

湘中白马山复式岩体成因及其成矿效应*

王川¹ 彭建堂^{1,2**} 徐接标¹ 阳杰华² 胡阿香³ 陈宪佳¹

WANG Chuan¹, PENG JianTang^{1,2**}, XU JieBiao¹, YANG JieHua², HU A' Xiang³ and CHEN XianJia¹

1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083

2. 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, 贵阳 550002

3. 湖南城市学院土木工程学院, 益阳 413000

1. MOE Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

3. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China

2020-11-03 收稿, 2021-02-10 改回.

Wang C, Peng JT, Xu JB, Yang JH, Hu AX and Chen XJ. 2021. Petrogenesis and metallogenic effect of the Baimashan granitic complex in central Hunan, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 37 (3): 805 – 829, doi: 10.18654/1000-0569/2021.03.11

Abstract The Baimashan granitic complex, located in the intersection of the NE-trending Xuefengshan arc uplift and the EW-trending Baimashan-Longshan-Ziyunshan structural belt, consists of Shuiche, Longtan, Xiaoshanjiang, and Longcangwan granite units. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating reveals that the Shuiche, Longtan, Xiaoshanjiang and Longcang units were emplaced at 424.9 ± 2.2 Ma, 228.2 ± 1.3 Ma, 225.3 ± 1.1 Ma and 215.0 ± 1.2 Ma, respectively. Granites from the Longtan and Xiaoshanjiang units are metaluminous to weakly peraluminous with low Si and alkali contents. They are strongly enriched in Rb, Th, U and Pb, but depleted in Nb, Sr, P and Ti. They are characterized by relatively high REE concentrations with weakly Eu negative anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.55 \sim 1.07$). All samples from Longtan and Xiaoshanjiang units exhibit high ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i values ($0.741441 \sim 0.748761$), and negative $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($-10.5 \sim -9.4$) and $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($-11.5 \sim -3.5$) values with Proterozoic two-stage Nd ($1.76 \sim 1.85$ Ga) and Hf ($1.42 \sim 1.83$ Ga) model ages. In contrast, granite samples collected from the Longcangwan unit are strongly enriched in Rb, Th, U, Ta and Pb, but depleted in Ba, Nb, Sr, and Ti, with strongly Eu negative anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.28 \sim 0.51$). The samples usually have relatively high ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i values ($0.741441 \sim 0.748761$), negative $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($-11.3 \sim -10.7$), and $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($-11.5 \sim -3.5$) values, with older Nd and Hf model ages of $1.87 \sim 1.91$ Ga and $1.47 \sim 1.97$ Ga, respectively. In combination with Sr-Nd-Hf isotopic and bulk-rock geochemical data, it can be concluded that the parental magmas of granites from the Longtan and Xiaoshanjiang units were likely to be derived from the partial melting of the ancient intermediate-mafic meta-igneous rock and meta-sedimentary rock of the upper continental crust in South China. Granites of the Longcangwan unit were likely to be formed by reworking of meta-sedimentary materials and display S-type affinity. The Indosinian granites in the Baimashan granitic complex were probably emplaced under the extensional background after continental collision between the South China block and the Indo-China block. The Au-W deposits around the Baimashan complex are temporally and spatially related with the Indosinian granites, and therefore the Indosinian granites are potentially favourable for Au-W mineralization. The Indosinian granitic activities and related Au-W-(Sb) mineralization in central Hunan may be more prevalent and more intensive than conventionally considered during the past several decades.

Key words Baimashan granitic complex; Indosinian granite; Petrogenesis; Metallogenic effect; Central Hunan; South China

摘要 白马山复式岩体位于湘西雪峰山弧形构造隆起带与湘中白马山-龙山-紫云山 EW 向构造带的交汇处, 由水车、龙

* 本文受国家自然科学基金项目(41972090、41473043)资助。

第一作者简介: 王川, 男, 1983年生, 博士生, 工程师, 矿产普查与勘探专业, E-mail: 270128656@qq.com

** 通讯作者: 彭建堂, 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床地球化学研究, E-mail: jtpeng@126.com

潭、小沙江和龙藏湾超单元花岗岩组成。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年显示,水车、龙潭、小沙江、龙藏湾超单元花岗岩的侵位年龄分别为 424.9 ± 2.2 Ma、 228.2 ± 1.3 Ma、 225.3 ± 1.1 Ma 和 215.0 ± 1.2 Ma。水车超单元形成于加里东期,其余 3 个超单元花岗岩均形成于印支晚期,首次系统搭建了白马山复式岩体的年代学格架。印支期龙潭和小沙江超单元花岗岩具有低硅、低碱、准铝质-弱过铝质的特点,显示较强的 Rb、Th、U、Pb 正异常和 Nb、Sr、P、Ti 负异常,具有较弱的负 Eu 异常 (δEu 为 $0.55 \sim 1.07$);富集 Sr 同位素 [$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$]_i = $0.719027 \sim 0.721297$],亏损 Nd 同位素 [$\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -10.5 \sim -9.4$]和锆石 Hf 同位素 [$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -7.7 \sim -4.1$]具有古老的 Nd 同位素 ($1.76 \sim 1.85$ Ga) 和 Hf 同位素 ($1.42 \sim 1.83$ Ga) 二阶段模式年龄。相反,龙藏湾超单元花岗岩具有高硅、高碱、强过铝质的特点,显示较强的 Rb、Th、U、Ta、Pb 正异常和 Ba、Nb、Sr、Ti 负异常,显示强的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.28 \sim 0.51$) 和高 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值 ($0.741441 \sim 0.748761$),具有负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($-11.3 \sim -10.7$) 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-11.5 \sim -3.5$),Nd 同位素 ($1.87 \sim 1.91$ Ga) 和 Hf 同位素 ($1.47 \sim 1.97$ Ga) 二阶段模式年龄更老。结合元素和同位素地球化学特征,可推断出龙潭和小沙江超单元花岗岩是华南古老地壳基底中基性变质火成岩混有变质沉积岩发生部分熔融形成的 I 型或者 I-S 过渡性质的花岗岩质岩,而龙藏湾超单元花岗岩则由华南成熟度更高的古老地壳基底富粘土变沉积岩发生部分熔融形成的 S 型花岗岩。白马山复式岩体中印支期超单元花岗岩很可能是华南板块受印支板块碰撞挤压后地壳发生伸展减薄,由加厚的地壳发生部分熔融形成的。这些印支期花岗岩与其周缘的金、钨矿床在时、空上具有密切联系,可能具有良好的成矿潜力;湘中地区印支期花岗岩的成岩、成矿作用在强度和广度上可能远高于过去的传统认识。

关键词 白马山复式岩体;印支期花岗岩;岩石成因;成矿效应;湘中地区;华南

中图法分类号 P588.121; P597.3

华南地处印支地块和华北地块之间,由华夏和扬子古陆组成。华南地区曾经历过 Columbia 超大陆、Gondwana 超大陆、Pangean 超大陆及欧亚大陆形成与演化的多期构造运动,晚古生代以来,古太平洋和特提斯构造域在华南产生了重要影响,由此形成不同时代的花岗岩及金属矿床。华南地区燕山期花岗岩分布广泛,与之相关的钨锡矿床和铅锌铜矿床众多,且很多达到了大型和超大型的规模,因此华南燕山期花岗岩的成岩、成矿作用受到人们高度重视和广泛关注(毛景文和王志良,2000;毛景文等,2004;Peng *et al.*,2006;彭建堂等,2008;胡瑞忠等,2010;陈骏等,2014;Yang *et al.*,2018;Yuan *et al.*,2018a,b,2019;Mao *et al.*,2019,2021)。而华南印支期花岗岩出露较少,且较为分散(周新民,2003;Wang *et al.*,2007;He *et al.*,2010),故该期花岗岩的成因人们关注较少,其成矿作用在很长时间内更是无人提及。近年来,越来越多的高精度放射性同位素定年结果显示,华南地区的一些金属矿床是印支期形成的,特别是湘中地区,印支期成矿作用尤为显著,如大坪金矿、铲子坪金矿、古台山金锑矿、杏枫山金钨矿、包金山金矿、谢家山锑钨矿、曹家坝钨矿、大溶溪钨矿都是印支期形成的(李华芹等,2008;张龙升等,2014;彭建堂等,2017,2021;Li *et al.*,2018;Xie *et al.*,2019a;Zhang *et al.*,2019;吕沅峻等,2021),故华南印支期花岗岩及其成矿作用值得高度重视。然而,目前有关华南印支期花岗岩的成因还存在非常大的争议,王岳军等(2002)、Wang *et al.*(2007)认为华南印支期花岗岩为陆壳碰撞挤压、地壳叠置加厚重熔的产物;周新民(2003)则主张该区大部分印支期花岗岩是在陆陆碰撞之后地壳伸展减薄的构造背景下中地壳发生部分熔融的产物;另外一些学者则认为华南印支期岩浆活动与古太平洋板块的俯冲作用有关,印支期花岗岩为岛弧岩浆作用的产物(Wang *et al.*,2005;Li *et al.*,2006,2007,2012;Li and Li,2007)。目前人们对华南燕山期花岗

