第42卷第2期	沉和上柱坦斯地质	Sodimontary Coology and Tothyan Coology	Vol. 42 No. 2
2022 年 6 月	机你可付旋别地灰	Sedimentary Geology and Ternyan Geology	Jun. 2022

DOI:10.19826/j. cnki. 1009-3850. 2022. 04012

郭林楠,刘书生,聂飞,吴松洋,徐思维,施美凤,2022. 老挝琅勃拉邦 - 泰国黎府成矿带古特提斯构造 - 岩浆演化与金铜成矿作用. 沉积与特提 斯地质,42(2):228-241. DOI:10.19826/j. cnki. 1009-3850. 2022. 04012.

GUO L N, LIU S S, NIE F, WU S Y, XU S W, SHI M F,2022. Paleo-Tethys tectonic-magmatic evolution and gold-copper metallogenesis in Luang Prabang (Laos)-Loei (Thailand) metallogenic belt. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(2):228-241. DOI:10.19826/j. cnki. 1009-3850. 2022.04012.

老挝琅勃拉邦—泰国黎府成矿带古特提斯构造 – 岩浆演化与金铜成矿作用

郭林楠¹,刘书生^{1*},聂飞²,吴松洋¹,徐思维¹,施美凤¹

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心,四川 成都 610081; 2. 中国地质调查局应用地质研究中心,四川 成都 610036)

摘要:老挝琅勃拉邦一泰国黎府成矿带位于印支板块西北缘,是中南半岛重要的金铜成矿带之一。该带经历了晚古生代一中 生代古特提斯构造 - 岩浆演化作用,成矿活动复杂,形成了斑岩 - 砂卡岩型金铜矿床、浅成低温热液型金银矿床以及热液脉 型金矿床。然而,热液脉型金矿的成因类型仍存在争议,3 类金铜矿床与区域构造演化的关系仍缺乏总结。本文通过对前人 典型矿床研究资料的整理,并结合成矿流体来源、演化新证据,将带内热液脉型金矿床的成因类型归为造山型金矿。综合区 域构造 - 岩浆 - 成矿作用研究资料,总结了成矿带内3 类金铜矿床的时空分布规律和成矿特征,建立了与古特提斯洋俯冲 -闭合及陆陆碰撞过程相关的区域金铜成矿模式,提出了晚二叠世—早三叠世俯冲期浅成低温热液型金银矿床、早中三叠世闭 合期斑岩 - 砂卡岩型铜金矿床、晚三叠世陆陆碰撞期造山型金矿床的成矿规律。

Paleo-Tethys tectonic-magmatic evolution and gold-copper metallogenesis in Luang Prabang (Laos) -Loei (Thailand) metallogenic belt

GUO Linnan¹, LIU Shusheng^{1*}, NIE Fei², WU Songyang¹, XU Siwei¹, SHI Meifeng¹ (1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. Research Center of Applied Geology, China Geological Survey, Chengdu 610036, China)

Abstract: The Luang Prabang (Laos)-Loei (Thailand) metallogenic belt is located on the northwestern margin of the Indochina Block and is one of the important gold-copper metallogenic belts in the Indo-China Peninsula. It has experienced the Paleo-Tethys tectonic-magmatic evolution during the Late Paleozoic-Mesozoic, leading to complex metallogenic activities and forming porphyry-skarn Cu-Au, epithermal Au-Ag, and hydrothermal vein-type gold deposits, respectively. However, the genetic type of hydrothermal vein-type gold deposits is still controversial. There is no summary as well on relationship between the three types of gold-copper deposits and the regional

资助项目:国家自然科学基金项目"老挝帕奔金矿主要载金矿物方解石年代学和地球化学研究"(42102113);国家重点研发计划课题"特提斯成矿域战略性矿产信息与成矿规律"(2021YFC2901803);国际地球科学计划(IGCP - 741);中国地质调查局地质调查项目"东南亚南亚国际合作地质调查"(DD20221805)

收稿日期: 2022-02-17; 改回日期: 2022-04-23; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 曹华文

作者简介:郭林楠(1989—),男,博士,高级工程师,从事地质矿产研究工作。E-mail:linnanguo@163.com

通讯作者:刘书生(1977—),男,博士,正高级工程师,从事地质矿产研究工作。E-mail:lshusheng@cgs.cn

tectonic evolution up to now. In this paper, by summarizing the previous research data of typical deposits, and combining with new evidence from study on source and evolution of ore-forming fluids, we conclude the hydrothermal vein-type gold deposits in the belt as orogenic gold deposits. Based on regional tectonic-magmaticmetallogenic research, the temporal and spatial distribution, as well as metallogenic characteristics of three types of typical gold-copper deposit including porphyry-skarn Cu-Au deposits, epithermal Au-Ag deposits and orogenic gold deposits in the belt was summarized. We also establish a regional metallogenic model related to the subductionclosure of the Paleo-Tethys Ocean plate and subsequent continental-continental collision process, consisting of porphyry-skarn Cu-Au in Late Permian-Early Triassic subduction period, epithermal Au-Ag inEarly-Middle Triassic closure period, and orogenic Au in Late Triassic collision period.

Key words: Luang Prabang-Loei metallogenic belt; Paleo-Tethys tectonic-magmatic evolution; Gold-copper metallogenesis; Orogenic gold deposit

0 引言

老挝琅勃拉邦--泰国黎府成矿带位于中南半 岛中部,纵贯老挝西北部和泰国中北部,是东南亚 重要的金铜成矿(区)带之一(图1;Goldfarb et al., 2014)。目前带内已发现金、铜等多金属矿床(点) 40 余处,共计金资源量近 200 吨、铜资源量超过 100 万吨、银资源量超过 1000 吨(Khin Zaw et al., 2014: 赵延朋等,2017;刘书生,2021)。琅勃拉邦--黎府 成矿带大地构造位置处于特提斯构造 - 成矿域东 段,印支板块西缘,经历了早古生代—中生代原 -古特提斯构造演化作用,构造 - 岩浆 - 成矿活动复 杂(Feng et al., 2005; 陈永清等, 2010; 潘桂棠等, 2020;耿全如等,2021;王立全等,2021),是研究东特 提斯域和印支板块古特提斯构造 - 岩浆演化与金 铜成矿作用的理想选区。目前对于琅勃拉邦—黎 府成矿带的研究集中于岩浆作用时限和区域大地 构造演化(Qian et al., 2015, 2016a, b; Wang et al., 2016, 2018; Shi et al., 2021; 郭林楠等, 2020),关 于该带成矿作用研究也多集中在矿床尺度, (Kamvonget al., 2006; Salam et al., 2014; 赵延朋 等,2015;郭林楠等,2019)。

