

· 专题研究 ·

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

赵延朋, 康铁锁, 宁庚陈, 葛 华, 潘 瀚

(中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004)

摘 要: 班康姆铜金矿床是近年来新发现的大型铜金矿床。前人研究初步表明研究区成矿作用与古特提斯洋壳俯冲消减所产生的岩浆作用密切相关,但是缺乏岩石地球化学证据。笔者于研究区地表、钻孔采集了13件火山岩-侵入岩新鲜岩石,开展了主量元素、微量元素、稀土元素分析测试。研究表明该区安山质-侵入杂岩具有岛弧钙碱性火山岩的地球化学特征,构造环境判别图显示该套岩石属于大洋弧环境,形成于大洋消减带,与洋壳板片俯冲有关。安山质-侵入杂岩来源于地幔楔,并经历了结晶分异作用,而煌斑岩形成于板片消减而富集的地幔部分熔融。通过与黎府构造带矿床稀土、微量元素特征对比,证实班康姆矿区与 Chatree 矿区火山岩及金矿床形成于同一期构造岩浆成矿作用,进一步表明了黎府构造岩浆带在晚二叠世-早三叠世发生了一次重要的区域成矿作用。

关键词: 地球化学特征;岩石成因;地质意义;铜金矿;班康姆;老挝

中图分类号: P588.1; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)03-0281-14

Geochemical characteristics of the volcanic intrusive complex in the Pangkuam copper-gold deposit of Laos and its geological significance

ZHAO Yan-peng, KANG Tie-suo, NING Geng-chen, GE Hua and PAN Han
(China Nonferrous Metals (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd., Guilin 541004, China)

Abstract: The Pangkuam deposit is a large-sized copper-gold deposit newly discovered in Laos. Previous studies held that the gold mineralization in the study area was closely related to the magmatic activity with the subduction of the Paleo-Tethys oceanic plate and crust vanishing; nevertheless, such an argument has not been supported by convincing geochemical evidence. In the study area, 13 samples of volcanic rock and intrusive rock were collected in order to analyze the content of main elements, trace elements and rare earth elements (REE). The research result shows that the andesitic intrusive rocks have the geochemical features of calc-alkaline volcanic rocks in an island arc environment. Tectonic discrimination diagram indicates that the rocks belong to an oceanic arc environment, related to the subduction of the oceanic plate. The formation process occurred in an oceanic subduction zone. The magma of volcanic rock and intrusive rock originated from the mantle wedge with crystallization differentiation. The lamprophyre was formed by the mantle melting, which was enriched during the plate subduction. Based on a comparison with the geochemical features of REE and trace elements of several deposits in Chatree magmatic belt, the authors hold that volcanic rocks and gold deposits in the two mining areas originated from the same stage of tectonomagmatic mineralization process. The result has further demonstrated that there existed an important regional mineralization process at the Loei tectonic magmatic belt in the Late Permian-

收稿日期: 2016-08-18; 接受日期: 2017-01-22

基金项目: 桂林市科学研究与技术开发计划(2016012401)

作者简介: 赵延朋(1981-), 男, 汉族, 硕士, 高级工程师, 地质工程专业, 长期于东南亚从事地质勘查工作, E-mail: 575707720@qq.com。

Early Triassic period.

Key words: geochemical characteristics; genesis of rocks; geological significance; copper-gold deposit; Pangkum; Laos

Fund support: Guilin Scientific Research and Technology Development Plan (2016012401)

老挝班康姆铜金矿位于中南半岛琅勃拉邦-黎府铜金多金属成矿带的中南段,是近年来新发现的一个大型铜金矿床,也是该成矿带众多金矿床(点)中的少数几个大型金矿之一(图1),金、铜金属量分

别是20.5吨和3.7万吨,金、铜平均品位分别为2.41 g/t和0.69%(赵延朋等,2015)。目前,该矿床的地质研究程度较低,与其相关的研究主要集中在中南半岛区域构造演化和成矿规律(Metcalf, 2002; Zaw,

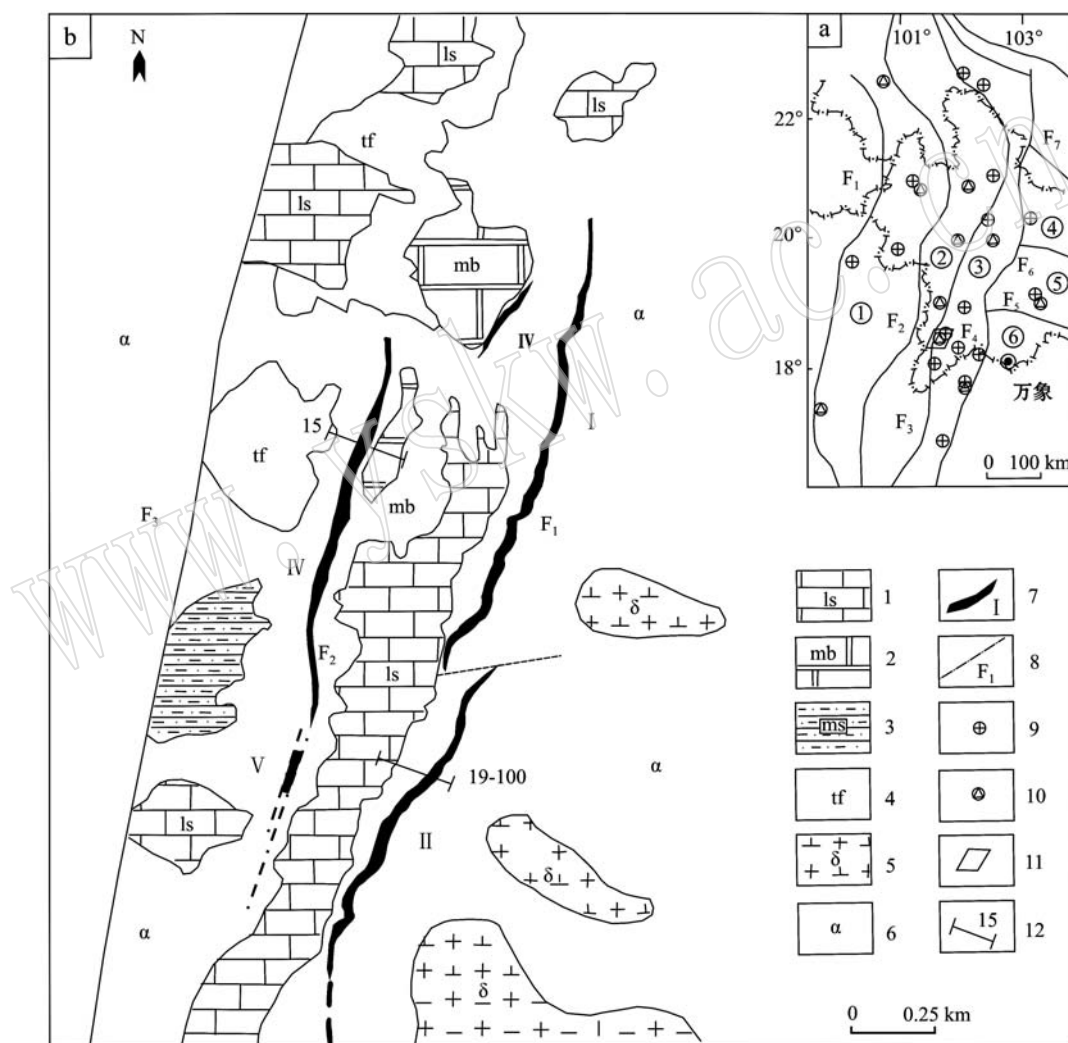


图1 老挝班康姆铜金矿床地质图(赵延朋等,2015)

Fig. 1 Geological sketch map of the Pangkum copper-gold deposit (after Zhao Yanpeng *et al.*, 2015)

1—石炭、二叠系灰岩; 2—石炭、二叠系砂卡岩化大理岩; 3—石炭、二叠系泥质砂岩; 4—安山质凝灰岩; 5—花岗闪长岩; 6—二叠-三叠系安山岩; 7—铜金矿体及编号; 8—断层及编号; 9—金矿床; 10—铜矿床; 11—研究区; 12—勘探线剖面及编号; ①—景洪-南塔岛弧带; ②—思茅-丰沙里微陆块; ③—琅勃拉邦岛弧带; ④—长山微陆块; ⑤—桑怒岛弧带; ⑥—万象-巴色微陆块; F₁—澜沧江-班南坎断裂; F₂—南本河断裂; F₃—黎府-琅勃拉邦断裂; F₄—普雷山断裂; F₅—长山-峴港断裂; F₆—蓝江断裂; F₇—马江断裂

1—Carboniferous, Permian limestone; 2—Carboniferous, Permian skarnized marble; 3—Carboniferous, Permian shaly sandstone; 4—andesitic tuff; 5—granodiorite; 6—Permian, Triassic andesite; 7—copper-gold orebody and its serial number; 8—fault and its serial number; 9—gold deposit; 10—copper deposit; 11—study area; 12—exploration line profile and its serial number; ①—Jinghong-Nanta island arc belt; ②—Simao-Fengshali micro-block; ③—Luang Prabang island arc belt; ④—Changshan micro-block; ⑤—Sangnu island arc belt; ⑥—Wanxiang-Base micro-block; F₁—Lancangjiang-Bannankan fault; F₂—Nanben River fault; F₃—Lifu-Luang Prabang fault; F₄—Poley Mountain fault; F₅—Changshan-Xiangang fault; F₆—Lanjiang fault; F₇—Majiang fault