岩与钨锡、铅锌铜的成矿进行了大量研究,但对该区印支期花岗岩的成矿作用缺乏研究。上述两方面研究的不足,严重制约了人们对华南地区印支期花岗岩成岩、成矿机制的深入认识。

白马山花岗质复式岩体处于江南古陆之中(图 1a),目前在该岩体周缘已发现了许多中型印支期金、钨矿床(图 1b),是系统揭示华南印支期构造-岩浆-成矿的理想对象。尽管前人对该岩体已开展了部分研究(王岳军等,2005;陈卫锋等,2007;罗志高等,2010;Chu *et al.*,2012;刘建清等,2013;Qiu *et al.*,2014;李建华等,2014;Fu *et al.*,2015),但其精确的成岩时代、岩浆源区特征和构造背景仍存在较大的分歧,成岩与成矿关系的研究更是处于空白。本文试图通过对白马山复式岩体的锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素分析,并结合全岩元素地球化学及 Sr-Nd 同位素研究,深入研究其岩石成因和构造背景,探讨该花岗质岩体的金、钨成矿效应,这将为揭示华南地区印支期花岗岩成岩、成矿机制提供一个重要窗口。

1 白马山复式岩体的地质特征及岩相学特征

白马山复式岩体位于江南造山带的东南缘(图 1a),在构造上处于 NE 向雪峰山弧形构造隆起带和 EW 向白马山-龙山-紫云山 EW 向构造带的交汇部位。地处隆回、新化、溆浦三县交界处,呈东西向串珠状分布,主要由黑云母花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩,出露面积约为 1650km^2 (湖南省地质矿产局,1988)。岩体侵位于新元古界板溪群、震旦系、寒武系、志留系和泥盆系地层中。前人根据这些花岗岩的野外地质特征、年代学和岩石地球化学将白马山复式岩体划分为 4 个超单元:水车超单元、龙潭超单元、

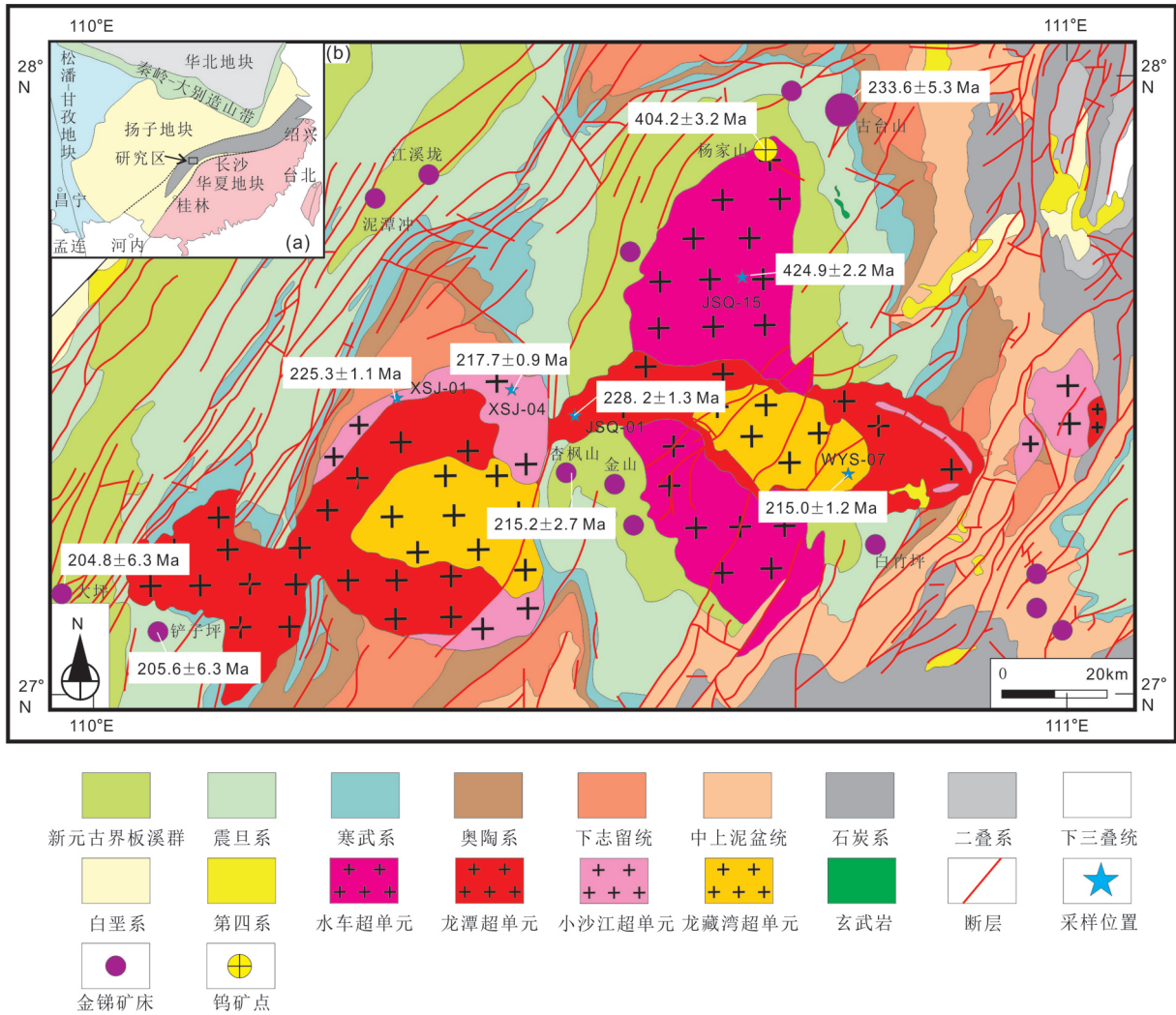


图1 白马山岩体地质图(据张义平等 2015 修改)

Fig.1 Geological map of the Baimashan granitic complex (modified after Zhang *et al.* , 2015)

小沙江超单元和龙藏湾超单元,并认为水车超单元形成于晚志留世,龙潭超单元形成于中三叠世,小沙江超单元形成于晚三叠世,龙藏湾超单元形成于早侏罗世(湖南省地质矿产局,1988)。

水车超单元位于岩体的东部,呈南北向岩基展布,中间被印支期花岗岩侵入,出露面积约为550km²(图1b)。岩体侵入到新元古界板溪群及下古生界地层中,岩体基本被中泥盆统地层不整合覆盖。岩性主要为中细粒黑云母二长花岗岩、细粒二云母二长花岗岩和中细粒角闪石黑云母花岗闪长岩。岩石具中细粒结构,部分可见似斑状结构,斑晶以斜长石为主,块状构造。其中,斜长石含量为30%~55%,具有环带结构和聚片双晶,钾长石为10%~25%,常包裹斜长石和黑云母,石英为30%~35%,黑云母为7%~13%,常为自形-半自形鳞片状,多色性明显,角闪石为0.5%~2%。副矿物主要有榍石、锆石、磷灰石。

