

东南亚锡矿带泰国沙蒙矿床花岗岩成因及其对锡成矿作用的指示

张博^{1, 2)}, 刘亮^{*1)}, 阳杰华¹⁾, 钟宏¹⁾, 符亚洲¹⁾, 毛伟¹⁾, 张兴春¹⁾

1) 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳, 550081;

2) 中国科学院大学, 北京, 100049

内容提要:本文围绕泰国沙蒙矿床锡成矿相关的中粗粒黑云母花岗岩及远离矿体的细粒角闪石黑云母花岗岩开展了全岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及原位 Hf 同位素研究。锆石 U-Pb 年龄显示两类花岗岩分别形成于 210.9 ± 1.1 Ma 和 206.5 ± 1.0 Ma。二者均具有富碱(全碱含量为 5.81%~8.22%)、弱过铝—强过铝(A/CNK = 1.01~1.14)、相对富集 Rb、Th、Pb 等元素、低的 TFeO/MgO(0.75~3.54)和 10000Ga/Al(2.21~2.66)比值等特征。中粗粒黑云母花岗岩具有原生白云母,高的 K_2O/Na_2O (1.56~2.50)和 Rb/Sr(2.26~2.60)比值,且其锆石具有较高的 P 含量,属于典型的 S 型花岗岩。而细粒角闪石黑云母花岗岩普遍发育角闪石,具有低的 K_2O/Na_2O (0.45~1.11)和 Rb/Sr(0.54~1.18)比值,且其锆石具有较低的 P 含量,应属于典型的 I 型花岗岩。两种花岗岩具有截然不同的 Hf 同位素组成,其中中粗粒黑云母花岗岩具有明显低的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(-20.0~-8.9),对应的二阶段模式年龄 t_{DM2} 值为 2.5~1.8 Ga(平均值为 2.0 Ga),而细粒角闪石黑云母花岗岩具有偏高的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(-4.6~5.5),二阶段模式年龄 t_{DM2} 值为 1.5~0.9 Ga(平均值为 1.1 Ga)。它们均形成于古特提斯洋闭合的碰撞后挤压向伸展转换构造背景下,具有相近的岩浆温度和中等演化程度($DI=79.6\sim 88.0$, $SiO_2=67.57\%\sim 72.97\%$ 及锆石 $Zr/Hf=29.8\sim 64.9$)。中粗粒黑云母花岗岩可能起源于古元古代的变质杂砂岩的部分熔融且具有较低的岩浆氧逸度(ΔFMQ 平均为 -4.93),而细粒角闪石黑云母花岗岩源区主要为新元古代新生地壳,并具有部分古老地壳变沉积岩源区物质的加入,具较前者相对偏高的岩浆氧逸度(ΔFMQ 平均为 -2.76)。源区性质和岩浆氧逸度条件可能是制约沙蒙矿区花岗岩锡成矿最重要的控制因素。

关键词:花岗岩成因;物理化学条件;锡成矿作用;东南亚;泰国沙蒙矿床

锡是一种稀有金属和战略性关键金属,具有质软、延展性好,熔点低,无毒和不活泼等优良化学性质,被广泛应用于现代工业、国防科技和人类生活(蒋少涌等,2020)。锡矿在全球分布极不均一,主要集中于东南亚、华南、中安第斯(玻利维亚及秘鲁南部)和英国康沃尔等地区。全球锡矿床类型丰富多样,但 95% 以上的锡矿床均直接或间接与花岗岩密切相关(袁顺达等,2020)。从与锡成矿相关的花岗岩类型来看,中安第斯、欧洲中西部和马来半岛等地

锡成矿花岗岩多为 S 型花岗岩(Romer and Kroner, 2016; Liu Liang et al., 2020; Yang Jiehua et al., 2020);我国湘南和桂东北的含锡花岗岩多为 A 型花岗岩,地幔物质参与成岩(蒋少涌等,2008;王汝成等,2017);在世界其他地区也可见锡成矿相关的 I 型花岗岩,如缅甸南部(Li Jinxiang et al., 2019);因此不同类型的花岗岩如何控制区域锡成矿作用并最终造成锡资源的不均匀分布尚有待研究。目前认为花岗岩类型、源区性质、熔融条件、岩浆分异演化

注:本文为中国科学院国际合作局国际伙伴计划项目(编号 E12K251)、贵州省高层次留学人才创新创业择优项目(编号(2020)03号)、国家自然科学基金项目(编号 42272096,42073046)、中国科学院“西部之光”人才培养计划项目、中国科学院青年创新促进会项目(编号 2020393)、贵州省科学技术基金资助项目(编号 黔科合 LH 字[2017]7055号)和贵州省教育厅青年科技人才成长项目(编号 黔教合 KY 字[2017]280)联合资助的成果。

收稿日期:2022-03-29;改回日期:2022-06-06;网络发表日期:2023-01-10;责任编委:张招崇;责任编辑:蔡志慧。

作者简介:张博,男,1997年生。硕士研究生,资源与环境专业。E-mail: zhangbo@mail.gyig.ac.cn。

* 通讯作者:刘亮,男,1985年生。副研究员,主要从事花岗岩与钨锡成矿作用研究。E-mail: liuliang@vip.gyig.ac.cn。

引用本文:张博,刘亮,阳杰华,钟宏,符亚洲,毛伟,张兴春. 2023. 东南亚锡矿带泰国沙蒙矿床花岗岩成因及其对锡成矿作用的指示. 地质学报, 97(4): 1228~1244, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023108.
Zhang Bo, Liu Liang, Yang Jiehua, Zhong Hong, Fu Yazhou, Mao Wei, Zhang Xingchun. 2023. Petrogenesis of granites from the Samoeng deposit in Thailand within the Southeast Asian tin belt, and their implications for tin mineralization. Acta Geologica Sinica, 97(4): 1228~1244.

程度及物理化学条件等均是花岗岩制约锡成矿的主要控制因素(Yuan Shunda et al. , 2019; Lehmann, 2020; Zhao Panlao et al. , 2022a),但是具体什么因素起决定性作用却存在争议。

东南亚巨型锡矿带是世界上锡资源最为丰富的锡成矿带,北起我国滇西,经缅甸、泰国、马来西亚,南抵印度尼西亚,全长 2800 km,宽 400 km,锡产量曾占全球的一半以上(Schwartz et al. , 1995)。泰国地处东南亚锡矿带的枢纽位置,区内锡矿床与花岗岩侵入体有密切的空间关系(Ridd et al. , 2011),已有研究显示它们多与特提斯演化密切相关(朱日祥等,2021)。但围绕泰国境内锡矿及相关花岗岩的研究相对偏少(Jiang Hai et al. , 2021),缺乏对这类花岗岩成因和构造背景的整体限定,进而制约对花岗岩与锡成矿关系及其与特提斯岩演化的联系的理解。沙蒙锡矿是泰国北部大型的原生锡钨矿床,前人针对该矿床的研究主要为基础地质和流体包裹体岩相等研究(Khositanont, 1991),缺乏系统的岩石学及地球化学的研究工作。本文针对沙蒙锡矿床中的典型花岗岩开展了系统的锆石原位 U-Pb 年代学和 Hf 同位素及全岩地球化学研究,旨在更好地约束矿区花岗岩的时代、成因及其所处构造背景,并进一步揭示有利于锡成矿作用的可能控制因素。

1 岩体地质和岩相学特征

沙蒙矿床位于东南亚锡矿带中带(主花岗岩省)的泰国北部地区,距清迈市西南约 70 km 处(图 1a)。矿区发育三种主要的锡成矿类型,包括锡石-石英脉型,伟晶岩型和细晶岩型(Khositanont, 1991)。沙蒙矿区围岩主要有寒武纪和石炭纪岩石,寒武系主要为石英云母片岩、钙硅酸盐岩和大理石,石炭系主要为长石质砂岩、粉砂岩和页岩,并可见奥陶系灰岩、大理岩和志留系—泥盆系片状砂岩、粉砂岩、页岩,局部变质为石英岩、片岩。

沙蒙矿区花岗岩可分为 G-1 单元(中粗粒黑云母花岗岩)、LG(细粒花岗岩)、PG(伟晶岩)和 G-2 单元(细粒角闪石黑云母花岗岩)(图 1b)。沙蒙锡石-石英脉型 Sn-W 矿体主要位于中粗粒黑云母花岗岩石内或/和大理岩接触带附近,而细粒角闪石黑云母花岗岩远离矿体 200 m 以上。本次选取 G-1 单元(中粗粒黑云母花岗岩)和 G-2 单元(细粒角闪石黑云母花岗岩)开展对比研究,两种花岗岩具有明显不同的岩相学特征(图 2),中粗粒黑云母花岗岩主要矿物为钾长石(30%~35%)、斜长石(30%~35%)、石英(25%~35%)、黑云母(5%~15%)和白云母(2%~3%),呈浅灰色,细粒、自形—他形粒状

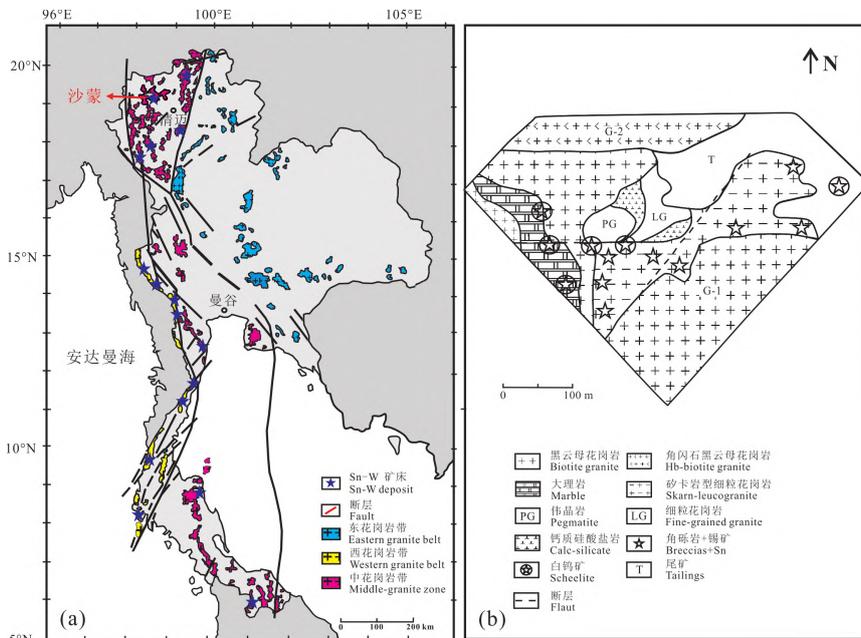


图 1 泰国典型锡矿床及花岗岩分布简图 (a)(据泰国矿产资源局, 泰国 1 : 100 万地质图修改)和泰国沙蒙锡矿床地质简图(b) (据 Khositanont, 1991 修改)

Fig 1 Schematic maps of typical tin deposits and granite distribution in Thailand (a) (modified after the Geological map of Thailand at the scale of 1 : 1000000 from Department of Mineral Resources, Thailand) and Samoeng Sn deposit in Thailand (b) (modified after Khositanont, 1991)

结构,副矿物主要有锆石、磷灰石、电气石和独居石等。其中黑云母穿插于白云母,指示白云母先于黑云母形成(图 2a、b);细粒角闪石黑云母花岗岩主要矿物为斜长石(30%~40%)、石英(25%~35%)、钾长石(15%~25%)、黑云母(5%~10%)和角闪石(5%~7%),细粒、自形—他形粒状结构,副矿物主要有锆石、榍石、磷灰石、电气石和磁铁矿等。其中角闪石和黑云母被石英包裹,指示黑云母和角闪石在早期形成(图 2c、d)。

2 测试方法

本次研究的花岗岩样品均较为新鲜,涉及的实验均在中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室完成。在严格避免污染的条件下,对拟测定的全岩样品进行破碎、淘洗和磁选以及重液分离,分离出锆石精样,然后在双目镜下观察所分离锆石的特

征(如颜色、透明度、晶型等),在此基础上,挑选出表面平整光洁,具不同长宽比例、不同柱锥面特征和颜色的锆石颗粒。将挑选的锆石颗粒用环氧树脂胶结,待固结后细磨至锆石颗粒核部出露,抛光成样品靶以待测试。测定前先拍摄透反射照片,并采用装有阴极荧光探头的扫描电镜对抛光后的锆石样品进行阴极发光(CL)照相,以了解被测锆石的内部结构,并作为选取分析点位的依据。CL 图像拍摄仪器为 JSM-7800F 型热场发射扫描电子显微镜加载 MonoCL4 型阴极发光谱仪采集,电压 10 kV,电流 10 nA。