已有勘查和研究工作表明,琅勃拉邦一黎府成 矿带主要产出和古特提斯构造 - 岩浆演化相关的 斑岩 - 砂卡岩型铜金矿床、浅成低温热液型金银矿 床和热液脉型金矿床。其中,斑岩 - 砂卡岩型和浅 成低温热液型矿床的成矿地质特征和矿床成因较 为典型(Khin Zaw et al., 2014),而老挝帕奔和萨纳 坎等以含金石英/方解石 - 金属硫化物脉为主要金 矿体,受断裂构造控制的热液脉型金矿的矿床成因 类型则存在争议。此外,上述 3 类金铜矿床成矿地 质背景与印支板块西缘的古特提斯演化联系仍缺 乏深入研究,琅勃拉邦—黎府成矿带区域成矿理论 认识仍缺乏系统总结。

本研究收集了琅勃拉邦—黎府成矿带关于岩 石学、矿床学、地球化学、年代学等方面的研究成 果,结合作者近几年对老挝帕奔和萨纳坎脉型金矿 床的最新研究成果,探讨了成矿带内热液脉型金矿 的矿床成因,总结了琅勃拉邦—黎府成矿带金铜矿 床的时空分布规律,探讨了带内古特提斯构造 - 岩 浆 - 成矿演化模式,以期为区域进一步矿产勘查提 供理论支撑。

1 区域构造 - 岩浆演化

琅勃拉邦--黎府成矿带因其特殊的大地构造 位置,记录了古特提斯洋在印支板块西北缘的演 化,同时也记录了随着古特提斯洋消亡,滇缅马苏 地块与印支地块俯冲 - 碰撞 - 造山的整个过程(钱 鑫,2016)。自早古生代冈瓦纳大陆裂解,其西北边 缘相继分离出东羌塘 - 思茅 - 印支板块、西羌塘 -滇缅马苏地块和拉萨-西缅地块,并伴随着原-中 -新特提斯洋的打开--闭合、洋陆俯冲--碰撞等过 程,这些地块逐渐增生于欧亚大陆的南缘,并于中 生代形成了多条蛇绿混杂岩带以及岩浆岩带(Hall, 2011;刘书生等,2018)。其中,昌宁-孟连-清迈 结合带代表了印支期原 - 古特提斯主洋盆俯冲消 减的产物,作为一级构造单元分界线,区分出了西 部滇缅马苏(Sibumasu)地块以及东部思茅-印支板 块(李文昌等,2010; Deng et al., 2014; 刘书生等, 2018),在印支地块西北缘形成了老挝琅勃拉邦---泰国黎府构造带(图1a)。区域岩浆岩年代学和地 球化学研究表明,琅勃拉邦-黎府成矿带自晚奥陶

世至晚三叠世大致经历了4期与原-古特提斯洋增 生拼贴、碰撞造山相关的构造-岩浆活动,包括晚 奥陶世—早志留世、石炭纪—中二叠世、晚二叠 世—中三叠世和晚三叠世。

1.1 奥陶世一早志留世

带内已知最古老的岩浆岩为晚奥陶世—早志 留世长英质 - 钙碱性火山岩,出露于成矿带中部, 老挝和泰国交界处(图 1b),包括老挝境内的凝灰 岩、英安岩等(ca. 450~415Ma,Long et al., 2019), 以及泰国黎府东北普龙地区的流纹岩、英安岩和安 山岩(ca. 445~420Ma,Khositanont et al., 2013;刘 书生,2021)。该套早古生代流纹岩 w(SiO₂)为 76.03%~77.85%;w(Al₂O₃)较高,约 11.62%~ 12.69%;呈轻稀土轻度富集、重稀土轻度亏损、中等



图 1 老挝及邻区大地构造单元划分图(a); 琅勃拉邦—黎府成矿带地质矿产简图(b)(据郭林楠等,2020 修编) Fig. 1 Tectonic units of Laos and neighboring areas (a), simplified geological map of the Luang Prabang-Loei metallogenic belt (b) (modified after Guo et al., 2020)

负 Eu 异常特征。同时,流纹岩富集 Th、U、K、Sr 等 大离子亲石元素(LILE),相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等 高场强元素(HFSE),属于高分异的 I 型花岗岩(刘 书生,2021),指示岩浆主要形成于活动大陆边缘的 环境中,与陆源弧火山岩相似。综合分析认为,该 带在晚奥陶世—早志留世处于一个与俯冲有关的 构造环境(Shi et al., 2021),可能为原特提斯洋板片 向印支板块之下俯冲形成了上述黎府地区的陆缘 弧型火山岩。

1.2 石炭纪—中二叠世

石炭纪—中二叠世火山岩和浅成 - 超浅成侵 入岩广泛分布于成矿带中北部(图1b),包括成矿带 北部老挝琅勃拉邦地区的辉长岩、辉绿岩、玄武岩 和凝灰岩(ca. 340~265 Ma; Qian et al., 2016a; Wang et al., 2020; Shi et al., 2021), 老挝巴莱南部 的安山岩、玄武岩(ca. 320~310 Ma; Qian et al., 2015),以及巴莱东部的安山岩、流纹岩等(ca. 350 ~330 Ma; Qian et al., 2015)。琅勃拉邦地区的玄武 岩样品 w(TiO₂)(0.55%~0.79%)较低,w(Al₂O₃) 较高(9.42%~20.43%),相对富集轻稀土和 LILE, 相对亏损 HFSE, 且具有较低的 Sm/Th 比值(0.86~ 1.96) 和较高的 Th/Y 比值(0.11~0.32),显示弧火 山岩特征,表明其岩浆可能来源于由亏损地幔与俯 冲沉积物及其伴随的流体经水岩反应而形成的富 集地幔(Plank and Languir, 1998)。样品的 Ba/Th (72~227)、Ba/La(24~36)、Ba/Nb(26~244)比值 变化范围较大,而(La/Sm)_N(1.6~2.1)变化较小, 表明源区主要受俯冲洋壳脱水释放的流体影响 (Qian et al., 2016a)。岩浆岩年代学、地球化学和 化石证据表明,琅勃拉邦--黎府成矿带自早石炭世 起主体为弧后盆地环境,其西部的古特提斯洋(如 昌宁-孟连-因他暖洋)及其分支洋(琅勃拉邦---黎府洋)自晚石炭世开始向东俯冲,使素可泰地体、 难河-程逸弧后盆地、琅勃拉邦-黎府古特提斯分 支洋依次向印支板块俯冲,形成了老挝琅勃拉邦、 巴莱一带的陆缘弧火山岩 (Sone and Metcalfe, 2008; Wang et al., 2020; Shi et al., 2021).

