

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04014

王天瑞,侯林,林方成,熊富浩,郭阳,郭林楠,徐思维,曾祥婷,施美凤,丛峰,2022. 老挝-越南长山成矿带古特提斯构造岩浆演化与成矿作用. 沉积与特提斯地质,42(2):212-227. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04014.

WANG T R, HOUL, LIN F C, XIONG F H, GUO Y, GUO L N, XU S W, ZENG X T, SHI M F, CONG F, 2022. Paleo-Tethys tectonic-magmatic evolution and mineralization in the Truong Son metallogenic belt, Laos-Vietnam. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(2):212-227. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04014.

## 老挝-越南长山成矿带古特提斯构造岩浆演化与成矿作用

王天瑞<sup>1,2</sup>, 侯林<sup>1\*</sup>, 林方成<sup>1</sup>, 熊富浩<sup>2</sup>, 郭阳<sup>1</sup>, 郭林楠<sup>1</sup>,  
徐思维<sup>1</sup>, 曾祥婷<sup>1</sup>, 施美凤<sup>1</sup>, 丛峰<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

**摘要:**老挝-越南长山成矿带位于特提斯构造成矿域东南段,发育大量古特提斯旋回岩浆岩和铜-金-铁-锡等多金属矿床,是研究东特提斯构造岩浆演化与成矿作用的天然实验室。本文系统梳理了长山成矿带的成岩成矿时代、矿床组合和岩石地球化学研究成果,揭示了长山成矿带古特提斯时期的岩浆岩时空格架,构建了晚石炭—中二叠世(317~264 Ma)哀牢山-马江洋的俯冲、中二叠—晚三叠世(263~235 Ma)华南地体与印支地体的碰撞以及晚三叠世(234~202 Ma)碰撞后伸展等构造演化过程。初步建立了长山成矿带各阶段的成矿模式,包括俯冲期斑岩-矽卡岩型 Fe-Cu-Au 和浅成低温热液型 Cu-Au-Ag 成矿(305~279 Ma)、碰撞期斑岩-矽卡岩型 Sn 和矽卡岩型 Fe-Au 成矿(249~236 Ma)、伸展期热液脉型 Au 矿化(212~204 Ma)。受限于晚三叠世晚期岩浆活动和成矿作用研究资料的缺乏,碰撞后伸展阶段的成矿作用仍有待进一步研究。

**关键词:**古特提斯;长山成矿带;构造岩浆演化;成矿作用

中图分类号:P548;P618.2

文献标识码:A

### Paleo-Tethys tectonic-magmatic evolution and mineralization in the Truong Son metallogenic belt, Laos-Vietnam

WANG Tianrui<sup>1,2</sup>, HOU Lin<sup>1\*</sup>, LIN Fangcheng<sup>1</sup>, XIONG Fuhao<sup>2</sup>, GUO Yang<sup>1</sup>, GUO Linnan<sup>1</sup>,  
XU Siwei<sup>1</sup>, ZENG Xiangting<sup>1</sup>, SHI Meifeng<sup>1</sup>, CONG Feng<sup>1</sup>

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The Truong Son metallogenic belt which spans Laos and Vietnam is located in the southeast part of the Tethys tectonic-metallogenic domain. It develops a large number of Paleogene igneous rocks and Cu-Au-Fe-Sn polymetallic deposits, which makes the Truong Son belt a natural laboratory for studying the tectonic-magmatic evolution and mineralization of the Eastern Tethys. This paper systematically combs the research findings of diagenetic and metallogenic age, deposit assemblage and whole-rock geochemistry in the Truong Son metallogenic

收稿日期:2022-04-14; 改回日期:2022-04-20; 责任编辑:黄春梅; 科学编辑:曹华文

作者简介:王天瑞(1996—),男,硕士研究生,主要从事矿床岩浆作用和成因矿物学研究。E-mail:trwang926@yeah.net

通讯作者:侯林(1985—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事东特提斯与扬子西南缘构造演化和成矿作用研究。E-mail:houlin\_aaron@163.com

资助项目:国家自然科学基金重点基金课题“东南亚长山带锡多金属成矿作用研究”(92162215-1)、中国地质调查局二级项目“柬埔寨-老挝-越南铝土矿资源调查”(DD20201160)

belt, and reveals the temporal and spatial framework of igneous rocks in the Paleo-Tethys period of the Truong Son metallogenic belt, and establishes the tectonic evolution processes, including the subduction of Ailaoshan-Song Ma ocean plate in the Late Carboniferous to Middle Permian (317 ~ 264 Ma), the collision between the South China block and the Indochina block in the middle Permian to Late Triassic (263 ~ 235 Ma), and the post-collision extension process in the Late Triassic (234 ~ 202 Ma). The metallogenic model of the Truong Son belt is preliminary established, including porphyry-skarn type Fe-Cu-Au and epithermal type Cu-Au-Ag mineralization (305 ~ 279 Ma) in subduction period, porphyry-skarn type Sn and skarn type Fe-Au mineralization (249 ~ 236 Ma) in collision period and hydrothermal vein type Au mineralization (212 ~ 204 Ma) in extension period. Since there are few reports on magmatism and mineralization in the Late Triassic, the mineralization of extensional period still needs to be further studied.

**Key words:** Paleo-Tethys; Truong Son metallogenic belt; tectonic-magmatic evolution; mineralization

## 0 引言

长山成矿带地处中南半岛北东部的老挝-越南相邻地区,又被称为长山褶皱带(Zaw et al., 2014)或长山地块(Burrett et al., 2014)。带内岩浆活动强烈,同时产出大量岩浆-热液金属矿床,如爬立山铁矿、色潘铜金矿、南巴坦锡矿、蓬苗金矿等,是重要的铁-铜-金-锡多金属成矿带。又因为长山成矿带位于特提斯成矿域的东南段,使之成为研究东特提斯构造岩浆演化与成矿作用的天然实验室。

前人研究表明,长山成矿带上述岩浆-热液矿床的形成,与古特提斯期(石炭纪-三叠纪)马江洋向南的俯冲及后续相邻陆块间的俯冲碰撞所引发的长英质岩浆作用有关(Hoa et al., 2008; Liu et al., 2012; Faure et al., 2014; Kamvong et al., 2014; Roger et al., 2014; Shi et al., 2015; Wang et al., 2016; Hieu et al., 2017; Liu et al., 2018)。然而,由于缺乏对这段时间带内具体的构造演化顺序、岩浆活动特征以及成矿作用的系统梳理,尤其是俯冲、碰撞、伸展等构造事件的时限、各构造演化阶段的岩浆岩成因和岩浆源区以及与之相关的矿床组合仍存在争议(Lepvrier et al., 2004; Hoa et al., 2008; Liu et al., 2012; Zaw et al., 2014; Liu et al., 2018; Wang et al., 2018; Qian et al., 2019; Hou et al., 2019b),一个完善的长山带古特提斯构造岩浆演化与成矿作用模式尚未提出,这制约了东特提斯构造域古特提斯时期成矿作用的归纳总结。

为深化对长山带古特提斯(石炭纪-三叠纪)构造岩浆演化与成矿作用认识,本文收集了近年来针对长山带开展的地质学、矿床学、年代学、岩石地

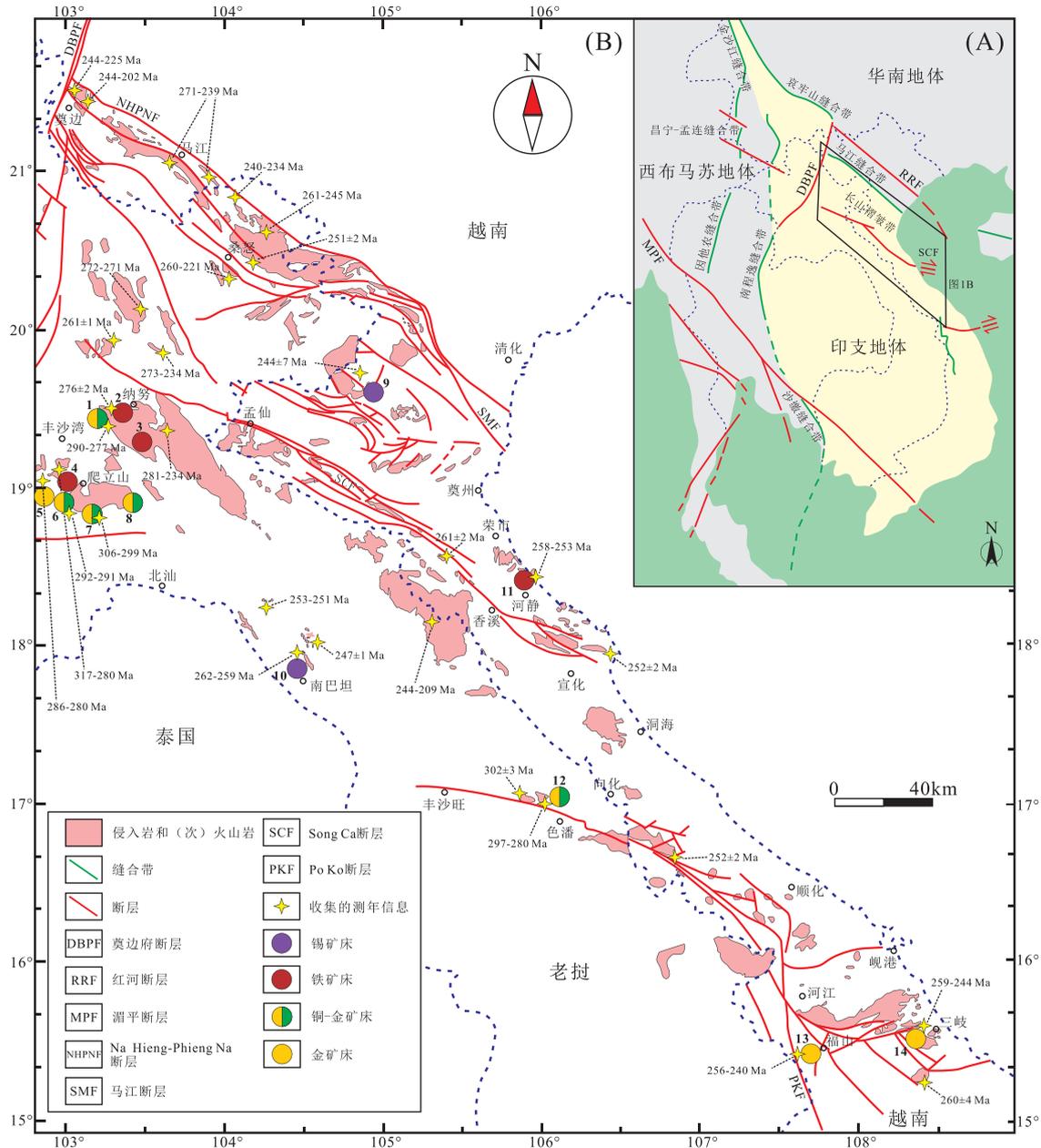
球化学、同位素示踪等方面研究的数据,结合本文作者承担的项目研究最新进展,通过综合对比分析的手段,旨在:(1)把握长山带古特提斯演化时期岩浆岩特征及其构造环境;(2)总结长山带古特提斯演化时期矿床类型与成矿作用;(3)建立长山带古特提斯构造岩浆演化模式并探讨其对成矿的约束。

