

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.11.013

老挝西北部班康姆金矿区火山岩地质年龄、地球化学特征及其对金矿勘查的启示

胡家博^{1,2}, 冯庆来^{1,2*}, Senebouttalath Vongpaseuth¹, Xayyavongsa Vongdavanh¹
HU Jiabo^{1,2}, FENG Qinglai^{1,2*}, SENEBOUTTALATH Vongpaseuth¹, XAYYAVONGSA
Vongdavanh¹

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:班康姆(Pangkum)金矿是近年来在老挝西北部巴莱(Paklay)地区经过详查的、具有寻找超大矿床潜力的大型金矿床,开展该金矿区及周围地质研究,对老挝西北部金矿形成规律及深部外围找矿具有重要意义。对班康姆金矿矿区及附近火山岩进行了岩石学、年代学和地球化学研究,得到玄武岩、绿泥石化角闪安山岩、绢云母化角闪安山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 304.5 ± 3.9 Ma、 309.4 ± 3.1 Ma 和 314.4 ± 3.6 Ma, 属于晚石炭世中晚期岩浆活动的产物。地球化学分析表明火山岩样品 TiO_2 、Ni、Cr 等元素含量低, K_2O 及 Al_2O_3 含量高, 富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 为一套钙碱性中基性安山岩-粗安岩-钾玄岩系列, 属于大陆边缘弧岩类, 可能为黎府洋俯冲闭合后的产物。晚石炭世中基性火山岩层系的存在, 暗示老挝西北部地区的金矿形成规律还需要进一步研究, 外围找矿需要关注更多的火山岩。

关键词:黎府构造带; 班康姆金矿; 地质年代学; 地球化学; 弧火山岩; 石炭纪

中图分类号: P618.51; P588.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2023)11-1967-16

Hu J B, Feng Q L, Senebouttalath V, Xayyavongsa V. Geochronology and geochemistry characteristics of the volcanic rocks in Pangkum gold deposit area, Northwestern Laos and its implication for gold exploration. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(11): 1967-1982

Abstract: Pangkum gold deposit is a large gold deposit that has been detailedly investigated in northwestern Laos and shows the potential becoming a super-large mineral deposit. It is of great significance to carry out research on this deposit and its surrounding area for understanding the formation and exploration direction of gold deposit in NW Laos. In this study, we investigate the petrological, geochronological and geochemical studies of volcanic rocks in Pangkum mining area. The results show that the LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the basalt, chlorite hornblende andesite, and sericite hornblende andesite is 304.5 ± 3.9 Ma, 309.4 ± 3.1 Ma, and 314.4 ± 3.6 Ma, respectively, and these ages belong to the middle to late Late Carboniferous. These volcanic rocks show low TiO_2 , Ni, Cr, and high Al_2O_3 content. In addition, they are enriched with LREEs and LILEs but depleted in HFSEs. These geochemical characteristics tested by XRF and ICP suggest that these samples are a set of calc-alkaline andesite-shoshonite rocks and exhibit a geochemical affinity to active continental marginal arc volcanic rocks. In summary, these samples may be products of subduction and closure of the Loei ocean. The exist of intermediate-basic volcanic rock series of the Late Carboniferous may indicate that the formation of gold deposit in NW Laos

收稿日期: 2020-08-05; 修订日期: 2021-02-17

资助项目: 国家自然科学基金项目《老挝-泰国朗勃拉邦和黎府构造带地层格架及特提斯演化研究》(批准号: 41972243)

作者简介: 胡家博(1996-), 男, 在读博士生, 地质学专业。E-mail: jiabohu96@163.com

* 通信作者: 冯庆来(1961-), 男, 博士, 教授, 地层古生物学专业。E-mail: qinglaifeng@cug.edu.cn

needs further study, and peripheral prospecting may need to focus on more volcanic rocks.

Key words: Loei tectonic zone; Pangkuam gold deposit; geochronology; geochemistry; arc volcanic rocks; Carboniferous

班康姆金矿床位于老挝西北部巴莱县西北约 42 km, 于 21 世纪初被发现, 矿床规模目前已经从中小型变成大型, 并具有寻找超大型矿床的潜力, 银金矿为主要的矿种, 且深部存在较多黄铜矿(赵延朋等, 2015; 迟占东等, 2017; 宁庚陈等, 2017; 潘瀚等, 2017; 夏瑜等, 2017)。目前对于班康姆矿床的研究较少, 主要由具有勘查权的中国企业和相关学者在进行研究工作, 对于矿床的成因有很多认识, 包括矽卡岩型、构造充填型、复合热液型等(康铁锁等, 2016; 史琪等, 2016; 赵延朋等, 2016; 迟占东等, 2017; 宁庚陈等, 2017), 但不同学者根据区域地质对比, 普遍认同赋矿岩系为二叠纪—三叠纪安山岩(卢汉堤等, 2017; 宁庚陈等, 2017; 潘瀚等, 2017)。赵延朋等(2016; 2017)通过对矿区火山岩样品的地球化学研究, 认为其是火山岛弧环境下形成的钙碱性安山岩, 也是成矿物质的主要来源, 与 Salam et al. (2014)研究的泰国黎府地区 Chatree 矿区二叠纪—三叠纪火山岩具有一致性, 但赵延朋等(2016; 2017)也表明还需要年代学、同位素地球化学等研究工作进一步证实。

基于以往的地质图资料, 研究者普遍认为, 老挝西北部地区主要出露石炭纪—二叠纪灰岩和二叠纪—三叠纪安山岩。Qian et al. (2015)通过年代学和地球化学研究, 认为老挝西北部存在石炭纪玄武岩—安山岩系列, 并具有大陆边缘弧的特征, 同时晚石炭世俯冲过程形成的基性火山岩也被更多地发现(文件生等, 2018)。尽管研究取得了一些进展, 但老挝西北部地区的基础地质研究仍然十分薄弱, 大量地质体缺乏地质时代依据, 其空间展布和对比依据不足, 大地构造单元属性和南北延伸一直存在争论(Feng et al., 2005; Sone et al., 2008; Metcalfe, 2013; Burrett et al., 2014; Qian et al., 2015; 2016; Shi et al., 2019), 特别是一些与大型矿床相关的地质体缺乏系统研究, 区域上仅有老挝中部、泰国北部的一些矿床进行过相关的详细研究(Kamvong et al., 2014; Manaka et al., 2014; Salam et al., 2014; Leaman et al., 2019)。

本文对老挝西北部班康姆金矿区火山岩进行了地质年龄和地球化学研究, 分析了火山岩形成的

时代及构造背景, 对班康姆金矿的地质特征及找矿方向提供了新的认识。

1 区域地质概况

研究区出露地层主要包括早志留世—中泥盆世泥岩、砂岩、中性火山岩, 晚泥盆世—早石炭世泥岩、灰岩等沉积岩, 二叠纪—早三叠世砂岩、粉砂岩、泥页岩、灰岩等沉积岩和中基性火山岩。侵入岩有晚石炭世花岗闪长岩、二长花岗岩, 以及二叠纪—早三叠世花岗闪长岩、二长花岗岩(图 1)。

从大地构造角度看, 研究区属于黎府构造带的组成部分。黎府构造带的研究始于泰国并向北延伸至老挝西北部地区(Bunopas, 1987; Kamvong et al., 2014; Qian et al., 2015), 研究区西部为难河—程逸构造带(Bar et al., 1987), 北部为朗勃拉邦构造带(Hutchison, 1975), 由于老挝地质研究程度较低, 它们之间的关系尚不清晰, 这也是造成东南亚古特提斯演化研究多种争论的主要原因。

2 矿区地质特征

矿区地层主要为石炭系—二叠系灰岩、大理岩、泥砂岩和粉砂岩, 于矿区中西区出露, 多呈 NNE 向分布。矿区岩浆岩主要为火山岩, 大面积分布在矿区及周围, 少量的侵入岩为矿区中南部的花岗闪长斑岩。矿区构造主要表现为 NNE 向深大断裂(F_3), 其也是研究区主要的控岩构造, 而控矿容矿构造为 F_1 、 F_2 次级断裂(赵延朋等, 2015; 2017; 卢汉堤等, 2017)。

班康姆金矿床由 12 条规模不等的金矿(化)和铜金矿(化)体组成, 其中以 I、II 号铜金矿体为主要矿体(图 2)(赵延朋等, 2017)。这些主要矿体均赋存于火山岩断裂带中或火山岩与碳酸盐岩接触带中, 呈脉状、透镜状, 火山岩 Au、Cu 丰度较高(赵延朋等, 2016), 岩性控矿和构造控矿是主要的控矿因素。矿体围岩主要为大理岩、矽卡岩、安山岩等, 表现出黄铁矿化、矽卡岩化、碳酸盐化、绿泥石化、青磐岩化等蚀变特征, 其中黄铁矿化是与成矿联系最密切的蚀变阶段(宁庚陈等, 2017)。