1.3 晚二叠世—中三叠世

晚二叠世—中三叠世岩浆岩广泛分布于整个 成矿带,包括老挝琅勃拉邦—沙耶武里—带的中酸 性火山岩(ca. 260~240 Ma;Rossignol et al., 2016; Qian et al., 2016b;郭林楠等,2020;刘书生,2021), 泰国碧差汶西部的中基性火山岩(ca. 255~245

Ma: Salam et al., 2014),以及泰国黎府东北部的中 酸性侵入岩(ca. 248~240 Ma; Khin Zaw et al., 2014; 聂飞等, 2019)。老挝沙耶武里一带的钙碱性 安山岩样品(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr),值较低(均值为0.70378), ε_{Nd}(t)为正(均值为4.14);具有高 LREE/HREE 和 LILE/HFSE 比值,以及较低的 Ba/Th 比值(21.45~ 73.21,均值为45.35)(刘书生,2021),表明安山岩 形成于造山带中的岛弧环境,源区为地幔,且基本 未遭受增生造山俯冲带流体改造。黎府弧后盆地 在中二叠世岩浆活动较弱,但在晚二叠世—早中三 叠世发生了较强的岩浆活动,形成了一系列以 Nb、 Ta、Ti、P 亏损,高 LILE/HFSE 比值为特征的大陆弧 火山岩(Qian et al., 2015)。成矿带内的斑岩 - 砂 卡岩型和浅成低温热液型金矿床也在这一时期形 成,如泰国普辛菲勒(Puthep)矽卡岩型矿体与约 242 Ma 的闪长岩和二长斑岩侵入体相关(Khin Zaw et al., 2014),泰国普龙(Phu Lon)矽卡岩型铜金矿 床与约 244~240 Ma 的闪长岩体相关(Kamvong and Khin Zaw, 2009; 聂飞等, 2019), 泰国切垂 (Chatree) 浅成低温热液金银矿则与 259~250 Ma 的安山质角砾岩、火山沉积岩相关(Salam et al., 2014)。这些岩浆-成矿活动均与晚二叠世开始的 古特提斯洋板片东向俯冲、难河 - 沙缴弧后盆地关 闭,以及早一中三叠世古特提斯洋持续俯冲闭合相 关(Sone and Metcalfe, 2008; Shi et al., 2021; 郭林 楠等,2020)。

1.4 晚三叠世

晚三叠世岩浆活动强度相对早中三叠世较小, 以中酸性火山岩为特征。主要包括分布于老挝琅 勃拉邦周边的凝灰岩(ca. 226~215 Ma; Blanchard et al., 2013),老挝沙耶武里附近的安山岩和角砾岩 (ca. 235~224 Ma; Shi et al., 2019, 2021; 刘书生, 2021),以及老挝巴莱--泰国黎府一带的中酸性火 山岩(ca. 236~220 Ma; Khin Zaw et al., 2014; Shi et al., 2021)。岩石学和岩石地球化学研究表明,沙 耶武里地区的火山岩具有高 LREE/HREE 比值, Nb、Ta、Sr 亏损,以及 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 高正值(9.87~12.13) 特征,表现为大陆弧岩浆来源(Shi et al., 2019, 2021)。琅勃拉邦周边的火山碎屑岩也表现出大陆 边缘弧来源特征(Blanchard et al., 2013)。因此, 琅 勃拉邦--黎府成矿带自早三叠世到晚三叠世经历 了漫长而连续的大陆边缘演化,并于晚三叠世发生 古特提斯洋闭合,滇缅马苏地块与印支板块碰撞拼

贴(Khin Zaw et al., 2014)。成矿带中北部的热液 脉型帕奔(Phapon)和萨纳坎(Sanakham)金矿的形 成与本期构造 - 岩浆活动相关。

2 主要成矿系列及其时空分布特征

前文述及,古特提斯洋在印支板块西北缘的俯 冲 - 碰撞 - 造山演化过程控制了老挝琅勃拉邦— 泰国黎府成矿带的金铜矿床的形成。主要成矿系 列包括3类:斑岩 - 砂卡岩型铜金矿床、浅成低温热 液型金银矿床和热液脉型金矿床。其中,本研究将 热液脉型金矿床归为造山型金矿(详见下文论述)。 本节将介绍上述3类矿床的时空分布规律及其与区 域构造 - 岩浆演化过程的耦合关系;同时,挑选了 达到中 - 大型规模且勘查/研究程度较高的5 处典 型矿床(图1),简要分析其地质地球化学特征和成 矿过程。

2.1 金铜矿床时空分布特征

 布和成矿特征如下(表1,图2):

(1)斑岩 - 砂卡岩型矿床包括老挝班康姆 (Pangkuam)、泰国普龙(Phu Lon)、普欣非勒 (Puthep)、普泰普发(Phu Thap Fah)等金铜矿床,主 要分布在成矿带中部,老挝巴莱和泰国黎府一带 (图1b),与早中三叠世中酸性侵入岩相关。矿化样 式为典型的斑岩 - 砂卡岩型,矿体多为脉状、透镜 状,赋存于岩体或岩体与围岩的接触带内。热液蚀 变以砂卡岩化、钾化、青磐岩化等为特征,成矿元素 为金和铜,成矿流体为岩浆热液来源,初始流体通 常具有中高温、中高盐度、富 CO₂等特征。

(2)浅成低温热液型矿床包括泰国切垂 (Chatree)、LD Prospect等金银矿床,集中分布于成 矿带南部,泰国碧差汶一带(图1b),与晚二叠世— 早三叠世古特提斯洋板片东向俯冲导致的火山活 动相关。矿化样式为典型的低硫型浅成低温热液 型,矿体赋存于上二叠统一下三叠统火山角砾岩、 火山沉积岩内,矿化多为脉状、细脉状、网脉状。热 液蚀变矿物以冰长石、石英、方解石、绢云母、绿泥 石、伊利石、蒙脱石等为特征,成矿元素为金和银,