## 1 长山成矿带古特提斯构造岩浆演化

### 1.1 长山成矿带区域构造背景及岩浆岩分布

长山成矿带位于中南半岛北东部,特提斯成矿域的南东段,自老挝东北部一直延伸至越南中南部,构造带呈北西-南东走向展布(图1A)。长山成矿带北部以哀牢山-马江缝合带与华南地体相邻(Zhang et al., 2014),南部以三岐-福山缝合带与昆嵩地块相邻(Tran et al., 2014; Minh et al., 2021)。马江缝合带曾被认为是古特提斯洋的弧后盆地或分支(Lepvrier et al., 2004; Vuong et al., 2013; Faure et al., 2014),近期研究发现该缝合带内蛇绿岩、变质岩、榴辉岩以及基性岩浆岩具有洋中脊(MORB)型地化特征,其原岩年龄为387~313 Ma(Vuong et al., 2013; Zhang et al., 2013, 2014),说明古特提斯洋东段的拉张从中泥盆世持续到中石炭世。长山带被认为是哀牢山-马江洋闭合的产物(Zaw et al., 2014)。

长山成矿带内分布大量石炭纪-三叠纪的火山岩和侵入岩(表1)。在长山带北部,岩体分布于马江断裂和斋江断裂之间,以陆相安山岩-英安岩和长英质侵入岩为主。其中,侵入岩主要分布于奠边、马江、桑怒地区,其岩石类型为闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩等。火山岩则主要分布在桑怒地区,以流纹岩为主。研究表明,这些长英质的岩浆岩形



1. KTL-Tharkhek 铜金矿床; 2. 纳努铁矿床; 3. 富诺安铁矿床; 4. 爬立山铁矿床; 5. 会晒金(银)矿床; 6. LCT 铜金(银)矿床; 7. 富康铜金矿床; 8. 那钦铜金矿床; 9. 葵合锡矿床; 10. 南巴坦锡矿床; 11. 石溪铁矿床; 12. 色潘铜金矿床; 13. 福山金矿床; 14. 蓬苗金矿床

图 1 长山带大地构造位置(A)与岩浆岩和矿床分布图(B)(根据 Hou et al., 2019b 改)

Fig. 1 Tectonic location of the Truong Son belt (A) and distribution map of igneous rocks and deposits in the Truong Son belt (B) (Hou et al., 2019b)

成于早二叠世至晚三叠世(Roger, et al., 2014; Shi et al., 2015; Wang et al., 2016; Hieu et al., 2017; Qian et al., 2019)。在长山带南部,如色潘、福康、会晒、爬立山和南巴坦(图 1B)等地,分布一系列长英质侵入岩和(次)火山岩,且与成矿关系密切。其中,侵入岩以闪长(斑)岩、花岗闪长岩和花岗(斑)岩为主,(次)火山岩则以安山岩和流纹质英安斑岩

为主。年代学研究表明,这些中酸性岩浆岩的形成于晚石炭世至晚三叠世(Lepvrier et al., 2004; Hoa et al., 2008; Liu et al., 2012; Kamvong et al., 2014; Manaka et al., 2014; Shi et al., 2015; Wang et al., 2016; Qian et al., 2019)。总体而言,长山带内岩浆岩呈现出南部略早而北部略新的特征(图 1B)。

表1 长山带古特提斯岩浆岩地球化学信息表  
Table 1 Geochemical data of igneous rocks in the Truong Son belt

时代	岩体名称	岩石类型	成岩年龄/Ma	参考文献
晚石炭—中二叠世 (317 ~ 264 Ma)	爬立山 Pha Lek	闪长岩	307.9 ± 9.3	李勇峰, 2012
		花岗闪长岩	317 ± 17	
		花岗闪长岩	288.2 ± 1.3	Hou et al., 2019b
		花岗岩	284.9 ± 1.2	Hou et al., 2019b
		二长花岗岩	280.3 ± 2.9	王疆丽等, 2013
	丰沙湾 Phonsavan	花岗闪长岩 角闪花岗岩	281 ~ 274	Qian et al., 2019
	丰沙湾-桑怒 Phonsavan-Xam Nua	黑云母花岗岩	273 ~ 271	
	Nam He	花岗闪长岩	296 ~ 289	Hieu et al., 2017
	福康 Phu Kham	闪长斑岩	306 ~ 304	Kamvong et al., 2014
	色潘 Sepon	花岗闪长斑岩	302.1 ± 2.9	Wang et al., 2018
		流纹质闪长斑岩	290 ~ 280	Cromie, 2010
	KTL-Tharkhek	闪长岩	290 ~ 285	Hoston, 2009
	Long Chieng Track	英安斑岩	290.6 ± 3.5	Manaka, 2008; Manaka et al., 2014
	会晒 Ban Houayxai	长石安山岩	286 ~ 283	Manaka, 2008; Manaka et al., 2014
	孟来 Muong Lay	花岗岩	277 ± 1.6	Roger et al., 2014
		辉石闪长岩	280.6 ± 5.0	Liu et al., 2012
		辉长岩	275.5 ± 4.6	
	Chieng Khuong	石英闪长岩	270.9 ± 3.3	Hou et al., 2019b
	纳努 Nanou	闪长斑岩	276.0 ± 1.5	
	南巴坦 Nam Pathene	花岗斑岩	261.9 ± 2.3	Hou et al., 2019b
二长花岗岩		258.9 ± 1.5		
Phia Bioc	黑云母花岗岩	244 ± 5	Hieu et al., 2017	
	二长花岗岩	253.4 ± 1.5		
Dong Trau	流纹岩	251.9 ± 1.7	Shi et al., 2015	
Bengiang-Queson	斜长花岗岩	251.8 ± 1.9		
奠边 Dien Bien	花岗闪长岩	242.2 ± 1.3	Hieu et al., 2017	
马江 Song Ma	二长花岗岩	260.9 ± 1.6		
Chieng Khuong	石英闪长岩	262 ± 4	Wang et al., 2016	
Lat Boua	二长花岗岩	254 ~ 245		
Kham	二长花岗岩	253 ~ 236	Sanematsu et al., 2011	
Phon Thong	花岗闪长岩	250 ~ 245		
Na The	花岗闪长岩	256 ~ 240	Sanematsu et al., 2011	
Phou Thoun	花岗闪长岩	253.3 ± 0.7		
Say Phou Ngou	花岗岩	246.8 ± 1.2	Sanematsu et al., 2011	
Poung Kuak	黑云母花岗岩	244.1 ± 1.1		
Nape	花岗闪长岩	235.1 ± 1.0	Qian et al., 2019	
桑怒 Xam Nua	黑云母花岗岩	260 ± 1		
		260 ± 1		
		258 ± 1		
蓬苗 Bong Mieu	流纹岩	261 ± 1	Tran et al., 2014	
		闪长岩		252.1 ± 1.5
		花岗岩		245.9 ± 1.5

续表 1

时代	岩体名称	岩石类型	成岩年龄/Ma	参考文献	
晚三叠世 (234 ~ 202 Ma)	福山 Phuoc son	英安斑岩	251 ~ 250	Manaka, 2014	
		花岗岩	251.1 ± 4.4		
	色潘 Sepon	花岗岩	247 ~ 243	Cromie, 2010	
	孟来 Muong Lay	辉石闪长岩	248.3 ± 2.1	Liu et al., 2012	
	Cha Val	花岗岩	258 ~ 249	Minh et al., 2021	
	丰沙湾 Phonsavan	花岗闪长岩 角闪花岗岩	234 ± 1	Qian et al., 2019	
	桑怒 Xam Nua		221 ± 1		
	Nam Rom	花岗闪长岩	233 ~ 231	Hieu et al., 2017	
	Kham	二长花岗岩	234.0 ± 3.5	Wang et al., 2016	
	Nape	花岗闪长岩	221.6 ± 1.1	Sanematsu et al., 2011	
		英云闪长岩	208.6 ± 1.6		
	奠边 Dien Bien		花岗岩	230 ± 1	Roger et al., 2014
				225 ± 3	
			花岗闪长岩	229.3 ± 3.1	Liu et al., 2012
石英二长岩			201.8 ± 3.6		

## 1.2 长山成矿带岩浆活动期次划分

长山成矿带内古特提斯岩浆活动可根据岩石类型、成岩年龄分布(图2)、地球化学及同位素特征(图3和图4)分为三个期次:晚石炭—中二叠世(317 ~ 264 Ma)、中二叠—晚三叠世(263 ~ 235 Ma)、晚三叠世(234 ~ 202 Ma)。全岩 Sr-Nd 和锆石 Hf 同位素所反映的地幔物质的幕式加入和消退是本文划分岩浆活动时限的重要依据。

