

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.092>



黎府构造带北部南莫溪蛇绿混杂岩的发现及其地质意义

吴松洋¹, 聂 飞^{2*}, 刘书生¹, 谢恩顺³, 冷秋锋¹, 李雁龙³, 吴振波¹, 张 红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
3. 四川省地质矿产勘查开发局攀西地质队, 四川西昌 615000

摘要: 东南亚特提斯构造格架复杂, 特别是印支板块西缘琅勃拉邦—黎府构造带构造演化及区域构造线连接更是争议不断。通过老挝西北部填图工作, 首次在黎府构造带北部南莫溪地区发现保存完整的蛇绿混杂岩, 为探讨黎府构造带的属性以及区域古地理格局, 选取了蛇绿混杂岩中的含放射虫硅质岩、辉长岩以及洋岛海山中的礁灰岩, 开展了岩相学、古生物学、锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学、岩石地球化学研究。结果表明, 该蛇绿混杂岩出露端元包括蛇纹岩、蛇纹石化橄榄岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩和硅质岩, 蛇绿岩套层序特征完整; 辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 350.4 ± 3.3 Ma, 成岩为早石炭世; 洋岛海山中珊瑚种属为 *Thamnopora* sp. 和 *Paracravenia* sp., 所属时代为中二叠世; 硅质岩岩石地球化学元素特征指示其为生物成因, 沉积环境为洋盆或开阔的盆地环境, 放射虫共鉴定出 9 属 30 种, 所属时代为中泥盆世—早石炭世。综合本次研究, 反映出南莫溪蛇绿混杂岩所代表的洋盆具有长期的演化历史, 从晚泥盆世开始, 一直持续到中二叠世还未结束, 演化时间至少超过 135 Ma, 指示了该蛇绿混杂岩代表残留的古特提斯洋盆, 而非弧后盆地。认为黎府构造带向北应与琅勃拉邦构造带相连, 且该区域从晚泥盆世开始一直存在古特提斯洋。

关键词: 蛇绿混杂岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 古生物学; 古特提斯洋; 黎府构造带。

中图分类号: P56; P58; P59

文章编号: 1000-2383(2022)08-2871-18

收稿日期: 2021-05-31

The Discovery of Ophiolitic Complex in Namhonr, Northern Loei Tectonic Belt and Its Geological Significance

Wu Songyang¹, Nie Fei^{2*}, Liu Shusheng¹, Xie Enshun³, Leng Qiufeng¹, Li Yanlong³, Wu Zhenbo¹, Zhang Hong¹

1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China
2. Applied Geological Survey Center, China Geological Survey, Chengdu 610036, China
3. Panxi Geological Brigade of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Xichang 615000, China

Abstract: The Tethyan tectonic framework in Southeast Asia is complex, especially the tectonic evolution history and tectonic belt connection of Luang Prabang-Loei tectonic belt on the western margin of the Indo China block is more controversial. Basing on the geological mapping work, we discovered for the first time a well-preserved ophiolitic complex in the Namhonr area, northern Loei tectonic belt. In order to explore the attributes of the Loei tectonic belt and the regional paleogeographic pattern, the lithology identification for the ophiolitic complex, zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for the gabbro, paleobiology and major and trace elements

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(No. DD20190444)

作者简介: 吴松洋(1989—), 男, 工程师, 博士, 从事东南亚构造演化与成矿效应研究。ORCID: 0000-0002-7587-0284. E-mail: songyuwu@163.com
* 通讯作者: 聂飞, E-mail: niefei_cdcgs@qq.com

引用格式: 吴松洋, 聂飞, 刘书生, 谢恩顺, 冷秋锋, 李雁龙, 吴振波, 张红, 2022. 黎府构造带北部南莫溪蛇绿混杂岩的发现及其地质意义. 地球科学, 47(8): 2871—2888.

Citation: Wu Songyang, Nie Fei, Liu Shusheng, Xie Enshun, Leng Qiufeng, Li Yanlong, Wu Zhenbo, Zhang Hong, 2022. The Discovery of Ophiolitic Complex in Namhonr, Northern Loei Tectonic Belt and Its Geological Significance. *Earth Science*, 47(8): 2871—2888.

for the radiolarian chert and reef limestone are presented in this paper. The results show that the outcrops end members of the ophiolitic complex include serpentinite, serpentinized peridotite, gabbro, diorite, basalt and siliceous rock, which display a complete sequence of ophiolitic complex. The LA-ICP-MS U-Pb ages of gabbro is 350.4 ± 3.3 Ma, indicating the gabbro was formed in the Early Carboniferous. The coral species in the oceanic island-seamount are *Thamnopora* sp. and *Paracravenia* sp. which belong to the Middle Permian. The geochemical characteristics of the siliceous rock indicate that it is of biological origin and the sedimentary environment is an ocean basin or an open basin environment. A total of 30 species of radiolarians have been identified in 9 genera, which belong to the Middle Devonian-Early Carboniferous. The results of this research reflect that the ocean basin represented by the ophiolitic complex in the Namhonr area has a long-term evolution history, starting from the Late Devonian and continuing to the Middle Permian, the evolution duration is at least 135 Ma, indicating that the ophiolitic complex represents the residual Paleo-Tethys ocean basin, not the back-arc basin. We believe that the Loei tectonic belt should be connected to the Luang Prabang tectonic belt to the north, the Paleo-Tethys Ocean has existed in this area since the Late Devonian.

Key words: ophiolitic complex; zircon U-Pb age; geochemistry; paleobiology; Paleo-Tethys Ocean; Loei tectonic belt.

0 引言

蛇绿岩是出露在缝合带中一套蛇纹石化超镁铁岩、镁铁质侵入杂岩、镁铁质熔岩以及海相沉积物的岩石组合,代表古大洋岩石圈或古洋盆的残留,经历了洋盆闭合以后至隆升的地壳演化历史,通常形成于洋中脊、弧后盆地、弧前盆地、岛弧或活动大陆边缘等构造环境。因此,蛇绿岩对于恢复古大洋的演化历史、探究深部构造信息和幔源成矿作用以及建立区域构造格架具有重要地质意义,一直是地球科学研究的热点之一(Dewey, 1971; 史仁灯, 2005; Bezard *et al.*, 2011; 吴福元等, 2014; 李廷栋等, 2019; Huang and Deng, 2020)。

中南半岛位于特提斯构造域东端,与我国西南三江地区共同构成一个复式大陆,是保存最好、最完整的古特提斯造山带,故是研究古特提斯洋形成、发展、俯冲、碰撞及消亡全过程最理想的“实验室”,也一直是国内外地质学者研究的重点地区之一。已有研究成果表明该地区是由多个微陆块拼接在一起的复杂地体(Metcalfe *et al.*, 2013; Zaw *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2018),并且已识别出了多条与古特提斯演化有关的缝合带,包括昌宁—孟连—文东—劳勿缝合带(刘本培等, 2002; 聂飞等, 2013; 王保弟等, 2018)、甘孜—理塘缝合带(王立全等, 2013; 聂飞等, 2019)、金沙江—哀牢山缝合带(Jian *et al.*, 2009; Fan *et al.*, 2015)、马江缝合带(Wang *et al.*, 2018)、南澜沧江—难河—程逸缝合带(Ueno and Hisada, 2001; Sone *et al.*, 2012; Metcalfe., 2017)和琅勃拉邦—黎府缝合带(Qian *et al.*, 2015, 2016a; Wang *et al.*, 2018)。

近几年,黎府构造带由于其特殊的地理位置逐

渐成为东南亚特提斯构造演化研究的热点地区。虽然前人在该地区已开展大量研究,但关于其构造属性问题仍存在较大争议。有些学者认为黎府构造带代表印支地块西北缘特有的海西期褶皱带(刘本培等, 2002);而有些学者则认为该构造带实际为一条岩浆弧带(刘书生等, 2018a; Shi *et al.*, 2019),并根据不同岩性和成岩时代划分了二叠纪—三叠纪西亚带(Qian *et al.*, 2015, 2016)和碧彩汶亚带(Zaw *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2018),泥盆纪中亚带(Intasopa and Dunn, 1994; Kamvong *et al.*, 2014),志留纪东亚带(Khositanont *et al.*, 2008);另外一些学者根据该构造带内出露的硅质岩、晚泥盆世MORB型枕状熔岩、OIB型镁铁质熔岩、枕状角砾熔岩、二叠纪含有的蛇纹岩砾石和尖晶石碎屑的浊积岩及该构造带的地层具有向东逆冲的构造变形样式,认为黎府构造带为一个南北走向的缝合带(Morley *et al.*, 2013; 杨宗璘等, 2019)。但是由于镁铁—超镁铁质岩石组合零星出露,未发现完整蛇绿岩套,故关于黎府地区是否存在缝合带仍然存在很大争议(Feng *et al.*, 2008; Qian *et al.*, 2015, 2016; Zhao *et al.*, 2016)。

笔者通过系统开展老挝西北部1:20万巴莱幅(E-47-XVIII)和孟根陶幅(E-47-XXIV)地质地球化学填图工作,并首次在黎府构造带北部南莫溪地区发现保存完整的蛇绿混杂岩,蛇绿岩套层序特征清晰。此次发现对于探究黎府构造带的构造属性、归属问题以及滇缅泰马板块至印支板块西缘整体构造格架的构建具有重要意义。

1 区域地质背景

黎府构造带位于印支板块最西缘,南起柬埔寨西部,经泰国碧彩汶省、黎府省后向北延伸至老挝西北部(图1),总体呈北东—南西走向。该带主要出露古生代和中生代地层,其中志留系—泥盆系地层主要分布在区域西北部,岩性以千枚岩、石英岩、片岩、酸性火山岩及凝灰岩为主。区域石炭系地层主要分布在黎府地区,中石炭统为砾岩、砂岩、页岩、硅质岩和灰岩,下石炭统为薄层—厚层云母质砂岩和页岩及灰黑色炭质页岩的互层。二叠系地层分布

相对广泛,岩性主要为灰岩夹页岩、粉砂岩、硅质岩、凝灰岩、集块岩、安山岩和砂岩,而下三叠统海相安山岩和英安岩不整合在下伏二叠系浊积岩之上,并被安山质岩墙和I型花岗闪长岩所侵入。侏罗—白垩系主要分布在黎府—碧差汶之间,系东部呵叻盆地地层的西延。

黎府构造带岩浆活动较强,火山岩年龄时代跨度较大,从志留纪到三叠纪一直有火山活动的记录,包括志留纪陆源弧流纹岩、玄武安山岩(434~420 Ma, Zaw *et al.*, 2014),泥盆纪—石炭纪弧玄武岩—安山岩(374~361 Ma, Intasopa and Dunn,