龙潭超单元西侧以黄茅园为界,向东包括龙潭-金石桥-

高坪,东部延伸至天龙山,整体呈东西向展布,出露面积为500km²左右(图1b)。岩体侵入到中、上元古界至石炭系地层中。岩性主要为中细粒角闪石黑云母二长花岗岩、中细粒黑云母二长花岗岩和中粒黑云母花岗闪长岩。龙潭超单元中普遍发育暗色包体,多出现在黑云母花岗闪长岩和角闪石黑云母二长花岗岩中,包体与寄主岩界线明显(图2a)。岩石为中-细粒结构,部分可见似斑状结构,斑晶主要为斜长石,块状构造,局部发育似片麻状构造。其中,斜长石含量为35%~50%,钾长石为5%~20%,石英为24%~35%,有变形拉长,普遍存在波状消光(图2b),黑云母为8%~13%,角闪石为1%~5%。此外,岩石中还有少量的副矿物,如榍石、锆石、磷灰石等。暗色包体矿物颗粒较细,暗色矿物含量较高,主要为黑云母和角闪石,含有少量的副矿物榍石和锆石。

小沙江超单元位于岩体的中部和东部,呈岩株产出,整体呈东西向展布,出露面积约200km²(图1b)。岩体侵入到下志留统地层中。岩性主要为中粗粒黑云母二长花岗岩、中

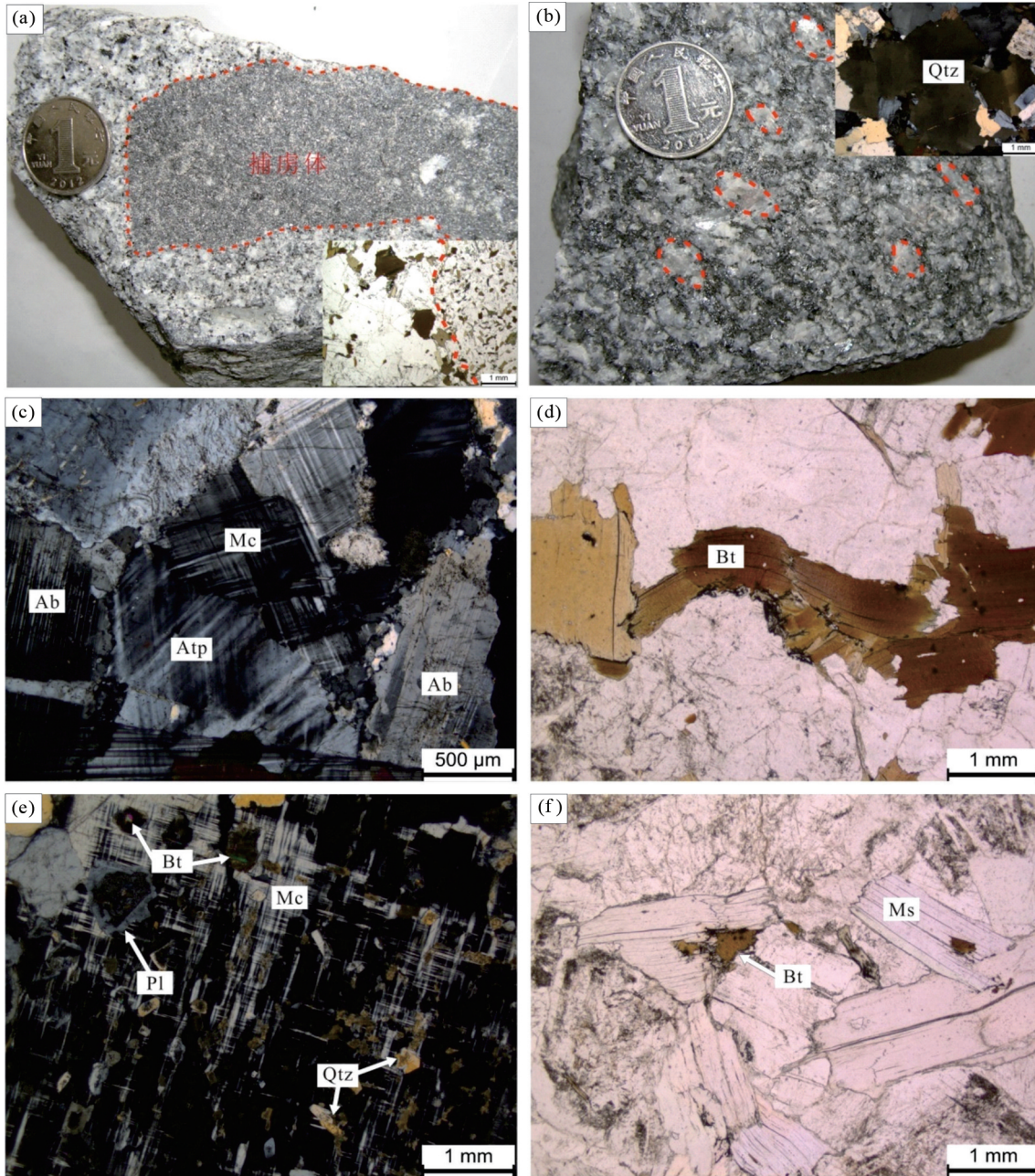


图2 白马山花岗岩手标本及显微照片

(a) 暗色包体与寄主岩界限清晰, 矿物成分相似; (b) 岩体受挤压石英发生变形, 石英普遍存在波状消光现象; (c) 碱性长石穿插交代酸性斜长石(正交偏光); (d) 黑云母受力发生扭曲(单偏光); (e) 微斜长石常包裹石英、黑云母和斜长石等矿物(正交偏光); (f) 黑云母蚀变成白云母, 仍保留原来的特征(单偏光)。Ab-钠长石; Atp-反条纹长石; Bt-黑云母; Mc-微斜长石; Ms-白云母; Pl-斜长石; Qtz-石英

Fig. 2 Hand specimen and microphotographs of the Baimashan granitic complex

(a) the boundary is clear and the minerals are similar between the dark inclusions and the host rocks; (b) the quartz distorted as the rock was extruded, and generally has a wave extinction phenomenon; (c) the acid plagioclase was replaced by the alkaline feldspar (crossed nicols); (d) the biotite was distorted (single nicols); (e) the quartz, the biotite and the plagioclase were wrapped by the microcline (crossed nicols); (f) the biotite turned into the muscovite (single nicols). Ab-allbite; Atp-antiperthite; Bt-biotite; Mc-microcline; Ms-muscovite; Pl-plagioclase; Qtz-quartz

粒黑云母花岗闪长岩和中粒二云母二长花岗岩。与龙潭超单元相似, 花岗岩中普遍发育暗色。岩石具中粗粒结构, 部分为似斑状结构, 可见斜长石和钾长石巨晶, 块状构造。其中, 斜长石含量为 30% ~ 45%, 双晶纹细密, 常被钾长石交

代, 钾长石为 10% ~ 25%, 常交代斜长石或沿斜长石裂隙充填(图 2c), 石英为 28% ~ 39%, 黑云母为 3% ~ 13%, 常受力发生扭曲(图 2d), 角闪石为 0.5% ~ 1%。此外, 岩石中还有少量的副矿物, 如榍石、锆石、磷灰石、钛铁矿等。

龙藏湾超单元位于岩体的中心部位以及东部,由两个岩体组成,与龙潭超单元构成环状分布,出露面积为 400 km² 左右(图 1b)。岩体主要侵入到下三叠统地层及龙潭超单元岩体中。岩性主要为中细粒二云母二长花岗岩和黑云母二长花岗岩。岩石具中细粒结构,块状构造。其中斜长石含量为 30%~35%,发育卡氏双晶和聚片双晶,钾长石为 25%~30%,常包裹石英、黑云母和斜长石等矿物(图 2e),石英为 35%~45%,黑云母为 2%~6%,白云母为 3%~9%(图 2f)。副矿物主要有榍石、锆石、磷灰石、电气石等。

2 样品采样与分析方法

本文对白马山复式岩体中水车、龙潭、小沙江和龙藏湾 4 个超单元进行了系统采样,具体采样位置见图 1b。经过详细的镜下观察,选取一部分代表性样品进行化学分析;另一部分通过粉碎、重力和磁选筛选之后,在双目镜下挑选晶形完整、无裂隙、无包体的锆石颗粒,制成锆石靶进行锆石原位 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析。