选取内部结构完整和环带清晰的颗粒进行锆石原位 U-Pb 定年和 Hf 同位素测试。锆石 U-Pb 定年所用仪器为 Agilent 7900 ICP-MS 及与之配套的 GeoasPro 193nm 激光剥蚀系统。所选测试点大小 32 μm ,频率 5 Hz,能量 5 J/cm^2 ,以 He 为载气,进入

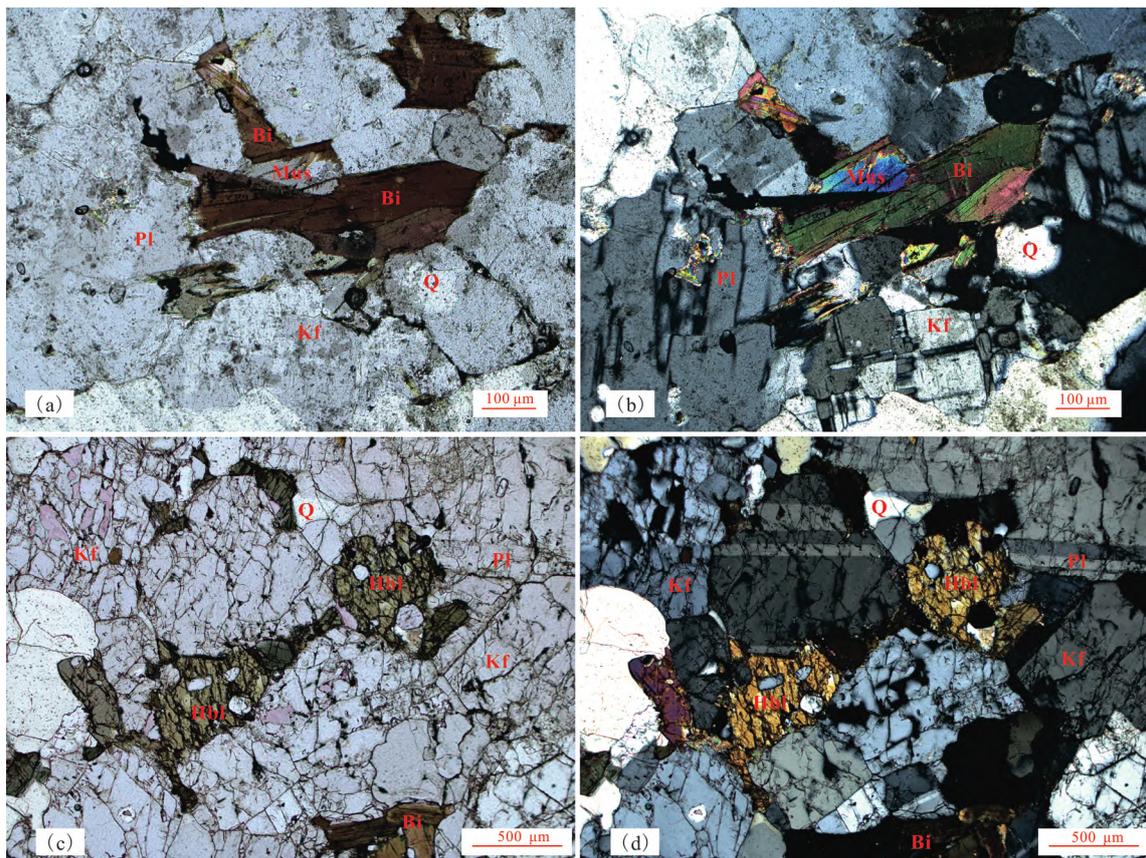


图 2 泰国沙蒙锡矿床中粗粒黑云母花岗岩显微照片(a和b)和细粒角闪石黑云母花岗岩显微照片(c和d)
(照片 a 和 c 在单偏光下拍摄, b 和 d 在正交偏光下拍摄)

Fig. 2 Micrographs of medium-coarse-grained biotite granite (a and b) and fine-grained hornblende biotite granite (c and d) from the Samoeng Sn deposit in Thailand (photos a and c are taken in plane-polarized light, b and d are taken under crossed-nicols)

Q—石英; Bi—黑云母; Hbl—角闪石; Mus—白云母; Pl—斜长石; Kf—钾长石

Q—quartz; Bi—biotite; Hbl—hornblende; Mus—muscovite; Pl—plagioclase; Kf—K-feldspar

ICP-MS 进行分析。数据处理采用 ICPMSDataCal 11.0 程序,绝大多数点未进行普通铅校正,锆石年龄谐和图通过 Isoplot 4.0 软件绘制获得,锆石微量中粗粒黑云母花岗岩用²⁹Si 进行校正,细粒角闪石黑云母花岗岩用⁹¹Zr 进行校正。锆石 Hf 同位素分析所用仪器型号为 Nu Plasma III MC-ICP-MS 与 RESOLUTION S-155 激光系统连用,束斑大小为 60 μm,频率为 6 Hz,能量密度为 6 J/cm²,用锆石 Penglai 和 91500 作外标,本次测试期间对应标样的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值分别为 0.282703 ± 0.000018 ($n=9, 2\sigma$)、0.282903 ± 0.000011 ($n=8, 2\sigma$)。

全岩地球化学分析先经岩相学观察与鉴定,以选出新鲜均匀具代表性的样品,然后对样品进行破碎、研磨至 200 目以上。主量元素分析的样品处理采用熔片法,熔片稀释比是 1:20(0.4 g 样品+8 g 助熔剂),助熔剂使用硼酸锂和偏硼酸锂混合熔剂(66:34),熔样机为澳大利亚 XRFuse 6 型电加热自动熔样炉,主量元素分析使用型号为 ARL PerformX 4200 的 X 射线荧光光谱仪(XRF)。测试条件为:以电压 40 kV,电流 60 mA,分析精度优于 5%。

微量元素(包括稀土元素)使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行分析,型号为 PlasmaQuant MS Elite 型等离子体质谱仪测定,首先准确称取 50 mg 样品于聚四氟乙烯坩埚中,加入 1 mL HF 和 1 mL HNO₃,其次将坩埚放入钢套中密封,置于烘箱于 185℃ 加热 32 h,消解样品,然后冷却后取出坩埚,置于低温电热板上蒸干,加入 1 mL 的 HNO₃ 继续蒸干完全,最后于坩埚中准确加入 200 mg 的 Rh(铑)内标溶液(配好的内标溶液 1 mL)、2 mL 的 HNO₃、3 mL 去离子水。重新置于钢套中,于 140℃ 加热 5 h。冷却后取出坩埚,摇匀。取 0.4 mL 溶液至 15 mL 离心管中,定容至 10 mL,进行 ICP-MS 测定,样品测定值和推荐值的相对误差小于 10%,详细的分析方法见 Qi Liang et al. (2000)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年及微量元素组成

本次研究选取中粗粒黑云母花岗岩(19SAM-17)和细粒角闪石黑云母花岗岩(19SAM-7)两件样品进行锆石 U-Pb 定年及微量元素分析,相关分析结果见表 1 和附表 1。统计结果表明,对年龄较小(<1.0 Ga)的锆石使用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄更加准确,对年龄较大的锆石则一般采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄

(Griffin et al., 2004)。因此,本文对较年轻的锆石采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,对于较老的锆石采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄。所测锆石颗粒多为无色透明,自形,长度为 50~150 μm,CL 图像显示大多数锆石颗粒有明显的振荡环带(图 3),锆石稀土元素配分曲线一致显示重稀土元素富集及明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常,均表明其为岩浆结晶锆石。两件样品本次皆获得 29 个有效测试点数据。在²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 谐和图中,样品点均落在谐和线上或靠近谐和线(图 4)。中粗粒黑云母花岗岩的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 210.9 ± 1.1 Ma (MSWD=0.1, 2σ)(图 4a),可见一颗继承锆石(²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为 2373 Ma);细粒角闪石黑云母花岗岩²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 206.5 ± 1.0 Ma (MSWD=0.1, 2σ),存在²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 677 Ma 和 506 Ma 的两颗继承锆石。中粗粒黑云母花岗岩锆石的 Th/U 比值平均值为 0.4, P 的含量为 371 × 10⁻⁶ ~ 2130 × 10⁻⁶, REE+Y 的含量为 1562 × 10⁻⁶ ~ 9510 × 10⁻⁶。细粒角闪石黑云母花岗岩 Th/U 比值平均值为 0.5, P 的含量为 261 × 10⁻⁶ ~ 934 × 10⁻⁶, REE+Y 的含量为 1069 × 10⁻⁶ ~ 9523 × 10⁻⁶(附表 1)。

3.2 全岩主量、微量和稀土元素特征

沙蒙地区 G-1 单元和 G-2 单元全岩的主量元素、微量和稀土元素分析结果分别见表 2、表 3。中粗粒黑云母花岗岩和细粒角闪石黑云母花岗岩 SiO₂ 含量为 67.57% ~ 72.97%, 全碱含量为 5.81% ~ 8.22%, 表现出高硅、富碱特征,并具有相似的 TFeO/MgO 比值(0.75 ~ 3.54)和 Al₂O₃ + TFeO + MgO + TiO₂ 含量(16.72% ~ 20.54%)。但中粗粒黑云母花岗岩具有较高的 K₂O/Na₂O 比值(1.56 ~ 2.50), 较低的 Al₂O₃/(MgO + TFeO + TiO₂) 比值(2.82 ~ 4.46)和 CaO/(MgO + TFeO) 比值(0.47 ~ 0.51)。细粒角闪石黑云母花岗岩具有较低的 K₂O/Na₂O 比值(0.45 ~ 1.11), 较高的 Al₂O₃/(MgO + TFeO + TiO₂) 比值(3.73 ~ 6.15)和 CaO/(MgO + TFeO) 比值(0.72 ~ 1.08)(表 2)。在 TAS 图中,两类花岗岩样品基本位于亚碱性花岗岩区域,极少量样品位于花岗闪长岩(19SAM-4L)和正长岩(19SAM-17)区域内(图 5a)。全岩铝饱和度指数 A/CNK 在 1.01 ~ 1.14 范围内,在 A/CNK-A/NK 图解中(图 5b),样品落入弱过铝质和强过铝质花岗岩区域中。中粗粒黑云母花岗岩和细粒角闪石黑云母花岗岩具有相似较低的 Zr+Nb+Ce+Y 含量(119 × 10⁻⁶ ~ 395 × 10⁻⁶)及 10000Ga/Al(2.21 ~

表 1 沙蒙花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of the Samoeng granite