### 1.2.1 317 ~ 264 Ma 期岩浆岩

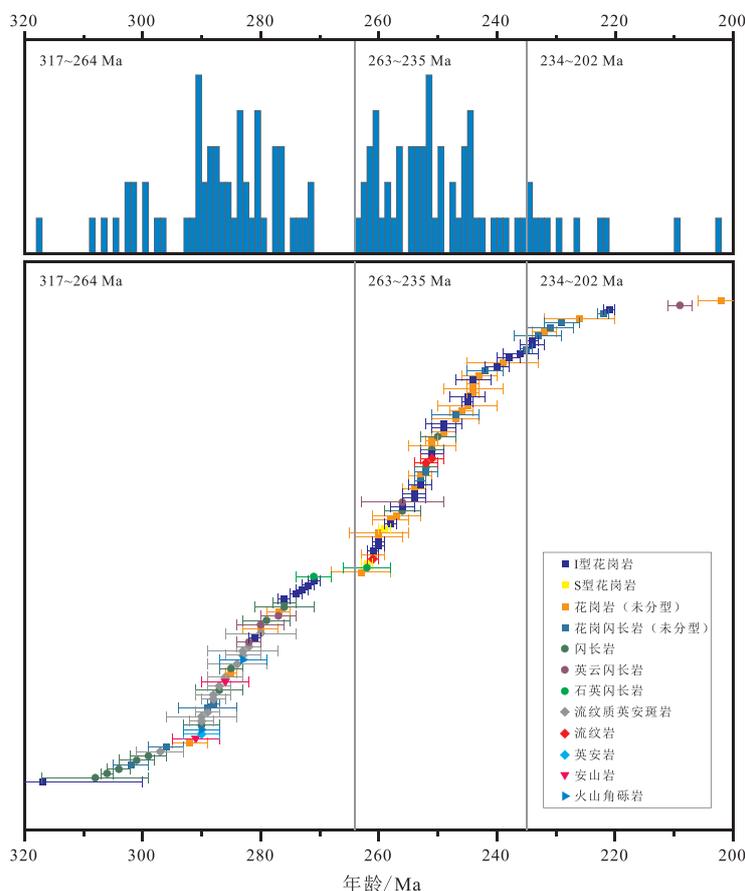
晚石炭—中二叠世(317 ~ 264 Ma)岩浆活动主要形成一套埃达克质闪长(斑)岩、流纹质英安斑岩、英安岩、安山岩,次为花岗岩、花岗闪长岩、石英二长岩等(Hoa et al., 2008; Manaka, 2008; Hotson, 2009; Cromie, 2010; Liu et al., 2012; 李勇峰, 2012; 毛洪江, 2012; 邹光富等, 2012; 朱华平等, 2014; Kamvong et al., 2014; 高建华等, 2015; Qian et al., 2019; Hieu et al., 2019; Hou et al., 2019b), 主要分布于长山带南部。与该期岩浆事件有关的矿床包括:爬立山铁矿、纳努铁矿、色潘铜金矿、福康铜金矿、KTL-Tharkhek 铜金矿、会晒金(银)矿和 Long Chieng Track 金(银、铜)矿。

该期岩浆岩  $w(\text{SiO}_2)$  为 43.1% ~ 80.4%,  $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  为 1.5% ~ 11.6%,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 10.6% ~ 21.2%,  $w(\text{CaO})$  为 0.01% ~ 17.9%, Mg# 值 5 ~ 67, 属亚碱性低钾至钾玄岩系列的准铝—过铝质岩石(图 3A、B、F)。其中,花岗质岩石总体具

有较低的  $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$  值、 $\text{FeO}^T/\text{MgO}$  值和  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$  值(图 3C、D)。在  $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$  图中(图 3E),全岩  $\text{P}_2\text{O}_5$  随  $\text{SiO}_2$  增加整体呈下降趋势,局部有上升趋势,表明该期花岗质岩石主要为 I 型花岗岩,岩浆来自火成岩或变质火成岩的部分熔融;次为 S 型花岗岩,源区为变质沉积物(Chappell, 1999)。前人研究表明,该期 I 型和 S 型花岗岩均形成于火山弧环境(李勇峰, 2012; 高建华等, 2015)。已报道的全岩初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值(0.70360 ~ 0.71382)和  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(-11.3 ~ +0.8) 范围较大(图 4B)。其中,具有较低初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值(0.70360 ~ 0.70590)和正的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(0.09 ~ 0.8)的花岗岩类和闪长(斑)岩的岩浆源区可能为自新生下地壳(Liu et al., 2012; Qian et al., 2019),而具有较高初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值(0.70870 ~ 0.71382)和负的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(-11.3 ~ -6.9)的花岗质岩石可能来自新生下地壳与古老地壳的混合。在图 4A 中,该期岩浆岩的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值随年龄(317 ~ 264 Ma)从正变负(-16.8 ~ +21.1),表明岩浆事件经历了新生下地壳源区贡献逐渐减少而古老地壳物质比例逐渐增加的过程(Wang et al., 2018; Qian et al., 2019; Hou et al., 2019b)。

### 1.2.2 263 ~ 235 Ma 期岩浆岩

中二叠—晚三叠世(262 ~ 235 Ma)岩浆活动形成一套花岗岩、二长花岗岩、花岗斑岩、花岗闪长岩、辉长岩、英安(斑)岩、流纹岩和安山岩组合,广泛分布于长山带内(Hoa et al., 2008; Cromie, 2010;



图中数据来源与表1、表2相同

图2 长山成矿带岩浆岩石类型及成岩年龄分布图

Fig. 2 Distribution of igneous rocks and their diagenetic ages in the Truong Son metallogenic belt

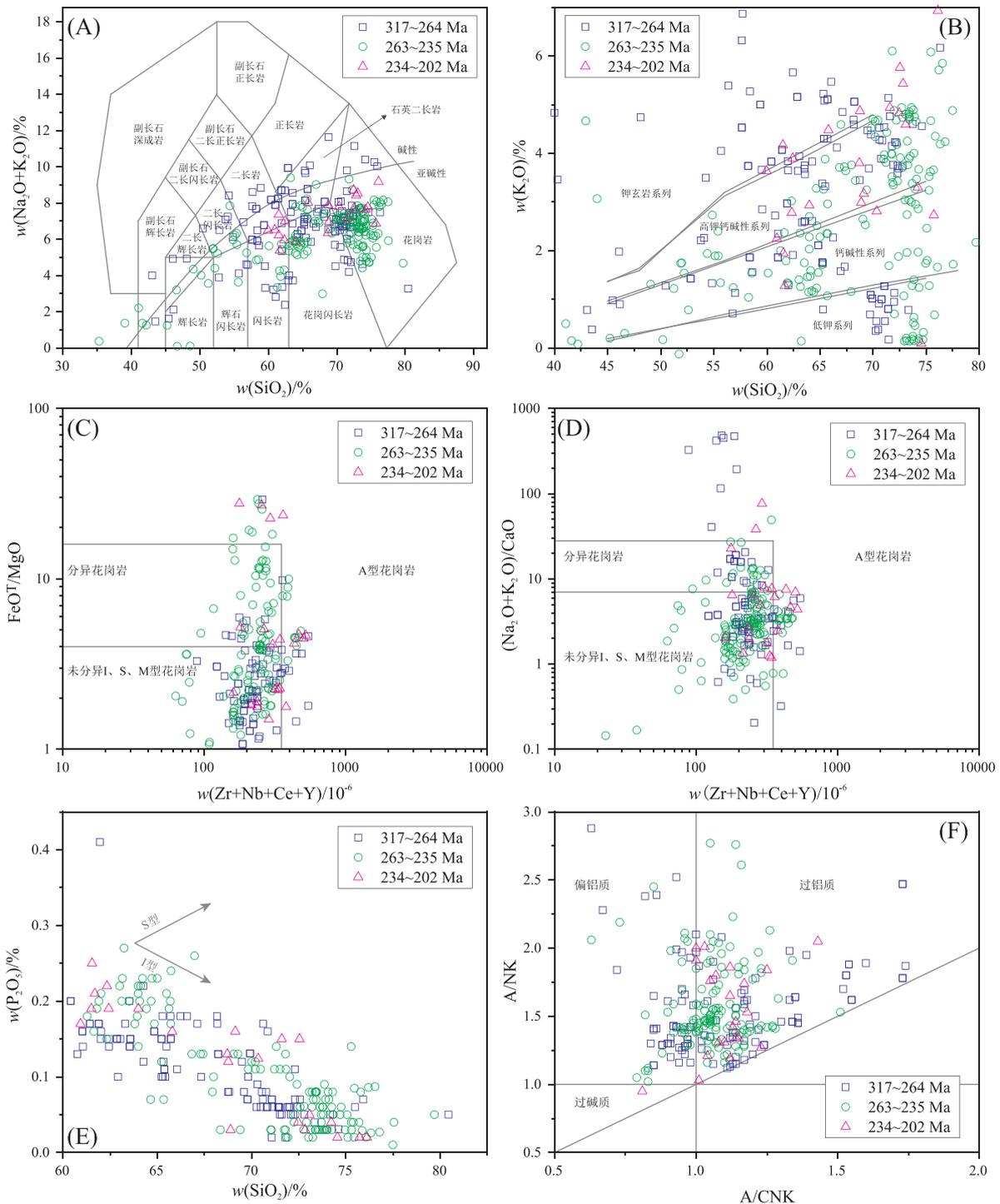
Manaka, 2014; Kamvong et al., 2014; Shi et al., 2015; Wang et al., 2016; Hou et al., 2019b; Qian et al., 2019; Hieu et al., 2017; Minh et al., 2021)。与该期岩浆事件有关的矿床包括:南巴坦锡矿、石溪铁矿、蓬苗金矿、福山金矿。

该期岩浆岩  $w(\text{SiO}_2)$  为 35.3% ~ 79.7%,  $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  为 0.1% ~ 9.4%,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 1.1% ~ 21.0%,  $w(\text{CaO})$  为 0.2% ~ 16.6%, Mg# 值 6 ~ 83, 属亚碱性低钾-高钾钙碱性系列岩石(图 3A, B)。A/CNK 集中在 1 附近(图 3F), 为准铝质-弱过铝质。其中, 花岗质岩石具有较低的  $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$  值、 $\text{FeO}^T/\text{MgO}$  值和  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$  值(图 3C, 3D)。在  $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$  图中(图 3E), 该期花岗质岩石大多呈现出 I 型花岗岩的特征。部分地区(如南巴坦)也有少量该期 S 型花岗岩的报道(Hou et al., 2019b), 主要出现在本次岩浆活动初期(图 2)。该期岩浆岩具有较高的初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值(0.70810 ~ 0.72440)和负的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(-8.9 ~ -2.9),