2006; Liu *et al.*, 2011; 王宏等, 2013; Goldfarb *et al.*, 2014; Salam *et al.*, 2014; 赵延朋等, 2013; 王宏等, 2015)及班康姆铜金矿地质特征、成矿规律、构造特征等方面(赵延朋等, 2015; 王晓曼等, 2016; 康铁锁等, 2016)。这些研究初步表明班康姆铜金矿床可能是一种与斑岩相关的矽卡岩型(Sillitoe, 2010)及热液充填型复合型矿床, 成矿作用与古特提斯洋壳俯冲消减于印度支那板块之下所产生的岩浆作用密切相关, 但是缺乏岩石地球化学资料。班康姆矿区岩浆岩主要为一套中基性火山-侵入杂岩, 包括安山岩、玄武安山岩、闪长岩及拉辉煌斑岩等, 与矿区南部 Chatree 超大型金银矿区的中基性火成杂岩类似(朱延浙等, 2009; 李建昆, 2013; Salam *et al.*, 2014)。本文对这套火成岩进行了岩石地球化学分析, 了解其岩石成因及形成的构造背景, 并与同属黎府构造-岩浆-成矿带的火山岩进行地球化学对比研究, 进而探讨琅勃拉邦-黎府铜金多金属成矿带岩浆-成矿作用的相互关系。

1 大地构造背景及矿床地质特征

琅勃拉邦-黎府铜-金-银-铅锌-钨多金属成矿带呈北北东走向, 北起老挝丰沙里, 经琅勃拉邦、泰国黎府, 最后呈 SE 走向延伸入柬埔寨, 南北长逾 1 500 km, 东西宽可达 100 km, 其北段与奠边府-哀牢山成矿带相接, 东侧与马江成矿带、长山成矿带相临(图 1a)。该成矿带不仅是中南半岛重要的铜金成矿带, 而且是一条重要的构造岩浆带, 其西边界为 Sibumasu 地体与印度支那地体的缝合带(Chonglakmani *et al.*, 2001; Salam *et al.*, 2014)。沿该矿带走向分布有众多的铜金矿床(点), 其中典型的有帕奔中型韧性剪切带型金矿、萨纳坎姆大型石英脉型金矿、Chatree 超大型浅成热液型金银矿等, 而且分布有大面积的中基性火山-侵入杂岩, 铜金矿床常赋存在这些火成杂岩中。年代学研究揭示了这套与金成矿作用相关的火成杂岩年龄为 250~230 Ma, 确定了琅勃拉邦-黎府成矿带岩浆成矿事件主要发生在早三叠世至晚三叠世(Tangwattanakul *et al.*, 2009; Zaw *et al.*, 2011, 2014; Salam *et al.*, 2014)。

班康姆铜金矿床由 12 条规模不等的金矿(化)体及铜金矿(化)体组成, 其中以 I、II 号铜金矿体为主要矿体(图 1b), 其地表走向延伸分别可达 1.3 km

与 1.05 km, 倾向控制最大斜深分别为 250 m 和 200 m, 平均厚度分别为 7.08 m 和 7.27 m, Au、Cu 的平均品位分别为 2.69g/t、0.72% 及 2.1g/t、0.62%。这些脉状及似层状矿体受黎府-琅勃拉邦区域深大断裂(F_3)的次级北北东走向、向西倾的断裂严格控制。矿区地层主要为石炭系-二叠系灰岩、泥岩质粉砂岩、大理岩及少量火山碎屑岩, 岩浆岩主要为一套中基性火山-侵入杂岩(图 1b)。矿体主要赋存在安山岩的断裂中及安山岩与大理岩的接触带, 围岩蚀变从高温石榴石、透辉石化到低温热液碳酸盐化均发育, 主要蚀变类型为绿帘石、绿泥石化, 矿体外围安山岩中青磐岩化蚀变也普遍发育。矿石构造有角砾状、脉状、致密块状及浸染状, 其中致密块状金(铜金)矿石为高品位矿石; 矿石矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、自然金、毒砂、镜铁矿等。在 NWW 向勘探线剖面中, 多组脉状或似层状矿体呈斜列展布, 且表现出“上金下铜”的空间分带特征(图 2)。

2 火山-侵入杂岩岩石学特征

班康姆地区地表出露的火成岩主要为大面积分布的安山岩(图 1b), 其次为闪长岩、玄武安山岩及英安岩, 矿区部分钻孔中可见到拉辉煌斑岩。岩石学特征方面, 安山岩呈灰绿色, 具有典型的玻基交织结构(图 3a), 斑晶矿物主要为针柱状角闪石及板柱状的斜长石, 斑晶含量约 20%~30%, 粒径分别为 1~3 mm 及 0.5~1.5 mm, 基质主要由微晶斜长石和隐晶玻璃质组成。热液蚀变强烈的安山岩常转变成青磐岩(图 3)。拉辉煌斑岩呈灰黑色脉穿插于闪长岩或安山岩中, 具有煌斑结构(图 3c、3d), 斑晶为无色自形柱状辉石(体积分数 15%, 下同), 可见环带结构, 部分被蛇纹石交代, 基质主要为长柱状角闪石(30%)、长板状斜长石(40%)及粒状辉石(15%)。

3 火山-侵入杂岩地球化学特征

本次研究的样品采自于班康姆矿区地表露头或钻孔中, 均为相对新鲜的岩石样品。分析测试在中国有色桂林矿产地质研究院测试中心完成, 主元素测定采用滴定法、分光光度法、原子吸收光谱法及重量法, 微量元素采用电感耦合等离子质谱法测定, 主微量数据、微量元素数据见表 1。

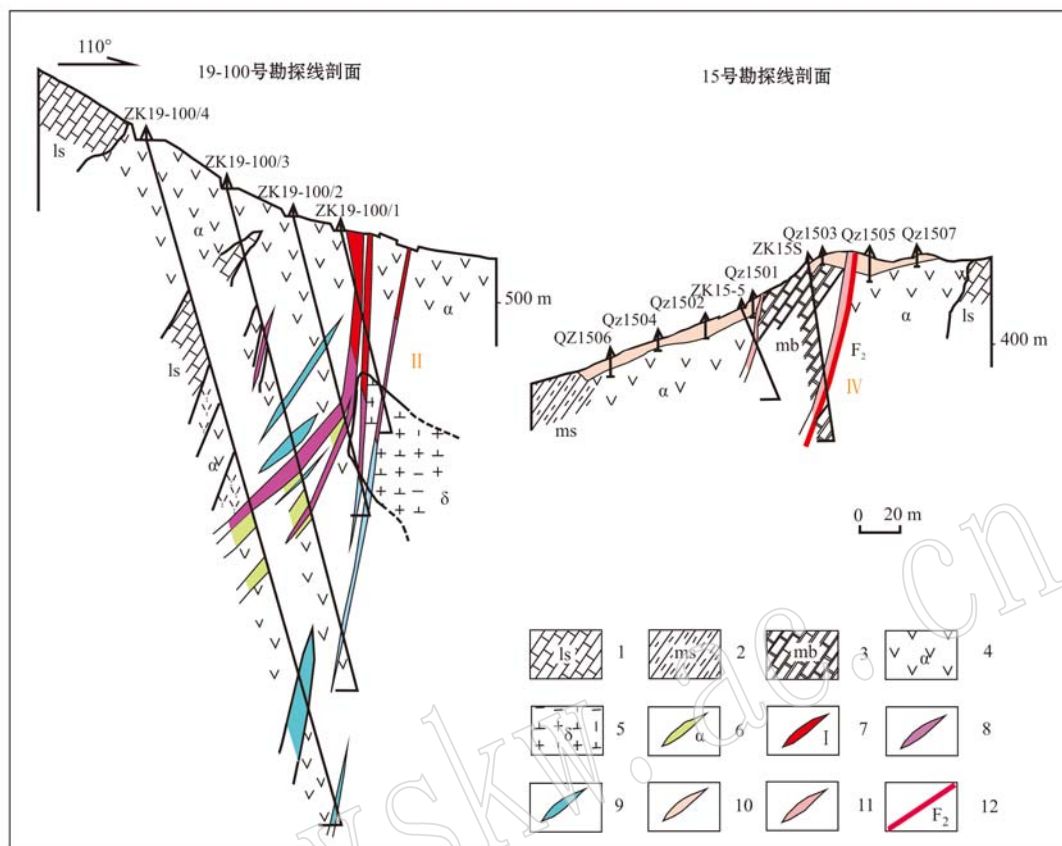


图 2 老挝班康姆铜金矿 19-100、15 号勘探线剖面图(据赵延朋等, 2015)

Fig. 2 Geological sections along No. 19-100 and 15 exploration lines of the Pangkuam copper-gold deposit (after Zhao Yanpeng *et al.*, 2015)

1—灰岩; 2—粉砂质泥岩; 3—大理岩; 4—二叠-三叠系安山岩; 5—闪长岩; 6—青磐岩化、黄铁矿化安山岩; 7—金矿体及编号; 8—铜金矿体; 9—铜矿体; 10—残坡积型氧化矿; 11—矿(化)体; 12—断层及编号
1—limestone; 2—siliceous mudstone; 3—marble; 4—Permian-Triassic andesite; 5—diorite; 6—propylitized, pyritized andesite; 7—gold orebody and its serial number; 8—copper-gold orebody; 9—copper orebody; 10—residual slope type oxide ore; 11—ore (mineralized) body; 12—fault and its serial number