点号	Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)			
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
19SAM-17, 岩性: 中粗粒黑云母花岗岩; 样品点经纬度: N18°43'55.70", E98°45'47.56"											
19SAM-17-01	0.52	0.0508	0.0021	0.2325	0.0101	0.0335	0.0006	232	96	213	4
19SAM-17-02	0.38	0.0521	0.0030	0.2310	0.0127	0.0331	0.0008	287	130	210	5
19SAM-17-03	0.41	0.0503	0.0032	0.2298	0.0122	0.0333	0.0006	209	150	211	4
19SAM-17-04	0.47	0.0468	0.0042	0.2268	0.0184	0.0336	0.0007	39	200	213	4
19SAM-17-05	0.58	0.0522	0.0024	0.2340	0.0110	0.0334	0.0006	295	104	212	4
19SAM-17-07	0.20	0.0513	0.0025	0.2291	0.0101	0.0330	0.0006	257	113	209	3
19SAM-17-08	0.30	0.0502	0.0024	0.2279	0.0104	0.0335	0.0006	211	118	212	4
19SAM-17-09	0.47	0.0515	0.0021	0.2307	0.0092	0.0334	0.0005	261	91	212	3
19SAM-17-10	0.47	0.0506	0.0034	0.2303	0.0160	0.0334	0.0006	233	156	212	4
19SAM-17-11	0.56	0.0514	0.0022	0.2294	0.0102	0.0331	0.0005	261	100	210	3
19SAM-17-12	0.70	0.0472	0.0021	0.2159	0.0087	0.0332	0.0005	58	109	211	3
19SAM-17-13	0.13	0.0505	0.0020	0.2284	0.0096	0.0333	0.0004	220	93	211	3
19SAM-17-14	1.04	0.0490	0.0017	0.2222	0.0081	0.0334	0.0004	150	81	212	3
19SAM-17-15	0.34	0.0518	0.0022	0.2330	0.0107	0.0330	0.0005	276	96	209	3
19SAM-17-16	0.13	0.0517	0.0020	0.2367	0.0094	0.0334	0.0004	333	82	212	3
19SAM-17-17	0.10	0.0490	0.0014	0.2235	0.0070	0.0332	0.0004	150	67	211	3
19SAM-17-18	0.14	0.0492	0.0013	0.2243	0.0067	0.0332	0.0004	167	63	210	3
19SAM-17-19	0.06	0.0498	0.0018	0.2269	0.0091	0.0331	0.0006	183	83	210	4
19SAM-17-20	0.51	0.0496	0.0022	0.2254	0.0100	0.0332	0.0005	176	99	211	3
19SAM-17-21	0.45	0.0488	0.0014	0.2226	0.0069	0.0331	0.0004	139	64	210	2
19SAM-17-22	0.54	0.0482	0.0018	0.2188	0.0084	0.0330	0.0004	106	85	209	2
19SAM-17-23	0.10	0.0498	0.0015	0.2301	0.0073	0.0335	0.0003	187	68	212	2
19SAM-17-24	0.11	0.0499	0.0014	0.2297	0.0069	0.0333	0.0004	191	67	211	2
19SAM-17-25	0.20	0.0504	0.0017	0.2321	0.0077	0.0334	0.0004	213	44	212	2
19SAM-17-26	0.68	0.1524	0.0038	0.0792	0.2439	0.4307	0.0054	2373	43	2309	24
19SAM-17-27	0.47	0.0505	0.0021	0.2322	0.0095	0.0333	0.0004	217	94	211	2
19SAM-17-28	0.61	0.0495	0.0023	0.2267	0.0106	0.0331	0.0004	172	109	210	3
19SAM-17-29	0.68	0.0514	0.0029	0.2348	0.0124	0.0333	0.0005	257	130	211	3
19SAM-17-30	0.20	0.0506	0.0029	0.2316	0.0131	0.0331	0.0004	233	133	210	3
19SAM-7, 岩性: 细粒角闪黑云母花岗岩; 样品点经纬度: N18°48'46.28", E98°33'33.89"											
19SAM-7-02	0.36	0.0506	0.0017	0.2285	0.0080	0.0326	0.0005	220	78	207	3
19SAM-7-03	0.31	0.0513	0.0014	0.2305	0.0067	0.0325	0.0004	254	63	206	2
19SAM-7-04	0.43	0.0519	0.0011	0.2346	0.0057	0.0326	0.0005	280	48	207	3
19SAM-7-05	0.47	0.0516	0.0016	0.2316	0.0071	0.0325	0.0004	333	72	206	2
19SAM-7-06	0.70	0.0526	0.0015	0.2372	0.0069	0.0326	0.0004	322	60	207	3
19SAM-7-07	0.55	0.0482	0.0019	0.2174	0.0075	0.0327	0.0003	109	91	207	2
19SAM-7-08	0.35	0.0505	0.0019	0.2280	0.0093	0.0324	0.0006	217	85	206	4
19SAM-7-09	0.45	0.0548	0.0014	0.2474	0.0075	0.0325	0.0005	406	57	206	3
19SAM-7-10	0.24	0.0480	0.0015	0.2168	0.0071	0.0327	0.0005	98	68	207	3
19SAM-7-11	1.34	0.0502	0.0013	0.2254	0.0058	0.0325	0.0003	206	57	206	2
19SAM-7-12	0.25	0.0668	0.0024	1.0208	0.0594	0.1108	0.0045	831	68	677	26
19SAM-7-13	0.55	0.0507	0.0034	0.2212	0.0098	0.0327	0.0008	228	149	208	5
19SAM-7-14	0.49	0.0490	0.0018	0.2242	0.0073	0.0326	0.0004	150	87	207	2
19SAM-7-15	0.31	0.0510	0.0015	0.2290	0.0069	0.0326	0.0004	239	70	207	3
19SAM-7-16	0.47	0.0506	0.0015	0.2256	0.0073	0.0323	0.0006	233	73	205	4
19SAM-7-17	0.69	0.0503	0.0016	0.2275	0.0074	0.0323	0.0004	209	76	205	3
19SAM-7-18	0.65	0.0519	0.0017	0.2336	0.0078	0.0326	0.0004	283	74	207	3
19SAM-7-19	0.49	0.0531	0.0014	0.2441	0.0100	0.0328	0.0007	345	59	208	4
19SAM-7-20	0.40	0.0497	0.0017	0.2259	0.0068	0.0325	0.0004	189	78	206	3
19SAM-7-21	0.21	0.0517	0.0011	0.2333	0.0057	0.0327	0.0005	333	48	207	3
19SAM-7-22	0.26	0.0501	0.0016	0.2247	0.0075	0.0326	0.0005	211	74	207	3
19SAM-7-23	0.30	0.0518	0.0022	0.2355	0.0124	0.0327	0.0005	276	96	208	3
19SAM-7-24	0.39	0.0529	0.0013	0.2398	0.0065	0.0327	0.0004	324	28	208	3
19SAM-7-25	0.69	0.0668	0.0030	0.7563	0.0409	0.0816	0.0015	831	90	506	9
19SAM-7-26	0.41	0.0516	0.0015	0.2312	0.0066	0.0325	0.0004	265	60	206	3
19SAM-7-27	0.24	0.0522	0.0016	0.2351	0.0081	0.0325	0.0005	300	64	206	3
19SAM-7-28	0.35	0.0499	0.0013	0.2248	0.0067	0.0326	0.0005	191	63	207	3
19SAM-7-29	0.72	0.0502	0.0021	0.2257	0.0085	0.0323	0.0004	211	96	205	2
19SAM-7-30	0.67	0.0503	0.0028	0.2240	0.0106	0.0327	0.0005	209	128	207	3

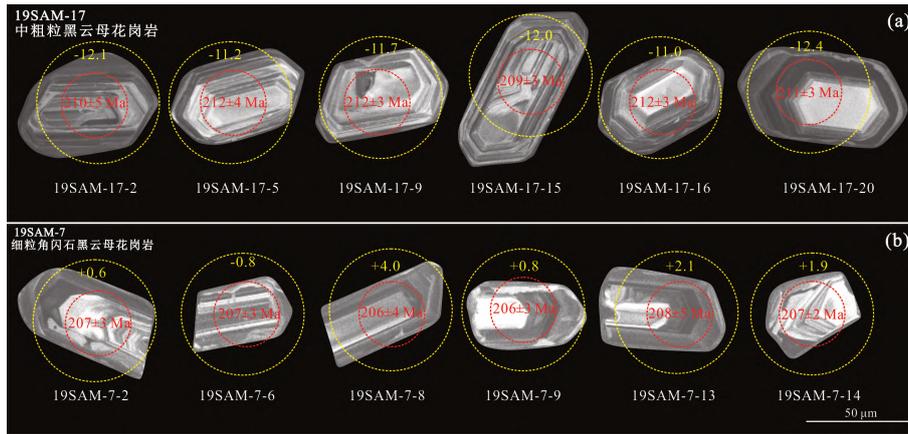


图 3 沙蒙花岗岩代表性锆石的阴极发光图像及分析点位

Fig 3 Cathodoluminescence (CL) images and analysis plots of representative zircons in the Samoeng granite 红圈为 U-Pb 年龄分析点, 数据为 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄, 黄圈为 Hf 同位素分析点, 数据为 ε_{Hf}(t) 值; 圆圈直径代表分析测试直径

The morphology of zircon grains, their ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages, and ε_{Hf}(t) values are shown. Red circles indicate the U-Pb dating locations, and yellow circles indicate the positions for Hf isotope analysis, with their diameters approximating the spot sizes

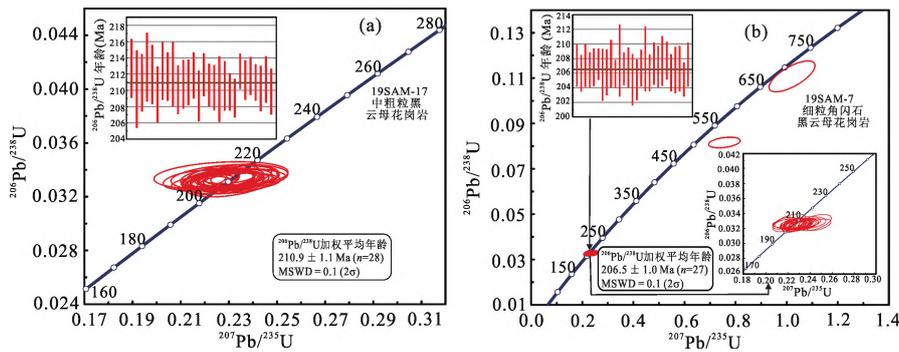


图 4 沙蒙矿床中粗粒黑云母花岗岩(a)和细粒角闪黑云母花岗岩(b)锆石 U-Pb 谐和图

Fig 4 U-Pb concordia diagrams of zircons for the medium-coarse-grained biotite granite (a) and fine-grained hornblende biotite granite (b) from the Samoeng deposit

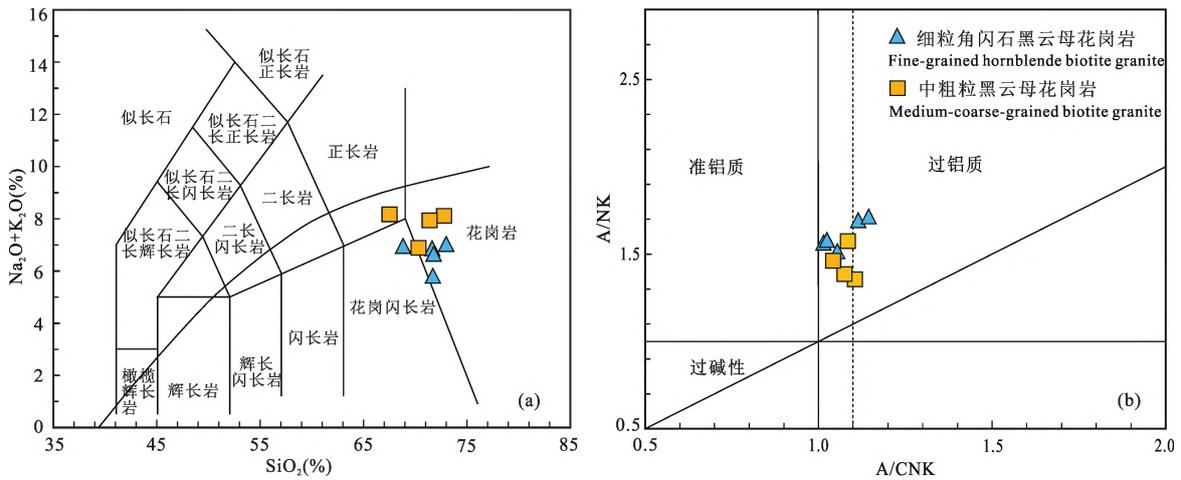


图 5 泰国沙蒙花岗岩主量关系图

Fig 5 Major element variation diagrams for the Samoeng granite in Thailand

(a)底图据 Middlemost (1994), 其中碱性与亚碱性系列分界线据 Irvine and Baragar (1971); (b)底图据 Maniar and Piccoli (1989)

(a) is after Middlemost (1994), and the boundary between the alkaline and subalkaline series is after Irvine and Baragar (1971); (b) is after Maniar and Piccoli (1989)

2.66)、Zr/Hf(30.5~39.8)和 Rb/Ba 比值(0.24~0.56),但前者具有较高的 Rb/Sr 比值(2.26~2.60),后者具有较低的 Rb/Sr 比值(0.54~1.18)(表3)。两种花岗岩一致表现为右倾型的配分形式(图6a),轻稀土元素相对富集[LREE/HREE = 9.78~23.3, (La/Yb)_N = 17.5~41.0],稀土元素总量变化范围较大(ΣREE = 114 × 10⁻⁶ ~ 295 × 10⁻⁶)。中粗粒黑云母花岗岩出现中等 Eu 负异常(δ_{Eu} = 0.34~0.51),而细粒

角闪石花岗岩中大部分样品 Eu 负异常不明显,只有 19SAM-4L 出现中等 Eu 负异常。微量元素原始地幔标准化蛛网图显示(图6b),中粗粒黑云母花岗岩和细粒角闪石黑云母花岗岩均相对富集 Rb、Th、Pb,相对亏损 Ba、Sr、Ti。值得注意的是,中粗粒黑云母花岗岩微量元素蛛网图配分形式接近于中地壳,而细粒角闪石黑云母花岗岩更接近于下地壳,暗示两者可能来源于不同的源区(图6b)。

表 2 泰国沙蒙花岗岩样品主量元素含量(%)