表明岩浆源区为古老地壳和新生下地壳物质的混合, 且古老地壳物质的贡献占主导(Wang et al., 2016; Qian et al., 2019; Hou et al., 2019b; Minh et al., 2021)。该期岩浆活动初期较高的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(+7.3 ~ +13.7, 263 Ma, Hieu et al., 2017)是区别于上一期次(317 ~ 264 Ma)岩浆活动最显著的标志。随后, 锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值随时间迅速降低并趋于稳定(-24.0 ~ +4.3, 平均为 -5.0), 可能说明仅在岩浆活动初期有较多新生下地壳物质的加入(图 4A)。

### 1.2.3 234 ~ 202 Ma 期岩浆岩

晚三叠世(234 ~ 202 Ma)岩浆活动形成一套花岗岩、角闪花岗岩、花岗斑岩、石英二长岩岩石组合(Hoa et al., 2008; Roger et al., 2014; Qian et al., 2019), 零星分布于长山带北端。目前, 与该期岩浆事件有关的矿床鲜有报道, 仅福山金矿区存在这一时代(212 ~ 204 Ma, 热液脉体中黑云母 Ar-Ar 年龄)的成矿事件(Manaka, 2014)。



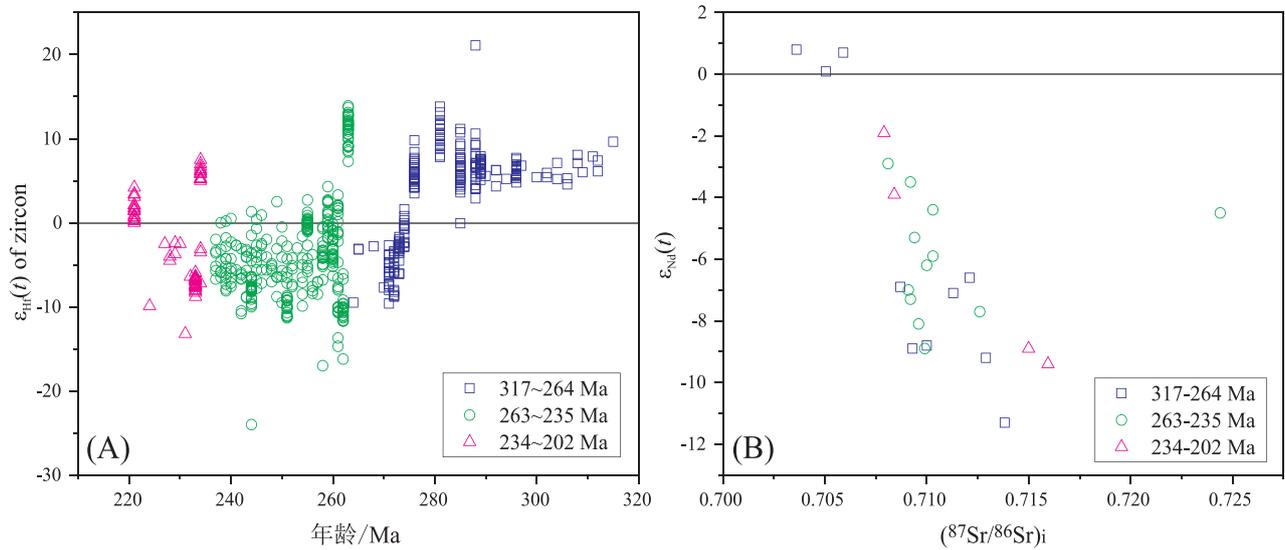
图中数据来自 Hoa et al., 2008; Manaka, 2008; Cromie, 2010; Liu et al., 2012; 李勇峰, 2012; 毛洪江, 2012; 邹光富等, 2012; 朱华平等, 2014; Kamvong et al., 2014; 高建华等, 2015; Qian et al., 2019; Hieu et al., 2019; Hou et al., 2019b; Minh et al., 2021

图3 长山成矿带岩石地球化学特征图

(1)  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ - $\text{SiO}_2$  岩石类型判别图 (Middlemost, 1994); (B)  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  岩石系列判别图 (Peccerillo and Taylor, 1976); (C) 和 (D) 花岗岩分类图 (Whalen, 1987); (E) I型和S型花岗岩判别图 (Chappell, 1999); (F)  $\text{A}/\text{NK}$ - $\text{A}/\text{CNK}$  图 (Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 3 Geochemical characteristics of rocks in the Truong Son metallogenic belt

(A)  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ - $\text{SiO}_2$  diagram for distinguishing the rock types (Middlemost, 1994); (B)  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  diagram for rock-series discrimination (Peccerillo and Taylor, 1976); (C) and (D) diagrams for distinguishing the granite types (Whalen, 1987); (E) discrimination diagram of I-type and S-type granites (Chappell, 1999); (F)  $\text{A}/\text{NK}$ - $\text{A}/\text{CNK}$  diagram (Maniar and Piccoli, 1989)



图中数据来自 Liu et al., 2012; Wang et al., 2016; Hieu et al., 2017; Wang et al., 2018; Hou et al., 2019b; Minh et al., 2021

图4 长山带古特提斯岩浆岩锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图(A)和岩浆岩全岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图(B)

Fig. 4  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  and ages of zircons in Paleo-Tethys igneous rocks (A) and  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  diagram for igneous rocks in the Truong Son belt (B)

该期岩浆岩  $w(\text{SiO}_2)$  为 60.0% ~ 76.1%,  $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  为 5.4% ~ 9.2%,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 11.5% ~ 18.3%,  $w(\text{CaO})$  为 0.1% ~ 5.2%, Mg# 值 6 ~ 55, 均属于亚碱性、过铝质岩石(图 3A, F), 主要为高钾钙碱性-钾玄岩系列(图 3B)。花岗质岩石较低的  $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$  值、 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$  值和  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$  值(图 3C, 3D), 表明其不属于 A 型花岗岩。在  $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$  图中(图 3E), 该期花岗质岩石呈现出 I 型花岗岩特征。岩浆岩的初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值(0.70810 ~ 0.71643) 和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(-9.4 ~ -1.9) 表明, 岩浆源区物质为古老地壳和新生下地壳的混合(Liu et al., 2012; Qian et al., 2019)。

### 1.3 长山带构造岩浆演化阶段划分

长山带内石炭纪到三叠纪(317 ~ 202 Ma) 的岩浆活动受该时期构造事件的控制和影响, 因此成为长山带古特提斯构造演化的绝佳记录。前人研究成果表明, 长山带古特提斯时期经历了板块俯冲、碰撞造山以及随后的伸展过程(Zaw et al., 2014; Shi et al., 2015; Wang et al., 2018; Qian et al., 2019; Hou et al., 2019b)。由于长山带岩浆活动的连续性, 不同学者对各阶段时间跨度的界定存在差异, 本文根据文献资料中的岩石类型、岩石地球化学和同位素特征, 提出了一套长山带构造岩浆演化阶段的时间划分方案, 以供参考。

#### 1.3.1 俯冲阶段(317 ~ 264 Ma)

古特提斯洋的分支洋之一, 哀牢山-马江洋在

晚石炭世开始向南西俯冲到印支地块之下(Zaw et al., 2014), 这与我国西南“三江”地区古特提斯分支洋(昌宁-孟连洋和金沙江-哀牢山洋)在晚石炭世向印支地块俯冲的时间相吻合(邓军等, 2020)。晚石炭-中二叠世形成北西-南东向的火山弧, 洋盆在中二叠世闭合。俯冲阶段岩浆活动在长山带南西侧的响应较早(图 1B), 首先形成爬立山 I 型花岗岩和少量 S 型花岗岩(317 ~ 280 Ma)、福康埃达克质岩石(306 ~ 304 Ma) 以及色潘花岗岩(302 ~ 280 Ma), 三者均具有火山弧岩浆特征(Cromie, 2010; 李勇峰, 2012; 王疆丽等, 2013; Kamvong et al., 2014; 高建华等, 2015; Wang et al., 2018; Hou et al., 2019a)。随后, 在早-中二叠世形成长山带内分布广泛的其他俯冲期岩浆岩, 包括孟来-马江附近(包括 Nam He) 的中酸性侵入岩(296 ~ 271 Ma)、爬立山附近的 LCT 英安斑岩( $290.6 \pm 3.5$  Ma), 会晒安山岩(286 ~ 283 Ma)、丰沙湾-桑怒(包括纳努和 KTL-Tharkhek) 一带的花岗岩类(290 ~ 271 Ma) 等(Manaka, 2008; Hoston, 2009; Liu et al., 2012; Roger et al., 2014; Manaka et al., 2014; Hieu et al., 2017; Qian et al., 2019; Hou et al., 2019b)。该期岩浆岩的时空分布特征可能与洋壳的低角度俯冲有关(Hou et al., 2019b)。270 ~ 264 Ma 是长山带内俯冲阶段岩浆活动的间歇期, 说明此时洋壳俯冲可能已经结束。

#### 1.3.2 碰撞阶段(263 ~ 235 Ma)

哀牢山-马江洋俯冲结束后, 印支地块与华南

地块在中二叠世发生碰撞(Zaw et al., 2014)。该过程的岩浆岩记录从 263 Ma 开始,在长山带内形成一套北西—南东向年龄连续(263 ~ 235 Ma)的岩浆岩,主要集中在 263 ~ 242 Ma (表 1)。碰撞初期,在马江地区侵位的偏铝质—弱过铝质花岗质岩浆主要来自新生下地壳的部分熔融(图 4A),随后形成的 S 型花岗岩(如南巴坦花岗岩)以及岩浆岩中较高的初始<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值(0.70810 ~ 0.72440)、负的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值(-8.9 ~ -2.9)、降低且趋于稳定的锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$  值(-24.0 ~ +4.3, 平均 -5.0),均说明在碰撞初期之后的时间跨度内岩浆主要来自古老地壳的熔融,而新生下地壳的贡献很小(Wang et al., 2016; Hieu et al., 2017; Hou et al., 2019b)。在碰撞阶段末期(241 ~ 235 Ma),长山带内岩浆活动也趋于平静,仅在马江和 Nape 地区有少量花岗岩类(238 ~ 235 Ma)侵位(Sanematsu et al., 2011; Wang et al., 2016)。

