

“东南亚特提斯构造岩浆演化与锡钨成矿响应”项目（91755208）

2018 年度研究进展

东南亚地处特提斯构造域最东端，经历了多期次的构造演化，矿产资源丰富，特别是锡钨成矿带是世界上最重要的锡钨矿产地。本项目主要围绕三个科学问题开展工作：（1）东南亚中生代花岗岩的时空分布、岩石成因及对特提斯构造演化的指示；（2）含矿花岗岩的成因及与锡钨成矿作用的关系；（3）东南亚锡钨矿床成矿规律与矿床成因。按照项目计划任务书，2018 年重点开展了资料数据收集和整理、野外地质考察、岩石地球化学和矿床地球化学的分析，对典型矿床开展了解剖研究。主要工作进展如下：

1. 已有资料的收集和整理

重点针对东南亚锡矿带上的花岗岩和典型矿床的已有研究资料进行了收集和整理，目前正在建立东南亚锡矿带花岗岩的成矿时代和岩石地球化学的数据库。鉴于之前发表的年龄数据主要依据 Rb-Sr 和 Ar-Ar 同位素定年方法，很多岩体需要重新用锆石定年方法进行重新厘定。从现有资料看，东区花岗岩主要形成于 280-220 Ma 间，主区花岗岩主要形成于 227-201 Ma 间。从年龄分布看，东区花岗岩的形成主要与古特提斯洋沿文冬-劳务缝合带东向俯冲有关，主区花岗岩的形成可能与新特提斯洋向滇缅泰马苏地块俯冲有关。目前还需要更多研究资料的支撑。西区花岗岩则主要形成于 149~40 Ma 间，对应于新特提斯的构造演化，但具体的时空分布规律以及形成的构造动力学机制还需要进一步研究确定。

2. 野外地质考察和样品采集

项目组成员于 2018 年 3 月对缅甸的 Hermyingyi 锡钨矿床进行了野外地质考察和样品采集工作，通过野外踏勘、井下观察、坑道编录等详细考察了各类矿体的地质特征，本次工作共采集了花岗岩和各类矿石样品共计 100 余块。目前对该矿床样品的各项分析测试结果正在陆续获得。

项目组 5 名成员于 2018 年 9 月 26 日-10 月 16 日对缅甸境内 10 个锡矿床（Hermingyi, Thitkhatoe, Thaling Taung, Calonta, Taungphila, Pagaye, Heida, Bahuapin, Kanbauk, Laytha Taung）及相关的花岗岩开展野外地质考察（图 1）。共采集花岗岩和各类矿石样品共计 250 块。原生锡矿床主要为石英-黑钨矿-锡石脉型，产于细粒花岗岩体内外带，少量云英岩型和矽卡岩型。



图 1 项目组考察缅甸锡矿床

3. 矿物原位分析方法的建立和应用

为了更好地完成项目任务，本年度也着重在我们自己的实验室建立新的矿床地球化学分析方法。目前已成熟建立的新的分析方法有：

（1）锡石原位的 U-Pb 同位素定年。由于锡石是大部分原生锡钨矿床的主要矿石矿物，锡石的形成年龄就是成矿年龄。利用激光剥蚀系统与 ICP-MS 的联机可以对直接对锡石进行原位的 U-Pb 同位素测年。测试结果显示，当锡石中 U 含量大于 10 ppm 时，可以获得较好的数据精度，单点误差小于 2.5%。当锡石中含普通铅时，可通过 Tera-Wasserburg 图解的下交点来获得 U-Pb 年龄，同时也可通过普通铅扣除获得精确地 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。目前该方法已经成熟，我们已利用该方法获得了华南许多锡矿床的精确成矿时代。该方法的建立将为精确获得东南亚锡矿带的精确成矿时代提供保障。相关研究成果在《Ore Geology Reviews》上发表 1 篇论文。