表1 琅勃拉邦一黎府成矿带主要金铜矿床基本信息

|--|

序号	矿床	矿种	矿床类型	资源量	矿石 品位	赋矿围岩	成矿相关侵 入体/年龄	成矿年代	热液蚀变矿物组合	参考文献
1	帕奔 (Phapon)	Au	造山型	金,20吨	6.28 g/t Au	下二叠统灰岩	未见相关侵 入体	晚三叠世	方解石、菱铁矿、磁铁 矿、石英、雄黄等	牛英杰等,2015;杨 昌正等,2017;郭林 楠等,2019
2	班康姆 (Pangkuam)	Cu-Au	斑岩-砂卡 岩型	金,20.5吨 铜,3.7万吨	0.69% Cu 2.41 g/t Au	二叠—三叠系 安山岩,石炭— 二叠系碳酸盐 岩和碎屑岩	花岗闪长岩 (不直接接 触)	与侵入岩 同期	石英、绢云母、绿帘石、 绿泥石、钾长石、石榴 子石等	赵延朋等, 2015, 2017; 史琪等, 2016
3	萨纳坎 (Sanakham)	Au	造山型	金, 10.6 吨	3.05 g/t Au	石英二长闪长 岩和上石炭统 板岩	石英二长闪 长岩(无成 因关联)	晚三叠世	石英、绢云母、碳酸盐 等	Liu et al., 2022
4	普龙 (Phu Lon)	Cu-Au	斑岩-砂卡 岩型	金, 3.5 吨 铜, 13 万吨	2.4% Cu 0.64 g/t Au	闪长岩和泥盆 系火山–沉积 岩接触带	闪长岩和石 英二长斑岩 /244~240 Ma	与侵入岩 同期	石榴子石、辉石、绿帘 石、阳起石、绿泥石、 碳酸盐等	Kamvong and Khin Zaw, 2009; Khin Zaw et al., 2014; 聂飞等, 2019
5	普辛菲勒 (Puthep)	Cu-Au	斑岩-砂卡 岩型	金, 14.8 吨 铜, 87 万吨	0.53% Cu 0.09 g/t Au	砂岩、粉砂岩、 灰岩	闪长岩和二 长斑岩 /242.4±1.3M a	与侵入岩 同期	钾长石、绢云母、石榴 子石、绿帘石、绿泥石、 碳酸盐等	Khin Zaw et al., 2014
6	普泰普发 (Phu Thap Fah)	Au-Cu- Ag	斑岩-砂卡 岩型	金, 14 吨 铜, 0.9 万吨 银, 25 吨	2.19 g/t Au 0.14% Cu 3.9 g/t Ag	硅质碎屑岩/灰 岩	花岗闪长岩 /245±3Ma	与侵入岩 同期	石榴子石、辉石、石英、 绿帘石、绿泥石、方解 石	Khin Zaw et al., 2014
7	切垂 (Chatree)	Au-Ag	浅成低温热 液型	金,96.4 吨 银,735 吨	1.18 g/t Au 9 g/t Ag	上二叠统—下 三叠统安山质 角砾岩、火山沉 积岩	花岗闪长岩 (不直接接 触) /244±1Ma	250.9±0.8 Ma, (冰 长石 40Ar/39A r 定年)	石英、方解石、冰长石、 绢云母、绿泥石、伊利 石、蒙脱石	Khin Zaw et al., 2014; Salam et al., 2014; Tangwattananukul et al., 2014
8	LD Prospect	Au-Ag	浅成低温热 液型	金, 3.2 吨 银, 290 吨	1.1 g/t Au 10 g/t Ag	安山岩	未见相关侵 入体	晩二叠世 —早三叠 世 (推测)	石英、方解石、冰长石、 绢云母、绿泥石	Khin Zaw et al., 2014



图 2 琅勃拉邦—黎府成矿带古特提斯演化阶段与主要铜金矿床 Fig. 2 Paleotethys evolution stage and major Cu-Au deposits of the Luang Prabang-Loei metallogenic belt

成矿流体主要来源于岩浆流体(火山次火山热液) 和大气降水混合,通常具有中低温、中低盐度特征。

(3)造山型金矿包括老挝帕奔(Phapon)和萨纳 坎(Sanakham)2处矿床,分布于成矿带中北部,琅勃 拉邦断裂带附近,是该成矿带近年来新识别出的金 矿床类型(图1b)。这类矿床受NE—NNE 向琅勃 拉邦断裂带的次级断裂控制,矿体为充填断裂带的 含金石英或方解石脉体,对围岩没有选择性。围岩 蚀变以硅化、绢云母化、碳酸盐化为主,金为单一成 矿元素,成矿流体具有中低温、中低盐度、富CO₂特 征,金沉淀与断裂活动导致的流体不混溶/沸腾作 用密切相关。目前还没有关于这类金矿床的精确 定年报导,根据矿体层位和区域成矿规律推测其形 成于晚三叠世,古特提斯洋闭合,滇缅马苏地块与 印支板块碰撞拼贴时期(Makoundi et al., 2014; Khin Zaw et al., 2014)。

2.2 斑岩-矽卡岩型铜金矿床

2.2.1 班康姆金铜矿床

班康姆金铜矿位于成矿带中段,老挝西部,巴 莱县城西北42km 处(图3)。探明金资源量20.5 吨,铜资源量3.7万吨,金、铜平均品位分别为 2.41g/t和0.69%,是该成矿带众多金矿床(点)中 的少数几个大型金矿之一(赵延朋等,2017)。

矿区出露地层主要为一套石炭—二叠系灰岩、 泥质砂岩为主的陆相-浅海相沉积系列。二叠— 三叠纪安山岩覆盖于灰岩之上,是主要的赋矿围 岩。矿区东南部出露以花岗闪长岩为主的侵入岩, 与矿体没有直接接触关系。金和铜矿体呈脉状和 似层状,主要赋存在安山岩以及安山岩与大理岩的 接触带内;受 NNE 向琅勃拉邦—黎府区域深大断裂 的次级断裂控制。其中 I、II、IV号主矿体地表走 向延伸均超过 1km,最大斜深达 200~250m,平均厚 度在 7~8 m。围岩蚀变主要包括砂卡岩化、钾化、 绢云母化、青磐岩化、硅化、云英岩化等。矿化样式 包括角砾状、致密块状、脉状及浸染状,其中致密块 状金(铜金)矿石为高品位矿石。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(赵延朋等,2015;史琪等,2016)。矿石矿物 主要为黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、磁黄铁矿、斑铜矿, 其次为自然金、毒砂、镜铁矿、辉锑矿等。

流体包裹体研究表明(赵延朋等,2018^①),班康 姆铜金矿成矿流体属 NaCl-H₂O-CO₂体系,初始成矿 流体具有低盐度特征(5.34 wt% NaCl eq.)。成矿 过程中流体从高温气液阶段至低温热液阶段,挥发 分含量总体减低,盐度升高(≥20 wt% NaCl eq.), 流体沸腾导致了金属沉淀。综合地质地球化学特 征,认为初始成矿流体来源于幔源岩浆出溶作用, 富含铜、金等成矿物质。岩浆上侵过程中,高温低 盐度的成矿流体沿断裂构造体系上升,与安山质围 岩发生大规模水岩反应,并在断裂构造体系内发生 了广泛的沸腾作用。铜矿化主要发生于早期硫化物阶段,与大规模水岩反应和青磐岩化以及砂卡岩的退化蚀变相关;金矿化则主要发生于晚期硫化物阶段,与大范围沸腾作用相关。

2.2.2 普龙铜金矿床

普龙铜金矿床位于成矿带中部,泰国北部的湄 公河右岸,与老挝相邻(图4)。探明资源量为铜 12.96 万吨、金3.46吨,铜、金平均品位分别为 2.4%和0.64 g/t(Khin Zaw et al., 2014)。

