

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

严清高¹, 郭忠林², 李超³, 江小均¹, 王忠强¹, 李亚东¹

(1 昆明理工大学国土资源工程学院地球科学系, 云南 昆明 650093; 2 云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南 曲靖 655000; 3 中国地质科学院 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘 要 姚安干沟金矿是三江铜金多金属成矿带上的一个重要矿床, 处于金沙江-哀牢山-红河富碱斑岩带中段, 大地构造隶属于扬子板块西缘内部。通过对干沟金矿深部煌斑岩开展锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及 Hf 同位素分析, 结果表明煌斑岩成岩时代为 $(31.12 \pm 0.88) \text{Ma}$, 样品锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\,217 \sim 0.282\,476$, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围变化在 -7.70 到 -18.94 之间。通过与区域同期岩体同位素综合对比分析, 认为姚安干沟金矿床深部煌斑岩起源于交代富集岩石圈地幔的部分熔融与加厚下地壳部分熔融的混合岩浆, 干沟煌斑岩以及区域上北衙、马厂箐等晚期煌斑岩均是对印度-欧亚大陆后碰撞时期岩石圈地幔发生拆沉的响应, 产在应力场环境由压扭挤压向张扭伸展逐渐过渡的动力学背景下, 为杂岩体晚期岩浆活动的产物。

关键词 地球化学; 煌斑岩; 金矿; Hf 同位素; 姚安

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology and Hf isotopes of lamprophyre in Gan'gou gold deposit, Yao'an County, Central Yunnan Province

YAN QingGao¹, GUO ZhongLin², LI Chao³, JIANG XiaoJun¹, WANG ZhongQiang¹ and LI YaDong¹

(1 Department of Earth Sciences, Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 2 Yunnan Chihong Zn & Ge Co., Ltd., Qujing 655000, Yunnan, China; 3 National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China)

Abstract

Located in the middle domain of the Jinshajiang-Ailaoshan-Red River alkaline porphyry belt as well as on the western margin of the Yangtze Block, the Gan'gou gold deposit is an important deposit in the Sanjiang Cu-Au polymetallic ore belt. In this paper, zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating and Hf isotopic analysis of lamprophyre samples collected from the deeper tunnel in the Gan'gou gold deposit were carried out. The results show that the formation age of the lamprophyre is $(31.12 \pm 0.88) \text{Ma}$, and the $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios range from $0.282\,217$ to $0.282\,476$, with $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values varying from -7.70 to -18.94 . Based on these isotopic results and analyses of the lamprophyre from other areas of this region, the authors believe that the lamprophyre of the Gan'gou gold deposit was derived from the mixed magma by partial melting of metasomatic enrichment of lithospheric mantle and thickened lower crust. The regional tectonic geodynamics suggest that the lamprophyre in the Yao'an, Beiya, and Machangqin areas of this region all resulted from both of the delamination of the over-thickened CLM and

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41673060)和国家重点基础研究发展计划(973)项目(编号:2015CB452605)的联合资助

第一作者简介 严清高,男,1995年生,硕士研究生,主要从事区域成矿动力学研究。Email: qinggaoy@126.com

** 通讯作者 江小均,男,1985年生,博士,主要从事沉积学和大地构造学研究。Email: cagsjiang@126.com

收稿日期 2018-09-24;改回日期 2019-02-09。赵海杰编辑。

transition from compressional to extensional setting after the post-collision between the India and Eurasia continents. It was also formed by the later magmatism of the alkaline volcanic-plutonic complex.

Key words: geochemistry, lamprophyre, gold deposit, Hf isotope, Yao'an

煌斑岩是一类具斑状结构的暗色浅成火成岩,常以小规模的岩脉、岩墙等形式产出于不同的大地构造环境中(Rock et al., 1991),成因模式主要包括交代富集地幔部分熔融(Rock et al., 1988)、基性岩浆陆壳混染(Bernard-Griffiths et al., 1991)以及幔源钾镁煌斑岩熔体与壳源硅质熔体的岩浆混合(Prelevic et al., 2004)等。因此,煌斑岩作为研究地幔演化及壳幔相互作用的重要“窗口”,其岩石成因、构造背景以及成岩成矿关系一直倍受中外地质学家的广泛关注。

青藏高原东南缘三江地区,沿金沙江-哀牢山-红河深大断裂带展布了一条延伸千里的新生代高钾富碱侵入岩带(图1),其中富碱斑岩与金、铜等多金属成矿作用有着密切的成因联系,共同组成了金沙江-哀牢山-红河断裂带构造-岩浆-热液成矿带,是中国新生代大规模成矿作用的重要地区和有色金属资源的重要产地(邓军等, 2010; 杨立强等, 2010; 2011)。因此,富碱斑岩岩石成因、构造演化及其成矿作用的研究一直是青藏高原东南缘最受关注的热点。由于煌斑岩对印度-欧亚陆-陆主碰撞后期构造、岩浆演化及其区域成矿机制具有重要意义,近年来该富碱侵入岩带在空间上、时间上与富碱斑岩密切相关的煌斑岩也开始引起学者们的普遍关注(管涛等, 2006; 符德贵等, 2010; 贾丽琼等, 2013; 曹华文等, 2013; 2016; 和文言等, 2014; Chen et al., 2014; 徐恒等, 2015; 陈福川等, 2015; 刘娇等, 2016; 袁和等, 2017; Gan et al., 2017)。滇中姚安富碱杂岩体位于该富碱侵入岩带中段,因其内部发育斑岩岩浆系统老街子浅层低温热液铅、银和深部斑岩型铜铅矿化,岩体接触带及围岩内产出姚安岩浆热液脉型金、铜、铁等多金属矿床,显示出深部及外围具有巨大的找矿潜力。前人主要对姚安杂岩体矿区地质特征(杨宗良等, 2007; 王建飞等, 2016)、岩石地球化学特征(Bi et al., 2002; 2004; Hu et al., 2004; 毕献武等, 2005; 程锦等, 2007; 孙春迪等, 2016; Sun et al., 2017)、富碱斑岩脉与金成矿关系(毕献武等, 2001)、矿床金属赋存状态(葛良胜等, 2002; 2004; 杨宗良等, 2007)、成矿物质来源(葛良胜等, 2002; 江小均等, 2018)、岩浆期次及年代学(李勇等, 2011; Lu et al., 2012; 严清高等,

2017)等方面开展了大量研究,取得了许多重要成果。干沟金矿区深部煌斑岩脉作为姚安富碱杂岩体的重要组成部分,能够反映姚安地区深部构造-岩浆作用过程,为姚安杂岩体的成因演化及动力学背景提供重要证据。然而前人对矿区岩体(脉)的研究多集中在与成矿相关的富碱斑岩及火山岩上,对煌斑岩的研究较为薄弱,仅做过少量年代学及地球化学等方面的研究(Lu et al., 2015)。

本文以姚安干沟金矿深部坑道出露的煌斑岩为研究对象,开展LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素特征和区域内同期岩浆源区对比研究,最终拟精确厘定矿区煌斑岩侵位时代、物质源区特征和岩石成因,并探讨其形成动力学背景,为青藏高原东南缘新生代岩石圈壳幔相互作用和动力学过程研究提供重要支撑。

1 矿区地质背景和岩石学特征

姚安杂岩体位于云南省姚安县文化村-老街子-白马苴-格苴坪村一带,大地构造位置上处于青藏高原东南缘金沙江-哀牢山-红河断裂带东侧约 150 km 扬子板块西缘内部,是金沙江-哀牢山-红河富碱斑岩带的重要组成部分。矿区出露地层包括下白垩统高峰寺组(K_{1g})黄白色-紫红色砂岩夹泥岩及底部砾岩和砂砾岩;下白垩统普昌河组(K_{1p})紫红色泥质粉砂岩夹灰绿色泥岩和砂岩,为矿区主要赋矿围岩;上白垩统马头山组(K_{2m})紫红色泥岩、细粒长石石英砂岩和粉砂岩;上白垩统江底河组(K_{2j})紫色-灰绿色泥岩和细砂岩;新生界渐新统老街子组(E_3l)粗面质火山岩,与同期岩浆杂岩为姚安矿区铅-银-铜-金等多金属矿化就位提供构造-岩性空间;上新统(N_2)为山间盆地砾岩、含煤粉砂岩和砂质泥岩。研究区褶皱构造主要为老街子-格苴坪复式背斜,轴向 NNW 向,断裂主要分为 NNW 向、NWW 向、NE 向和近 EW 向,构造活动具明显多期、多阶段性,其中 NE 向、NNW 向和近 EW 向为该区控岩-控矿断裂,对姚安杂岩体的空间展布起决定性作用(图2)(江小均等, 2018)。根据野外岩体(脉)的压盖-侵位关系,在研究区识别出同期 5 阶段火山-侵入岩事件,第一阶段为似斑状