3.1 主量元素特征

班康姆矿区火山-侵入杂岩主要由安山质火山-侵入岩及晚期拉辉煌斑岩脉构成。安山质杂岩 SiO_2 含量为 50.04% ~ 66.47%, 平均 56.93%; 低 K_2O (0.48% ~ 1.48%, 平均 0.99%), 富钠 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 2.7 ~ 5.9, 平均 4.3), $\text{Mg}^\#$ 为 46 ~ 78, 平均为 58。在 $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$ 图解中其主要分布于亚碱性安山岩-英安岩区(图 4)。 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解(图 5a)及岩浆系列 AFM 图解(图 5b)显示其属于拉斑-钙碱性过渡系列岩石。总体来说, 班康姆安山质火山-侵入岩主量元素表现出了岛弧火山岩的岩石地球化学特征(Miyashiro, 1974)。相对安山质杂岩, 拉辉煌斑岩具有低 SiO_2 (41.71% ~ 45.92%)、高 MgO (9.84% ~ 10.3%) 及 $\text{Mg}^\#$ (68)、富钾等特征。

在主元素成分变异图解中, 研究区安山质杂岩

的 Al_2O_3 、 TFeO 、 CaO 、 MgO 等含量与 SiO_2 含量表现出明显的岩浆结晶分异趋势(图 6), 推测其来源于同一母岩浆演化的产物。而拉辉煌斑岩脉在 Harker 图解中不在安山质杂岩的演化趋势线上, 暗示其与前者非同一岩浆演化的产物, 与其作为晚期岩脉的地质产状是一致的。

3.2 微量元素特征

班康姆安山质火山-侵入杂岩低 Ni (2.94×10^{-6} ~ 42.70×10^{-6} , 平均 15×10^{-6}), V 比 Ni 含量高 1 个数量级; 低 Rb (14.50×10^{-6} ~ 25.80×10^{-6} , 平均 19×10^{-6}) 及高 Sr (534×10^{-6} ~ 1045×10^{-6} , 平均为 771×10^{-6}); 低 Rb/Sr 值 (0.02 ~ 0.04, 平均 0.03); Th/U 值为 1 ~ 4, La/Yb 值为 1.2 ~ 4.3, K/Rb 值为 274 ~ 700, 平均为 432。这些微量元素特征与岛弧钙碱性安山岩的微量元素特征基本一致

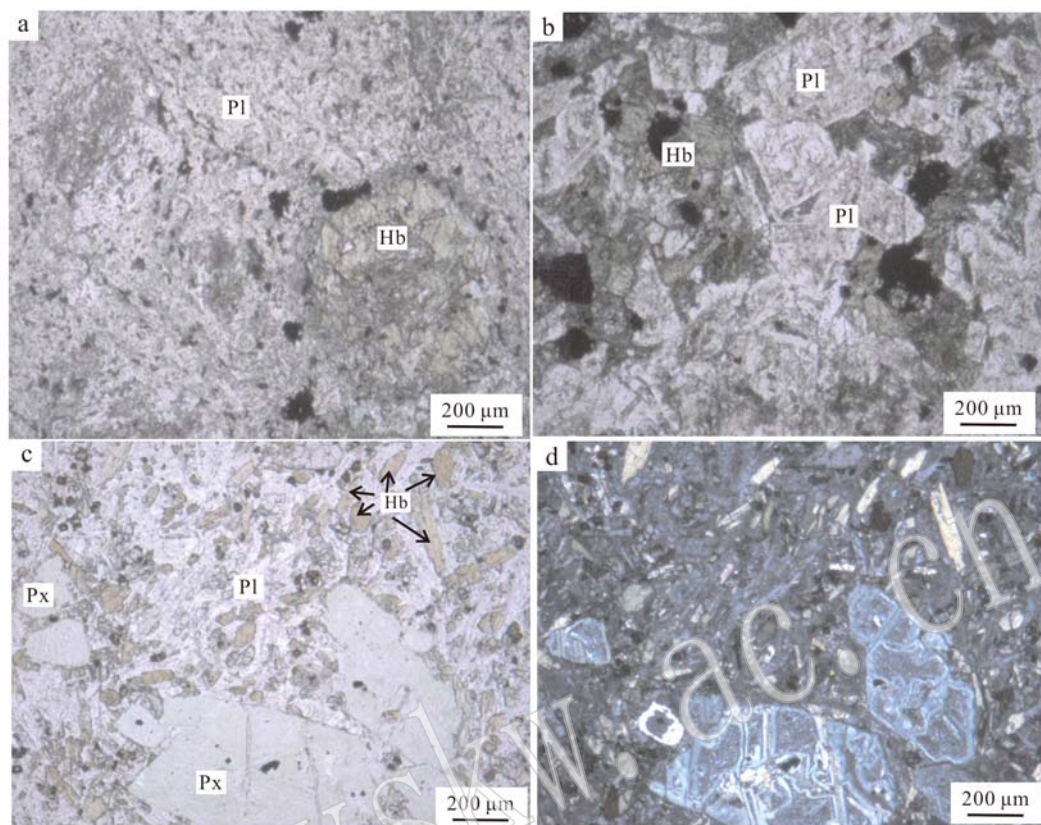


图3 班康姆铜金矿区火山-侵入杂岩显微照片

Fig. 3 Microscopic photos of igneous rocks in the Pangkuam copper-gold deposit

a—安山岩, 单偏光; b—细粒闪长岩(SB19), 单偏光; c—拉辉煌斑岩(SHHB48), 单偏光; d—拉辉煌斑岩(SHHB48), 正交偏光;

Pl—斜长石, Hb—角闪石, Px—辉石

a—andesite, plainlight; b—fine-grained diorite (SB19), plainlight; c—pull brilliant porphyry (SHHB48), plainlight;

d—pull brilliant porphyry (SHHB48), crossed nicols; Pl—plagioclase; Hb—hornblende; Px—pyroxene

(Jakeš and Gill, 1970; Green, 1980; Bailey, 1981)。

安山质杂岩具有相似的稀土元素配分曲线, 没有明显的轻重稀土元素分馏(图 7a), 具有大洋环境安山岩的稀土元素参数(陈德潜等, 1990), 例如 ΣREE 为 $27.80 \times 10^{-6} \sim 63.90 \times 10^{-6}$, 平均为 43.5×10^{-6} ; $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}}$ 为 $0.9 \sim 2.92$, 平均为 1.47 ; Eu/Sm 为 $0.25 \sim 0.38$, δEu 为 $0.74 \sim 1.12$, 平均为 0.97 ; 与厚地壳的安第斯大陆边缘弧稀土元素配分型式存在明显差异(图 7a)。在微量元素原始地幔标准化图解中, 班康姆安山质杂岩富集大离子亲石元素 K、Rb、Ba、Pb、Sr, 相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti, 具有典型岛弧岩浆岩的微量元素特征(Kay, 1978; Saunders *et al.*, 1980; McCulloch and Gamble, 1991; Jakeš and Gill, 1997; Kelemen *et al.*, 2003; Aghazadeh *et al.*, 2015), 且曲线型式与具有陆壳的日本岛弧安山岩存在差异, 而与太平洋 Less-

er Antilles 火山岩(图 7b)及中菲律宾 Cebu 洋内弧火山岩(Deng *et al.*, 2015)较为一致。图 7 中, 稀土球粒陨石标准化数值采用 Boynton(1984), 蛛网图标准化数值采用 Sun 和 McDonough(1989), 大陆边缘弧安山岩数据采用南美安第斯北部火山岩带 Ecuador 地区 33 个安山岩($\text{SiO}_2 = 56\% \sim 62\%$)的平均值(Garrison *et al.*, 2011), 日本岛弧安山岩数据来自日本东北 Ryozen 组中新世 4 个安山岩的平均值($\text{SiO}_2 = 54.36\% \sim 56.91\%$)(Shuto *et al.*, 2013), 大洋弧安山岩数据来自 Lesser Antilles 火山岩带北部 30 个 Quill 安山岩的平均值($\text{SiO}_2 = 53.44\% \sim 60.37\%$)(Davidson and Wilson, 2011)。

拉辉煌斑岩脉具有较高的 Cr($457 \times 10^{-6} \sim 516 \times 10^{-6}$)、Ni($192 \times 10^{-6} \sim 212 \times 10^{-6}$)含量暗示其来自于地幔的部分熔融且熔体没有经历明显的橄榄石及辉石的分离结晶作用。基性煌斑岩脉相对安山质

表 1 班康姆矿区中基性火成岩主量元素($w_B/\%$)和稀土微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果
 Table 1 Chemical composition ($w_B/\%$) and trace element and REE ($w_B/10^{-6}$) of intermediate-basic intrusive rocks in the Pangkuam copper-gold deposit