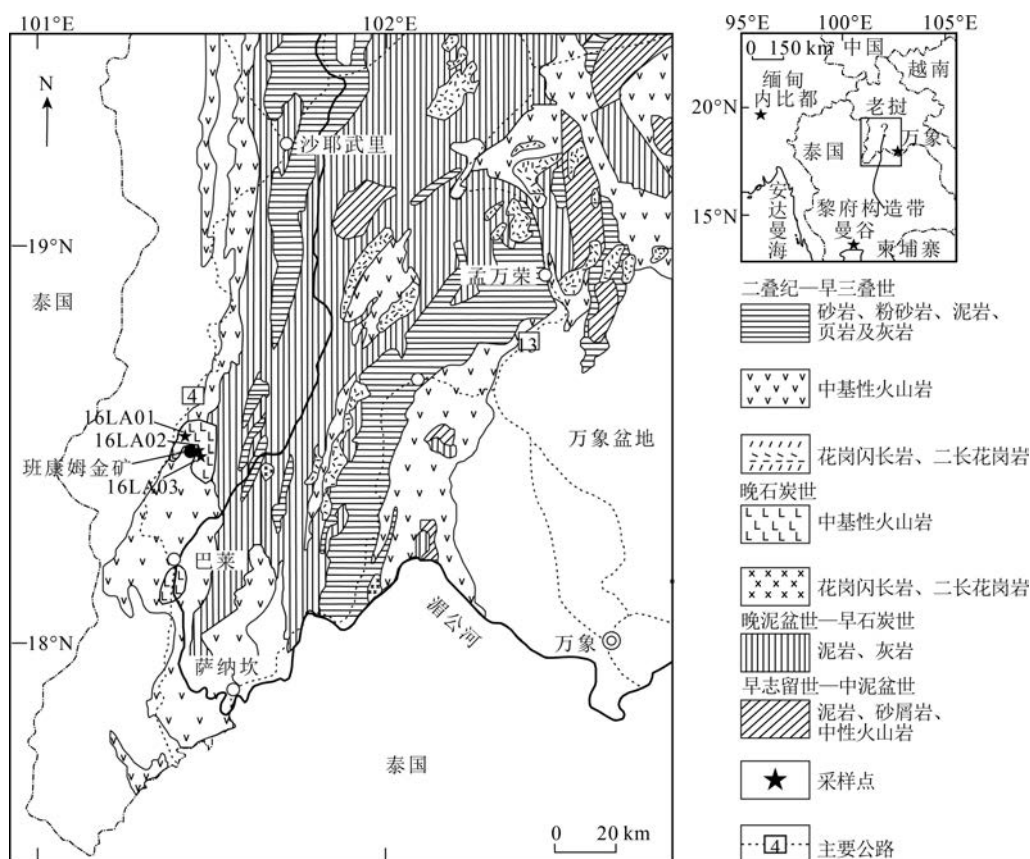


图 1 老挝西北部地质简图及采样位置(据 Qian et al., 2015 修改)

Fig. 1 Geographical map and simplified geological map of the study area in northwestern Laos

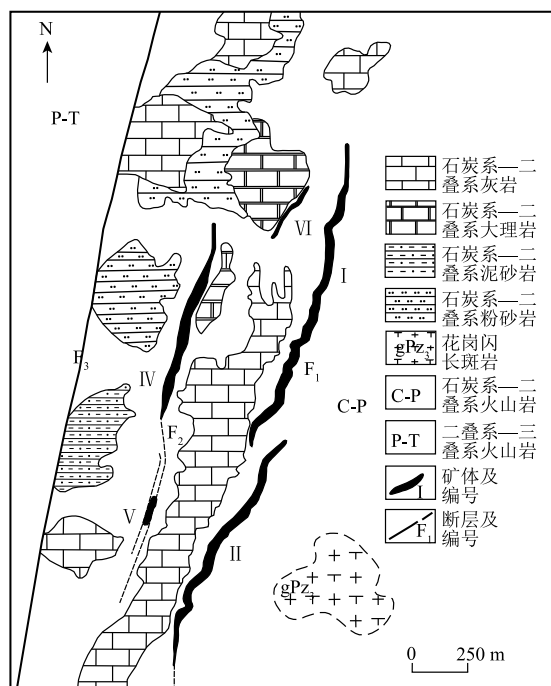


图 2 老挝班康姆金矿区地质简图(据赵延朋等, 2015 修改)

Fig. 2 Generalized geological map of Pangkum gold deposit area, Laos

在老挝西北部巴莱地区开展详细的野外调查后发现,在巴莱西部即老挝边境地区,分布一条近 SN 向展布的火山岩带。从区域地质图看,该火山岩带被确定为二叠纪—三叠纪中基性火山岩。野外穿越班康姆金矿区,踏勘一条横切剖面,发现该火山岩带岩性较稳定,属于中基性火山岩,与地质图岩性一致。为深入开展研究,在班康姆金矿的简易公路边及矿区附近 2 km 处,采集 4 件样品;在矿区附近及矿区新鲜露头采集 11 件样品。室内将保存较好的样品进行切片,并对所有薄片开展了岩相学研究,岩石样品特征如下(图版 I)。

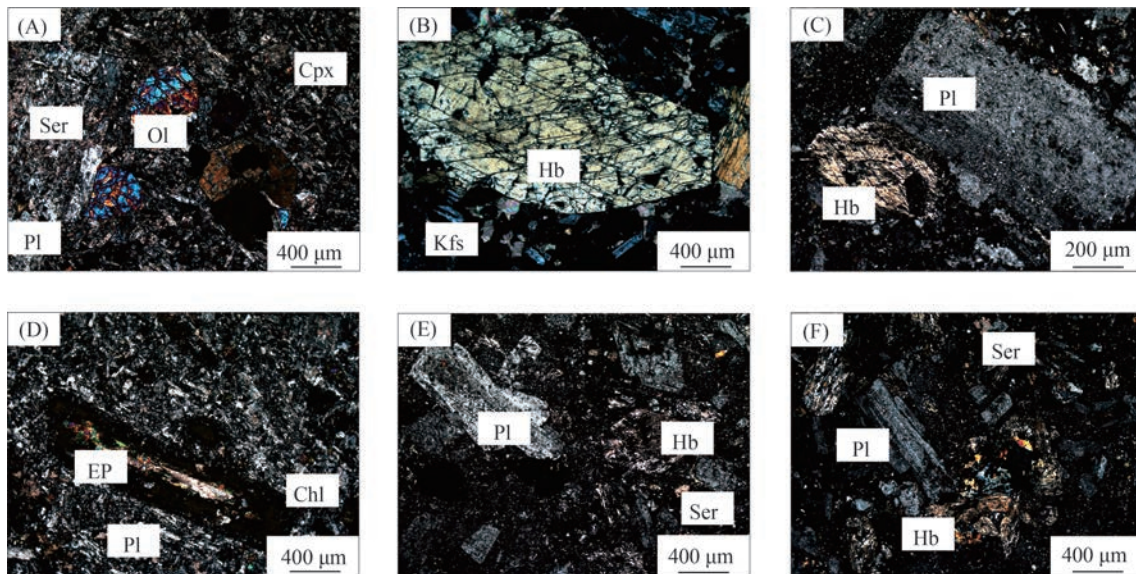
采样点 1: 样品点位于 Pakhang 村附近(北纬 18°25'55"、东经 101°22'38"),属于班康姆金矿外围地区,岩石露头宽度逾 40 m,岩石较新鲜,采集样品 16LA01-1、16LA01-3 和 16LA01-4。样品为灰褐色,斑状结构,斑晶以斜长石、橄榄石为主,还有少量辉石及角闪石;基质主要为粒径 0.5 mm 及以下的斜长石、钾长石、辉石、不透明矿物等,蚀变主要为绢云母化、绿帘石化等,蚀变程度较轻(图版 I-A、B)。



图3 老挝班康姆金矿区火山岩石露头

Fig. 3 Volcanic rock sample outcrops in Pangkuam gold deposit area

图版 I Plate I



A~F.老挝班康姆金矿火山岩显微照片;A—玄武岩;B—玄武岩;C—安山岩;D—安山岩;E—安山岩;F—安山岩;Cpx—单斜辉石;Pl—斜长石;Ol—橄榄石;Ser—绢云母;Kfs—钾长石;Hb—普通角闪石;Chl—绿泥石;Ep—绿帘石

综合鉴定为灰褐色弱蚀变玄武岩。

采样点2:样品点(图3)位于矿区附近(北纬 $18^{\circ}24'46.4''$ 、东经 $101^{\circ}24'19''$),岩石露头宽度达50多米,岩石较新鲜,采集样品16LA02-1、16LA02-2、16LA02-3、16LA02-4和16LA02-5。样品为灰绿色,有细的石英脉,斑状结构,斑晶为斜长石与角闪石,角闪石边缘发生较多的蚀变;基质为0.2 mm及以下的斜长石、角闪石、不透明矿物等;蚀变主要为绢云母化、绿帘石化、绿泥石化等,蚀变程度一般(图版I-C、D)。综合鉴定为灰绿色绿泥石化角闪安山岩。

采样点3:样品点位于班康姆金矿矿区(北纬 $18^{\circ}24'56.4''$ 、东经 $101^{\circ}25'03''$),露头较好,岩石新

鲜,采集样品16LA03-2、16LA03-5和16LA03-6。样品为灰绿色,斑状结构,斑晶为斜长石和少量的角闪石;基质为0.1 mm及以下的斜长石、角闪石、不透明矿物等,具有玻基交织结构,蚀变主要为绢云母化等,存在后期脉体的穿插(图版I-E、F)。综合鉴定为灰褐色绢云母化角闪安山岩。

3 分析测试方法

3.1 锆石分选及定年方法

将野外采集到的具有代表性的样品用水清洗干净,去除表面杂质,每件样品预留约200 g,用作地球化学研究和备份样品,其余样品按照采样点位置合并成3件大样(编号分别为16LA01、16LA02、

16LA03), 分别送往南京宏创地质勘查技术服务有限公司(编号 16LA01)和河北省区域调查研究所实验室(编号 16LA02 和 16LA03), 利用重磁法从岩石碎块中提取锆石; 筛选颗粒较大、晶形较好的锆石制靶(宋彪等, 2002), 用于同位素年代学研究。16LA01 样品阴极发光(CL)图像利用该公司的 TESCAN MIRA3 场发射扫描电镜完成, 16LA02 和 16LA03 样品的 CL 图像在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 JXA-8100 电子探针仪完成。