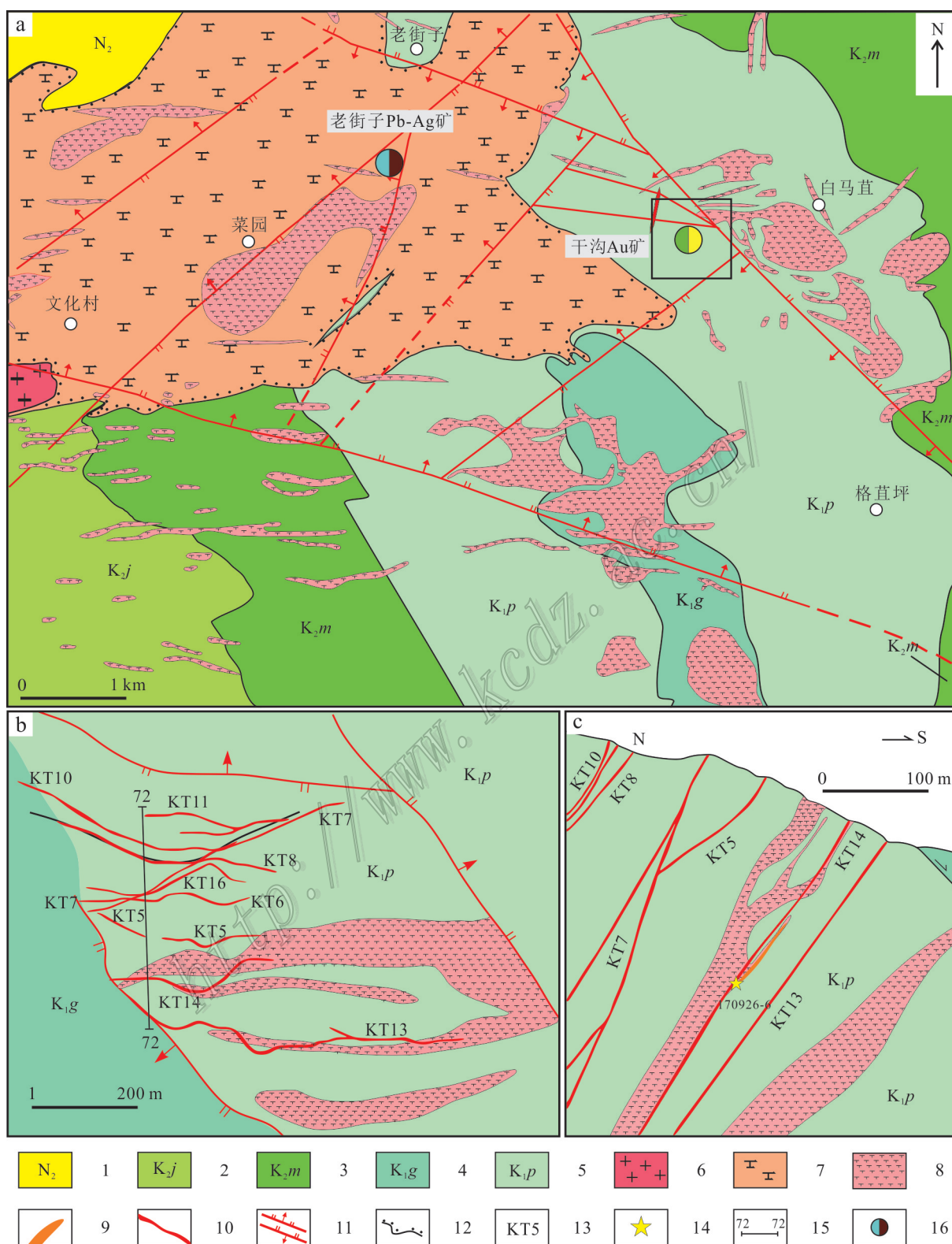


图2 滇中姚安铅-银-金多金属矿床地质简图(a,b)及干沟金矿地质剖面图(c)(b和c据 Zhou et al., 2017 修改)
 1—上新统;2—上白垩统江底河组;3—上白垩统马头山组;4—下白垩统普昌河组;5—下白垩统高峰寺组;6—似斑状花岗岩;
 7—碱性粗面岩;8—正长斑岩;9—煌斑岩;10—矿体;11—断层;12—不整合接触;13—矿体编号;14—取样位置;
 15—剖面线;16—矿床类型及位置

Fig. 2 Geological sketch map of the Yao'an Pb-Ag-Au polymetallic deposit (a, b) and geological section of the Gan'gou gold deposit (c) (b and c modified after Zhou et al., 2017)

1—Pliocene; 2—Jiangdihe Formation of Late Cretaceous; 3—Matoushan Formation of Late Cretaceous; 4—Puchanghe Formation of Early Cretaceous; 5—Gaofengsi Formation of Early Cretaceous; 6—Porphyritic granite; 7—Alkaline trachyte; 8—Syenite porphyry; 9—Lamprophyre; 10—Orebodies; 11—Fault; 12—Unconformity; 13—Orebody number; 14—Sample location; 15—Section line; 16—Location and type of deposit

岩)、河流和湖相(凝灰质砾岩和砂岩),其中,粗面质凝灰岩和熔结凝灰岩显示火山事件发生于 33.63~33.27 Ma(严清高等,2017)。第三阶段为正长斑岩,呈脉状侵位于火山岩层及其他中生代地层内。第四阶段为正长细晶岩,呈细脉状侵位于正长斑岩体内。第五阶段为辉绿岩-煌斑岩等基性脉岩体,少量辉绿岩呈细脉出现在杂岩体外围,而煌斑岩则在全区均有出露,呈脉状侵位于正长斑岩体、火山岩层及中生代粉砂岩地层内。杂岩体锆石 U-Pb 年代学研究显示,富碱火山-侵入杂岩体形成年代为 33.63~31.12 Ma(另文发表)。接触带常见火成岩体与围岩犬牙交错,可见大量明显节理裂隙被后期方解石或石英充填,不同期次岩体间接触带常见冷凝边或角岩化。

姚安杂岩体中煌斑岩主要以脉状呈 NEE 向和 NWW 向 2 组方向展布,侵位于正长斑岩和中生代粉砂岩层内,老街子-干沟矿区均有分布,脉宽 1~4 m,多为 2~3 m,最宽可达 10 m。本次用于锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素研究的煌斑岩采自干沟金矿 KT14 矿

体深部坑道(图 2c),新鲜样品呈灰褐-灰绿色,具典型的煌斑结构,致密块状构造,地表出露煌斑岩风化后呈碎粒状,多显示为黄色或黄黑色。岩石斑晶自形程度较高,主要为暗色矿物角闪石(20%~30%)、单斜辉石(10%~20%)、黑云母(10%~15%)和石英(<5%),粒度约为 0.05~0.4 mm,基质自形程度较差,主要为浅色矿物钾长石(30%~40%)、黑云母(10%~20%)和绿泥石(~10%),副矿物为磷灰石、榍石,其中角闪石、黑云母普遍发生强烈绿泥石化,部分可见被绿泥石不完全交代的残留(图 3)。参照 IUGS 分类方案,本次采集姚安干沟金矿区深部坑道煌斑岩为闪正煌岩。

2 分析方法

煌斑岩锆石挑选在北京锆年领航科技有限公司利用单矿物常规分选技术完成,将通过重选和磁选技术挑出晶形完好,透明度和色泽较好的锆石颗粒粘贴于环氧树脂靶上,然后进行打磨和抛光,使锆石

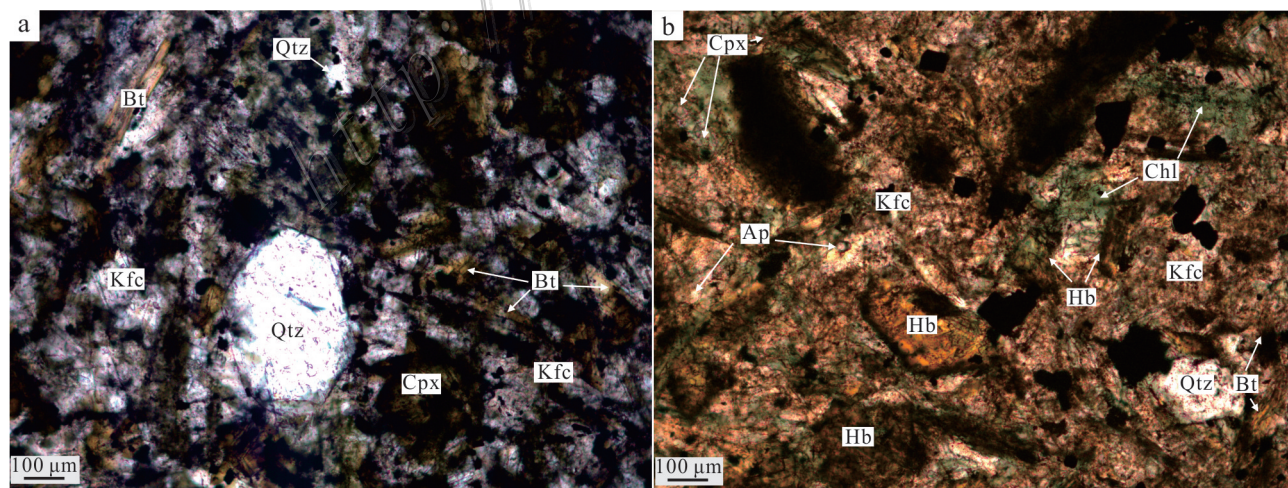


图3 姚安金矿床煌斑岩镜下照片

Qtz—石英;Bt—黑云母;Kfc—钾长石;Cpx—单斜辉石;Chl—绿泥石;Hb—角闪石;Ap—磷灰石

Fig. 3 Microphotographs of the lamprophyres in the Yao'an gold deposit

Qtz—Quartz; Bt—Biobite; Kfc—K-feldspar; Cpx—Clinopyroxene; Chl—Chlorite; Hb—Hornblende; Ap—Apatite