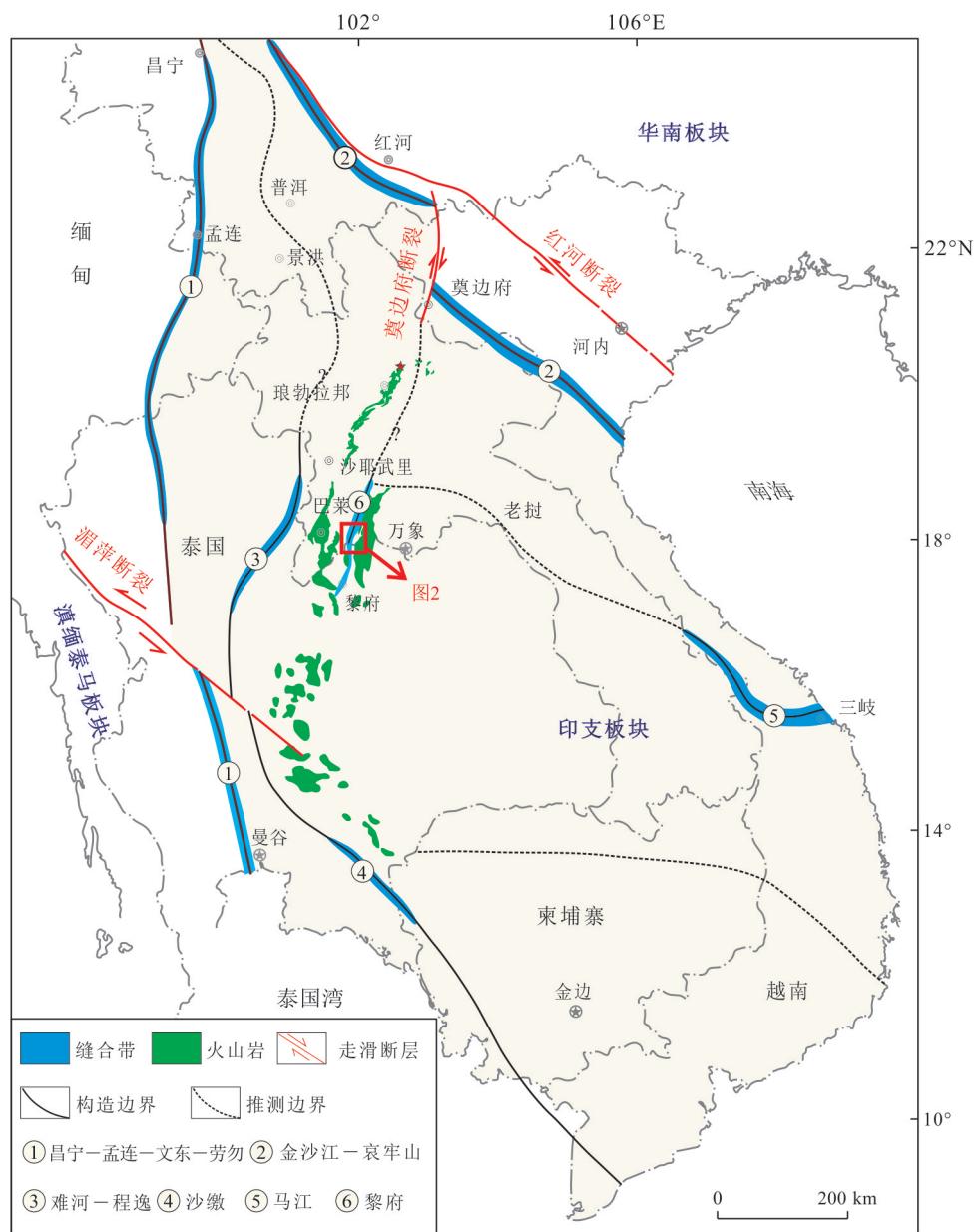


图1 黎府构造带大地构造位置图(据Shi *et al.*, 2019修改)

Fig.1 Tectonic map of Loeibelt (modified from Shi *et al.*, 2019)

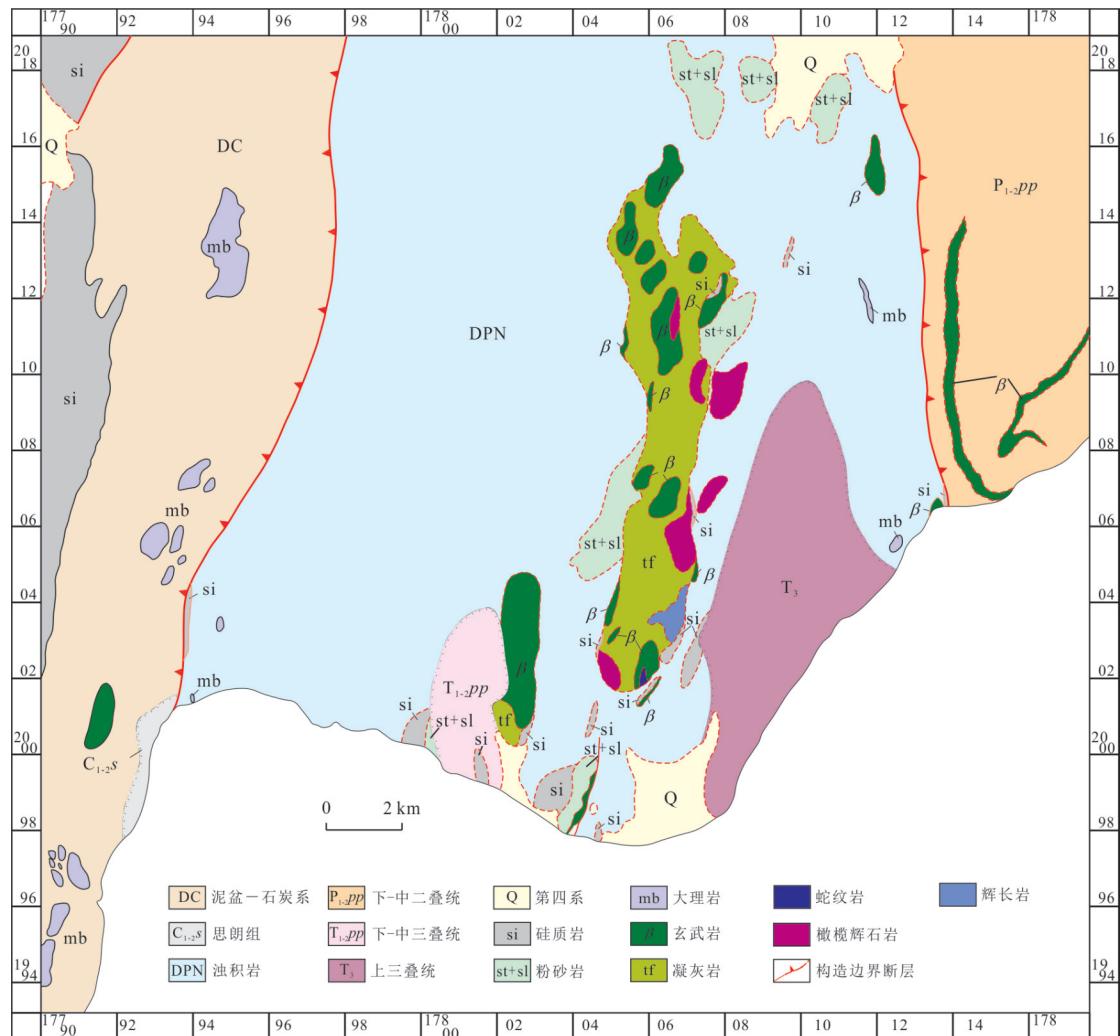


图 2 黎府构造带南莫溪蛇绿混杂岩地质图

Fig.2 Geologicalmap of namhonrophiolitic complex in Loeibelt

1994; 419~305 Ma, Zaw *et al.*, 2014; Qian *et al.*, 2015, 2016a)和中二叠世—三叠纪的弧玄武岩—流纹岩(254~216 Ma, Blanchard *et al.*, 2013; Kamvong *et al.*, 2014; Qian *et al.*, 2016b; Shi *et al.*, 2019);侵入岩相对分布较少,主要为二叠纪—三叠纪的闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩(260~209 Ma, 刘书生等, 2018b; Nualkhao *et al.*, 2018; 聂飞等, 2019),并且该构造带中浅成低温热液型金矿、斑岩型铜金矿、矽卡岩型铜金矿与该期岩浆活动有成因联系(Zaw *et al.*, 2014; Nualkhao *et al.*, 2018; 聂飞等, 2019).

2 南莫溪蛇绿混杂岩岩石学特征

2.1 基质部分

本次研究发现的蛇绿混杂岩位于黎府构造带

北部南莫溪地区(图 2),可分为基质部分和岩块部分。基质成分主要由浅变质长石岩屑砂岩、浅变质岩屑长石砂岩、浅变质粉砂岩、浅变质泥岩等组成,发育粒序层理、平行层理、包卷层理等,形成不完整的鲍马序列组合。A 段由具递变层理的杂砂岩组成(图 3a),厚度大,粒度下粗上细,为正递变,反映浊流能量逐渐减弱,代表递变悬浮沉积的产物。C 段以粉砂岩为主,具小型流水沙纹交错层理和爬升沙纹交错层理(图 3b),在沙纹的层系之间见含泥质的纹层,并出现滑塌变形层理(图 3c)和包卷层理(图 3d),这是由于流水改造和重力滑动的复合作用造成的,故 C 段通常解释为浊流转变为低密度流,出现牵引水流机制所致(Zhang *et al.*, 2018)。D 段以泥质粉砂和粉砂质为主,具有断续水平纹层。E 段为远洋泥质沉积,由黑色、黄绿色页岩、泥岩组成,具微显水平层理,沉积厚度巨大(图 3b)。该套地

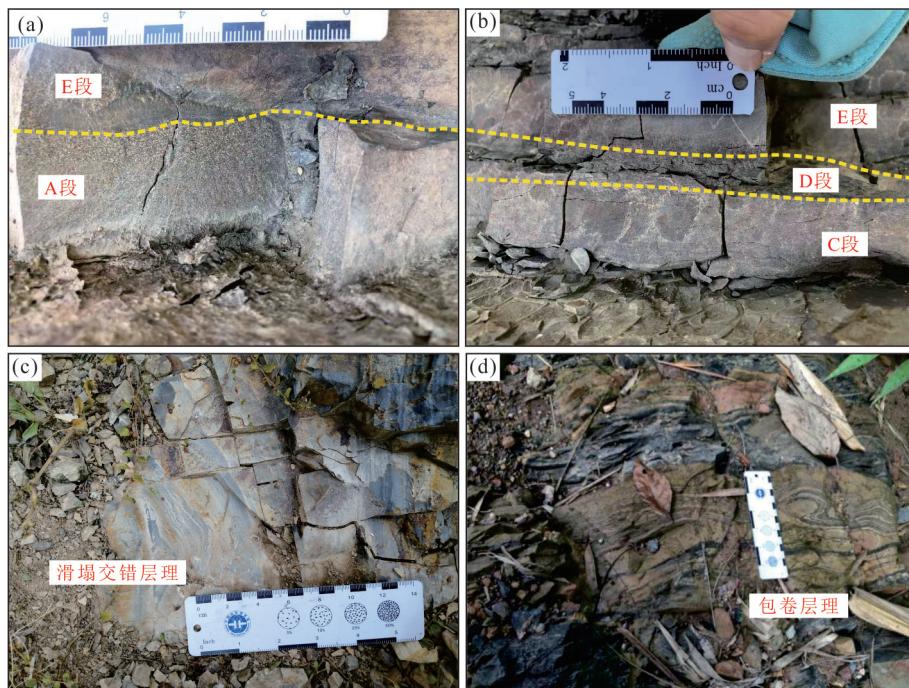


图3 淤积岩鲍马序列野外地质特征

Fig.3 Field outcrops of turbidite showing geological characteristics

a. 具递变层理的杂砂岩(A段)与远洋泥质沉积黑色、黄绿色页岩、泥岩(E段)界线;b. 具小型流水沙纹交错层理和爬升沙纹交错层理粉砂岩(C段)、具有断续水平纹层泥质粉砂和粉砂质(D段)及E段界线;c. C段滑塌变形层理;d. C段包卷层理