锆石 U-Pb 定年和微量元素含量分析在 GPMR 的 LA-ICP-MS 实验室完成, 激光剥蚀系统采用 GeoLas2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a, 激光剥蚀光束直径为 32 μm , 剥蚀深度为 20~40 μm , 并以 91500 为外标。数据处理采用 ICPMSDataCal 10.7 软件完成, 详细的操作方法及数据处理方法见 Liu et al. (2008; 2010a; 2010b), 锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图和年龄加权平均值计算均在 Excel 中采用 Ludwig (2003) 的 Isoplot 3.0 插件完成。

3.2 主量和微量元素测试方法

选择 10 件较新鲜的样品, 先碎至 1 cm 左右, 再用 RS-200 碎样机碎至 200 目以下。全岩主量元素在 GPMR 利用日本理学 Primus II X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成。全岩微量及稀土元素在 GPMR 利用 Agilent 7500a ICP-MS 分析完成。详细的处理过程见 Liu et al. (2008)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

锆石测试点位于锆石的边部或核部, 代表性测试点位见图 4, 测试结果见表 1。

样品 16LA-01 锆石颗粒大部分较完整, 晶形多为透明无色的柱状或多边形, 粒径为 20~150 μm , 长宽比为 1:1~4:1, 大部分锆石都发育较好的环带, 部分可见后期改造。对该样品中 23 颗锆石进行分析测试, 得到 15 个有效数据点, 结果分析如下: $\text{Th} = 36.1 \times 10^{-6} \sim 161 \times 10^{-6}$, $\text{U} = 93.8 \times 10^{-6} \sim 281 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.30~0.59, 平均值为 0.40。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $304.5 \pm 3.9 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.6, n=15$), 为晚石炭世晚期。

样品 16LA-02 锆石颗粒较完整, 粒径为 100~130 μm , 长宽比为 1:1~2:1, 具有明显的岩浆锆

石振荡环带。14 个有效数据点结果如下: $\text{Th} = 15.1 \times 10^{-6} \sim 57.6 \times 10^{-6}$, $\text{U} = 40.3 \times 10^{-6} \sim 139.2 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.33~0.59, 平均值为 0.39。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $309.4 \pm 3.1 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.83, n=14$), 为晚石炭世中晚期。

样品 16LA-03 锆石颗粒较完整, 粒径为 100~140 μm , 长宽比为 1:1~2.5:1。锆石棱角较明显, 可见清晰的振荡环带。14 个有效数据点测试结果如下: $\text{Th} = 8.92 \times 10^{-6} \sim 72.16 \times 10^{-6}$, $\text{U} = 33.71 \times 10^{-6} \sim 194.63 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.26~0.62, 平均值为 0.42。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $314.4 \pm 3.6 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.3, n=14$), 为晚石炭世中期。

总体而言, 样品锆石无磨圆、无分选, 颗粒均较完整, 无明显港湾状结构、重结晶等现象, 振荡环带较清晰, Th/U 值大于 0.1, 且基本在 0.4 左右, 表明该样品锆石具有岩浆成因的特点(吴元保等, 2004)。

4.2 主量元素

班康姆金矿床火山岩样品主量和微量元素分析结果见表 2。为了使其他主量元素含量的总和为 100%, 烧失量(LOI)在计算主量元素平均值时已被扣除, 得到 100% 标准化处理后的主量元素数据。

样品主量元素含量分别为 SiO_2 48.72%~62.18%, 平均 56.58%; MgO 3.68%~6.92%, 平均 4.62%; TiO_2 0.51%~0.94%, 平均 0.67%, 含量较低; Al_2O_3 16.26%~19.46%, 平均 17.53%, 含量较高; K_2O 变化范围较大, 0.62%~3.92%, 平均 1.87%, Na_2O 3.05%~6.04%, 平均 4.52%, 含量较高, 全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量较高, 3.66%~9.96%。样品 TiO_2 含量(平均 0.67%)与岛弧火山岩(0.58%~0.85%)相似(Pearce et al., 1984)。在 TAS 图解(图 5-A)中, 安山岩样品点(16LA02、16LA03)均落入安山岩-粗面安山岩区域, 属于亚碱性系列, 而玄武岩 3 个样品点(16LA01-1、16LA01-3、16LA01-4)落入粗面玄武岩和玄武质粗面安山岩区域。此外, 本次研究的火山岩样品, 除 16LA02-2、16LA02-3、16LA03-5 样品烧失量接近 3.5 外, 其余样品的烧失量均较高, 说明火山岩形成后发生了不同程度的蚀变。以上岩性及蚀变特征与岩相学观察结果一致。在 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解(图 5-B)中, 样品点落入安山岩-玄武岩范围, 表明样品均为中基性火山岩。在 SiO_2 - K_2O 图解(图 5-C)中, 样品点在低钾钙碱性系列-钾玄岩系列中均有分布, 但具体看, 安山岩

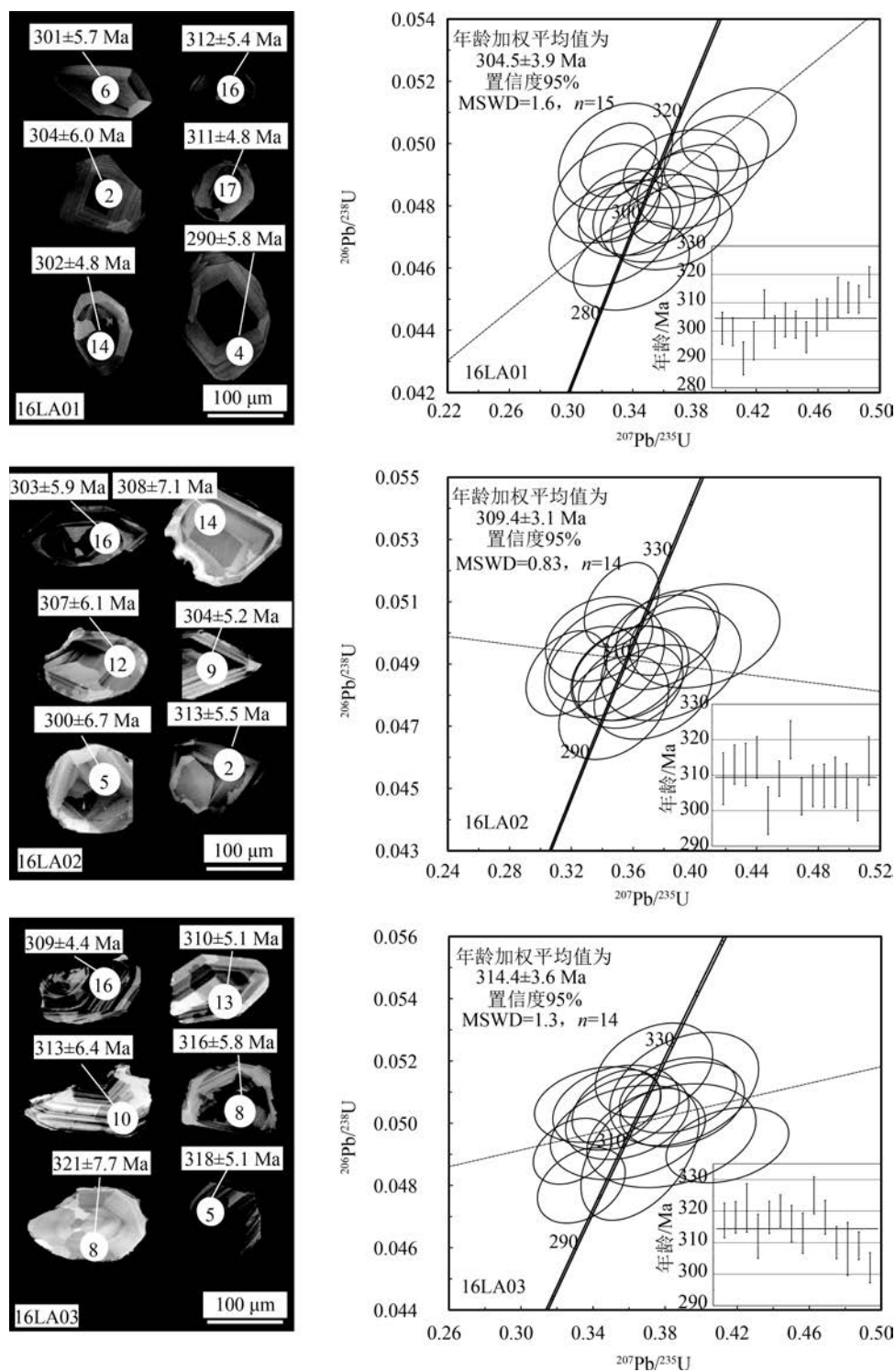


图 4 老挝班康姆金矿火山岩锆石阴极发光(CL)图像(典型点位)及 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 CL images of typical zircons and zircon U-Pb concordia diagrams for the volcanic rocks in Pangkuam gold deposit in Laos

表 1 老挝班康姆金矿火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素组成分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotope dating results for the volcanic rocks in Pangkum gold deposit in Laos

