个超大型、2 个大型和 2 个中型斑岩铜矿床及 20 多个矿化点。这些超大型、大型斑岩型铜矿床的发现, 吸引了大批地质学家的关注, 并在含矿岩体形成时代、岩浆物质来源、构造背景和成矿机制等方面开展了大量工作(李荫清等, 1981; 马鸿文, 1989; 丁朝建等, 1990; 张玉泉等, 1998a, b, c; Hou Zengqian et al., 2003; 侯增谦等, 2006; 吴伟中等, 2013; 陈连喜

等, 2016)。而位于玉龙矿带南段的巴达 Cu—Au 矿床在 2014 年经外围勘查发现深部有铜金矿体, 且规模较大, 目前控制金资源量和铜资源量已达到大型铜金矿床规模, 该矿床类型已被确定为富碱斑岩形成的中硫型浅成低温热液矿床(杨富成等, 2020)。但该矿床形成的系统资料极其有限, 研究程度仍然较低。尤其是矿区富碱火山—侵入岩演化序列及与 Cu—Au 成矿作用关系和形成时代等却少有研究。本文在前人的研究基础上, 对巴达 Cu—Au 矿区富碱杂岩体开展详细的岩相学解剖、锆石 U—Pb 年代学和系统的岩石地球化学及 Sr—Nd—Hf 同位素研究, 以探讨杂岩体的形成时限、岩浆来源与动力学背景。本项研究既加深了该矿床成矿体系或成矿规律的认识, 也为青藏高原东南缘新生代岩石圈构造演化和地球动力学过程研究提供新的窗口。

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号: 41673060, 41873065)的成果。

收稿日期: 2021-03-17; 改回日期: 2021-06-16; 网络首发: 2021-06-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.06.131

作者简介: 孟会明, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; Email: 2391246318@qq.com。通讯作者, 江小均, 男, 1985 年生, 副教授, 主要从事区域地质与大地构造研究与教学工作; Email: cagsjiang@126.com。

1 矿床地质背景

巴达 Cu—Au 矿区位于昌都—思茅陆块内的芒康中生代拗陷带内(图 1),东邻金沙江—哀牢山缝合带,西邻澜沧江缝合带,属于金沙江—哀牢山—红

河富碱侵入岩带的一部分。矿区出露地层较为简单(图 2),主要出露中生代和新生代地层。中生代地层主要为下白垩统景星组(K_1j)和上白垩统南新组(K_2n),新生代地层为始新统拉屋拉组(E_2l)和第四系(Q)。下白垩统景星组(K_1j),岩性以灰色—褐黄

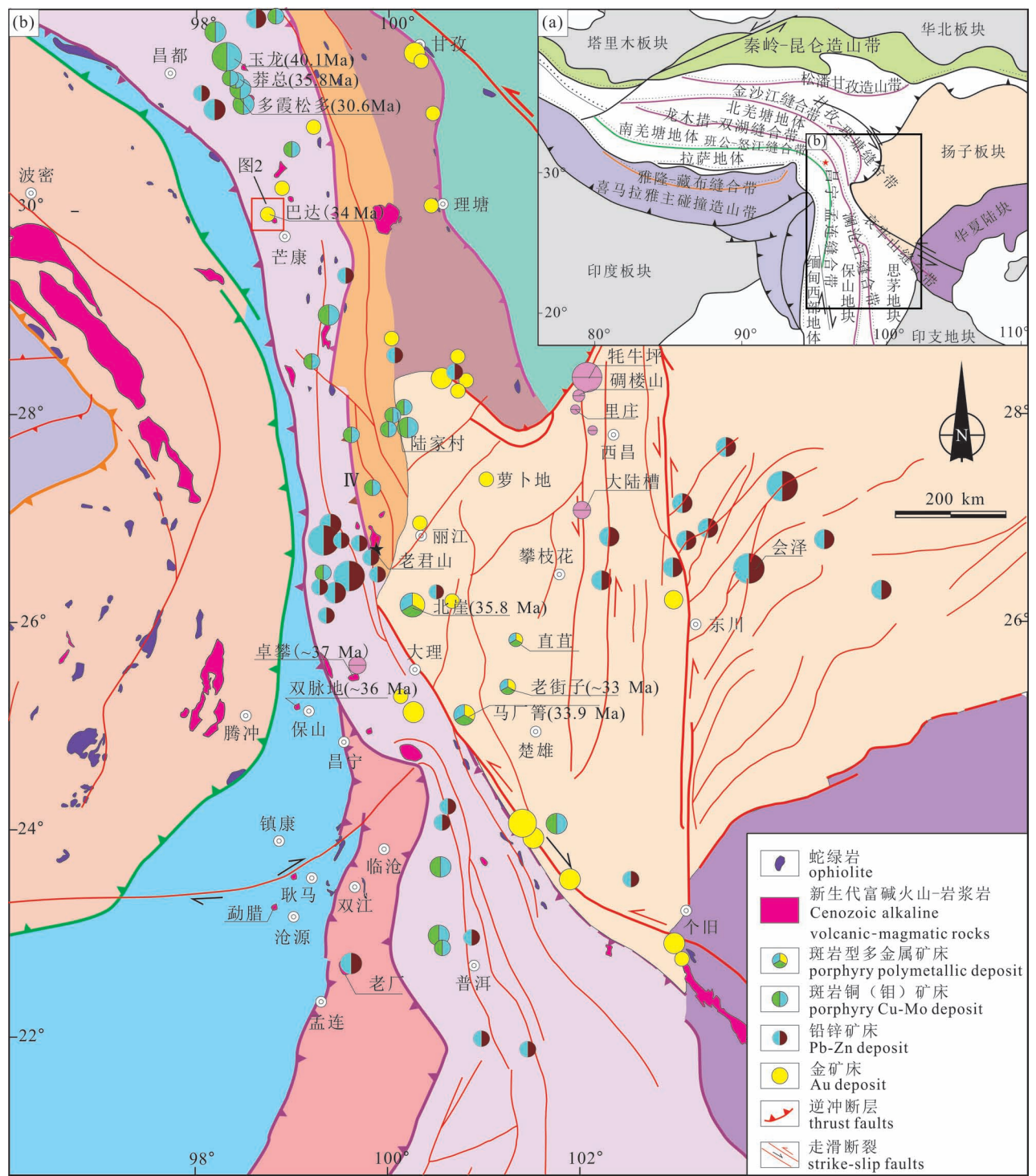
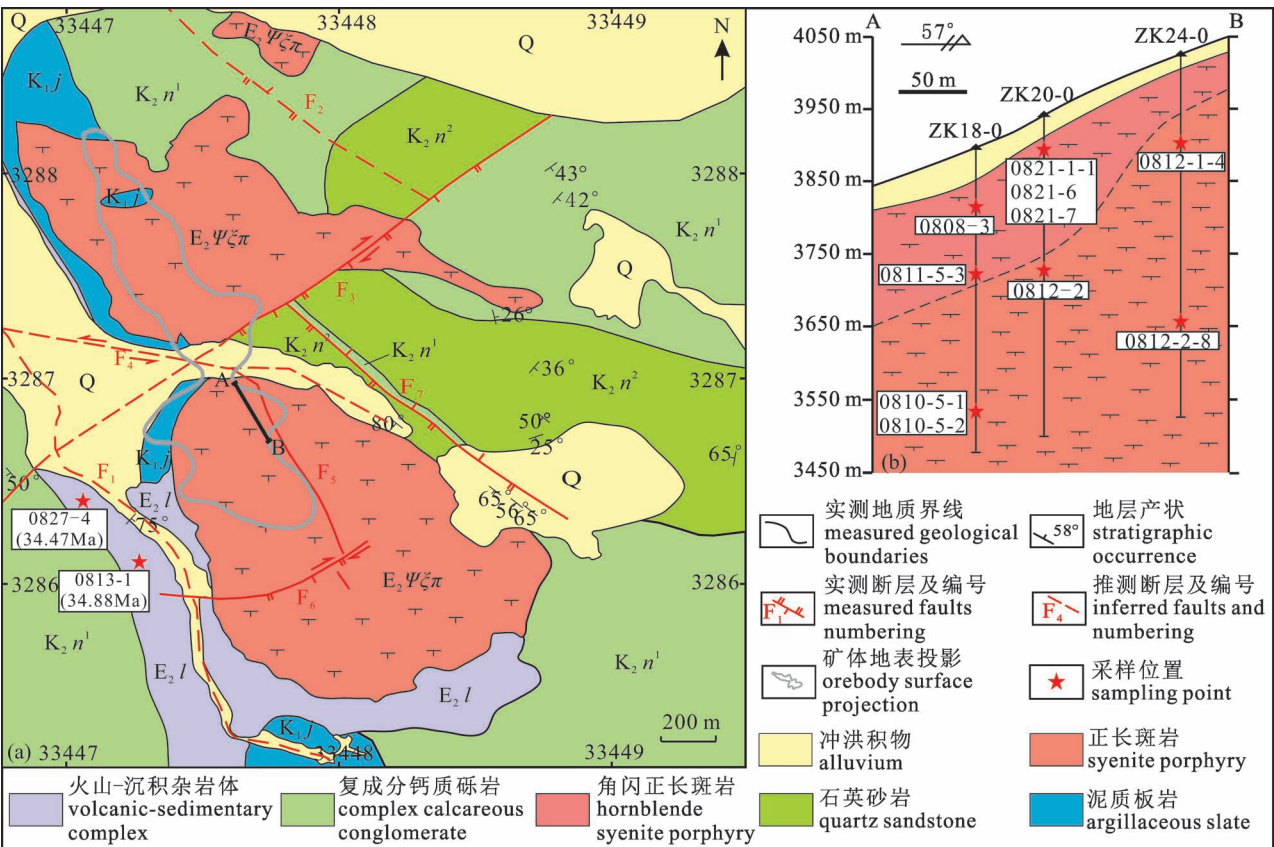


图 1 扬子西缘大地构造及新生代岩浆—矿床分布图(据严清高等,2017,2019;江小均等,2018 修改)

Fig. 1 Distribution map of geotectonics and Cenozoic magma—ore deposits in the western margin of the Yangtze Craton (modified from Yan Qinggao et al. , 2017& , 2019& ; Jiang Xiaojun et al. , 2018&)



色钙质粉砂岩、暗灰色泥质板岩为主(图 2)。上白垩统南新组(K_2n)第一岩性段(K_2n^1)岩性为浅灰色、灰白色中—细粒石英砂岩,为矿区主要的矿体围岩;第二岩性段(K_2n^2)岩性为浅紫红色钙质砾岩夹岩屑砂砾岩和中—细粒石英砂岩。新生代地层发育较少,仅有始新统拉屋拉组(E_2l)和第四系冲洪积沉积物(Qh^{al+pl}),拉屋拉组(E_2l)为一套陆相火山喷发—沉积杂岩,其底部岩性为砂砾岩、砂岩、泥岩,含介形虫、腹足类、轮藻等;中、下部为粗面岩、凝灰熔岩夹凝灰岩、沉火山角砾凝灰岩;上部为含煤岩系,以长石砂岩为主;全新统冲洪积物(Qh^{al+pl})为灰黄—紫红色砂砾层。矿区发育 F1~F7 共 7 条断裂,以 NW—SE 向和 NE—SW 向为主,其中 F5 断裂与矿化关系较为密切,发育在斑岩体中心部位,并由白云石+石英+方铅矿—黄铜矿—黄铁矿多金属硫化物+菱铁矿等充填。

矿区出露的斑岩体主要为始新世角闪正长斑岩—正长斑岩,二者为渐变过渡关系,并多以脉状或岩墙产出,岩体与地层之间有较规则和清楚的侵位接触界线。后期的白云石—石英—硫化物热液充填于早期角闪正长斑岩—正长斑岩结晶冷却时形成的张性裂隙中,多呈 NW—SE 向陡倾矿脉(倾角大于 60°)。矿区主要的矿化集中带主要分布于南矿区 18 线~26 线 0 号钻孔附近岩体内部和北矿区岩体与南新组砂砾岩围岩 NW 向接触带附近,且构造—岩相蚀变特征显示矿区具有斑岩型岩浆外带热液矿化蚀变特征,从矿脉至两边具有钾硅化→绢英岩化→青磐岩化(磁性)的蚀变分带特征。本研究

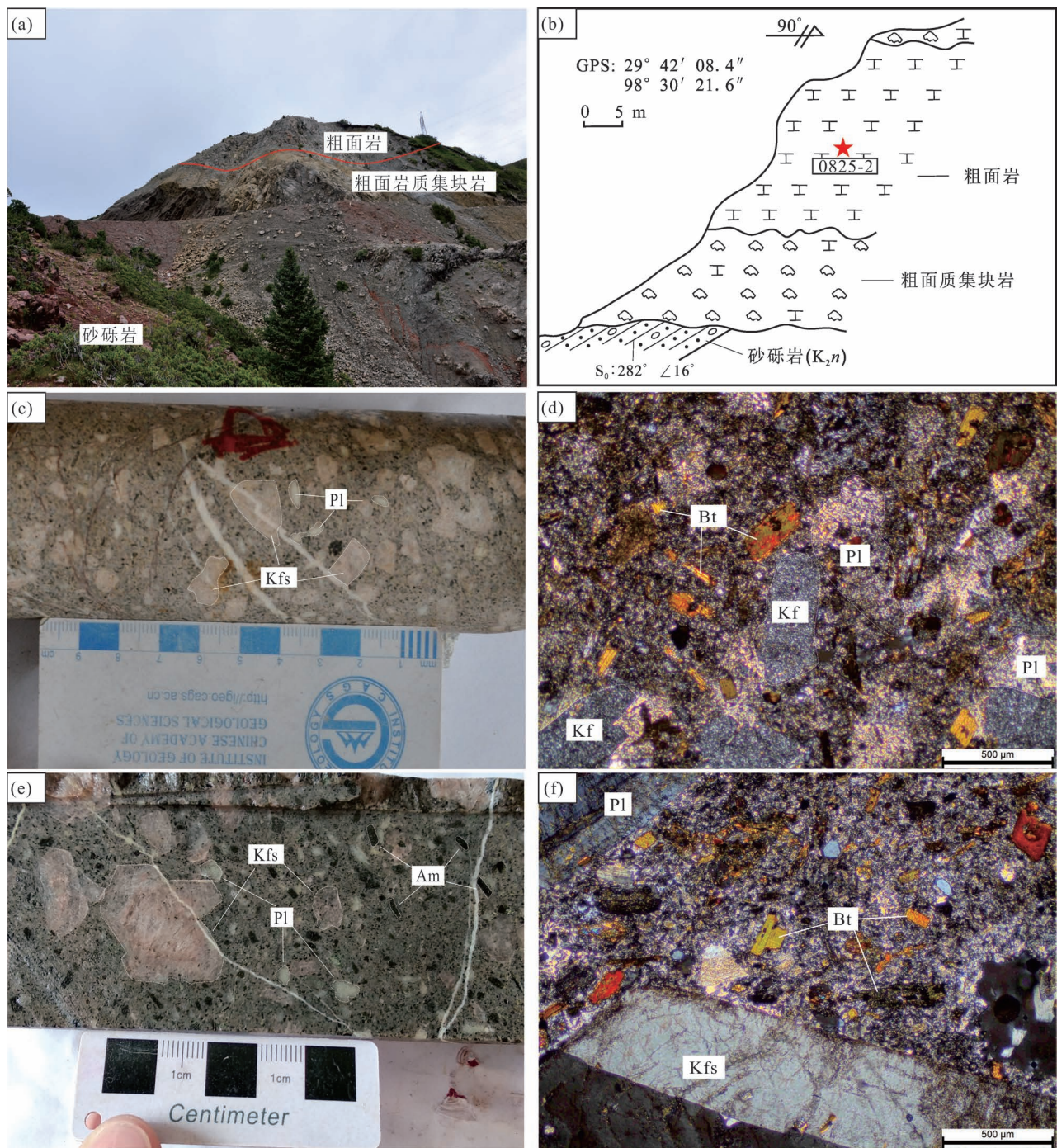


图 3 昌都—思茅陆块巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入岩体野外露头及显微特征:(a)、(b)拉屋山西侧土公路山脊处始新统拉屋拉组(E_2l)与南新组(K_2n)不整合接触关系剖面;(c)、(d)正长斑岩样品及显微特征;(e)、(f)角闪正长斑岩样品及显微特征