层面理置换十分普遍,泥质、粉砂质等细碎屑岩中板劈理十分发育。实际上E段已不属浊流沉积,但它是判断深水浊流沉积的重要标志。

2.2 岩石组合

蛇绿混杂岩的岩石组成主要包括蛇纹岩、蛇纹石化橄榄岩、变质辉石橄榄岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、硅质岩等,岩块整体发生了较强烈构造变形,表现出片理化、糜棱岩化等,各类岩块均以构造岩片或透镜体的形式产出。野外地质调查研究表明,该套蛇绿混杂岩表现出典型且完整的蛇绿岩套特征(图5),依据野外恢复的基本层序,依次论述如下:

2.2.1 硅质岩 黎府蛇绿混杂岩中的硅质岩岩块主要为中—薄层灰色—灰黑色(图4a),产状为 $123^{\circ} \angle 53^{\circ}$,层厚约30 m,上部与底部均与浊积岩为整合接触,受强烈的构造作用局部整体发育尖棱褶皱。硅质岩中含有丰富的放射虫化石,镜下观察该套硅质岩主要由微晶石英组成,大多数放射虫化石内部由玉髓和微晶石英充填,重结晶程度较强,部分放射虫还可见内部结构(图4b)。

2.2.2 枕状玄武岩 玄武岩由斑晶和基质组成,斑晶成分为辉石和少量长石,粒径0.40~4.50 mm;辉

石为自形一半自形晶,可见柱状、六边形、八边形、近四边形切面,以单斜辉石为主,少量斜方辉石。单斜辉石单偏光下为浅绿、浅红,干涉色为二级,斜消光,偶见环带;斜方辉石已转变为绿泥石集合体,多仅保留其假象,偶见少量残留;长石为半自形晶,板条状,发生硅化、绿泥石化蚀变,仅保留其假象,含量小于5%。基质成分有辉石、斜长石和极少量铁质,为微晶—隐晶质;辉石为半自形晶,柱状,以单斜辉石为主,斜方辉石已发生绿泥石化蚀变;斜长石为半自形晶,板条状,具聚片双晶、卡钠复合双晶,发生土化、绿泥石化蚀变;铁质为不规则状,黑色不透明。

2.2.3 辉绿岩 辉绿岩大多呈岩墙状产出,在南莫溪北侧一带十分发育。受剪切影响,矿物已发生定向排列,野外手标本观察到的斜长石呈米粒状,暗色矿物呈不对称眼球状(图4c)。镜下岩石具碎裂结构或粗糜结构。斜长石与辉石矿物粒径0.1~2.2 mm,微粒少,细粒75%,余为中粒,各矿物较均匀相间,长石半自形板状,少量辉石呈半自形柱状与辉石相间,而多数辉石呈填隙状产于斜长石所搭角状空间内,从而显示出典型辉绿结构(图4d)。普通辉石呈半自形柱状,偶见简单双晶,局部发育绿帘石

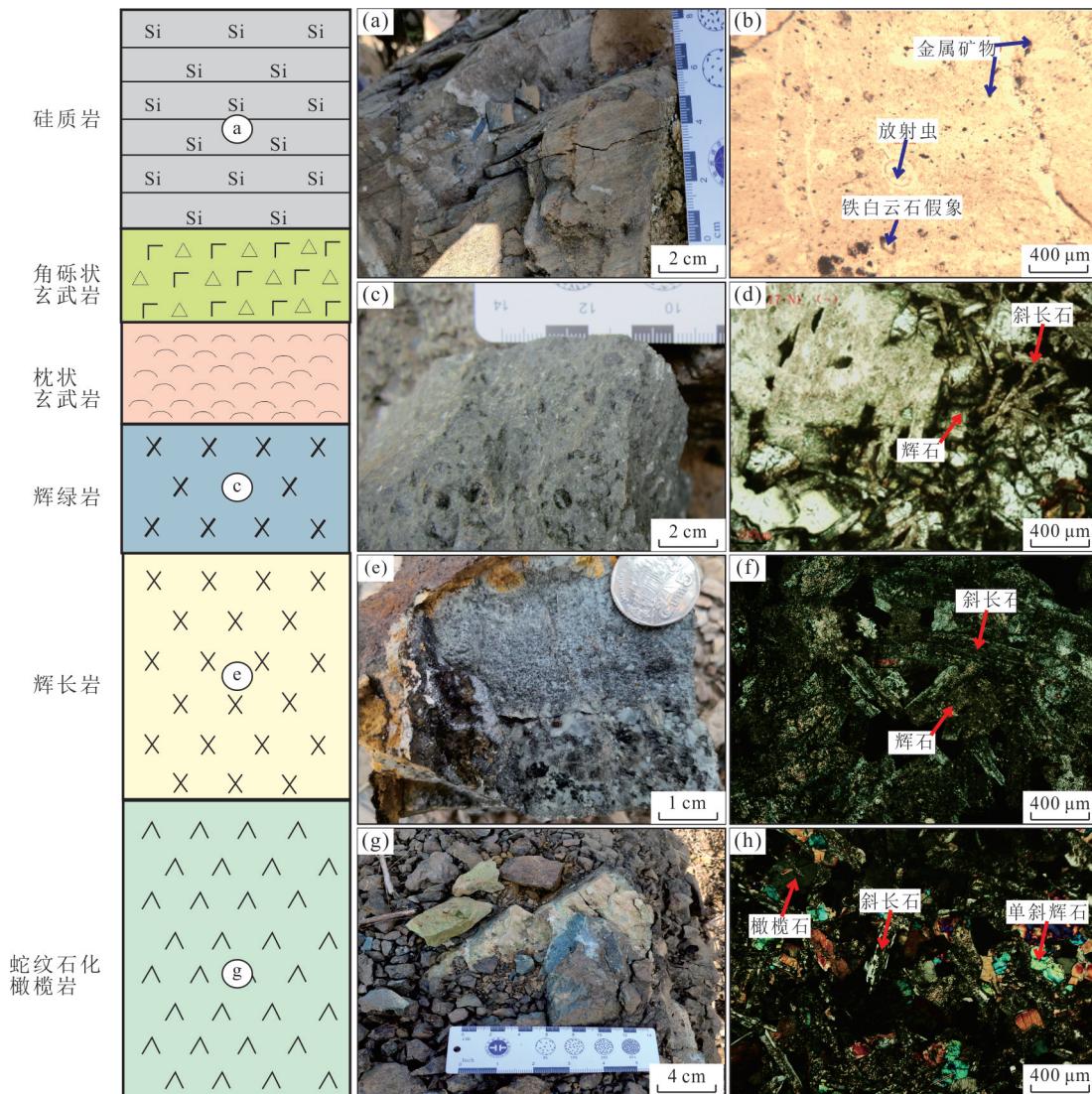


图 4 南莫溪蛇绿混杂岩柱状图及野外和镜下照片

Fig.4 Stratigraphic column, field outcrops and microscopic photos of Namhonr ophiolitic complex

a. 硅质岩野外露头;b. 硅质岩单偏光镜下照片;c. 辉绿岩野外露头;d. 辉绿岩单偏光镜下照片;e. 辉长岩野外露头;f. 辉长岩正交偏光镜下照片;g. 蛇纹石化橄榄岩野外露头;h. 蛇纹石化橄榄岩正交偏光镜下照片

化及绿泥石化,裂纹发育,显示出碎裂结构。斜长石半自形板状,发育卡钠连晶、见聚片双晶,An30±,普遍被扭弯,发育裂纹,绢云母化、绿泥石化等。

2.2.4 辉长岩 辉长岩呈灰黑色,等粒结构,块状构造(图 4e),主要由普通辉石、斜长石组成,可见普通角闪石、榍石及金属矿物。辉石与斜长石粒径大小相近,辉石呈 0.01~1.40 mm 半自形—他形柱状,较均匀分布;斜长石呈 0.04~1.07 mm 半自形—较自形板条状,见聚片双晶与环带构造,较强烈泥化、绢云母化、绿泥石化,均匀分布;普通角闪石呈 0.02~0.79 mm 他形粒状,强烈绿泥石化仅存其假象,稀疏分布;榍石呈 0.02~0.06 mm 半自形—较自

形粒状,零星不均匀分布;不透明金属矿物呈 0.01~0.30 mm 他形—较自形粒状,稀疏分布(图 4f)。

2.2.5 蛇纹岩 蛇纹岩呈暗绿色,块状构造,主要矿物为蛇纹石,占 95% 左右,还有很少量的次闪石和叶蜡石等,含量约为 4% 左右,方解石的含量远小于 1%,不透明矿物的含量小于 1%。蛇纹石具纤维变晶结构,呈集合体状;次闪石为纤维状变晶结构,分布于蛇纹石集合体之中;金属矿物呈它形粒状或细小的集合体状,部分形成席勒状。尽管强烈的蛇纹石化使原岩矿物难以识别,但是仍然可以判断这一蛇绿岩单元经历了较强的构造变形,并且呈大小不等的块体或透镜体分布于玄武岩和浊积岩中。

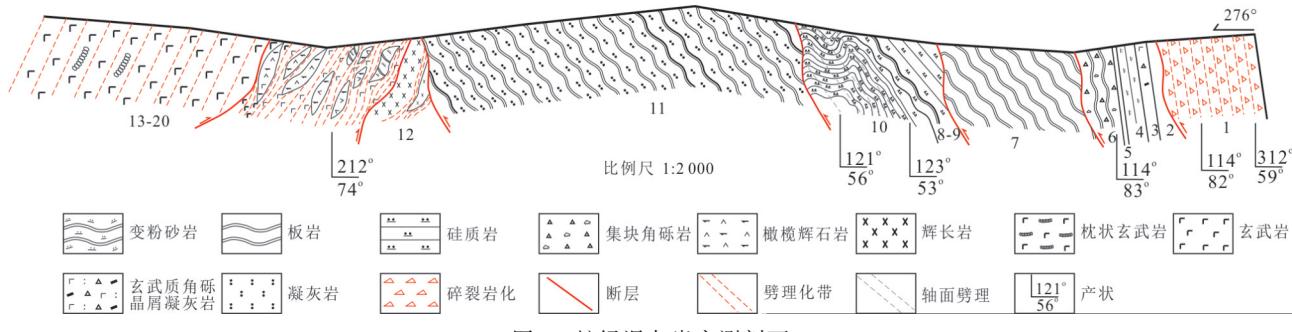


图5 蛇绿混杂岩实测剖面

Fig.5 Section map of Namhonr ophiolitic complex

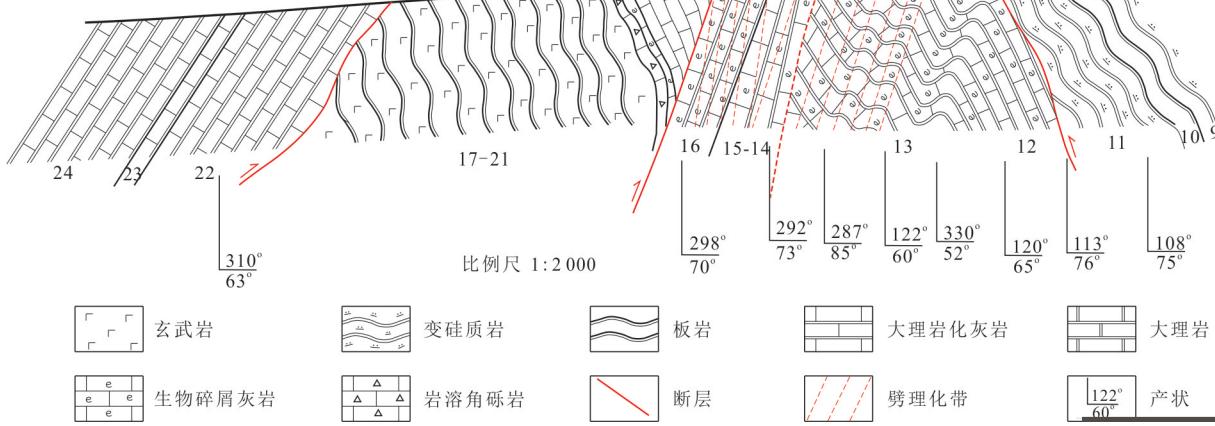


图6 南莫溪地区“洋岛—海山”岩块实测剖面

Fig.6 Section of oceanic island-seamount in Namhon area

2.2.6 蛇纹石化辉石橄榄岩 蛇纹石化辉石橄榄岩风化面呈褐色,新鲜面呈绿黑色—黑色,块状构造,半自形粒状结构。岩石由橄榄石、单斜辉石构成。橄榄石呈绿色,半自形粒状结构,粒度0.5 mm左右,含量60%~70%之间,橄榄石部分已蛇纹石化,局部可见残留假象(图4g),蛇纹石为纤维状变晶,呈集合体状,交叉状排列,构成似交织结构。单斜辉石呈自形一半自形柱状,标本上呈灰白色,薄片中无色,粒度在0.4 mm左右,多色不明显,两组完全解理,夹角为87°,多被滑石、透闪石交代。金属矿物呈它形粒状、半自形八面体状分布(图4h)。