在进行锆石 U-Pb 同位素分析之前,先对锆石进行透射光和反射光照相,然后在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进行了锆石阴极发光拍照,结合光学和阴极发光图像,选择了环带发育良好,无裂纹无包裹体的位置进行锆石 U-Pb 同位素分析。锆石 U-Pb 同位素定年在中南大学地球科学与信息物理院 LA-ICP-MS 实验室完成,实验采用的 193nm ArF 准分子激光剥蚀器(型号为 Analyte He Excimer)和 Analytik Jena PlasmaQuant MS Elite 型电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)进行分析。激光束斑直径为 32 μm,剥蚀时间为 45s。测试过程中以标准锆石 91500 为外标校正仪器质量歧视与同位素元素分馏;以标准锆石 GJ-1 为盲样,检验 U-Pb 定年数据质量(Liu *et al.*, 2010a; Hu *et al.*, 2011)。原始的测试数据经过 iolite 软件离线处理完成。谐和图绘制采用 ISOPLOT 3.70 软件完成(Ludwig, 2008)。

锆石 Hf 同位素分析位置靠近 U-Pb 同位素分析点,实验分析在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配有 RESOLUTION-LR-S-155 激光剥蚀系统的 Nu Plasma MC-ICP-MS 质谱仪上进行(LA-MC-ICP-MS)。实验采用单点剥蚀模式对锆石进行数据采集(激光束斑为 44 μm),每次分析包括 20 秒空白信号和 50 秒剥蚀信号的采集时间。实验过程中 3 种锆石标样(91500、Penglai、Plésovice)用以监控 Hf 同位素分析质量,详细的分析过程与方法见 Hu *et al.* (2008, 2012)。ICPMSDataCal 软件用以进行分析信号的离线处理及质量分馏校正等(Liu *et al.*, 2010b)。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值计算参考球粒状陨石现今的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28277$ (Blichert-Toft and Albredé, 1997)。单阶段 Hf 模式年龄(t_{DM})和两阶段 Hf 模式年龄($t_{2\text{DM}}$)分别采用采用现今亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$ (Griffin *et al.*, 2004),与假设大陆地壳的平均 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$

(Griffin *et al.*, 2002) 进行计算。

全岩和暗色包体的主量元素分析采用 X 荧光光谱分析(XRF)方法,在澳实分析检测(广州)有限公司完成,实验仪器型号为荷兰 PANalyticalPW2424 型 X 射线荧光光谱仪。主量元素测试方法为 ME-XRF26d,测定仪器为 X 荧光光谱仪(XRF),样品消解采用硝酸锂熔融,试样加入包含硝酸锂在内的助熔剂,充分混合后,高温熔融。熔融物倒入铂金模子形成扁平玻璃片后,再用 X 荧光光谱仪(XRF)分析。同时称取另一份试样在 1000℃ 下测定烧失量(LOI)。主量元素的检测下限为 0.01%,相对误差优于 5%。全岩的微量元素分析在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完成。微量元素测定采用 ELAN DRC-e 型 Q-ICP-MS 完成,实验过程中以 Ar 为载气,分析精度优于 5% (Qi *et al.*, 2000)。Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析在澳大利亚昆士兰大学放射性同位素实验室完成。实验仪器为 VG 54 多接收质谱计(TIMS),Sr 同位素比值分析采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 进行质量分馏校正,Nd 同位素比值分析采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行质量分馏校正(Mearns, 1986)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

样品 JSQ-15 为水车超单元的代表性岩石样品,从中挑选的锆石晶型发育良好,韵律环带清晰,为典型的岩浆成因锆石(图 3a)。锆石 LA-ICP-MS 分析显示,所有分析点的 Th/U 比值介于 0.35~0.70(表 1),13 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 $424.9 \pm 2.2\text{Ma}$,加权年龄为 $424.5 \pm 1.9\text{Ma}$ (图 3b),在误差范围基本一致,为加里东期岩浆作用。本文重点讨论的是印支期的成岩成矿作用,因此,对白马山岩体的加里东期成岩作用不做过多的涉及。

样品 JSQ01 采自龙潭超单元,锆石多为长柱状,大小比较均一,多为 150~200 μm,长宽比为 2:1~3:1。CL 图像显示锆石发育典型的振荡环带,部分锆石发育锆石核,具有核幔结构(图 3a)。其 Th/U 比值较高,介于 0.29~0.75 之间(表 1),具有岩浆成因锆石的特征。20 个测点在谐和图上的下交点年龄为 $228.2 \pm 1.3\text{Ma}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $228.1 \pm 1.0\text{Ma}$ (图 3c),其中对 1 颗锆石的边部(JSQ01-05)和核部(JSQ01-06)分别进行分析,得到其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $220.1 \pm 1.8\text{Ma}$ 和 $225.6 \pm 2.6\text{Ma}$ 。

样品 XSJ01 采自小沙江超单元,锆石多为长柱状,大小为 150~300 μm,长宽比为 2:1~5:1。CL 图像显示锆石发育典型的振荡环带,少数锆石发育锆石核,呈核幔结构,但其核普遍较小(图 3a)。其 Th/U 比值为 0.25~0.60(表 1),具有岩浆成因锆石的特征。16 个测点的谐和年龄为 $225.3 \pm 1.1\text{Ma}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $224.1 \pm 1.1\text{Ma}$ (图 3d)。