测试点位	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						年龄/Ma						
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		rho	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
				1σ	1σ	1σ	1σ		1σ	1σ						
16LA01-02	50.8	149	0.34	0.0568	0.0036	0.3663	0.0192	0.0483	0.0010	0.3868	483	139	317	14.3	304	6.0
16LA01-03	89.2	152	0.59	0.0583	0.0045	0.3652	0.0259	0.0473	0.0009	0.2652	539	168	316	19.2	298	5.5
16LA01-04	38.3	125	0.31	0.0551	0.0047	0.3390	0.0248	0.0461	0.0009	0.2796	417	193	296	18.8	290	5.8
16LA01-06	52.4	174	0.30	0.0540	0.0038	0.3473	0.0218	0.0478	0.0009	0.3063	372	159	303	16.4	301	5.7
16LA01-10	36.9	103	0.36	0.0532	0.0050	0.3288	0.0244	0.0496	0.0011	0.3086	345	245	289	18.6	312	7.0
16LA01-11	36.1	108	0.34	0.0516	0.0046	0.3259	0.0265	0.0471	0.0011	0.2862	333	201	286	20.3	297	6.7
16LA01-13	74.7	210	0.36	0.0534	0.0037	0.3377	0.0217	0.0476	0.0008	0.2633	346	153	295	16.5	300	5.0
16LA01-14	86.1	249	0.35	0.0511	0.0030	0.3311	0.0175	0.0480	0.0008	0.3057	243	135	290	13.4	302	4.8
16LA01-15	72.1	163	0.44	0.0602	0.0039	0.4086	0.0246	0.0505	0.0009	0.2896	613	141	348	17.7	317	5.4
16LA01-16	74.4	180	0.41	0.0592	0.0038	0.3939	0.0224	0.0496	0.0009	0.3109	572	141	337	16.3	312	5.4
16LA01-17	161	281	0.57	0.0491	0.0026	0.3306	0.0164	0.0495	0.0008	0.3206	154	121	290	12.5	311	4.8
16LA01-20	65.3	162	0.40	0.0550	0.0041	0.3715	0.0248	0.0492	0.0008	0.2513	413	169	321	18.4	310	5.0
16LA01-21	41.3	126	0.33	0.0553	0.0044	0.3577	0.0256	0.0476	0.0009	0.2727	433	178	311	19.1	300	5.7
16LA01-22	39.6	93.8	0.42	0.0509	0.0049	0.3239	0.0232	0.0484	0.0011	0.3036	235	207	285	17.8	305	6.5
16LA01-23	67.3	160	0.42	0.0582	0.0043	0.3788	0.0237	0.0486	0.0009	0.2946	539	162	326	17.4	306	5.5
16LA02-01	15.1	43.9	0.34	0.0511	0.0043	0.3415	0.0256	0.0491	0.0012	0.3231	243	197	298	19.4	309	7.3
16LA02-02	21.0	58.6	0.36	0.0509	0.0039	0.3380	0.0229	0.0498	0.0009	0.2679	235	208	296	17.4	313	5.5
16LA02-03	16.6	50.8	0.33	0.0558	0.0040	0.3780	0.0241	0.0497	0.0010	0.3086	443	159	326	17.8	313	6.0
16LA02-04	26.0	60.8	0.43	0.0571	0.0040	0.3825	0.0221	0.0500	0.0009	0.3258	494	149	329	16.2	315	5.8
16LA02-05	17.3	48.6	0.36	0.0556	0.0045	0.3475	0.0235	0.0476	0.0011	0.3408	435	177	303	17.7	300	6.7
16LA02-07	30.4	80.0	0.38	0.0507	0.0031	0.3346	0.0192	0.0490	0.0008	0.2921	228	143	293	14.6	309	5.0

续表 1

测试点位	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
				1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$	1σ	1σ	1σ	1σ	ρ	1σ	1σ			
16LA02-08	57.6	139	0.41	0.0510	0.0024	0.3526	0.0160	0.0509	0.3803	239	111	307	12.0	320	5.4
16LA02-09	33.7	83.9	0.40	0.0548	0.0037	0.3585	0.0223	0.0483	0.2838	406	147	311	16.7	304	5.2
16LA02-10	24.5	71.3	0.34	0.0482	0.0031	0.3169	0.0173	0.0487	0.3549	122	1335	280	13.4	307	5.8
16LA02-12	15.5	47.2	0.33	0.0548	0.0045	0.3584	0.0248	0.0487	0.2947	467	192	311	18.5	307	6.1
16LA02-14	23.8	40.3	0.59	0.0593	0.0052	0.3846	0.0299	0.0490	0.3031	589	195	330	21.9	308	7.1
16LA02-15	17.8	53.5	0.33	0.0538	0.0043	0.3559	0.0238	0.0487	0.3116	361	180	309	17.9	307	6.3
16LA02-16	20.9	58.1	0.36	0.0580	0.0042	0.3729	0.0252	0.0481	0.2929	532	157	322	18.7	303	5.9
16LA02-17	21.7	47.8	0.45	0.0624	0.0055	0.4063	0.0322	0.0499	0.2821	689	190	346	23.2	314	6.8
16LA03-01	26.4	66.6	0.40	0.0514	0.0034	0.3528	0.0232	0.0505	0.2680	261	154	307	17.4	317	5.5
16LA03-02	72.2	178	0.41	0.0510	0.0024	0.3529	0.0162	0.0505	0.3481	243	107	307	12.2	318	5.0
16LA03-03	12.7	33.7	0.38	0.0583	0.0053	0.3906	0.0273	0.0511	0.3500	539	200	335	19.9	321	7.7
16LA03-04	18.0	51.4	0.35	0.0558	0.0048	0.3835	0.0310	0.0496	0.2830	456	195	330	22.8	312	7.0
16LA03-05	26.7	85.0	0.31	0.0494	0.0035	0.3426	0.0232	0.0506	0.2443	168.6	156	299	17.6	318	5.1
16LA03-07	51.6	82.6	0.62	0.0548	0.0031	0.3872	0.0215	0.0509	0.2930	406	97	332	15.7	320	5.1
16LA03-08	37.8	63.2	0.60	0.0529	0.0039	0.3590	0.0226	0.0502	0.3001	328	165	311	16.9	316	5.8
16LA03-10	8.92	34.7	0.26	0.0540	0.0050	0.3593	0.0284	0.0497	0.2660	369	209	312	21.2	313	6.4
16LA03-11	50.1	115	0.44	0.0528	0.0031	0.3739	0.0215	0.0517	0.3221	317	133	323	15.9	325	5.9
16LA03-12	38.7	86.0	0.45	0.0556	0.0032	0.3895	0.0228	0.0506	0.2955	435	131	334	16.6	318	5.4
16LA03-13	30.7	81.0	0.38	0.0607	0.0034	0.4146	0.0225	0.0493	0.3101	628	122	352	16.1	310	5.1
16LA03-14	25.0	57.9	0.43	0.0546	0.0038	0.3660	0.0216	0.0490	0.4739	398	156	317	16.1	308	8.4
16LA03-16	71.6	195	0.37	0.0485	0.0021	0.3285	0.0143	0.0491	0.3336	124	108	288	10.9	309	4.4
16LA03-18	66.3	138	0.48	0.0506	0.0024	0.3335	0.0161	0.0480	0.3364	233	103	292	12.2	302	4.8

表 2 老挝班康姆金矿火山岩全岩主量、微量和稀土元素含量

Table 2 Whole-rock major elements, trace elements and REE data for the volcanic rocks in Pangkuam gold deposit in Laos

样品号	16LA01-1	16LA01-3	16LA01-4	16LA02-2	16LA02-3	16LA02-4	16LA02-5	16LA02-6	16LA03-2	16LA03-5
SiO ₂	50.05	45.62	45.53	56.59	58.96	54.81	59.51	/	56.07	57.77
TiO ₂	0.74	0.87	0.86	0.59	0.51	0.48	0.62	/	0.58	0.50
Al ₂ O ₃	18.77	15.10	16.29	17.11	16.37	16.56	16.03	/	16.88	17.07
Fe ₂ O ₃	10.05	8.06	8.21	5.12	4.02	3.15	4.26	/	6.98	5.83
MnO	0.19	0.23	0.17	0.09	0.08	0.14	0.08	/	0.11	0.11
MgO	4.06	4.25	6.47	4.69	3.61	3.45	5.03	/	4.26	3.71
CaO	6.13	11.94	9.66	5.20	5.25	8.59	5.03	/	5.51	5.50
Na ₂ O	4.55	2.83	3.15	5.54	5.78	4.44	4.47	/	4.03	4.00
K ₂ O	1.78	3.64	2.78	1.31	0.93	2.03	0.59	/	1.43	1.46
P ₂ O ₅	0.14	0.31	0.34	0.14	0.13	0.13	0.09	/	0.15	0.13
烧失量	3.81	7.49	6.91	2.85	3.41	6.48	3.95	/	4.12	3.79
总量	100.27	100.34	100.37	99.23	99.05	100.26	99.66	/	100.12	99.87
Li	75.77	14.53	11.65	20.67	9.93	8.52	12.07	23.51	12.34	11.17
Be	0.76	0.41	0.98	0.97	0.99	0.81	0.98	0.97	0.76	0.94
Sc	26.83	22.67	27.76	28.32	16.44	13.42	13.26	19.43	15.81	14.50
V	198.65	230.11	245.26	248.86	134.56	114.38	103.70	160.62	142.35	119.56
Cr	0.63	5.31	29.36	103.96	46.89	26.98	28.66	42.57	49.93	41.97
Co	28.88	29.62	30.15	30.31	31.28	26.46	8.70	25.28	26.90	24.70
Ni	17.38	5.75	36.62	53.49	34.37	26.11	26.00	39.58	34.89	33.00
Cu	90.40	50.11	133.54	27.35	20.37	15.09	3.63	5.29	7.13	20.32
Zn	76.58	72.40	54.43	66.47	38.75	37.60	43.08	44.35	74.91	65.59
Ga	20.28	17.60	14.07	15.90	18.49	16.44	15.44	19.31	17.60	17.30
Rb	13.17	24.81	53.42	45.49	15.03	10.25	26.31	6.56	21.32	21.90
Sr	145.69	970.29	795.32	490.21	1256.98	1188.99	773.51	784.93	683.71	692.29
Y	47.50	19.94	18.32	21.55	13.80	12.88	11.80	11.15	13.06	12.32
Zr	143.71	47.84	79.39	103.81	86.73	78.01	75.13	112.43	70.62	71.09
Nb	2.56	1.12	2.73	5.38	2.14	1.80	1.73	2.62	1.88	1.86
Sn	1.22	0.29	0.67	0.80	0.56	0.56	0.49	0.30	0.48	0.48
Cs	1.04	0.41	0.74	0.95	0.77	0.56	0.78	0.58	0.48	0.43
Ba	12.86	193.10	501.80	311.12	246.20	180.68	304.80	224.87	209.26	190.07
La	7.22	3.82	16.43	22.11	7.01	8.26	5.72	5.58	7.92	8.01
Ce	19.92	9.92	38.47	51.20	16.77	18.65	13.88	12.34	17.93	17.67
Pr	3.13	1.49	5.49	6.90	2.29	2.53	1.82	1.63	2.38	2.36
Nd	16.34	7.60	24.80	29.86	10.20	11.06	8.05	7.14	10.42	10.36
Sm	5.35	2.28	5.40	6.28	2.63	2.41	1.95	1.94	2.46	2.44
Eu	1.69	0.86	1.51	1.75	0.79	0.80	0.63	0.70	0.87	0.81
Gd	6.97	2.84	4.62	5.03	2.65	2.52	1.98	1.93	2.46	2.30
Tb	1.19	0.49	0.60	0.69	0.42	0.39	0.33	0.30	0.38	0.37