2.2.7 洋岛海山岩块 在老挝南莫溪地区开展的火山岩与上覆碳酸盐岩地层之间关系的实测剖面(图6,图7),判定该地区碳酸盐岩地层与玄武岩为“洋岛—海山”双层结构,底座为玄武岩,顶盖为生物礁灰岩,二者之间为整合接触(图7a)。在灰岩与玄武接触部位发育砾岩,砾石成分单一,为灰岩砾石,可能为海山边部的垮塌岩块和砾石(图7b)。生物礁灰岩古生物含量达到75%以上,主要为珊瑚(图7c、7d),通过鉴定确定珊瑚种属为Thamnopora

sp. 和 Paracrvenia sp., 所属时代为中二叠世。

2.3 构造样式

黎府蛇绿混杂岩至少经历了3期以上的构造变形作用,早期为韧脆性动力变质作用,中期为韧性动力变质作用,后期为脆性动力变质作用。蛇绿混杂岩基质与岩块经过第一期中浅构造层次韧性构造变形变质作用,形成了绿泥石片岩(图8a)等,岩石中发育透入性片理化S₁面理,面理产状为302°/78°。第二期构造变形变质是对第一期变形的叠加改造,以较强烈的逆冲剪切变形为特征。老挝南莫溪蛇绿混杂岩基质与岩块均受到不同程度的韧性剪切变质变形,韧性变形较强烈,形成不对称褶皱(图8b);能干性较强的岩块变形较弱,多以岩块的形式出现,仅部分岩块在构造变形带发育糜棱岩化,形成糜棱面理S₂和δ型旋转碎斑等(图8c),并根据碎斑判断平面韧性剪切运动方向为左行剪切,剪切方向近南北;同时在纵向剖面上看,该期构造主要为逆冲剪切。可以看出该阶段为混杂岩形成构造发育主要时期,并且总体现实为左行逆冲剪切。第三期的构造以岩石发育密集劈理带为特征(图8d),变形变质层次较浅。

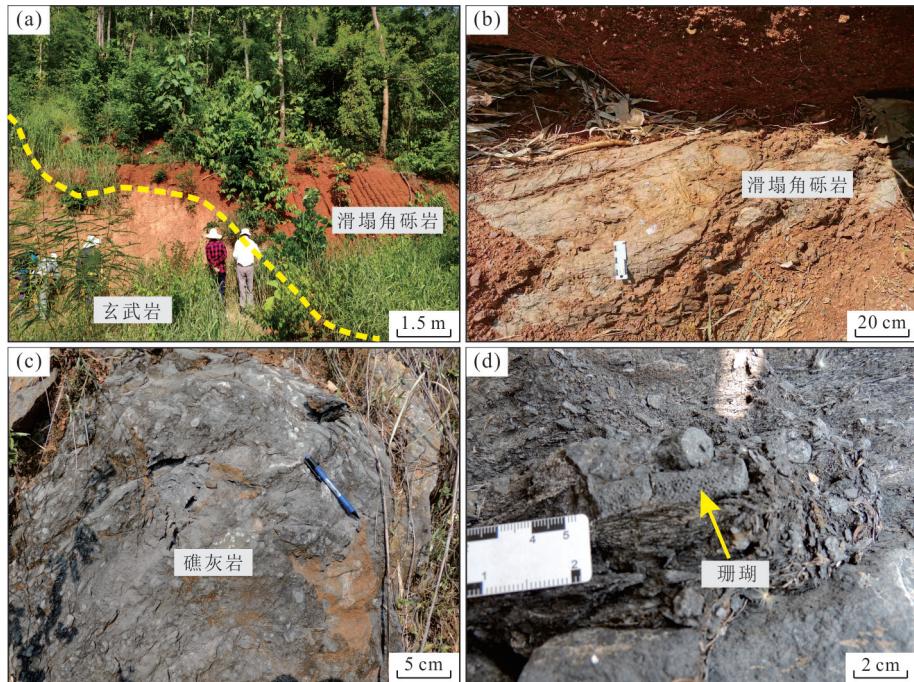


图 7 南莫溪地区洋岛—海山野外照片

Fig.7 Field outcrops of oceanic island-seamount in Namhonr area

a. 玄武岩与生物礁灰岩整合接触带;b. 海山边部的垮塌岩块和砾石;c. 生物礁灰岩;d. 礁灰岩中珊瑚化石

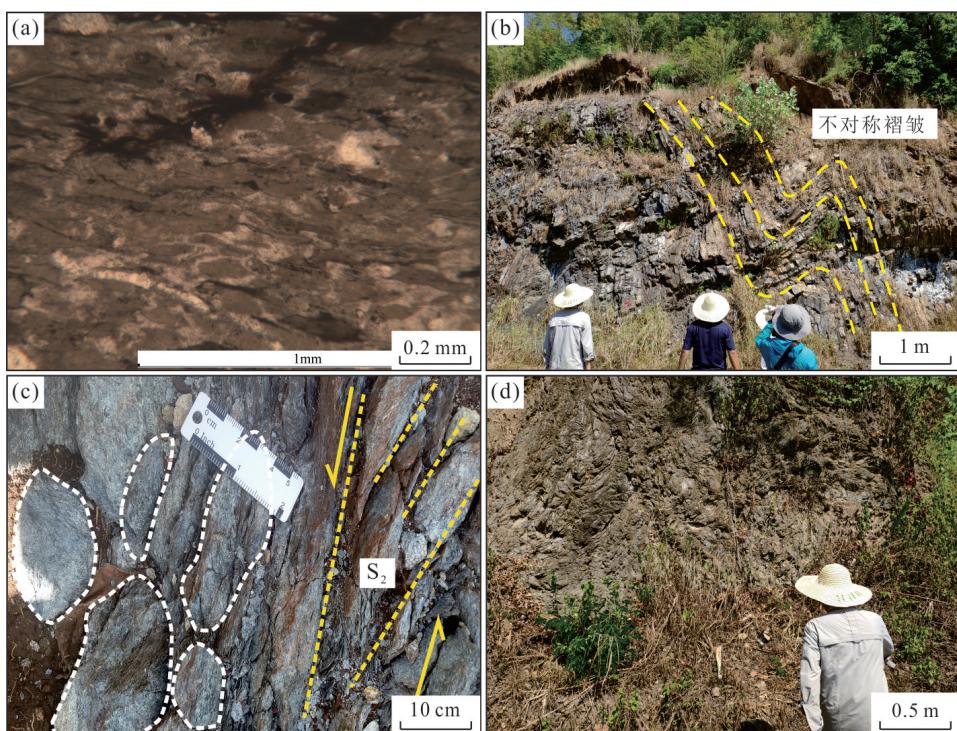


图 8 南莫溪蛇绿混杂岩构造变形特征

Fig.8 Tectonic deformation characteristics of Namhonrophioliticcomplex

a. 绿泥石片岩;b. 不对称褶皱;c. 糜棱面理 S_2 和 δ 型碎斑;d. 密集劈理带

3 分析方法

本次研究主要针对黎府蛇绿混杂岩的辉长岩进行锆石 U-Pb LA-ICP-MS 同位素定年, 针对硅质岩开展全岩主微量元素分析、以及放射虫分选和时代鉴定。

3.1 锆石 U-Pb 测年

辉长岩锆石分选在廊坊市诚信地质服务有限公司完成。首先将用于锆石挑选的辉长岩样品破碎, 经浮选、磁选、重液等方法后, 淘洗并挑出单颗粒锆石。锆石单矿物用环氧树脂胶固定于矿物靶上, 矿物靶表面经研磨抛光, 直至磨制锆石晶体近中心新鲜切面且基本无划痕为止。

阴极发光拍照和 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。详细的仪器参数和分析流程见 Zong *et al.* (2017). Geolas-Pro 激光剥蚀系统由 COMPExPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7700e. 激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度, 二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合, 激光剥蚀系统配置有信号平滑装置(Hu *et al.*, 2015). 本次分析的激光束斑和频率分别为 32 μm 和 5 Hz. U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2010)完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3 (Ludwig, 2003) 完成。

3.2 主量元素和微量元素分析

硅质岩的主微量元素分析均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。全岩主量元素分析仪器使用日本理学(Rigaku)生产的 ZSX Primus II 型波长色散 X 射线荧光光谱仪(XRF), 4.0 kW 端窗铑靶 X 射线光管, 测试条件为电压:50 kV, 电流:60 mA, 主量各元素分析谱线均为 $K\alpha$, 标准曲线使用国家标准物质岩石系列 GBW07101-14. 数据校正采用理论 α 系数法, 测试相对标准偏差(RSD)<2%. 全岩微量元素含量利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成。用

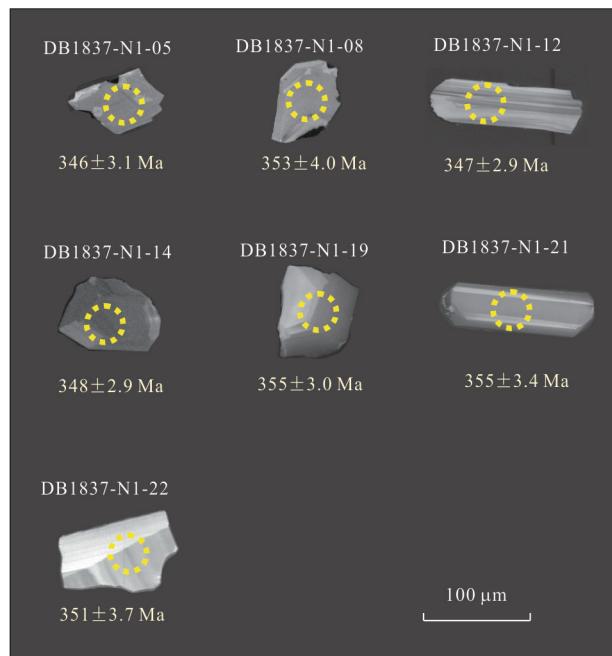


图 9 辉长岩锆石 CL 图像

Fig.9 Zircon CL image of gabbro

于 ICP-MS 分析的样品处理如下:(1)将 200 目样品置于 105 °C 烘箱中烘干 12 h;(2)准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中;(3)先后依次缓慢加入 1 mL 高纯 HNO_3 和 1 mL 高纯 HF;(4)将 Teflon 溶样弹放入钢套, 拧紧后置于 190 °C 烘箱中加热 24 h 以上;(5)待溶样弹冷却, 开盖后置于 140 °C 电热板上蒸干, 然后加入 1 mL HNO_3 并再次蒸干;(6)加入 1 mL 高纯 HNO_3 、1 mL MQ 水和 1 mL 内标 In(浓度为 10^{-6}), 再次将 Teflon 溶样弹放入钢套, 拧紧后置于 190 °C 烘箱中加热 12 h 以上;(7)将溶液转入聚乙烯料瓶中, 并用 2% HNO_3 稀释至 100 g 以备 ICP-MS 测试。