### 1.3.3 伸展阶段(234 ~ 202 Ma)

印支地体与华南地体结束碰撞,在晚三叠世进入造山后伸展阶段(Liu et al., 2012; Zaw et al., 2014; Wang et al., 2018)。丰沙湾—桑怒一带 234 Ma 的花岗岩和花岗闪长岩(Wang et al., 2016; Qian et al., 2019)是伸展期最早的记录,以正的锆石  $\epsilon_{Nd}(t)$  值(+5.0 ~ +7.5)为标志(图 4A),表明初期新生下地壳物质的大量重新加入。随后形成长山带北段的莫边附近花岗岩类(233 ~ 202 Ma)、桑怒花岗闪长岩和黑云母花岗岩(221 ± 1 Ma)、Nape 花岗闪长岩和英云闪长岩(222 ~ 209 Ma)等(Sanematsu et al., 2011; Liu et al., 2012; Roger et al., 2014; Wang et al., 2016; Hieu et al., 2017; Qian et al., 2019)。这些花岗岩具有较明显的碰撞后特征(如较高的全碱、大离子亲石元素和轻稀土元素含量)(Liu et al., 2012; Hieu et al., 2017; Qian et al., 2019),岩浆岩的较高初始<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值(0.70810 ~ 0.71643)和负的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值(-9.4 ~ -1.9)均表明新生下地壳和古老地壳的混合来源。长山带中部和南东段的伸展期岩浆记录较少,有待进一步研究。

## 2 长山带古特提斯矿床时空分布与特征

### 2.1 长山带古特提斯矿床时空分布

长山成矿带内发育有一系列多金属矿床,主要

矿床的储量、品位和地质特征列于表 2。这些矿床均表现出与火成岩的密切关系,并伴随强烈的热液蚀变(斑岩—矽卡岩型铁铜矿、斑岩—矽卡岩型锡矿、浅成低温热液型金银矿等)。本文根据矿床的形成时代、成因类型、矿种及分布特征(图 1B),将长山带古特提斯时期的一系列矿床做以下时空划分。

晚石炭世—中二叠世矿床:斑岩—矽卡岩型铁矿主要分布在长山带北西端的丰沙湾附近,典型矿床为爬立山铁矿、纳努铁矿和富诺安铁矿;斑岩—矽卡岩型铜、金矿床主要分布在丰沙湾—色潘一带,典型矿床为 KTL—Tharkhek 铜—金矿、福康铜—金矿和色潘铜—金矿;浅成低温热液型铜—金—银矿主要分布在丰沙湾附近,典型矿床为 LCT 铜—金—银矿和会晒金—银矿。

中二叠世—晚三叠世矿床:斑岩—矽卡岩型锡矿床主要分布在长山带南西侧的南巴坦附近,典型矿床为南巴坦锡矿;矽卡岩型铁矿床主要分布在长山带北东测的河静附近,典型矿床为石溪铁矿;矽卡岩型金矿床主要分布在长山带南东端与昆嵩地块交界的福山—三岐一带,典型矿床为福山金矿和蓬苗金矿,其中福山金矿的热液脉型金矿化可能持续到晚三叠世末期。

### 2.2 长山带古特提斯代表性矿床特征

长山带内古特提斯期矿床的不同矿种和成矿类型之间,成矿年龄区别很大,与其成矿相关联的岩体类型也不同。为充分说明这些特征上的差异,下面着重介绍四个代表性矿床。

#### 2.2.1 老挝万象省爬立山铁矿床

爬立山(Pha Lek)铁矿床位于老挝万象省赛宋文县西北方向的南山村,在构造上,其位于长山成矿带北西端(图 1B)。目前已完成的勘探工作表明,该矿床的铁矿石资源量在 2 亿吨以上,属于大型矽卡岩型铁矿床(林方成等,2014<sup>①</sup>;朱华平等,2014)。

矿区主要出露泥盆系地层,中上泥盆统地层构成矿区的主要赋矿岩系,可分为上、下两个岩性组合。下部以大理岩为主夹少量钙质碎屑岩,上部为一套火山碎屑岩夹少量碎屑岩组合。矿区发育以二长花岗岩,花岗岩,花岗闪长岩和石英闪长岩为主的侵入岩,总体呈 NW—SE 向展布,以不规则岩株状产出。锆石 U—Pb 年代学数据显示,矿区的侵入岩主要形成于 317 ~ 280 Ma 之间(赵红娟等,

2011;王疆丽等,2013;Hou et al., 2019b)。

前人已在爬立山矿区圈定出 D1、D2、D3、D4 四个主要矿体和数个小矿体(邹光富等,2012;林方成等,2014<sup>①</sup>;朱华平等,2014;Hou et al., 2019a)。主要矿体均产于花岗质侵入体与围岩接触带附近的矽卡岩中。矿体中黄铁矿的 Re-Os 等时线年龄为

287 ± 17 Ma,表明爬立山矿床形成于晚石炭世—中二叠世,其矿化与矿区侵入体所代表的岩浆活动密切相关(Hou et al., 2019b)。爬立山矿床的主要矿石类型为砂砾土状铁矿石、孔洞状赤(褐)铁矿石和致密块状磁铁矿石三种。矿石品位在 40% ~ 60% 之间。

表 2 长山带古特提斯主要矿床信息表

Table 2 Information of major Paleo-Tethys deposits in the Truong Son belt

矿床名称	岩浆岩	成矿时代/Ma	成因类型	储量/品位	参考文献
爬立山(Pha Lek) 铁矿床	二长花岗岩、花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩; 成岩年龄: 317~280 Ma	287±17	矽卡岩型	矿石资源量>2 亿吨, 矿石品位: TFe 40%~60%	赵红娟等, 2011 王疆丽等, 2013 林方成等, 2014 <sup>①</sup> Hou et al., 2019b
福康(Phu Kham) 铜金银矿床	花岗闪长斑岩; 成岩年龄: 310~270Ma	304.9±1.7 304.7±1.7	斑岩-矽卡岩型	矿石资源量 2.4 亿吨; 铜矿石品位 TCu0.55%, 金矿石品位 0.24g/t, 银矿石品位 2.2g/t	王宏等, 2014 Kamvong et al., 2014
色潘(Sepon) 铜金矿床	花岗岩、花岗闪长斑岩、流纹质英安斑岩; 成岩年龄: 302~243 Ma	282.4±1.6 280.2±1.0 287.2±1.0 286.1±1.0	斑岩-矽卡岩型	196 万吨铜和 102 吨金; 铜矿石: 原生矿石 1.1%, 氧化矿石 2.5%; 金矿石品位 2.0g/t	Cromie, 2010 Wang et al., 2018 朱华平等, 2013 林方成等, 2014 <sup>①</sup> 施美凤等, 2017
KTL-Tharkhek 铜金矿床	闪长岩、英云闪长岩; 成岩年龄: 290~277 Ma	289.4±1.0	斑岩-矽卡岩型	矿石资源量 9200 万吨, 矿石品位: 铜 0.45%, 金 0.19g/t, 银 2.3g/t	Hotson, 2009 Zaw et al., 2014
纳努(Nanou) 铁矿床	闪长斑岩, 成岩年龄: 276 Ma	-	斑岩-矽卡岩型	矿石资源量未知, 矿石品位	Hou et al., 2019b
富诺安(Phou Nhuan) 铁矿床	二长花岗岩、花岗斑岩、闪长岩	-	斑岩-矽卡岩型	矿石资源量 3 亿吨, 矿石品位 TFe 60%左右	何文举, 2004 Hou et al., 2019b
Long Chieng Track (LCT) 金银铜矿床	石英二长岩, 长石英安斑岩; 成岩年龄: 290.6±3.5 Ma	279±4	浅成低温热液型	矿石资源量 3200 万吨, 矿石品位: 金 0.77g/t, 银 4.9g/t, 铜 0.12%	Manaka, 2008 Zaw et al., 2014
会晒(Ban Houayxai) 金银矿床	长石安山岩, 火山角砾岩; 成岩年龄: 286~283 Ma	286±4	浅成低温热液型	矿石资源量 7600 万吨, 金品位 0.82g/t, 银品位 7.0g/t	Manaka, 2008 Manaka et al., 2014
南巴坦(Nam Pathene) 锡矿床	花岗岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、花岗斑岩; 成岩年龄: 262~239 Ma	249.4±6.6	斑岩-矽卡岩型	资源量 60 万吨, 矿石含 Sn 0.12%	赵延朋等, 2012 施美凤等, 2017 Hou et al., 2019a
石溪(Thack Khe) 铁矿床	花岗闪长岩、二长花岗岩、二云母花岗岩; 成岩年龄: 258~253 Ma	-	矽卡岩型	矿石资源量 5.5 亿吨, 矿石品位: TFe 60%~65%	Shi et al., 2015
蓬苗(Bong Mieu) 金矿床	闪长岩、花岗岩; 成岩年龄: 252~246 Ma	239.6±0.8	矽卡岩型	192.5 吨金; 矿石品位 2.79~8.3g/t	Tran et al., 2014 林方成等, 2015 <sup>②</sup>
福山(Phuoc son) 金矿床	花岗岩, 英安斑岩; 成岩年龄: 251~250 Ma	211.6±0.1 203.9±0.1 248.8±3.1 236.4±2.5	矽卡岩型 (热液脉型)	矿石资源量 310 万吨, 矿石品位: 金 6.7g/t	Borisenko et al., 2006 Tran et al., 2014 Manaka, 2014

### 2.2.2 老挝沙湾拿吉省色潘铜金矿床

色潘(Sepon)铜金矿床位于老挝沙湾拿吉省色潘镇以北约40 km处,在构造上,其位于长山成矿带南东段色潘盆地内。目前,色潘矿区已探明铜储量196万吨铜和金102吨,属于大型斑岩-矽卡岩型铜金矿床(林方成等,2014<sup>①</sup>;施美凤等,2017)。