（2）硫化物原位硫同位素分析。利用我们实验室的激光剥蚀系统与多接收等离子体质谱仪联机可实现对硫化物矿物（黄铁矿、闪锌矿等）的精确原位硫同位素分析。针对具有不同成因世代的硫化物开展原位硫同位素分析，为示踪成矿过程提供指示。相关研究成果在《Journal of Geochemical Exploration》上发表 1 篇论文。

（3）电气石原位主微量元素和硼同位素分析方法。由于电气石广泛存在于锡钨矿床中，且可形成于从岩浆到热液各个阶段，因此利用电气石化学成分的变化可以很好地示踪成矿流体的演化和成矿过程。传统上主要通过电子探针来分

析电气石的主量元素含量。我们基于激光剥蚀系统与 ICP-MS 联机的方式建立了同时分析电气石主微量元素含量的方法。电气石中微量元素（特别是含矿元素，如 Sn 等）的变化可为成矿过程提供更为精细的指示。同时通过激光剥蚀系统与 MC-ICPMS 联机也可对电气石进行高精度的原位硼同位素分析。该方法将为精确示踪东南亚锡矿床的矿床成因和成矿过程提供直接的证据。相关研究成果在《Chemical Geology》上发表 1 篇论文。

4. 缅甸 Hermyingyi 锡钨矿床含矿花岗岩成因及形成的构造背景

Hermyingyi 锡钨矿床是缅甸第二大的锡钨矿床，位于缅甸东南部。矿体呈石英脉状产于花岗岩中（图 2）。含矿花岗岩主要为中细粒二长花岗岩，矿物组成包括斜长石（35%）、钾长石（30%）、石英（25%）、黑云母（5%）和白云母（5%）。副矿物包括石榴石、钛铁矿、磷灰石和褐帘石等。对花岗岩样品开展了锆石 LA-ICPMS 定年工作，获得形成年龄分别为 70.5 ± 0.8 Ma。Hermyingyi 含矿花岗岩具有高硅和弱过铝质的特点，岩石地球化学特征显示为 A 型花岗岩的特征，比如具有高的 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 比值（3.02-3.76）和高的高场强元素含量（如 Nb 含量 35-42 ppm）等。该花岗岩具有较低的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{t})$ 值（-11.3~-10.6）和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(\text{t})$ 值（-12.4~-10.0）结合区域花岗岩的形成时代和分布特点，我们建议 Hermyingyi 含矿花岗岩应形成于新特提斯洋俯冲板片的后侧导致的弧后拉张环境（图 3）。该项研究成果发表在《Lithos》上。