矿区出露地层主要为泥盆系火山 – 沉积岩,二 叠系—早三叠统火山岩,以及少量第四系沉积。泥 盆系可分为由块状白云质灰岩和薄层泥质灰岩组 成的海相沉积岩,以及由安山质凝灰岩、块状角砾 岩、角闪石安山岩、砾岩、页岩和流纹凝灰质砂岩组 成的火山岩相单元(Kamvong et al., 2006)。二叠 系—早三叠统火山岩主要由流纹岩、安山岩、英安 岩组成。矿区内的构造主要为一组近 SN 向断裂, 这些断层及其次级断裂控制了侵入岩的产出。岩 体以闪长岩为主,具有 I 型埃达克质特征(Kamvong and Khin Zaw, 2009),出露于矿区中部,锆石 U-Pb 定年显示其成岩年代为240.6±1.2Ma(聂飞等, 2019)。闪长岩与围岩接触带发育矽卡岩化蚀变, 成矿阶段可分为矽卡岩阶段和石英硫化物阶段。 砂卡岩阶段主要矿物组合为石榴子石、辉石和磁铁 矿:石英硫化物阶段的矿物组合为石英及含水矿物 (绿帘石、绿泥石)和金属硫化物(斑铜矿、黄铁矿、 黄铜矿等),金主要沉淀于石英硫化物阶段。流体 包裹体研究表明(Kamvong and Khin Zaw, 2009),普 龙铜金矿的初始成矿流体具有高温高盐度特征 (468 °C,23 wt% NaCl eq.);石榴石中的流体包裹 体含有赤铁矿子矿物,指示氧化成矿环境;结合S同 位素特征(δ^{34} S为 - 2.6% ~ - 1.1%),综合认为成 矿流体和物质来源于岩浆热液。绿帘石中的流体 包裹体表现出低温低盐度(0.5~8 wt% NaCl eq.) 特征,可能指示了成矿过程中发生了岩浆热液和其 他来源流体(如大气降水)混合。

2.3 浅成低温热液型金银矿床

浅成低温热液型矿床的代表切垂金银矿位于成



图 3 班康姆金铜矿床地质图(据赵延朋等,2017修编) Fig. 3 Geological map of Pangkuam gold-copper deposit (modified after Zhao et al., 2017)





矿带南段,泰国中部,曼谷以北约300km处(图5)。 探明资源量为金96吨、银735吨、金、银平均品位为 1.18 g/t 和9 g/t, 是东南亚最大的浅成低温热液型 金矿床(Khin Zaw et al., 2014)。矿区内出露的地 层主要包括上二叠统中基性火山岩、中基性角砾 岩,上二叠统一下三叠统火山沉积岩和火山角砾 岩,锆石 U-Pb 年龄为 250 ± 6 Ma (Salam et al., 2014)。其中,上二叠统安山质角砾岩和上二叠 统一下三叠统由粉砂岩、炭质泥岩、辉石角砾岩组 成的火山沉积岩为主要赋矿围岩。侵入岩主要为 分布于矿区南部的花岗闪长岩,与矿体没有直接接 触关系,其Re-Os 年龄为244 ±1 Ma(Salam, 2013)。 金矿化以脉状、细脉状和网脉状为特征,矿体带总 长约800~1800 m,垂直延伸约200 m。单个石英脉 矿体长约100~300 m,宽度变化较大,为1 mm 至3 m。矿石矿物主要为黄铁矿和少量黄铜矿、闪锌矿; 脉石矿物以石英和方解石为主,另有少量冰长石、 伊利石、绿泥石等。

热液石英氧同位素 δ¹⁸ O 变化范围总体在 +10.4‰到+11.7‰,根据成矿温度,计算得成矿流 体δ¹⁸O值约为-3%。古地磁数据表明,矿床形成于 赤道附近(Charusiri et al., 2002),且矿区内主要地 层为二叠系和三叠系滨海相沉积,因此,初始成矿 流体可能为海水,也可能由岩浆水和大气降水混合 而成。流体包裹体研究显示成矿温度在 150 ~ 250℃,盐度在 0.2 ~ 2.2 wt% NaCl eq.,表明成矿 过程中大气降水对成矿流体有较大贡献 (Tangwattananukul et al., 2014)。成矿期间发生了 流体沸腾现象并导致金和银快速沉淀,估算成矿深 度为 900 ~ 1000 m(Salam, 2013)。冰长石⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 定年结果为 250.9 ± 0.8 Ma(Salam, 2013),显示其 成矿于晚二叠世—早三叠世,结合矿区出露的地层 及矿床地质特征,认为成矿与火山 – 侵入岩浆活动 的转换相关。

2.4 造山型金矿床

2.4.1 帕奔金矿床

帕奔金矿位于成矿带北段,老挝琅勃拉邦省东 北部约 30km 处(图 6),巴乌县帕奔村一带。探明 金资源量超过 20 吨,平均品位为 6.28 g/t。

帕奔金矿矿区出露地层主要为石炭系、二叠系



图 5 泰国切垂金银矿床地质图(据 Salam et al., 2014 修编) Fig. 5 Geological map of Chatree gold-silver deposit (modified after Salam et al., 2014)

和三叠系。石炭系为一套含硅细粒碎屑碳酸盐和 海相碳质沉积地层。下二叠统为厚层微晶灰岩和 生物碎屑灰岩,在矿区内呈透镜体并显示出强烈的 韧性 - 脆性剪切变形,是主要的赋矿围岩。上二叠 统主要为灰绿色玄武岩、安山岩、安山质凝灰岩。 中上三叠统主要由紫红色砂岩、粉砂岩、砾岩组成。 矿区内构造主要为 NE 向琅勃拉邦韧 - 脆性剪切带 (杨昌正等,2017),宽度可达几百米,总体控制了 NE 向带状分布的金矿化。已发现的5个脉状金矿 体均发育于下二叠系灰岩内,受一系列 NE 向大断 裂的雁列式次级断裂——NNW 向断裂控制,近平行 展布,间距约300 m。其中, V - 1 号矿体占帕奔金 矿金储量的90% 以上,总体呈脉状,局部囊状或透 镜状,长约650 m,宽 0.3~10 m,延深约350 m,平 均金品位为 6.28 g/t(郭林楠等,2019)。金矿体由 充填断裂带的含金方解石主脉以及两侧的褐铁矿 化、菱铁矿化蚀变带(宏观上呈淡红色)组成。热液 矿物组合相对简单,主要矿物有方解石、黄铁矿、自 然金,次要矿物有菱铁矿、磁铁矿、雄黄、雌黄、石英 等。受次生风化淋滤作用影响,原生金属硫化物基 本被褐铁矿取代。金以裂隙金或包体金形式产出, 通常直接赋存于方解石微裂隙内或晶隙间,少量与 褐铁矿或磁铁矿共生(Guo et al., 2018;牛英杰等, 2017)。