3.3 放射虫分选及鉴定

硅质岩样品中的放射虫处理与鉴定在中国地质大学(北京)微体古生物实验室中完成。方法依次包括碎样、酸处理、筛样、镜下挑选、电镜扫描拍照等。具体步骤为:先将硅质岩样品碎成直径为 2 cm 左右的碎块, 用清水冲洗后将其放入塑料烧杯中, 并加入 4% 的氢氟酸溶液。每天换酸两次, 12 h 后, 将烧杯中的上层清液(废酸)倒出, 将底部残渣转移至盛有清水的另一烧杯中保存, 同时在原烧杯加入新配置的 4% 的氢氟酸溶液, 溶液覆盖所有硅质岩样品(De Wever *et al.*, 2001). 重复上述步骤, 10 d 之后, 直到溶解出放射虫软泥后, 将得到的残渣过筛、洗净、烘干, 用双目镜挑选放射虫化石。选择保存较

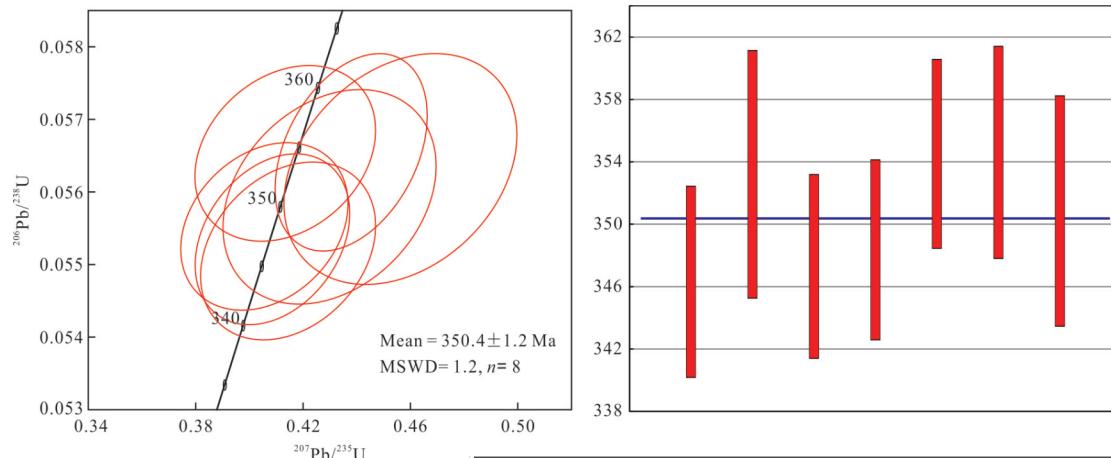


图 10 南莫溪蛇绿混杂岩中辉长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图及加权年龄图

Fig.10 Zircon LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram and weighted average age of gabbro from Namhonr ophiolitic complex

好的化石固定于黄铜靶台,利用电子显微镜(SEM)进行拍照,并鉴定分类。

4 分析结果

4.1 辉长岩锆石 U-Pb 年代学

辉长岩的锆石呈板状或短柱状,大部分呈不规则碎粒状,粒径在 60~150 μm 之间,长宽比在 2 左右。CL 图像中,多数锆石内部多为均一的特征,可见明显的岩浆振荡环带,且环带较宽,部分表现出扇形分带特征(图 9),属于典型的基性岩浆锆石(Vavra *et al.*, 1996; 吴元保和郑永飞, 2004)。

本次研究选择了 25 颗锆石进行测试分析,剔除明显异常的数据(可能含有包裹体、裂隙),得到了 7 颗锆石年龄数据,LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果见附表 1。Th 含量范围为 $(88.9 \sim 267.0) \times 10^{-6}$, U 含量范围为 $(191 \sim 504) \times 10^{-6}$, Th/U 比值在 0.41~0.70 之间,平均为 0.54。从图 10 可以看出, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围在 $346 \pm 3.1 \text{ Ma}$ 到 $355 \pm 3.0 \text{ Ma}$, 加权平均年龄为 $350.4 \pm 3.3 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.2$), 为早石炭世,代表了辉长岩的结晶年龄。

4.2 硅质岩地球化学特征

硅质岩的主量元素和微量元素分析结果见附表 2。部分样品烧失量(LOI)偏高,故需剔除烧失量后重新按照 100% 分配后计算氧化物含量。所有 11 件样品的 SiO_2 质量分数范围为 96.05%~98.39%, Al_2O_3 质量分数范围为 0.46%~1.59%, Si/Al 平均质量比 97.86, 为指示本次研究样品为纯硅质岩(Murray *et al.*, 1992)。其他氧化物含量由于 SiO_2 过高而较低, TFe_2O_3 平均质量分数 0.45%、 MnO 平均

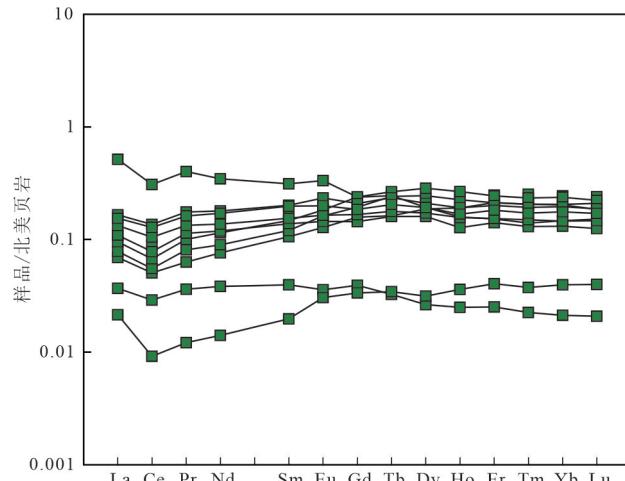


图 11 南莫溪蛇绿混杂岩中硅质岩稀土元素配分曲线

Fig.11 NASC-normalized REE diagrams of chert from Namhonr ophiolitic complex

质量分数 0.011%、 K_2O 平均质量分数 0.269%、 TiO_2 平均质量分数 0.033, 都指示了黎府蛇绿岩中的硅质岩几乎不含陆源沉积物。

硅质岩稀土元素特征显示,稀土总量不高, $\sum \text{REE}$ 为 $(2.69 \sim 56.57) \times 10^{-6}$, 平均为 20.04×10^{-6} 。将稀土元素含量北美页岩标准化后,整体稀土配分模式呈现平坦型(图 11), LREE/HREE 为 2.37~13.63, 平均值为 5.11。Ce 和 Eu 异常选取的计算公式分别为 $\delta\text{Ce} = 2 \times \text{Ce}_{\text{N}} / (\text{La}_{\text{N}} + \text{Pr}_{\text{N}})$ 和 $\delta\text{Eu} = 2 \times \text{Eu}_{\text{N}} / (\text{Sm}_{\text{N}} + \text{Gd}_{\text{N}})$, 得到 δCe 值为 0.55~0.81, δEu 值为 0.91~1.21, 仅表现出弱的 Eu 异常, Ce 异常相对明显。

4.3 放射虫组合及时代

黎府蛇绿岩中的硅质岩存在大量放射虫化石,

除部分样品由于变质作用或重结晶作用导致放射虫难以鉴定之外,本次硅质岩中共鉴定出放射虫9属30种(图12)。通过鉴定,包括*Stigmosphaerostylusvariospina* (Won)、*Trilonche* sp. cf. *T. parapalimbola* Wang、*Stigmosphaerostylustortispina* (Ormiton and Lane)在内的放射虫均属于中—上泥盆统到上石炭统的地层中,其中最具有年代指示意义的属种为*Triloncheminax* (Hinde),该种在全球范围内均有分布,见于澳大利亚东部新英格兰造山带、俄罗斯乌拉尔山脉、滇西、广西和美国等地,同时也是上泥盆统放射虫*Triloncheminax*组合的带化石。总体来看,本次研究的硅质岩中放射虫的所属时代应为中泥盆世—早石炭世。

5 讨论

5.1 硅质岩成因及沉积环境

硅质岩按成因类型可分为热液成因硅质岩和生物成因硅质岩。一般来说,热液作用的影响会导致硅质岩中Mn、Fe等元素含量发生变化,而Al的含量则与含铝硅酸盐的陆源物质参与有关,因此硅质岩中的Al、Fe、Mn含量及Al/(Al+Fe+Mn)的比值常作为用于判断硅质岩成因的有效指标(Bostrom and Peterson, 1969)。前人研究表明,硅质岩的Al/(Al+Fe+Mn)值一般在0.01和0.6之间变化,值越小代表热液影响越大,热液成因硅质岩比值范围为0.01~0.35,生物成因硅质岩比值为0.45~0.75(Adachi et al., 1986)。黎府硅质岩的Al/(Al+Fe+Mn)的比值为0.56~0.83,平均为0.65,指示本次其属于生物成因硅质岩。从Al-Fe-Mn三角判别图解(图13a)中可以看出,11件硅质岩样品全部落在生物成因硅质岩范围之内或附近,同时在Al/(Al+Fe+Mn)-Al₂O₃/TiO₂图解(图13b)中,所有样品均落也在非热液成因范围,由于部分样品Al₂O₃/TiO₂比值出现升高趋势,推测受到区域酸性岩浆活动的影响。

Eu异常也是判断硅质岩是否存在热液沉积作用的重要指示标志。生物成因或是正常海水沉积的硅质岩稀土元素特征中没有明显的Eu异常,而热液成因硅质岩一般表现出明显的Eu异常,且异常越强指示热液作用越显著(Frimmel, 2009)。黎府11件样品硅质岩均未表现出明显的Eu异常(图11),δEu平均值为1.04,同样也表现出生物成因的特征。

Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃)的比值是判断硅质岩的

沉积环境的重要指标,特别是区分洋中脊和大陆边缘环境。研究表明,洋中脊硅质岩的比值小于0.4,大陆边缘硅质岩的比值为0.5~0.9,黎府构造带蛇绿岩中硅质岩的Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃)比值为0.53~0.77,指示沉积环境非洋中脊,进而通过Fe₂O₃/TiO₂-Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃)(图14a)和(La/Ce)_N-Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃)(图14b)判别图解判断,大部分样品均落在远洋环境范围内,代表本次研究的硅质岩形成于洋盆或开阔的盆地环境中。

此外,La_N/Ce_N的比值也可作为判断硅质岩沉积环境的重要稀土元素参数之一(Adachi et al., 1986),形成于大陆边缘的硅质岩的值为1.1~1.4,高于其他沉积环境;形成于大洋盆地的硅质岩的比值一般为0.3~1.1;而形成于洋中脊的硅质岩的La_N/Ce_N一般小于0.3(Murray et al., 1992)。黎府蛇绿混杂岩中硅质岩的La_N/Ce_N值为0.34~3.51,平均值为0.98,同样指示其形成于大洋盆地中。