矿区出露地层以古生界碎屑岩、碳酸盐岩建造为主,为一套半地槽盆地滨浅-深海相沉积和陆相河流沉积,从下至上大致可分为7个主要地层单元。下部3个单元为奥陶系砂岩、砾岩及钙质页岩,中部2个单元为志留系钙质页岩、碳质页岩、碳酸盐岩夹安山质火山岩和少量火山碎屑岩,上部2个单元为泥盆系粉砂岩、页岩、白云岩及碧玉质岩,地层厚度可达2000 m(朱华平等,2013)。区内主要发育一套以花岗岩、花岗闪长(斑)岩、流纹质英安斑岩为主的侵入岩,锆石 U-Pb 年龄为302~280 Ma,表明岩浆活动发生在晚石炭世到早二叠世(Cromie, 2010; Wang et al., 2018)。

色潘矿区内的矿化带总体呈东西向展布,由东、西两个近似连续的矿化亚带组成,总长约12 km。区内主要存在4种矿化类型,包括斑岩体内部的斑岩型铜钼金矿化、斑岩体边部的类矽卡岩型铜矿化、邻近斑岩体的碳酸盐岩交代型铅锌银矿化、远离斑岩体的沉积岩容矿型(类卡林型)金矿化(朱华平等,2013)。其中原生铜矿石平均品位为1.1%,氧化铜矿石平均品位为2.5%。金矿石平均品位为2.0 g/t(林方成等,2015<sup>②</sup>)。矽卡岩型金矿化近年来也有报道,主要的载金矿物为黄铁矿(Cromie et al., 2018)。

### 2.2.3 老挝甘蒙省南巴坦锡多金属矿床

南巴坦(Nam Pathene)锡多金属矿床位于老挝甘蒙省他曲市西北约70 km处的南巴坦谷,在构造上,其位于长山成矿带中南部(图1B)。该矿床锡储量达60万吨,属于大型斑岩-矽卡岩型锡矿床(赵延朋等,2012;施美凤等,2017;Hou et al., 2019b)。

矿区主要出露奥陶-志留系砂岩,泥盆系一下石炭统砂岩、页岩、石灰岩,以及中石炭统一二叠系石灰岩。中石炭统一二叠系石灰岩不整合覆盖在较老的单元上,并被南-北向逆冲断层切割(Hou et al., 2019b)。区内发育一套早-中三叠世花岗岩侵入岩,其中,花岗岩和花岗闪长岩的黑云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄分别为239 Ma和247 Ma(李兴振等,2007<sup>③</sup>),

而二长花岗岩和花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄分别为259 Ma和262 Ma(Hou et al., 2019b)。该套花岗岩类侵入于泥盆系碎屑岩和石炭-二叠系石灰岩中,并与围岩发生交代变质作用,形成矽卡岩和角闪岩(施美凤等,2017;Hou et al., 2019b)。锡矿化石英脉中,黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为249.4 ± 6.6 Ma,表明区内早-中三叠世岩浆活动与成矿密切相关。

该矿床存在两种类型的矿化。矽卡岩型铁、铜矿化发育于侵入体与围岩的接触带,矿体呈层状、浸染状,并显示出强烈的矽卡岩化蚀变。其中,铁、铜主要以硫化物形式存在,包括磁铁矿、黄铜矿和斑铜矿(Hou et al., 2019b)。锡矿化主要为锡石-石英脉型,广泛分布于侵入体和围岩中。此外,在河谷中还存在砂锡矿,为目前主要的开采类型,是原生锡矿经地表风化、剥蚀、搬运、形成的残、坡、冲积型砂锡矿(林方成等,2015<sup>②</sup>)。

### 2.2.4 老挝万象省会晒金银矿床

会晒(Ban Houayxai)金银矿床位于老挝北部,万象北东约100 km处,在构造上,该矿床位于长山成矿带北西端,靠近爬立山铁矿床和LCT金银铜矿床(图1B)。目前该矿床的矿石资源量为7600万吨,金品位0.82g/t,银品位7.0g/t,属于大型浅成低温热液型金银矿床(Manaka et al., 2014;施美凤等,2017)。

矿区主要出露一套石炭-早二叠世碳酸盐岩、火山碎屑岩、(次)火山岩。区内主要的成矿-赋矿岩石为火山碎屑岩,而长石安山岩中亦存在含矿热液脉(Manaka, 2008;林方成等,2015<sup>②</sup>)。长石安山岩和火山角砾岩的锆石 U-Pb 年龄为286~283 Ma,其中,与成矿有关的长石安山岩的锆石 U-Pb 年龄为286 ± 4 Ma(Manaka, 2008)。蚀变类型主要为硅化、冰长石化、黄铁绢英岩化。此外,在碳酸盐岩地层中亦发生碳酸盐化、硅化等低温热液蚀变,发育黄铁矿化及金、银矿化。矿石矿物主要为黄铁矿、金银矿、辉银矿、自然金及少量黄铜矿(林方成等,2015<sup>②</sup>)。

## 3 长山带古特提斯演化与成矿

长山带古特提斯时期成矿作用受构造运动控制,因此可根据构造事件分为俯冲期、碰撞期和伸展期成矿作用。

### 3.1 俯冲期成矿作用

俯冲期成矿作用从晚石炭世持续到早二叠世

(305 ~ 279 Ma), 全部发生于岩浆间歇期(270 ~ 264 Ma)之前, 说明该期成矿作用与构造 - 岩浆活动存在紧密联系。俯冲前期主要形成斑岩 - 矽卡岩型铁、铜、金矿床, 后期主要形成浅成低温热液型铜、金、银矿床(表 3), 这与我国西南“三江”地区昌宁 - 孟连构造带内与古特提斯洋闭合有关的岩浆热液型铜多金属成矿事件一致(邓军等, 2020)。其中, 前期的斑岩 - 矽卡岩型矿床与俯冲期 I 型花岗岩密切相关, 如爬立山铁矿矿体主要产于围岩与以 I 型花岗岩为主的侵入岩体的接触带内。后期浅成低温热液型矿床主要与俯冲期火山 - 沉积岩系有关, 如会晒金银矿区的火山碎屑岩和长石安山岩均为赋矿岩石(Manaka, 2008; 林方成等, 2015<sup>②</sup>)。另

外, 俯冲期矿化以铁、铜、金为主, 这些元素主要与深部岩浆加入有关, 如福康矿区与埃达克质岩有关的铜 - 金矿化, 可能是俯冲板片熔融产生的埃达克岩浆交代地幔楔, 将深源铜和金运移至近地表的结果(图 6A)。铁、铜、金多以硫化物的形式存在, 俯冲期矿床 S 同位素也普遍具有深源特征(图 5, Cromie, 2010; Hou et al., 2019b)。爬立山矿床的该期 S 型花岗岩以及全岩的上地壳 Pb 同位素特征(李勇峰, 2012)可能仅代表古老地壳端元成分的贡献, 这与深源岩浆和成矿物质的加入并不矛盾。此外, 深源岩浆的加入在该期锆石正的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值、全岩较低的初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值和正的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值中也有体现(图 4)。

表 3 长山带古特提斯成矿作用

Table 3 Paleo-Tethys mineralization in the Truong Son belt

构造背景	成矿作用类型	矿种	矿床名称	参考文献
俯冲期	斑岩 - 矽卡岩型	铁	爬立山 Pha Lek	王疆丽等, 2013 Hou et al., 2019b
			纳努 Nanou	Hou et al., 2019b
			富诺安 Phou Nhouan	何文举, 2004 Hou et al., 2019b
			色潘 Sepon	Cromie, 2010 Wang et al., 2018
			福康 Phu Kham	王宏等, 2014 Kamvong et al., 2014
	浅成低温热液型	铜、金	KTL-Tharkhek	Hotson, 2009 Zaw et al., 2014
			Long Chieng Track	Manaka, 2008 Zaw et al., 2014
			会晒 Ban Houayxai	Manaka, 2008 Manaka et al., 2014
			南巴坦 Nam Pathene	施美凤等, 2017 Hou et al., 2019a
			石溪 Thack Khe	Shi et al., 2015
碰撞期	矽卡岩型	金	蓬苗 Bong Mieu	Tran et al., 2014
			福山 Phuoc son	Borisenko et al., 2006 Manaka, 2014
伸展期	热液脉型	金	福山 Phuoc son	2006 Manaka, 2014

### 3.2 碰撞期成矿作用

碰撞期成矿作用集中在早一中三叠世(249 ~ 236 Ma), 主要形成斑岩 - 矽卡岩型锡矿和矽卡岩型铁、金矿, 不同的矿化类型亦对应不同的岩浆来源(表 3)。如福山金矿区与成矿有关的岩体主要为 I 型花岗岩类, 表明其来自火成岩或变质火成岩的部分熔融, 这可能与底侵深源岩浆熔融新生下地壳

有关; 而南巴坦锡矿区与成矿有关的岩浆岩则主要为 S 型花岗岩, 表明其变质沉积物来源。这说明碰撞期底侵的深源岩浆除了熔融新生下地壳提供成矿物质(如金)之外, 也起到加热、活化等间接作用(图 6B), 致使古老地壳物质熔融, 形成一系列与成矿相关且具有明显壳源特征的岩浆岩。在成矿物质方面, 铁和金主要来自深部岩浆, 而锡等元素则

具有复杂的物质来源,这也与碰撞期不同的岩浆岩类型以及较高的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值、负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值、随年龄降低且趋于稳定的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值一致(图4A, 4B)。此外,色潘矿区 247 ~ 243 Ma 的类卡林型金矿石 S 同位素具有非岩浆来源特征(图5),说明色潘矿区的该期成矿热液可能来自碰撞造山后期的变质流体(Hou et al., 2019b)。