帕奔金矿热液方解石内流体包裹体岩相学、显 微测温和群成分分析表明,成矿流体属 NaCl-H₂O-CO₂体系,温度-盐度变化范围大体在 180~240℃、 3~10 wt.% NaCl eq. (Guo et al., 2019;牛英杰等, 2017),流体不混溶是金沉淀的机制之一。热液方 解石和围岩灰岩的 C-O 同位素组成均表现出海相 碳酸盐特征(Guo et al., 2018;牛英杰等,2015);成 矿流体 H-O 同位素组成总体落在变质流体和原始 岩浆流体重叠范围内(Guo et al., 2019;陆芳芳等, 2015)。然而,前人对帕奔金矿矿床成因依然存在 争议:(1)成矿流体来源于深部岩浆水,并在成矿过 程中与浅部大气水混合(陆芳芳等,2015;牛英杰 等,2015);(2)成矿流体来源于剪切带动力变质作 用下的压溶作用(李会恺等,2011;杨昌正等, 2017);(3)剪切带控制的低温热液矿床(薛兰花和 史老虎,2016)。

作者开展了一系列矿床地质和地球化学研究 (Guo et al., 2018, 2019;郭林楠等,2019),并总结 了前人研究成果,认为帕奔金矿的许多特征与造山 型金矿(Groves et al., 1998)相近,其中包括:(1)矿 体严格受 NNW 向断层控制;(2)在不同深度上无蚀 变或金属分带;(3)金的赋存形式为包体金和裂隙 金;(4) Au/Ag 比值极高(≥10,平均银品位仅为 0.05 g/t,薛兰花和史老虎,2016);(5) 成矿流体具 有中低温、低盐度特征。此外在区域上,晚三叠世 古特提斯洋壳东向俯冲引发缅马苏地体与印支板 块碰撞,在印支板块西缘形成了造山型金矿 (Makoundi et al., 2014; Khin Zaw et al., 2014)。结 合帕奔金矿地质地球化学特征和区域地质背景,作 者将帕奔金矿归入造山型金矿类型。

2.4.2 萨纳坎金矿床

萨纳坎金矿位于成矿带中部,老挝万象省西南 部沙拉县城正北方向,隔湄公河与泰国相邻,是近 年来成矿带内发现的主要金矿床之一(图7)。探明 金资源量为10.6 t,平均品位为3.05 g/t。

矿区内出露地层主要为上石炭统南坡组,岩性 组合为紫红色、褐红色厚层状变质粉砂岩、粉砂质 板岩、板岩、褐色薄层状角岩化细粒长石岩屑砂岩。 矿区内岩浆活动较为发育,主要为中三叠世石英二 长闪长岩,总体为 NNE 向展布的岩株(或岩基)。矿





Fig. 6 Geological map of Phapon gold deposit (modified after Guo et al., 2019)

区内主要发育 NNE 向脆 - 韧性剪切带, 与区域琅勃 拉邦构造带走向基本一致,控制了岩体和金矿体带 的产出。目前已发现十多个矿体群,其中 Au9 矿体 群占金资源总量的3/4。矿体呈脉状,长约80~400 m, 走向 NE, 倾角 10°~40°SE, 倾向延深 300~600 m。矿体平均厚度为1.5 m, 金平均金品位为3.05 g/t。赋矿围岩主要为石英二长闪长岩和上石炭统 板岩,局部为角岩。围岩蚀变以硅化、硫化、绢云母 化和碳酸盐化为主,发育于石英二长闪长岩内,受 NE—NNE 向断层控制。矿物组合主要包括石英、黄 铁矿、毒砂、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿,金 主要为包体金和裂隙金。本团队最新的流体包裹 体研究表明(Liu et al., 2022), 萨纳坎金矿初始成 矿流体属于中高温 CH₄-CO₂体系,并逐渐演化为成 矿主阶段的中温、中等盐度 NaCl-H,O-CO, ± CH₄体 系,再到成矿晚阶段的中低温、中高盐度 NaCl-H,O 体系。成矿过程中发生了两次流体不混溶过程,伴 随着两次重要的金沉淀事件,估算出金沉淀的温、 压条件为 337~272 °C 和 236~65 MPa 左右, 成矿 深度为8.7~6.5 km。现有探矿工程揭露,金矿体 均为充填断裂的热液石英硫化物脉,与周边砂卡岩 化、角岩化蚀变带没有接触关系;矿体虽多位于岩 体内,但其延伸并不受围岩岩性约束,与岩性没有 明确的关系。另外,矿体与围岩界线清晰,结合流 体包裹体研究结果,综合推断萨纳坎金矿与老挝帕 奔金矿类似,为造山型金矿床。

3 琅勃拉邦—黎府成矿带古特提斯金 铜成矿作用

琅勃拉邦─黎府成矿带自晚奥陶世至晚三叠 世经历了原-古特提斯洋增生拼贴、碰撞造山等的 构造-岩浆活动。其中,晚奥陶世─早志留世原特 提斯阶段洋板片向印支板块俯冲及其相关陆缘弧 火山活动与区域成矿没有直接关系。成矿带主要 在晚二叠世─晚三叠世发生了三期与古特提斯洋 俯冲-闭合与陆陆碰撞过程相关的金铜成矿作用, 分别形成了3类金矿床,其构造-岩浆-成矿模式 分述如下(图8):



图 7 萨纳坎金矿床地质图(据刘书生,2021 修编) Fig. 7 Geological map of Sanakham gold deposit (modified after Liu, 2021)



图 8 琅勃拉邦—黎府成矿带古特提斯构造 – 岩浆演化与金成矿模式图 Fig. 8 Paleotethys tectonic-magmatic evolution and gold mineralization model of the Luang Prabang-Loei metallogenic belt

3.1 晚二叠世一早三叠世俯冲期

该期构造 - 岩浆 - 成矿作用主要持续时间为 260~250 Ma,从晚二叠世至早三叠世早期。受古特 提斯主洋板片东向俯冲的影响,素可泰地块、难河 - 程逸弧后盆地、思茅地块、琅勃拉邦—黎府弧后 盆地被整体驱动向印支板块俯冲,并在印支板块西 缘发育一套中基性火山角砾岩和火山沉积岩,深部 发育中酸性侵入体。该时期主要发育以泰国切垂 和以 LD Prospect 为代表的浅成低温热液型金银矿 床(图 8a)。岩浆流体沿区域张性断裂上涌,受到岩 层顶部相对致密的辉石角砾岩影响,流体在下部渗 透性相对较强的角砾岩中横向移动,并与渗滤的大 气降水循环混合形成了初始成矿流体。断层活动 过程中,流体 CO₂和 H₂S 脱气并发生沸腾,物理化学 条件变化,金和银的二硫化物络合物失稳导致金银 快速沉淀成矿。