Table 2 Major element contents (%) of the Samoeng granite samples in Thailand

岩性 样品	中粗粒黑云母花岗岩				细粒角闪石黑云母花岗岩					
	19SAM-8	19SAM-9	19SAM-10	19SAM-17	19SAM-4L	19SAM-6(1)L	19SAM-6(2)L	19SAM-7	19SAM-16	
SiO ₂	70.29	72.76	71.35	67.57	68.80	72.97	71.62	71.72	71.68	
TiO ₂	0.64	0.39	0.48	0.65	0.46	0.23	0.31	0.28	0.37	
Al ₂ O ₃	14.04	13.66	14.04	15.38	15.86	14.48	14.67	14.93	14.57	
TFe ₂ O ₃	3.23	2.04	2.51	3.31	1.89	1.67	2.36	1.96	1.56	
MnO	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	
MgO	1.43	0.84	1.14	1.60	1.12	0.62	0.89	0.82	1.86	
CaO	2.23	1.27	1.63	2.28	2.72	2.30	2.78	2.76	2.35	
Na ₂ O	2.69	2.32	2.85	3.11	3.30	3.47	3.56	4.01	4.00	
K ₂ O	4.20	5.79	5.09	5.11	3.65	3.56	3.30	2.72	1.81	
P ₂ O ₅	0.23	0.11	0.14	0.25	0.14	0.09	0.11	0.10	0.14	
LOI	0.70	0.65	0.46	0.61	1.25	0.35	0.50	0.61	1.19	
Total	99.71	99.84	99.72	99.91	99.23	99.76	100.13	99.93	99.54	
TFeO	2.91	1.84	2.26	2.98	1.70	1.50	2.12	1.76	1.40	
K ₂ O/Na ₂ O	1.56	2.50	1.79	1.64	1.11	1.03	0.93	0.68	0.45	
Na ₂ O+K ₂ O	6.89	8.11	7.94	8.22	6.95	7.03	6.86	6.73	5.81	
TFeO/MgO	2.03	2.19	1.98	1.82	1.52	2.42	2.39	3.54	0.75	
A/CNK	1.08	1.10	1.07	1.04	1.11	1.05	1.01	1.03	1.14	
CaO摩尔数/(MgO摩尔数+TFeO摩尔数)	0.51	0.47	0.48	0.51	0.96	1.08	0.92	0.74	0.72	
K ₂ O摩尔数/Na ₂ O摩尔数	1.03	1.65	1.18	1.08	0.73	0.68	0.61	0.45	0.30	
Al ₂ O ₃ /(MgO+TFeO+TiO ₂)	2.82	4.46	3.62	2.98	4.84	6.15	4.42	3.73	4.02	
Al ₂ O ₃ +TFeO+MgO+TiO ₂	19.02	16.72	17.92	20.54	19.14	16.83	17.99	18.93	18.20	
DI	80.7	88.0	85.3	80.4	79.6	84.5	81.2	81.7	79.9	
T _{Zr} (°C)	761	754	759	747	818	715	717	695	729	

注: TFe₂O₃ 为全铁, A/CNK = Al₂O₃/(Na₂O+K₂O+CaO); DI 为分异指数; T_{Zr}(°C) 为锆石饱和温度。

表 3 泰国沙蒙花岗岩样品微量和稀土元素含量(×10⁻⁶)

Table 3 The trace element contents (×10⁻⁶) of the Samoeng granite in Thailand

岩性 样品	中粗粒黑云母花岗岩				细粒角闪石黑云母花岗岩					
	19SAM-8	19SAM-9	19SAM-10	19SAM-17	19SAM-4L	19SAM-6(1)L	19SAM-6(2)L	19SAM-7	19SAM-16	
Li	32.5	20.0	24.6	35.0	76.2	104	105	162	30.8	
Be	2.30	1.49	1.85	2.38	10.0	5.20	4.12	5.97	20.4	
Sc	10.0	7.30	7.72	10.6	7.39	4.27	6.13	5.57	6.84	
V	48.4	28.9	35.6	51.6	29.2	22.0	31.2	26.8	33.0	
Cr	53.2	33.9	40.5	39.6	27.7	22.4	24.9	15.2	27.3	
Co	161	157	124	8.58	130	158	167	4.08	159	
Ni	30.7	25.6	23.5	16.8	20.4	19.8	22.0	5.64	22.7	
Cu	9.94	15.6	16.9	11.5	9.09	3.96	5.09	4.39	3.76	
Zn	51.7	30.8	38.5	52.5	79.2	67.5	91.4	64.6	75.0	
Ga	19.8	16.0	17.8	20.5	20.0	17.7	18.4	18.2	17.1	
Ge	1.19	1.10	1.15	1.24	0.90	1.14	0.90	1.12	1.11	
As	3.35	5.86	6.62	3.45	2.09	2.07	2.90	1.53	2.43	
Rb	256	259	265	276	255	246	224	180	206	

续表 3

岩性 样品	中粗粒黑云母花岗岩				细粒角闪石黑云母花岗岩				
	19SAM-8	19SAM-9	19SAM-10	19SAM-17	19SAM-4L	19SAM-6(1)L	19SAM-6(2)L	19SAM-7	19SAM-16
Sr	106	100	104	122	217	274	346	333	289
Y	40.4	18.2	23.4	35.0	23.9	6.19	6.94	6.66	9.80
Zr	117	102	115	110	223	65.3	72.3	53.2	73.4
Nb	16.5	9.85	12.5	16.4	9.90	5.45	5.79	6.06	7.22
Mo	1.55	1.30	0.89	1.24	0.32	0.32	0.42	0.17	0.33
Ag	0.49	0.36	0.44	0.64	0.44	0.33	0.38	0.39	0.43
Cd	0.31	0.17	0.21	0.30	0.80	1.06	1.26	0.85	2.30
In	0.08	0.05	0.06	0.07	0.10	0.11	0.15	0.09	0.24
Sn	8.19	4.14	4.94	6.64	24.8	31.4	39.4	26.0	67.2
Sb	0.14	0.34	0.36	0.14	0.13	0.18	0.22	0.17	0.11
Cs	6.27	5.27	6.61	6.36	21.7	54.6	28.2	26.3	37.4
Ba	702	769	718	970	1065	740	730	672	371
La	59.6	43.3	49.0	62.2	73.7	29.1	34.0	28.8	32.1
Ce	126	89.6	105	122	138	54.2	62.0	52.6	59.8
Pr	14.5	10.5	12.0	15.1	13.5	5.68	6.63	5.61	6.22
Nd	54.8	38.6	44.8	55.9	44.1	19.2	22.5	18.8	21.9
Sm	11.3	7.67	9.07	11.3	6.76	2.95	3.34	2.84	3.42
Eu	1.16	1.13	1.18	1.40	0.87	0.74	0.87	0.81	0.90
Gd	9.46	5.93	7.13	9.33	4.81	1.97	2.25	1.96	2.52
Tb	1.45	0.83	1.00	1.34	0.73	0.27	0.30	0.25	0.36
Dy	8.01	3.97	4.99	7.08	4.06	1.22	1.36	1.20	1.83
Ho	1.49	0.66	0.86	1.26	0.80	0.22	0.24	0.22	0.32
Er	3.88	1.64	2.10	3.25	2.30	0.59	0.67	0.64	0.89
Tm	0.46	0.20	0.26	0.40	0.34	0.08	0.09	0.09	0.12
Yb	2.30	1.25	1.65	2.27	2.14	0.50	0.56	0.59	0.77
Lu	0.30	0.18	0.24	0.32	0.29	0.07	0.08	0.09	0.11
Hf	3.37	3.07	3.50	3.12	5.60	2.14	2.08	1.63	2.06
Ta	1.89	1.34	1.33	1.13	1.56	1.26	1.08	1.00	1.34
W	476	484	351	1.18	374	397	456	0.67	468
Tl	1.10	1.10	1.13	1.23	1.16	1.35	1.23	1.04	1.08
Pb	34.4	46.8	42.2	40.1	33.0	27.5	23.8	23.9	13.8
Bi	0.49	0.19	0.14	0.23	0.56	0.38	0.75	0.14	0.47
Th	43.3	31.3	36.9	38.6	35.2	8.25	8.35	9.21	10.3
U	4.29	2.42	2.94	2.88	5.21	1.13	1.26	2.00	2.38
Zr/Hf	34.7	33.2	32.9	35.3	39.8	30.5	34.8	32.6	35.6
Al	74319	72308	74319	81412	83953	76648	77654	79030	77125
10000 Ga/Al	2.66	2.21	2.40	2.52	2.38	2.31	2.37	2.30	2.22
Rb/Ba	0.36	0.34	0.37	0.28	0.24	0.33	0.31	0.27	0.56
Rb/Sr	2.42	2.60	2.55	2.26	1.18	0.90	0.65	0.54	0.71
REE	295	205	239	293	292	117	135	115	131
LREE/HREE	9.78	13.0	12.1	10.6	17.9	22.8	23.3	21.7	18.0
Zr+Nb+Ce+Y	300	220	256	283	395	131	147	119	150
(La/Yb) _N	17.5	23.4	20.0	18.5	23.2	39.4	41.0	32.7	28.3
δEu	0.34	0.51	0.45	0.42	0.47	0.94	0.97	1.05	0.94

3.3 锆石 Hf 同位素组成

沙蒙矿区花岗岩的锆石 Hf 同位素数据见表 4。由图 7a、b 可以看出,两种花岗岩具有截然不同的 Hf 同位素特征,且变化范围均较大,显示出多峰的特征。其中中粗粒黑云母花岗岩具有富集的 Hf 同位素组

成, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的范围为 $-20.0 \sim -8.9$, 二阶段模式年龄 t_{DM2} 值在 2.5~1.8 Ga 之间,平均值为 2.0 Ga; 而细粒角闪石黑云母花岗岩 Hf 同位素组成相对亏损, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的范围为 $-4.6 \sim 5.5$, 并主要集中在 0.5~4, 二阶段模式年龄 t_{DM2} 值在 1.5~0.9 Ga, 平均值为 1.1 Ga。

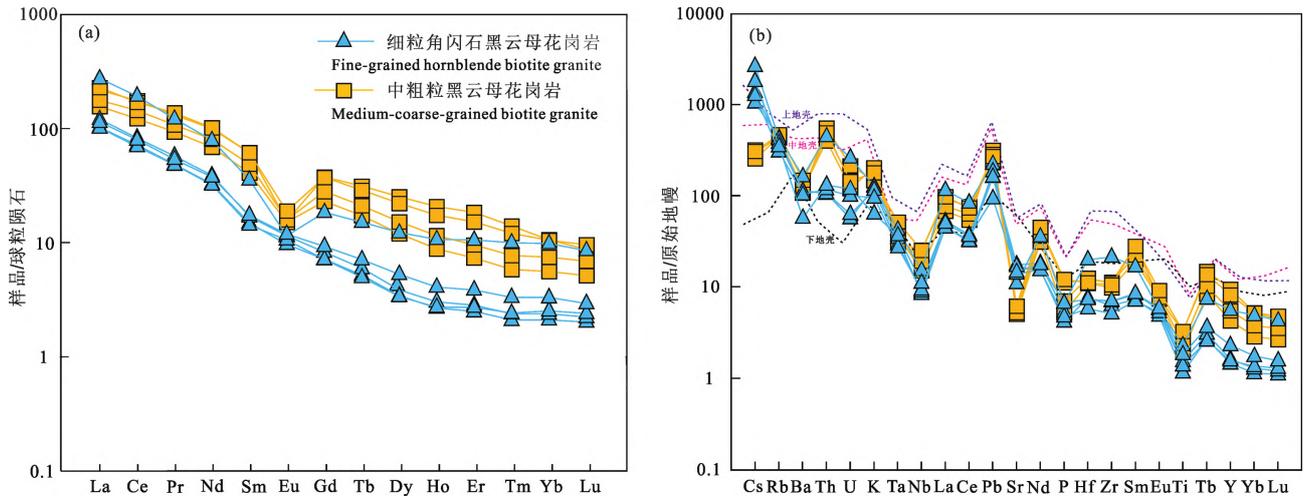


图 6 沙蒙花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线 (a, 标准化值据 Boynton, 1984) 及微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b, 标准化值据 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 6 Chondrited-normalized REE distribution patterns (a, the normalized values after Boynton, 1984) and primitive mantle normalized trace elements spidergrams (b, the normalized values after McDonough and Sun, 1995) of the Samoeng granite