露出新鲜晶面。最后对锆石进行透射光、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定年和Hf同位素分析。

2.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年在国家地质实验测试中心 LA-MC-ICP-MS 实验室完成。分析仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 New-wave UP 213 激光剥蚀系统。测试中以 He 作为载气,能量密度约为 2.5 J/m^2 ,频率为 10 Hz ,束斑 $30 \mu\text{m}$ 。每测试 10 个样品点前后重复 2 组锆石标样 GJ1 对样品进行校正,同时测量一颗锆石 Plesovice 观察仪器运行状态以保证测试精确度,详细仪器分析过程参考侯可军等(2007)。样品分析过程中,监测仪器状态的 Plesovice 锆石标样测试结果为 $(337.2 \pm 2.3) \text{ Ma}$,对应年龄推荐值为 $(337.13 \pm 0.37) \text{ Ma}$ (2σ),两者在误差范围内完全一致,表明仪器测试结果精度较高。实验数据处理采用 ICP MS Data Cal 程序,选取谐和度 95% 以上分析点数据通过 Isoplot 4.0 程序计算获得锆石谐和年龄及加权平均年龄。

2.2 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)上测试,仪器运行条件及详细测试流程参考侯可军等(2007)。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,根据锆石大小,剥蚀直径 $40 \sim 60 \mu\text{m}$ 不等,激光剥蚀点靠近 U-Pb 年龄测定,测试时使用锆石标样 Plesovice 作为参考物质,其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282\,471 \pm 0.000\,006$ (2σ , $n=13$),与文献报道值

(Elhlou et al., 2006)在误差范围内一致。 $\text{Hf}(t)$ 计算采用衰变常数 $\lambda=1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Scherer et al., 2001) $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}=0.032$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0}=0.282\,772$ (Bichert-Toft et al., 1997),亏损地幔模式年龄(T_{DM1})计算采用 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.283\,25$ (Griffin et al., 2000),二阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})计算时,平均地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.015 (Griffin et al., 2002)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

煌斑岩锆石多为浅灰色,少数呈深灰色,颗粒以长柱状和短柱状为主。锆石粒径 $50 \sim 150 \mu\text{m}$,长宽比 $1:1 \sim 3:1$ 。多数锆石内部可见结构清晰的典型单期生长震荡环带且呈短柱状晶形,显示为典型的岩浆锆石(图4)。岩浆锆石通常情况下含有较高的 $w(\text{Th})$ 和 $w(\text{U})$,其 Th/U 值一般大于 0.4 (Hoskin et al., 2003),而变质锆石中 $w(\text{Th})$ 和 $w(\text{U})$ 较低,其 Th/U 值小于 0.1 (Griffin et al., 2004)。11 颗锆石样品的 $w(\text{Th})$ 为 $398.1 \times 10^{-6} \sim 4481 \times 10^{-6}$, $w(\text{U})$ 为 $273.5 \times 10^{-6} \sim 2415 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 $0.54 \sim 2.04$ (表1),进一步证实样品锆石为典型的岩浆锆石。10 颗锆石分析点获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据集中在 $30.10 \sim 34.30 \text{ Ma}$ 之间,所有数据点分布在谐和线附近(谐和度大于 95%),表明这些锆石并未遭受后期明显的热事件影响。所获 10 颗干沟金矿煌斑岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 $(31.22 \pm 0.33) \text{ Ma}$ ($n=10$, MSWD=0.79),与加权平均

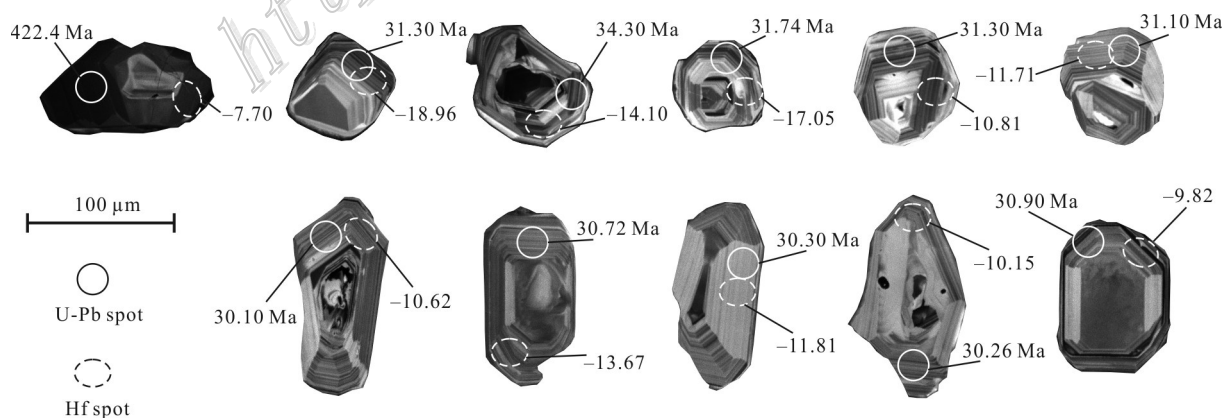


图4 姚安金矿区煌斑岩锆石 CL 图像

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircon with LA-MC-ICP-MS U-Pb and Hf isotope data for the lamprophyres in the Gan'gou gold deposit

表1 姚安金矿床煌斑岩锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄分析结果

Table 1 Results of zircon U-Pb LA-MC-ICP-MS dating for the lamprophyres in the Yao'an gold deposit

点号	$w(B)/\times 10^{-6}$			Th/U	同位素比值					年龄/Ma					谐和度
	U	Th	Pb		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	
1.1	273.5	558.0	23.20	2.04	0.0328	0.0050	0.0049	0.0003	0.0546	0.0090	32.5	4.8	31.30	1.80	96.24%
2.1	2415	4481	200.8	1.86	0.0348	0.0023	0.0053	0.0002	0.0479	0.0034	34.7	2.3	34.30	1.10	98.84%
3.1	1043	1690	76.20	1.62	0.0327	0.0031	0.0049	0.0001	0.0492	0.0048	32.6	3.0	31.74	0.90	97.33%
4.1	1688	908.0	557.0	0.54	0.5110	0.0130	0.0677	0.0016	0.0551	0.0012	418	8.5	422.4	9.50	98.98%
5.1	1072	1401	71.50	1.31	0.0319	0.0024	0.0047	0.0001	0.0502	0.0038	31.7	2.3	30.26	0.91	95.35%
6.1	1070	1760	104.0	1.64	0.0321	0.0029	0.0048	0.0002	0.0489	0.0048	32.0	2.9	30.90	1.20	96.50%
7.1	1920	1452	96.30	0.76	0.0305	0.0042	0.0049	0.0003	0.0474	0.0067	30.4	4.2	31.30	2.10	97.08%
8.1	1159	1064	64.10	0.92	0.0316	0.0025	0.0048	0.0002	0.0490	0.0041	31.5	2.4	31.10	1.00	98.72%
9.1	1173	1200	71.00	1.02	0.0313	0.0029	0.0047	0.0002	0.0489	0.0046	31.2	2.9	30.10	1.00	96.41%
10.1	942.0	937.0	56.40	0.99	0.0322	0.0028	0.0048	0.0002	0.0495	0.0043	32.1	2.8	30.72	0.98	95.61%
11.1	737.0	398.1	28.60	0.54	0.0289	0.0028	0.0047	0.0002	0.0471	0.0049	28.8	2.8	30.30	1.00	94.92%

年龄(31.12±0.88)Ma($n=10$, MSWD=1.3)误差范围内一致(图5),代表了煌斑岩的结晶年龄。其中一颗深灰色锆石分带不明显且所测年龄较老(422.4 Ma),可能为煌斑岩岩浆侵位时的捕获锆石。

3.2 锆石 Hf 同位素

在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年基础上,对相同锆石颗粒进行了 Hf 同位素组成原位分析,详细分析结果见表 2 及图 4。锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值在 0.000 528~0.001 250 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 的累积,所测 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值可代表岩石形成时体系的 Hf 同位素组成(吴福元

等,2007)。11 个测试点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值范围为 0.282 217~0.282 476,平均值为 0.282 381,根据相同锆石获得的原位年龄校正计算,捕获锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值较大,为 -7.70,对应二阶段模式年龄为 1681 Ma,其余结晶锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -9.82~-18.94,对应二阶段模式年龄为 1487~1981 Ma。