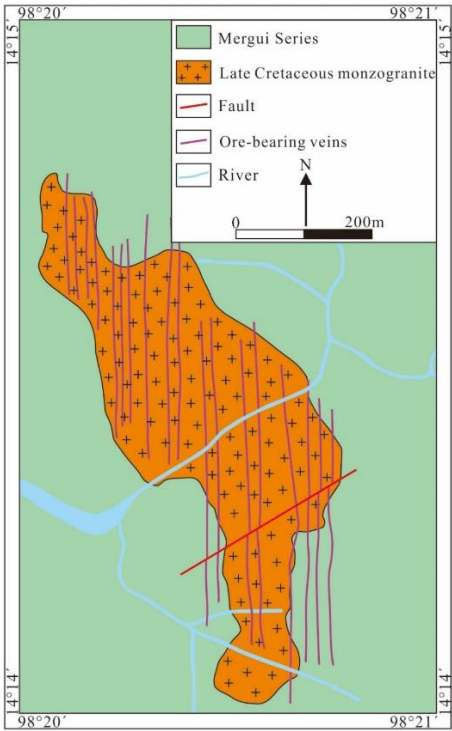


图 2 缅甸 Hermyingyi 锡钨矿床地质简图

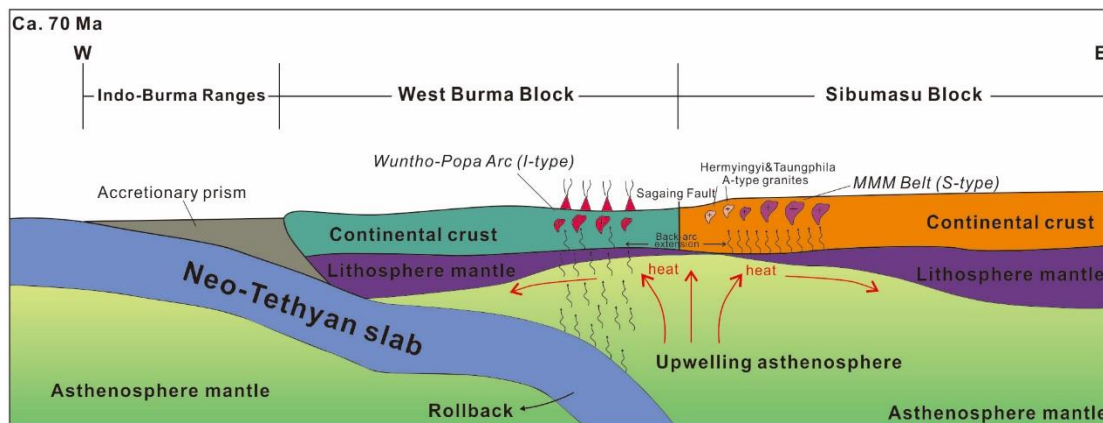


图 3 缅甸 Hermyingyi 锡钨矿床含矿花岗岩形成的构造背景

5. 缅甸 Hermyingyi 锡钨矿的成因机制

该矿床为典型的石英脉型锡-钨矿床，矿脉主要赋存在约 70Ma 形成的二长花岗岩中（图 2 和图 4）。根据矿体产状和矿石结构构造，可将该矿床划分成三个成矿期次：（1）硅酸盐-氧化物阶段；（2）石英-硫化物阶段和（3）成矿后期石英脉阶段。

对矿石中挑选出的五个辉钼矿样品进行了 Re-Os 同位素定年，获得一致的模式年龄，变化为 67.8 ± 1.6 Ma 到 69.2 ± 1.6 Ma，等时线年龄为 68.4 ± 2.5 Ma（图 5）。成矿年龄与花岗岩的锆石 U-Pb 年龄（ 70.5 ± 0.8 Ma）一致，指示锡钨矿脉的形成主要与花岗岩有关。辉钼矿具有非常低的 Re 含量（22.9~299 ppb），显示成矿物质主要为壳源。硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化在 +1.9~+5.6‰，也指示成矿物质主要来自含矿花岗岩。该项研究成果将发表在《Journal of Earth Sciences》上。