3.2 早中三叠世闭合期

该期构造 - 岩浆 - 成矿作用主要持续时间为 250~240 Ma,从早三叠世晚期到中三叠世。古特提 斯洋板片持续向东俯冲到印支板块之下,琅勃拉 邦—黎府弧后盆地逐渐闭合,并在带内广泛发育了 基性 - 酸性火山岩、火山角砾岩以及中酸性侵入岩体,该时期主要发育以老挝班康姆、泰国普龙等为 代表的斑岩 - 砂卡岩型铜金矿床(图 8b)。初始富 铜金成矿流体来源于幔源岩浆出溶作用,沿断裂系 统上升并与围岩碳酸盐岩或碎屑岩发生接触交代 作用,发生大规模砂卡岩化或角岩化、钾化、青磐岩 化等蚀变作用。成矿作用过程中发生多期次流体 沸腾、脱气和退化蚀变作用,成矿流体由高温、低盐 度、富 CO₂流体逐步演化为中低温、中高盐度、贫 CO₂流体,金和铜随之沉淀成矿。

3.3 晚三叠世陆陆碰撞期

该期构造 - 岩浆 - 成矿作用主要持续时间为 235~220 Ma,即晚三叠世早中期。随着古特提斯洋 闭合,滇缅马苏地块与印支板块拼贴,陆陆碰撞导 致沿构造活动边界出现深大断裂和岩浆活动,该时 期主要发育以老挝帕奔和萨纳坎为代表的造山型 金矿床(图8c)。强烈的碰撞挤压导致动力学变质 作用,并可能引起原始洋板片的脱水和脱碳酸盐作 用,形成了最初中低温、中低盐度、富 CO₂含金成矿 流体。区域岩浆活动与金成矿无成因联系,但为驱 动流体循环提供热源。流体沿张性断裂进入围岩, 并与围岩发生水 - 岩反应, 控矿断裂多期开合也引起了压力波动而导致流体不混溶/沸腾。水 - 岩反 应和流体不混溶作用均可引起流体内金的络合物 失稳, 金沉淀成矿。

4 结论

(1)老挝琅勃拉邦—泰国黎府成矿带经历了石炭纪—中二叠世古特提斯洋初始俯冲的弧后盆地环境,晚二叠世—中三叠世古特提斯洋俯冲闭合,以及晚三叠世滇缅马苏地块与印支板块陆陆碰撞3 个构造 - 岩浆活动期。其中,后两个时期是带内主要的金铜成矿期。

(2) 琅勃拉邦—黎府成矿带内金铜成矿系列主 要有3类:斑岩 - 砂卡岩型铜金矿床、浅成低温热液 型金银矿床和造山型金矿床。总结区域地质背景、 控矿构造特征、金赋存状态等研究资料,结合成矿 流体来源、演化方面的新证据,将老挝帕奔和萨纳 坎等以热液石英/方解石脉为主要矿体的金矿床成 因类型归为造山型金矿。

(3)成矿带内的金铜成矿作用与晚二叠世—晚 三叠世古特提斯洋俯冲 – 闭合和陆陆碰撞过程相 关。浅成低温热液型矿床与晚二叠世—早三叠世 古特提斯洋板片东向俯冲导致的火山活动相关;斑 岩 – 矽卡岩型铜金矿床与早中三叠世中酸性侵入 岩相关;造山型金矿与晚三叠世陆陆碰撞过程中沿 构造活动边界出现的深大断裂和岩浆活动相关。

致谢:谨以此文庆贺中国地质调查局成都地质 调查中心(原国土资源部成都地质矿产研究所)成 立60周年!并向长期在境外从事地质调查和科学 研究的地质工作者致以崇高的敬意! 敬请各位专 家学者不吝批评与指教。

注释:

①赵延朋,陈晓峰,康铁锁,等,2018.老挝班康姆铜金矿床成矿作 用与勘查技术示范研究[R].中国有色桂林矿产地质研究院有限 公司.

参考文献(References):

Blanchard S, Rossignol C, Bourquin S, et al., 2013. Late Triassic volcanic activity in South-East Asia: New stratigraphical, geochronological and paleontological evidence from the Luang Prabang Basin (Laos) [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 70 – 71: 8 – 26.

- Charusiri P, Pongsapich W, Sutthirat C, 1996. Ptrochemistry of probable gem-bearing basalts in Sop Prab-Kokha, Changwat Lampang [M]. Bangkok: Chulalongkorn University.
- Deng J, Wang Q F, Li G J, et al., 2014. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China [J]. Earth-Science Reviews, 138: 268 – 299.
- Feng Q L, Chonglakmani C, Helmcke D, et al., 2005. Correlation of Triassic stratigraphy between the Simao and Lampang-Phrase Basins: implications for the tectonopaleogeography of Southeast Asia [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 24: 777 – 785.
- 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.
- Groves D I, Goldfarb, R J, Gebre-Mariam M, et al., 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. Ore Geology Reviews, 13(1): 7 - 27.
- Guo L N, Hou L, Liu S S, et al., 2018. REE geochemistry and C-O isotope characteristics of hydrothermal calcites: Implications for fluid-rock reaction and ore-forming processes in the Phapon gold deposit, NW Laos [J]. Minerals, 8(10): 438-459.
- Guo L N, Liu S S, Hou L, et al., 2019. Fluid inclusion and C-H-O isotopes geochemistry of the Phapon gold deposit, NW Laos: Implications for fluid source and ore genesis [J]. Journal of Earth Science, 30(1): 80 – 94.
- Hall R, 2011. Australia-SE Asia collision: plate tectonics and crustal flow[J]. Geological Society London Special Publications, 355(1): 75 - 109.
- Kamvong T, Khin Zaw, Harris A, 2006. Fluid chemistry of the Phu Lon Cu-Au skarn deposit, Loei Fold Belt, northeastern Thailand: Implication for ore genesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70(18-supp-S): 304.
- Kamvong T, Khin Zaw, 2009. The origin and evolution of skarn-forming fluids from the Phu Lon deposit, northern Loei Fold Belt, Thailand. Evidence from fluid inclusion and sulfur isotope studies [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 34: 624 – 633.
- Khin Zaw, Meffre S, Lai CK, et al., 2014. Tectonics and metallogeny of mainland Southeast Asia-A review and contribution [J]. Gondwana Research, 26: 5-30.
- Khositanont S, Panjasawatwong Y, Ounchanum P, et al., 2008. Petrochemistry and zircon age determination of Loei-Phetchabun volcanic rocks [C]// In: Chutakositkanon, V., Sutthirat, C., Charoentitirat, T. (Eds.), International Symposia on Geoscience Resources and Environments of Asian Terranes (GREAT 2008), 4th IGCP 516 and 5th APSEG, Bangkok, pp. 272 – 278.
- Liu S S, Guo L N, Ding J, et al., 2022. Evolution of ore-forming fluids and gold deposition of the Sanakham Lode gold deposit, SW Laos: Constrains from fluid inclusions study [J]. Minerals, 12: 259. https://doi.org/10.3390/min12020259
- Long Y Z, Zhang D X, Huang D Z, et al., 2019. Age, composition and tectonic implications of late Ordovicianearly Silurian igneous rocks of

the Loel Volcanic Belt, NW Laos [J]. International Geology Review, 61(15): 1940-1956.