样号	BK22	B146	AB133	D117/118	zk19/1	zk19/13	BK78	zk19/16	BK119	SB19	BK36	SHHB48	SHHB97
岩性	安山岩	安山岩	安山岩	安山岩	英安岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	玄武安山岩	拉辉煌斑岩	拉辉煌斑岩
SiO ₂	55.11	53.95	56.18	6.01	66.47	54.77	62.88	58.66	55.63	52.76	50.04	45.92	41.71
TiO ₂	0.50	0.69	0.79	0.65	0.35	0.68	0.45	0.51	0.62	0.70	0.74	2.12	1.64
Al ₂ O ₃	16.83	18.57	17.98	17.54	15.94	17.74	16.87	16.96	17.47	17.94	17.52	13.46	11.39
Fe ₂ O ₃	1.25	3.97	1.01	1.56	1.46	2.66	0.48	2.51	0.80	2.52	0.45	3.08	3.85
FeO	4.66	4.29	3.48	4.20	2.40	4.11	2.13	3.56	3.74	5.14	2.87	5.73	4.90
MgO	5.26	4.96	4.50	2.65	1.93	3.95	3.32	3.33	3.83	4.52	6.41	10.30	9.84
MnO	0.13	0.14	0.11	0.25	0.13	0.11	0.06	0.09	0.12	0.17	0.16	0.12	0.14
CaO	7.72	7.94	7.92	5.35	3.62	7.38	5.51	5.48	5.97	8.79	16.30	10.60	13.10
Na ₂ O	3.93	3.39	5.02	4.75	4.29	5.09	3.73	4.80	4.70	3.57	2.14	2.28	1.19
K ₂ O	1.37	0.83	0.85	1.00	0.96	0.92	0.75	1.14	1.48	1.31	0.48	1.19	2.01
P ₂ O ₅	0.14	0.11	0.13	0.12	0.11	0.12	0.19	0.18	0.18	0.12	0.12	0.60	0.57
烧失量	3.24	1.76	1.93	1.70	2.26	2.24	3.03	2.62	5.25	2.23	2.63	4.30	9.32
总量	99.99	99.92	99.59	99.53	99.57	99.95	99.54	99.95	99.97	99.96	99.98	99.96	99.92
NaO/K ₂ O	3.10	4.00	5.90	4.80	4.90	5.50	5.00	4.20	3.20	2.70	4.50	1.90	0.60
Mg [#]	62.00	53.20	65.40	46.40	48.90	52.20	70.00	50.80	60.80	52.30	58.20	68.60	67.90
La	5.30	3.90	5.20	6.30	8.10	4.10	3.40	4.30	7.80	4.80	2.60	24.40	21.80
Ce	12.60	9.50	12.80	15.10	21.60	10.30	7.90	11.90	19.40	12.00	6.70	69.60	65.80
pr	1.80	1.50	1.90	2.30	3.10	1.60	1.30	1.90	2.90	1.90	1.20	10.10	9.70
Nd	8.00	7.00	8.90	10.20	14.10	7.50	6.10	9.10	12.90	8.70	6.30	46.40	43.10
Sm	1.90	2.00	2.40	2.60	3.30	2.10	1.80	2.50	2.90	2.40	2.00	9.00	8.30
Eu	0.60	0.70	0.90	0.90	1.00	0.80	0.60	0.70	0.90	0.80	0.50	2.80	2.40
Gd	1.90	2.20	2.50	2.70	3.20	2.40	1.90	2.40	2.80	2.40	2.10	7.20	6.50
Tb	0.40	0.40	0.50	0.60	0.70	0.50	0.40	0.50	0.50	0.50	0.40	1.10	0.90
Dy	2.20	2.90	3.30	3.70	4.00	3.30	2.50	3.10	2.90	3.10	2.90	5.20	4.50
Ho	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	0.70	0.50	0.70	0.60	0.60	0.60	0.90	0.80
Er	1.40	1.80	2.00	2.40	2.60	2.00	1.60	1.90	1.60	1.80	1.70	2.30	2.00
Tm	0.30	0.30	0.40	0.40	0.50	0.40	0.30	0.40	0.30	0.30	0.30	0.40	0.30
Yb	1.70	2.20	2.60	3.00	3.50	2.50	2.20	2.50	1.80	2.20	2.10	2.20	1.90
Lu	0.30	0.30	0.40	0.40	0.50	0.40	0.30	0.40	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
ΣREE	36.90	33.10	42.20	48.70	63.90	36.20	29.00	39.90	54.60	39.40	27.80	174.70	161.60
LREE	30.20	24.60	32.20	37.40	51.30	26.40	21.20	30.50	46.70	30.50	19.40	162.30	151.00
HREE	6.70	8.50	10.00	11.30	12.60	9.80	7.80	9.40	7.90	8.90	8.40	12.40	10.60
LREE/HREE	4.51	2.89	3.22	3.31	4.07	2.69	2.72	3.24	5.91	3.43	2.31	13.09	14.25
La/Yb	3.12	1.77	2.00	2.10	2.31	1.64	1.55	1.72	4.33	2.18	1.24	2.67	11.47
Eu/Sm	0.32	0.35	0.38	0.35	0.30	0.38	0.33	0.28	0.31	0.33	0.25	0.31	0.29
Cr	142.00	49.40	21.30	15.70	12.80	89.20	18.60	17.50	79.30	13.40	47.00	516.00	457.00
Ni	42.70	16.20	11.30	5.38	2.94	12.10	8.74	6.36	30.40	8.39	18.40	192.00	212.00
Rb	20.20	18.90	18.40	21.70	17.30	14.90	18.90	23.90	25.80	15.60	14.50	12.60	30.00
Ba	303.00	201.00	187.00	142.00	176.00	237.00	158.00	204.00	226.00	420.00	32.00	255.00	624.00
Th	0.99	0.77	1.04	1.32	1.24	0.94	1.77	1.31	1.43	0.91	0.50	2.78	2.87
U	0.43	0.41	0.62	0.59	0.64	0.49	0.48	0.68	0.53	0.42	0.41	1.14	2.13
Pb	17.60	12.90	10.30	5.79	7.95	9.05	4.71	7.11	7.67	7.05	7.39	4.35	6.13
Sr	644.00	534.00	794.00	947.00	554.00	956.00	862.00	596.00	1045.00	943.00	611.00	864.00	522.00
Nb	3.44	3.07	3.45	3.65	4.56	3.59	4.00	3.90	3.68	3.17	2.96	16.50	10.90
Ta	0.54	0.38	0.42	0.39	0.41	0.42	0.38	0.33	0.31	0.46	0.47	1.10	0.65
Zr	120.00	142.00	123.00	170.00	177.00	123.00	144.00	161.00	150.00	111.00	118.00	492.00	354.00
Hf	3.25	3.17	3.55	4.58	4.62	3.25	3.75	4.04	4.04	3.09	3.12	10.00	7.75
Sc	26.40	28.50	26.60	16.80	6.70	28.10	11.50	14.80	19.10	40.50	50.30	31.50	26.10
V	198.00	211.00	227.00	160.00	52.40	238.00	104.00	154.00	146.00	287.00	338.00	274.00	231.00
Cs	3.55	1.52	2.34	2.22	0.87	1.31	1.30	1.19	1.42	0.81	2.48	0.99	1.13
Rb/Sr	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.06
Th/U	2.29	1.90	1.68	2.24	1.94	1.94	3.65	1.93	2.69	2.18	1.22	2.45	1.34

注: $Mg^{\#} = 100 \times n(Mg^{2+}) / [n(Mg^{2+}) + n(TFe^{2+})]$ 。

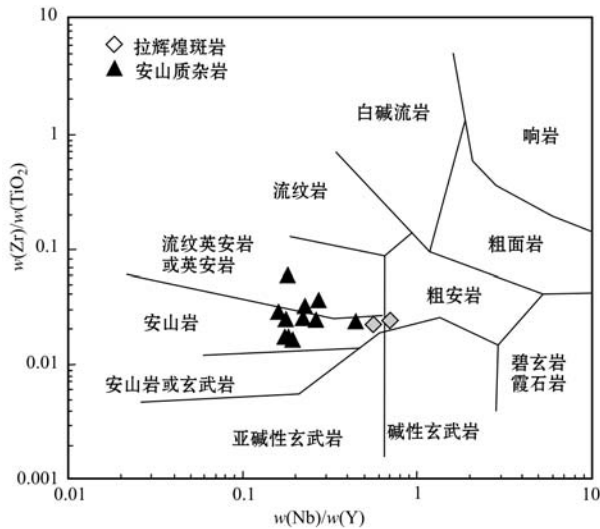


图4 火山岩微量元素分类图解(底图来源于 Winchester 和 Floyd, 1977)

Fig. 4 Classification diagram of trace elements of volcanic rocks (after Winchester and Floyd, 1977)

杂岩具有更高的稀土元素总量(ΣREE 为 $161.6 \times 10^{-6} \sim 174.7 \times 10^{-6}$)、轻稀土元素含量及陡倾的稀土元素配分型式(图 7a)。由于轻稀土元素在基性岩浆结晶分异过程中趋向富集于熔体中(杨学明等, 2000), 这进一步表明这两者非同一母岩浆演化的产物。在微量原始蛛网图中(图 7b), 富集 Rb、Ba 而亏损 Nb、Ta, 亦显示了弧岩浆岩的特征。

4 岩石成因

关于安山质岩浆的生成, Tatsumi 等(2008)曾总结出 5 种模型: ① 幔源玄武质岩浆在地壳浅部或深部(接近莫霍面)结晶分异作用; ② 幔源岩浆底侵下地壳导致基性下地壳发生深熔作用而形成原生安山质岩浆; ③ 开放系统中的基性岩浆与长英质岩浆混合或幔源基性岩浆同化花岗质地壳; ④ 受板片来源的流体或熔体交代的地幔楔发生部分熔融; ⑤ 消减的洋壳板片脱水熔融。其中第 1 种模型一般形成拉斑系列安山岩, 第 2 种模型一般形成高镁安山岩, 而后两种模型则形成广泛分布于消减带且具典型弧火山岩特征的拉斑或钙碱系列安山岩(路凤香等, 2002; 黄圭成等, 2004)。虽然 Tatsumi 等(2008)将日本东北岛弧火山岩带安山岩的成因归之为第 3 种模式, 但这种模式形成的安山岩在大陆弧环境更为常见(Keleman *et al.*, 2003)。

主微量元素研究表明班康姆安山质火山-侵入杂岩具有洋内岛弧钙碱性火山岩的地球化学特征, 构造环境判别图解亦显示这套岩石形成于大洋弧环境(图 8)。一般认为消减的榴辉岩相板片脱水熔融产生的安山质熔体富集不相容元素及轻稀土元素且具有陡倾的稀土元素配分曲线, 形成高钾安山岩或埃达克岩(Peccerillo and Taylor, 1976; Defant and