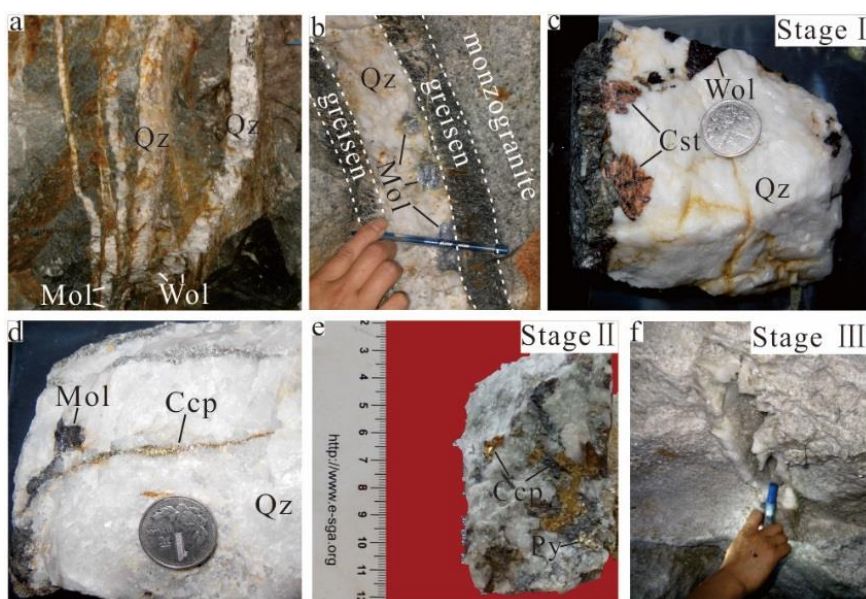


图 4 缅甸 Hermyingyi 锡钨矿床典型矿石特征

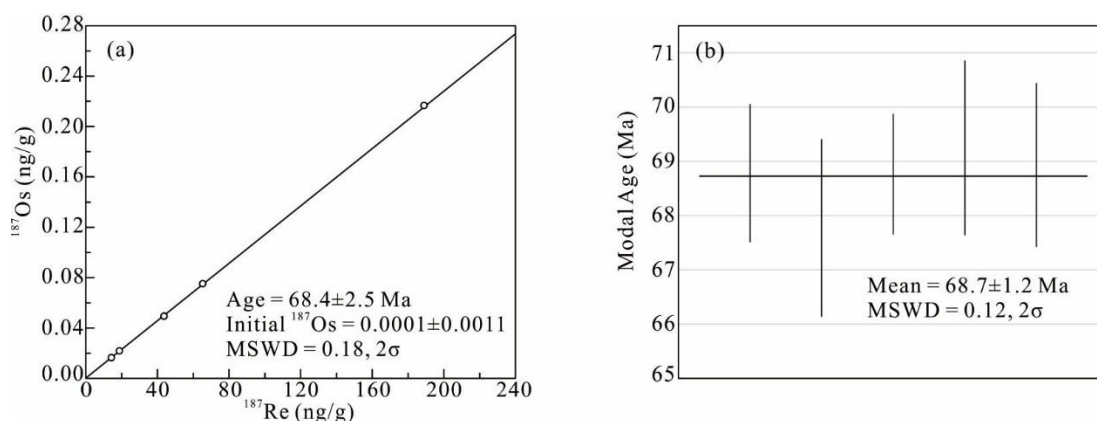


图 5 缅甸 Hermyingyi 锡钨矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年结果

6. 缅甸南部锡钨成矿时代的精确厘定

利用我们实验室建立起来的锡石原位 LA-ICPMS U-Pb 同位素定年方法，对缅甸南部典型 Sn-W 矿床的锡石开展了年代学分析测试，获得了精确的成矿时代。Pagaye 矿床中锡石的 U-Pb 年龄为 70 ± 1 Ma (图 6)。Colonta 矿床中锡石的 U-Pb 年龄为 64 ± 1 Ma。Kanbauk 矿床中锡石的 U-Pb 年龄为 62 ± 1 Ma。Heida 矿床中锡石的 U-Pb 年龄为 62 ± 1 Ma。Thaling Taung 矿床中锡石的 U-Pb 年龄为 67 ± 1 Ma。Thitkatoe 矿床中锡石的 U-Pb 年龄为 64 ± 2 Ma。从已有的年龄数据，可以看出缅甸土瓦地区的锡钨成矿作用主要发生在 60-70 Ma 间。