### 3.3 伸展期成矿作用

目前尚未在长山带内发现与伸展期岩浆活动直接相关的矿床,但个别矿床存在伸展期的热液成矿作用。如福山金矿岩体的成岩年龄为 251 ~ 250 Ma,而其热液事件从 249 Ma 持续到 204 Ma (Borisenko et al., 2006; Manaka, 2014)。福山金矿成岩成矿时间的不一致原因可能有两种:一是福山矿区在伸展期存在岩浆再活化有关的热液脉型金矿化,被活化的岩浆可能来自与碰撞期成矿相关岩体相同的岩浆储库,而储库的活化过程可能受深源岩浆加入的驱动,也可能与伸展背景下幔源岩浆底侵供热有关,前者在活化储库的同时还可补给深源成矿物质(金),后者则暗示储库中岩浆在活化前已经含矿;二是在伸展期形成了富含成矿物质(如金、硫)的非岩浆变质流体,可能与伸展盆地边缘产生的压性走滑断裂有关。

目前,长山成矿带内俯冲期和碰撞期相关矿床的成岩成矿年代学研究已经较为充分,仅个别矿床

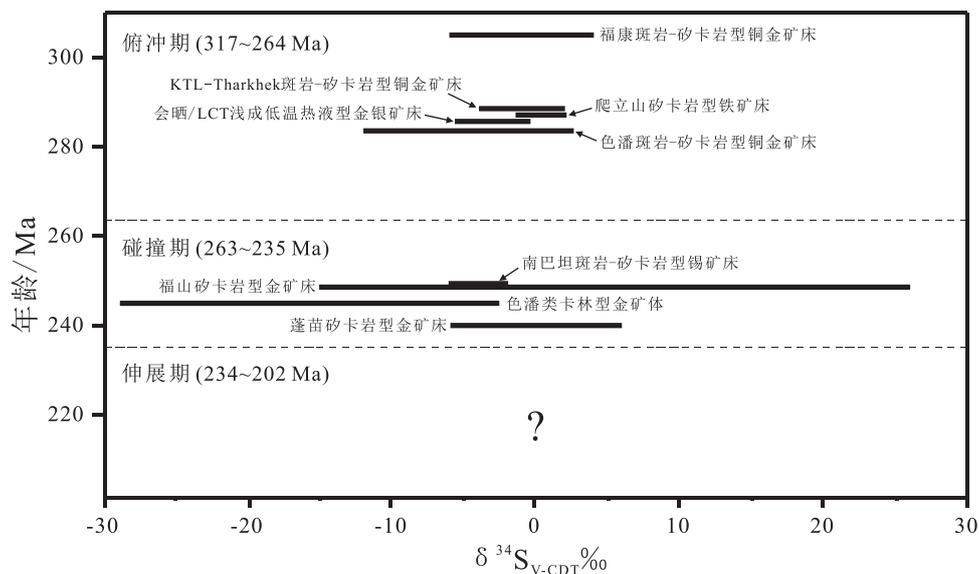
(纳努、富诺安、石溪)的相关研究需要补充,但伸展期构造-岩浆演化和成矿作用研究较为匮乏。长山带内各伸展期岩体的成矿潜力可能尚未被发掘,尤其是长山带南东端,个别矿区(如福山)与伸展期成矿有关的岩浆岩尚未被发现,与金矿化相关的岩浆-热液过程有待进一步探索。

## 4 结论

(1)长山带古特提斯时期经历了晚石炭—中二叠世哀牢山-马江洋的俯冲、中二叠—晚三叠世华南地体与印支地体的碰撞以及晚三叠世的碰撞后伸展过程,形成了较为完整的岩浆岩记录。

(2)长山带古特提斯演化俯冲阶段以埃达克质(次)火山岩和少量 I 型花岗岩为特征,源区从新生下地壳逐渐变为古老地壳;碰撞阶段以初期的 S 型花岗岩和广泛分布的 I 型花岗岩为特征,古老地壳物质贡献占主导;伸展阶段以具有碰撞后特征的花岗岩类为主,新生下地壳物质重新大量加入。

(3)长山带古特提斯各演化阶段内成矿作用特征明显。在俯冲阶段形成与 I 型花岗岩有关的斑岩-矽卡岩型铁、铜、金矿床和与(次)火山岩有关的浅成低温热液型铜、金、银矿床,在碰撞阶段形成与 S 型和 I 型花岗岩有关的斑岩-矽卡岩型锡、铁、金矿床,在伸展阶段形成可能与岩浆再活化或非岩浆变质流体有关的热液脉型金矿化。



图中数据来自 Manaka, 2008, 2014; Hotson, 2009; Cromie, 2010; Hou et al., 2019a, 2019b

图5 长山成矿带内各矿床硫同位素统计图

Fig. 5 Statistical plot of S isotope compositions for deposits in the Truong Son metallogenic belt

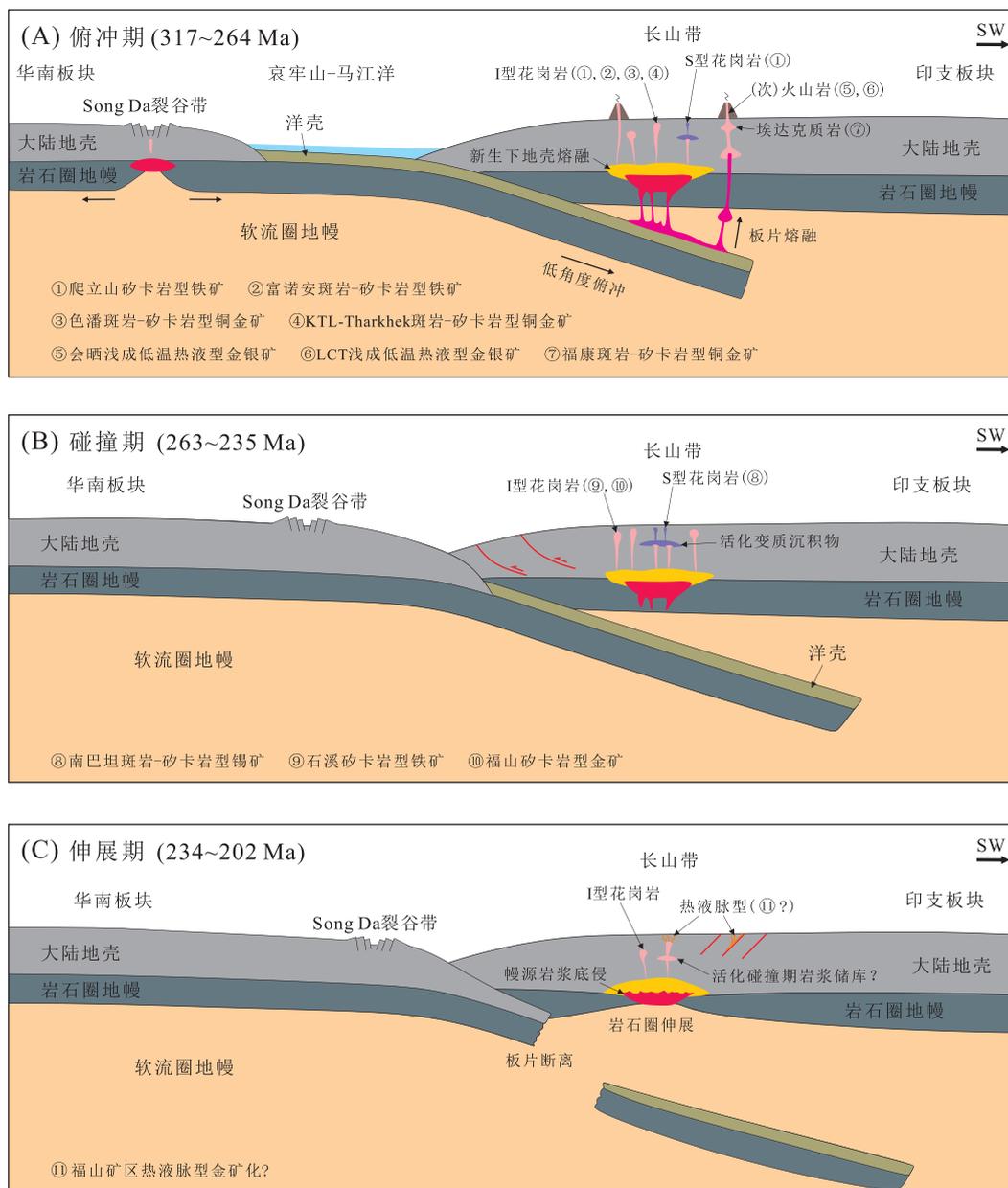


图6 长山带古特提斯构造岩浆演化与成矿作用模式图

Fig. 6 Diagram of the Paleo-Tethys tectonic-magmatic evolution and mineralization in the Truong Son belt

致谢:文章所引用资料,广泛参考了成都地质调查中心、中国地质大学(北京)、中国地质大学(武汉)、成都理工大学等机构和高校的研究成果;文章在撰写过程中,得到成都地质调查中心范文玉教授级高级工程师和两名匿名审稿专家的悉心指导,在此一并作出感谢。值此成都地质调查中心成立60周年之际,祝中心越来越好!

注释:

①林方成,丛峰,施美凤,等,2014. 东南亚地区重要成矿带成矿规律

与优势矿产资源潜力评价研究项目成果报告[R]. 145-147.

②林方成,施美凤,李佑国,等,2015. 老挝-越南长山成矿带成矿规律与勘查靶区优选研究项目成果报告[R]. 41-46.

③李兴振,刘朝基,林方成,等,2007. 东南亚地区地质矿产对比研究项目成果报告[R]. 243-245.

参考文献 (References):

Borisenko A S, Hoa T T, Izokh A E, et al., 2006. Stages of formation of gold mineralisation in central Vietnam[J]. Journal of Geology, 28: 1-11.