续表 2

样品号	16LA01-1	16LA01-3	16LA01-4	16LA02-2	16LA02-3	16LA02-4	16LA02-5	16LA02-6	16LA03-2	16LA03-5
Dy	7.90	3.25	3.53	3.98	2.41	2.36	2.11	1.97	2.25	2.21
Ho	1.70	0.70	0.67	0.76	0.51	0.44	0.42	0.39	0.48	0.42
Er	4.86	2.11	1.79	2.12	1.44	1.31	1.25	1.19	1.31	1.21
Tm	0.75	0.31	0.26	0.32	0.21	0.19	0.18	0.19	0.19	0.18
Yb	4.94	2.12	1.57	2.03	1.39	1.34	1.28	1.35	1.30	1.23
Lu	0.71	0.34	0.24	0.30	0.21	0.20	0.20	0.21	0.19	0.19
Hf	4.10	1.50	2.25	2.89	2.61	2.26	2.29	3.00	2.02	2.00
Ta	0.16	0.07	0.15	0.32	0.15	0.14	0.29	0.16	0.12	0.14
Tl	0.08	0.09	0.16	0.13	0.09	0.07	0.17	0.04	0.10	0.10
Pb	4.06	1.13	5.05	4.70	3.47	3.73	2.49	3.40	3.66	4.46
Th	0.67	0.47	2.11	3.28	1.62	1.29	1.37	2.17	1.43	1.44
U	0.43	0.21	1.02	1.11	0.65	0.63	0.43	0.79	0.61	0.62
ΣREE	82.68	38.15	105.39	133.32	48.91	52.48	39.81	36.88	50.55	49.75
LREE	53.66	25.97	92.10	118.10	39.69	43.71	32.06	29.34	41.98	41.64
HREE	29.02	12.18	13.28	15.22	9.23	8.77	7.75	7.54	8.57	8.11
LREE/HREE	1.85	2.13	6.93	7.76	4.30	4.98	4.14	3.89	4.90	5.13
δEu	0.85	1.03	0.90	0.92	0.91	0.98	0.96	1.10	1.07	1.03
δCe	1.03	1.02	0.99	1.01	1.02	0.99	1.05	0.99	1.00	0.98

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

落在钙碱性系列,而玄武岩落入钾玄武岩及高钾钙碱性系列。以上说明,班康姆金矿床火山岩样品主要为一套钙碱性粗安岩-安山岩和钾玄武岩组合。

4.3 微量和稀土元素

所有样品的稀土元素都采用球粒陨石进行标准化处理(图 6-A),微量元素采用原始地幔进行标准化处理(图 6-B)。班康姆金矿火山岩稀土元素变化范围较大,ΣREE=36.88×10⁻⁶~133.32×10⁻⁶,大部分在 30×10⁻⁶~80×10⁻⁶之间,平均值为 63.79×10⁻⁶。除样品 16LA01-1 和 16LA01-3 外,其余样品均具有右倾型稀土元素配分模式,轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对亏损,δEu=0.85~1.10,平均值为 0.97,大部分 δEu 集中于 0.85~0.98 之间,具有微弱的负 Eu 异常,个别样品具有弱的正 Eu 异常(δEu=1.03~1.10);大部分无明显的 Ce 异常(δCe=0.98~1.05,平均 1.01)。

从样品的微量元素原始地幔蛛网图(图 6)可以看出,这些样品均表现为相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素,富集大离子亲石元素及有较高轻、重稀土元素比值的特征,这种“弧型”地球化学特征与

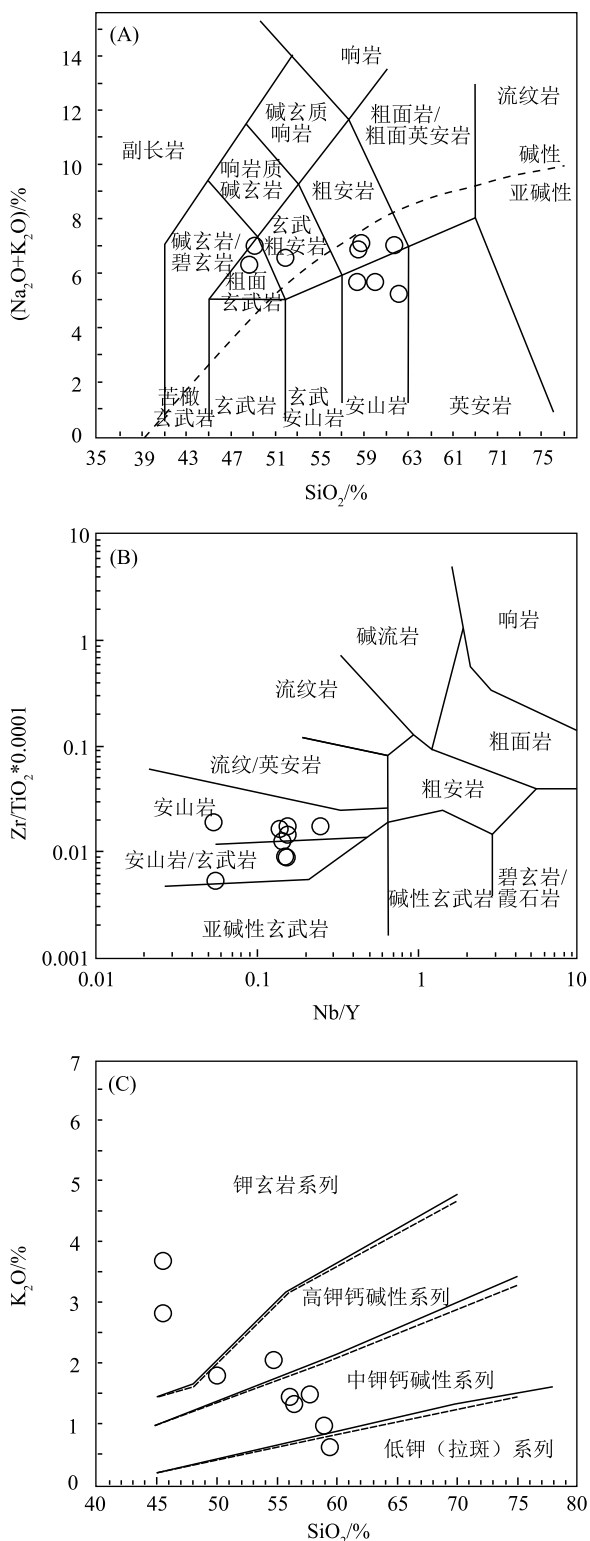
大洋弧玄武岩类似(Zheng,2012),同时与云南地区澜沧江火山岩带的大陆缘弧火山岩相比,也有一定的相似性,但是高场强元素和重稀土元素含量稍低(Peng et al.,2008)。

5 讨 论

5.1 火山岩形成时代

3 件样品(16LA01、16LA02 和 16LA03)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 304.5±3.9 Ma、309.4±3.1 Ma 和 314.4±3.6 Ma,属于晚石炭世中晚期。测试点表面年龄均为晚石炭世,表现出了较好的一致性,基本分布在谐和线附近,指示样品仅具有单阶段的演化史,未经过后期大规模改造,基本可以代表各自岩石样品的成岩年龄。

一直以来,学者将老挝西北部大部分的火山岩时代划分为二叠纪—三叠纪,认为是难河洋向印支地块西缘俯冲形成的岛弧火山岩,且泰国中东部地区的黎府构造带、碧彩汶构造带也多次报道二叠纪—三叠纪火山岩(Intasopa,1993;Salam et al.,2014)。但是近年来,晚石炭世的岩浆活动在老挝西北部和



A—TAS 图解 (Le Bas et al., 1986); B—Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解 (Winchester et al., 1977); C—SiO₂-K₂O 图解 (Le Maitre et al., 1989)

泰国中东部有了多次的报道,包括玄武岩、安山岩、花岗岩等 (Zaw et al., 2014; Qian et al., 2015; Fanka et al., 2018), 而自从晚石炭世的玄武岩在老挝西北部被第一次报道, 黎府构造带被认为延伸至老挝西北部地区 (Qian et al., 2015)。目前大部分学者都遵循以往的观点, 认为班康姆金矿矿区岩石同样是二叠纪—三叠纪中基性火山岩 (卢汉堤等, 2017; 宁庚陈等, 2017; 潘瀚等, 2017)。本次研究表明, 班康姆金矿矿区及周边还存在大量晚石炭世中基性火山岩。