Fig. 3 Alkali-rich volcanic—intrusive complex outcrops and microscopic photographs in the Bada Cu—Au deposit, Qamdo—Simao Block: (a), (b) Eocene Lawula Formation (E_2l) and Nannxin Formation (K_2n) unconformable contact relationship profile on the ridge of earthy highway on the west side of Lawu Mountain; (c), (d) sample and microscopic photos of syenite porphyry; (e), (f) sample and microscopic photos of hornblende syenite porphyry

Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Bt—黑云母;Am—角闪石。红色五角星为采样点

Kfs—K-feldspar;Pl— Plagioclase; Bt— Biotite; Am— Hornblende. The red pentagonal show the sampling location

主要关注由集块岩、粗面岩、凝灰岩、凝灰质角砾岩、正长斑岩—角闪正长斑岩、云煌岩等组成的富碱火山—侵入杂岩体。

2 富碱火山—侵入岩序列期次划分

本文基于对矿区西南部杂岩体进行路线地质填图和实测剖面测制等详细野外地质调查,并根据其接触关系和 U-Pb 同位素年龄,将其划分为同期 2 阶段岩浆事件:① 始新世早阶段(34.88~34.47 Ma)火山—侵入岩喷发—侵位事件;② 始新世晚阶段(34.18 Ma)云煌岩侵位事件。

2.1 始新世早阶段(34.88~34.47 Ma)火山—侵入岩喷发—侵位事件

拉屋拉组(E_2l)火山岩主要出露于矿区西南部山沟中,呈 NW—SE 向展布,岩性主要为灰紫色粗面质熔结凝灰岩、似枕状粗面岩和集块岩,向 NE 方向逐渐变为凝灰质砾岩、沉凝灰岩等火山—沉积碎屑岩。该套火山岩与下伏白垩系景新组(K_2j)和南新组(K_2n)呈角度不整合接触,其接触界面在拉屋山西侧土公路山脊处可见(图 3 a,b),下伏南新组(K_2n)地层岩性主要为紫红色厚层块状细砾岩与紫红色中薄层状粗砂岩与粉砂岩韵律层,且在砂岩中发育平行层理和斜层理。另外对拉屋山公路垭口、卡东村以及矿区西南部等地出露的拉屋拉组(E_2l)火山岩进行野外地质调查对比研究后,认为拉屋山公路垭口拉屋拉组出露的灰白色—土黄色粗面质集块岩、灰绿色粗面岩、粗面质凝灰质角砾岩、灰紫色粗面岩构成两个火山喷发旋回。本文获得该组火山岩中的凝灰岩和粗面岩的形成年龄为 34.88 Ma 和 34.47 Ma,表明在始新世存在该期火山喷发事件。

矿区始新世角闪正长斑岩—正长斑岩出露于矿区西南部,呈不规则面状产出,在 F_1 断裂东部与拉屋拉组(E_2l)火山岩呈喷发或平行不整合接触关系。角闪正长斑岩在浅地表大面积出露,斑晶成分主要为钾长石(35%)、斜长石(25%)、角闪石(5%)和少量黑云母(2%),基质为隐晶质,岩石整体具磁性(图 3 c,d)。正长斑岩在矿区未见露头,但在钻孔内均有揭露,斑晶成分主要为钾长石(30%)、斜长石(20%)以及少量角闪石(3%)和黑云母(1%),基质为隐晶质,岩石多发生黑云母化和绿泥石化。与上部角闪正长斑岩呈岩相过渡关系,其界面在南矿区 16 线~20 线深度为 200~300 m 处可见,二者以含磁性角闪石减少为边界(图 3 e,f)。杨富成等

(2020)报道的该期斑岩体形成年龄为 35.0~34.7 Ma,与拉屋拉组(E_2l)火山岩形成年龄相近。综合以上野外证据及同位素年龄将该火山—侵入岩体划分为始新世早阶段岩浆事件。

2.2 始新世晚阶段(34.18 Ma)云煌岩侵位事件

本区云煌岩主要出露于矿区东北部外围拉屋山顶,呈脉状侵位于拉屋拉组(E_2l)粗面质火山—沉积岩不同层位。斑晶成分主要为黑云母,基质不易识别。在拉屋山垭口土公路旁(图 4 a,b)和拉屋山西侧高压电线塔下山脊处(图 4 c,d)可见云煌岩脉侵位拉屋拉组(E_2l)灰—灰白色粗面质集块岩和粗砾凝灰质砾岩,脉宽约 30~35 cm,脉体产状较为陡倾,呈 N 或 NE 向展布,侵位接触面发育明显褐红色烘烤边和冷凝边,在钻孔中偶见以脉体或包体形式产出。本文获得该云煌岩侵位年龄 34.18 Ma,其形成稍晚于早阶段的火山—侵入岩体。据此将其划分为始新世晚阶段云煌岩侵位事件。

3 样品特征及分析方法

本文以巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体为研究对象,共采取钻孔岩芯和新鲜露头样品 25 件,进行全岩微量元素分析,并对其中早阶段粗面岩、凝灰岩和晚阶段云煌岩 3 类样品进行锆石 U-Pb 年代学测试及 Sr—Nd—Hf 同位素分析,以上实验均在国家地质实验测试中心完成。

3.1 样品特征

三类岩石代表性样品的特征见表 1 和图 4,凝灰岩(0813-1)呈深灰紫色,凝灰结构,块状构造;晶屑主要为长石和黑云母,呈细长条状(图 5 a,b),较为碎裂,粒径 < 2 mm,火山灰呈尘点状紧密堆积。云煌岩(0813-2)呈灰褐—褐绿色,斑状结构,块状构造;斑晶主要为黑云母,基质为粒度细小,不易识别(图 5 c,d)。粗面岩(0827-4)呈浅灰色,略带淡褐色调,斑状结构,基质隐晶质结构,具块状构造。斑晶主要是长石、黑云母和少量角闪石,角闪石和黑云母部分或全部黑化,且暗色矿物和长石大致呈定向排列(图 5 e,f)。

3.2 锆石 U-Pb 定年

锆石挑选和制靶在廊坊市宇恒矿岩技术服务有限公司完成,并对锆石进行透射光、反射光以及阴极发光(CL)照相,据此选择生长环带发育且无裂痕的锆石进行 U-Pb 定年分析。

锆石 U-Pb 定年分析在国家地质实验测试中心 LA-ICP-MS 实验室完成。激光剥蚀—电感耦合等离

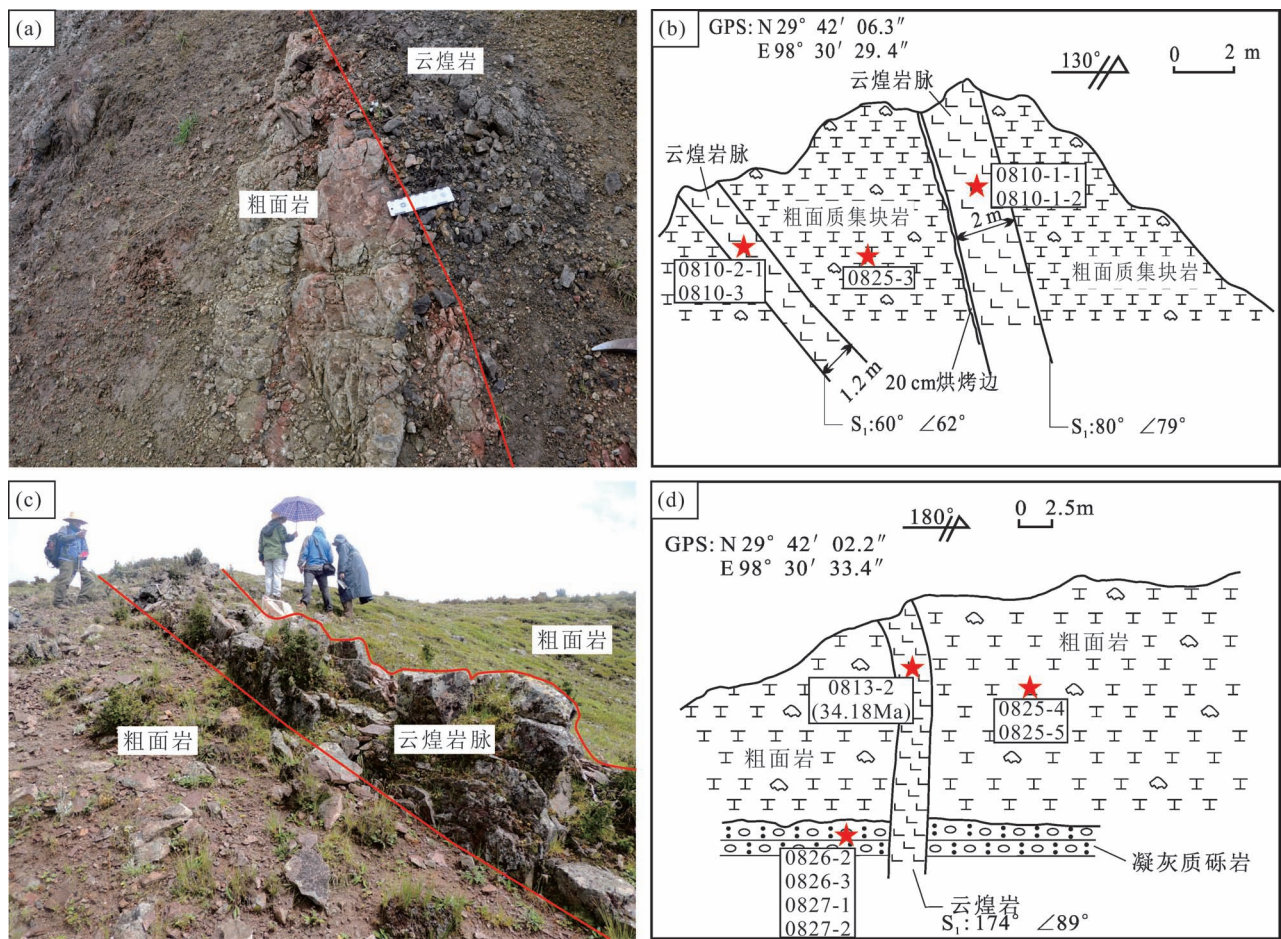


图 4 芒康盆地拉屋山顶云煌岩侵位拉屋拉组粗面质火山—沉积地层 (红色五角星为采样点)

Fig. 4 Fraidronite intruded into trachytic volcanic—sedimentary strata of the Lawula Formation in Lawu Mountain Peak area, Mangkang Basin (The red pentagonal show the sampling location)

子体质谱仪 (LA-ICP-MS) 分析设备由 NEW WAVE esi 193 nm 激光剥蚀系统和 Thermo ELEMENT XR 扇形磁场高分辨质谱仪组成。激光剥蚀系统以 He 作为剥蚀物质传输载气,激光斑束直径为 25 μm ,频率为 10 Hz,输出能量约为 8 mJ;ICP-MS 分析采用低分辨模式,使用 NIST612 进行仪器信号调谐, ^{232}Th 和 ^{238}U 信号大于 2×10^5 cps,监测 ThO^+/Th^+ 控制氧化物产率 $<0.2\%$,同位素信号比值 $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th} \approx 1$,降

表 1 昌都—思茅陆块巴达铜金矿区富碱火山—侵入杂岩体锆石 LA-ICP-MS 测年样品岩石学特征

Table 1 Petrological characteristics of the samples for zircon LA-ICP-MS dating from the alkali-rich volcanic— intrusive complex in the Bada Cu—Au deposit , Qamdo—Simao Block

序号	样品编号	采样位置	岩性	地质特征	结构构造	矿物组合	年龄 (Ma)
1	0813-1	N29°42'02. 2" E98°30'33. 4"	凝灰岩	为矿区同期早阶段火山岩,在矿区至拉屋山顶靠近火山喷发中心地区可见两个火山喷发—沉积旋回	凝灰结构块状构造	钾长石含量 25%±,斜长石含量 10%±,黑云母含量 7%±,火山灰含量 58%±	34. 47±0. 60
2	0827-4	N29°41'37. 70" E98°27'18. 16"	粗面岩		斑状结构或粗面结构	钾长石含量 27%±,斜长石含量 12%±,角闪石含量 8%±,基质含量 53%±	34. 88±0. 59
3	0813-2	N29°42'02. 2" E98°30'33. 4"	云煌岩	为矿区同期中阶段侵入岩,灰黑色煌斑岩侵位早阶段凝灰岩和粗面岩	斑状结构块状构造	黑云母含量 20%±钾长石含量 15%±,斜长石含量 5%±,基质 60%±	34. 18±0. 53