- Makoundi C, Khin Zaw, Large R R, et al., 2014. Geology, geochemistry and metallogenesis of the Selinsing gold deposit, central Malaysia [J]. Gondwana Research, 26(1): 241-261.
- Plank T, Languir C H, 1998. The chemical compositions of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle [J]. Chemical Geology, 145(3-4): 325-394.
- Qian X, Feng Q L, Yang, W Q, et al., 2015. Arclike volcanic rocks in NW Laos: geochronological and geochemical constraints and their tectonic implications[J]. Journal of Asian Earth Science, 98: 342 - 357.
- Qian X, Feng Q L, Wang Y J, et al., 2016a. Geochronological and geochemical constraints on the mafic rocks along the Luang Prabang zone: carboniferous back-arc setting in northwest Laos[J]. Lithos, 245: 60-75.
- Qian X, Feng Q L, Wang Y J, et al., 2016b. Petrochemistry and tectonic setting of the Middle Triassic arc-like volcanic rocks in the Sayabouli area, NW Laos[J]. Journal of Asian Earth Science, 27: 365 – 377.
- Rossignol C, Bourquin S, Poujol M, et al., 2016. The volcaniclastic series from the Luang Prabang Basin, Laos: A witness of a Triassic magmatic arc? [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 120: 159 - 183.
- Salam A, Khin Zaw, Meffre S, et al., 2014. Geochemistry and geochronology of epithermal Au-hosted Chatree volcanic sequence: implication for tectonic setting of the Loei Fold Belt in central Thailand [J]. Gondwana Research, 26: 198-217.
- Salam A, 2013. A geological, geochemical and metallogenic study of the Chatree epithermal deposit, Petchabun Province, Central Thailand [D]. Hobart: University of Tasmania
- Shi M F, Wu Z B, Liu S S, et al., 2019. Geochronology and petrochemistry of volcanic rocks in the Xaignabouli Area, NW Laos [J]. Journal of Earth Science, 30(1): 37-51.
- Shi M F, Khin Zaw, Liu S S, et al., 2021. 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 Sciences, 208(71):104661.
- Sone M, Metcalfe I, 2008. Parallel Tethyan sutures in mainland Southeast Asia: new insights for Paleo-Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny [J]. Geoscience, 340: 166 - 179.
- Tangwattananukul L, Ishiyama D, Matsubaya O, et al., 2014. Characteristics of Triassic epithermal Au mineralization at the Q prospect, Chatree mining area, Central Thailand [J]. Resource Geology, 64(2):167-181.
- Wang Y J, He H Y, Cawood P A, et al., 2016. Geochronological, elemental and Sr-Nd-Hf-O isotopic constraints on the petrogenesis of the Triassic post-collisional granitic rocks in NW Thailand and its Paleotethyan implications [J]. Lithos, 266 – 267: 264 – 286.

Wang Y J, Qian X, Cawood P A, et al., 2018. Closure of the East

Paleotethyan Ocean and amalgamation of the Eastern Cimmerian and Southeast Asia continental fragments [J]. Earth Science Reviews, 186: 195 – 230.

- Wang Y J, Yang T X, Zhang Y Z, et al., 2020. Late Paleozoic back-arc basin in the Indochina block: Constraints from the mafic rocks in the Nan and Luang Prabang tectonic zones, Southeast Asia [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 195: 104333.
- 陈永清,刘俊来,冯庆来,2010. 东南亚中南半岛地质及与花岗岩有 关的矿床[M]. 北京:地质出版社,76-89.
- 耿全如,李文昌,王立全,等,2021.特提斯中西段古生代洋陆格局 与构造演化[J]. 沉积与特提斯地质,41(2):297-315.
- 郭林楠,侯林,刘书生,等,2019. 老挝帕奔金矿床成矿流体来源与 矿床成因:稀土元素和 C、O、S 同位素证据[J]. 矿床地质,38 (2):233-250.
- 郭林楠,侯林,聂飞,等,2020. 老挝琅勃拉邦构造带石英闪长岩锆石 U-Pb 定年:古特提斯洋东向俯冲启示[J]. 沉积与特提斯地质,40(1):68-75.
- 李会恺,张翔君,王军,2011. 老挝琅勃拉邦爬奔金矿矿床地质及 成因探讨[J]. 云南地质,30(3):280-284.
- 李文昌,潘桂棠,侯增谦,等,2010.西南"三江"多岛弧盆-碰造山 成矿理论与勘查技术[M].北京:地质出版社,1-491.
- 刘书生,杨永飞,郭林楠,等,2018. 东南亚大地构造特征与成矿作 用[J]. 中国地质,45(5):7-33.
- 刘书生,2021. 老挝琅勃拉邦一泰国黎府铜金成矿带构造 岩浆 成矿作用研究[D]. 成都:成都理工大学.
- 陆芳芳,杨海林,童文辉,等,2015. 老挝帕奔金矿床包裹体特征 [J]. 河南科学,33(11):1985-1989.
- 聂飞,刘书生,杨永飞,等,2019.泰国普龙砂卡岩型铜矿床闪长岩 锆石 U-Pb 定年及意义[J]. 沉积与特提斯地质,39(4):71 -78.
- 牛英杰,刘威,高亚龙,等,2015. 老挝爬奔金矿床稳定同位素、稀土 元素地球化学特征[J]. 地质调查与研究,38(4):277-283.
- 牛英杰,孙宏岩,王居松,等,2017. 老挝帕奔金矿成矿流体特征及 成因类型[J]. 地质找矿论丛,32(2):317-323.
- 潘桂棠,王立全,耿全如,等,2020. 班公湖—双湖—怒江—昌宁— 孟连对接带时空结构——特提斯大洋地质及演化问题[J]. 沉 积与特提斯地质,40(3):1-19
- 钱鑫,冯庆来,王岳军,2016. 老挝西北部琅勃拉邦构造带放射虫硅 质岩及其构造意义[J]. 地学前缘,23(6):287-298.
- 史琪,赵延朋,迟占东,等,2016. 老挝班康姆铜金矿床地质特征及找 矿方向[J]. 矿产与地质,30(4):568-572.
- 王立全,王宝弟,李光明,等,2021. 东特提斯地质调查研究进展综述 [J]. 沉积与特提斯地质,41(2):283-296.
- 薛兰花,史老虎,2016. 老挝爬奔金矿成矿作用与成矿演化[J]. 地 质调查与研究,39(3):191-197.
- 杨昌正, 沈利霞, 周琳, 等, 2017. 老挝帕奔金矿地质 构造地球化 学特征及成矿机理[J]. 矿产与地质, 31(1):11-22.
- 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):178-182.
- 赵延朋,康铁锁,宁庚陈,等,2017. 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,36 (3):281-294.