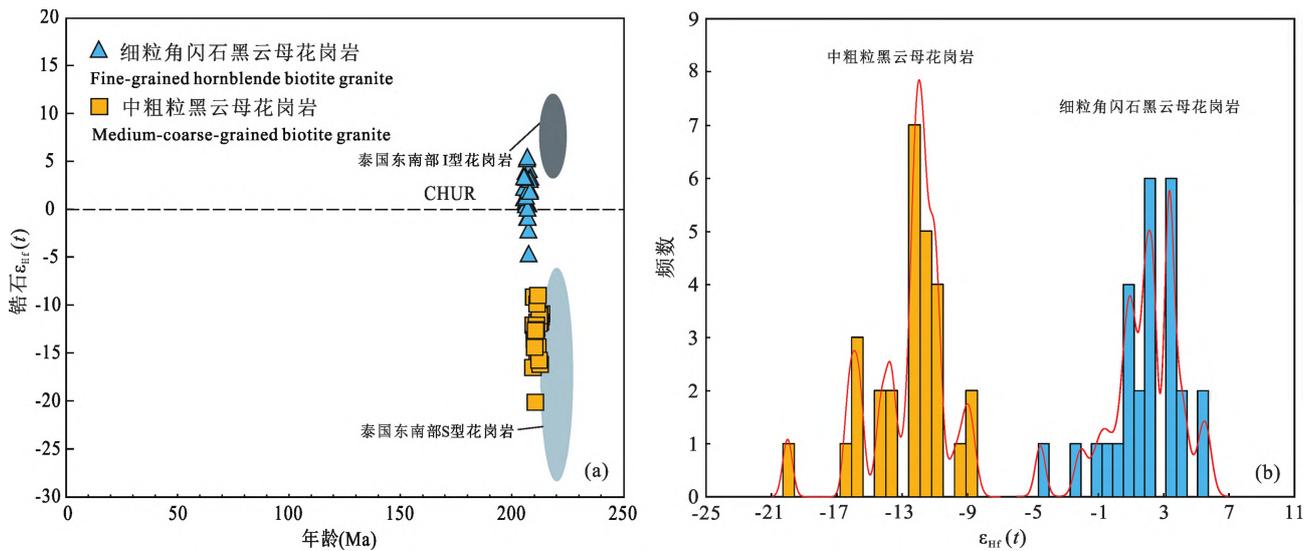


图 7 泰国沙蒙花岗岩锆石 $\epsilon_{Hf}(t)-t$ 关系图(a)和沙蒙花岗岩锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 频率分布直方图(b)

Fig. 7 Zircon $\epsilon_{Hf}(t)-t$ diagram (a) and zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ frequency distribution diagram (b) of the Samoeng granite in Thailand 泰国东南部典型 I 型和 S 型花岗岩数据引自 Qian et al. (2017)

Data for the representative I- and S-type granites in SE Thailand are from Qian et al. (2017)

4 讨论

4.1 岩浆的物理化学条件

4.1.1 氧逸度

本文利用 Smythe and Brenan (2016) 的锆石氧逸度估计估算岩浆氧逸度。其中温度由锆石 Ti 温度计获得, Ce^{3+}/Ce^{4+} 比值采用晶格应变模型计算 (Ballard et al., 2002), 由于岩石中可见新鲜云母和角闪石, 岩浆水含量采用弧岩浆的平均值 (4%;

Plank et al., 2013)。为了排除锆石中矿物包裹体的影响, 我们将锆石微量元素异常的数据进行了剔除, 其中 $Ca > 200 \times 10^{-6}$, $La > 0.3 \times 10^{-6}$ 和 $Ti > 20 \times 10^{-6}$ 数据可能暗示存在磷灰石和榍石矿物包裹体的干扰 (Zhu Jingjing et al., 2018)。计算结果表明, 中粗粒黑云母花岗岩氧逸度 ΔFMQ 范围为 $-7.43 \sim -3.17$ (平均值为 -4.93), 细粒角闪石黑云母氧逸度 ΔFMQ 范围为 $-4.14 \sim -2.00$ (平均值为 -2.76), 中粗粒黑云母花岗岩岩浆总体上较细粒

表 4 泰国沙蒙花岗岩锆石 Hf 同位素组成
Table 4 Zircon Hf isotopic composition of the Samoeng granite in Thailand

样号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$
样号: 19SAM-17; 岩性: 中粗粒黑云母花岗岩								
19SAM-17-1	213	0.282344	0.000008	0.001638	0.054474	-11.1	0.3	1.9
19SAM-17-2	210	0.282316	0.000009	0.001345	0.044126	-12.1	0.3	2.0
19SAM-17-3	211	0.282329	0.000008	0.001526	0.051529	-11.7	0.3	2.0
19SAM-17-4	213	0.282351	0.000008	0.001062	0.036043	-10.8	0.3	1.9
19SAM-17-5	212	0.282339	0.000008	0.001179	0.039861	-11.2	0.3	1.9
19SAM-17-7	209	0.282404	0.000011	0.001351	0.044754	-9.0	0.4	1.8
19SAM-17-8	212	0.282331	0.000009	0.002151	0.067401	-11.6	0.3	2.0
19SAM-17-9	212	0.282325	0.000008	0.001082	0.034631	-11.7	0.3	2.0
19SAM-17-10	212	0.282349	0.000010	0.001245	0.041788	-10.9	0.3	1.9
19SAM-17-11	210	0.282312	0.000007	0.001259	0.041783	-12.2	0.3	2.0
19SAM-17-12	211	0.282312	0.000010	0.001662	0.054007	-12.3	0.4	2.0
19SAM-17-13	211	0.282220	0.000010	0.002522	0.083096	-15.7	0.4	2.2
19SAM-17-14	212	0.282325	0.000011	0.001486	0.048919	-11.8	0.4	2.0
19SAM-17-15	209	0.282321	0.000008	0.001385	0.047049	-12.0	0.3	2.0
19SAM-17-16	212	0.282347	0.000008	0.001487	0.048601	-11.0	0.3	1.9
19SAM-17-17	211	0.282321	0.000009	0.001649	0.053210	-12.0	0.3	2.0
19SAM-17-18	210	0.282274	0.000007	0.002372	0.078760	-13.7	0.3	2.0
19SAM-17-19	210	0.282093	0.000008	0.001560	0.051219	-20.0	0.3	2.5
19SAM-17-20	211	0.282308	0.000010	0.001607	0.049673	-12.4	0.4	2.0
19SAM-17-21	210	0.282282	0.000009	0.002168	0.070251	-13.4	0.3	2.1
19SAM-17-22	209	0.282199	0.000008	0.002054	0.066982	-16.4	0.3	2.2
19SAM-17-23	212	0.282202	0.000007	0.001093	0.033715	-16.1	0.3	2.2
19SAM-17-24	211	0.282262	0.000009	0.002945	0.088926	-14.2	0.3	2.1
19SAM-17-25	212	0.282220	0.000008	0.002485	0.080662	-15.6	0.3	2.2
19SAM-17-26	2373	0.281353	0.000010	0.000865	0.030993	1.8	0.4	2.8
19SAM-17-27	211	0.282381	0.000012	0.001148	0.039179	-9.8	0.4	1.8
19SAM-17-28	210	0.282304	0.000010	0.001185	0.039284	-12.5	0.4	2.0
19SAM-17-29	211	0.282407	0.000011	0.001179	0.039498	-8.9	0.4	1.8
19SAM-17-30	210	0.282257	0.000010	0.001845	0.060920	-14.3	0.4	2.1
样号: 19SAM-7; 岩性: 细粒角闪石黑云母花岗岩								
19SAM-7-2	207	0.282676	0.000010	0.000826	0.025182	0.6	0.4	1.2
19SAM-7-3	206	0.282688	0.000009	0.001113	0.035093	1.0	0.3	1.2
19SAM-7-4	207	0.282601	0.000010	0.001595	0.049782	-2.1	0.4	1.3
19SAM-7-5	206	0.282640	0.000016	0.001835	0.058481	-0.8	0.6	1.3
19SAM-7-6	207	0.282641	0.000016	0.001926	0.057119	-0.8	0.6	1.3
19SAM-7-7	207	0.282754	0.000007	0.000822	0.025793	3.4	0.3	1.0
19SAM-7-8	206	0.282772	0.000010	0.000895	0.026078	4.0	0.4	1.0
19SAM-7-9	206	0.282683	0.000010	0.001165	0.034584	0.8	0.4	1.2
19SAM-7-10	207	0.282779	0.000011	0.001468	0.047961	4.2	0.4	0.9
19SAM-7-11	206	0.282680	0.000016	0.002321	0.072564	0.5	0.6	1.2
19SAM-7-12	677	0.282379	0.000009	0.001002	0.032487	0.3	0.3	1.6
19SAM-7-13	208	0.282718	0.000010	0.000962	0.030523	2.1	0.4	1.1
19SAM-7-14	207	0.282713	0.000010	0.000852	0.026549	1.9	0.4	1.1
19SAM-7-15	207	0.282723	0.000011	0.001257	0.040300	2.2	0.4	1.1
19SAM-7-16	205	0.282726	0.000006	0.000816	0.024682	2.4	0.2	1.1
19SAM-7-17	205	0.282699	0.000013	0.001724	0.051802	1.3	0.5	1.1
19SAM-7-18	207	0.282665	0.000026	0.001395	0.039858	0.2	0.9	1.2
19SAM-7-19	208	0.282755	0.000009	0.001134	0.037341	3.4	0.3	1.0
19SAM-7-20	206	0.282701	0.000012	0.001243	0.038624	1.4	0.4	1.1
19SAM-7-21	207	0.282749	0.000008	0.000623	0.018399	3.3	0.3	1.0
19SAM-7-22	207	0.282718	0.000010	0.001077	0.037108	2.1	0.3	1.1
19SAM-7-23	208	0.282748	0.000007	0.000908	0.026525	3.2	0.2	1.0
19SAM-7-24	208	0.282713	0.000008	0.001123	0.034627	1.9	0.3	1.1
19SAM-7-25	506	0.282599	0.000009	0.001038	0.034353	4.3	0.3	1.2
19SAM-7-26	206	0.282756	0.000008	0.001197	0.041977	3.4	0.3	1.0
19SAM-7-27	206	0.282811	0.000013	0.001333	0.046555	5.3	0.5	0.9
19SAM-7-28	207	0.282816	0.000010	0.001141	0.036851	5.5	0.4	0.9
19SAM-7-29	205	0.282760	0.000018	0.001725	0.052787	3.4	0.6	1.0
19SAM-7-30	207	0.282528	0.000009	0.000698	0.019976	-4.6	0.3	1.5

角闪石黑云母花岗岩具有更为还原的氧逸度条件(图 8a)。

4.1.2 温度

目前常用的地质温度计有全岩 Zr 饱和温度计(Watson and Harrison, 1983)和锆石 Ti 温度计(Ferry and Watson, 2007)。全岩 Zr 饱和温度计代表着岩浆初始就位时其最低温度估算值,低于岩浆在源区的形成温度(Miller et al., 2003)。运用该方法获得中粗粒黑云母花岗岩温度为 747~761℃(平均温度为 755℃),细粒角闪石黑云母花岗岩温度为 695~818℃(平均温度为 735℃)。锆石 Ti 温度计可能反映锆石在结晶分异过程中温度的持续变化(Coogan and Hinton, 2006),假定 TiO_2 和 SiO_2 的活性分别为 0.7 和 1.0,计算获得中粗粒黑云母花岗岩温度为 689~847℃,细粒角闪石花岗岩温度为 666~767℃(图 8b,附表 1),尽管该方法计算的温度变化范围较大,记录着岩浆不同阶段锆石的结晶温度,但总体上中粗粒黑云母花岗岩的岩浆温度具有更高的峰值及最大值。上述两种计算方法综合表明中粗粒黑云母花岗岩具有较细粒角闪石黑云母花岗岩略微偏高的岩浆初始温度。

4.2 花岗岩成因

4.2.1 花岗岩成因类型归属

根据花岗岩物质来源可将花岗岩类分为 I 型和

S 型(White and Chappell, 1977),而在非造山环境伸展背景下具碱性、无水特征的花岗岩被定义为 A 型(Loiselle, 1979)。本文中粗粒黑云母花岗岩和细粒角闪石黑云母花岗岩总体具有偏低的 $Zr+Nb+Ce+Y$ 含量($119 \times 10^{-6} \sim 395 \times 10^{-6}$)、 $10000Ga/Al(2.21 \sim 2.66)$ 和 $TFeO/MgO$ 比值($0.75 \sim 3.54$),且均明显低于 A 型花岗岩的平均值(Whalen et al., 1987)。在 $(Na_2O+K_2O)-10000Ga/Al$ 图解中(图 9a),两种花岗岩代表性样品均位于 I 型和 S 型花岗岩范围。从矿物组合特征来看(图 2),原生白云母和角闪石分别被认为是 S 型和 I 型花岗岩的特征矿物(Chappell and White, 1974)。中粗粒黑云母花岗岩存在新鲜原生白云母(图 2a),并未发现角闪石;而细粒角闪石黑云母花岗岩中普遍发育新鲜角闪石,未见原生白云母(图 2b)。