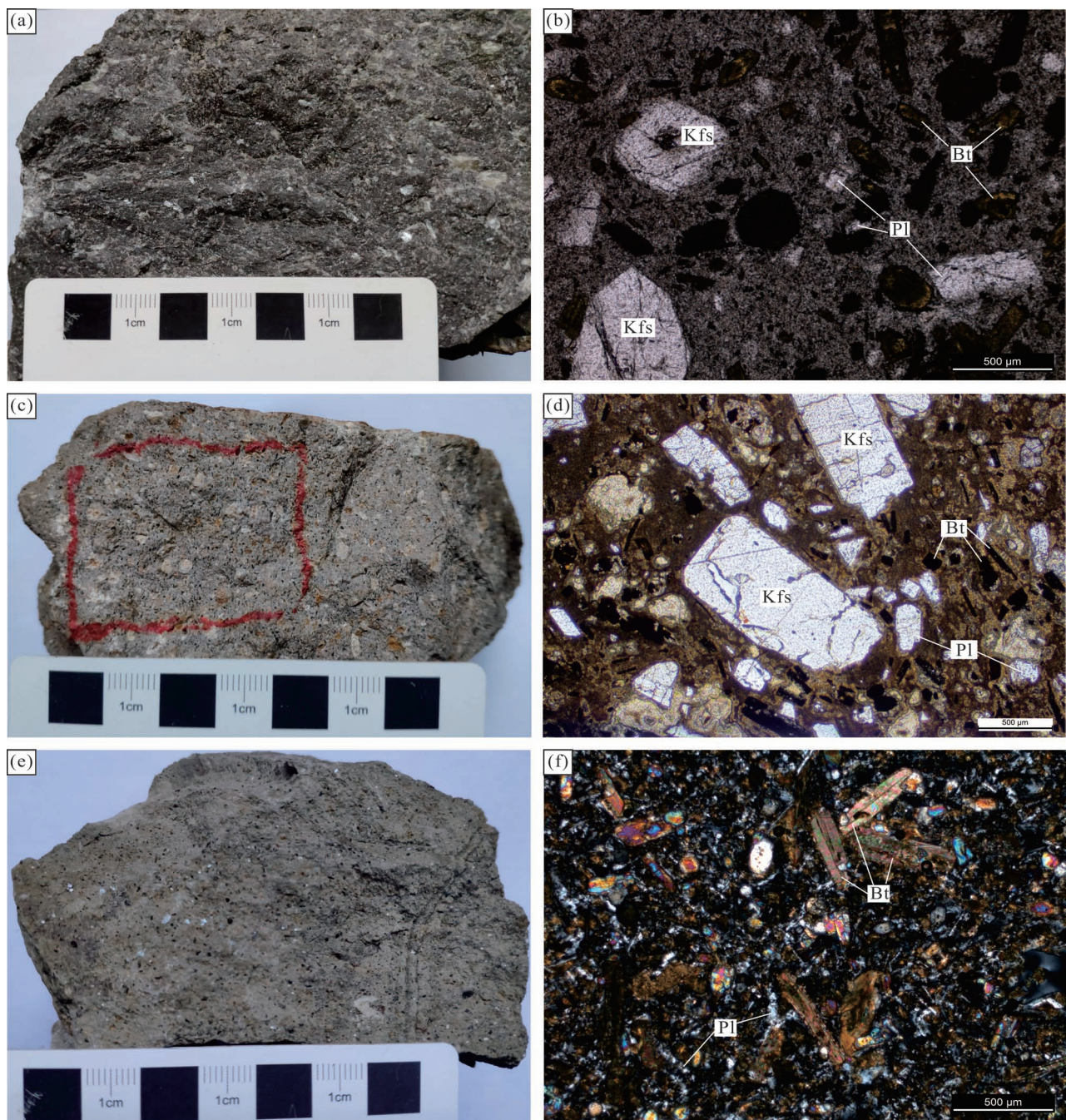


图 5 昌都—思茅陆块巴达铜金矿区富碱火山—侵入杂岩体锆石 LA-ICP-MS 测年样品显微特征

Fig. 5 Microscopic characteristics of the samples for zircon LA-ICP-MS dating from alkali-rich volcanic—intrusive complex in the Bada Cu—Au deposit, Qamdo—Simao Block

(a) 凝灰岩手标本照片; (b) 凝灰岩显微照片 (单偏光, 2.5×); (c) 粗面岩手标本照片; (d) 粗面岩显微照片 (单偏光); (e) 云煌岩手标本照片; (f) 云煌岩显微照片 (正交偏光)。Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Bt—黑云母

(a) Photos of tuff hand specimens; (b) microscopic photos of tuff (polarizing); (c) photos of trachyte hand specimens; (d) microscopic photos of trachyte (polarizing); (e) photos of frairionite hand specimens; (f) microscopic photos of frairionite (crossed polarized light). Kfs—K-feldspar; Pl— plagioclase; Bt— biotite

低分析过程中动态分馏作用的影响。锆石 U-Pb 分析检测²⁰²Hg、²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁸U, 其中²⁰²Hg、²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁸U 检测时间为 4

ms,²⁰⁷Pb 检测时间为 8 ms。单点分析包括气体背景采集时间 20 s, 激光剥蚀锆石信号采集时间 40 s 及剥蚀后吹扫时间 20 s。每 10 个未知样品点分析插

表 2 昌都—思茅陆块巴达铜金矿区富碱火山—侵入杂岩体锆石 LA-ICP-MS 测年结果

Table 2 The LA-ICP-MS dating analytical results of the zircon from alkali-rich volcanic—intrusive complex in the Bada Cu—Au deposit, Qamdo—Simao Block

样品号	元素含量(×10 ⁻⁶)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度 (%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$				
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ			
早阶段 样品 凝灰岩 (0813-1)	2	473	333	5.32	0.70	0.00525	0.00013	0.0341	0.0024	0.0455	0.0034	33.9	2.4	33.84	0.83	100.2	
	3	1970	1229	16.9	0.62	0.00531	0.00014	0.0357	0.0016	0.0468	0.002	35.6	1.6	34.16	0.88	104.2	
	4	764	745	11.7	0.98	0.00553	0.00012	0.0366	0.0018	0.0475	0.0024	36.5	1.7	35.56	0.74	102.6	
	5	446	722	10.63	1.62	0.00535	0.00012	0.0359	0.0026	0.0496	0.0037	35.7	2.5	34.4	0.8	103.8	
	6	754	871	12.39	1.16	0.00538	0.0001	0.0355	0.0018	0.0484	0.0024	35.4	1.8	34.56	0.66	102.4	
	9	173.7	136.3	2.38	0.78	0.00519	0.00023	0.0364	0.0052	0.063	0.0094	36	5.1	33.4	1.5	107.8	
	10	339	419	6.35	1.24	0.00565	0.00025	0.0377	0.0054	0.061	0.0086	37.3	5.2	36.3	1.6	102.8	
	13	304	324	4.83	1.07	0.00533	0.00017	0.0337	0.0033	0.0587	0.0059	33.5	5.8	34.2	1.1	98.0	
	14	493	1203	15.52	2.44	0.00519	0.00018	0.0347	0.003	0.059	0.0051	35	3	33.3	1.2	105.1	
	1	535	263	4.42	0.49	0.00525	0.00013	0.0365	0.0027	0.0542	0.004	36.3	2.6	33.78	0.84	107.5	
	3	820	516	8.17	0.63	0.00525	0.00011	0.0351	0.0019	0.0516	0.0028	35	1.8	33.76	0.71	103.7	
	6	1386	1317	19.03	0.95	0.00529	0.00011	0.0361	0.0019	0.0527	0.0028	35.9	1.8	34.01	0.71	105.6	
	7	479	423	6.74	0.88	0.00527	0.00012	0.0373	0.0029	0.0549	0.0044	37	2.8	33.88	0.77	109.2	
	8	751	691	10.5	0.92	0.00535	0.00012	0.0361	0.0021	0.0514	0.0029	36	2	34.41	0.77	104.6	
早阶段 样品 粗面岩 (0827-4)	11	544	468	7.31	0.86	0.00555	0.00013	0.0376	0.0026	0.0461	0.0031	37.3	2.5	35.65	0.84	104.6	
	12	624	389	5.99	0.62	0.00543	0.00014	0.0353	0.0022	0.0452	0.0027	35.1	2.1	34.88	0.87	100.6	
	13	432	279.2	4.39	0.65	0.00561	0.00013	0.0374	0.0025	0.0469	0.0032	37.2	2.4	36.08	0.86	103.1	
	14	608	393	6.13	0.65	0.00544	0.00014	0.0388	0.0022	0.0496	0.0028	38.6	2.1	34.96	0.88	110.4	
	17	794	765	11.74	0.96	0.0057	0.00012	0.039	0.0021	0.0472	0.0025	38.8	2.1	36.61	0.78	106.0	
	18	603	314	5.29	0.52	0.00565	0.00012	0.0395	0.0023	0.0492	0.0029	39.2	2.2	36.35	0.75	107.8	
	19	404	313	5.05	0.77	0.00554	0.00015	0.0389	0.0026	0.0502	0.0035	38.6	2.6	35.64	0.96	108.3	
	20	724	555	8.24	0.77	0.00548	0.00012	0.0359	0.002	0.046	0.0025	35.7	1.9	35.24	0.8	101.3	
	23	790	485	7.58	0.61	0.0053	0.00011	0.0358	0.0016	0.0487	0.0022	35.7	1.5	34.11	0.68	104.7	
	6	321	337	5.55	1.05	0.0054	0.00016	0.0362	0.0029	0.0502	0.0043	35.9	2.8	34.7	1	103.5	
	7	308	220.7	3.44	0.72	0.00547	0.00017	0.0382	0.0029	0.0519	0.004	38.2	2.9	35.2	1.1	108.5	
	8	429	319	4.89	0.74	0.00519	0.00014	0.0339	0.0025	0.0485	0.0037	33.7	2.4	33.37	0.89	101.0	
	9	256.9	199.8	2.78	0.78	0.00528	0.00016	0.0355	0.0035	0.0487	0.0046	35.2	3.4	33.9	1.1	103.8	
	晚阶段 样品 云煌岩 (0813-2)	11	402	332	5.01	0.83	0.0054	0.00015	0.0375	0.0029	0.051	0.0042	37.3	2.8	34.7	0.97	107.5
12		601	571	8.58	0.95	0.0054	0.00011	0.0364	0.002	0.0484	0.0027	36.2	2	34.7	0.7	104.3	
13		242.6	179.3	2.76	0.74	0.00505	0.00015	0.0334	0.0028	0.0488	0.0042	33.5	2.8	32.47	0.95	103.2	
14		258.4	198.3	3.12	0.77	0.00545	0.00015	0.0363	0.0031	0.0487	0.0045	35.9	3	35.05	0.93	102.4	
15		238.1	186	2.76	0.78	0.00523	0.00014	0.0339	0.0029	0.0469	0.0042	33.6	2.9	33.64	0.87	99.9	
16		312	278	3.86	0.89	0.00506	0.00014	0.0333	0.0026	0.047	0.0036	33.4	2.5	32.54	0.91	102.6	
17		551	641	8.88	1.16	0.00543	0.00019	0.0361	0.0029	0.0484	0.004	35.9	2.8	34.9	1.2	102.9	
18		284	395	5.42	1.39	0.00539	0.0002	0.0337	0.004	0.0453	0.0055	33.5	3.9	34.6	1.3	96.8	
19		389	463	6.76	1.19	0.00552	0.00017	0.0327	0.0027	0.0433	0.0037	32.9	2.7	35.5	1.1	92.7	

表 3 昌都—思茅陆块芒康县巴达铜金矿区富碱火山—侵入杂岩体微量和稀土元素 (×10⁻⁶) 含量

Table 3 The analytical results of trace and rare elements contents (×10⁻⁶) in alkali-rich volcanic—intrusive complex in the Bada Cu—Au deposit, Qamdo—Simao Block

样品	0825-2	0825-3	0825-4	0825-5	0827-4	0813-1	0826-2	0826-3	0827-1	0827-2
早阶段	粗面岩					凝灰岩				
Li	12. 63	11. 09	7. 380	12. 50	22. 58	17. 75	21. 26	10. 45	9. 800	10. 24
Be	2. 539	5. 462	5. 288	7. 043	7. 819	5. 327	3. 925	2. 453	4. 445	5. 044
Sc	10. 97	10. 98	14. 72	12. 44	7. 750	22. 72	7. 130	10. 07	4. 000	6. 770
Ti	5313	5088	6370	5891	4574	8034	3819	4174	3362	3304
V	127. 7	105. 3	130. 8	118. 5	87. 60	187. 0	79. 90	95. 2	60. 70	62. 10
Cr	277. 4	58. 00	127. 3	101. 0	113. 4	411. 0	52. 40	217. 7	91. 10	86. 90
Mn	132. 8	83. 90	123. 3	548. 6	699. 3	647. 5	278. 0	1918	99. 60	414. 9
Co	10. 41	6. 340	9. 850	28. 41	14. 13	25. 42	11. 09	12. 02	4. 490	7. 180
Ni	33. 89	20. 62	32. 49	28. 63	57. 89	85. 26	31. 36	77. 36	25. 36	33. 15
Cu	36. 75	25. 95	36. 20	26. 93	19. 07	60. 00	23. 45	34. 02	9. 490	19. 38
Zn	64. 98	41. 09	88. 33	107. 6	154. 6	203. 8	150. 2	148. 2	61. 64	130. 3
Ga	22. 30	24. 34	25. 29	24. 91	23. 27	21. 48	20. 71	21. 13	21. 20	20. 76
Ge	2. 073	1. 400	1. 727	1. 443	1. 659	1. 844	1. 310	1. 282	1. 211	1. 389
As	20. 37	8. 164	24. 82	30. 59	107. 9	85. 54	17. 77	12. 30	62. 26	222. 2
Rb	283. 6	352. 0	357. 9	317. 9	199. 3	495. 7	258. 8	112. 7	231. 5	239. 9
Sr	1936	1498	2285	2103	1632	1673	1290	1904	1274	1247
Zr	283. 4	330. 6	345. 8	359. 5	396. 4	367. 0	264. 1	216. 0	268. 0	278. 9
Nb	17. 18	18. 80	19. 20	19. 53	19. 89	20. 18	14. 96	9. 250	14. 18	13. 05
Mo	4. 361	17. 22	6. 784	5. 826	1. 420	0. 654	3. 439	2. 319	3. 520	3. 278
Cd	0. 146	0. 187	0. 154	0. 163	0. 335	0. 156	0. 107	0. 271	0. 071	0. 419
In	0. 058	0. 047	0. 045	0. 057	0. 042	0. 072	0. 056	0. 041	0. 040	0. 230
Sn	4. 439	7. 060	3. 174	2. 631	3. 214	4. 491	4. 228	2. 003	1. 770	1. 615
Sb	0. 411	0. 707	0. 644	0. 696	4. 051	3. 118	0. 970	7. 891	5. 024	5. 602
Cs	5. 752	15. 79	23. 81	9. 494	13. 85	7. 571	15. 16	8. 039	7. 966	7. 173
Ba	2071	1450	2127	2248	1394	1432	1998	1427	1560	1389
Hf	8. 881	9. 972	10. 81	10. 27	9. 094	8. 505	8. 623	7. 052	8. 794	8. 818
Ta	1. 365	1. 538	1. 421	1. 554	2. 361	2. 121	1. 322	0. 716	1. 231	1. 188
W	3. 996	4. 194	4. 802	4. 464	5. 501	5. 277	2. 385	0. 886	4. 460	3. 611
Tl	2. 166	1. 295	1. 796	1. 429	1. 159	1. 351	1. 511	0. 812	2. 185	1. 929
Pb	60. 87	41. 05	55. 10	54. 51	69. 66	35. 89	71. 79	128. 7	63. 82	141. 6
Bi	0. 228	0. 013	0. 070	0. 021	0. 251	0. 142	1. 360	0. 017	0. 123	0. 476
Th	18. 79	20. 65	19. 24	20. 22	24. 01	18. 10	21. 97	13. 06	16. 77	15. 52
U	4. 593	4. 407	4. 955	9. 303	5. 994	13. 16	3. 969	3. 993	3. 444	3. 728
La	82. 24	67. 43	85. 06	62. 58	63. 25	48. 29	81. 59	65. 48	56. 50	51. 75
Ce	165. 2	145. 6	178. 6	135. 3	111. 6	93. 10	156. 8	160. 0	103. 1	107. 5
Pr	18. 25	15. 29	19. 99	13. 98	12. 82	11. 40	17. 46	17. 08	11. 26	11. 26
Nd	69. 54	62. 18	77. 08	55. 74	46. 20	45. 36	62. 88	66. 46	41. 52	41. 70
Sm	13. 88	12. 03	15. 65	11. 17	9. 230	10. 07	11. 35	12. 29	6. 660	7. 330
Eu	3. 601	2. 853	3. 959	3. 154	2. 659	2. 956	2. 794	3. 220	1. 667	1. 713
Gd	12. 85	10. 74	14. 44	10. 45	9. 690	11. 10	9. 320	10. 75	5. 670	6. 360
Tb	1. 656	1. 515	1. 976	1. 453	1. 048	1. 292	1. 299	1. 282	0. 740	0. 840
Dy	7. 092	6. 859	8. 470	6. 694	5. 130	6. 685	5. 380	4. 966	3. 158	3. 635
Ho	1. 150	1. 296	1. 514	1. 208	0. 915	1. 297	1. 010	0. 846	0. 552	0. 685
Er	3. 289	3. 547	4. 249	3. 540	2. 725	3. 780	3. 131	2. 429	1. 698	2. 052
Tm	0. 379	0. 493	0. 521	0. 439	0. 352	0. 492	0. 397	0. 287	0. 236	0. 281
Yb	2. 538	3. 139	3. 536	2. 870	2. 314	3. 060	2. 657	1. 798	1. 570	1. 907
Lu	0. 356	0. 486	0. 494	0. 439	0. 402	0. 528	0. 416	0. 253	0. 258	0. 289
Y	25. 39	28. 19	33. 33	25. 46	30. 39	41. 24	21. 61	18. 79	12. 33	14. 53
ΣREE	407. 4	361. 6	448. 9	334. 5	298. 7	280. 6	378. 1	366. 0	246. 9	251. 8
ΣLREE	352. 7	305. 4	380. 4	282. 0	245. 7	211. 2	332. 9	324. 6	220. 7	221. 2
ΣHREE	54. 70	56. 26	68. 53	52. 56	52. 96	69. 47	45. 22	41. 40	26. 21	30. 57
(ΣLREE/ΣHREE)	6. 45	5. 43	5. 55	5. 36	4. 64	3. 04	7. 36	7. 84	8. 42	7. 24
δEu	0. 81	0. 75	0. 79	0. 88	0. 85	0. 85	0. 81	0. 84	0. 81	0. 75