样品 XSJ04 同样采自小沙江超单元,锆石多为长柱状,大小为 150~300 μm,长宽比为 2:1~6:1。CL 图像显示锆

表1 白马山复式岩体花岗岩锆石 U-Pb 同位素定年分析结果

Table 1 U-Pb isotopic dating of zircons from the Baimashan granitic complex

测点号	Th U		Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	($\times 10^{-6}$)			$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
水车超单元 样品号 JSQ15															
-01	886	2526	0.40	0.0579	0.0014	0.5390	0.0140	0.0682	0.0013	508	51	436.9	9.1	425.2	7.7
-04	929	2113	0.56	0.0554	0.0008	0.5110	0.0130	0.0681	0.0015	428	33	418.1	8.9	424.8	8.9
-05	1553	3199	0.70	0.0549	0.0012	0.5180	0.0130	0.0680	0.0015	400	49	422.8	8.5	424.1	9.0
-06	1693	3128	0.65	0.0556	0.0010	0.5150	0.0150	0.0679	0.0015	440	36	420.9	9.9	423.5	9.1
-07	1176	2775	0.36	0.0555	0.0006	0.5177	0.0081	0.0681	0.0009	427	26	423.3	5.4	424.4	5.3
-08	1598	3154	0.41	0.0557	0.0009	0.5190	0.0110	0.0679	0.0011	440	35	423.7	7.6	423.4	6.8
-09	1291	3116	0.42	0.0576	0.0008	0.5370	0.0140	0.0681	0.0013	508	31	435.2	9.2	424.3	7.6
-10	2504	4132	0.54	0.0548	0.0007	0.5120	0.0100	0.0681	0.0008	405	28	419.4	6.8	424.4	4.7
-12	1256	2782	0.62	0.0549	0.0009	0.5130	0.0130	0.0681	0.0011	401	36	419.5	8.4	424.6	6.4
-13	1364	1960	0.29	0.0591	0.0021	0.5350	0.0250	0.0680	0.0019	545	79	433	16	424.0	11.0
-14	965	2510	0.35	0.0546	0.0008	0.5110	0.0120	0.0681	0.0010	387	35	418.5	8	424.9	6.3
-19	931	2179	0.63	0.0557	0.0013	0.5270	0.0150	0.0682	0.0012	454	51	430.7	9	425.4	7.3
-23	1270	2805	0.43	0.0561	0.0008	0.5270	0.0180	0.0683	0.0017	452	33	429	12	426.0	10.0
龙潭超单元 样品号 JSQ01															
-02	962	2409	0.40	0.05896	0.00168	0.28590	0.00831	0.03476	0.00037	564.9	63.0	255.3	6.6	220.3	2.3
-04	1049	1877	0.56	0.05659	0.00160	0.27284	0.00725	0.03463	0.00040	476.0	93.5	245.0	5.8	219.5	2.5
-05	2917	4153	0.70	0.05390	0.00101	0.26110	0.00484	0.03473	0.00028	368.6	42.6	235.6	3.9	220.1	1.8
-06	1778	2752	0.65	0.05540	0.00167	0.27457	0.00790	0.03562	0.00041	427.8	63.9	246.3	6.3	225.6	2.6
-07	776	2147	0.36	0.05698	0.00142	0.26996	0.00674	0.03396	0.00033	500.0	53.7	242.7	5.4	215.3	2.0
-08	1470	3595	0.41	0.05252	0.00117	0.25478	0.00555	0.03478	0.00035	309.3	54.6	230.4	4.5	220.4	2.2
-09	1047	2494	0.42	0.05398	0.00131	0.25560	0.00592	0.03401	0.00041	368.6	55.6	231.1	4.8	215.6	2.6
-10	1830	3405	0.54	0.05434	0.00147	0.26996	0.00629	0.03577	0.00037	383.4	65.7	242.7	5.0	226.6	2.3
-11	2929	4733	0.62	0.05973	0.00141	0.28944	0.00700	0.03478	0.00042	594.5	50.0	258.1	5.5	220.4	2.6
-12	854	2952	0.29	0.05178	0.00132	0.25328	0.00644	0.03514	0.00038	276.0	57.4	229.2	5.2	222.6	2.3
-13	734	2115	0.35	0.05340	0.00172	0.26555	0.00918	0.03568	0.00041	346.4	41.7	239.1	7.4	226.0	2.6
-14	1663	2639	0.63	0.05303	0.00137	0.26197	0.00686	0.03549	0.00034	331.5	26.9	236.3	5.5	224.8	2.1
-17	1877	4379	0.43	0.05311	0.00109	0.25919	0.00533	0.03515	0.00037	331.5	50.9	234.0	4.3	222.7	2.3
-20	1570	2819	0.56	0.05302	0.00131	0.25311	0.00630	0.03447	0.00042	331.5	55.6	229.1	5.1	218.5	2.6
-24	2689	3595	0.75	0.05762	0.00127	0.28142	0.00623	0.03526	0.00034	516.7	48.1	251.8	4.9	223.4	2.1
小沙江超单元 样品号 XSJ01															
-01	1023	3486	0.29	0.0515	0.0007	0.2501	0.0052	0.0350	0.0006	262	31	226.4	4.3	221.8	3.6
-02	517	2055	0.25	0.0501	0.0011	0.2438	0.0066	0.0352	0.0006	190	49	221.3	5.4	222.7	3.9
-03	685	1707	0.40	0.0499	0.0013	0.2436	0.0071	0.0353	0.0006	178	56	221	5.7	223.8	3.5
-05	1855	6338	0.29	0.0524	0.0011	0.2555	0.0074	0.0354	0.0007	288	47	230.7	6	224.4	4.0
-07	1059	2818	0.38	0.0505	0.0013	0.2499	0.0081	0.0356	0.0008	206	56	227	6.4	225.2	5.1
-11	370	1015	0.36	0.0523	0.0030	0.2620	0.0150	0.0356	0.0012	270	120	236	11	225.1	7.4
-12	494	1802	0.27	0.0519	0.0026	0.2660	0.0220	0.0357	0.0019	270	110	239	17	226.0	12.0
-13	1790	3079	0.58	0.0518	0.0014	0.2510	0.0130	0.0353	0.0014	275	64	227	10	223.6	8.6
-14	726	2041	0.36	0.0518	0.0007	0.2570	0.0075	0.0355	0.0008	268	30	232.7	5.9	224.7	5.2
-15	1121	2893	0.39	0.0522	0.0012	0.2558	0.0076	0.0356	0.0008	286	54	230.9	6.1	225.2	4.8
-17	788	1311	0.60	0.0540	0.0027	0.2700	0.0130	0.0357	0.0010	330	110	242	10	225.8	6.4
-18	419	731	0.57	0.0504	0.0010	0.2475	0.0075	0.0353	0.0007	204	45	224.2	6.1	223.5	4.2
-19	286	668	0.43	0.0537	0.0013	0.2654	0.0099	0.0355	0.0006	342	52	238.3	7.9	224.5	3.9
-20	425	1010	0.42	0.0513	0.0008	0.2528	0.0058	0.0356	0.0006	245	36	228.6	4.7	225.6	3.6

续表 1

Continued Table 1

测点号	Th U		Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	($\times 10^{-6}$)			$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
-21	495	1998	0.25	0.0501	0.0011	0.2481	0.0079	0.0353	0.0007	198	49	224.6	6.4	223.7	4.4
-24	683	1209	0.56	0.0545	0.0020	0.2630	0.0230	0.0357	0.0016	357	81	244.1	9.7	226.0	10.0
小沙江超单元 样品号 XSJ04															
-01	670	2142	0.31	0.0527	0.0010	0.2487	0.0070	0.0343	0.0008	307	42	225.2	5.7	217.2	4.7
-02	1044	2906	0.36	0.0546	0.0019	0.2600	0.0100	0.0344	0.0009	364	76	235.4	8.6	217.6	5.4
-03	512	1426	0.36	0.0545	0.0013	0.2566	0.0080	0.0343	0.0006	377	53	231.6	6.5	217.5	3.8
-04	726	2261	0.32	0.0516	0.0009	0.2464	0.0077	0.0342	0.0008	258	39	223.2	6.2	217.7	4.8
-05	379	1086	0.35	0.0602	0.0027	0.3030	0.0150	0.0344	0.0010	635	84	267	12	218.0	6.3
-06	597	2020	0.30	0.0570	0.0014	0.2743	0.0071	0.0343	0.0005	474	52	245.8	5.6	217.5	3.4
-07	473	1797	0.26	0.0547	0.0021	0.2649	0.0094	0.0341	0.0008	393	85	237.8	7.6	216.8	4.6
-09	175	237	0.74	0.0515	0.0020	0.2540	0.0110	0.0344	0.0012	244	85	229.4	9	217.9	7.7
-10	377	1608	0.23	0.0504	0.0011	0.2409	0.0065	0.0343	0.0005	202	49	218.9	5.3	217.4	3.1
-11	332	1482	0.22	0.0504	0.0010	0.2447	0.0064	0.0343	0.0008	201	43	221.9	5.2	217.5	5.1
-12	335	949	0.35	0.0505	0.0010	0.2404	0.0060	0.0343	0.0005	205	46	218.5	4.9	217.4	3.0
-13	573	2125	0.27	0.0514	0.0008	0.2456	0.0052	0.0343	0.0007	257	34	222.8	4.3	217.1	4.3
-14	728	2403	0.30	0.0504	0.0010	0.2424	0.0070	0.0343	0.0007	209	44	219.9	5.7	217.3	4.3
-15	718	2691	0.27	0.0506	0.0017	0.2411	0.0091	0.0343	0.0006	201	72	218.8	7.4	217.1	3.8
-16	552	1889	0.29	0.0514	0.0010	0.2441	0.0070	0.0342	0.0006	248	45	221.5	5.7	216.5	3.7
-17	370	1121	0.33	0.0520	0.0015	0.2550	0.0110	0.0342	0.0013	271	66	229.4	9.2	216.5	8.4
-18	810	2890	0.28	0.0539	0.0016	0.2563	0.0090	0.0341	0.0006	343	66	231.1	7.2	216.3	3.6
-19	1082	3765	0.29	0.0534	0.0021	0.2567	0.0097	0.0341	0.0007	338	84	231.2	7.9	216.2	4.6
-20	2192	5747	0.38	0.0510	0.0015	0.2407	0.0064	0.0341	0.0006	228	64	218.7	5.2	216.1	4.0
-21	325	1359	0.24	0.0505	0.0010	0.2417	0.0061	0.0340	0.0005	214	45	219.6	5	215.4	3.1
-22	554	1359	0.41	0.0512	0.0021	0.2430	0.0110	0.0340	0.0007	219	89	220.5	8.8	215.5	4.2
-23	670	2111	0.32	0.0509	0.0021	0.2422	0.0097	0.0340	0.0007	200	85	219.4	7.9	215.3	4.5
-24	538	2171	0.25	0.0504	0.0009	0.2376	0.0054	0.0340	0.0005	206	39	216.3	4.4	215.4	2.9
-25	445	1386	0.32	0.0504	0.0012	0.2412	0.0066	0.0340	0.0008	200	51	219.2	5.4	215.3	4.9
龙藏湾超单元 样品号 WYS07															
-01	460	5163	0.09	0.05597	0.00139	0.26974	0.00596	0.03470	0.00035	450.0	55.6	242.5	4.8	219.9	2.2
-03	603	7437	0.08	0.05461	0.00112	0.25958	0.00527	0.03416	0.00033	394.5	46.3	234.3	4.3	216.5	2.1
-04	883	5061	0.17	0.05261	0.00127	0.25150	0.00559	0.03432	0.00039	322.3	53.7	227.8	4.5	217.6	2.4
-05	380	1020	0.37	0.05300	0.00225	0.24744	0.01040	0.03352	0.00042	327.8	102.8	224.5	8.5	212.5	2.7
-06	886	1994	0.44	0.05570	0.00145	0.26503	0.00663	0.03437	0.00039	438.9	54.6	238.7	5.3	217.9	2.4
-07	240	5242	0.05	0.05233	0.00102	0.24610	0.00525	0.03391	0.00031	298.2	44.4	223.4	4.3	215.0	1.9
-10	404	9029	0.04	0.05012	0.00066	0.23817	0.00328	0.03435	0.00027	211.2	31.5	216.9	2.7	217.7	1.7
-11	482	2005	0.24	0.05360	0.00120	0.24723	0.00500	0.03337	0.00033	353.8	51.8	224.3	4.1	211.6	2.1
-12	283	4457	0.06	0.05245	0.00104	0.24944	0.00510	0.03433	0.00029	305.6	44.4	226.1	4.1	217.6	1.8
-13	171	8757	0.02	0.04934	0.00066	0.23253	0.00338	0.03404	0.00029	164.9	31.5	212.3	2.8	215.8	1.8
-14	564	4248	0.13	0.05049	0.00078	0.23823	0.00389	0.03405	0.00024	216.7	32.4	217.0	3.2	215.9	1.5
-15	282	6113	0.05	0.04799	0.00099	0.22272	0.00435	0.03357	0.00034	98.2	45.4	204.2	3.6	212.9	2.2
-16	158	9965	0.02	0.04971	0.00076	0.23294	0.00360	0.03386	0.00029	189.0	35.2	212.6	3.0	214.7	1.8
-17	252	8123	0.03	0.04917	0.00070	0.23109	0.00349	0.03393	0.00026	166.8	33.3	211.1	2.9	215.1	1.6
-18	958	2036	0.47	0.05184	0.00137	0.24300	0.00667	0.03385	0.00032	279.7	61.1	220.9	5.4	214.6	2.0