黎府构造带位于印支地块西缘,是一条大致呈 NE—SW 走向的火山岩带,由南向北经泰国碧彩汶、黎府、老挝巴莱等地区,最终可能延伸至朗勃拉邦以南 (Bunopas, 1981; Intasopa, 1993; Qian et al., 2015)。酸性—中性火成岩在该带均有出露,主要岩石类型为玄武岩、安山岩、流纹岩、凝灰岩、火山集块岩、玻璃碎屑岩和枕状角砾岩。老挝西北部巴莱地区主要出露安山岩和玄武岩。本文对老挝西北部沙耶武里省巴莱地区班康姆金矿火山岩的地球化学特征研究显示,这套火山岩为洋壳向大陆地壳俯冲形成的活动大陆边缘弧构造背景。

在 TAS 图解(图 5-A)中,样品 16LA02、16LA03 均落入安山岩-粗安岩区域,属于亚碱性系列,样品 16LA01 落入粗面玄武岩和玄武质粗面安山岩区域。这 3 个玄武岩样品根据 N_2O 和 K_2O 含量关系,可进一步细分为钾质粗面玄武岩和橄榄粗安岩(Le Maitre, 2002)。在 $\text{Nb/Y}-\text{Zr/TiO}_2$ 图解(图 5-B)中,样品点基本都落入安山岩-玄武岩区域。在研究俯冲带火山岩的 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 5-C)中,大部分样品点也是落在钙碱性区域,2 个样品点落入钾玄岩区域,还有 1 个玄武岩样品点落在钾玄岩与高钾钙碱性玄武岩的分界处,这些玄武岩样品仍然属于广义上的钙碱性系列。结合样品的年龄,这些主量元素地球化学特征显示,班康姆金矿火山岩样品为一套钙碱性安山岩-粗安岩和钾玄岩组合,样品整体钾含量较高,显示出陆缘弧火山岩的特征。Jakes et al. (1972) 及 Miyashiro (1974) 指出,在活动大陆边缘由大洋向大陆岩浆成分从拉斑玄武岩到钙碱性系列再到钾玄岩系列,是一个典型的陆缘弧岩浆岩构造组合。

而从样品的地球化学稀土元素配分曲线和微

量元素蛛网图(图6)看,它们具有较相似的右倾型稀土元素分配模式,轻微的Eu异常,且基本没有Ce异常;相对富集大离子亲石元素,相对亏损高场强元素,部分样品发生Sr元素的亏损,同时大多数样品的 $(\text{Nb/La})_N$ 值为0.32~0.41。以上特征也表明,样品具弧火山岩的地球化学亲缘性。

火山岩的 K_2O 和 Na_2O 元素在后期的风化作用和变质作用中活动性较强,而Ti、Zr、Y、Nb、V、Sc、REE等元素属于相对稳定的组分,可用来进行火山岩构造环境分析(Cann, 1970; Floyd et al., 1975; Holm, 1985; Polat et al., 2002)。如图7所示,碱性元素Rb与碱土元素Sr、Ba和Zr之间没有显著的相关性,而Nb、Y、La、Nd和Sm与Zr具有一定的相关性,这些与Zr具有一定相关性的元素受后期蚀变作用影响较弱,所以可以用这些元素讨论岩石的成因及其构造背景。

样品较低的Sm/Th值(0.90~4.80)和较高的Th/Y值(0.02~0.19)表明,源区应为富集地幔。样品具有变化范围较大的Ba/Th值(19.20~406.71),

Ba/La值(1.78~53.26)和Ba/Nb值(5.03~184.12),说明这种富集过程以俯冲板片流体的参与为主,沉积物的参与较少(Su et al., 2012)。在Yb-Th-Ta图解(图8-A)中,绝大部分样品点落在活动大陆边缘区。在Nb/Yb-Th/Yb图解(图8-B)中,绝大部分样品落在陆缘弧区。样品主量和微量元素显示低 TiO_2 、Ni、Cr等元素和较高的 K_2O 、 Al_2O_3 含量特征,且富集轻稀土元素和大离子亲石元素,亏损高场强元素,具有弧岩浆岩的特征。在Th-Hf-Nb图解(图8-C)中,也落入岛弧玄武岩的区域。以上特征表明,老挝西北部班康姆金矿石炭纪火山岩属于大陆边缘弧火山岩。

Qian et al. (2015)在万象西北约100 km的Muang Feuang地区报道了早石炭世安山岩,揭示在老挝西北部自东向西由Muang Feuang向巴莱方向,石炭纪的岩浆岩类型由中低钾钙碱性中基性火山岩向中高钾钙碱性安山岩再到钾玄岩,具有活动大陆边缘弧的演化特征。Zhao et al. (2016)研究发现,黎府构造带东亚带以火山弧环境的志留纪火山碎屑岩为主。Intasopa et al. (1994)运用全岩Rb-Sr法研究了距Muang Feuang约西南100 km的泰国黎府构造带中亚带的玄武岩,测得枕状熔岩年龄为 361 ± 11 Ma,拉斑玄武岩全岩Rb-Sr同位素表明其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为3.63~2.32,低于正常型洋中脊玄武岩(约8),应属于弧后盆地玄武岩,并有晚泥盆世—早石炭世深海放射虫的记录(杨宗璘等, 2019)。这样看来,黎府地区在志留纪晚期受到俯冲作用影响,弧后盆地在早泥盆世开始拉开,但是目前在老挝西北部还没有找到相关的证据。Qian et al. (2015)认为,黎府弧后盆地向东俯冲至印支地块之下,但是按照上述岩石类型组合,黎府弧后盆地可能同时也向西俯冲至素可泰地体之下。

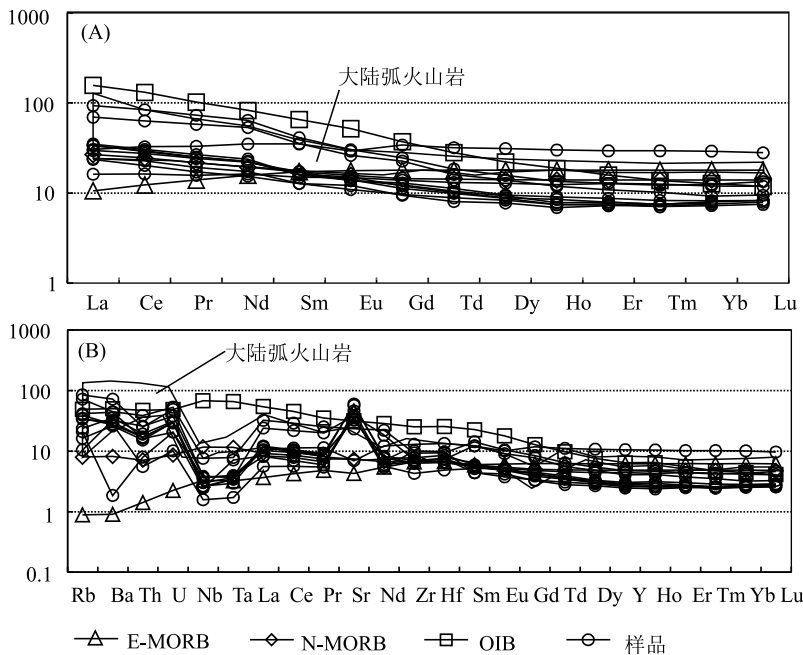


图6 老挝班康姆金矿火山岩稀土元素配分模式图(A)及微量元素原始地幔标准化蛛网图(B)(标准化数据据Sun et al., 1989; 大陆弧火山岩数据据Peng et al., 2008)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns(A) and primitive mantle normalized trace element spider diagram(B) for the volcanic rocks in Pangkuam gold deposit in Laos

E-MORB—富集型洋中脊玄武岩; N-MORB—正常型洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩

屑岩为主。Intasopa et al. (1994)运用全岩Rb-Sr法研究了距Muang Feuang约西南100 km的泰国黎府构造带中亚带的玄武岩,测得枕状熔岩年龄为 361 ± 11 Ma,拉斑玄武岩全岩Rb-Sr同位素表明其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为3.63~2.32,低于正常型洋中脊玄武岩(约8),应属于弧后盆地玄武岩,并有晚泥盆世—早石炭世深海放射虫的记录(杨宗璘等, 2019)。这样看来,黎府地区在志留纪晚期受到俯冲作用影响,弧后盆地在早泥盆世开始拉开,但是目前在老挝西北部还没有找到相关的证据。Qian et al. (2015)认为,黎府弧后盆地向东俯冲至印支地块之下,但是按照上述岩石类型组合,黎府弧后盆地可能同时也向西俯冲至素可泰地体之下。