4 讨论

4.1 岩浆活动时代

姚安杂岩体远离金沙江-哀牢山-红河断裂带,位

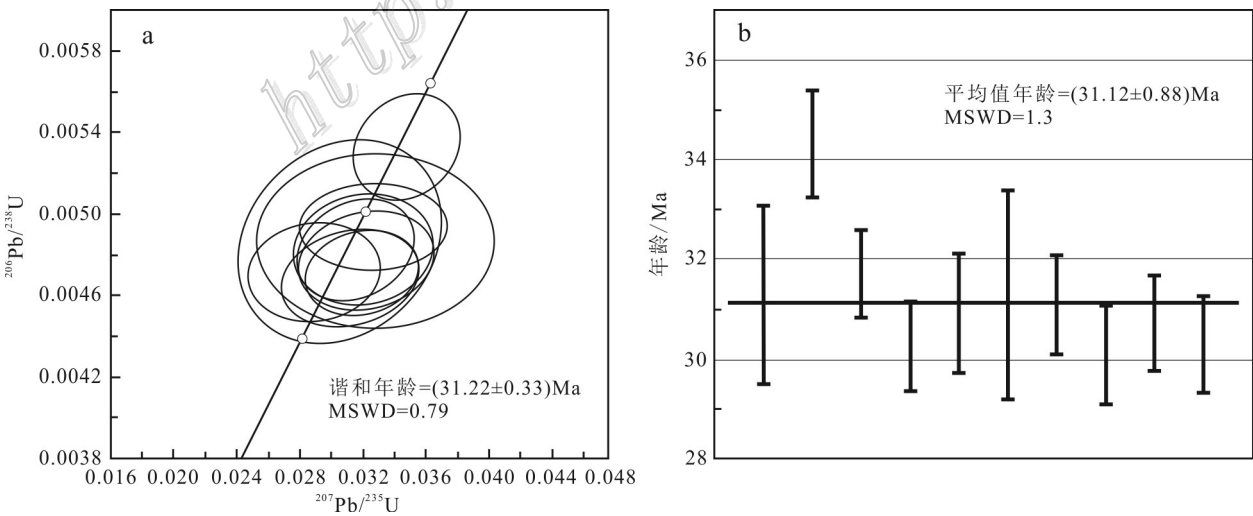


图5 姚安金矿床煌斑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和加权平均年龄图(b)

Fig. 5 U-Pb concordia diagram (a) and weighted average age diagram (b) for the lamprophyres in the Yao'an gold deposit

表 2 姚安金矿床煌斑岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 2 The analytical results of zircon Hf isotope for the lamprophyres in the Yao'an gold deposit

点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	t_{Ma}	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM}/Ma	$t_{\text{DM}}^c/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1.1	0.019793	0.000583	0.282217	0.000026	31.30	-18.96	1444	1981	-0.98
2.1	0.045479	0.001250	0.282353	0.000026	34.30	-14.10	1278	1721	-0.96
3.1	0.030776	0.000902	0.282271	0.000028	31.74	-17.05	1381	1878	-0.97
4.1	0.016593	0.000528	0.282296	0.000025	422.4	-7.70	1333	1681	-0.98
5.1	0.018631	0.000561	0.282467	0.000025	30.26	-10.15	1098	1504	-0.98
6.1	0.036044	0.001084	0.282476	0.000025	30.90	-9.82	1100	1487	-0.97
7.1	0.024589	0.000648	0.282447	0.000027	31.30	-10.81	1127	1541	-0.98
8.1	0.021513	0.000586	0.282422	0.000031	31.10	-11.71	1160	1590	-0.98
9.1	0.032297	0.000912	0.282453	0.000026	30.10	-10.62	1126	1530	-0.97
10.1	0.025850	0.000712	0.282367	0.000034	30.78	-13.67	1241	1695	-0.98
11.1	0.030632	0.000868	0.282420	0.000033	30.30	-11.81	1172	1594	-0.97

于稳定扬子板块内部,产出一系列与富碱斑岩相关的 Pb-Ag-Cu-Au 多金属矿床,其独特的稳定板块内部大地构造位置及矿床学价值吸引了广大地质学者的普遍关注。杂岩体各阶段年龄的精确厘定对于姚安富碱火山-侵入杂岩体(脉)时空演化序列及成岩-成矿机制研究具有重要意义,前人已对姚安杂岩体侵位时代开展了大量研究(表 3)。张玉泉等(1997)首次报道了姚安文化村粗面斑岩黑云母 K-Ar 年龄

为 $(33.5 \pm 1.9)\text{Ma}$, 毕献武等(2005)和程锦等(2007)先后对姚安老街子-白马苴-文化村一带产出的正长斑岩、花岗斑岩和粗面岩进行了角闪石、钾长石、黑云母的 K-Ar 和 Ar-Ar 测年工作,显示结晶年龄为 $28.9 \sim 34.9\text{Ma}$,李勇等(2011)对姚安文化村黑云母角闪正长斑岩和黑云母二长斑岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,分别获得 $(36.86 \pm 0.63)\text{Ma}$ 和 $(31.8 \pm 2.6)\text{Ma}$ 的同位素年龄。前期获得的年龄数据范围

表 3 姚安富碱火山-侵入杂岩体同位素年代学统计表

Table 3 The data of isotopic age for the Yao'an alkaline volcanic-plutonic complex

位置	岩石类型	测试对象	测试方法	年龄/Ma	资料来源
文化村	粗面斑岩	黑云母	K-Ar	33.5 ± 1.9	张玉泉等,1997
	粗面岩	黑云母	K-Ar	34.6 ± 1.0	程锦等,2007
	粗面岩	黑云母	K-Ar	33.5 ± 1.0	程锦等,2007
	黑云母角闪正长斑岩	锆石	LA-ICP-MS	36.86 ± 0.63	李勇等,2011
	黑云母二长斑岩	锆石	LA-ICP-MS	31.8 ± 2.6	李勇等,2011
老街子	正长岩	钾长石	K-Ar	34.9 ± 2.2	程锦等,2007
	碱性花岗斑岩	钾长石	K-Ar	31.3 ± 2.6	程锦等,2007
	假白榴石斑岩	锆石	LA-ICP-MS	34.1 ± 0.3	Sun et al.,2017
	粗面质凝灰岩	锆石	SHRIMP	33.63 ± 0.50	严清高等,2017
	熔积凝灰岩	锆石	SHRIMP	33.27 ± 0.38	严清高等,2017
	煌斑岩	云母	Ar-Ar	33.7 ± 0.5	Lu et al.,2015
白马苴	正长斑岩	角闪石	Ar-Ar	28.9 ± 0.1	毕献武等,2005
	正长斑岩	钾长石	K-Ar	34.7 ± 1.9	程锦等,2007
	正长斑岩	锆石	(U-Th)/He	33.4 ± 1.6	Lu et al.,2013a
	正长斑岩	钾长石	K-Ar	34.0 ± 2.0	程锦等,2007
干沟	石英二长斑岩	锆石	SHRIMP	33.4 ± 0.3	Lu et al.,2012
	正长斑岩	锆石	LA-ICP-MS	32.8 ± 0.3	Zhou et al.,2017
	含金赤铁矿	独居石	SIMS U-Pb	$31.7 \sim 30.2$	Zhou et al.,2017
	煌斑岩	锆石	LA-ICP-MS	31.22 ± 0.33	本文

跨度较大且 K-Ar 或 Ar-Ar 年龄并不是微区测试所得,其年龄很可能受到后期蚀变的影响。近年来,随着微区测试技术的发展,越来越多关于姚安杂岩体的高精度年龄被报道出来,姚安老街子-文化村一带产出的正长斑岩、煌斑岩以及粗面火山岩等形成时代大致集中于 33~34 Ma (Lu et al., 2012; 2015; Sun et al., 2017; 严清高等, 2017; Yan et al., 2018), 这与 Zhou 等 (2017) 对干沟金矿正长斑岩获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄一致。野外多期次岩体(脉)的侵位关系以及前人大量年龄数据的报道表明滇中姚安地区在始新世时期较短时间内发生了多期岩浆侵位和火山喷发事件,共同形成了姚安富碱火山-侵入杂岩体。