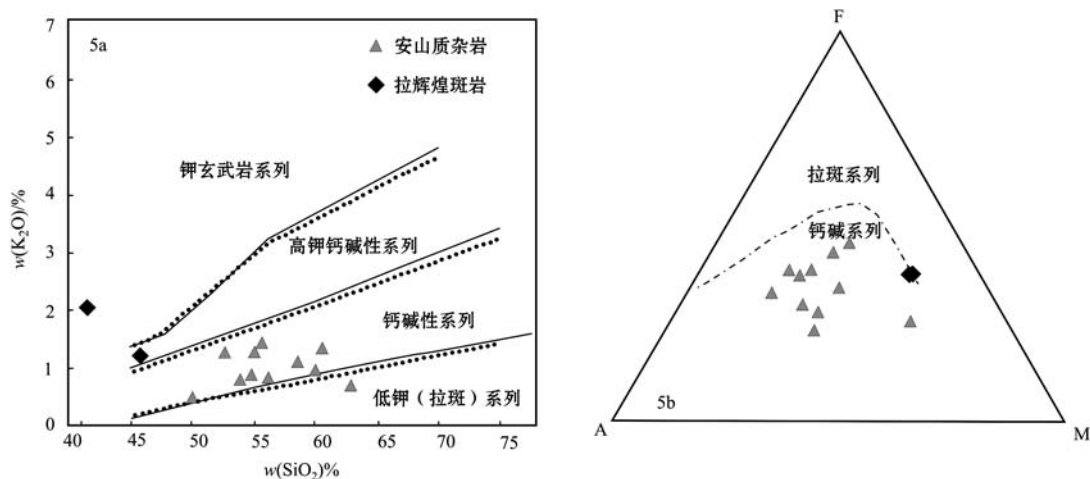


图5 班康姆矿区安山质杂岩 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (a)和 AFM 判别图解(b, 据 Irvine 和 Baragar, 1971)

Fig. 5 Discrimination diagram of $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (a) and AFM (b, after Irvine and Baragar, 1971) of andesitic complex of the Pangkuam copper-gold deposit

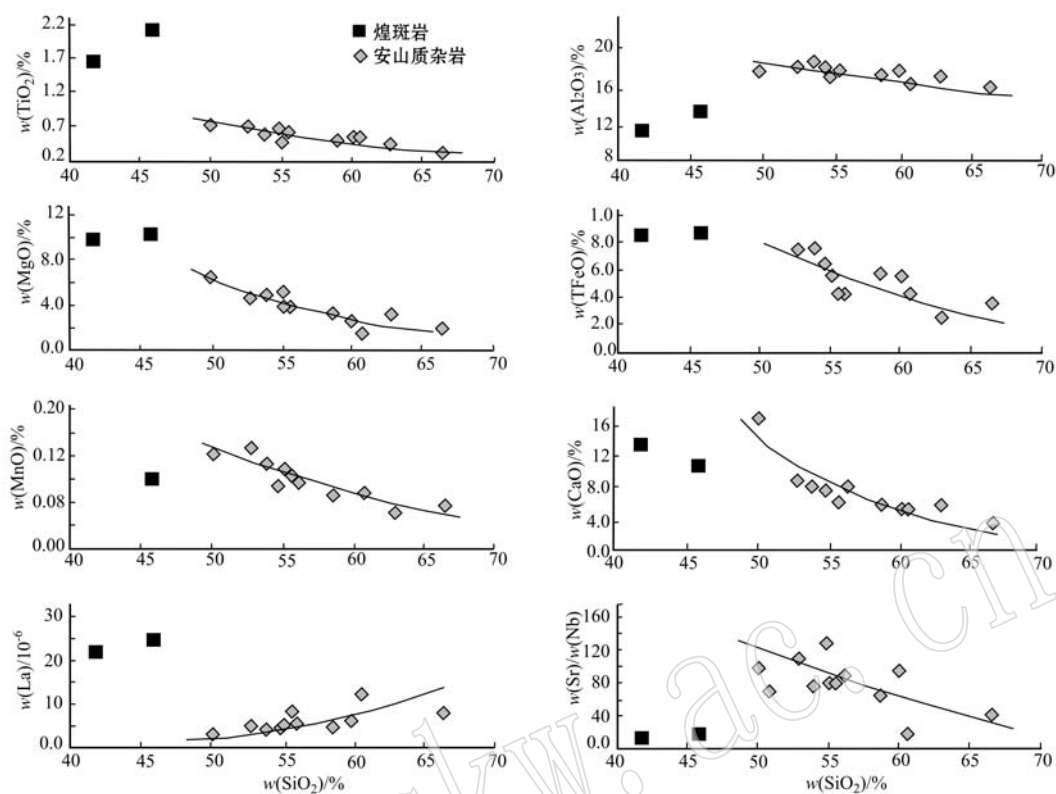


图 6 班康姆矿区火山-侵入杂岩主元素成分变异图解

Fig. 6 Variation diagram of major element composition of volcanic rocks and intrusive complex in the Pangkuam copper-gold deposit

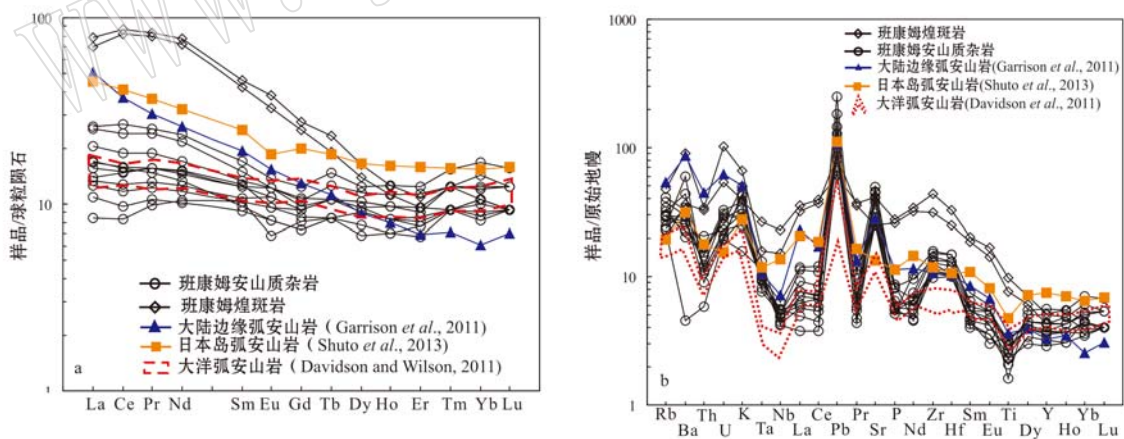


图 7 班康姆矿区安山质杂岩稀土元素配分型式(a)及微量元素蛛网图(b)

Fig. 7 REE patterns (a) and trace element spider diagram (b) of andesitic complex rock of the Pangkuam copper-gold deposit

Drummond, 1990)。班康姆安山质杂岩属于中钾钙碱系列岩石,具有缓倾的稀土元素配分曲线,在 Y-Sr/Y 图解中(图略)落入经典岛弧岩石区而非埃达克岩区,因此不可能直接来自于洋壳板片的熔融。虽然火山弧环境原始的玄武质岩浆同壳源熔体混合或同化下地壳可以产生高 $Mg^\#$ 、高 $(Dy/Yb)_N$ 值的

安山岩($Mg^\# > 60$),但是这种安山岩却具有低的 Sr/Nd 值(Keleman *et al.*, 2003)。班康姆矿区高 $Mg^\#$ 的岩石具有低 $(Dy/Yb)_N$ (0.7~0.9) 和高的 Sr/Nd 值(81~141, 平均为 98),因而推测矿区安山质杂岩不是形成于幔源基性熔体与壳源熔体的混合。中基性火成岩中低相容元素(Cr、Ni 等)含量及 $Mg^\#$ 一般

解释为幔源玄武质岩浆经历了橄榄石及辉石的分离结晶作用,但 Keleman 等(2003)认为具有 SiO_2 含量为 45%~63% 而 $\text{Mg}^\#$ 为 70 左右(或大于 70)的火山弧熔岩的形成不可能产生于这种分离结晶作用,高 $\text{Mg}^\#$ (>60)安山岩可能来源于原始的安山质岩浆,受消减的榴辉岩相板片(或沉积物)来源的熔体交代的地幔楔部分熔融形成的岩浆。Davidson 和 Wilson (2011)及 Bouvier 等 (2008)通过 Sr、Nd、Pb、Hf、Li、B 等同位素及微量元素的研究认为, Lesser Antilles 弧火山岩的原始岩浆($\text{SiO}_2 = 48\% \sim 50\%$)产生于地幔楔(亏损地幔+微量沉积物)的部分熔融,同时受

板片来源流体的交代作用,而安山岩则是这些原始岩浆经历了显著分离结晶作用的产物。班康姆安山质火山-侵入岩与 Lesser Antilles 弧火山岩具有非常相似的微量元素分布型式,而且与阿留申原始安山质弧火山岩的微量元素分布型式亦较相似(Keleman *et al.*, 2003),因此推测班康姆地区偏基性的玄武安山岩(BK36, $\text{Mg}^\# = 78$)可能代表受板片(或沉积物)来源流体/熔体交代或沉积物混合的地幔楔部分熔融产生的原始岩浆组分,而相对低 $\text{Mg}^\#$ 值(<70)的安山岩或英安岩则作为于原始玄武安山质岩浆经历了结晶分异过程的产物(图 6、图 9)。