5.3 对找矿方向的启示

现今,班康姆金矿与塞奔金矿、富开金矿等金矿床一并成为老挝境内最具规模的金矿床,但矿床的成因类型多种多样(高亚龙等, 2017),结合矿

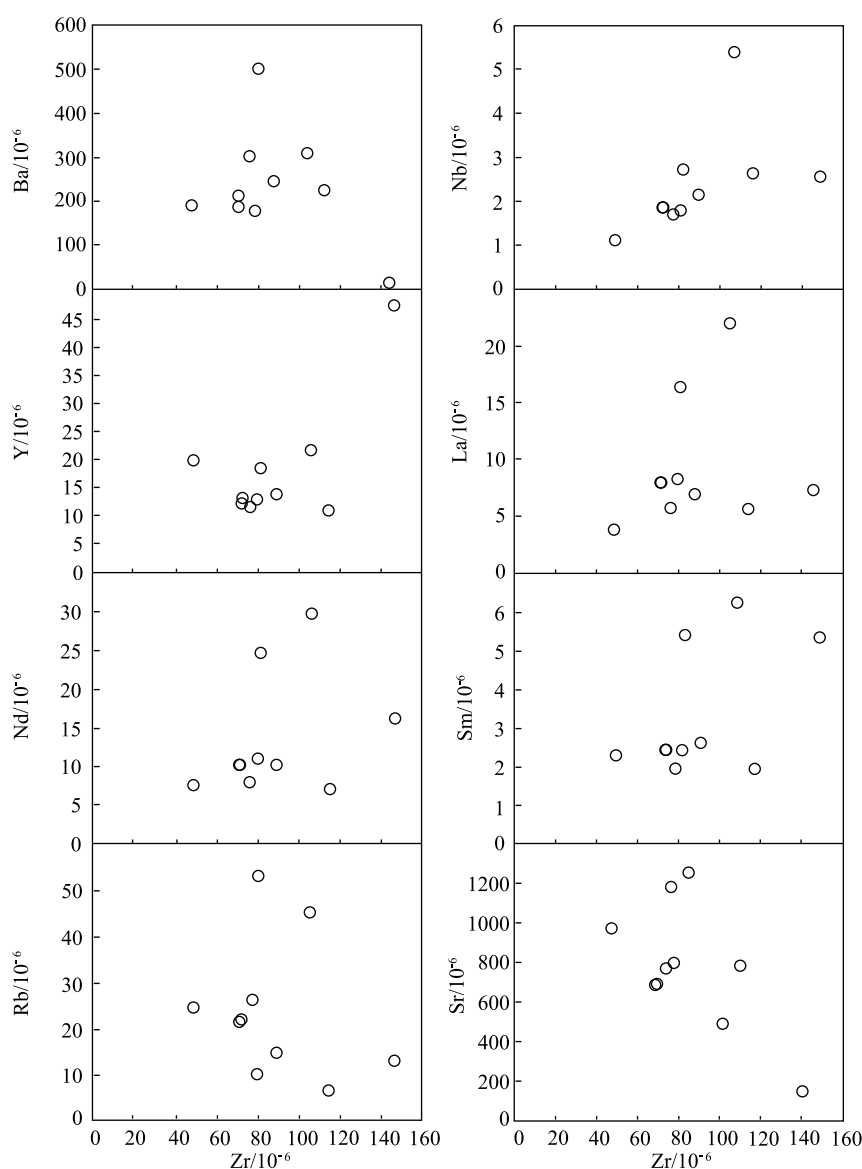


图 7 老挝班康姆金矿火山岩不相容元素与 Zr 元素协变图解

Fig. 7 Incompatible elements with Zr covariant diagrams for the volcanic rocks in Pangkuam gold deposit in Laos

区、矿床地质特征,班康姆矿床可能为破碎带复合热液型铜金矿床。在中国最重要的黄金产区——山东半岛胶东金矿集区,已探明多种金矿,其中大尹格庄金矿是典型的大型破碎带蚀变岩型金矿,绢云母化强烈,构造控矿特征明显(袁月蕾等,2023),这与班康姆金矿可能有相似性。国内外众多学者对老挝的金矿做了相关研究并试图总结成矿规律(赵延朋等,2013;Goldfarb et al.,2014;高亚龙等,2017),目前主要认为,老挝境内长山成矿带内的金矿为晚石炭世—早二叠世形成,而黎府成矿带内的金矿为晚二叠世—早中三叠世形成(Goldfarb et al.,2014;Kamvong et al.,2014;Salam et al.,2014)。尤其

是,近年来对老挝中部长山带与黎府带结合部位的富开金矿及其周围的 Ban Houayxai 矿床、Long Chieng Track 矿床的一系列研究(Kamvong et al.,2014;Manaka et al.,2014;Leaman et al.,2019),都表明这些矿床形成于晚石炭世—早二叠世板块俯冲背景。如 Kamvong et al.(2014)提出,长山成矿带富开金矿和泰国黎府构造带的 PUT1 金矿的形成分别与晚石炭世和中三叠世的埃达克岩密切相关。目前,大量的研究表明,构造单元上黎府带和也可以向北经朗勃拉邦与中国西南地区的哀牢山带联系对比(Qian et al.,2015;文件生等,2018;Shi et al.,2019;2021),它们同属于特提斯火山弧,且构造变

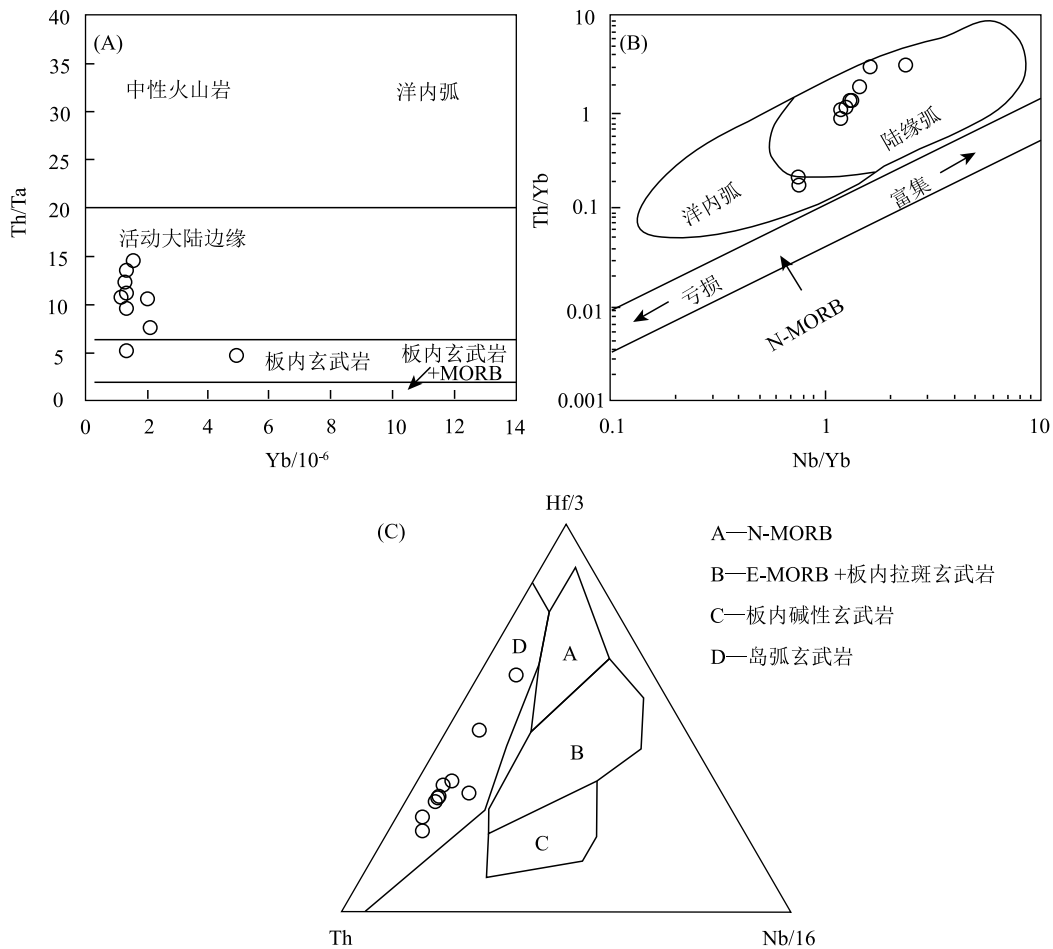


图 8 老挝班康姆金矿火山岩构造环境判别图解

Fig. 8 Tectonic setting discrimination diagrams for the volcanic rocks in Pangkuam gold deposit
A—Yb—Th/Ta 图解(底图据 Gorton et al.,2000);B—Nb/Yb—Th/Yb 图解(底图据 Pearce et al.,1995);C—Th—Hf—Nb 图解(底图据 Wood,1980);
MORB—洋中脊玄武岩;E-MORB—富集型洋中脊玄武岩;N-MORB—正常型洋中脊玄武岩

形较强;地理条件上该地区与东南亚地区自然环境接近,地表覆盖较严重,河网密布,地球化学填图在区域找矿勘探上具有较明显的优势。哀牢山带的金矿主要在基性超基性岩中发现,黎府带金矿区研究的新发现可能表明,哀牢山带的断裂和石炭纪—三叠纪中基性弧火山岩是另外较重要的找矿方向。

老挝 1:100 万地球化学填图工作显示,该地区 Au 异常范围大、强度高,是主要的目标矿产(王玮等,2020),然而,老挝境内黎府构造带矿床的研究较少,这也造成了老挝的长山和沙耶武里 2 个主要的金矿成矿带之间缺少对比研究。目前对于班康姆金矿,中国学者们延续之前的认识,认为占矿区 80% 面积的安山岩系列均属于二叠纪—三叠纪火山岩(卢汉堤等,2017;宁庚陈等,2017;潘瀚等,2017)。而本文通过年代学研究,发现班康姆金矿

矿区存在晚石炭世火山岩,该火山岩可能是较重要的控矿因素。之前的研究主要集中于找矿勘探方面,还需要对班康姆金矿与矿区火山岩之间的成因联系进行更多的研究,同时也需要对老挝西北部地区更多的金矿床进行系统研究,从而总结老挝西北部金矿的成矿规律,完善老挝境内金矿带的研究,并指导找矿工作。

6 结 论

(1)班康姆金矿矿区及邻区玄武岩、绿泥石化角闪安山岩、绢云母化角闪安山岩的锆石 U—Pb 年龄分别为 304.5 ± 3.9 Ma、 309.4 ± 3.1 Ma 和 314.4 ± 3.6 Ma,时代归属晚石炭世中晚期。