干沟煌斑岩作为姚安杂岩体重要组成部分,本文对其开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年工作,获得煌斑岩谐和年龄为 (31.22 ± 0.33) Ma, 与加权平均年龄 (31.12 ± 0.88) Ma 在误差范围内一致,代表了煌斑岩结晶年龄。结合野外煌斑岩呈细脉状穿插于正长斑岩体内,进一步证实了煌斑岩为晚期岩浆活动的产物。值得指出的是,马厂箐复式杂岩体由岩株、岩脉、岩墙或岩床状产出的浅色斑状花岗岩、似斑状花岗岩、正长斑岩、石英二长斑岩和花岗斑岩等岩体组成,其中根据煌斑岩与矿体的穿插关系分为早期煌斑岩和晚期煌斑岩,晚期煌斑岩年龄为 (33.77 ± 0.11) Ma (贾丽琼等, 2013)。北衙矿区岩浆活动频繁,基性、中性、酸性均有出露。喜马拉雅期主要为中酸性富碱斑岩侵入体,也有喷出和溢流相的苦橄玄武岩、橄榄玄武岩、钾质碱性岩出露(和文言等, 2013)。煌斑岩在区内呈带状分布,分为成矿前期煌斑岩和成矿后期煌斑岩,成矿后期煌斑岩年龄为 (34.96 ± 0.66) Ma (和文言等, 2014)。可见,马厂箐、北衙以及姚安等杂岩体均出现了以煌斑岩为典型代表的晚期岩浆活动。姚安杂岩体多期次岩浆活动特点与马厂箐、北衙以及三江地区其他复式岩体具有的多期次侵入特征相同(张玉泉等, 1997; Liang et al., 2004; 2007; 毕献武等, 2005; Lu et al., 2012; Yan et al., 出版中),指示该区域岩浆活动具有相同的大地构造背景,即印度-欧亚大陆主碰撞构造演化期,青藏高原东南缘在侧向挤压背景下,岩石圈整体挤压收缩,造成陆壳岩石圈的缩短加厚;至后碰撞构造转换阶段,三江地区作为吸收和调节大陆碰撞应变的侧向碰撞带,应力场环境由压扭挤压向张扭伸展逐渐过渡。

4.2 源区性质

不同地球化学端员的 Hf 同位素组成一般不同,球粒陨石和亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值较大 (≥ 0.282772), 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大于零;而地壳物质或不同类型富集岩石圈地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值较小,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值(吴福元等, 2007)。本文对姚安金矿区煌斑岩开展 LA-ICP-MS 锆石 Hf 同位素研究,结果显示样品 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282217 \sim 0.282476$, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围变化在 $-7.70 \sim -18.94$ 之间,所有锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均小于零,表明煌斑岩并不是由纯地幔物质形成。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ (图 6a、b) 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}-t$ 图解(图 6c、d) 上,数据点均落在球粒陨石演化线之下,但其值域变化范围较大,数据点分散于下地壳与球粒陨石区域(图 6a、c),显示了富集地幔与下地壳混合特征。

众所周知,煌斑岩类等基性岩浆岩,其物质来源较深。前人对扬子板块边缘的马厂箐、北衙等 Cu-Au 多金属矿床内产出的煌斑岩进行 Hf 同位素研究,结果显示北衙煌斑岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要落在球粒陨石演化线之下,而马厂箐煌斑岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大多大于零(图 6b), 两者数据点均在球粒陨石演化线附近且 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值相对较集中,综合研究认为北衙和马厂箐煌斑岩起源于受俯冲板片交代富集的岩石圈地幔部分熔融(贾丽琼等, 2013; 和文言等, 2013; Lu et al., 2015)。而处于扬子板块内部,远离金沙江-哀牢山断裂带的姚安地区,煌斑岩显示了更负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,如果同样认为起源于单一的交代岩石圈地幔的部分熔融,则煌斑岩显示较大的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值域变化范围无法得到合理的解释。另外锆石阴极发光(CL)图像显示出明显的岩浆生长环带,且少量锆石可见继承核(图 4),年龄结果也显示 422 Ma 的古老年龄(表 1, 图 4),反映了地壳物质的混入。

另外,江小均等(2018)利用硫化物 Re-Os 同位素测试手段对姚安老街子 Pb-Ag 多金属矿床成矿物质来源进行示踪,认为该区金属成矿物质主要来源于壳幔相互作用而成的岩浆。Yan 等(2018)对老街子富碱火山岩开展锆石 Hf-O 和全岩 Sr-Nd 同位素地球化学研究,认为岩浆物质来源于加厚下地壳的部分熔融及少量岩石圈地幔和表壳物质的混入,值得注意的是,煌斑岩与成矿密切相关的火山岩(Yan et al., 2018)以及富碱正长斑岩(待发表)具有相同的 Hf 同位素组成特征(图 6b、d),指示煌斑岩与正长斑岩等富碱侵入岩体具有相似的源区性质。

基于以上分析,笔者认为姚安干沟金矿床深部

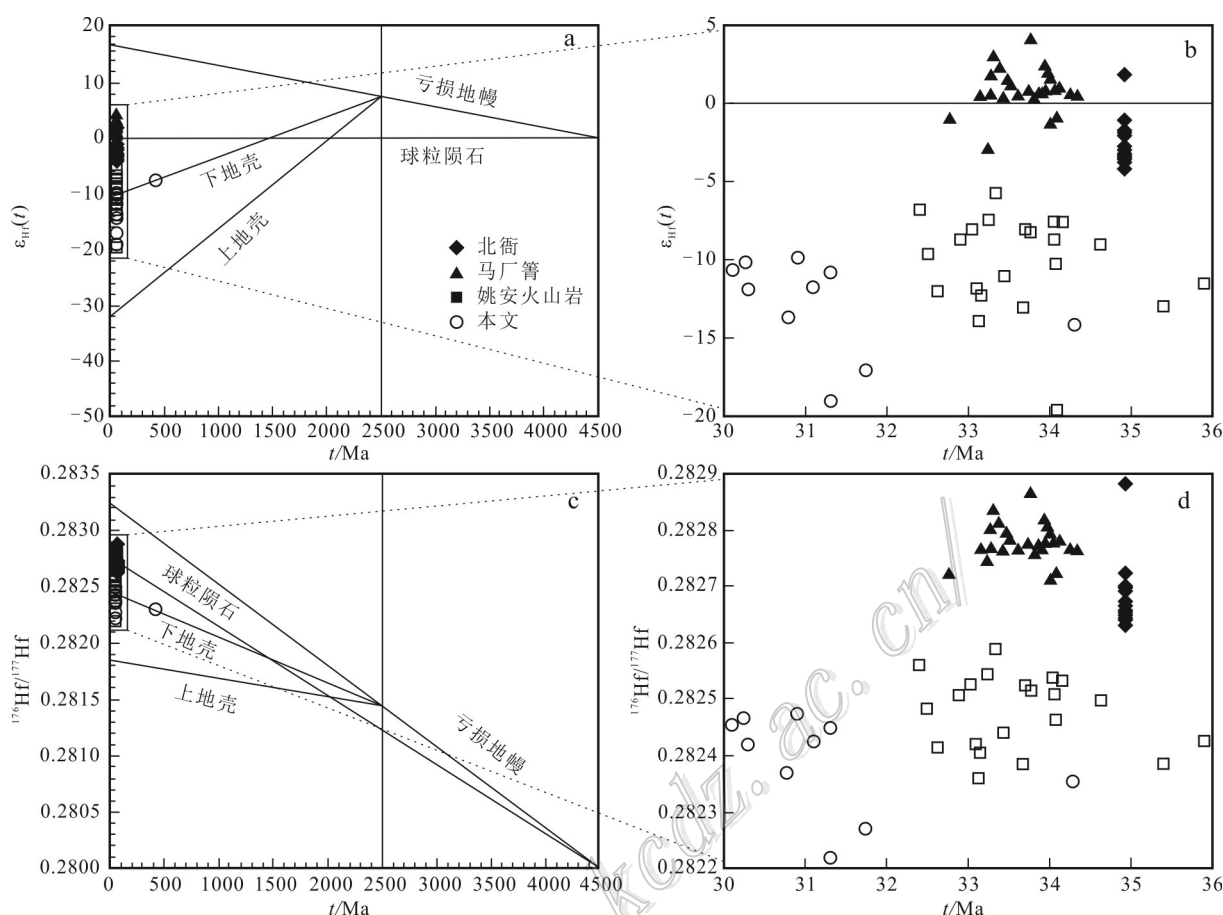


图6 姚安干沟金矿区煌斑岩锆石 Hf 同位素组成特征(北衙、马厂箐数据引自和文言等,2014;贾丽琼等,2013,姚安火山岩数据引自 Yan et al.,2018)

Fig. 6 Zircon Hf isotopic compositions for the lamprophyres in the Gan'gou gold deposit in Yao'an (Hf isotopic data of Beiya and Machangqing after He et al., 2014; Jia et al., 2013, data of Yao'an volcanic rocks after Yan et al., 2018)

煌斑岩的岩石成因可能为交代岩石圈地幔部分熔融,产生铁镁质基性岩浆,即煌斑岩母岩浆,随后,基性熔体在壳-幔边界聚集演化并进一步熔融扬子板块加厚下地壳物质,进而形成兼具壳-幔混源特征的碱性玄武质岩浆,岩浆在快速上升过程中,混染了少部分地壳物质。

4.3 构造环境及成因机制

一直以来,关于青藏高原东南缘金沙江-哀牢山-红河富碱斑岩带的物质来源及其动力学背景存在争议。前人提出与印度大陆向东俯冲相关的“大陆俯冲”模型(Wang et al., 2001),大规模走滑断裂诱发“岛弧型”地幔部分熔融模型(Wang et al., 2001),古特提斯洋俯冲交代富集地幔部分熔融模型(毕献武等,2015),岩石圈地幔受软流圈物质对流减薄模型(Lu et al., 2013a; 2013b)以及交代岩石圈地幔“拆