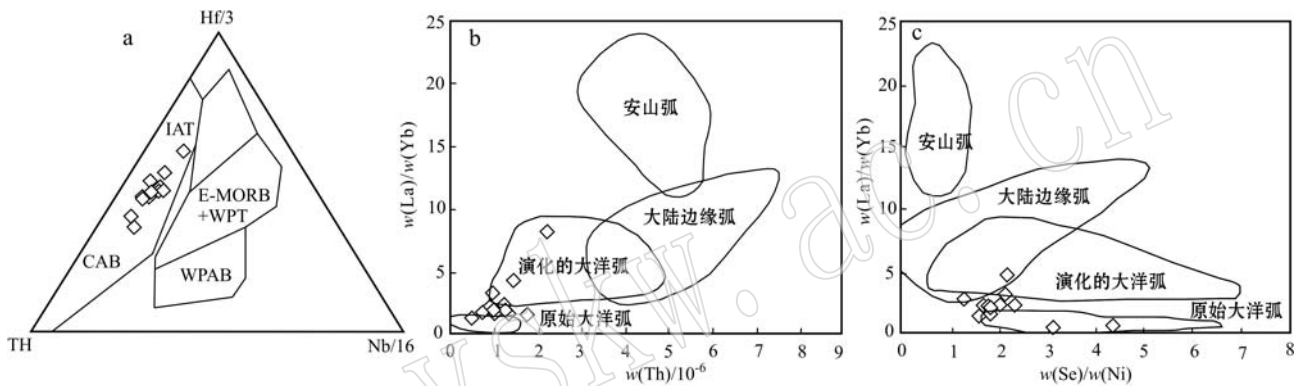


图 8 班康姆矿区安山质杂岩微量元素构造环境判别图解(图 a 据 Ringwood, 1980; 图 b、c 据 Condie, 1986)

Fig. 8 Tectonic discrimination diagram of trace elements of andesitic complex in the Pangkuam copper-gold deposit (a after Ringwood, 1980; b and c after Condie, 1986)

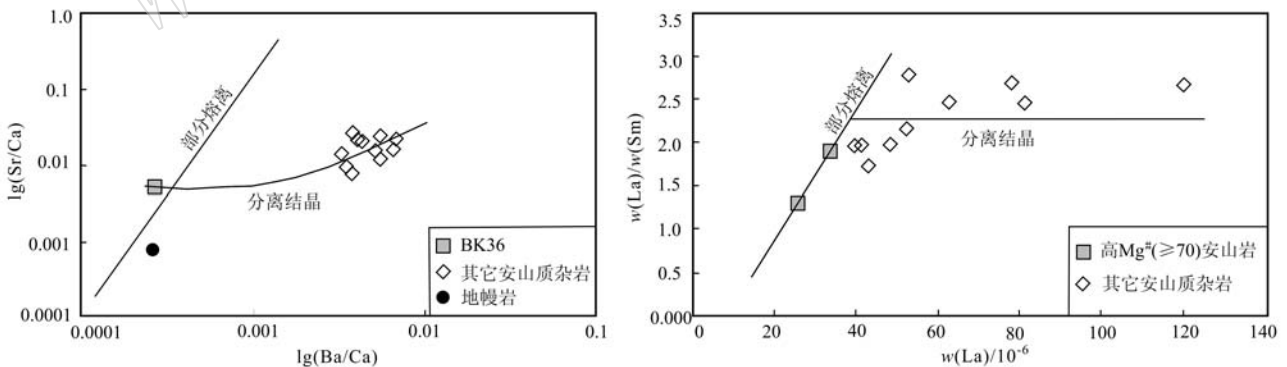


图 9 班康姆矿区安山质杂岩部分熔融与分离结晶作用图解(据 Allegre, 1978)

Fig. 9 Partial melting and fractional crystallization diagrams of volcanic rock and andesitic complex in the Pangkuam copper-gold deposit

煌斑岩具有低 SiO_2 、高 MgO 及 $\text{Mg}^\#$, 高的相容元素含量($\text{Cr} = 457 \times 10^{-6} \sim 516 \times 10^{-6}$, $\text{Ni} = 192 \times 10^{-6} \sim 212 \times 10^{-6}$), 反映了幔源岩浆来源, 但是其相对富集大离子亲石元素(Rb、Ba), 亏损高场强元素(Nb、Ta、Y)且微量元素比值(La/Nb 、 Rb/Nb 、 $\text{K}/$

Nb 、 Ce/Pb 、 Ba/La)显示了壳源标志(Taylor and McLennan, 1985; 杨学明等, 2000)。班康姆煌斑岩的这种主量元素与不相容微量元素解耦的现象在先前的许多研究中出现过, 可能与多种过程相关(Abdefadil *et al.*, 2013), 例如岩石圈地幔低程度部分熔

融,消减环境变质交代地幔的部分熔融,幔源岩浆与壳源熔体的混合或幔源岩浆在上升过程中发生了同化混染及分离结晶过程。在消减带环境,幔源岩浆所携带的这种壳源标志可以通过消减过程板片或大洋沉积物来源的熔体/流体与地幔楔橄榄岩反应而获得(Elliot *et al.*, 1997; Prelevic *et al.*, 2013)。班康姆煌斑岩具有弧火山岩微量元素特征,未经历显著的分离结晶作用,且稀土及微量元素分布型式与

Abdefadil 等(2016)报道的来自消减带富集地幔的部分熔融生成的 Spessartite 煌斑岩相似,但是与地幔柱过程相关的意大利碱性煌斑岩(Stoppa *et al.*, 2014)存在明显差异(图 10,球粒陨石标准化数值采用 Boynton, 1984; 原始地幔标准化数值采用 Sun and McDonough, 1989)。因此,本文认为班康姆煌斑岩可能形成于因板片消减而富集的地幔的部分熔融。

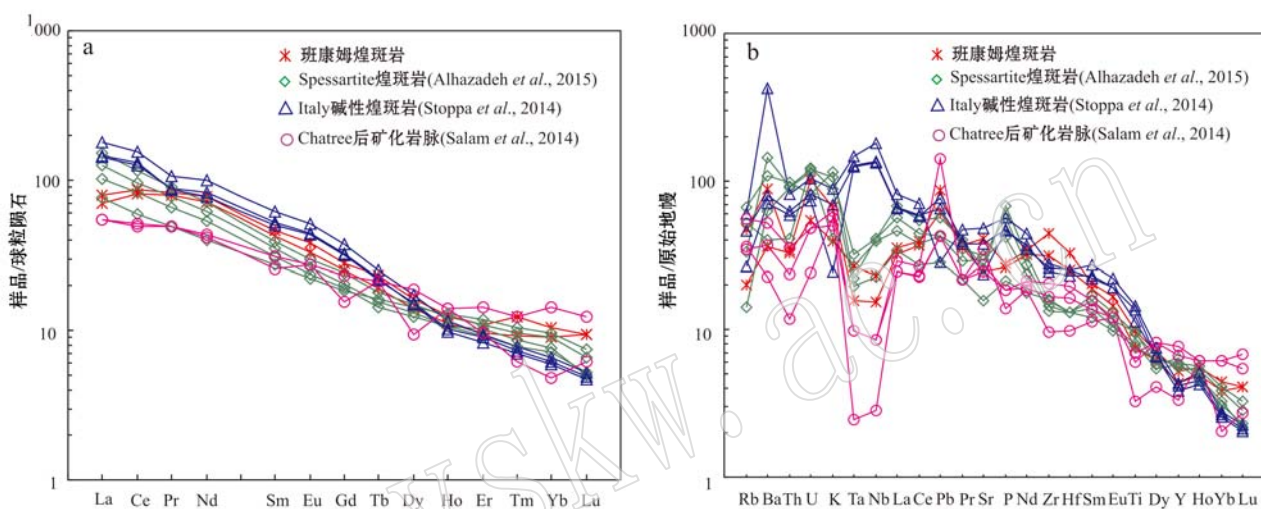


图 10 班康姆矿区煌斑岩稀土(a)及微量元素(b)图解

Fig. 10 Illustration of REE (a) and trace elements (b) of lamprophyre in the Pangkuam copper-gold deposit

在富集地幔中,富含挥发分的矿物(例如金云母或角闪石)是大离子亲石元素的主要载体(Foley *et al.*, 1996)。由含角闪石的橄榄岩部分熔融会产生低 Rb/Sr (<0.1) 及高的 Ba/Rb (>20) 的熔体,而由含金云母的橄榄岩部分熔融产生的熔体具有高 Rb/Sr (>0.1) 及低的 Ba/Rb (<20) 的特征(Furman and Graham, 1999)。班康姆煌斑岩具有低 Rb/Sr (0.01~0.06) 及高的 Ba/Rb (20.2~20.8),暗示其地幔源区富含角闪石。

消减带弧下地幔主要由亏损域及富含挥发分的变质交代域构成,这种地幔在部分熔融过程中会优先熔融变质交代域,所产生的熔体随后会诱导亏损地幔的熔融,导致最后形成的熔体既具有亏损地幔标志(高 Cr、Ni、Mg 及 $Mg^\#$) 同时又富集不相容元素(Foley, 1992; Tappert *et al.*, 2009)。班康姆高 $Mg^\#$ 安山岩(BK36)与煌斑岩均形成于消减作用所致的富集地幔的部分熔融,且具有相似的微量元素分布型式及比值(Zr/Nb、Th/Nb、Th/La、Nb/U),暗示这两者可能来自于同一地幔源区。煌斑岩相对安

山岩具有更高的 MgO 及 Cr、Ni 含量,反映了更高比例的亏损地幔组分的熔融,暗示煌斑岩的源区可能继承了安山岩熔融后的亏损地幔源区,这与煌斑岩形成于安山岩之后的地质现象是一致的。但是这种亏损的源区难以产生不相容元素的富集,一种可能的解释就是安山岩熔融后的地幔源区在板块持续消减过程中经历了再富集过程(Abdefadil *et al.*, 2013)。因此,煌斑岩相对安山岩具有更高的不相容元素(Rb、Ba)含量及相容元素(MgO、Cr、Ni)含量,可能与其地幔亏损域更高层次的部分熔融而变质交代域更低程度的部分熔融有关。