(2)中基性火山岩的主量和微量元素特征显示,岩石具有低 TiO_2 、Ni、Cr 等元素、高钾及高

Al_2O_3 含量,且都较富集轻稀土元素和大离子亲石元素,亏损高场强元素,为一套钙碱性安山岩-粗安岩-钾玄岩系列,属于晚石炭世大陆边缘弧岩浆活动的产物。

(3)晚石炭世钙碱性中基性火山岩系列在矿区有一定规模出露,晚石炭世岩浆活动与金矿化的联系有待进一步研究,深部及外围找矿可能更多地需要关注火山岩。

参考文献

- Bar S M, Macdonald A S. Nan River suture zone, northern Thailand [J]. *Geology*, 1987, 15(10): 71-74.
- Burrett C, Zaw K, Meffre S, et al. The configuration of Greater Gondwana—Evidence from LA ICPMS, U-Pb geochronology of detrital zircons from the Palaeozoic and Mesozoic of Southeast Asia and China [J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(1): 31-51.
- Bunopas S. Palaeogeographic History of Western Thailand and Adjacent Parts of Southeast Asia: A Plate Tectonic Interpretation [D]. Victoria University, Wellington, New Zealand, 1981.
- Cann J R. Rb, Sr, Y, Zr and Nb in some ocean floor basaltic rocks [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1970, 10(1): 7-11.
- DGM. Lao P.D.R. Geological and Mineral Occurrence Map 1:1 000 000 [R]. Department of Geology and Mines, Lao P.D.R., Vientiane, 1990.
- Fanka A, Tsunogae T, Daorerk V, et al. Petrochemistry and zircon U-Pb geochronology of granitic rocks in the Wang Nam Khiao area, Nakhon Ratchasima, Thailand: Implications for petrogenesis and tectonic setting [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 157: 92-118.
- Feng Q L, Chonglakmani C, Helmcke D, et al. Correlation of Triassic stratigraphy between the Simao and Lampang-Phrae basins: implications for the tectonopaleogeography of Southeast Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 777-785.
- Floyd P A, Winchester J A. Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1975, 27(2): 211-218.
- Goldfarb R J, Taylor R D, Collins G S, et al. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 48-102.
- Gorton M P, Schandl E S. From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for Arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks [J]. *Canadian Mineralogist*, 2000, 38(5): 1065-1073.
- Holm P E. The geochemical fingerprints of different tectonomagmatic environments using hygromagmatophile element abundances of tholeiitic basalts and basaltic andesites [J]. *Chemical Geology*, 1985, 51(3): 303-323.
- Hutchison C S. Ophiolites in Southeast Asia [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1975, 86: 797-806.
- Intasopa S B. Petrology and geochronology of the volcanic rocks of the Central Thailand volcanic belt [D]. Canada, University of New Brunswick, Fredericton, PhD thesis, 1993.
- Intasopa S B, Dunn T. Petrology and Sr-Nd isotopic systems of the basalts and rhyolites, Loei, Thailand [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1994, 9(1/2): 167-180.
- Jakes P, White J R. Major and Trace Element Abundances in Volcanic Rocks of Orogenic Areas [J]. *GSA Bull.*, 1972, 83: 29-40.
- Kamvong T, Zaw K, Meffre S, et al. Adakites in the Truong Son and Loei fold belts, Thailand and Laos: Genesis and implications for geodynamics and metallogeny [J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(1): 165-184.
- Leaman P, Manaka T, Jarical K, et al. The geology and mineralization of the Long Chieng Track (LCT) subvolcanic Au-Ag-Cu-Pb-Zn deposit, LaoPDR [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 106: 387-402.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckheisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27: 745-750.
- Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A Classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the international union of geological sciences subcommission on the systematics of igneous rocks [M]. London: Blackwell Scientific Publication, 1989.
- Le Maitre R W. Igneous rocks—A classification and glossary of terms. Recommendations of the IUGS subcommission on the Systematics of Igneous Rocks (2nd Edition) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34-43.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Science Bulletin*, 2010a, 55(15): 1535-1546.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China orogen: U-Pb dating, Hf Isotopes and trace Elements in zircons from Mantle Xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 2010b, 51(1/2): 537-571.
- Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 42003, Berkeley, CA, 2003.
- Manaka T, Zaw K, Meffre S, et al. The Ban Houayxai epithermal Au-Ag deposit in the Northern Lao PDR: Mineralization related to the Early Permian arc magmatism of the Truong Son Fold Belt [J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(1): 185-197.
- Metcalfe I. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 1-33.
- Miyashiro A. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins [J]. *American Journal of Science*, 1974, 274(4): 321-355.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the composition of

- volcanic arc lavas[J]. Annual Review Earth & Planetary Science Letter, 1995, 23(1): 251-285.
- Peng T P, Wang Y J, Zhao G C, et al. Arc-like volcanic rocks from the southern Lancangjiang zone, SW China: geochronological and geochemical constraints on their petrogenesis and tectonic implications[J]. Lithos, 2008, 102: 358-373.
- Polat A, Hofmann A W, Rosing M T. Boninite-like volcanic rocks in the 3.7-3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland: geochemical evidence for intra-oceanic subduction zone processes in the early Earth[J]. Chemical Geology, 2002, 184(3/4): 231-254.
- Qian X, Feng Q, Yang W, et al. Arc-like volcanic rocks in NW Laos: Geochronological and geochemical constraints and their tectonic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 98(98): 342-357.
- Qian X, Feng Q, Wang Y, et al. Petrochemistry and tectonic setting of the Middle Triassic arc-like volcanic rocks in the Sayabouli area, NW Laos[J]. Journal of Earth Science, 2016, 27(3): 365-377.
- Salam A, Zaw K, Meffre S, et al. Geochemistry and geochronology of the Chatree epithermal gold-silver deposit: Implications for the tectonic setting of the Loei Fold Belt, central Thailand[J]. Gondwana Research, 2014, 26(1): 198-217.
- Shi M F, Wu Z B, Liu S S, et al. Geochronology and petrochemistry of volcanic rocks in the Xaignabouli area, NW Laos[J]. Journal of Earth Science, 2019, 30(1): 37-51.
- Shi M F, Khin Z, Liu S S, et al. Geochronology and petrogenesis of Carboniferous and Triassic volcanic rocks in NW Laos: Implications for the tectonic evolution of the Loei Fold Belt[J]. Journal of Asian Earth Science, 2021, 208: 104661.
- Sone M, Metcalfe I. Parallel Tethyan sutures in mainland Southeast Asia: New insights for Palaeo-Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2008, 340(2/3): 166-179.
- Su Y P, Zheng J P, Griffin W L, et al. Geochemistry and geochronology of Carboniferous volcanic rocks in the eastern Junggar terrane, NW China: Implication for a tectonic transition[J]. Gondwana Research, 2012, 22: 1009-1029.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society London Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20(4): 325-343.
- Wood D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 50: 11-30.
- Zaw K, Meffre S, Lai C K, et al. Tectonics and metallogeny of mainland Southeast Asia—a review and contribution[J]. Gondwana Research, 2014, 26: 5-30.
- Zhao T Y, Qian X, Feng Q L. Geochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotopic constraints on the petrogenesis of the Silurian rhyolites in the Loei fold belt and their tectonic implications[J]. Journal of Earth Science, 2016, 27(3): 391-402.
- Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones[J]. Chemical Geology, 2012, 328: 5-48.
- 迟占东, 史琪, 康铁锁. 老挝班康姆金矿地球化学特征及找矿方向[J]. 地质论评, 2017, 63(S1): 183-184.
- 高亚龙, 牛英杰, 刘智勇, 等. 老挝金矿资源分布特征与成矿远景[J]. 现代矿业, 2017, 5: 27-32.
- 康铁锁, 胡远档, 宁庚陈, 等. 老挝班康姆铜金矿床地质特征及成矿规律[J]. 矿产与地质, 2016, 30(5): 778-782, 788.
- 卢汉堤, 潘翰, 康铁锁, 等. 老挝班康姆铜金矿床地质物化探综合找矿预测[J]. 矿产与地质, 2017, 31(6): 1141-1146.
- 宁庚陈, 赵延朋, 康铁锁, 等. 老挝 Pangkham 铜金矿床地质及围岩蚀变特征[J]. 世界有色金属, 2017, 10: 268-270.
- 潘瀚, 李学彪, 赵延朋, 等. 老挝班康姆金矿地质特征与控矿因素分析[J]. 有色金属工程, 2017, 7(2): 76-80.
- 史琪, 赵延朋, 迟占东, 等. 老挝班康姆铜金矿床地质特征及找矿方向[J]. 矿产与地质, 2016, 30(4): 568-572.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 48(s1): 26-30.
- 王玮, 王学求, 张必敏, 等. 老挝全国地球化学填图与成矿远景区预测[J]. 地球学报, 2020, 41(1): 80-90.
- 文件生, 黎泽阳, 杨静, 等. 老挝沙耶武里地区晚石炭世火山岩地球化学及同位素年代学研究[J]. 矿物岩石, 2018, 38(1): 80-90.
- 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- 夏瑜, 周卫宁, 单志强. 老挝班康姆某矿床铜金矿石工艺特性研究[J]. 地质与勘探, 2017, 53(1): 198-206.
- 杨宗璘, Senebottalath V, 孙慧, 等. 泰国-老挝黎府构造带晚泥盆世—早石炭世放射虫动物群及其地质意义[J]. 微体古生物学报, 2019, 36(3): 224-231.
- 袁月蕾, 刘晨辰, 柳旭光, 等. 胶东大尹格庄金矿床构造蚀变分带特征与成矿关系[J]. 地质通报, 2023, 42(4): 576-588.
- 赵延朋, 何国朝, 陆家海. 老挝典型金矿床地质特征及成矿模式[J]. 矿产与地质, 2013, (S1): 41-46.
- 赵延朋, 莫江平, 王晓曼. 老挝班康姆铜金矿床找矿标志及成矿预测研究[J]. 矿产与地质, 2015, 29(2): 178-183, 188.
- 赵延朋, 王晓曼, 康铁锁. 老挝班康姆铜金矿床成矿条件及成矿机理研究[J]. 矿产与地质, 2016, 30(6): 901-908.
- 赵延朋, 康铁锁, 宁庚陈, 等. 老挝班康姆铜金矿床火山-侵入杂岩地球化学特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2017, 36(3): 281-294.