5.2 黎府蛇绿混杂岩地质意义

关于中南半岛特提斯演化及构造格架划分长期以来未达到共识,一直在寻求发现更多的关键性证据。其中琅勃拉邦—黎府构造带及其西侧的难河—程逸构造带以及北部奠边府构造带的连接问题是区域构造划分的关键。部分学者认为琅勃拉邦构造带向南可与难河—程逸构造带相连,向北与我国云南金沙江—哀牢山构造带相连,作为古特提斯洋弧后盆地的残余(Leloup et al., 1995; 刘本培等, 2002; Barr et al., 2006; 杨文强等, 2009; 陈永清等, 2010; 钟维敷等, 2012; 钱鑫, 2016; Yang et al., 2016),但关于黎府构造带的性质以及向北如何连接系列问题一直没有给与充分的解释。虽有研究者认为黎府构造带向北应与琅勃拉邦构造带相连(Chonglakmani et al., 2001; Zaw et al., 2014)但一直未发现关键性证据。难河—程逸所发现的蛇绿岩套的地球化学及年代学研究成果,其所代表的的洋盆演化时限明显短于古特提斯主洋或支洋(图15),故目前对于难河—程逸缝合带代表了古特提斯洋向东俯冲所形成的素可泰弧的弧后盆地这一观点已得到广泛认可(Ueno and Hisada, 2001; Metcalfe, 2005, 2006; Sone and Metcalfe, 2008; Sone et al., 2012; Metcalfe et al., 2017; Hara et al., 2018),向北可与我国南澜沧江(景洪)带相连,向南可与沙缴相连。Hara et al. (2020)在柬埔寨西部报道的一套由角闪岩、变辉长岩和长英质火山岩组成的杂岩

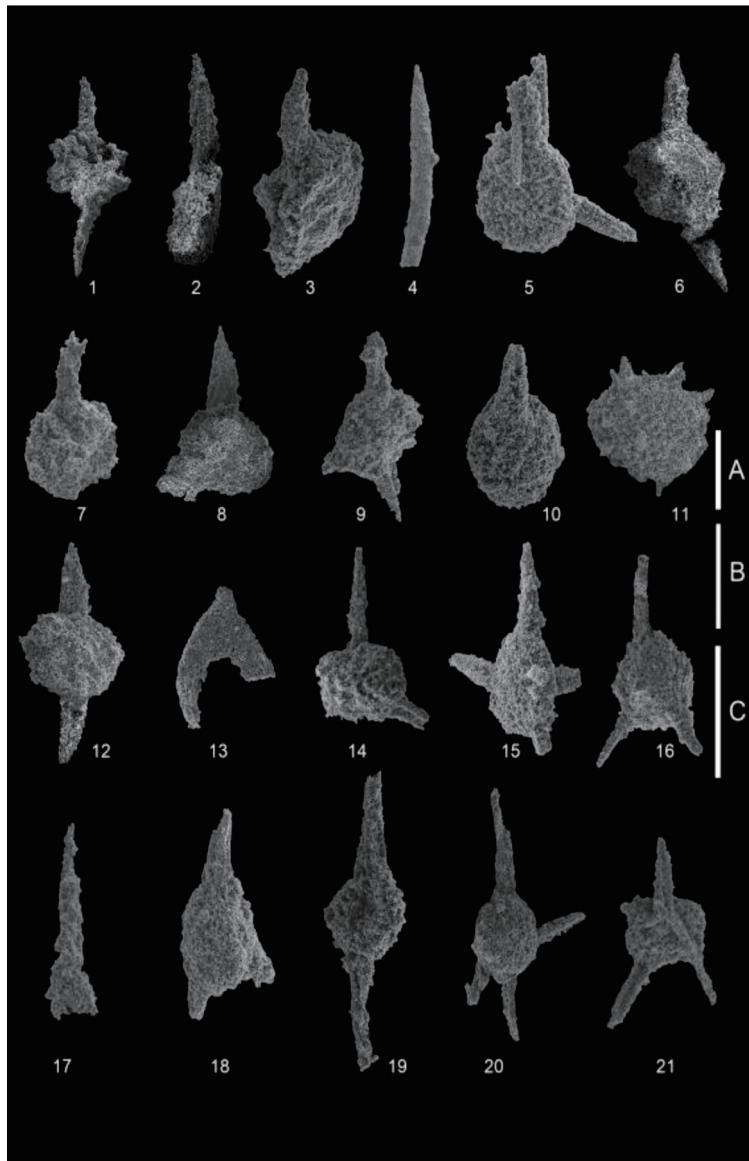


图 12 硅质岩中放射虫化石

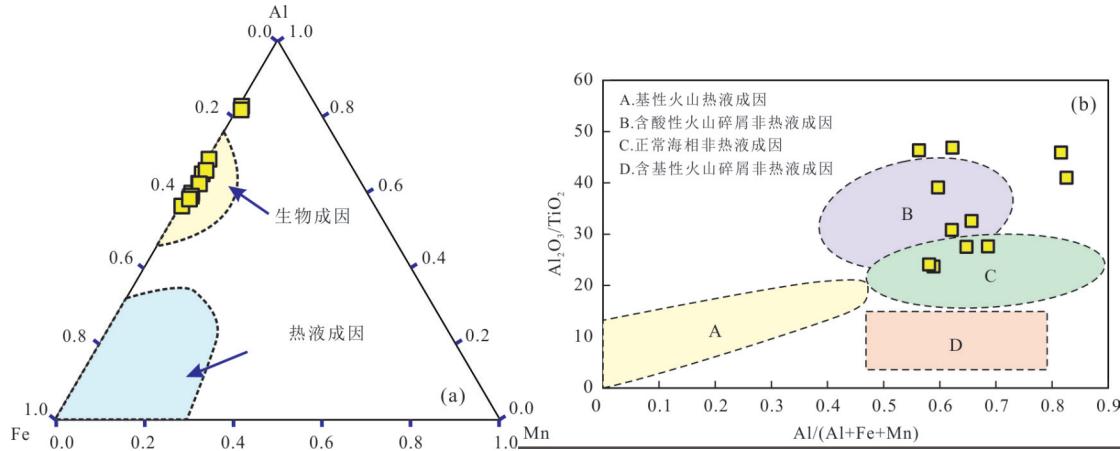
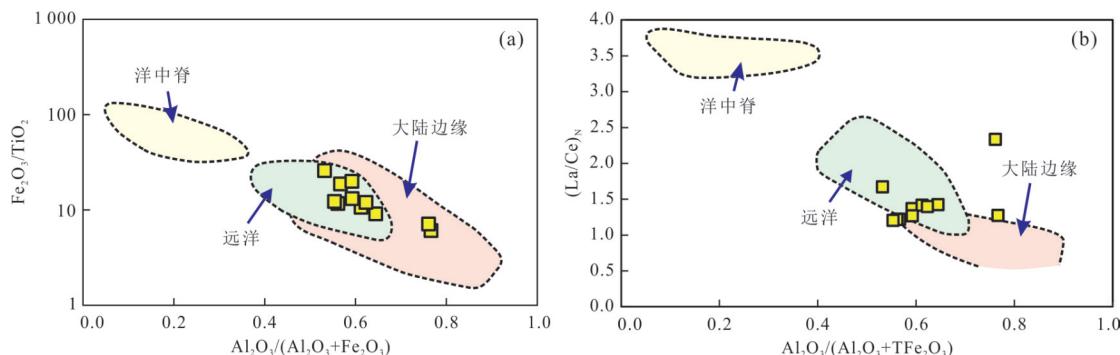
Fig.12 Radiolarian fossils in the chert

1. *Trilonche* sp. C; 3. *Trilonche* sp. D; 4. *Palaeoscenidium* (?)sp.; 5, 6, 9, 18. *Trilonche* sp. cf. *T. parapalimbola* Wang; 7, 10. *Trilonche palimbola* (Foreman); 8. *Trilonche* sp. cf. *T. palimbola* (Foreman); 11. *Stigmosphaerostylus* sp.; 12. *Trilonche vetusta* Hinde; 13. *Helenifore robustum* (Boundy-Sanders and Murchey); 14, 16, 20. *Stigmosphaerostylus tortispina* (Ormiston and Lane); 15. *Stigmosphaerostylus* sp. cf. *S. tortispina* (Ormiston and Lane); 2, 17. *Stigmosphaerostylus* ? *variospina* (Won); 19. *Trilonche minax* (Hinde); 21. *Trilonche davidi* (Hinde); 比例尺 A、B、C 均代附表 100 μm, A. 1,4; B. 2,6~10,13~16,18~21; C. 3,5,11,12,17

体, 钨石 U-Pb 年龄为 275~283 Ma, 形成于弧后背景环境, 再次佐证了难河—程逸弧后盆地向南可延至柬埔寨, 共同作为古特提斯洋弧后盆地的残余。南澜沧江(景洪)—难河—程逸—沙缴共同代表了古特提斯向东俯冲所形成的弧后盆地, 同时也是印支板块和素可泰地体的分界线。

本次研究首次在黎府构造带北部南莫溪地区发现了完整的蛇绿岩组合, 同时识别出了早石炭世

的基性侵入岩 (348±3.7 Ma) 和晚泥盆世—早石炭世的远洋放射虫硅质岩, 综合判断黎府构造带北部南莫溪地区在晚泥盆世—早石炭世存在一个开阔的洋盆。本次研究还针对洋岛海山礁灰岩的珊瑚进行了时代的限定, 通过鉴定确定珊瑚种属为 *Thamnopora* sp. 和 *Paracravenia* sp., 所属时代为中二叠世, 证实了该蛇绿混杂岩所代表的洋盆具有长期的演化历史, 从晚泥盆世开始, 一直持续到中二叠

图13 南莫溪蛇绿混杂岩中硅质岩Al-Fe-Mn(a)和Al/(Al+Fe+Mn)-Al₂O₃/TiO₂(b)图解Fig.13 Al-Fe-Mn(a) and Al/(Al+Fe+Mn)-Al₂O₃/TiO₂(b) diagrams for the radiolarian chert in the Namhonr ophiolitic complex图14 南莫溪蛇绿混杂岩中硅质岩Fe₂O₃/TiO₂-Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃)(a)和(La/Ce)_n-Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃)(b)判别图解Fig.14 Fe₂O₃/TiO₂-Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃)(a) and (La/Ce)_n-Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃)(b) diagrams for the radiolarian chert in the Namhonr ophiolitic complex

世还未结束,演化时间至少超过135 Ma,指示了黎府构造带北部南莫溪地区的蛇绿混杂岩代表了该区域曾存在古特提斯洋,而非弧后盆地(图15)。钱鑫(2016)在本次研究区北部琅勃拉邦地区报道了同样发现了枕状玄武岩+辉绿岩+硅质岩的组合,玄武岩和辉绿岩的锆石年龄为335±3.3 Ma,与本文辉长岩结果相近。同时,硅质岩的研究结果表明其同样为生物成因硅质岩,形成于开阔洋盆环境,且放射虫的地质时代可对比早石炭世,与本文一致。此外,琅勃拉邦地区硅质岩上部与石炭纪一二叠纪薄层灰岩整合接触,因此研究者认为在琅勃拉邦地区可能也存在洋岛海山,但目前未发现相关证据。综合本文首次发现的蛇绿混杂岩研究成果及前人认识,笔者更偏向于认为黎府构造带向北应与琅勃拉邦构造带相连,且该区域从晚泥盆世开始一直存在古特提斯洋。东南亚地区的大地构造背景非常复杂,本文在南莫溪地区首次发现的蛇绿混杂岩为