δCe	1.00	1.07	1.03	1.08	0.91	0.94	0.97	1.15	0.94	1.04
样品	0812-2	0810-5-1	0810-5-2	0812-1-4	0812-2-8	0821-6	0821-1-1	0821-7-2	0808-3	0811-5-3
早阶段	正长斑岩					角闪正长斑岩				
Li	16.79	36.99	36.79	20.93	14.51	32.10	16.27	44.78	18.99	20.66
Be	5.865	3.083	3.150	7.770	5.573	7.570	5.370	2.658	5.882	5.668
Sc	9.010	9.300	9.210	10.23	10.32	11.22	7.460	8.000	9.220	8.160
Ti	4011	3477	3531	3608	3096	4614	2891	3310	3386	3130
V	89.50	76.20	71.60	89.20	74.80	98.20	60.80	65.00	73.80	67.70
Cr	59.70	58.90	63.50	82.40	81.80	100.2	53.90	59.50	80.00	60.90
Mn	1344	2466	536.9	452.6	6056	868.6	505.5	482.3	975.0	656.5
Co	9.900	16.93	10.63	12.01	42.64	15.07	9.310	11.33	12.15	15.32
Ni	21.36	31.84	23.12	28.25	213.2	26.45	18.27	22.17	27.66	22.06
Cu	10.23	10.38	11.49	21.79	42.47	21.25	10.13	8.180	21.48	14.66
Zn	97.85	45.18	63.36	38.39	622.9	201.0	41.23	79.32	72.86	47.84
Ga	20.08	21.73	21.75	20.89	19.62	20.17	19.63	21.98	20.35	19.18
Ge	1.349	1.239	1.659	1.345	1.537	1.567	0.990	1.381	1.091	1.310
As	107.8	53.55	33.78	10.23	482.5	92.15	9.506	14.00	21.38	5.596
Rb	179.3	176.6	225.0	260.1	290.9	314.3	233.7	284.4	287.3	268.5
Sr	851.7	317.2	928.2	976.8	521.5	1194	871.3	765.0	1039	1034
Zr	343.8	269.3	242.9	272.7	217.8	399.5	207.0	271.7	250.8	228.0
Nb	19.80	15.31	16.00	15.59	12.48	21.03	14.06	15.83	14.43	14.52
Mo	2.937	3.079	1.710	1.709	4.989	3.764	1.855	2.613	6.261	4.089
Cd	0.073	0.137	0.135	0.130	4.092	0.112	0.111	0.137	0.113	0.102
In	0.113	0.252	0.046	0.053	1.020	0.053	0.038	0.044	0.043	0.036
Sn	4.122	3.253	2.964	3.005	2.772	3.900	2.682	2.974	3.717	2.762
Sb	6.079	11.44	3.796	2.815	120.1	1.990	1.271	1.684	6.621	1.621
Cs	15.41	8.435	14.21	6.895	30.95	19.27	10.42	15.45	18.49	7.040
Ba	783.0	444.0	3179	1121	636.0	971.0	1233	1432	976.0	1277
Hf	8.652	8.780	8.333	8.527	6.905	9.244	6.937	9.510	8.540	7.774
Ta	2.894	1.412	1.390	1.316	1.071	2.577	1.272	1.457	1.336	1.360
W	6.933	6.119	7.884	0.957	6.017	3.331	1.270	5.639	4.996	4.996
Tl	1.730	2.296	2.666	1.195	3.992	1.971	1.209	2.098	2.047	1.614
Pb	19.81	34.57	33.08	57.02	31.02	46.50	31.90	32.19	34.33	39.80
Bi	0.515	0.411	0.515	0.513	1.707	1.021	0.210	0.369	0.686	0.218
Th	24.58	18.95	18.12	19.15	14.05	24.21	17.15	20.20	18.29	18.14
U	5.525	8.874	4.162	5.366	15.02	7.506	4.713	4.226	5.026	8.820
La	43.30	45.45	55.64	46.29	49.58	42.40	56.46	59.53	52.10	62.08
Ce	81.80	93.80	112.8	94.00	96.40	85.10	109.0	111.7	104.8	117.8
Pr	9.440	10.32	12.04	11.10	10.70	9.350	11.85	11.68	11.56	12.27
Nd	35.42	41.21	47.00	42.58	42.26	35.34	41.28	44.97	43.16	46.49
Sm	7.840	7.930	8.910	8.660	8.460	7.820	8.580	8.270	8.830	8.610
Eu	2.160	1.998	2.145	1.967	2.259	2.131	1.906	2.134	2.193	2.248
Gd	9.050	8.130	8.360	8.710	8.660	8.610	8.270	8.840	8.520	8.630
Tb	1.358	1.144	1.141	1.187	1.290	0.990	1.004	1.080	1.169	1.205
Dy	5.811	5.081	5.273	5.483	6.079	5.240	4.902	5.328	5.378	5.442
Ho	1.335	1.045	1.016	1.058	1.255	0.970	0.966	0.976	1.085	1.076
Er	3.462	3.328	2.954	3.214	3.644	2.972	2.824	3.086	3.245	3.218
Tm	0.682	0.475	0.403	0.440	0.518	0.419	0.376	0.439	0.448	0.444
Yb	3.195	3.228	2.802	3.080	3.380	2.777	2.516	3.040	3.114	3.072
Lu	0.721	0.515	0.433	0.478	0.523	0.470	0.418	0.484	0.499	0.485
Y	33.57	25.74	22.08	25.62	28.25	30.89	21.60	22.72	23.28	23.21
ΣREE	239.2	249.4	283.0	253.9	263.3	235.4	272.0	284.3	269.3	296.3
ΣLREE	180.0	200.7	238.6	204.6	209.7	182.1	229.1	238.3	222.6	249.5
ΣHREE	59.18	48.69	44.46	49.27	53.60	53.34	42.87	45.99	46.74	46.78
(ΣLREE/ΣHREE)	3.04	4.12	5.37	4.15	3.91	3.41	5.34	5.18	4.76	5.33
δEu	0.78	0.75	0.75	0.69	0.80	0.79	0.68	0.76	0.76	0.79
δCe	0.95	1.02	1.02	0.98	0.98	1.00	0.98	0.98	1.00	0.98

样品	0813-2	0810-1-1	0810-1-2	0810-2-1	0810-3	样品	0813-2	0810-1-1	0810-1-2	0810-2-1	0810-3
晚阶段	云煌岩					晚阶段	云煌岩				
Li	16.31	15.69	20.33	18.13	23.01	W	3.666	4.317	4.281	3.986	5.106
Be	5.101	5.951	5.977	5.490	5.589	Tl	0.214	1.362	1.253	1.343	1.932
Sc	9.560	17.47	16.89	16.63	17.41	Pb	27.05	36.72	134.7	104.2	179.0
Ti	4738	5960	5538	5585	6283	Bi	0.069	0.229	0.257	0.320	0.293
V	76.70	151.3	141.9	140.1	149.5	Th	24.17	11.88	11.78	11.38	13.18
Cr	85.60	363.7	347.1	335.0	372.0	U	5.986	5.029	5.701	5.374	11.05
Mn	595.9	909.8	1092	993.1	481.9	La	55.40	47.50	47.93	46.55	58.70
Co	12.09	23.23	25.94	24.26	23.84	Ce	104.3	102.8	103.9	100.6	110.2
Ni	25.02	85.47	89.26	88.97	96.48	Pr	12.32	11.93	12.48	11.56	13.78
Cu	21.98	58.71	39.20	45.71	64.25	Nd	46.30	49.06	49.78	47.94	55.19
Zn	117.3	240.1	241.0	267.1	622.1	Sm	9.900	9.630	10.12	9.480	11.10
Ga	19.83	19.35	18.36	18.40	20.56	Eu	2.482	2.680	2.732	2.758	2.890
Ge	1.538	1.477	1.448	1.387	1.461	Gd	11.11	9.750	9.180	9.790	11.28
As	76.08	2.400	2.764	2.691	1.447	Tb	1.332	1.268	1.312	1.255	1.525
Rb	247.4	276.5	280.1	269.4	307.1	Dy	7.004	5.788	5.737	5.582	6.995
Sr	1194	1295	1251	1222	1412	Ho	1.317	1.097	1.075	1.096	1.306
Zr	408.2	231.0	226.5	214.5	251.9	Er	4.010	2.905	3.085	3.160	3.883
Nb	22.29	13.20	12.94	12.98	14.76	Tm	0.548	0.412	0.403	0.412	0.478
Mo	0.849	52.39	1.930	3.649	4.080	Yb	3.584	2.590	2.580	2.604	3.179
Cd	0.064	0.963	0.540	0.408	2.184	Lu	0.594	0.383	0.379	0.398	0.480
In	0.043	0.060	0.061	0.059	0.063	Y	41.47	22.93	23.70	23.24	30.36
Sn	3.191	2.977	3.374	2.790	3.241	ΣREE	301.7	270.8	274.4	266.4	311.3
Sb	1.825	0.551	0.555	0.513	0.304	ΣLREE	230.7	223.6	227.0	218.9	251.8
Cs	11.80	6.840	7.233	6.938	6.860	ΣHREE	70.97	47.13	47.45	47.53	59.49
Ba	849.0	1293	1286	1283	1391	ΣLREE/ΣHREE	3.25	4.75	4.78	4.61	4.23
Hf	9.429	7.680	7.172	7.571	8.524	δEu	0.72	0.84	0.85	0.87	0.78
Ta	2.852	1.000	0.997	0.957	1.120	δCe	0.94	1.03	1.02	1.03	0.92

入国际标准锆石样品 91500 (2 点) 及 Plesovice (1 点)。同位素比值数据处理采用 GLITTER (Version 4.0) 完成, 年龄计算采用 ISOPLLOT 进行。样品测试结果见表 2。

3.3 全岩微量元素分析

用于微量元素分析的样品送至廊坊宇能岩石矿物分选有限公司粉碎并研磨成 200 目粉末, 采用密闭溶样法将样品溶解, 并取 5 mL 溶液于试剂瓶中, 根据仪器对盐度的要求稀释 1000 倍后上机测试。用 PE300D 型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 上分析了微量元素和稀土元素, 分析不确定度小于 5%, 标准参考物质为 GSR-1。

3.4 全岩 Sr—Nd 同位素分析

采用特效树脂法对全岩样品溶液进行 Sr、Nd 元素分离富集, 并利用多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS, NEPTUNE Plus) 对 Sr、Nd 同位素进行分析。在整个分析过程中, Sr 和 Nd 空白分别为 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ g 和 5×10^{-11} g, 并利用 ICP-MS 全岩 Rb、Sr、Sm 和 Nd 的浓度计算了 $n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ 和 $n(^{147}\text{Sm})/n(^{144}\text{Nd})$ 值 (表 4)。对分析的 Sr 和 Nd 同位素比值进行了归一化校正, 分别为 $n(^{88}\text{Sr})/n$

$(^{86}\text{Sr}) = 8.37521$ 和 $n(^{146}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd}) = 0.7219$ 。详细的分析步骤见唐索寒等 (2010)。

3.5 锆石 Hf 同位素分析

锆石 Hf 同位素在激光剥蚀—多接收电感耦合等离子体质谱仪 (LA-MC-ICP-MS) 上进行测试, 实验过程采用 He 作为剥蚀物质载气, 根据锆石大小, 选择剥蚀激光斑束直径 20~40 μm 不等, 分析点与锆石 U-Pb 测年点为同一点。测试时对锆石标样 Plseovice 进行分析, 以评估激光剥蚀结果的准确性。仪器运行条件及详细测试流程参考侯可军等 (2007)。分析结果见表 5。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年样品挑选的锆石颗粒绝大多数晶形完好, 呈典型的长柱状或短柱状, 少量锆石呈浑圆—次圆状。阴极发光 (CL) 图像显示, 大多数锆石具有典型岩浆震荡韵律环带结构 (图 6 a、b 和 c)。3 件样品锆石 U-Pb 定年分析数据详见表 2。