两种花岗岩均具有偏高的 A/CNK 值(图 5b),属于弱过铝质—强过铝质花岗岩,但中粗粒黑云母花岗岩均有明显偏高的 $K_2O/Na_2O(1.56 \sim 2.50)$,显示 S 型花岗岩的特征(Zhao Zifu et al., 2015),而细粒角闪石花岗岩均有明显偏低的 $K_2O/Na_2O(0.45 \sim 1.11)$,显示 I 型花岗岩特征。在 Na_2O-K_2O 分类判别图解中(图 9b),中粗粒黑云母花岗岩样品均投影于典型 S 型花岗岩范围,而细粒角闪石

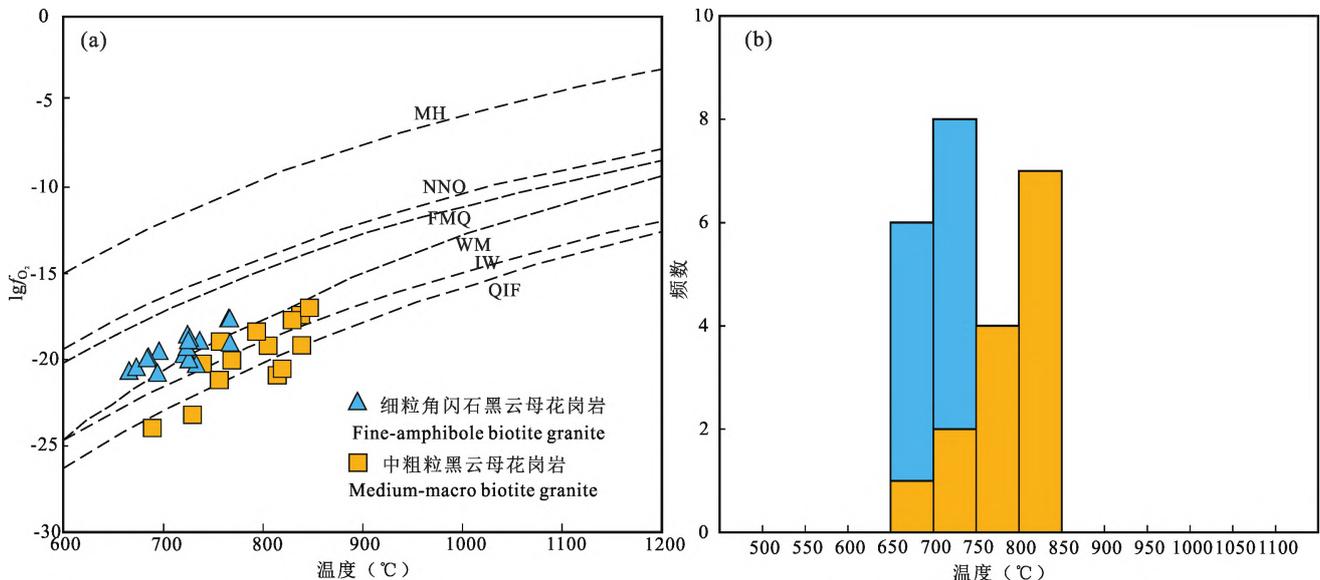


图 8 泰国沙蒙花岗岩温度与氧逸度关系图(a)和温度频数分布直方图(b)

Fig. 8 The relationship between temperature and oxygen fugacity (a) and the histogram of temperature frequency distribution (b) of the Samoeng granite in Thailand

氧缓冲剂: MH—磁铁矿-赤铁矿; NNO—镍-氧化镍; FMQ—铁橄榄石-磁铁矿-石英; WM—方铁矿-磁铁矿; IW—铁-方铁矿; QIF—石英-铁-铁橄榄石

Oxygen buffers: MH—magnetite hematite; NNO—nickel nickel oxide; FMQ—fayalite magnetite quartz; WM—wüstite magnetite; IW—iron wüstite; QIF—quartz iron fayalite

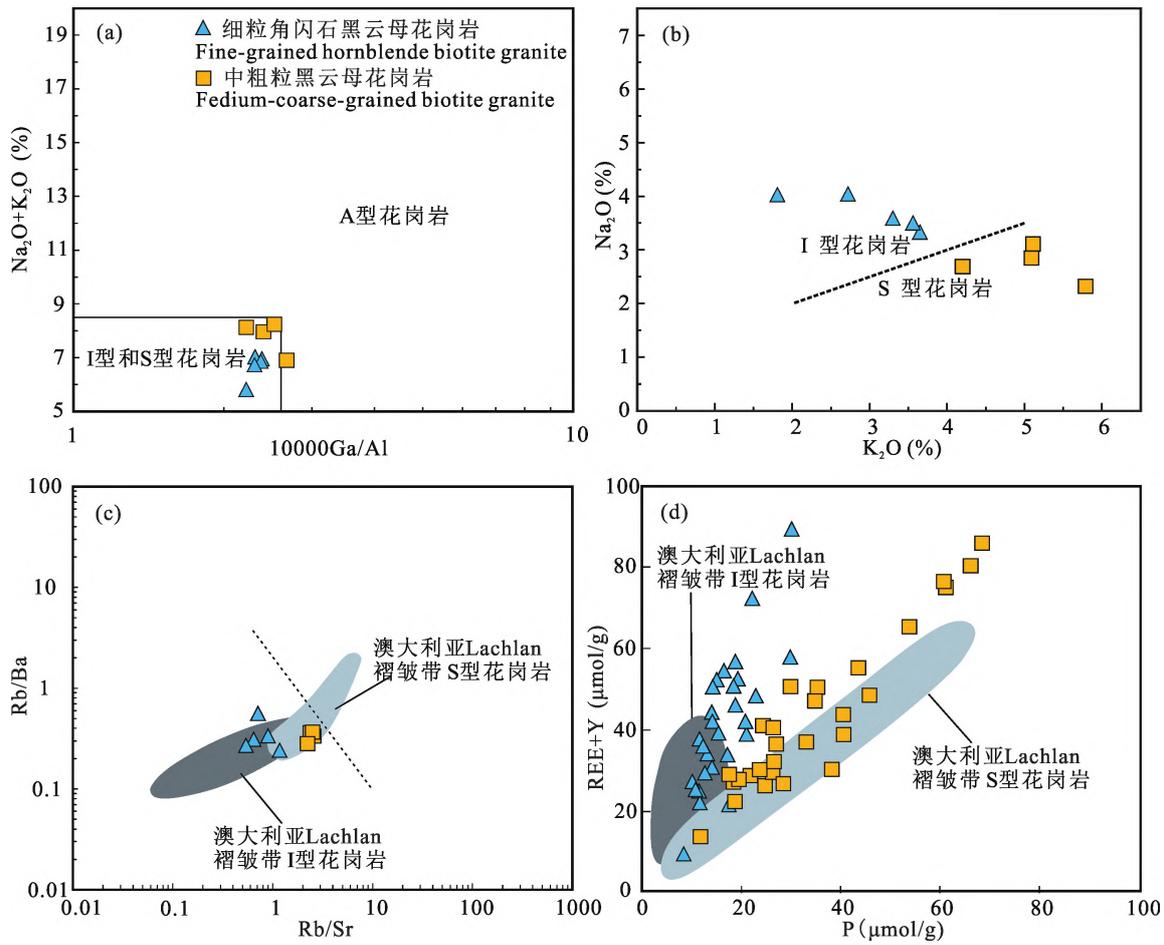


图 9 泰国沙蒙花岗岩 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-10000\text{Ga}/\text{Al}$ 关系图(a)(底图据 Whalen, 1987)、 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解(b)(底图据 Chappell and White, 2001)、 $\text{Rb}/\text{Ba}-\text{Rb}/\text{Sr}$ 图(c)(底图据 Sylvester, 1998)及 $(\text{REE}+\text{Y})-\text{P}$ 图(d)(底图据 Burnham and Berry, 2017)

Fig. 9 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ versus $10000\text{Ga}/\text{Al}$ diagram (a) (after Whalen, 1987), Na_2O versus K_2O diagram (b) (after Chappell and White, 2001), Rb/Ba versus Rb/Sr diagram (c) (after Sylvester, 1998) and $(\text{REE}+\text{Y})$ versus P diagram (d) (after Burnham and Berry, 2017) of the Samoeng granite in Thailand

黑云母花岗岩均落入到了 I 型花岗岩范围之中。在 $\text{Rb}/\text{Ba}-\text{Rb}/\text{Sr}$ 判别图上(图 9c), 中粗粒黑云母花岗岩和细粒角闪石黑云母花岗岩分别与澳大利亚 Lachlan 褶皱带典型 S 型和 I 型相对应(Wang Tingyi et al., 2019)。此外, Burnham and Berry (2017)利用锆石 $(\text{REE}+\text{Y})-\text{P}$ 图解(图 9d)将澳大利亚 Lachlan 褶皱带典型 I 型和 S 型花岗岩进行划分, 本文中粗粒黑云母花岗岩与澳大利亚 S 型花岗岩变化趋势相似, 细粒角闪石黑云母花岗岩与澳大利亚 I 型花岗岩变化趋势相似。综上所述, 可以确定判断沙蒙矿区中粗粒黑云母花岗岩属于 S 型花岗岩, 细粒角闪石黑云母为 I 型花岗岩。

4.2.2 花岗岩源区判别

锆石 Hf 同位素数据显示, 中粗粒黑云母花岗岩锆石具有相对富集的 Hf 同位素组成, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的范

围在 $-20.0 \sim -8.9$ 之间; 细粒角闪石黑云母花岗岩具有相对亏损的锆石同位素组成, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的范围为 $-4.6 \sim 5.5$ 。总体上两类花岗岩的锆石 Hf 同位素变化范围均较大, 显示多峰的特征(图 7b), 暗示两类花岗岩可能均具有多种来源的岩浆源区(Veeravinantanakul et al., 2021)。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图中(图 7a), 中粗粒黑云母花岗岩与泰国东南部典型 S 型花岗岩具有相似的 Hf 同位素组成, 对应的二阶段 Hf 模式年龄($t_{\text{DM}2}$)约为 $2.6 \sim 1.2$ Ga, 该岩性中见约 2.4 Ga 的继承锆石, 而泰国东南部 S 型花岗岩($t_{\text{DM}2} = 2.6 \sim 1.5$ Ga)被认为是古元古代地壳物质重熔的产物(Qian Xin et al., 2017), 因此中粗粒黑云母花岗岩可能主要为古元古代的地壳物质部分熔融形成。而细粒角闪石黑云母花岗岩样品接近球粒陨石演化线, 介于泰国东南部典型 I 型花岗岩和 S

型花岗岩之间,对应的 t_{DM2} 为 1.5~0.9 Ga,并可见 0.7~0.5 Ga 的继承锆石。已有研究显示泰国东南部 I 型花岗岩 ($t_{DM2}=0.7\sim 0.4$ Ga) 主要形成于新生玄武质地壳物质的部分熔融,并有部分变沉积岩物质参与成岩(Qian Xin et al., 2017)。因此,细粒角闪石黑云母花岗岩可能是新生地壳和古老地壳两种不同源区部分熔融后的岩浆混合产物。

在 $Al_2O_3/(MgO+TFeO+TiO_2)-(Al_2O_3+TFeO+MgO+TiO_2)$ 图解中(图 10a),两种花岗岩代表性样品均落入杂砂岩质熔体和角闪岩质熔体重叠区域,也显示出其源岩的多源性。在 $K_2O_{\text{摩尔数}}/Na_2O_{\text{摩尔数}}-CaO_{\text{摩尔数}}/(MgO_{\text{摩尔数}}+TFeO_{\text{摩尔数}})$ 图解中(图 10b),中粗粒黑云母花岗岩源区主体位于变质杂砂岩区域,细粒角闪石黑云母花岗岩源区位于变质安山岩范围,这表明前者源区以变质杂砂岩为主,而后者源区以变火成岩为主。结合两种花岗岩的成因类型归属,可以限定沙蒙矿区中粗粒黑云母花岗岩源区主要为古元古代的变质杂砂岩,而细粒角闪石黑云母花岗岩岩浆主要起源于新元古代新生地壳,并具有古老地壳变沉积岩源区物质的加入。变沉积源岩均加入两类花岗岩的成岩过程,由此导致它们都具有弱过铝—强过铝质特征,而参与的比例不同则是控制两类不同类型花岗岩形成的可能原因。