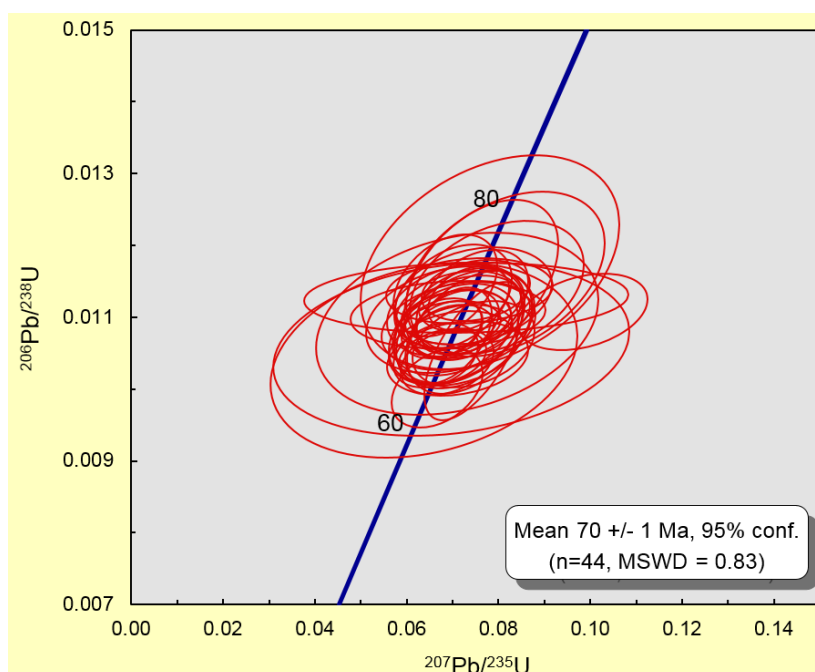


图 6 缅甸土瓦地区 Pagaye 矿床中锡石 U-Pb 同位素定年结果

本年度研究工作圆满完成了项目年度研究计划，特别是野外考察和采样工作、

室内分析方法的建立为项目后续研究打下了良好的基础。受项目资助，本年度发表和接收 SCI 论文 7 篇，参加了一次国际学术会议和三次国内学术会议。在《Journal of Earth Science》杂志组织了一期《Tectonics and Metallogeny of Southeast Asia》的专辑，目前组稿工作已经完成，将在 2019 年出版。

本年度受本项目资助共发表 7 篇 SCI 论文：

- (1) Jiang, S.Y., Jiang, H., Zhao, K.D., 2019. Mesozoic metallogeny of Southeast Asia: A preface. *Journal of Earth Science*, 30(1), 1-4.
- (2) Jiang, H., Jiang, S.Y., Li, W.Q., Zhao, K.D., 2019. Timing and source of the Hermyingyi W-Sn deposit in Southern Myanmar, SE Asia: Evidence from molybdenite Re-Os age and sulfur isotopic composition. *Journal of Earth Science*, 30(1), 70-79.
- (3) Zhao, H.D., Zhao, K.D., Palmer, M.R., Jiang, S.Y., 2019. In-situ elemental and boron isotopic variations of tourmaline from the Sanfang granite, South China: Insights into magmatic-hydrothermal evolution. *Chemical Geology*, 504, 190-204.
- (4) Li, X., Zhao, K.D., Jiang, S.Y., Palmer, M.R., 2019. In-situ U-Pb geochronology and sulphur isotopes constrain the metallogenesis of the giant Neves Corvo deposit, Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews*, 105, 223-235.
- (5) Zhao, K.D., Liu, G.Q., Jiang, S.Y., 2019. Petrogenesis and tectonic implications of the Yuhuashan A-type volcanic-intrusive complex and mafic microgranular enclaves in the Gan-Hang Volcanic Belt, Southeast China. *Journal of Geology*, 127, 37-59.
- (6) Zhang, D., Zhao, K.D., Chen, W., Jiang, S.Y., 2018. Early Jurassic mafic dykes from the Aigao uranium ore deposit in South China: Geochronology, petrogenesis and relationship with uranium mineralization. *Lithos*, 308-309, 118-133.
- (7) Liu, G.Q., Zhao, K.D., Jiang, S.Y., Chen, W., 2018. In-situ sulfur isotope and trace element analysis of pyrite from the Xiwang uranium ore deposit in South China: Implication for ore genesis. *Journal of Geochemical Exploration*, 195, 49-65.

受项目资助参加学术会议，做主题报告 2 次：

- (1) Zhao, K.D., Multi-epoch and multi-type tin metallogeny in South China. International Symposium on Ore-forming Fluids and Metallogenic Mechanisms. Nanjing, 2018.9.11-2018.9.13.
- (2) 赵葵东, 华南锡矿床的成因多样性。第一届青年矿床论坛, 贵阳, 2018.4.19-2018.4.22.