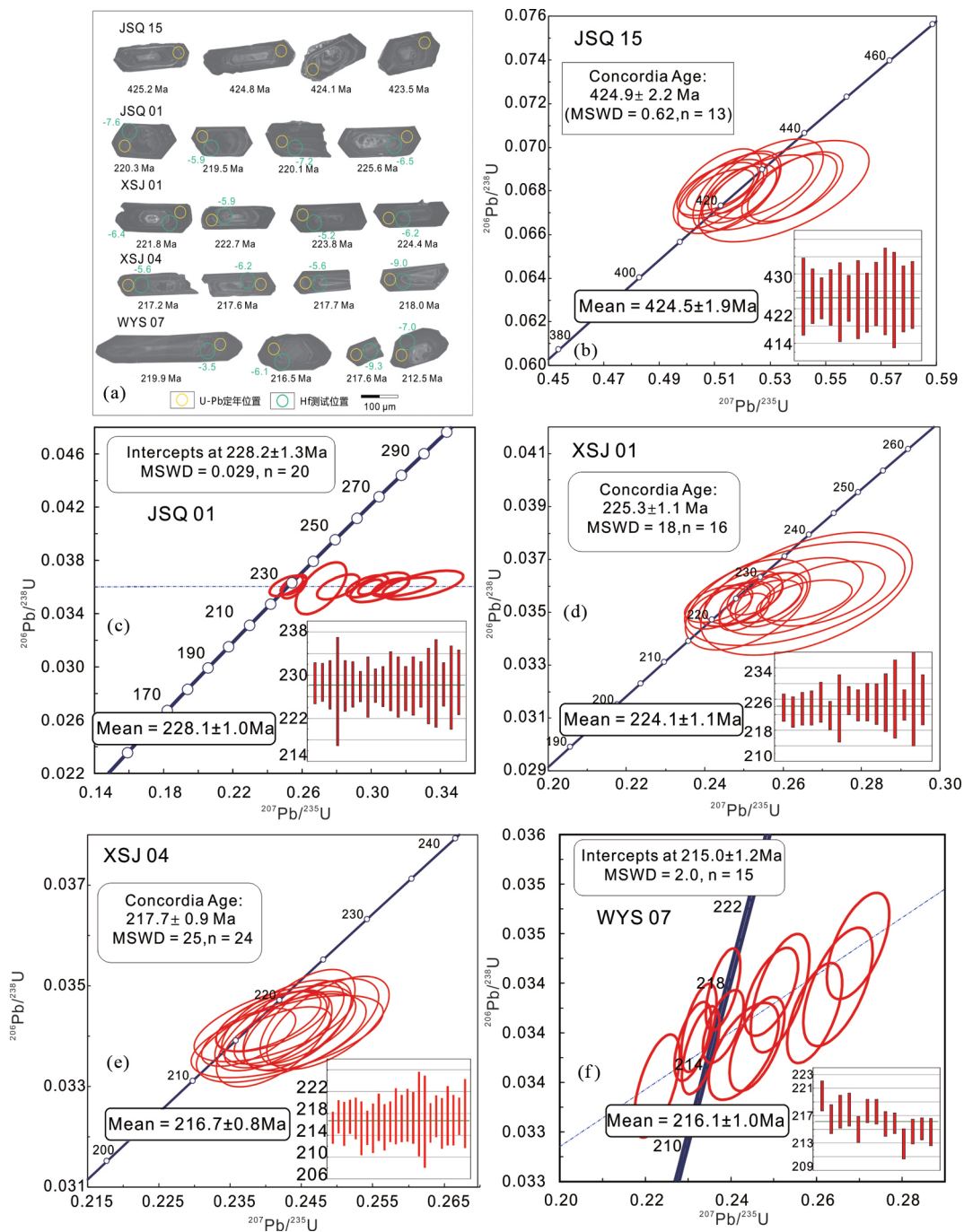


图3 白马山复式岩体花岗岩锆石 CL 图像 (a) 和 U-Pb 年龄谐和图 (b-f)

右下角小插图为相应样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布和加权年龄

Fig. 3 Zircon CL images (a) and U-Pb concordia diagrams of (b-f) the Baimashan granitic complex

The $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of the corresponding samples and their weighted mean ages shown at the lower right of the figure

石发育典型的振荡环带,部分锆石发育锆石核,具有核幔结构(图 3a)。锆石的 Th/U 比值为 0.22 ~ 0.74(表 1)。24 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 $217.7 \pm 0.9\text{Ma}$, 加权平均年龄为 $216.7 \pm 0.8\text{Ma}$ (图 3e)。

样品 WYS07 采自龙藏湾超单元,多为长柱状,大小为

120 ~ 200 μm ,长宽比为 2 : 1 ~ 4 : 1。CL 图像显示锆石发育典型振荡环带,部分锆石发育锆石核,具有核幔结构(图 3a)。其 Th/U 比值介于 0.02 ~ 0.47 之间,但大多数超过 0.10(表 1),具有岩浆成因锆石的特征。15 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $215.6 \pm 1.2\text{Ma}$ (图 3f)。

表2 白马山复式岩体花岗岩主量元素组成(wt%)

Table 2 Major element contents of granites from the Baimashan granitic complex(wt%)