4.3 成岩成矿时代及构造背景

沙蒙矿区中粗粒黑云母花岗岩和细粒角闪石黑云母花岗岩形成年龄分别为 210.9 ± 1.1 Ma 和

206.5 ± 1.0 Ma,与泰国 Sukhothai 褶皱带花岗岩锆石 U-Pb 年龄 $237.1\pm 2.6\sim 201.7\pm 0.6$ Ma 相近。根据中粗粒黑云母花岗岩中锡石-石英脉获得的锡石原位 U-Pb 定年数据约为 214 Ma(未刊数据)。从区域构造演化来看,一般认为古特提斯洋在早二叠世向印支地块发生俯冲(Metcalf, 2000),并在 230 Ma 左右闭合(王东升等,2011; Liu Junlai et al., 2012; Tang Yuan et al., 2013; Gardiner et al., 2016),泰国 Sukhothai 褶皱带 Doi Ngom 锆石 U-Pb 年龄显示古特提斯洋在泰国地区的闭合时间约为 237 Ma,随后 Sibumasu 地块与印支地块发生碰撞,分别在约 237~230 Ma 和 230~200 Ma 发生同碰撞和碰撞后造山事件。泰国 Sukhothai 褶皱带南部 Trok Nong 角闪石二长花岗岩(锆石 U-Pb 年龄 202 Ma)被认为形成于后碰撞的构造环境中(Veeravinantanakul et al., 2021)。新近锆石微量元素对构造判别的研究显示,与伸展有关的岩浆中形成的锆石 $Th/U>1.0$,而挤压环境形成的岩浆中锆石 $Th/U<1.0$ (Kirkland et al., 2015)。两种花岗岩锆石 Th/U 比值范围平均值约为 0.4~0.5,但同时可见部分锆石大于 1.0(附表 1),综合上述资料,初步判断沙蒙地区中粗粒黑云母花岗岩和细粒角闪石黑云母花岗岩可能形成于古特提斯洋闭合的碰撞后造山挤压向伸展转换的构造背景。

4.4 对锡成矿作用的指示

锡成矿富集受到花岗岩的岩浆结晶分异(Lehmann et al., 1990, 2020)、源区(Romer and

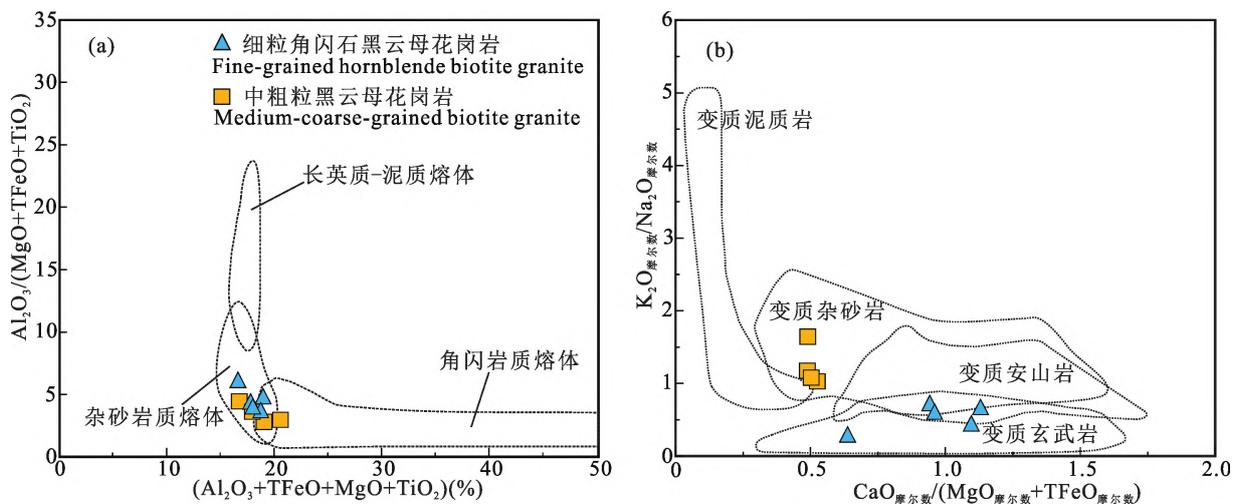


图 10 泰国沙蒙花岗岩 $Al_2O_3/(MgO+TFeO+TiO_2)-(Al_2O_3+TFeO+MgO+TiO_2)$ 图解(a)(底图据 Patiño Douce, 1999) 和 $K_2O_{\text{摩尔数}}/Na_2O_{\text{摩尔数}}-CaO_{\text{摩尔数}}/(MgO_{\text{摩尔数}}+TFeO_{\text{摩尔数}})$ 图解(b)(底图据 Altherr and Siebel, 2002)

Fig. 10 Diagrams of $Al_2O_3/(MgO+TFeO+TiO_2)$ versus $(Al_2O_3+TFeO+MgO+TiO_2)$ (a) (after Patiño Douce, 1999) and molar K_2O/Na_2O versus molar $CaO/(MgO+TFeO)$ (b) (after Altherr and Siebel, 2002) of the Samoeng granite in Thailand

Kroner, 2016)、温度和氧逸度等多种因素影响(毛景文等, 2018; Zhao Panlao et al., 2022a, 2022b)。本文研究显示, 沙蒙矿床中粗粒黑云母花岗岩和细粒角闪石黑云母花岗岩均属于中等演化程度的花岗岩($DI=79.6\sim 88.0$; $Zr/Hf=29.8\sim 64.9$; $SiO_2=67.57\%\sim 72.97\%$), 暗示岩浆演化程度不是该矿区花岗岩控制锡成矿的决定性因素, 而最近 Zhao Panlao et al. (2022c) 研究也显示岩浆分异程度并不是制约岩浆锡成矿潜力的关键因素, 但两种花岗岩具有明显不同的成因类型归属及源区, 其中中粗粒黑云母花岗岩属 S 型花岗岩, 主体来源于古元古代的变质杂砂岩源区, 细粒角闪石黑云母花岗岩成岩尽管有部分古老地壳的变沉积岩物质加入, 但主体仍为新生地壳。两类不同的岩浆源区可能控制了不同类型花岗岩的锡成矿潜力的差异。此外, 锡成矿并与岩浆氧逸度密切相关, 相对还原的岩浆条件更有利于锡成矿也逐渐成为共识(Sato et al., 2010), 如果岩浆体系为还原环境, Sn 主要以 Sn^{2+} 形式存在, 离子半径较大, 不易进入早期结晶铁镁矿物中, 导致在结晶分异晚期岩浆和流体中富集(Ishihara, 1977; Linnen et al., 1996)。中粗粒黑云母花岗岩岩浆明显具有相对还原的岩浆氧逸度条件(ΔFMQ 平均为 -3.92 , 代表性样品基本位于缓冲剂 WM 之下(图 10a), 而细粒角闪石黑云母花岗岩的岩浆氧逸度条件相对偏高(ΔFMQ 平均值约为 -2.56), 绝大部分样品位于缓冲剂 WM 之上, 表现出明显的差异性。实际上, 源区以变质杂砂岩或者变泥质岩为主时, 往往更有利于形成还原性岩浆(Mlynarczyk and Williams-Jones, 2005)。此外, 中粗粒黑云母花岗岩相对细粒角闪石黑云母花岗岩具有略微偏高的初始岩浆温度(图 8b), 暗示岩浆温度也可能是制约该矿区花岗岩锡成矿潜力的重要因素, 成锡岩浆往往具有更高的初始温度(Yuan Shunda et al., 2018; Zhao Panlao et al., 2022a, 2022b)。综上所述, 我们认为主导沙蒙矿区两类不同类型花岗岩的锡成矿能力的关键因素可能是氧逸度和源区, 变质杂砂岩源区部分熔融形成的还原性岩浆更具有锡成矿潜力, 此外, 温度也可能是重要的控制因素。

5 结论

(1) 沙蒙矿区中粗粒黑云母花岗岩和细粒角闪石黑云母花岗岩分别形成于 210.9 ± 1.1 Ma 和 206.5 ± 1.0 Ma, 属晚三叠世岩浆活动的产物。

(2) 沙蒙矿区中粗粒黑云母花岗岩属 S 型花岗岩, 细粒角闪石黑云母花岗岩属 I 型花岗岩, 两者可能均形成于古特提斯洋闭合的碰撞后造山期挤压-伸展转换的构造背景。

(3) 中粗粒黑云母花岗岩岩浆主要起源于古元古代的变质杂砂岩, 而细粒角闪石黑云母花岗岩岩浆主要起源于新元古代新生地壳, 并具有部分古老地壳变沉积岩源区物质的加入。源区性质和氧逸度条件可能为该矿区花岗岩制约锡成矿的主要控制因素。

附件: 本文附件(附表 1) 详见 http://www.geojournals.cn/dzxb/dzxb/article/abstract/202304098?st=article_issue

References

- Altherr R, Siebel W. 2002. I-type plutonism in a continental back-arc setting: Miocene granitoids and monzonites from the central Aegean Sea, Greece. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(4): 397~415.
- Ballard J R, Palin M J, Campbell I H. 2002. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(3): 347~364.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: REE Geochemistry. Amsterdam: Elsevier.
- Burnham A D, Berry A J. 2017. Formation of Hadean granites by melting of igneous crust. *Nature Geoscience*, 10(6): 457~461.
- Chappell B W, White A. 1974. Two contrasting granite type. *Pacific Geology*, 8: 173~174.
- Chappell B W, White A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489~499.
- Coogan L A, Hinton R W. 2006. Do the trace element compositions of detrital zircons require Hadean continental crust? *Geology*, 34(8): 633~636.
- Ferry J M, Watson E B. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429~437.
- Gardiner N J, Searle M P, Morley C K, Whitehouse M P, Spencer C J, Robb L J. 2016. The closure of Palaeo-Tethys in Eastern Myanmar and northern Thailand: new insights from zircon U-Pb and Hf-isotope data. *Gondwana Research*, 39: 401~422.
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, Pearson N J, O'Reilly S Y. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons. *Precambrian Research*, 131(3): 231~282.
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523~548.
- Ishihara S. 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, 27: 293~305.
- Jiang Hai, Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong, Li Wenqiang, Zaw K, Zhang Di. 2021. Late Triassic post-collisional high-K two-mica granites in Peninsular Thailand, SE Asia: petrogenesis and Sn mineralization potential. *Lithos*, 398-399: 106290.
- Jiang Shaoyong, Zhao Kuidong, Jiang Yaohui, Dai Baozhang. 2008. Characteristics and genesis of Mesozoic A-type granites and associated mineral deposits in the southern Hunan and northern Guangxi Provinces along the Shi-Hang belt, South China.