Burrett C, Zaw K, Meffre S, et al., 2014. 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*, 26(1): 31–51.
- Chappell B W, 1999. Aluminium saturation in I-and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J]. *Lithos*, 46(3): 535–551.
- Cromie P W, 2010. Geological setting, geochemistry and genesis of the Sepon gold and copper deposits, Laos [D]. Hobart: University of Tasmania, 50–63.
- Cromie P, Makoundi C, Zaw K, et al., 2018. Geochemistry of Au-bearing pyrite from the Sepon Mineral District, Laos DPR, Southeast Asia; implications for ore genesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 164: 194–218.
- Faure M, Lepvrier C, Nguyen V V, et al., 2014. The South China block-Indochina collision: Where, when, and how? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 260–274.
- Hoa T T, Anh T T, Phuong N T, et al., 2008. Permo-Triassic intermediate-felsic magmatism of the Truong Son belt, eastern margin of Indochina [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2–3): 112–126.
- Hotson M D, 2009. The geochronology and tectonic framework of Cu-Au Prospects in the Phonsovan district, northern Laos [D]. Hobart: University of Tasmania, 115.
- Hieu P T, Li S Q, Yang Y, et al., 2017. Stages of late Paleozoic to early Mesozoic magmatism in the Song Ma belt, NW Vietnam; evidence from zircon U-Pb geochronology and Hf isotope composition [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 106(3): 1–20.
- Hou L, Xiong F, Wang W, et al., 2019a. Carboniferous-Triassic felsic igneous rocks and typical mineral deposits in the Truong Son orogenic belt, SE Asia; Implications for Paleo-Tethyan tectonic evolution and metallogeny [J]. *Ore Geology Reviews*, 112: 103036.
- Hou L, Liu S, Guo L, et al., 2019b. Geology, Geochronology, and Hf Isotopic Composition of the Pha Lek Fe Deposit, Northern Laos; Implications for Early Permian Subduction-Related Skarn Fe Mineralization in the Truong Son Belt [J]. *Journal of Earth Science*, 30(1): 109–120.
- 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(1): 165–184.
- Lepvrier C, Maluski H, Tich V V, et al., 2004. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son Belt and Kontum Massif); implications for the geodynamic evolution of Indochina. *Tectonophysics*, 393(1–4): 87–118.
- Liu J, Tran M D, Tang Y, et al., 2012. Permo-Triassic granitoids in the northern part of the Truong Son belt, NW Vietnam; Geochronology, geochemistry and tectonic implications [J]. *Gondwana Research*, 22(2): 628–644.
- Liu H, Wang Y, Li Z, et al., 2018. Geodynamics of the Indosinian orogeny between the South China and Indochina blocks; Insights from latest Permian-Triassic granitoids and numerical modeling [J]. *GSA Bulletin*, 130(7–8): 1289–1306.
- Maniar P D, Piccoli P M, et al., 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643.
- Middlemost E, 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth-Science Reviews*, 37: 215–224.
- Manaka T, 2008. Geological setting and mineralisation characteristics of the Long Chiang Track and Ban Houayxai deposits, Lao PDR [D]. Hobart: University of Tasmania, 31–51.
- Manaka T, 2014. A study of mineralogical, geochemical and geochronological characteristics and ore genesis in Phuoc Son Gold deposit area, Central Vietnam [D]. Hobart: University of Tasmania, 35–101.
- Minh P, Hieu P T, Kawaguchi K, et al., 2021. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf isotopic composition of the Cha Val plutonic rocks in central Vietnam; Implications for Permian-Triassic Paleo-Tethys subduction-related magmatism [J]. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 1–26. <https://doi.org/10.15625/2615-9783/16842>.
- Peccerillo A, Taylor S R, et al., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81.
- Qian X, Wang Y, Zhang Y, et al., 2019. Petrogenesis of Permian-Triassic felsic igneous rocks along the Truong Son zone in northern Laos and their Paleotethyan assembly [J]. *Lithos*, 328–329: 101–114.
- Roger F, Jolivet M, Maluski H, et al., 2014. Emplacement and cooling of the Dien Bien Phu granitic complex; Implications for the tectonic evolution of the Dien Bien Phu Fault (Truong Son Belt, NW Vietnam) [J]. *Gondwana Research*, 26(2): 785–801.
- Sanematsu K, Murakami H, Duangsuirigna S, et al., 2011. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ages of granitoids from the Truong Son fold belt and Kontum massif in Laos [J]. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 106: 13–25.
- Shi M F, Lin F C, Fan W Y, et al., 2015. Zircon U-Pb ages and geochemistry of granitoids in the Truong Son terrane, Vietnam; Tectonic and metallogenic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 101(apr. 1): 101–120.
- Tran H T, Zaw K, Halpin J A, et al., 2014. The Tam Ky-Phuoc Son Shear Zone in central Vietnam; Tectonic and metallogenic implications [J]. *Gondwana Research*, 26(1): 144–164.
- Vuong N V, Hansen B T, Wemmer K, et al., 2013. U/Pb and Sm/Nd dating on ophiolitic rocks of the Song Ma suture zone (northern Vietnam); Evidence for upper paleozoic paleotethyan lithospheric remnants. *Journal of Geodynamics*, 69(sep.): 140–147.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W, 1987. A-type granites; geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Wang S, Mo Y, Wang C, et al., 2016. Paleotethyan evolution of the Indochina Block as deduced from granites in northern Laos [J].

- Gondwana Research, 38: 183–196.
- Wang X Y, Cao D H, Wang Z Q, et al., 2018. Zircon U-Pb age, trace element and Hf isotope composition of Sepon Au-Cu deposit, Laos: tectonic and metallogenic implications[J]. China Geology, 1: 36–48.
- Wang Y, 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.
- Zaw K, Meffre S, Lai C K, et al., 2014. Tectonics and metallogeny of mainland Southeast Asia-A review and contribution[J]. Gondwana Research, 26(1): 5–30.
- Zhang R Y, Lo C H, Chung S L, et al., 2013. Origin and Tectonic Implication of Ophiolite and Eclogite in the Song Ma Suture Zone between the South China and Indochina Blocks [J]. Journal of Metamorphic Geology, 31(1): 49–62.
- Zhang R Y, Lo C H, Li X H, et al., 2014. U-Pb dating and tectonic implication of ophiolite and metabasite from the Song Ma suture zone, northern Vietnam [J]. American Journal of Science, 314(2): 649–678.
- 陈永清, 刘俊来, 冯庆来, 等, 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. 46–76.
- 邓军, 王庆飞, 陈福川, 等, 2020. 再论三江特提斯复合成矿系统[J]. 地学前缘, 27(2): 106–136.
- 高建华, 范文玉, 吴振波, 等, 2015. 老挝爬立山铁矿二长花岗岩地球化学特征及其成矿意义[J]. 沉积与特提斯地质, 35(3): 102–108.
- 何文举, 2004. 老挝中-东部大型铁铜金矿集区矿床地质——对云南“三江地区”找金的启示[J]. 地球科学进展, 23(2): 164–178.
- 李勇峰, 2012. 老挝帕立山与矽卡岩型铁矿化有关的花岗岩地球化学特征与定年研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京). 10–33.
- 毛洪江, 2012. 老挝长山成矿带爬立山铁矿床成矿地质特征与成因研究[D]. 成都: 成都理工大学. 39–62.
- 施美凤, 林方成, 朱华平, 等, 2017. 中新经济走廊地质矿产特征及找矿潜力[J]. 地质通报, 36(1): 16–34.
- 王疆丽, 林方成, 朱华平, 等, 2013. 老挝万象省爬立山铁矿成矿二长花岗岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 33(3): 87–93.
- 王宏, 王疆丽, 陈慕天, 等, 2014. 老挝川圹省 Phu Kham 铜金矿床地质特征及找矿方向[J]. 地质找矿论丛, 29(1): 66–71.
- 赵红娟, 陈永清, 卢映祥, 2011. 老挝长山成矿带与花岗岩有关的铜金铁矿床的成矿模式[J]. 地质通报, 30(10): 1619–1627.
- 赵延朋, 王晓曼, 夏绪学, 等, 2012. 老挝甘蒙省南巴坦锡多金属矿田地质特征及成因浅析[J]. 有色矿冶, 28(6): 1–4.
- 邹光富, 吴振波, 高建华, 等, 2012. 老挝人民民主共和国万象省赛宋文县爬立山铁矿地质特征及找矿方向[J]. 中国地质, 39(5): 1375–1386.
- 朱华平, 范文玉, 王宏, 等, 2013. 老挝色潘铜金矿床研究新进展[J]. 地质科技情报, 32(5): 182–187.
- 朱华平, 范文玉, 毛洪江, 等, 2014. 老挝万象省爬立山(PHaLek)铁矿床地质特征及成矿作用分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 44(5): 1492–1501.

## 《沉积与特提斯地质》2022年第3期文章预告

- 关于相的命名及其分类的建议 ..... 牟传龙
- 中国岩相古地理研究进展 ..... 牟传龙
- 扬子西缘泛非造山与绵阳-长宁克拉通裂陷的沉积充填过程重塑 ..... 汪正江, 王启宇, 杨菲, 熊国庆, 马龙, 杜秋定, 郑炳嵩
- 米仓山-大巴山地区赫兰特期岩相古地理及其页岩气地质意义 ..... 熊国庆, 周小琳, 李小刚
- 川东地区东岳庙段沉积环境演化及其页岩油气富集主控因素分析 ..... 何江林, 陈正辉, 董大忠, 孙莎莎, 王志国
- 川南地区二叠系沉积环境及其演化特征——以四川古蔺芭蕉村剖面为例 ..... 王秀平, 王启宇, 安显银
- 扬子区西南缘奥陶纪末-志留纪初笔石生物地层对比及意义 ..... 张娣, 刘伟, 周业鑫, 牟必鑫, 周志, 赵安坤, 陆俊泽, 余谦
- 基于宽频大地电磁法的页岩气探测实践——以川西南沐川地区须家河组为例 ..... 杨剑, 王桥, 刘伟, 夏时斌, 张伟, 廖国忠, 李华, 高慧
- 羌塘盆地优质烃源岩和白云岩储油层的层位与分布 ..... 伊海生, 夏国清
- 羌塘盆地南坳陷布曲组白云岩储层孔喉结构及其分形特征研究 ..... 万友利, 冯兴雷, 赵瞻, 王忠林
- 北美羌塘坳陷上三叠统沉积模式、石油成因及对油气勘探的启示 ..... 刘中戎, 杨平, 张国常, 范志伟, 占王忠, 曾胜强
- 北美羌塘盆地沙土湾湖地区中晚侏罗世古生物研究及其意义 ..... 白培荣, 曾禹人, 吴滔, 陈启飞, 蒋开源, 符宏斌, 徐安全