超单元	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	Na ₂ O + K ₂ O	A/CNK	Mg [#]	σ
龙潭	JSQ01	69.20	0.38	15.06	2.97	0.05	1.44	3.03	3.19	4.08	0.09	0.67	100.16	7.27	0.99	0.52	2.02
	JSQ03	69.24	0.40	14.88	3.02	0.05	1.46	3.02	3.13	3.87	0.11	0.56	99.74	7.00	1.00	0.52	1.87
	JSQ05	68.40	0.45	15.36	3.38	0.05	1.80	3.44	3.18	3.65	0.11	0.56	100.38	6.83	0.99	0.54	1.84
	JSQ07	67.59	0.44	15.18	3.32	0.06	1.73	3.51	3.23	3.62	0.10	0.46	99.24	6.85	0.97	0.54	1.91
	JSQ08	67.18	0.45	15.54	3.33	0.06	1.78	3.49	3.23	3.64	0.16	0.60	99.46	6.87	0.99	0.54	1.95
	JSQ09	66.92	0.48	15.77	3.62	0.06	1.95	3.72	3.28	3.53	0.17	0.64	100.14	6.81	0.99	0.54	1.94
	JSQ10	68.46	0.37	15.32	2.87	0.05	1.50	3.17	3.24	3.81	0.13	0.66	99.58	7.05	1.01	0.54	1.95
	JSQ11	65.94	0.51	16.48	3.82	0.06	2.04	4.16	3.62	2.86	0.18	0.51	100.18	6.48	0.99	0.54	1.83
暗色包体	JSQ04-1	62.51	0.86	16.07	5.37	0.09	2.41	4.68	3.61	2.84	0.18	0.73	99.35	6.45	0.92	0.50	2.13
	JSQ04-2	63.29	0.87	16.31	5.58	0.09	2.53	4.83	3.65	2.70	0.18	0.71	100.74	6.35	0.92	0.50	1.99
小沙江	XSJ01	66.56	0.57	15.25	4.32	0.07	2.12	3.59	2.97	3.03	0.13	0.61	99.22	6.00	1.04	0.52	1.53
	XSJ02	65.78	0.60	15.76	4.58	0.07	2.23	3.54	2.93	3.52	0.15	0.56	99.72	6.45	1.04	0.52	1.83
	XSJ03	67.22	0.47	15.50	3.69	0.06	1.87	3.37	3.09	3.36	0.11	0.55	99.29	6.45	1.04	0.53	1.72
	XSJ04	67.47	0.51	14.93	3.94	0.06	2.00	3.06	2.79	3.75	0.12	0.60	99.23	6.54	1.05	0.53	1.75
	XSJ05	68.09	0.47	15.21	3.59	0.06	1.76	3.04	2.94	3.53	0.11	0.71	99.51	6.47	1.07	0.52	1.67
	XSJ06	67.88	0.45	14.91	3.51	0.06	1.72	2.98	2.90	3.59	0.11	0.82	98.93	6.49	1.06	0.52	1.69
	XSJ07	68.99	0.40	14.65	3.14	0.05	1.54	2.66	2.76	4.14	0.10	0.69	99.12	6.90	1.06	0.52	1.83
龙藏湾	WYS01	72.14	0.15	14.98	1.43	0.04	0.43	1.12	3.04	4.56	0.13	1.24	99.26	7.60	1.25	0.40	1.98
	WYS02	73.10	0.12	14.56	1.28	0.04	0.33	1.02	3.24	4.63	0.14	1.15	99.61	7.87	1.19	0.36	2.06
	WYS05	72.01	0.17	14.96	1.67	0.05	0.50	1.06	2.86	4.60	0.13	1.24	99.25	7.46	1.29	0.40	1.92
	WYS07	72.73	0.13	14.49	1.39	0.05	0.35	1.14	3.43	4.38	0.11	0.98	99.18	7.81	1.16	0.36	2.05
	WYS09	72.97	0.11	14.50	1.12	0.04	0.30	1.06	3.45	4.87	0.13	1.04	99.59	8.32	1.12	0.37	2.31

注: Fe₂O₃^T 为全铁含量; 铝饱和指数 A/CNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O) (摩尔比值); Mg[#] = Mg / (Mg + ΣFe²⁺), FeO^T = Fe₂O₃^T × 0.8998; σ = (Na₂O + K₂O)² / (SiO₂ - 43)

3.2 主量元素

龙潭超单元花岗岩的 SiO₂ 含量为 65.94% ~ 69.24% , 其全碱含量(Na₂O + K₂O) 为 6.48% ~ 7.27% , Al₂O₃ 含量为 14.49% ~ 16.48% (表2); 岩性划分上落入花岗闪长岩区域(图4a); 在 K₂O-SiO₂ 判别图中(图4b), 样品均落入高钾钙碱性系列区域内; A/CNK 介于 0.97 ~ 1.01 之间, 属于准铝质花岗岩(图4c); Mg[#] 比较集中, 介于 0.52 ~ 0.54 之间, 里特曼指数 σ 介于 1.83 ~ 2.02 之间, 属于钙碱性花岗岩。2 件暗色包体 SiO₂ 含量(62.51% 和 63.29%) 和全碱含量(6.45% 和 6.35%) 较低, Al₂O₃ 含量较高(16.07% 和 16.31%) , 其岩性属于英云闪长岩(图4a), 在 K₂O-SiO₂ 判别图中(图4b), 落入高钾钙碱性系列区域内, A/CNK 较低(0.92), 也属于准铝质花岗岩(图4c)。

小沙江超单元花岗岩的 SiO₂ 含量为 65.78% ~ 68.99% , 其全碱含量(Na₂O + K₂O) 为 6.00% ~ 6.90% , Al₂O₃ 含量为 14.65% ~ 15.76% (表2); 岩性划分上落入花岗闪长岩区域(图4a); 在 K₂O-SiO₂ 判别图中(图4b), 样品

均落入高钾钙碱性系列区域内; A/CNK 介于 1.04 ~ 1.07 之间, 属于弱过铝质花岗岩(图4c); Mg[#] 比较集中, 介于 0.52 ~ 0.53 之间, 里特曼指数 σ 介于 1.53 ~ 1.83 之间, 属于钙碱性花岗岩。

龙藏湾超单元花岗岩的 SiO₂ 含量(72.01% ~ 73.10%)、其全碱含量(7.46% ~ 8.32%) 和 A/CNK 值(1.12 ~ 1.29) 均略高于龙潭和小沙江超单元, 属于强过铝质高钾钙碱性花岗岩(图4a-c), Al₂O₃ 含量(14.49% ~ 14.98%) 和 Mg[#](0.36 ~ 0.40) 值较低, 里特曼指数 σ 介于 1.92 ~ 2.31 之间, 也属于钙碱性花岗岩。

3.3 微量元素

龙潭和小沙江超单元花岗岩具有相似的微量元素组成(表3)和配分型式(图5a) 均显示了较强的 Rb、Th、U、Pb 正异常和中等的 Nb、Sr、P、Ti 负异常。Rb/Ba 为 0.23 ~ 0.76、Rb/Sr 为 0.70 ~ 1.43(表3) 略高于中国东部(0.31 和 0.12, 高山等, 1999) 和全球上地壳的平均值(0.32 和 0.21, Taylor and McLennan, 1985); 龙藏湾超单元花岗岩显示出较强的

表3 白马山复式岩体花岗岩微量元素组成 ($\times 10^{-6}$)