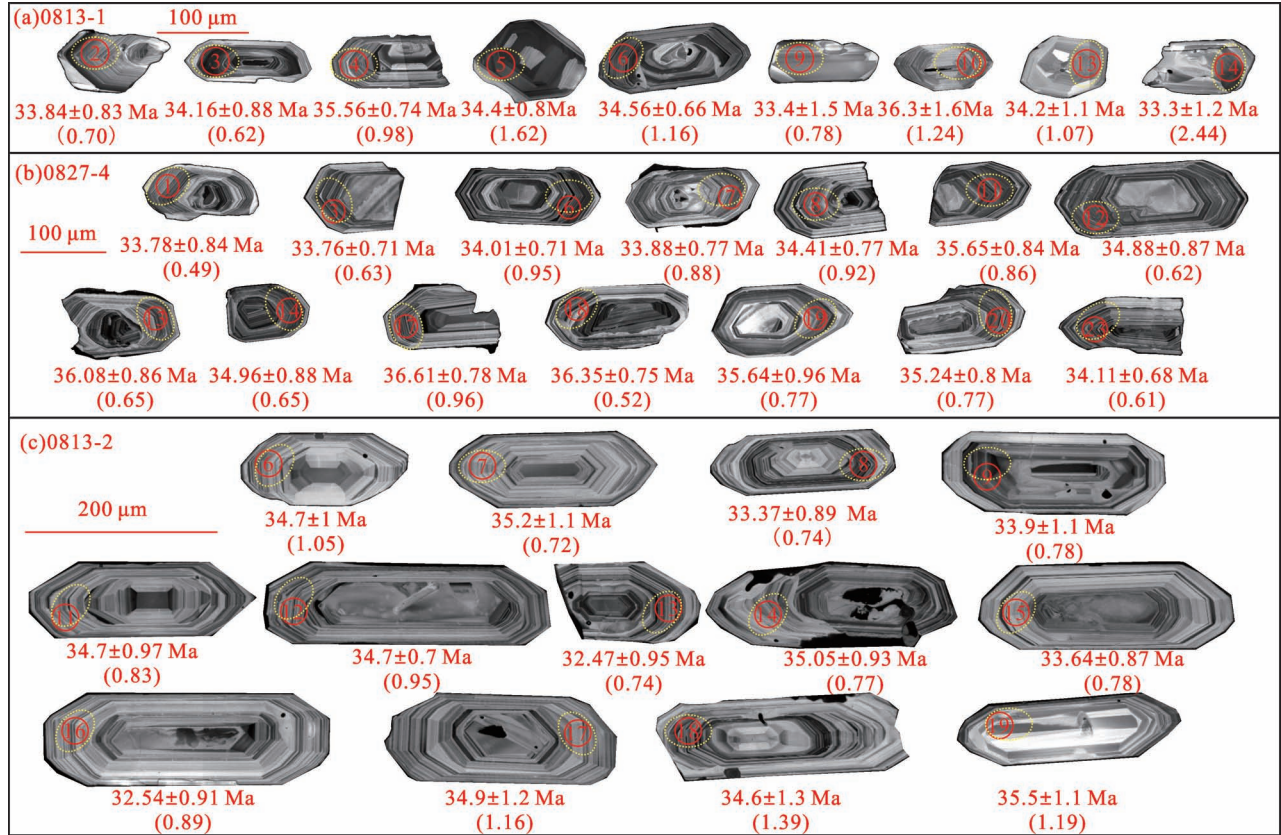


图 6 昌都—思茅陆块巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体样品锆石 CL 图像
(红圈/细实线圈为 U-Pb 测试位置;黄圈/点线圈为 Hf 同位素测试位置;圆圈内数字为测试点号;括号内数字为 Th/U 值)
Fig. 6 CL images of zircons form alkali-rich volcanic—intrusive complex in the Bada Cu—Au deposit, Qamdo—Simao Block (The red/solid circle is the U-Pb test position, and the yellow/dotted circle is the Hf isotope test position. The number in the circle represents the test point; Number in brackets represents Th/U values)

表 4 昌都—思茅陆块芒康县巴达铜金矿区富碱火山—侵入杂岩体全岩 Sr—Nd 同位素结果
Table 4 Sr—Nd isotope analytical results of the whole rocks from alkali-rich intrusive—volcanic complex in the Bada Cu—Au deposit, Qamdo—Simao Block

	样品	$\frac{n(^{87}\text{Rb})}{n(^{86}\text{Sr})}$	$\frac{n(^{87}\text{Sr})}{n(^{86}\text{Sr})}$	$\left[\frac{n(^{87}\text{Sr})}{n(^{86}\text{Sr})}\right]_i$	$\frac{n(^{147}\text{Sm})}{n(^{144}\text{Nd})}$	$\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})}$	$\left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})}\right]_i$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	T_{DM1}	T_{DM2}
早阶段粗面岩	0825-2	0.42388	0.70872	0.70851	0.12064	0.51229	0.51226	-6.75	-6.41	1406	1369
	0825-3	0.67994	0.70803	0.70770	0.11690	0.51240	0.51238	-4.58	-4.23	1178	1191
	0825-4	0.45322	0.70770	0.70747	0.12270	0.51239	0.51236	-4.90	-4.57	1280	1219
	0825-5	0.43741	0.70767	0.70745	0.12104	0.51240	0.51237	-4.74	-4.40	1244	1206
	0827-4	0.35341	0.70704	0.70686	0.12075	0.51236	0.51233	-5.38	-5.04	1294	1258
早阶段凝灰岩	0813-1	0.85763	0.70714	0.70672	0.13412	0.51242	0.51239	-4.27	-4.00	1402	1172
	0826-2	0.58051	0.70839	0.70810	0.10910	0.51233	0.51230	-6.09	-5.70	1202	1311
	0826-3	0.17128	0.70638	0.70629	0.11174	0.51254	0.51251	-1.95	-1.57	917	975
	0827-1	0.52580	0.70770	0.70743	0.09687	0.51238	0.51236	-5.07	-4.63	1009	1224
	0827-2	0.55667	0.70776	0.70748	0.10626	0.51241	0.51238	-4.55	-4.14	1059	1184
晚阶段云煌岩	0810-1-1	0.61782	0.70745	0.70714	0.11865	0.51243	0.51241	-3.98	-3.63	1150	1143
	0810-1-2	0.64788	0.70758	0.70726	0.12289	0.51243	0.51240	-4.02	-3.69	1207	1147
	0810-2-1	0.63792	0.70758	0.70727	0.11953	0.51242	0.51240	-4.19	-3.85	1179	1161
	0810-3	0.62934	0.70765	0.70734	0.12151	0.51242	0.51239	-4.23	-3.90	1207	1164
	0813-2	0.59954	0.70753	0.70724	0.12919	0.51238	0.51235	-4.99	-4.70	1387	1229

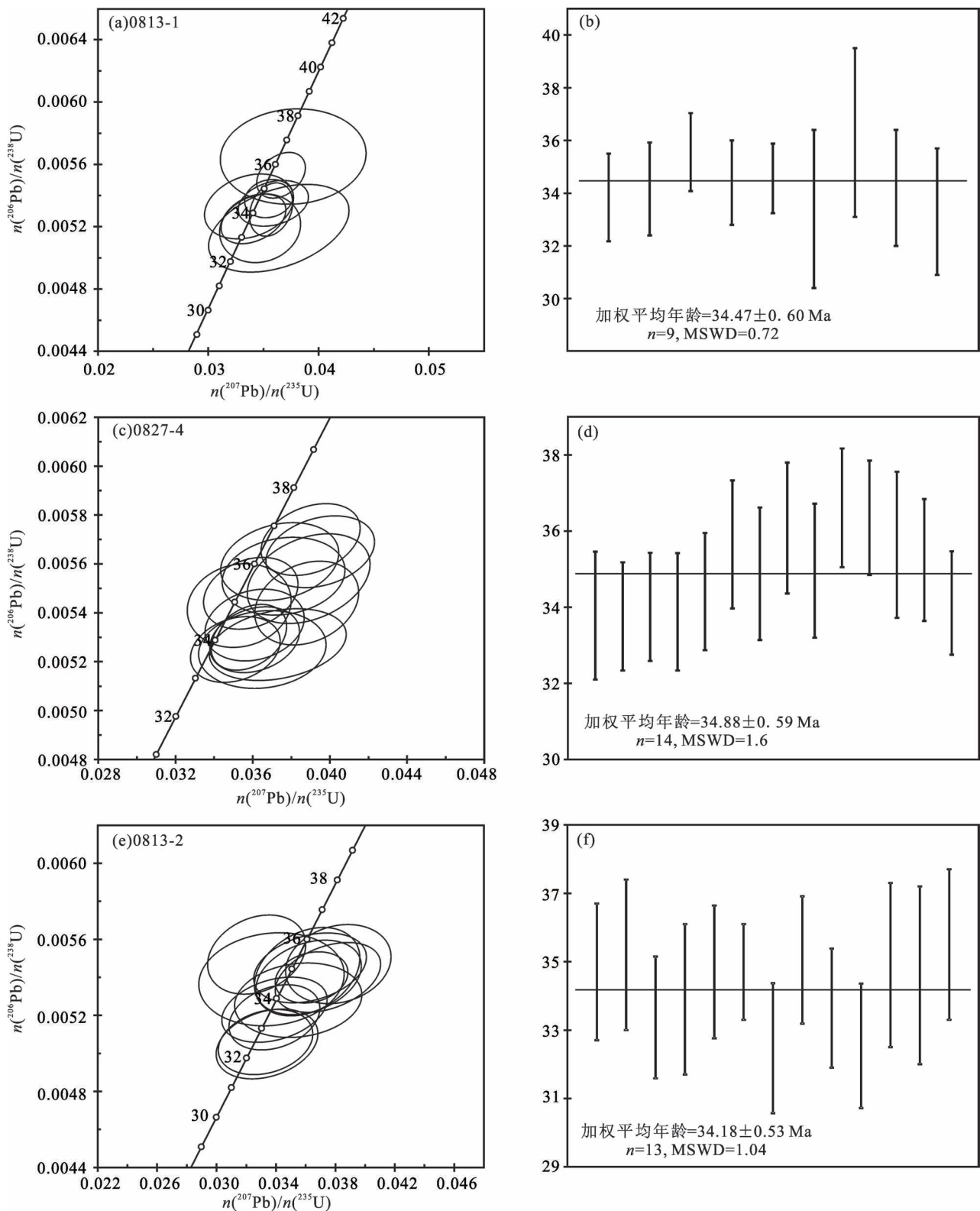


图 7 昌都—思茅陆块巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体样品锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 7 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams of zircon from alkali-rich volcanic—intrusive complex in the Bada Cu—Au deposit, Qamdo—Simao Block

(a)、(b) 0813-1 (凝灰岩); (c)、(d) 0827-4 (粗面岩); (e)、(f) 0813-2 (云煌岩)

(a)、(b) 0813-1 (tuff); (c)、(d) 0827-4 (trachyte); (e)、(f) 0813-2 (foidronite)

早阶段样品 0813-1(凝灰岩)9 颗锆石的 Th 的含量为 $324\times10^{-6}\sim1229\times10^{-6}$, 平均为 664.7×10^{-6} , U 含量为 $173.7\times10^{-6}\sim1970\times10^{-6}$, 平均为 635.2×10^{-6} , Th/U 值为 0.62~2.44。样品锆石的 Th/U 值和韵律环带结构特征反映其由岩浆结晶作用形成(Rubatto et al,2002)。测试所获 9 个数据给出的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄都集中在 33.3~36.3 Ma, 且集中分布于一致曲线上或其附近(图 7 a,b)。所有数据点给出 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 的加权平均年龄为 $34.47\pm0.60\text{ Ma}(n=9, \text{MSWD}=0.72)$, 其代表云煌岩的形成年龄。而同阶段另一样品 0827-4(粗面岩)14 颗锆石 Th 的含量为 $263\times10^{-6}\sim1317\times10^{-6}$, 平均为 512.2×10^{-6} , U 含量为 $404\times10^{-6}\sim1386\times10^{-6}$, 平均为 678.1×10^{-6} , Th/U 值为 0.49~0.96。样品锆石的 Th/U 值和韵律环带结构特征反映其为岩浆结晶作用形成。测试所获 14 个数据给出的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄都集中在 33.76~36.61 Ma 之

间,且集中分布于一致曲线上或其附近(图 7 c,d)。所有数据点给出 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 的加权平均年龄为 $34.88\pm0.59\text{ Ma}(n=14, \text{MSWD}=1.6)$, 其代表粗面岩的形成年龄。

晚阶段样品 0813-2(煌斑岩)13 颗锆石的 Th 的含量为 $186\times10^{-6}\sim641\times10^{-6}$, 平均为 332.3×10^{-6} , U 含量为 $238.1\times10^{-6}\sim601\times10^{-6}$, 平均为 353.3×10^{-6} , Th/U 值为 0.72~1.39。样品锆石的 Th/U 值和韵律环带结构特征反映其为岩浆结晶作用形成。测试所获 13 个数据给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄都集中在 32.47~35.5 Ma, 且集中分布于一致曲线上或其附近(图 7 e,f)。所有数据点给出 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 $34.18\pm0.53\text{ Ma}(n=13, \text{MSWD}=1.04)$, 其代表凝灰岩的形成年龄。

4.2 全岩微量元素特征

25 件样品全岩微量、稀土数据见表 3,从稀土配分图(图 8a)上可以看出,早阶段火山岩样品凝灰岩

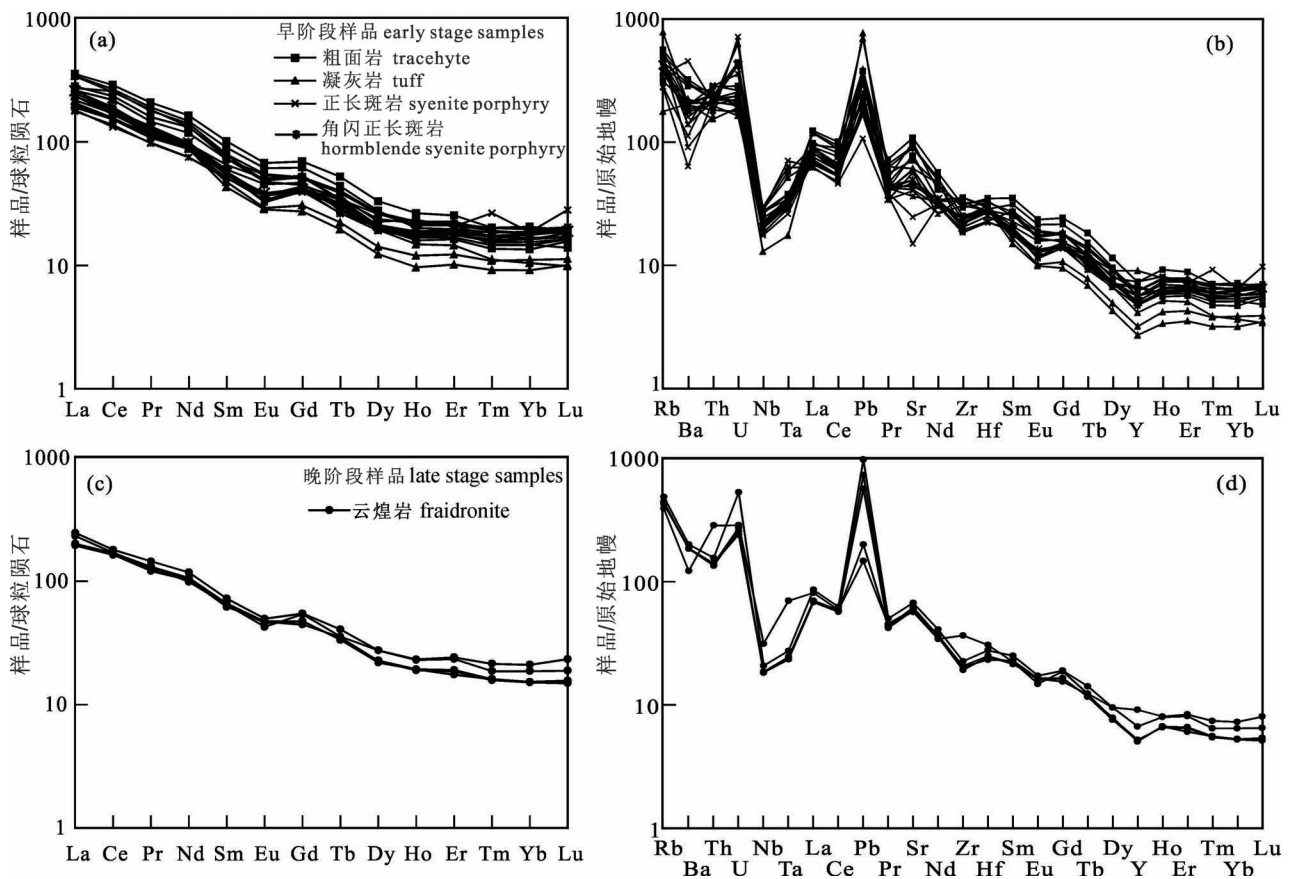


图 8 昌都—思茅陆块巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体样品稀土元素配分曲线(a,c)和微量元素原始地幔蛛网图(b,d)(原始地幔和球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns (a, c) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b, d) of samples from alkali-rich volcanic—intrusive complex in the Bada Cu—Au deposit, Qamdo—Simao Block (normalization values from Sun and McDonough, 1989)