沉”模型等(Lu et al., 2015; Deng et al., 2014; 2015)。金沙江-哀牢山-红河钾质-超钾质富碱斑岩带北段侵位时间大多为43~37 Ma,而中段侵位时间大致集中在37~32 Ma之间,年龄显示早于哀牢山-红河断裂带同剪切淡色花岗岩体侵位时间(30~23 Ma, Lu et al., 2012),而与同剪切年龄相近或稍晚的侵入岩体大多出于该富碱斑岩带南段(Deng et al., 2014)。另外,新生代富碱火山-岩浆杂岩体不仅发育在主断裂带的次级断裂构造中,而且在稳定板块内部也呈面状分布(图1)。因此,提出的构造模型不仅要解释区域上侵位年龄相近或同时代产生的富碱岩体,而且还需兼顾远离断裂带呈面状展布的板内富碱岩体的形成机制。

扬子克拉通在元古代受到南北双向俯冲作用并使底部岩石圈地幔发生交代富集(Wang et al., 2009;

Lu et al., 2015), 而新元古代至晚三叠世(700~220 Ma), 扬子板块西缘以沉积碳酸盐岩和页岩为特征, 显示该时期扬子克拉通作为被动大陆边缘并未受到洋壳板块俯冲作用影响(Metcalf, 2006; Pullen et al., 2008)。自晚三叠世, 扬子板块与思茅地块完成拼接, 形成金沙江缝合带。新生代以来(约65 Ma), 该区遭受了印度-欧亚板块陆-陆碰撞, 伴随构造平衡及应力释放, 导致大幅度的岩石圈缩短加厚及金沙江-哀牢山-红河断裂带和扬子西缘小江断裂带发生大规模的左行走滑-挤压剪切作用, 产生了一系列构造-岩浆-变质岩带, 并伴随着大规模Cu-Au-Pb-Zn等多金属成矿作用(侯增谦等, 2006; 任纪舜等, 2013; Li et al., 2016)。回溯扬子克拉通构造演化史, 并未有古特提斯洋壳板块俯冲至扬子克拉通内部交代岩石圈地幔的岩石记录, 同时本次煌斑岩锆石Hf二阶段模式年龄集中在1.4~1.9 Ga, 再次证实岩石圈地幔交代富集作用发生在中元古代至古元古代。新生代钾质-超钾质钙碱性火山-侵入岩不仅局限在金沙江-哀牢山-红河断裂带区域, 而且大量岩体同样出露于扬子板块内部、思茅地块、保山地块、甚至呈面状展布于拉萨-腾冲地块(图1), 因此加厚岩石圈地幔拆沉模型可能更合理地解释该区域大范围发生的新生代火山-岩浆活动, 地球物理资料也证实该区新生代以来存在着软流圈地幔物质的上涌(Lei et al., 2009)。值得指出的是, 本次研究的煌斑岩以及区域上广泛发育的煌斑岩和铁镁质火山岩主要源于交代富集的岩石圈地幔(和文言等, 2014; Xu et al., 2007; 贾丽琼等, 2013; Chen et al., 2014; Guan et al., 2005; Li et al., 2008; Lu et al., 2015), 暗示了岩石圈地幔并未完全发生剥离。

因此, 对于姚安干沟金矿煌斑岩的成因机制, 本文认为自新生代以来特别是进入始新世后, 随着印度-欧亚大陆持续地碰撞, 加剧该区岩石圈增厚。岩石圈块体受热和变形, 其重力不稳定性增加。为了调节重力异常, 加厚岩石圈地幔底部发生拆沉, 导致软流圈物质上涌, 致使残余的元古代交代富集的岩石圈地幔部分熔融, 产生基性岩浆, 即煌斑岩母岩浆, 岩浆沿构造薄弱带底侵至莫霍面, 混合了加厚下地壳部分熔融岩浆。由于印度-欧亚大陆后碰撞时期, 应力场从压扭向张扭逐渐过渡, 转换期间应力的松弛形成了足够压力梯度的减压带, 诱发了壳-幔混合带岩浆的上侵, 快速上侵过程中, 混染了少量陆壳物质, 并呈脉状侵位至姚安老街子-干

沟一带, 形成姚安富碱火山-侵入杂岩体晚期煌斑岩。

5 结 论

(1) 姚安干沟金矿煌斑岩锆石U-Pb谐和年龄为 (31.22 ± 0.33) Ma, 与加权平均年龄 (31.12 ± 0.88) Ma误差范围内一致, 表明煌斑岩为姚安富碱火山-侵入杂岩体晚期岩浆活动的产物。

(2) 煌斑岩锆石Hf同位素组成显示 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282 217~0.282 476, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围变化在-7.70到-18.94之间, 较大的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值域范围指示煌斑岩物质来源可能为岩石圈地幔的部分熔融及加厚下地壳部分熔融的混合岩浆。

(3) 岩浆形成于扬子板块内部伸展背景下, 岩石圈地幔拆沉导致大规模软流圈物质上涌, 致使残余岩石圈地幔部分熔融, 产生基性煌斑岩母岩浆, 岩浆沿构造薄弱带底侵至莫霍面与加厚下地壳部分熔融岩浆混合。随着印度-欧亚大陆的持续挤压, 扬子板块内部应力场从压扭向张扭逐渐过渡期间, 诱发了壳-幔混合带岩浆的快速上侵, 并混染了少量陆壳物质, 形成了姚安干沟金矿区煌斑岩。

致 谢 本文在野外采样过程中得到姚安飞龙矿业公司姜龙燕总工程师支持与帮助, 锆石U-Pb定年及Hf同位素实验过程中得到国家地质实验测试中心赵令浩老师的帮助, 论文成文过程中得到国家地质实验测试中心周利敏老师的指导, 审稿人的修改意见对文章质量的提升起到了积极作用, 在此一并表示真诚谢意!

References

- Bernard-Griffiths J, Fourcade S and Dupuy C. 1991. Isotopic study (Sr, Nd, O and C) of lamprophyres and associated dykes from Tamazert (Morocco): Crustal contamination processes and source characteristics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 103 (1-4): 190-199.
- Bi X W, Cornell D H and Hu R Z. 2002. REE composition of primary and altered feldspar from the mineralized alteration zone of alkaline intrusive rocks, western Yunnan Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 19(1): 69-78.
- Bi X W, Hu R Z and Cornell D H. 2004. The alkaline porphyry associated Yao'an gold deposit, Yunnan, China: Rare earth element and sta-