5 地质意义

班康姆铜金矿区位于老挝西北巴莱县,在区域构造中属于黎府构造岩浆成矿带(Zaw *et al.*, 2014; 王宏等, 2015)。目前,在黎府构造带已发现了多组不同年龄及大地构造背景的火山岩: ① 志留纪—泥盆纪与古特提斯洋向西消减相关的流纹岩(U-Pb 年

龄 434~374 Ma) (Intasopa and Dunn, 1994; Boonsoong *et al.*, 2011); 中石炭世—早二叠世古特提斯洋壳向东消减于 SukhoThai 地体之下 (Altermann *et al.*, 1991) 或印度支那块体之下 (Qian *et al.*, 2015, U-Pb 年龄 349~330 Ma) 产生的大陆边缘弧火山岩; ③ 晚二叠世—中三叠世古特提斯洋壳向东消减于 SukhoThai 块体之下产生的具有洋内弧岩石地球化学特征的火山岩-侵入杂岩 (260~238 Ma) (Salam *et al.*, 2014; Zaw *et al.*, 2014), 或消减于印度支那块体之下而形成的具有埃达克质地球化学特征的火山岩? 侵入岩? (Kamvong *et al.*, 2014, U-Pb 年龄 244~241 Ma) 或大陆边缘弧火山岩 (Qian *et al.*, 2016, U-Pb 年龄 237.7 ± 1.7 Ma); ④ 晚三叠世后碰撞花岗岩类 (220~200 Ma, Salam *et al.*, 2014)。而黎府构造岩浆成矿带不同类型的 Cu-Au 矿床 (矽卡岩型、浅成热液型等) 的矿化年龄分布于 305~234 Ma, 绝大部分集中在 251~244 Ma (Goldfarb *et al.*, 2014; Zaw *et al.*, 2014), 因此黎府构造带的 Cu-Au 成矿作用主要发生在早三叠世—晚三叠世安第斯大陆弧背景下, 与构造岩浆成矿作用有关。

班康姆矿区安山质杂岩与同为黎府构造带的老挝西北石炭世 Muang Fuang 大陆边缘弧安山岩、早三叠世 Puhep Cu-Au 矿区埃达克岩及 Chatree 大型浅成热液 Au-Ag 矿床赋矿区晚二叠世的岛弧拉斑玄武安山岩的稀土及微量元素分布型式存在明显差异, 而与 Chatree 矿区成矿相关的早三叠世岛弧拉斑

-钙碱过渡系列安山岩较为相似 (图 11, 球粒陨石标准化数值采用 Boynton, 1984; 原始地幔标准化数值采用 Sun and McDonough, 1989; 上述各弧岩岩浆岩曲线均采用各自样品的平均化学组成绘制)。且班康姆矿区后矿化煌斑岩脉与 Chatree 矿区的后矿化基性脉岩微量元素分布型式亦较为相似 (图 10), 暗示这两个 Au 矿床可能形成于同一时期岩浆成矿作用, 需要进一步年代学及同位素地球化学来验证。另一方面, 班康姆矿区安山质杂岩和 Chatree 矿区三叠纪安山岩均形成于大陆边缘的构造背景, 却具有洋内岛弧安山岩的岩石地球化学特征 (图 7), 表明幔源岩浆在上升过程中极少受到壳源物质的混染, 这暗示岩浆作用要么发生在洋盆内, 要么消减带幔源岩浆沿着穿壳断裂快速上升到地表。班康姆铜金矿受黎府-琅勃拉邦区域深大断裂的次级断裂控制的地质事实支持后一种推测。

6 结论

班康姆矿区火山-侵入岩主要由安山质火山-侵入杂岩及晚期的煌斑岩脉构成。安山质杂岩主微量元素研究显示其主要为钙碱系列岩石, 形成于大洋弧环境, 具有典型大洋岛弧火山岩微量元素分布特征, 其形成受消减板片/沉积物来源流体交代或沉积物混合的地幔楔部分熔融及随后的分离结晶过程控制。煌斑岩亦具有弧岩浆岩的地球化学特征, 其源区为安山岩熔融后的地幔源区在板块持续消减

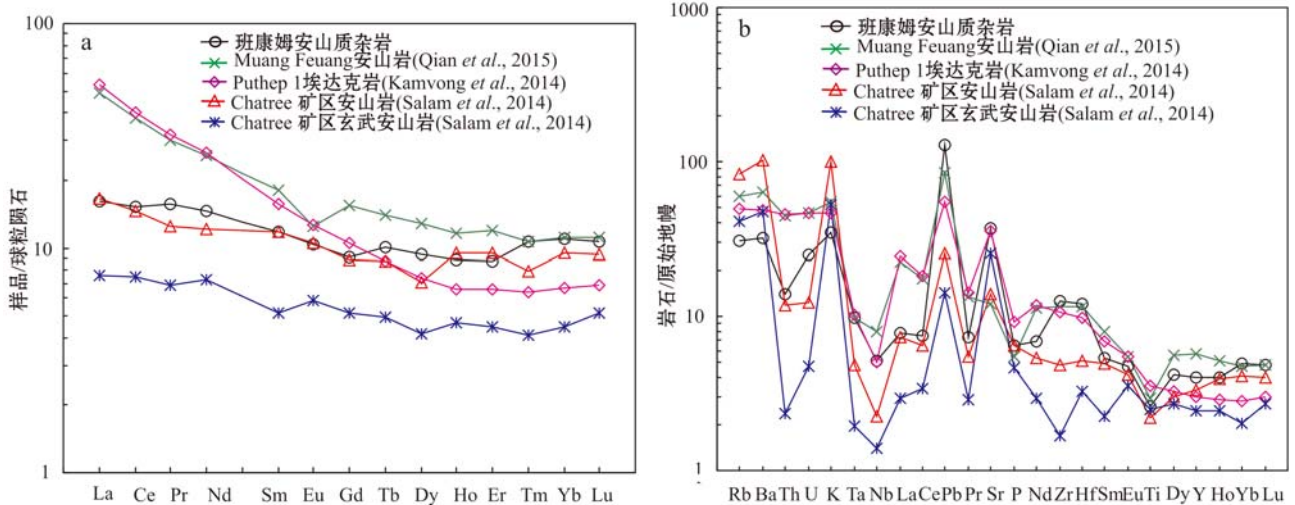


图 11 黎府构造带弧岩浆岩稀土(a)及微量元素(b)图解

Fig. 11 Illustration of REE (a) and trace elements (b) of magmatic rocks in the Pangkum copper-gold deposit

过程中经历了再富集过程。黎府构造带火山岩的区域地球化学对比研究暗示班康姆矿区和 Chtree 矿区 Au 的岩浆成矿作用可能具有同一动力背景,且受深大断裂控制,进一步暗示了黎府构造带在晚二叠—早三叠世发生了一次重要的区域成矿作用。

References

- Abdelfadil K M, Asimow P D, Azer M K, *et al.* 2016. Genesis and petrology of Late Neoproterozoic pegmatites and aplites associated with the Taba metamorphic complex in southern Sinai, Egypt[J]. *Geologica Acta An International Earth Science*, 14: 219~235.
- Abdelfadil K M, Romer R L, Seifery T H, *et al.* 2013. Calc-alkaline lamprophyres from Lusatia(Germany) Evidence for a repeatedly enriched mantle source[J]. *Chemical Geology*, 353: 230~245.
- Allegre C J. 1978. Trace Element in Igneous Petrology[M]. Amsterdam: Elsevier.
- Altermann W. 1991. New Permo-Carboniferous geochemical data from central Thailand: implication for a volcanic arc model[J]. *Palaeogeology*, 87: 191~210.
- Bailey J C. 1981. Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites[J]. *Chemical Geology*, 32: 139~154.
- Boonsoong B, Sangpradub N, Barbour M T, *et al.* 2011. An implementation plan for using biological indicators to improve assessment of water quality in Thailand[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 165: 205~215.
- Bouvier A S, Metrich N and Deloule E. 2008. Slab-derived fluids in the magma sources of St. Vincent(Lesser Antilles Arc): Volatile and light element imprints[J]. *Journal of Petrology*, 49(8): 1 427~1 448.
- Boynnton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[A]. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry [C]. Amsterdam: Elsevier, 63~114.
- Chen Deqian and Chen Gang. 1990. Practical Rare Earth Element Geochemistry[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press(in Chinese).
- Chonglakmani C, Feng Qinglai, Meischner D, *et al.* 2001. Correlation of tectono-stratigraphic units in northern Thailand with those of western Yunnan(China)[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 12(3): 207~213.
- Condie K C. 1986. Geochemistry and tectonic setting of early proterozoic supracrustal rocks in the southwestern United States[J]. *Journal of Geology*, 94: 845~864.
- Davidson J and Wilson M. 2011. Differentiation and source processes at Mt Pelee and the Quill: Active volcanoes in the Lesser Antilles Arc[J]. *Journal of Petrology*, 52(7&8): 1 493~1 531.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347(6 294): 662~665.
- Deng Jianghong, Yang Xiaoyong, Zhang Zhao Feng, *et al.* 2015. Early Cretaceous arc volcanic suite in Cebu Island, Central Philippines and its implications on Paleo-Pacific plate subduction: Constrains from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes[J]. *Contents Lists Available at Science Direct*, 230: 166~179.
- Elliot T, Younger P L and Chadha D S. 1997. The future sustainability of ground water resources in East Yorkshire: a past and present perspectives[J]. *Hydrology in a Changing Environment*, 2: 21~31.
- Foley S F. 1992. Vein-plus-wall-rock melting mechanisms in the lithosphere and the origin of potassic alkaline magmas[J]. *Lithos*, 28(3~6): 435~453.
- Foley S F, Jackson S E, Fryer B J, *et al.* 1996. Trace element partition coefficients for clinopyroxene and phlogopite in an alkaline lamprophyre from Newfoundland by LAM-ICP-MS[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(4): 629~638.
- Furman T and Graham D. 1999. Erosion of lithospheric mantle beneath the East African Rift system: Geochemical evidence from the Kivu volcanic province[J]. *Lithos*, 48: 237~262.
- Garrison J M, Davidson J P, Minard H, *et al.* 2011. Geochemistry and petrology of the most recent deposits from Cotopaxi Volcano, northern volcanic zone, Ecuador[J]. *Journal of Petrology*, 52(9): 1 641~1 678.
- Goldfarb R J, Taylor R D, Collins G S, *et al.* 2014. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia[J]. *Gondwana Research*, 25: 48~102.
- Green M M. 1980. Transposable elements in Drosophila and other Diptera[J]. *Annual Review of Genetics*, 14(14): 109~120.
- Huang Guicheng, Li Zhichang, Qiu Ruizhao, *et al.* 2014. Geologic and geochemical characteristics of volcanic rocks in Shiduo, western Gangdise, Tibet[J]. *Geoscience*, 18(4): 511~517(in Chinese with English abstract).
- Intasopa S and Dunn T. 1994. Petrology and Sr-Nd isotopic systems of basalts and rhyolites, Loei, Thailand[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 9(s 1~2): 167~180.
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Can. J. Earth Sci.*, 8: 523