- Geological Journal of China Universities, 14(4): 496~509 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Shaoyong, Zhao Kuidong, Jiang Hai, Su Huimin, Xiong Suofei, Xiong Yiqu, Xu Yaoming, Zhang Wei, Zhu Lvyun. 2020. Spatiotemporal distribution, geological characteristics and metallogenic mechanism of tungsten and tin deposits in China: an overview. *Bulletin of Science and Technology*, 65(33): 3730~3745 (in Chinese with English abstract).
- Khositanont S. 1991. The genesis of the Sn-W deposits at Samoeng Mine, Thailand: evidence from fluid inclusions. Master thesis of McGill University.
- Kirkland C L, Smithies R H, Taylor R J M, Evans N, McDonald B. 2015. Zircon Th/U ratios in magmatic environs. *Lithos*, 212: 397~414.
- Lehmann B. 2020. Formation of tin ore deposits: a reassessment. *Lithos*, 402-403: 105756.
- Lehmann B, Ishihara S, Michel H, Miller J, Winkelmann L. 1990. The Bolivian tin province and regional tin distribution in the Central Andes: A reassessment. *Economic Geology*, 85(5): 1044~1058.
- Li Jinxiang, Fan Weiming, Zhang Liyun, Evans N J, Sun Yali, Ding Lin, Guan Qiuyun, Peng Touping, Cai Fulong, Sein K. 2019. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of Late Cretaceous-Eocene granites in southern Myanmar: Petrogenetic, tectonic and metallogenic implications. *Ore Geology Reviews*, 112: 103031.
- Linnen R L, Pichavant M, Holtz F. 1996. The combined effects of f_{O_2} and melt composition on SnO_2 solubility and tin diffusivity in haplogranitic melts. *Pergamon*, 60(24): 4965~4976.
- Liu Junlai, Tran My-Dung, Tang Yuan, Nguyen Quang-Luat, Tran Thanh-Hai, Wu, Wenbin, Chen Jiafu, Zhang Zhaochong, Zhao Zhidan. 2012. Permo-Triassic granitoids in the northern part of the Truong Son belt, NW Vietnam: Geochronology, geochemistry and tectonic implications. *Gondwana Research*, 22: 628~644.
- Liu Liang, Hu Ruizhong, Zhong Hong, Yang Jiehua, Tang Yanwei. 2020. Petrogenesis of multistage S-type granites from the Malay Peninsula in the Southeast Asian tin belt and their relationship to Tethyan evolution. *Gondwana Research*, 84: 20~37.
- Loiselle M C. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, 11: 468.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological society of America bulletin*, 101(5): 635~643.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Yuan Shunda, Liu Peng, Meng Xuyang, Zhou Zhenhua, Zheng Wei. 2018. Current research progress and future trends of porphyry-skarn copper and granite-related tin polymetallic deposits in the Circum Pacific metallogenic belts. *Acta Petrologica Sinica*, 34(9): 2501~2517 (in Chinese with English abstract).
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223~253.
- Metcalfe I. 2000. The Bentong-Raub suture zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 691~712.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-science reviews*, 37(3-4): 215~224.
- Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31(6): 529.
- Mlynarczyk M, Williams-Jones A. 2005. The role of collisional tectonics in the metallogeny of the Central Andean tin belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 240: 656~667.
- Patiño Douce A E. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? *Geological Society, London, Special Publications*, 168(1): 55~75.
- Plank T, Kelley K A, Zimmer M M, Hauri E H, Wallace P J. 2013. Why do mafic arc magmas contain 4 wt% water on average? *Earth and Planetary Science Letters*, 364: 168~179.
- Qi Liang, Hu Jing, Gregoire D C. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51(3): 507~513.
- Qian Xin, Feng Qinglai, Wang Yuejun, Zhao Tianyu, Udchachon Mongkol, Wang Yukun. 2017. Late Triassic post-collisional granites related to Paleotethyan evolution in SE Thailand: geochronological and geochemical constraints. *Lithos*, 286-287: 440~453.
- Ridd M F, Barber A J, Crow M J. 2011. *The Geology of Thailand*. Gsw Books.
- Romer R L, Kroner U. 2016. Phanerozoic tin and tungsten mineralization-tectonic controls on the distribution of enriched protoliths and heat sources for crustal melting. *Gondwana Research*, 31: 60~95.
- Sato K, Vrublevsky A A, Rodionov S M, Romanovsky N P, Nedachi M. 2010. Mid-Cretaceous episodic magmatism and tin mineralization in Khingan Okhotsk volcano-plutonic belt, Far East Russia. *Resource Geology*, 52(1): 1~14.
- Schwartz M O, Rajah S S, Askury A K, Putthapiban P, Djaswadi S. 1995. The Southeast Asian tin belt. *38(2-4): 0~293*.
- Smythe D J, Brennan J M. 2016. Magmatic oxygen fugacity estimated using zircon-melt partitioning of cerium. *Earth and Planetary Science Letters*, 453: 260~266.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *lithos*, 45(1-4): 29~44.
- Tang Yuan, Liu Junlai, My-Dung Tran, Song Zhijie, Wu Wenbin, Zhang Zhaochong, Zhao Zhidan, Chen Wen. 2013. Timing of left-lateral shearing along the Ailao Shan-Red River shear zone: constraints from zircon U-Pb ages from granitic rocks in the shear zone along the Ailao Shan Range, Western Yunnan, China. *International Journal of Earth Sciences*, 102(3): 605~626.
- Veeravinantanakul A, Takahashi R, Agangi A, Ohba T, Watanabe Y, Elburg M A, Ueckermann H, Kanjanapayont P, Charusiri P. 2021. Zircon Hf-isotope constraints on the formation of metallic mineral deposits in Thailand. *Resource Geology*, 71(4): 1~33.
- Wang Dongsheng, Liu Junlai, Tran My-Dung, Ngyuen Quang Luat, Guo Qiang, Wu Wenbin, Zhang Zhaochong, Zhao Zhidan. 2011. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of granites in the Tinh Túc W-Sn ore deposits, Northern Vietnam. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2795~2808 (in Chinese with English abstract).
- Wang Rucheng, Xie Lei, Lu Jianjun, Zhu Jinchu, Chen Jun. 2017. Diversity of Mesozoic tin-bearing granites in the Nanling and adjacent regions, South China: Distinctive mineralogical patterns. *Science China Earth Science*, 47(11): 1257~1268 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tingyi, Li Gongjian, Wang Qingfei, Santosh M, Deng Jun. 2019. Petrogenesis and metallogenic implications of Late Cretaceous I- and S-type granites in Dachang-Kunlunquan ore belt, southwestern South China Block. *Ore Geology Reviews*, 113: 103079.
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295~304.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- White A, Chappell B W. 1977. Ultrametamorphism and granitoid genesis. *Tectonophysics*, 43(1-2): 7~22.
- Yang Jiehua, Zhou Meifu, Hu Ruizhong, Zhong Hong, Williams-Jones A E, Liu Liang, Zhang Xingchun, Fu Yazhou, Mao Wei. 2020. Granite-related tin metallogenic events and key controlling factors in peninsular Malaysia, Southeast Asia: New insights from cassiterite U-Pb dating and zircon geochemistry. *Economic Geology*, 115(3): 581~601.
- Yuan Shunda, Williams-Jones A E, Mao Jingwen, Zhao Panlao, Yan Chen, Zhang Dongliang. 2018. The origin of the

- Zhangjialong tungsten deposit, South China: Implications for W-Sn mineralization in large granite batholiths. *Economic Geology*, 113(5): 1193~1208.
- Yuan Shunda, Williams-Jones A E, Romer R L, Zhao Panlao, Mao Jingwen. 2019. Protolith-related thermal controls on the decoupling of Sn and W in Sn-W metallogenic provinces: insights from the Nanling Region, China. *Economic Geology*, 114(5): 1005~1012.
- Yuan Shunda, Zhao Panlao, Liu Min. 2020. Some problems involving in petrogenesis and metallogenesis of granite-related tin deposits. *Mineral Deposits*, 39(4): 607~618 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Panlao, Chu Xu, Williams-Jones A E, Mao Jingwen, Yuan Shunda. 2022a. The role of phyllosilicate partial melting in segregating tungsten and tin deposits in W-Sn metallogenic provinces. *Geology*, 50(1): 121~125.
- Zhao Panlao, Yuan Shunda, Williams-Jones Anthony E, Romer Rolf L, Yan Chen, Song Shiwei, Mao Jingwen. 2022b. Temporal separation of W and Sn mineralization by temperature-controlled incongruent melting of a single protolith: evidence from the Wangxianling area, Nanling region, South China. *Economic Geology*, 117(3): 667~682.
- Zhao Panlao, Zajacz Zoltán, Tsay Alexandra, Yuan Shunda. 2022c. Magmatic-hydrothermal tin deposits form in response to efficient tin extraction upon magma degassing. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 316: 331~346.
- Zhao Zifu, Gao Peng, Zheng Yongfei. 2015. The source of Mesozoic granitoids in South China: integrated geochemical constraints from the Taoshan batholith in the Nanling Range. *Chemical Geology*, 395: 11~26.
- Zhu Jingjing, Richards J P, Rees C, Creaser R S, Andrew D, Andrew L, Joseph A, Petrus L J. 2018. Elevated magmatic sulfur and chlorine contents in ore-forming magmas at the Red Chris porphyry Cu-Au deposit, northern British Columbia, Canada. *Economic Geology*, 113(5): 1047~1075.
- Zhu Rixiang, Zhao Pan, Zhao Liang. 2021. Tectonic evolution and geodynamics of the Neo-Tethys Ocean. *Science China Earth Sciences*, 52(1): 1~25 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 戴宝章. 2008. 十杭带湘南-桂北段中生代 A 型花岗岩带成岩成矿特征及成因讨论. *高校地质学报*, 14(4): 496~509.
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜海, 苏慧敏, 熊索菲, 熊伊曲, 徐耀明, 章伟, 朱律运. 2020. 中国钨锡矿床时空分布规律, 地质特征与成矿机制研究进展. *科学通报*, 65(33): 16.
- 毛景文, 谢桂青, 袁顺达, 刘鹏, 孟旭阳, 周振华, 郑伟. 2018. 环太平洋成矿带斑岩-矽卡岩型铜矿和与花岗岩有关的锡多金属矿研究现状与展望. *岩石学报*, 34(9): 2501~2517.
- 王东升, 刘俊来, Tran M D, Ngyuen Q L, 郭强, 吴文彬, 张招崇, 赵志丹. 2011. 越南东北部静足(Tinh Túc)钨锡矿区花岗岩年代学、地球化学与区域构造意义. *岩石学报*, 27(9): 2795~2808.
- 王汝成, 谢磊, 陆建军, 朱金初, 陈骏. 2017. 南岭及邻区中生代含锡花岗岩的多样性: 显著的矿物特征差异. *中国科学: 地球科学*, 47(11): 1257~1268.
- 袁顺达, 赵盼捞, 刘敏. 2020. 与花岗岩有关锡矿成岩成矿作用研究若干问题讨论. *矿床地质*, 39(4): 607~618.
- 朱日祥, 赵盼, 赵亮. 2021. 新特提斯洋演化与动力过程. *中国科学: 地球科学*, 52(1): 1~25.

Petrogenesis of granites from the Samoeng deposit in Thailand within the Southeast Asian tin belt, and their implications for tin mineralization

ZHANG Bo^{1, 2)}, LIU Liang^{*1)}, YANG Jiehua¹⁾, ZHONG Hong¹⁾, FU Yazhou¹⁾,
MAO Wei¹⁾, ZHANG Xingchun¹⁾

1) State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550081, China;

2) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Corresponding author: liuliang@vip.gyig.ac.cn

Abstract

Our study involved zircon U-Pb dating and in-situ Hf isotope, and whole-rock geochemical analyses for the medium-coarse-grained biotite granites associated with tin mineralization and the fine-grained hornblende biotite granites far away from the ore bodies from the Samoeng deposit, in Thailand. Zircon U-Pb ages show that the two granites were formed at 210.9 ± 1.1 Ma and 206.5 ± 1.0 Ma, respectively. Both granites are characteristic of rich in alkali with total alkali content of 5.81%~8.22%, relatively rich in Rb, Th, and Pb, weakly to strongly peraluminous ($A/CNK = 1.01 \sim 1.14$) and low in TFeO/MgO (0.75~3.54) and 10000Al/Ga (2.21~2.66) values. The medium-coarse-grained biotite granites have primary muscovite and relatively high K_2O/Na_2O (1.56~2.50) and Rb/Sr (2.26~2.60) ratios, with high P content in their zircons, belonging to typical S-type granites. While the fine-grained amphibole biotite granites are wide development of amphibole, and have relatively low K_2O/Na_2O (0.45~1.11) and Rb/Sr (0.54~1.18) ratios, with low content of P in their zircons, which can be classified as typical I-type granites. The two granites have quite different Hf isotopic compositions. The medium-coarse-grained biotite granites have relatively low $\epsilon_{Hf}(t)$ values (-20.0 to -8.9), with the corresponding two-stage Hf model age of 1.8 to 2.5 Ga (average values of 2.0 Ga). In contrast, the fine hornblende biotites granite have relatively high $\epsilon_{Hf}(t)$ values (-4.6 to 5.5), with the two-stage Hf model age of 0.9 to 1.5 Ga (average values of 1.1 Ga). Both two granites were formed in a post-collisional tectonic transition (from compression to extension) related to the closed Paleo-Tethys Ocean, and have similar magmatic temperatures and moderate fractionated ($DI = 79.6 \sim 88.0$, $SiO_2 = 67.57\% \sim 72.97\%$, and zircon Zr/Hf values = 29.8~64.9). The mid-coarse-grained biotite granites were suggested to be derived from Paleoproterozoic metagreywackes with low magmatic oxygen fugacities (average $\Delta FMQ = -4.93$), whereas the fine-grained amphibolite biotite granites mainly originated from juvenile meta-igneous rocks with the input of ancient meta-sedimentary component, and have relatively high magmatic oxygen fugacities (average $\Delta FMQ = -2.76$). We think the nature of the source region and magmatic oxygen fugacity condition could be the most important controlling factors for tin mineralization in the Samoeng deposit.

Key words: petrogenesis of granite; physic-chemical conditions; tin mineralization; Southeast Asia; Samoeng deposit in Thailand