- ble isotope evidence for magmatic-hydrothermal ore formation[J]. *Mineralium Deposita*, 39(1): 21-30.
- Bi X W, Hu R Z and Cornel D H. 2001. Trace element and isotope evidence for the evolution of ore-formation fluid of Yao'an gold deposit, Yunnan Province, China[J]. *Geochemica*, 30(3): 264-272(in Chinese with English abstract).
- Bi X W, Hu R Z, Pen J T, Wu K X, Su W C and Zhan X Z. 2005. Geochemical characteristics of the Yao'an and Machangqing alkaline-rich intrusions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (1): 113-124(in Chinese with English abstract).
- Blichert-Toft J, Chauvel C and Albarede F. 1997. Separation of Hf and Lu for high-precision isotope analysis of rock samples by magnetic sector-multiple collector ICP-MS[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 127: 248-260.
- Cao H W, Zhang S T, Wang C M, Song X, Lin J Z and Li D. 2013. Geochemical characteristics and genesis of lamprophyres in Gejiu tin deposit, Yunnan Province, China[J]. *Geochemica*, 42 (4): 340-351(in Chinese with English abstract).
- Cao H W, Pei Q M, Zhang S T, Wang C M, Wang G K and Wang L. 2016. Mineralogical characteristics, zircon U-Pb and biotite ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of potassic lamprophyres in the Gejiu tin deposit, Yunnan Province[J]. *Geochimica*, 45 (6): 545-568(in Chinese with English abstract).
- Chen F C, Wang Q F, Li G J and Zhao Y. 2015. ^{40}Ar - ^{39}Ar chronological and geochemical characteristics of Zhenyuan lamprophyres in Ailaoshan belt, western Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (11): 3203-3216(in Chinese with English abstract).
- Chen Y H, Yao S Z and Pan Y M. 2014. Geochemistry of lamprophyres at the Daping gold deposit, Yunnan Province, China: Constraints on the timing of gold mineralization and evidence for mantle convection in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 93(2): 129-145.
- Cheng J, Xia B and Zhang Y Q. 2007. Petrological and geochemical characteristics of Yao'an alkaline complex in Yunnan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 118-125(in Chinese with English abstract).
- Deng J, Hou Z Q, Mo X X, Yang L Q, Wang Q F and Wang C M. 2010. Superimposed orogenesis and metallogenesis in Sanjiang Tethys[J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 37-42(in Chinese with English abstract).
- Deng J, Wang Q F, Li G J, Li C S and Wang C M. 2014. Tethys evolution and spatial temporal distribution of ore deposits in the Sanjiang region, SW China[J]. *Gondwana Research*, 26(2): 419-437.
- Deng J, Wang Q F, Li G J and Zhao Y. 2015. Structural control and genesis of the Oligocene Zhenyuan orogenic gold deposit, SW China[J]. *Ore Geology Review*, 65: 42-54.
- Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, Pearson N J, O'Reilly S Y. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: (18-suppl-S).
- Fu D G, Zhou Y M, Zhang C Q, Chen Q G and Qin X P. 2010. Geological characteristics of lamprophyres and their relations with gold mineralization of the Xiaoshuijing gold deposit in central Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 46 (3): 414-425(in Chinese with English abstract).
- Gan T and Huang Z L. 2017. Platinum-group element and Re-Os geochemistry of lamprophyres in the Zhenyuan gold deposit, Yunnan Province, China: Implications for petrogenesis and mantle evolution[J]. *Lithos*, (282-283): 228-239.
- Ge L S, Guo X D, Zou Y L, Yang J H and Li Y J. 2002. Geology and genesis of the Yao'an gold deposit related to alkali-rich magmatic rock in Yunnan Province[J]. *Geology and Resources*, 11(1): 29-37 (in Chinese with English abstract).
- Ge L S, Zou Y L, Xing J B, Wang Z H and Guo X D. 2004. Gold mineralization system related to alkali-rich porphyries in Himalayan, the northwestern part of Yunnan[J]. *Gold Geology*, 10(1): 39-47 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W J, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, Achterbergh E V, O'Reilly S Y and Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147.
- Griffin W J, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu, X S and Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3-4): 237-269.
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, Pearson N J and O'Reilly S Y. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 131(3-4): 231-282.
- Guan T, Huang Z L, Cheng X, Zhang Z L, Yan Z F and Shen B J. 2005. REE geochemistry of lamprophyres in Baimazhai nickel deposit, Yunnan Province, China: Implication for the mantle source region[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 24 (3): 273-279.
- Guan T, Huang Z L, Xu C, Zhang Z L, Yan Z F and Chen M. 2006. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating and geochemical characteristics of lamprophyres in the Baimazhai nickel deposit, Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 873-883(in Chinese with English abstract).
- He W Y, Mo X X, Yu X H, Dong G C, He Z H, Huang X F, Li X W and Jiang L L. 2014. Genesis and geodynamic settings of lamprophyres from Beiya, western Yunnan: Constraints from geochemistry, geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (11): 3287-3300(in Chinese with English abstract).
- He W Y, Mo X X, Yu X H, He Z H, Dong G C, Liu X B, Su G S and Huang X F. 2013. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the Beiya gold-polymetallic deposit in the western Yunnan Province and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1301-1310(in Chinese with English abstract).
- Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27-62.

- Hou K J, Li Y H, Zou T R, Qu X M, Shi Y R and Xie G Q. 2007. Laser ablation MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595-2604(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Pan G T, Wang A J, Mo X X, Tian S H, Sun X M, Ding L, Wang E Q, Gao Y F, Xie Y L, Zeng P S, Qin K Z, Xu J F, Qu X M, Yang Z M, Yang Z S, Fei H C, Meng X J and Li Z Q. 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(5): 521-543(in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Burnard, P.G., Bi X W, Zhou M F, Pen J T, Su W C and Wu K X. 2004. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jinshajiang fault belt, SW China[J]. *Chemical Geology*, 203(3): 305-317.
- Jia L Q, Mo X X, Dong G C, Xu W Y, Wang L, Guo X D, Wang Z H and Wei S G. 2013. Genesis of lamprophyres from Machangqing, western Yunnan: Constraints from geochemistry, geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (4): 1247-1260(in Chinese with English abstract).
- Jiang X J, Yan Q G, Li W C, Li C, Wu P, Guan S J, Yu H J and Li J L. 2018. The metallogenic age and geodynamic setting of the Laojiezi Pb-Ag polymetallic deposit, central Yunnan Province: Evidence from Re-Os isotope of sulfides[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92 (6): 1280-1296(in Chinese with English abstract).
- Lei J S, Zhao D P and Su Y J. 2009. Insight into the origin of the Tengchong intraplate volcano and seismotectonics in southwest China from local and teleseismic data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 114: B05302.
- Li B, Huang Z L, Guan T and Ding W. 2008. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of lamprophyre dykes in the Baimazhai nickel deposit, Yunnan Province, China, and its geological significance[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 27 (4): 351-355.
- Li W C, Wang J H, He Z H and Dou S. 2016. Formation of Au-polymetallic ore deposits in alkaline porphyries at Beiya, Yunnan, Southwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 73: 241-252.
- Li Y, Mo X X, Yu X H, Huang X K and He W Y. 2011. Zircon U-Pb Dating of several selected alkali-rich porphyries from the Jinshajiang-Ailaoshan fault zone and geological significance[J]. *Geoscience*, 25(2): 189-200(in Chinese with English abstract).
- Liang H Y, Xie Y W, Zhang Y Q and Campbell, I. 2004. The potassic alkaline intrusions constrain the copper mineralization: Case study from Machangqing copper deposit[J]. *Progress in Natural Sciences*, 14(1): 116-120.
- Liang H Y, Campbell I.H, Allen C.M, Sun W D, Yu H X, Xie Y W and Zhang Y Q, 2007. The age of potassic alkaline igneous rocks along the Ailao Shan-Red River shear zone: Implications for the onset age of left-lateral shearing[J]. *Journal of Geology*, 115: 231-242.
- Liu J, Zhou Y, Xie D G, Ji X X and Li D W. 2016. Geochronology, geochemistry and geological implications of the lamprophyre in Jianshui, East Yunnan Province[J]. *Geology in China*, 43(6): 1977-1991(in Chinese with English abstract).
- Lu Y J, Robert K, Peter A, Cawood T, Campbell M, Craig J R H, Li Z X, Hou Z Q and Leon B. 2012. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of potassic felsic intrusions in western Yunnan, SW China: Constraints on the relationship of magmatism to the Jinsha suture[J]. *Gondwana Research*, 22(2): 737-747.
- Lu Y J, Robert K, Anthony I S K, Campbell M, Hou Z Q, Craig J R H, Li Z X, Peter A C, Leon B, Yang Z M, Cliff F, Elena A B, Jourdan F and Noreen J E. 2013a. Intracontinental Eocene-Oligocene porphyry Cu mineral systems of Yunnan, western Yangtze Craton, China: Compositional characteristics, sources, and implication for continental collision metallogeny[J]. *Econ. Geol.*, 108(7): 1541-1576.
- Lu Y J, Robert K T, Campbell M, Li Z X, Craig J R H, Peter A C, Hou Z Q, Leon B, Cliff J, Elena A B and Tang S H. 2013b. Geochemical, Sr-Nd-Pb, and Zircon Hf-O isotopic compositions of Eocene-Oligocene shoshonitic and potassic adakite-like felsic intrusions in western Yunnan, SW China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Journal of Petrology*, 54 (7): 1309-1348.
- Lu Y J, Campbell M C T, Li Z X, Jourdan F, Craig J.R.H, Hou Z Q, Tang S H, 2015. Paleogene post-collisional lamprophyres in western Yunnan, western Yangtze Craton: Mantle source and tectonic implications[J]. *Lithos*, 233: 139-161.
- Metcalfe I. 2006. Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: the Korean peninsula in context [J]. *Gondwana Research*, 9(1): 24-46.
- Prelevic D, Foley S F, Cvetkovi V and Romer R L. 2004. Origin of minette by mixing of lamproite and dacite magmas in Velike Majdan, Serbia[J]. *Journal of Petrology*, 45(4): 759-792.
- Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, Vervoort J D and Ding L. 2008. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleo-Tethys ocean[J]. *Geology*, 36(5): 351-354.
- Ren J S, Niu B G, Wang J, He Z J, Jin X C, Xie L Z, Zhao L, Liu R Y, Jiang X J, Li S and Yang F L. 2013. 1:5 Million international geological map of asia[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34 (1): 24-30(in Chinese with English abstract).
- Rock N M S and Groves D I. 1988. Can lamprophyres resolve the genetic controversy over mesothermal gold deposits?[J]. *Geology*, 16 (6): 538-541.
- Rock N M S, Bowes D R and Wright A E. 1991. *Lamprophyres* [M]. Glasgow: Blackie, 1-285.
- Scherer C M and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock[J]. *Science*, 293 (5530): 683-687.
- Sun C D, Wu P, Wang D, Guan S J, Jiang X J, Jiang L Y, and Wang J F. 2016. Spatial distribution and fabric features of pseudoleucite porphyry from the Yao'an Pb-Ag deposit in Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35 (6): 991-1002(in Chinese with English abstract).
- Sun C D, Wu P, Wang D, Guan S J, Jiang X J, Jiang L Y and Wang L Y.