- ~548.
- Jakeš P and Gill J. 1970. Rare earth elements and island arc tholeiitic series[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 9(1): 17.
- Jakeš P and Gill J. 1997. Rare earth elements and the island arc tholeiitic series[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 9: 17~28.
- Kamvong T, Zaw K, Meffre S, *et al.* 2014. Adakites in the Truong son and Loei fold belts, Thailand and Laos: Genesis and implications for geodynamics and metallogeny[J]. *Gondwana Research*, 26: 165~184.
- Kang Tiesuo, Hu Yuandang and Ning Gengchen. 2016. Geological characteristics and metallogenic regularity of Pangkuam Cu-Au deposit in Laos[J]. *Mineral Resources and Geology*, 5: 778~782, 788 (in Chinese with English abstract).
- Kay R W. 1978. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific Ocean crust[J]. *Volcanol Geotherm Res.*, 4: 117~132.
- Kelemen P B, Rilling J L, Parmentier E M, *et al.* 2003. Thermal structure due to solid-state flow in the mantle wedge beneath arcs [J]. *American Geophysical Union*, 138: 293~311.
- Li Jiankun. 2013. Geological characteristics and ore-prospecting significance of the Kongshawan porphyry gold deposit in Sayaboury Province, southwestern Laos [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34 (Supplement 1): 183~187 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wenlan, Wang Gongwen, Chen Yongqing, *et al.* 2011. The structural information and alteration information extraction and metallogenic prognosis in Laos area[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 10: 386~391.
- Lu Fengxiang, Sang Longkang, Wu Jinhua, *et al.* 2002. Petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- McCulloch M T and Gamble J A. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism[J]. *Earth and Planetary Letters*, 102: 358~374.
- Metcalfe I. 2002. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20: 551~566.
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in Island arcs and Active continental margins[J]. *American Journal of Science*, 274: 321~355.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Rare earth elements in east carpathian volcanic rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 32: 121~126.
- Prelevic D, Jacob D E and Foley S F. 2013. Recycling plus: a new recipe for the formation of Alpine-Himalayan orogenic mantle lithosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 362: 187~197.
- Qian Xin, Feng Qinglai, Wang Yuejun, *et al.* 2016. Petrochemistry and tectonic setting of the middle Triassic arc-like volcanic rocks in the Sayabouli area, NW Laos[J]. *Journal of Earth Science*, 27(3): 365~377.
- Qian Xin, Feng Qinglai, Yang Wenqiang, *et al.* 2015. Arc-like volcanic rocks in NW Laos: Geochronological and geochemical constraints and their tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98: 342~357.
- Ringwood A E. 1980. Slab-mantle interactions: Petrogenesis of intraplate magmas and structure of the upper mantle[J]. *Chemical Geology*, 82: 187~207.
- Salam A, Zaw K, Meffre S, *et al.* 2014. 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*, 26: 198~217.
- Saunders A D, Tarney J and Weaver S D. 1980. Transverse geochemical variations across the Antarctic Peninsula: implications for the genesis of calc-alkaline magmas[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 46: 344~360.
- Shuto M, Tonino F, Ohmi H, *et al.* 2013. Voltage distribution over capacitively coupled plasma electrode for atmospheric-pressure plasma generation[J]. *Nanoscale Research Letters*, 8(1): 1~7.
- Sillitoe R H. 2010. Porphy copper systems[J]. *Economic Geology*, 105: 3~41.
- Stoppa F, Alexei S R, Keith B, *et al.* 2014. Lamprophyres of Italy: early Cretaceous alkaline lamprophyres of southern Tuscany, Italy [J]. *Contents Lists Available at Science Direct*, 188: 97~122.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society of London Special Publications*, 42: 313~345.
- Tangwattananukul L, Ishiyama D, Matsubaya O, *et al.* 2009. Gold mineralization of Q prospect at Chatree deposit, central Thailand [R]. *Nmccannual Report* 16.
- Tappert R, Foden J, Stachel T, *et al.* 2009. Deep mantle diamonds from South Australia: A record of Pacific subduction at the Gondwanan margin[J]. *Geology*, 37(1): 43~46.
- Tatsumi Y, Takahashi T, Hirahara Y, *et al.* 2008. New insights into andesite genesis: the role of mantle-derived calc-alkalic and crust-derived tholeiitic melts in magma differentiation beneath Zao Volcano, NE Japan[J]. *Journal of Petrology*, 49(11): 1971~2008.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. London: Blackwell, 1~328.

- Wang Hong. 2013. Study on Tectonic Evolution and Metallogenesis in Laos and its Adjacent Regions[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- Wang Hong, Lin Fangcheng, Li Xingzhen, *et al.* 2015. The division of tectonic units and tectonic evolution in Laos and its adjacent regions [J]. *Geology in China*, 42(1): 71~84(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoman and Shi Yujiao. 2016. Geological characteristics and prospecting directions of lateritic gold deposits in Pangkuam Cu-Au mining area of Laos[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2: 193~197(in Chinese with English abstract).
- Winchester J A and Floyd P A . 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325~343.
- Yang Xueming, Yang Xiaoyong and Chen Shuangxi. 2000. Rock Geochemistry [M]. Hefei: China University of Science and Technology Press(in Chinese).
- Zaw K. 2006. Origin and genesis of Manaoke gold deposit, Sichuan Province, China: evidence from fluid inclusion and stable isotope [A]. Program with Abstracts of the First Meeting Asia Current Research on Fluid Inclusion[C], 168~170.
- Zaw K, Meffre S, Lai Chun Kit, *et al.* 2014. Tectonics and metallogeny of mainland Southeast Asia-A review and contribution[J]. *Gondwana Research*, 26: 5~30.
- Zaw K, Meffre S, Oo K L, *et al.* 2011. LA ICP-MS U-Pb zircon geochronology of Pondaung Sandstones, southern Chindwin Basin, Myanmar: Implications for tectonic interpretation [A]. Aogs: Meeting, 2011[C].
- Zhao Yanpeng, He Guochao and Lu Jiahai. 2013. Geological features and mineralization rules of the gold metallogenic belt, Laos[J]. *Mineral Resources and Geology*, 27(Supplement 1): 41~46(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yanpeng, Mo Jiangping and Wang Xiaoman. 2015. Prospecting criteria and metallogenic prediction of Pangkuam copper-gold, Laos [J]. *Mineral Resources and Geology*, 29(2): 178~183, 188(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yanzhe, Wu Jun, Hu Jianjun, *et al.* 2009. Introduction on the Geology and Mineral Resources of Laos[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 20~66(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 黄圭成, 李志昌, 邱瑞照, 等. 2004. 西藏冈底斯西段狮多地区火山岩的地质地球化学特征[J]. *现代地质*, 18(4): 511~517.
- 李建昆. 2013. 老挝西南部沙耶武里省孔沙湾斑岩型金矿地质特征及找矿意义[J]. *地球学报*, 34(增刊1): 183~187.
- 陈德潜, 陈刚. 1990. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社.
- 康铁锁, 胡远档, 宁庚陈, 等. 2016. 老挝班康姆铜金矿床地质特征及成矿规律[J]. *矿产与地质*, 05: 778~782, 788.
- 路凤香, 桑隆康, 邬金华, 等. 2002. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社.
- 王宏. 2013. 老挝及邻区构造演化与成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 王宏, 林方成, 李兴振, 等. 2015. 老挝及邻区构造单元划分与构造演化[J]. *中国地质*, 42(1): 71~84.
- 王晓曼, 施玉娇. 2016. 老挝班康姆铜金矿红土型金矿地质特征及找矿方向[J]. *矿产与地质*, 02: 193~197.
- 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜. 2000. 岩石地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- 赵延朋, 何国朝, 陆家海. 2013. 老挝典型金矿床地质特征及成矿模式[J]. *矿产与地质*, 27(增刊1): 41~46.
- 赵延朋, 莫江平, 王晓曼. 2015. 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*, 29(2): 178~183, 188.
- 朱延浙, 吴军, 胡建军, 等. 2009. 老挝地质矿产概论[M]. 昆明: 云南科技出版社.