和粗面岩的配分曲线属向右陡倾型[$(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}} = 9.81 \sim 24.73$], 轻稀土强烈富集($\Sigma \text{LREE} = 211.2 \sim 380.4 \mu\text{g/g}$), 重稀土无亏损[$(\text{Gd}/\text{Lu})_{\text{N}} = 2.60 \sim 5.25$], 但含量较低($26.21 \sim 69.47 \mu\text{g/g}$), 所测 10 件样品均表现出弱的 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.75 \sim 0.88$)和较弱的 Ce 异常($\delta\text{Ce} = 0.91 \sim 1.15$), 稀土总量均很高($\Sigma \text{REE} = 246.9 \sim 448.9 \mu\text{g/g}$)。在经原始地幔值标准化的多元蛛网图(图 8b)上, 火山岩显示出一致的配分型式, 即大离子亲石元素(LILEs) Rb、Th、U、Sr 等的富集, 而亏损高场强元素(HFSE) Nb、Ta、Zr 等。

同阶段侵入岩样品正长斑岩和角闪正长斑岩的配分曲线(图 8a)也呈向右陡倾型[$(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}} = 6.44 \sim 13.77$], 轻稀土强烈富集($\Sigma \text{LREE} = 180 \sim 249.5 \mu\text{g/g}$), 重稀土无亏损[$(\text{Gd}/\text{Lu})_{\text{N}} = 1.55 \sim 2.39$], 但含量较低($42.87 \sim 59.18 \mu\text{g/g}$), 所测 10 件样品均表现出弱的 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.68 \sim 0.79$)和较弱的 Ce 异常($\delta\text{Ce} = 0.95 \sim 1.02$), 稀土总量均很高($\Sigma \text{REE} = 239.2 \sim 296.3 \mu\text{g/g}$)。在经原始地幔值标准化的多元蛛网图(图 8b)上, 火山岩显示出一致的配分型式, 即大离子亲石元素(LILEs) Rb、Th、U、Sr 等的富集, 而亏损高场强元素(HFSE) Nb、Ta、Zr 等。

晚阶段样品云煌岩也表现出与早阶段火山岩和侵入岩相似的微量、稀土分布特征, 其配分曲线(图 8c)也呈向右陡倾型[$(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}} = 10 \sim 13.55$], 轻稀土强烈富集($\Sigma \text{LREE} = 218.9 \sim 251.8 \mu\text{g/g}$), 重稀土无亏损[$(\text{Gd}/\text{Lu})_{\text{N}} = 2.31 \sim 3.15$], 但含量较低($47.13 \sim 70.97 \mu\text{g/g}$), 所测 5 件样品均表现出弱的 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.72 \sim 0.87$)和较弱的 Ce 异常($\delta\text{Ce} = 0.92 \sim 1.03$), 稀土总量均很高($\Sigma \text{REE} = 266.4 \sim 311.3 \mu\text{g/g}$)。在经原始地幔值标准化的多元蛛网图(图 8d)上, 火山岩显示出一致的配分型式, 即大离子亲石元素(LILEs) Rb、Th、U、Sr 等的富集, 而亏损高场强元素(HFSE) Nb、Ta、Zr 等。

4.3 Sr—Nd—Hf 同位素特征

4.3.1 全岩 Sr—Nd 同位素

样品分析结果列于表 4, 所有分析的样品均具有相似的 Sr 和 Nd 同位素组成。早阶段火山岩样品凝灰岩和粗面岩的 $n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ 值为 $0.17128 \sim 0.854763$, $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值为 $0.70638 \sim 0.70872$, 根据 $t = 34 \text{ Ma}$, 计算的初始 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值为 $0.70629 \sim 0.70851$ 。 $n(^{147}\text{Sm})/n(^{144}\text{Nd})$ 值为 $0.09687 \sim 0.13412$, $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ 值为 0.51229

~ 0.51254 , 计算的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-6.41 \sim -1.57$, 两阶段 Nd 同位素地幔模式年龄(T_{DM2}) 范围为 $0.97 \sim 1.37 \text{ Ga}$ 。

而晚阶段样品云煌岩也表现出与早阶段样品相似的同位素特征, 其 $n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ 值为 $0.59954 \sim 0.64788$, $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值为 $0.70745 \sim 0.70765$, 根据 $t = 34 \text{ Ma}$, 计算的初始 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值为 $0.70714 \sim 0.70734$ 。 $n(^{147}\text{Sm})/n(^{144}\text{Nd})$ 值为 $0.11865 \sim 0.12919$, $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ 值为 $0.51238 \sim 0.51243$, 计算的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-4.70 \sim -3.63$, 两阶段 Nd 同位素地幔模式年龄(T_{DM2}) 范围为 $1.14 \sim 1.23 \text{ Ga}$ 。

4.3.2 锆石 Hf 同位素

早阶段粗面岩、凝灰岩样品和晚阶段云煌岩样品锆石 Hf 同位素分析结果见表 5。早阶段粗面岩和凝灰岩样品的 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值在 $0.000822 \sim 0.001547$ 之间, 所有比值均小于 0.002, 显示锆石形成后较低的放射性成因 Hf 的积累, 所测 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值可代表锆石结晶时体系的 Hf 同位素组成(吴福元等, 2007)。14 个测点的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值范围为 $0.282751 \sim 0.282875$, 平均值为 0.282824 , 根据相同锆石获得的原位年龄校正计算, 结晶锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $0 \sim 4.4$, 对应二阶段模式年龄为 $717 \sim 958 \text{ Ma}$ 。

而晚阶段粗面岩样品的 Hf 同位素组成表现出与早阶段样品 Hf 同位素组成的相似性, 其 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值在 $0.000824 \sim 0.001646$ 之间, 所有比值均小于 0.002, 10 个测点的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值范围为 $0.282761 \sim 0.282832$, 平均值为 0.282791 , 根据相同锆石获得的原位年龄校正计算, 结晶锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $0.3 \sim 2.9$, 对应二阶段模式年龄为 $932 \sim 1091 \text{ Ma}$ 。两阶段样品锆石 Hf 模式年龄远大于结晶年龄($34.18 \sim 34.88 \text{ Ma}$), 表明岩浆源区受到过地壳物质混染或源于富集地幔(吴福元等, 2007)。

5 讨论

5.1 成岩时代

本文通过对巴达 Cu—Au 矿区早阶段凝灰岩、粗面岩和晚阶段云煌岩进行锆石 LA-ICP-MS U—Pb 精确年代学研究, 最终分别获得 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 $34.47 \pm 0.60 \text{ Ma}$ 、 $34.88 \pm 0.59 \text{ Ma}$ 和 $34.18 \pm 0.53 \text{ Ma}$, 代表该杂岩体形成于始新世末期。而马宏杰等(2016)对拉屋拉组粗面岩进行 LA-

表 5 昌都—思茅陆块芒康县巴达铜金矿区富碱火山—侵入杂岩体锆石 Hf 同位素结果

Table 5 The Hf isotope analytical results of alkali-rich intrusive—volcanic complex in the Bada Cu—Au deposit, Qamdo—Simao Block

	点号	$\frac{n(^{176}\text{Yb})}{n(^{177}\text{Hf})}$	$\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}$	$n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$		年龄 (Ma)	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}	T_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
		测值	2σ							
早阶段 粗面岩 (0827-4)	]1. 1	0.034096	0.001154	0.282846	0.000017	33.78	3.3	578	774	-0.97
	3. 1	0.038282	0.001262	0.282831	0.000017	33.76	2.8	601	803	-0.96
	6. 1	0.031893	0.001196	0.282824	0.000015	34.01	2.6	609	815	-0.96
	7. 1	0.025130	0.000832	0.282822	0.000017	33.88	2.5	607	820	-0.97
	12. 1	0.036610	0.001197	0.282875	0.000016	34.88	4.4	537	717	-0.96
	17. 1	0.037375	0.001273	0.282854	0.000017	36.61	3.7	569	758	-0.96
	18. 1	0.042571	0.001547	0.282829	0.000017	36.35	2.8	609	806	-0.95
	20. 1	0.033966	0.001166	0.282865	0.000015	35.24	4.0	550	735	-0.96
	23. 1	0.042431	0.001446	0.282872	0.000018	34.11	4.2	545	723	-0.96
凝灰岩 (0813-1)	]2. 1	0.035324	0.001315	0.282751	0.000017	33.84	0.0	716	958	-0.96
	5. 1	0.038556	0.001322	0.282812	0.000031	34.40	2.2	628	838	-0.96
	6. 1	0.040028	0.001461	0.282814	0.000018	34.56	2.2	629	836	-0.96
	13. 1	0.022999	0.000822	0.282773	0.000015	34.20	0.8	675	913	-0.98
	14. 1	0.030628	0.001010	0.282763	0.000018	33.30	0.4	693	934	-0.97
晚阶段 云煌岩 (0813-2)	7. 1	0.040957	0.001389	0.282832	0.000013	35.2	2.9	602	932	-0.96
	8. 1	0.033949	0.001210	0.282766	0.000013	33.37	0.5	693	1082	-0.96
	11. 1	0.031363	0.001085	0.282786	0.000014	34.70	1.2	663	1036	-0.97
	12. 1	0.040016	0.001452	0.282777	0.000012	34.70	0.9	681	1055	-0.96
	13. 1	0.046876	0.001646	0.282791	0.000014	32.47	1.3	665	1027	-0.95
	14. 1	0.023588	0.000824	0.282777	0.000015	35.05	0.9	670	1055	-0.98
	15. 1	0.032375	0.001187	0.282761	0.000015	33.64	0.3	699	1091	-0.96
	16. 1	0.044097	0.001491	0.282796	0.000014	32.54	1.5	655	1015	-0.96
	17. 1	0.032350	0.001093	0.282825	0.000015	34.90	2.6	607	947	-0.97
	18. 1	0.046657	0.001565	0.282801	0.000015	34.60	1.7	649	1002	-0.95

ICP-MS 锆石 U-Pb 测年并获得 36.4~35.2 Ma 的年龄,认为其属于晚始新世的产物,另外 Su 等(2018)对拉屋拉组火山凝灰岩进行⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年研究,获得年龄值为 33.4±0.5 Ma 和 34.7±0.5 Ma,认为拉屋拉组火山岩形成于始新世至渐新世的转折期。近期杨富成等(2020)也报道了本矿区含矿斑岩体的形成年龄 35.0~34.7 Ma。上述所测的年龄值与本文数据在误差范围内一致,表明巴达 Cu—Au 矿床富碱火山—侵入杂岩体形于始新世末期。本文报道的 34.88~34.18 Ma 富碱火山—侵入杂岩体形成年龄与青藏高原晚碰撞造山作用下发育的受新生代走滑断裂系统控制的不连续的钾质火成岩省岩浆活动时限 40~24 Ma 相吻合,且该岩浆活动高峰期在(35±5)Ma(侯增谦等,2006,2020),说明该富碱杂岩体也处于陆内走滑转换构造应力场中。矿区各阶段富碱杂岩体年龄的精确厘定对于矿区富碱火山杂岩体时空演化序列及成岩—成矿机制研究具有重要意义。

5.2 岩浆来源

哀牢山—金沙江富碱侵入岩带呈 NW 向断续分

布,由玉树西南杂多转为 NWW 向,经可可西里继续延展到新疆西南塔什库尔干一带,产状从侵入至喷出,岩性从超基性、基性、中性直达酸性。该新生代富碱斑岩带通常被认为是钾玄岩系列,而且目前多认为钾玄质岩石主要来源于受俯冲流体交代的地幔部分熔融(Morrison,1980;张玉泉等,1997,1998b;姜耀辉等,2006a,2006b)。

本文所分析的 25 件样品的微量元素和稀土元素均表现出一致性,即富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),而亏损高场强元素(HFSE)和重稀土元素(HREE),显示壳幔混合源区的一般特征。Nb/U 值常作为判别地壳混染的指标,巴达 Cu—Au 矿区富碱杂岩体的 Nb/U 值(0.44~1.55)比 MORB 和 OIB(Nb/U≈47, Hofmann et al.,1986)低很多,也比陆壳上地壳(Nb/U≈9, Taylor and McLennan,1985)和全球平均俯冲沉积物(Nb/U≈5, Plank and langmuir,1998)低,但接近俯冲带释放流体的 Nb/U 值(0.22, Ayers,1998),表明俯冲作用过程中释放的流体对地幔交代作用是地幔源区具有壳源特征的重要因素。此外,岩石相对富 Sr,并表

现出弱的 Eu 负异常(0.68–0.88),说明源区有少量斜长石残留或岩浆发生过少量斜长石的分离结晶,而岩体相对亏损 HREEs 和 Y 说明源区有石榴石残留相。在 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i-\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解中 15 件样品主要落入 EM II 区域(图 9 a),表明矿区富碱火山—侵入杂岩体起源于 II 富集地幔。

另外,本矿区早阶段粗面质火山岩和晚阶段云煌岩脉的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围变化在 0~4.4 之间,所有锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均大于零,在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解中落点均位于亏损地幔范围内(图 9b),表明源区应为亏损地幔,这与地球化学特征和 Sr—Nd 同位素得到的源区为俯冲交代的富集地幔的结论相矛盾。一般情况下,Nd 和 Hf 同位素存在一定正相关性,但值得注意的是,由于 Rb—Sr、Sm—Nd 和 Lu—Hf 同位素体系具有不同的地球化学性质,在岩浆作用的过程中,流体携带 Nd 的能力强于 Hf,因此被流体改造的地幔楔将包含更多非放射成因 Nd,造成相对 Nd 具有更高放射成因 Hf,进而引起 Hf—Nd 同位素解耦(Pearce et

al.,1999;吴福元等,2007)。

如前所述,本矿区富碱火山—侵入杂岩体的微量和稀土元素结果指示了一个受交代的富集地幔部分熔融并混染少量地壳物质的源区,且其较高的 Y 含量(12.33~41.47 $\mu\text{g/g}$)、Ba 含量(444~3179 $\mu\text{g/g}$)和 Nb/Y—Ba 大致成正相关趋势的特征(图 10),也反映了区域性的俯冲板片流体交代与岩浆作用过程的联合控制(Hou Zengqian et al.,2005)。另外巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体 Sr—Nd—Hf 同位素特征与同时代北衙(34.92 Ma)、马厂箐煌斑岩(33.77 Ma)的 Sr—Nd—Hf 同位素特征相似(图 8),北衙、马厂箐煌斑岩被认为源自俯冲板片交代富集了的岩石圈地幔,并可能混合了少量古特提斯洋壳沉积物(贾丽琼等,2013;和文言等,2014),而与形成时代稍晚的姚安富碱火山杂岩体(33.27~33.63 Ma)不同,姚安富碱火山杂岩体则被认为是交代岩石圈地幔部分熔融和扬子板块加厚下地壳物质的混合(杨航等,2020),且在岩浆快速上升过程