2017. Geochemistry and zircon U-Pb age of the Yao'an pseudo-leucite porphyry, Yunnan Province, China[J]. *Acta Geochimica*, 36 (2): 316-328.
- Wang J F, Wu P, Jiang L Y, Guan S J, Jiang X J and Sun C D. 2016. Lithology-fault ore-controlling characters and prospecting prediction of the Laojiezi Pb-Ag deposit in Yao'an, Yunnan Province: A case study of the 2108m level[J]. *Geology and Exploration*, 35(6): 407-416(in Chinese with English abstract).
- Wang J H, Yin A, Harrison T.M, Grove M, Zhang Y Q and Xie G H, 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(1): 123-133.
- Wang X C, Li X H, Li W X and Li Z X. 2009. Variable involvements of mantle plumes in the genesis of mid-Neoproterozoic basaltic rocks in south China: A review[J]. *Gondwana Research*, 15(3-4): 381-395.
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2): 185-220(in Chinese with English abstract).
- Xu H, Cui Y L, Zhang M H, Zhou J X, Liu L C, Chen L, Liang T X and Rong H F. 2015. Geochemistry and geochronology of the lamprophyres in the Bijishan ore deposit, Dali city, Yunnan Province: Implications for source region and diagenetic environment[J]. *Mineral Petrol*, 35(3): 41-51(in Chinese with English abstract).
- Xu X W, Zhang B L, Qin K Z, Mao Q and Cai X P. 2007. Origin of lamprophyres by the mixing of basic and alkaline melts in magma chamber in Beiya area, western Yunnan, China[J]. *Lithos*, 99 (3): 339-362.
- Yan Q G, Jiang X J, Wu P, Sun H Y and Guan S J. 2017. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology and volcanic edifice division of the Laojiezi intraplate alkali-rich volcanic rocks in Yao'an, central Yunnan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(8): 1743-1759 (in Chinese with English abstract).
- Yan Q G, Jiang X J, Li C, Zhou L M, Wang Z Q, Sultan B S, Qu W J and Du A D. 2018. Geodynamic background of intracontinental Cenozoic alkaline volcanic rocks in Laojiezi, western Yangtze Craton: Constraints from Sr-Nd-Hf-O isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(6): 1685-1699.
- Yang L Q, Liu J T, Zhang C, Wang Q F, Ge L S, Wang Z L, Zhang J and Gong Q J. 2010. Superimposed orogenesis and metallogenesis: An example from the orogenic gold deposits in Ailaoshan gold belt, southwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1723-1723(in Chinese with English abstract).
- Yang L Q, Deng J, Zhao K and Liu J T. 2011. Tectono-thermochronology and gold mineralization events of orogenic gold deposits in Ailaoshan orogenic belt, southwest China: Geochronological constraints[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2519-2532(in Chinese with English abstract).
- Yang Z L, Yang S K, Wang Z C, Yang C H and Dai Q H. 2007. The geology of Laojiezi Pb deposit, and existence of Ag, Yao'an Yunnan[J]. *Geology of Yunnan Province*, 26 (1): 106-111(in Chinese with English abstract).
- Yuan H, Luo X R, Li W Y and Chen W. 2017. Geochemical characteristics and tectonic significance of lamprophyre in the Gudui area of Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 53(2): 300-309(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Q and Xie Y W. 1997. Geochronology and Nd, Sr isotopic characteristics of alkali-rich intrusive rocks in Ailaoshan-Jinshajiang river[J]. *Science in China (Series D)*, 27 (4): 289-293(in Chinese).
- Zhou H Y, Sun X M, Wu Z W, Liao J L, Fu Y, Li D F, Pete H, Liu Y, Lin H and Lin Z Y. 2017. Hematite U-Pb geochronometer: Insights from monazite and hematite integrated chronology of the Yao'an gold deposit, southwest China[J]. *Econ. Geol.*, 112: 2023-2039.

附中文参考文献

- 毕献武, 胡瑞忠, Cornel D H. 2001. 富碱侵入岩与金成矿关系: 云南省姚安金矿床成矿流体形成演化的微量元素和同位素证据[J]. *地球化学*, 30 (3): 264-272.
- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 吴开心, 苏文超, 战新志. 2005. 姚安和马厂箐富碱侵入岩体的地球化学特征[J]. *岩石学报*, 21 (1): 113-124.
- 曹华文, 张寿庭, 王长明, 宋欣, 林进展, 李冬. 2013. 云南个旧煌斑岩脉地球化学特征及其地质意义[J]. *地球化学*, 42 (4): 340-351.
- 曹华文, 裴秋明, 张寿庭, 王长明, 王光凯, 王亮. 2016. 个旧老厂钾质黄斑岩矿物学特征及其锆石 U-Pb 和黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄[J]. *地球化学*, 45 (6): 545-568.
- 陈福川, 王庆飞, 李龚健, 赵岩. 2015. 滇西哀牢山镇沉煌斑岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学和地球化学特征[J]. *岩石学报*, 31 (11): 3203-3216.
- 程锦, 夏斌, 张玉泉. 2007. 云南姚安碱性杂岩体的岩石学和地球化学特征[J]. *大地构造与成矿学*, 31(1): 118-125.
- 邓军, 候增谦, 莫宣学, 杨立强, 王庆飞, 王长明. 2010. 三江特提斯复合造山与成矿作用[J]. *矿床地质*, 29 (1): 37-42.
- 符德贵, 周云满, 张长青, 陈庆广, 覃修平. 2010. 滇中小水井金矿煌斑岩特征及金矿化的关系[J]. *地质与勘探*, 46 (3): 414-425.
- 葛良胜, 郭晓东, 邹依林, 杨嘉禾, 李玉静. 2002. 云南姚安与富碱岩浆活动有关的金矿床地质及成因[J]. *地质与资源*, 31 (1): 29-37.
- 葛良胜, 邹依林, 邢俊兵, 王治华, 郭晓东. 2004. 滇西北与喜马拉雅期富碱斑岩有关的金矿成矿系统[J]. *黄金地质*, 10 (1): 39-47.
- 管涛, 黄智龙, 许成, 张振亮, 严再飞, 陈冕. 2006. 云南白马寨矿区煌斑岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年和地球化学特征[J]. *岩石学报*, 22 (4): 873-883.
- 和文言, 莫宣学, 喻学惠, 和中华, 董国臣, 刘晓波, 苏纲生, 黄雄飞. 2013. 滇西北衙金多金属矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 29 (4): 1301-1310.
- 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. 滇西北衙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[J]. *岩石学报*, 30 (11): 3287-3300.

- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. 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, 23 (10): 2595-2604.
- 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[J]. 矿床地质, 25 (5): 521-543.
- 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[J]. 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[J]. 地质学报, 92 (6): 1280-1296.
- 李勇, 莫宣学, 喻学惠, 黄行凯, 和文言. 2011. 金沙江-哀牢山断裂带几个富碱斑岩体的锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 现代地质, 25 (2): 189-200.
- 刘娇, 周洋, 谢德根, 纪星星, 李德威. 2016. 云南建水煌斑岩年代学和地球化学及其构造意义[J]. 中国地质, 43(6): 1977-1991.
- 任纪舜, 牛宝贵, 王军, 和政军, 金小赤, 谢良珍, 赵磊, 刘仁燕, 江小均, 李舩, 杨付岭. 2013. 1:500 万国际亚洲地质图[J]. 地球学报, 34 (1): 24-30.
- 孙春迪, 吴鹏, 王蝶, 管申进, 江小均, 姜龙燕, 王建飞. 2016. 云南姚安铅银矿床假白榴斑岩空间分布和组构特征[J]. 岩石矿物学杂志, 35 (6): 991-1002.
- 王建飞, 吴鹏, 姜龙燕, 管申进, 江小均, 孙春迪. 2016. 云南姚安老街子铅银矿床岩性-断裂控矿特征与找矿预测—以 2108m 中段为例[J]. 地质与勘探, 52(3): 407-416.
- 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[J]. 岩石学报, 23 (2): 185-220.
- 徐恒, 崔银亮, 张苗红, 周家喜, 刘利超, 陈梁, 梁庭祥, 荣惠锋. 2015. 云南大理笔架山矿区煌斑岩地球化学、年代学及其对源区和成岩环境的指示[J]. 矿物岩石, 35 (3): 1-51.
- 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[J]. 地质学报, 91 (8): 1743-1759.
- 杨立强, 刘江涛, 张闯, 王庆飞, 葛良胜, 王中亮, 张静, 龚庆杰. 2010. 哀牢山造山带金成矿系统: 复合造山构造演化与成矿作用初探[J]. 岩石学报, 26 (6): 1723-1739.
- 杨立强, 邓军, 赵凯, 刘江涛. 2011. 哀牢山造山带金矿成矿时序及动力学背景探讨[J]. 岩石学报, 27 (9): 2519-2532.
- 杨宗良, 杨世坤, 王正常, 杨成华, 代清华. 2007. 云南姚安老街子铅矿地质及银的赋存状态[J]. 云南地质, 26(1): 106-111.
- 袁和, 罗先熔, 李武毅, 陈武. 2017. 西藏古堆地区煌斑岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地质与勘探, 53(2): 300-309.
- 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[J]. 中国科学(D 辑), 27 (4): 289-293.