进一步探究区域构造分区提供了相应证据,但若要充分厘清构造格架,未来仍需要更多研究工作支撑。

6 结论

(1)首次在黎府构造带北部南莫溪地区发现完整的蛇绿混杂岩,出露的蛇绿岩套端元包括蛇纹岩、蛇纹石化橄榄岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、硅质岩等,指示该地区存在古洋壳的残留。本次发现对于研究印支板块西缘的古特提斯构造格架具有重要意义。

(2)LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测定结果表明,蛇绿混杂岩中辉长岩形成时代为350.4±3.3 Ma (MSWD=1.2),为早石炭世。洋岛海山中珊瑚种属为Thamnopora sp.和Paracravenia sp.,所属时代为中二叠世。

(3)含放射虫硅质岩稀土配分模式中未表现出明显的Eu异常,结合其Al、Mn、Fe、Ti等特征元素

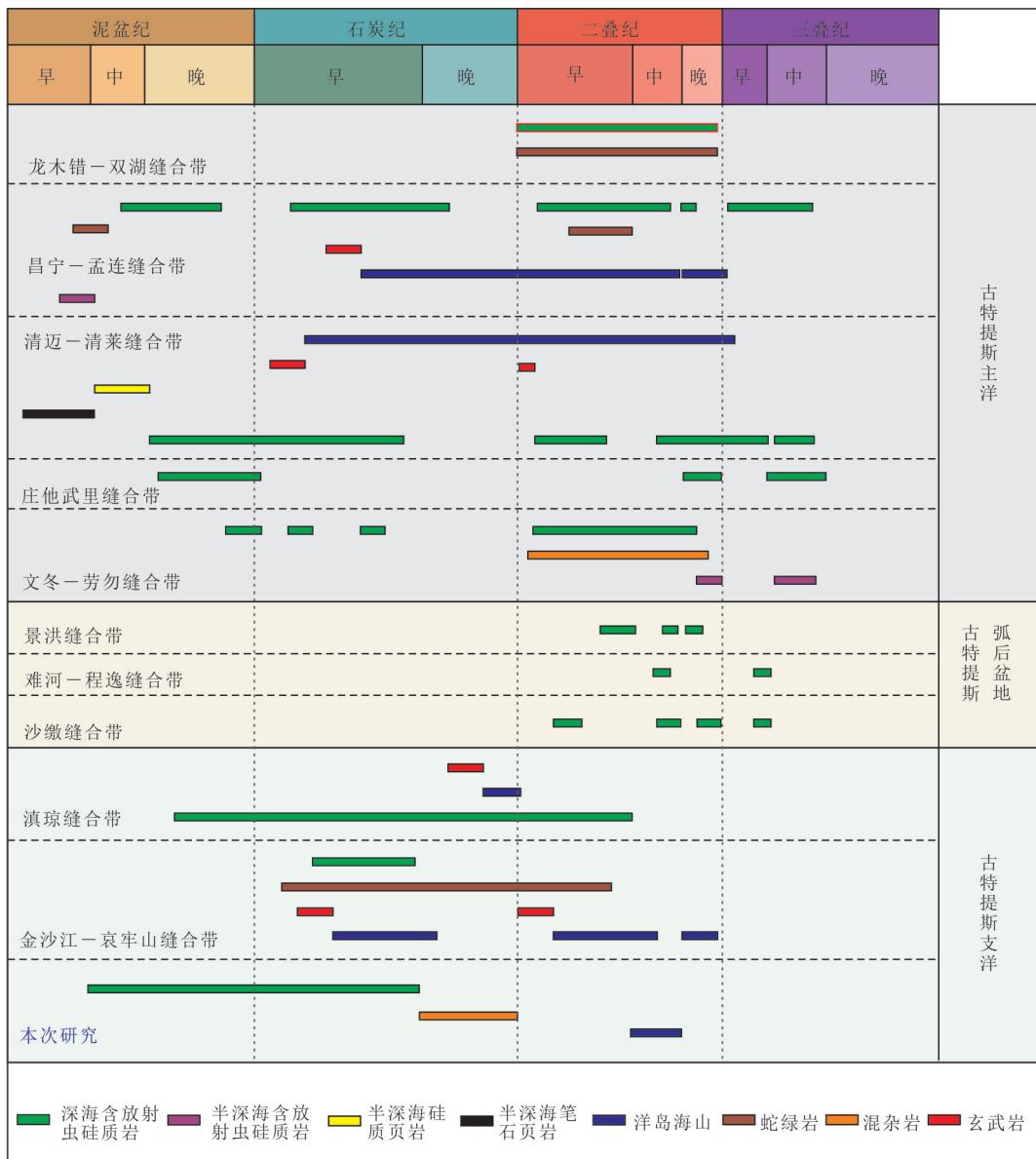
图 15 东特提斯缝合带各类岩石年龄数据统计图(据 Metcalfe *et al.*, 2017 修改)

Fig.15 Agesofcherts, carbonates, ophiolites, complex and basalts that constrain the age duration of eastern Palaeo-Tethys suture zones(modified after Metcalfe *et al.*, 2017).

地球化学特征,指示该硅质岩为生物成因,沉积环境为洋盆或开阔的盆地环境. 硅质岩放射虫鉴定出9属30种,所属时代为中泥盆世—早石炭世.

(4)南莫溪蛇绿混杂岩所代表的洋盆具有长期的演化历史,从晚泥盆世开始,一直持续到到中二叠世还未结束,演化时间至少超过135 Ma,指示了黎府构造带北部南莫溪地区的蛇绿混杂岩代表残留的古特提斯洋洋盆,而非弧后盆地. 笔者认为黎府构造带向北应与琅勃拉邦构造带相连,且该区域从晚泥盆世开始一直存在古特提斯洋.

附表见本刊官网(www.earth-science.net).

References

- Adachi, M., Yamamoto, K., Sugisaki, R., 1986. Hydrothermal Chert and Associated Siliceous Rocks from the Northern Pacific Their Geological Significance as Indication of Ocean Ridge Activity. *Sedimentary Geology*, 47(1/2): 125—148. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(86\)90075-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(86)90075-8)
- Barr, S. M., Macdonald, A. S., Ounchanum, P., et al., 2006. Age, Tectonic Setting and Regional Implications of the Chiang Khong Volcanic Suite, Northern Thailand. *Journal of the Geological Society*, 163(6): 1037—1046. <https://doi.org/10.1144/0016-76492005-118>
- Bezard, R., Hébert, R., Wang, C. S., et al., 2011. Petrolo-

- gy and Geochemistry of the Xiugugabu Ophiolitic Massif, Western Yarlung Zangbo Suture Zone, Tibet. *Lithos*, 125(1/2): 347—367. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.02.019>
- 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). *Journal of Asian Earth Sciences*, 70—71: 8—26. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2013.02.024>
- Bostrom, K., Peterson, M. N. A., 1969. The Origin of Aluminum - Poor Ferromanganese Sediments in Areas of High Heat Flow on the East Pacific Rise. *Marine Geology*, 7(5): 427—447. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(69\)90016-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(69)90016-4)
- Chen, Y. Q., Liu, J. L., Feng, Q. L., et al., 2010. Geology and Ore Deposits Associated with Granites in Indo-China Peninsula of Southeastern Asia. Geological Publishing House, Beijing, 1—213 (in Chinese).
- Chonglakmani, C., Feng, Q. L., Ingavat-Helmcke, R., et al., 2001. Correlation of Tectono - Stratigraphic Units in Northern Thailand with Those of Western Yunnan (China). *Earth Science*, 12(26): 207—213 (in Chinese with English abstract).
- De Wever, P., Dumitrica, P., Caulet, J. P., Nigrini, C., Caridroit, M., 2001. Radiolarians in the Sedimentary Record. Gordon and Breach, London, 1—533.
- Fan, W. M., Wang, Y. J., Zhang, Y. H., et al., 2015. Paleotethyan Subduction Process Revealed from Triassic Blueschists in the Lancang Tectonic Belt of Southwest China. *Tectonophysics*, 662(3): 95—108. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.12.021>
- Feng, Q. L., Yang, W. Q., Shen, S. Y., et al., 2008. The Permian Seamount Stratigraphic Sequence in Chiang Mai, North Thailand and Its Tectogeographic Significance. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(12): 1768—1775. <https://doi.org/10.1007/s11430-008-0121-5>
- Frimmel, H. E., 2009. Trace Element Distribution in Neoproterozoic Carbonates as Palaeoenvironmental Indicator. *Chemical Geology*, 258(3/4): 338—353. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.033>
- Dewey, J. F., Bird, J. M., 1971. Origin and Emplacement of the Ophiolite Suite: Appalachian Ophiolites in Newfoundland. *Journal of Geophysical Research*, 76(14): 3179—3206. <https://doi.org/10.1029/jb076i014p03179>
- Hara, H., Tokiwa, T., Kurihara, T., et al., 2018. Permian-Triassic Back-Arc Basin Development in Response to Paleo - Tethys Subduction, Sa Kaeo - Chanthaburi Area in Southeastern Thailand. *Gondwana Research*, 64: 50—66. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.06.007>
- Hara, H., Ito, T., Tokiwa, T., et al., 2020. The Origin of the Pailin Crystalline Complex in Western Cambodia, and Back - Arc Basin Development in the Paleo - Tethys Ocean. *Gondwana Research*, 82: 299—316. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.01.007>
- Hu, Z. C., Zhang, W., Liu, Y. S., et al., 2015. "Wave" Signal - Smoothing and Mercury - Removing Device for Laser Ablation Quadrupole and Multiple Collector ICPMS Analysis: Application to Lead Isotope Analysis. *Analytical Chemistry*, 87(2): 1152—1157. <https://doi.org/10.1021/ac503749k>
- Huang, Y., Deng, H., 2020. Geochemical Characteristics of Zoned Chromites in Peridotites from the Proterozoic Miawian Ophiolitic Complex, Yangtze Craton: Implications for Element Mobility and Tectonic Setting. *Journal of Earth Science*, 31(2): 223—236. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1278-x>
- Intasopa, S., Dunn, T., 1994. Petrology and Sr-Nd Isotopic Systems of the Basalts and Rhyolites, Loei, Thailand. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(1/2): 167—180. [https://doi.org/10.1016/0743-9547\(94\)90073-6](https://doi.org/10.1016/0743-9547(94)90073-6)
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2009. Devonian to Permian Plate Tectonic Cycle of the Paleo-Tethys Orogen in Southwest China (I): Geochemistry of Ophiolites, Arc/back-Arc Assemblages and Within-Plate Igneous Rocks. *Lithos*, 113(3/4): 748—766. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.004>
- 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. *Gondwana Research*, 26(1): 165—184. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.06.011>
- Khositanont, S., Panjasawatwong Y., Ounchanum, P., et al., 2008. Petrochemistry and Zircon Age Determination of Loei - Phetchabun Volcanic Rocks. In: Chutakositkanon, V., ed., Proceedings of the International Symposia on Geoscience Resources and Environments of Asian Terranes (GREAT 2008). 4th IGCP 516 and 5th APSEG, Bangkok, 272—278.
- Leloup, P. H., Lacassin, R., Tapponnier, P., et al., 1995. The Ailao Shan - Red River Shear Zone (Yunnan, China), Tertiary Transform Boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251(1/2/3/4): 3—84. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00070-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00070-4)
- Li, T. D., Xiao, Q. H., Pan, G. T., et al., 2019. A Consideration about the Development of Ocean Plate Geology. *Earth Science*, 44(5): 1441—1451 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Liu, B. P., Feng, Q. L., Chonglakmani C., et al., 2002. Framework of Paleotethyan Archipelago Ocean of Western Yunnan and Its Elongation towards North and South. *Earth Science Frontiers*, 9(3): 161–171 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. S., Yang, Y. F., Guo, L. N., et al., 2018a. Tectonic Characteristics and Metallogeny in Southeast Asia. *Geology in China*, 45(05): 7–33 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. S., Nie, F., Wu, Z. B., et al., 2018b. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemical Characteristics of the Diorites in the Sayabouli Area, NW Laos. *Geology and Exploration*, 54(6): 1282–1291 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 537–571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Ludwig, K. R., 2003. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 1–70.
- Metcalfe, I., 2005. Asia: South-East. In: Selly, R. C., Cocks, L. R. M., Plimer, I. R., eds. *Encyclopedia of Geology*. Elsevier Academic Press, Oxford, 1: 169–196.
- Metcalfe, I., 2006. Palaeozoic and Mesozoic Tectonic Evolution and Palaeogeography of East Asian Crustal Fragments: The Korean Peninsula in Context. *Gondwana Research*, 9(1/2): 24–46. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2005.04.002>
- Metcalfe, I., 2013. Gondwana Dispersion and Asian Accretion: Tectonic and Palaeogeographic Evolution of Eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66(B05423): 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.12.020>
- Metcalfe, I., Henderson, C. M., Wakita, K., 2017. Lower Permian Conodonts from Palaeo-Tethys Ocean Plate Stratigraphy in the Chiang Mai-Chiang Rai Suture Zone, Northern Thailand. *Gondwana Research*, 44(5): 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.12.003>
- Morley, C. K., Ampaiwan, P., Thanudamrong, S., et al., 2013. Development of the Khao Khwang Fold and Thrust Belt: Implications for the Geodynamic Setting of Thailand and Cambodia during the Indosian Orogeny. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62(2–3): 705–719. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.11.021>
- Murray, R. W., Buchholz Ten Brink, M. R., Gerlach, D. C., et al., 1992. Rare Earth, Major, and Trace Element Composition of Monterey and DSDP Chert and Associated Host Sediment: Assessing the Influence of Chemical Fractionation during Diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(7): 2657–2671. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90351-i](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90351-i)
- Nie, F., Dong, G. C., Mo, X. X., et al., 2012. Geochemistry, Zircon U-Pb Chronology of the Triassic Granites in the Changning-Menglian Suture Zone and Their Implication. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1465–1476 (in Chinese with English abstract).
- Nie, F., Liu, S. S., Yang, Y. F., et al., 2019. Zircon U-Pb Dating and Its Geological Implication for the Diorites from the Phu Lon Skarn-Type Copper-Gold Deposit in Thailand. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39(4): 71–78 (in Chinese with English abstract).
- Nualkhao, P., Takahashi, R., Imai, A., et al., 2018. Petrochemistry of Granitoids along the Loei Fold Belt, Northeastern Thailand. *Resource Geology*, 68(4): 395–424. <https://doi.org/10.1111/rge.12176>
- Qian, X., 2016. The Paleotethyan Tectonic Evolution of the Loei and Luang Prabang Tectonic Zones in Laos (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 1–143 (in Chinese with English abstract).
- Qian, X., Feng, Q. L., Yang, W. Q., et al., 2015. Arc-Like Volcanic Rocks in NW Laos: Geochronological and Geochemical Constraints and their Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98(Suppl. 1): 342–357. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2014.11.035>
- 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. *Lithos*, 245: 60–75. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.019>
- 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. *Journal of Earth Science*, 27(3): 365–377. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0669-5>
- Shi, M. F., Wu, Z. B., Liu, S. S., et al., 2019. Geochronology and Petrochemistry of Volcanic Rocks in the Xaignabouli Area, NW Laos. *Journal of Earth Science*, 30(1): 37–51. <https://doi.org/10.1007/s12583-018-0863-8>
- Shi, R. D., 2005. Comment on the Progress in and Problems on Ophiolite Study. *Geological Review*, 51(6): 681–693 (in Chinese with English abstract).
- Sone, M., Metcalfe, I., 2008. Parallel Tethyan Sutures in Mainland Southeast Asia: New Insights for Palaeo-Tethys Closure and Implications for the Indosian Orogeny. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2/3): 166–179. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.01.003>