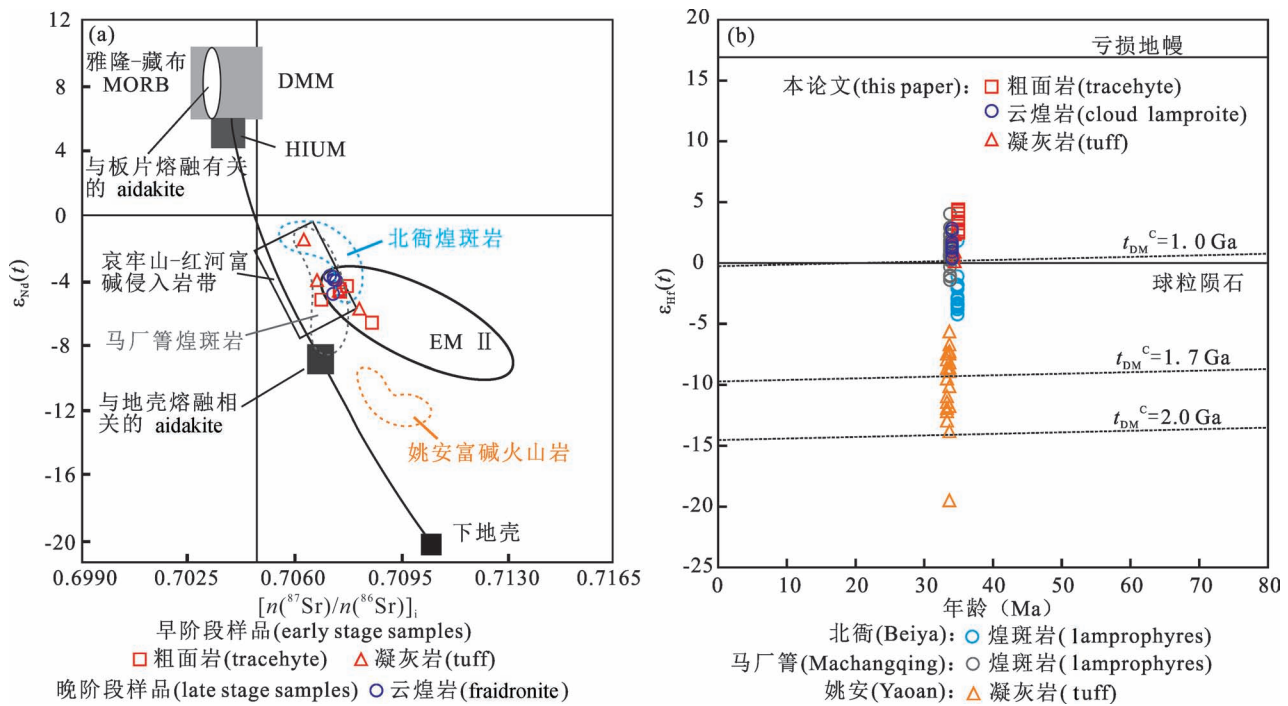


图 9 昌都—思茅陆块巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体样品 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i-\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(a)和锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解(b)(哀牢山—红河富碱侵入岩带据张玉泉等,1997;马厂箐煌斑岩据贾丽琼等,2013;北衙煌斑岩据和文言等,2014;姚安富碱火山岩据 Yan Qinggao et al.,2018)

Fig. 9 Variation of $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ vs $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a) and zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. t plot (b) for the samples from alkali-rich volcanic—intrusive complex in the Bada Cu—Au deposit, Qamdo—Simao Block(the data of alkali-rich Intrusions in Ailaoshan—Honghe belt after Zhang Yuquan et al., 1997#; the data of lamprophyres from Machangqing after Jia Liqiong et al., 2013&; the data of the lamprophyres in the Beiya area after He Wenyan et al., 2014&; the data of alkaline volcanic rocks from Yaoan after Yan Qinggao et al., 2018)

中,又混杂了少部分地壳物质(严清高等,2019)。造成该种源区性质差异的原因可能是巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体的母岩浆只混杂了少量地壳物质。

基于以上分析,笔者认为巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体的地球化学特征和同位素特征主要反映其来源于受板片流体交代的 EMII 型富集地幔源区的特征,且有少量地壳物质的混杂。

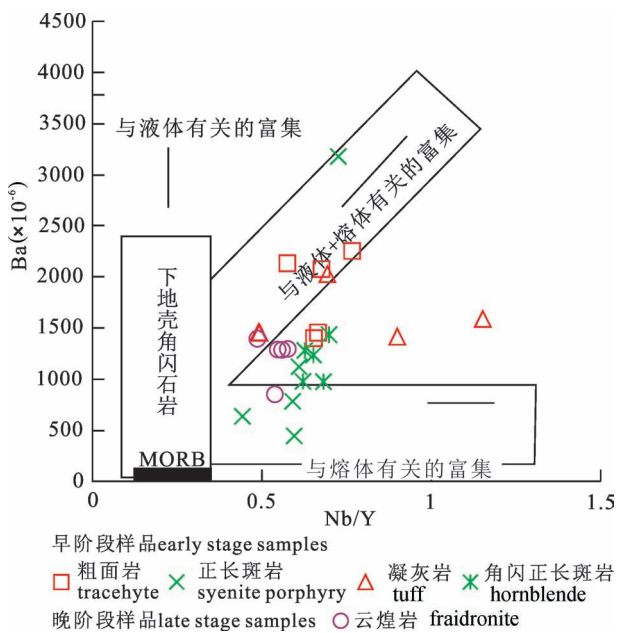


图 10 昌都—思茅陆块巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体的 Ba—Nb/Y 图(据 Hou Zengqian et al., 2005)
Fig. 10 Ba versus Nb/Y plots of alkali-rich volcanic—intrusive complex in the Bada Cu—Au deposit, Qamdo—Simao Block(after Hou Zengqian et al., 2005)

5.3 构造环境

钾玄质岩石通常被认为是岛弧和碰撞带与伸展环境有关的典型岩石(Morrison, 1980; Gill, 2010),而近年来的研究也表明三江富碱侵入岩带形成于拉张(张玉泉等,1997)或碰撞后伸展的环境(武精凯等,2019)。同时区域上广泛出露与富碱斑岩同期的煌斑岩也表明该区处于岩石圈伸展构造背景,且岩石圈减薄机制是该富碱侵入岩带形成的合理解释(罗照华等,2006;贾丽琼等,2013;和文言等,2014;严清高等,2019)。

从 55~37 Ma,印度—欧亚板块的持续碰撞,使得金沙江缝合带的岩石圈增厚,而杨文采等(2019)的研究也证实了 50 Ma 之前特提斯洋板块就已经俯冲到青藏高原软流圈,其上方青藏高原岩石圈发生

俯冲带大规模的岩浆和火山作用;在 37~32 Ma 之间,三江地区发生应力变化,富碱斑岩处于后碰撞环境,岩石圈地幔发生拆沉导致软流圈地幔上涌(Thompson and Connolly, 1995),温度升高使得交代富集的岩石圈地幔和加厚的钾质下地壳发生熔融,并沿金沙江—红河大型走滑构造带上侵,形成一系列斑岩 Cu—Au 矿床(张玉泉等,1997;侯增谦等,2006;武精凯等,2019;李文昌,2020)。李文昌等(2020)的研究显示沿金沙江—红河大型走滑构造带分布的富碱斑岩表现出由北往南或由西往东成矿时代变新,成矿元素从 Cu(Mo)—Au→Au(Cu)→Pb—Zn—Ag(Ge)的分带特征,间接揭示扬子西缘系列斑岩和与斑岩有关的多金属矿化可能是 NW 向大型走滑断裂及派生的 SN、EW 远程热液系统耦合的结果。

基于上述分析,本文认为巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体形成于青藏高原后碰撞伸展环境,而岩石圈拆沉是该杂岩体形成的关键机制。其具体形成过程如下:晚白垩世至古新世印度大陆和欧亚大陆碰撞阶段近 EW 向的挤压褶皱造山作用使增厚下地壳发生拆沉,幔源岩浆上侵交代下地壳形成壳幔混合岩浆,后上侵至芒康复式向斜核部形成岩浆房,并沿复式向斜南翼就位形成富碱火山—侵入杂岩体。巴达 Cu—Au 矿区深部角闪正长斑岩—正长斑岩复式岩体中心部位(F5 断裂附近)发育 NW—SE 向延伸的张裂隙脉集中带或正断层,被后期岩浆成矿热液贯入并沉淀形成黄铁矿—菱铁矿—黄铜矿—方铅矿—石英—白云石脉或矿体,上述特征显示角闪正长斑岩—正长斑岩复式岩体仅为晚期岩浆热液提供运输—沉淀通道,粗面岩、凝灰岩等火山杂岩和云煌岩也仅为同期火山—岩浆事件的产物。

6 结论

(1)巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体进行详细的岩相学解剖和剖面实测,划分出矿区同期 2 阶段岩浆事件:① 始新世早阶段富碱火山岩—侵入岩喷发—侵位事件;② 始新世晚阶段云煌岩侵位事件。

(2)对早阶段凝灰岩、粗面岩和晚阶段云煌岩进行锆石 LA-ICP-MS U—Pb 精确年代学研究,最终分别获得 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 34.47 ± 0.60 Ma、 34.88 ± 0.59 Ma 和 34.18 ± 0.53 Ma,其代表着巴达富碱火山—侵入杂岩体形成时代为始新世

末期。

(3)巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体的微量和 Sr—Nd—Hf 同位素特征显示其主要来自受流体交代的富集地幔部分熔融,并混染了少量地壳物质。

(4)巴达 Cu—Au 矿区富碱火山—侵入杂岩体形成于青藏高原后碰撞伸展环境,而岩石圈拆沉是该杂岩体形成的关键机制。杂岩体深部角闪正长斑岩—正长斑岩内部发育 NW—SE 向延伸张裂隙脉集中带或正断层,为后期岩浆成矿热液提供运输—沉淀通道,粗面岩、凝灰岩等火山杂岩和云煌岩也仅为同期火山—岩浆事件的产物。

致谢:野外工作得到西藏熙坤矿业有限公司芒康分公司倪智、陈国峰、韩美良等和重庆 205 地质队杨增清、石登华、肖宏等的帮助,样品测试工作在国家地质实验测试中心赵令浩助理研究员和孙鹏程硕士研究生等人的指导下完成,审稿专家在论文审稿过程中提出有益的建议和宝贵意见,在此一并诚挚感谢。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈喜连, 黄文婷, 邹银桥, 梁华英, 张健, 张玉泉. 2016. 玉龙斑岩铜矿带南段含矿斑岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及南北段成矿规模差异分析. 岩石学报, 32(8): 2522~2534.

丁朝建, 王增, 申屠保涌. 1990. 藏东玉龙斑岩铜(钨)矿带主要成矿岩体 Nd—Sr 同位素特征. 见: 青藏高原地质文集: 20. 北京: 地质出版社: 160~167.

侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MCICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报, 23(10): 2595~2604.

和文言, 莫宣学, 喻学惠, 董国臣, 和中华, 黄雄飞, 李小伟, 姜丽莉. 2014. 滇西北銜煌斑岩的岩石成因及动力学背景: 年代学、地球化学及 Sr—Nd—Pb—Hf 同位素约束. 岩石学报, 30(11): 3287~3300.

侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 2006. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用. 矿床地质, (5): 521~543.

侯增谦, 郑远川, 卢占武, 许博, 王长明, 张洪瑞. 2020. 青藏高原巨厚地壳: 生长、加厚与演化. 地质学报, 94(10): 2797~2815.

贾丽琼, 莫宣学, 董国臣, 徐文艺, 王梁, 郭晓东, 王治华, 韦少港. 2013. 滇西马厂箐煌斑岩成因: 地球化学、年代学及 Sr—Nd—Pb—Hf 同位素约束. 岩石学报, 29(4): 1247~1260.

江小均, 严清高, 李文昌, 李超, 吴鹏, 管申进, 余海军, 李金龙. 2018. 滇中老街子 Pb—Ag 多金属矿床的成矿时代及成矿动力学背景探讨: 来自硫化物 Re—Os 同位素证据. 地质学报, 92(6): 1280~1296.

姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞, 戴宝章. 2006a. 陆—陆碰撞造山环境下含铜斑岩岩石成因——以藏东玉龙斑岩铜矿带为例. 岩石学报, 22(3): 697~706.

姜耀辉, 蒋少涌, 戴宝章, 凌洪飞. 2006b. 玉龙斑岩铜矿含矿与非含矿斑岩元素和同位素地球化学对比研究. 岩石学报, 22(10): 2561~2566.

李文昌, 江小均. 2020. 扬子西缘陆内构造转换系统与构造—岩浆—成矿效应. 地学前缘, 27(2): 151~164.

李荫清, 芮宗瑶, 程莱仙. 1981. 玉龙斑岩铜(钨)矿床的流体包裹体及成矿作用研究. 地质学报, (3): 58~73.

罗照华, 魏阳, 辛后田, 詹华明, 柯珊, 李文韬. 2006. 造山后脉岩组合的岩石成因——对岩石圈拆沉作用的约束. 岩石学报, 22(6): 1672~1684.

马宏杰, 张世涛, 林楠, 程先锋, 张磊. 2016. 西藏芒康盆地粗面岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义. 科学技术与工程, 16(15): 9~14+21.

马鸿文. 1989. 论藏东玉龙斑岩铜矿带岩浆侵入时代. 地球化学, (3): 210~216.

唐索寒, 朱祥坤, 李津, 王进辉, 闫斌. 2010. 利用锆特效树脂分离富集岩石样品中的锆及测定 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. 分析化学, 38(7): 999~1002.

武精凯, 赵志丹, 杨逸云, 雷杭山, 苗壮, 刘栋, 朱弟成, 喻学惠. 2019. 云南哀牢山—红河断裂带南段新生代富碱斑岩岩石成因和地质意义. 岩石学报, 35(2): 485~504.

吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, (2): 185~220.

吴伟中, 夏斌, 张玉泉, 董冰华, 夏中曦. 2013. 西藏玉龙成矿带斑岩 Cu—Mo 矿床地质地球化学特征及成矿机制探讨—玉龙和多霞松多对比研究. 大地构造与成矿学, 37(3): 440~454.

杨富成, 李文昌, 祝向平, 江小均, 刘俊, 廖忠礼, 刘鸿飞, 杨后斌, 李勇. 2020. 藏东芒康县巴达铜金矿床地质特征及找矿方向研究. 地学前缘, 27(4): 232~243.

杨航, 吴鹏, 韩润生, 姜龙燕, 陶琴, 江小均, 管申进. 2020. 滇中楚雄盆地老街子 Pb—Ag 矿床和白马苴 Au(Cu)矿床赋矿岩体对比及成矿模式. 地质学报, 94(12): 3726~3745.

严清高, 江小均, 吴鹏, 孙会一, 管申进. 2017. 滇中姚安老街子板内富碱火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及火山机构划分. 地质学报, 91(8): 1743~1759.

严清高, 郭忠林, 李超, 江小均, 王忠强, 李亚东. 2019. 滇中姚安干沟金矿床煌斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及 Hf 同位素特征. 矿床地质, 38(3): 526~540.

杨文采, 瞿辰, 任浩然, 黄联捷, 胥颐, 于常青, 刘晓宇. 2019. 青藏高原软流圈与提斯洋板块俯冲. 地质论评, 65(3): 521~532.

张玉泉, 谢应雯. 1997. 哀牢山—金沙江富碱侵入岩年代学和 Nd, Sr 同位素特征. 中国科学: 地球科学, 27(4): 289~293.

张玉泉, 谢应雯, 梁华英, 邱华宁, 李献华, 钟孙霖. 1998a. 藏东玉龙铜矿带含矿斑岩及成岩系列. 地球化学, 27(3): 236~243.

张玉泉, 谢应雯, 邱华宁, 李献华, 钟孙霖. 1998b. 钾玄岩系列: 藏东玉龙铜矿带含矿斑岩 Sr、Nd、Pb 同位素组成. 地质科学, 33(3): 359~366.

张玉泉, 谢应雯, 邱华宁, 李献华, 钟孙霖. 1998c. 钾玄岩系列: 藏东玉龙铜矿带含矿斑岩元素地球化学特征. 地球科学, 23(6): 557~561.

Ayers J. 1998. Trace element modeling of aqueous fluid peridotite interaction in the Mantle wedge of subduction zones. Contributions to Mineralogy and Petrology, 132(4): 390~404.

Chen Xilian, Huang Wenting, Zou yinqiao, Liang Huaying, Zhang Jian

- and Zhang Yuquan. 2016&. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of ore-bearing porphyries in the southern Yulong porphyry copper belt, and factors resulting in the differences in scale of mineralization between the southern and northern Yulong porphyry copper belt. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2522~2534.
- Ding Chaojian, Wang Zeng and Shentu Baoyong. 1990&. A Sr—Nd Study of Major Mineralizing Rockbodies in Yulong Propy Cu(Mo) Belt, Eastern Xizang(Tibet). In: Contribution to the Geology of the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau: 20. Beijing: Geological Publishing House: 160~167.
- Gill R. 2010. *Igneous rocks and Processes: A Practical Guide*. Chichester: Wiley-Blackwell: 375~376.
- Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, White W M. 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(1~2): 33~45.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, Qu Xiaoming, Shi Yuruo, Xie Guiqing. 2007&. Laser ablation MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595~2604.
- He Wenyan, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, Dong Guochen, He Zhonghua, Huang Xiongfei, Li Xiaowei, Jiang Lili. 2014&. Genesis and geodynamic settings of lamprophyres from Beiya, western Yunnan: Constraints from geochemistry, geochronology and Sr—Nd—Pb—Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3287~3300.
- Hou Zengqian, Ma Hongwen, Khin Zaw, Zhang Yuquan, Wang Mingjie, Wang Zeng, Pan Guitang and Tang Rrenli. 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet. *Economic Geology*, 98(1): 125~145.
- Hou Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, Mo Xuanxue, Tian Shihong, Sun Xiaoming, Ding Lin, Wang Erqi, Gao Yongfeng, Xie Yuling, Zeng Pusheng, Qin Kezhang, Xu Jifeng, Qu Xiaoming, Yang Zhiming, Yang Zhusen, Fei Hongcai, Meng Xiangjin and Li Zhenqing. 2006&. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting. *Mineral Deposits*, (5): 521~543.
- Hou Zengqian, Zhong Dalai, Deng Wanming, Zaw K. 2005. A tectonic modle for porphyry copper—molybdenum—gold deposits in the eastern Indo—Asian collision zone. In: Porter T M, ed. *Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective*. Adelaide: PGC Publishing, 423~440.
- Hou Zengqian, Zhen Yuanchuan, Lu Zhanwu, Xu Bo, Wang Changming, Zhang Hongrui. 2020&. Growth, thickening and evolution of the thickened crust of the Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 94(10): 2797~2815.
- Jia Liqiong, Mo Xuanxue, Dong Guochen, Xu WenYi, Wang Liang, Guo Xiaodong, Wang Zhihua, Wei Shaogang. 2013&. Genesis of lamprophyres from Machangqing, western Yunnan: Constraints from geochemistry, geochronology and Sr—Nd—Pb—Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1247~1260.
- Jiang Xiaojun, Yan Qinggao, Li Wenchang, Li Chao, Wu Peng, Guan Shenjin, Yu Haijun, Li Jinlong. 2018&. The Metallogenic Age and Geodynamic Setting of the Laojiezi Pb—Ag Polymetallic Deposit, Central Yunnan Province: Evidence from Re—Os Isotope of Sulfides. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 1280~1296.
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Ling Hongfei and Dai Baozhang. 2006a&. Petrogenesis of Cu-bearing porphyry associated with continent—continent collisional setting: Evidence from the Yulong porphyry Cu ore-belt, East Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 697~706.
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Dai Baozhang and Ling Hongfei. 2006b&. Comparison on elemental and isotopic geochemistry of ore-bearing and barren porphyries from the Yulong porphyry Cu deposit, East Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2561~2566.
- Li Wenchang and Jiang Xiaojun. 2020&. The Cenozoic tectono—magmatism—mineralization effect of the intracontinental tectonic transformation system in the western margin of Yangtze Block. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 151~164.
- Li Yinqing, Rui Zongyao and Cheng Laixian. 1981&. Fluid Inclusions and Mineralization of the Yulong Porphyry copper (Molybdenum) Deposit. *Acta Geologica sinica*, (3): 58~73.
- Luo Zhaohua, Wei Y, Xin Houtian, Zhan Huaming, Ke Shan, Li Wentao. 2006&. Petrogenesis of the post-orogenic dike complex—Constraints to lithosphere delamination. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1678~1684.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. *Lithos*, 13(1): 97~108.
- Ma Hongjie, Zhang Shitao, Lin Nan, Cheng Xianfeng, Zhang Lei. 2016&. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Trachyte and Its Significance in Mangkang Basin, Tibet. *Science Technology and Engineering*, 16(15): 9~14+21.
- Ma Hongwen. 1989#. *Emplacement Age of Granitic Magma in the Yulong Propyry Copper belt, Eastern Tibet*. *Geochimica*, (3): 210~216.
- Pearce J A, Kempton P D, Nowell G M, Noble S R. 1999. Hf—Nd element and isotope perspective on the nature and provenance of mantle and subduction components in W estern Pacific arc—basin systems. *Journal of Petrology*, 40(11): 1579~1611.
- Plank T and Langmuir C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, 145(3~4): 325~394.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184: 123~138.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313~345.
- Su Tao, Spicer Robert A, Li Shihu, Xu He, Huang Jian, Sherlock Sarah, Huang Yongjiang, Li Shufeng, Wang Li, Jia Linbo, Deng Wei Yudong, Liu Jia, Deng Chenglong, Zhang Shitao, Valdes Paul J, Zhou Zhekun. 2018. Uplift, Climate and Biotic Changes at the Eocene—Oligocene Transition in Southeast Tibet. *National Science Review*, 6(03): 495~504.
- Thompson A B and Connolly J A D. 1995. Melting of the continental crust: Some thermal and petrological constraints on anatexis in continental collision zones and other tectonic settings. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B8): 15565~15579.
- Tang Suohan, Zhu Xiangkun, Li Jin, Wang Jinhui, Yan Bin. 2010&. Separation and Isotopic Measurement of Sr in Rock Samples Using Selective Specific Resins. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 38(7): 999~1002.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 1~312.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei and Gao Shan. 2007&. Lu—Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta*

Petrologica Sinica, 23(2): 185~220.

Wu Jingkai, Zhao Zhidan, Yang Yiyun, Lei Hangshan, Miao Zhuang, Liu Dong, Zhu Dicheng, Yu Xuehui. 2019&. Petrogenesis and geological implications of the alkali-rich porphyry in southern Ailaoshan—Red River shear zone. Acta Petrologica Sinica, 35(2): 485~504.

Wu weizhogn, Xia Bin, Zhang Yuquan, Dong Binghua and Xia Zhognxi. 2013&. Geochemical Characteristics and Metallogenic Mechanism of the Porphyry Cu—Mo Deposits in the Yulong Ore Belt, Eastern Tibet: A Case Study of the Yulong and Duoxiasongduo Porphyryise. Geotectonica et Metallogenia, 37(3): 440~454.

Yang Fucheng, Li Wenchang, Zhu Xiangping, Jiang Xiaojun, Liu Jun, Liao Zhongli, Liu Hongfei, Yang Houbin and Li Yong. 2020&. Geological characteristics and prospecting of Bada Cu—Au deposit, Mangkang County, Eastern Tibet. Earth science Frontiers, 27(4): 232~243.

Yang Hang, Wu Peng, Han Runsheng, Jiang Longyan, Tao Qin, Jiang Xiaojun, Guan Shenjin. 2020&. Contrast between the ore-bearing syenite porphyry and metallogenic models of the Laojiezi Pb—Ag and the Baimaju Au (Cu) deposits in the Chuxiong basin, central Yunnan, SW China. Acta. Geologica Sinica, 94(12): 3726~3745.

Yan Qinggao, Jiang Xiaojun, Wu Peng, Sun Huiyi, Guan Shenjin. 2017&. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology and Volcanic Edifice Division of the Laojiezi Intraplate Alkali-rich Volcanic Rocks in Yao'an, Central Yunnan Province. Acta Geologica Sinica, , 91(8): 1743~1759.

Yan Qinggao, Jiang Xiaojun, Li Chao, Zhou Limin, Wang Zhongqiang, SHER Sultan Baig, Qu Wenjun, Du Andao. 2018. Geodynamic

Background of Intracontinental Cenozoic Alkaline Volcanic Rocks in Laojiezi, Western Yangtze Craton: Constraints from Sr—Nd—Hf—O Isotopes. Acta Geologica Sinica—English Edition, 92(6): 2098~2119.

Yan Qinggao, Guo Zhonglin, Li Chao, Jiang Xiaojun, Wang Zhongqiang, Li Yadong. 2019&. Zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology and Hf isotopes of lamprophyre in Gan'gou gold deposit, Yao'an County, Central Yunnan Province. Mineral Deposits, 38(3): 526~540.

Yang Wencai, Qu Chen, Ren Haoran, Huang Lianjie, Xu Yi, Yu Changqing, Liu Xiaoyu. 2019&. The asthenosphere of the Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau and subduction of the Tethys Ocean. Geological Review, 65(3): 521~532.

Zhang Yuquan and Xie Yingwen. 1997#. Geochronology and Nd, sr isotopic characteristics of alkali-rich Intrusions in Ailaoshan—Honghe belt. Science in China (Series D), 27(4): 289~293.

Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Liang Huaying, Qiu Huaning, Li Xianhua and Zhong Sunlin. 1998a&. Petrogenesis Series and the ore-bearing Porphyries of the Yulong Copper Ore Belt in Eastern Tibet. Geochimica, 27(3): 236~243.

Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Qiu Huaning, Li Xianhau. 1998b&. Shoshonitic Series: Sr, Nd, and Pb isotopic Compositions of Ore-bearing Porphyry for Yulong Copper Ore belt in the Eastern Xizang (Tibet). Scientia Geologica Sinica, 33(3): 359~366.

Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Qiu Huaning, Li Xianhua and Zhong Sunlin. 1998c&. Shoshonitic Series; Geochemical Characteristics of Elements for Ore-bearing porphyry from Yulong Copper Ore belt in Eastern Tibet. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 23(6): 557~561.

Ages and geochemical characteristics of zircons from alkali-rich intrusive—volcanic sequence in Bada Cu—Au deposit, eastern Xizang(Tibet)

MENG Huiming^{1, 2)}, LI Wenchang³⁾, LI Chao²⁾, ZHU Xiangping³⁾,
JIANG Xiaojun¹⁾, YANG Fucheng³⁾, YANG Houbin⁴⁾

1) Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technonlogy, Kunming, 650093;

2) National Research Center for Geoanalysis, Beijing, 100037;

3) Chendu Geological Survey Center, China Geological Survey, Chengdu, 610081;

4) Geological and Mineral Exploration Institute of Yunnan Province, Kunming, 650000

Objectives: The Bada Cu—Au deposit, located in the south of the Yulong metallogenic belt, is a newly discovered collision-type porphyry Cu—Au deposit, which has attracted wide attention of geologists because of its unique intraplate tectonic setting and great prospecting potential. However, the systematic data of the formation of this deposit is very limited and the research degree is still low. In particular, there are few studies on the evolution sequence of alkali-rich volcanic—intrusive rocks and their relationship with Cu—Au mineralization and formation age.

Methods: In this paper, we take the alkali-rich volcanic—intrusive complex in Bada Cu—Au deposit as the research object. A total of 25 drilling and fresh outcrop samples were collected, and the whole rock trace analysis were carried out. At the same time, zircon U-Pb geochronology and Sr—Nd—Hf isotopic analysis of tuff, trachyte and fraidronite were also carried out.

Results: Trace elements analysis of the whole rock shows that all samples are enriched in large ion lithophile elements (Rb, Sr, Ba) and light rare earth elements (LREE), and depleted in high field strength elements (Nb, Ta, HF) and heavy rare earth elements (HREE), with weak negative Eu anomaly (0.68~0.88). In addition, the weighted average age of $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ zircons for the tuff, trachyte of the early stage samples and the fraidronite of the late stage samples are 34.47 ± 0.60 Ma, 34.88 ± 0.59 Ma and 34.18 ± 0.53 Ma, respectively. The results of Sr—Nd—Hf isotopic analysis show that the $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ values of the two stage samples range from 0.70629 to 0.70851, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values range from -6.41 to -1.57, and $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range from 0 to 4.4, the two stage model for Hf was 0.72~1.09 Ga.

Conclusions: Based on the detailed field investigation of the alkali-rich volcanic—intrusive complex in the Bada Cu—Au deposit and combined with the results of U-Pb isotope, the complex can be divided into two stages of magmatic events: ① during the early stage of Eocene (34.88 to 34.47 Ma), the alkaline volcanic—intrusive rocks erupted and emplaced; ② the emplacement of the fraidronite in the late Eocene (34.18 Ma). The characteristics of trace elements and Sr—Nd—Hf isotopes indicate that the complex is mainly derived from the partial melting of enriched mantle metasomatism, and is contaminated by a small amount of crustal material. Based on the above characteristics, it is concluded that the alkali-rich volcanic—intrusive complex in the Bada Cu—Au deposit was formed in the post-collision extensional environment of the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau, and the lithospheric delamination is the key mechanism for its formation.

Keywords: zircon U-Pb age; petrological geochemistry; Sr—Nd—Hf isotopic; volcanic—intrusive sequence; Bada Cu—Au deposit

Acknowledgements: The field work was helped by NI Zhi, CHEN Guofeng, HAN Meiliang of Mangkang Branch of Tibet Xikun Mining Limited Company, and YANG Zengqing, SHI Denghua, XIAO Hong of Chongqing 205 Geological team. Sample testing was completed under the guidance of ZHAO Linhao, assistant researcher of the National Geological experiment and testing Center, and SUN Pengcheng, a postgraduate student. I would like to express my sincere thanks for the useful suggestions and valuable suggestions put forward by the reviewers in the process of reviewing the paper

First author: MENG Huiming, male, born in 1996, master, is major in mineralogy, petrology and mineralogy; Email: 2391246318@qq.com

Corresponding author: JIANG Xiaojun, male, born in 1985, associate professor, is mainly engaged in regional geology and geotectonics research and teaching work; Email: cagsjiang@126.com

Manuscript received on: 2021-03-17; **Accepted** on: 2021-06-16; **Network published** on: 2021-06-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.06.131 **Edited by:** LIU Zhiqiang