- doi.org/10.1016/j.crte.2007.09.008
- Sone, M., Metcalfe, I., Chaodumrong, P., 2012. The Chanthaburi Terrane of Southeastern Thailand: Stratigraphic Confirmation as a Disrupted Segment of the Sukhothai Arc. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61(6): 16–32. https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.08.021
- Ueno, K., Hisada, K. I., 2001. The Nan-Uttaradit-Sa Kaeo Suture as a Main Paleo-Tethyan Suture in Thailand: Is it Real?. *Gondwana Research*, 4(4): 804–806. https://doi.org/10.1016/s1342-937x(05)70590-6
- Vavra, G., Gebauer, D., Schmid, R., et al., 1996. Multiple Zircon Growth and Recrystallization during Polyphase Late Carboniferous to Triassic Metamorphism in Granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): An Ion Microprobe (SHRIMP) Study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122(4): 337–358. https://doi.org/10.1007/s004100050132
- Wang, B. D., Wang, L. Q., Wang, D. B., et al., 2018. Tectonic Evolution of the Changning-Menglian Proto-Paleo Tethys Ocean in the Sanjiang Area, Southwestern China. *Earth Science*, 43(8): 2527–2550 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. Q., Pan, G. T., Ding, J., et al., 2013. Geotectonic Maps and Instructions for the Qinghai-Tibet Plateau and Adjacent Areas (1: 1 500 000). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, Y. J., Qian X., Cawood, P., et al., 2018. Closure of the East Paleotethyan Ocean and Amalgamation of the Eastern Cimmerian and Southeast Asia Continental Fragments. *Earth-Science Reviews*, 186: 195–230.
- Wu, F. Y., Liu, C. Z., Zhang, L. L., et al., 2014. Yarlung-Zangbo Ophiolite: A Critical Updated View. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 293–325 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircon and its Constrain on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- Yang, W. Q., Feng, Q. L., Shen, S. Y., et al., 2009. Permian Radiolarians, Chert and Basalt from the Nan Suture Zone, Northern Thailand. *Earth Science*, 34(5): 743–751 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. Q., Qian, X., Feng, Q. L., et al., 2016. Zircon U-Pb Geochronological Evidence for the Evolution of the Nan-Uttaradit Suture in Northern Thailand. *Journal of Earth Science*, 27(3): 378–390. https://doi.org/10.1007/s12583-016-0670-z
- Yang, Z. L., Seneboultalath, V., Sun, H., et al., 2019. Late Devonian-Early Carboniferous Radiolarian Fauna from Loei Fold Belt in Thailand and Laos and Its Geological Implication. *Acta Minropalaentologica Sinica*, 36(3): 224–231 (in Chinese with English abstract).
- Zaw, K., Meffre, S., Lai, C. K., et al., 2014. Tectonics and Metallogenesis of Mainland Southeast Asia: a Review and Contribution. *Gondwana Research*, 26(1): 5–30. https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.10.010
- Zhao, T. Y., Qian, X., Feng, Q. L., 2016. Geochemistry, Zircon U-Pb Age and Hf Isotopic Constraints on the Petrogenesis of the Silurian Rhyolites in the Loei Fold Belt and their Tectonic Implications. *Journal of Earth Science*, 27(3): 391–402. https://doi.org/10.1007/s12583-016-0671-y
- Zhong, W. F., Feng, Q. L., Chonglakmani, C., et al., 2012. Permian-Triassic Stratigraphic Correlations between Laos and Yunnan and Their Tectonic Significance. *Earth Science*, 37(S2): 73–80 (in Chinese with English abstract).
- Zong, K. Q., Klemd, R., Yuan, Y., et al., 2017. The Assembly of Rodinia: The Correlation of Early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) High-Grade Metamorphism and Continental Arc Formation in the Southern Beishan Orogen, Southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Research*, 290: 32–48. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.12.010

附中文参考文献

- 陈永清,刘俊来,冯庆来,等,2010.东南亚中南半岛地质及花岗岩有关的矿床.北京:地质出版社,1—213.
- 李廷栋,肖庆辉,潘桂棠,等,2019.关于发展洋板块地质学的思考.地球科学,44(5):1441–1451.
- 刘本培,冯庆来,Chonglakmani, C.,等,2002.滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸.地学前缘,9(3): 161–171.
- 刘书生,杨永飞,郭林楠,等,2018a.东南亚大地构造特征与成矿作用.中国地质,45(5):863–889.
- 刘书生,聂飞,吴振波,等,2018b.老挝西北部沙耶武里地区闪长岩锆石U-Pb年代学与地球化学特征.地质与勘探,54(6):1282–1291.
- 聂飞,董国臣,莫宣学,等,2013.滇西昌宁—孟连带三叠纪花岗岩地球化学、年代学及其意义.岩石学报,28(5): 1465–1476.
- 聂飞,刘书生,杨永飞,等,2019.泰国普龙砂卡岩型铜金矿床闪长岩锆石U-Pb定年及意义.沉积与特提斯地质,39(4):71–78.
- 钱鑫,2016.老挝琅勃拉邦及黎府构造带古特提斯构造演化(博士学位论文).武汉:中国地质大学,1—143.
- 史仁灯,2005.蛇绿岩研究进展、存在问题及思考.地质论评,51(6):681–693.

- 王保弟,王立全,王冬兵,等,2018.三江昌宁—孟连带原—古特提斯构造演化.地球科学,43(8):2527—2550.
- 王立全,潘桂棠,丁俊,等,2013.青藏高原及邻区地质图及说明书(1:1 500 000).北京:地质出版社.
- 吴福元,刘传周,张亮亮,等,2014.雅鲁藏布江蛇绿岩——事实与臆想.岩石学报,30(2):293—325.
- 吴元保,郑永飞,2004.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约.科学通报,49(16):1589—1604.
- 杨文强,冯庆来,沈上越,等,2009.泰国北部难河构造带二叠纪放射虫、硅质岩和玄武岩.地球科学,34(5):743—751.
- 杨宗璘,张小哎,孙慧,等,2019.泰国—老挝黎府构造带晚泥盆世—早石炭世放射虫动物群及其地质意义.微体古生物学报,36(3):224—231.
- 钟维敷,冯庆来,Chonglakmani, C.,等,2012.老挝与云南二叠纪—三叠纪地层对比及其构造意义.地球科学,37(S2):73—80.

《地球科学》

2022 年 9 月 第 47 卷 第 9 期 要目预告

- | | | |
|---|-------|------|
| 新疆北部 VMS 矿床地质特征及成矿规律 | | 杨富全等 |
| 西天山构造演化与优势矿产成矿规律 | | 张连昌等 |
| 中亚造山带蛇绿岩研究现状与展望 | | 敖松坚等 |
| 准噶尔盆地腹部两类走滑断裂带及其构造变形样式 | | 王建伟等 |
| 盆山耦合机制驱动下的库车坳陷铀成矿作用响应 | | 吴立群等 |
| 额尔古纳地块韩家园子—富林地区中生代火成岩的成因及其对蒙古—鄂霍茨克洋演化的启示 | | 刘博等 |
| 大兴安岭南段北大山含锡石与不含锡石花岗岩特征对比 | | 丁磊磊等 |
| 东天山阿奇山—雅满苏构造带小东山火山岩的成因和意义:年代学、主微量元素及 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学约束 | | 王嘉玮等 |
| 新疆东准噶尔库拉比也铜镍矿床含矿岩体的成因及构造意义:年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素证据 | | 汤贺军等 |