样品号 超单元	暗色包体										小沙江										龙藏湾									
	JSQ01	JSQ03	JSQ05	JSQ07	JSQ08	JSQ09	JSQ10	JSQ11	JSQ04-1	JSQ04-2	XSJ01	XSJ02	XSJ03	XSJ04	XSJ05	XSJ06	XSJ07	WYS01	WYS02	WYS05	WYS07	WYS09								
Co	36.1	34.7	32.2	31.4	28.2	28.0	33.6	31.9	30.2	29.6	34.1	33.8	31.7	38.7	36.3	36.6	35.0	23.1	24.3	22.9	28.7	23.6								
Ni	28.7	27.1	32.3	29.3	40.1	36.5	33.4	40.2	26.6	27.0	36.2	37.7	34.7	38.4	34.5	35.0	30.5	10.7	11.1	12.6	13.1	10.2								
Rb	207	211	203	220	165	162	181	161	219	224	157	168	157	167	169	174	184	286	296	318	321	334								
Sr	156	160	166	154	203	201	210	231	189	188	181	177	175	160	157	161	149	60.5	57.4	61.9	39.4	43.2								
Y	13.8	12.5	14.5	20.4	15.6	17.0	16.2	17.3	23.6	25.0	16.9	18.4	17.4	17.4	19.2	21.3	13.9	10.3	11.3	10.0	13.7	11.4								
Zr	123	157	161	186	195	224	217	235	211	198	230	182	184	172	150	158	130	82.0	77.4	82.6	69.9	74.7								
Nb	9.89	9.82	10.4	12.8	12.9	12.3	12.3	13.8	10.7	11.0	11.1	11.7	9.89	10.6	10.4	10.5	9.45	13.4	13.9	16.3	16.2	12.9								
Sb	0.24	0.18	0.18	0.23	0.24	0.27	0.58	0.40	0.15	0.19	0.40	0.43	0.27	0.61	1.53	0.33	0.18	0.43	0.32	0.32	0.54	0.37								
Cs	14.8	24.8	12.8	16.3	12.8	12.6	17.8	19.5	14.4	14.7	11.7	11.5	10.7	11.1	14.4	12.5	15.6	72.7	59.2	102	83.9	34.9								
Ba	436	443	436	290	728	705	640	615	342	321	518	612	549	617	543	550	602	251	225	275	88.3	101								
Hf	3.46	4.19	4.16	4.79	5.14	5.80	5.88	6.00	5.30	5.03	6.05	4.65	5.37	4.71	3.98	4.51	3.55	2.36	2.41	2.74	2.39	2.50								
Ta	4.45	4.52	4.16	8.06	4.45	4.02	4.79	4.22	3.73	3.52	4.92	4.51	4.30	5.76	5.89	5.50	4.70	9.71	8.53	10.9	11.7	9.34								
W	607	783	476	460	439	395	513	455	304	268	762	596	543	979	922	785	625	301	346	345	436	406								
Pb	49.8	44.4	43.5	46.9	46.4	42.3	52.3	41.3	35.7	34.3	32.3	32.9	40.7	38.3	42.2	40.1	45.1	44.6	51.9	47.3	44.1	46.2								
Th	26.4	25.5	28.3	27.9	25.5	25.4	24.6	24.0	22.7	22.7	12.3	19.8	19.2	12.4	22.7	23.0	16.1	14.5	16.2	14.7	15.0	13.4								
U	6.71	6.06	6.82	6.71	3.47	4.44	6.47	4.54	5.23	4.12	8.68	3.67	5.33	4.06	3.98	4.58	4.27	4.24	3.61	4.38	5.13	4.23								
La	31.1	36.4	37.1	34.9	44.2	41.9	36.8	42.4	38.2	44.9	25.1	40.8	33.4	19.6	33.4	40.3	25.9	22.4	21.6	22.0	20.0	17.2								
Ce	59.7	70.6	72.2	70.1	80.8	79.1	68.9	80.3	78.3	88.9	48.3	78.4	62.7	38.6	64.8	77.5	49.7	42.3	42.3	41.6	40.5	34.9								
Pr	6.14	7.45	7.41	7.23	8.24	7.74	6.77	8.24	8.31	9.35	4.97	8.10	6.65	4.08	6.79	8.08	5.04	16.1	16.0	16.1	14.7	13.1								
Nd	21.0	25.7	26.7	25.8	26.9	26.1	24.2	26.9	31.2	34.6	18.0	28.7	23.7	15.1	23.7	29.3	17.5	16.1	16.0	16.1	14.7	13.1								
Sm	3.79	4.16	4.35	4.63	3.93	4.13	3.75	4.31	5.51	6.25	3.34	4.98	4.23	3.10	4.42	5.38	3.46	3.32	3.42	3.40	3.15	2.49								
Eu	0.790	0.774	0.808	0.768	0.948	0.896	0.872	0.978	1.05	1.12	1.11	1.10	1.01	0.926	0.985	0.971	0.961	0.495	0.450	0.481	0.271	0.283								
Gd	3.29	3.09	3.65	3.91	3.34	3.55	3.16	3.82	4.75	5.42	3.01	4.26	3.72	3.02	4.00	4.47	2.65	2.66	2.90	2.69	2.88	2.49								
Tb	0.488	0.482	0.504	0.644	0.525	0.568	0.561	0.609	0.804	0.851	0.536	0.665	0.605	0.504	0.685	0.725	0.467	0.470	0.493	0.457	0.533	0.450								
Dy	2.49	2.29	2.56	3.55	2.91	3.03	2.98	3.21	4.21	4.50	3.02	3.26	3.25	3.24	3.48	3.89	2.35	2.18	2.32	2.08	2.54	2.17								
Ho	0.499	0.415	0.522	0.664	0.530	0.561	0.554	0.560	0.792	0.837	0.575	0.707	0.634	0.598	0.689	0.791	0.504	0.356	0.411	0.357	0.479	0.399								
Er	1.39	1.24	1.53	2.04	1.55	1.78	1.68	1.73	2.37	2.38	1.75	2.03	1.75	1.72	1.96	2.18	1.35	0.884	0.930	0.929	1.25	1.03								
Tm	0.179	0.171	0.211	0.299	0.218	0.248	0.259	0.260	0.357	0.362	0.280	0.295	0.266	0.263	0.281	0.310	0.216	0.127	0.143	0.138	0.171	0.144								
Yb	1.34	1.18	1.40	2.11	1.47	1.61	1.63	1.60	2.22	2.30	1.75	1.85	1.68	1.75	1.92	2.10	1.40	0.834	0.951	0.795	1.07	0.945								
Lu	0.194	0.184	0.188	0.295	0.220	0.242	0.255	0.236	0.358	0.341	0.258	0.275	0.237	0.252	0.293	0.311	0.211	0.097	0.123	0.108	0.157	0.139								
Σ REE	132.4	154.1	159.1	156.9	175.8	171.5	152.4	175.2	178.4	202.1	112.0	175.4	143.8	92.8	147.4	176.3	111.7	96.7	96.5	95.6	91.9	79.4								
(La/Yb) _N	15.7	20.8	17.9	11.2	20.3	17.6	15.3	17.9	11.6	13.2	9.7	14.9	13.4	7.6	11.8	13.0	12.5	18.1	15.3	18.7	12.6	12.3								
(La/Sm) _N	5.16	5.51	5.37	4.74	7.08	6.39	6.18	6.19	4.36	4.52	4.73	5.16	4.97	3.98	4.76	4.71	4.71	4.25	3.98	4.07	4.00	4.35								
(Gd/Yb) _N	1.99	2.12	2.11	1.50	1.84	1.79	1.57	1.94	1.73	1.91	1.40	1.87	1.79	1.40	1.69	1.73	1.54	2.59	2.47	2.74	2.18	2.13								
δ Ce	1.01	1.00	1.02	1.03	0.99	1.03	1.02	1.01	1.03	1.02	1.01	1.01	0.99	1.01	1.01	1.01	1.02	0.99	1.01	0.98	1.03	1.03								
δ Eu	0.68	0.66	0.62	0.55	0.80	0.72	0.77	0.74	0.63	0.59	1.07	0.73	0.78	0.92	0.72	0.61	0.97	0.51	0.44	0.49	0.28	0.35								
Rb/Ba	0.47	0.48	0.47	0.76	0.23	0.23	0.28	0.26	0.64	0.70	0.30	0.27	0.29	0.27	0.31	0.32	0.31	1.14	1.32	1.16	3.64	3.31								
Rb/Sr	1.33	1.32	1.22	1.43	0.81	0.81	0.86	0.70	1.16	1.19	0.87	0.95	0.90	1.04	1.08	1.08	1.23	4.73	5.16	5.14	8.15	7.73								
Zr/Hf	35.5	37.5	38.7	38.8	37.9	38.6	36.9	39.2	39.8	39.4	38.0	39.1	34.3	36.5	37.7	35.0	36.6	34.7	32.1	30.1	29.2	29.9								
Nb/Ta	2.22	2.17	2.50	1.58	2.90	3.05	2.57	3.27	2.87	3.12	2.27	2.59	2.30	1.85	1.77	1.91	2.01	1.38	1.63	1.50	1.39	1.38								
T_z ($^{\circ}$ C)	753	775	774	784	790	800	803	802	778	773	809	787	791	786	777	781	766	747	739	750	729	731								

注: $T_z = 12900/[2.95 + 0.85M + \ln(496000/Zr_{\text{meq}})]$; Zr_{meq} 是锆在饱和熔体中的含量($\times 10^{-6}$); $M = (Na + K + 2Ca)/(Al \times Si)$; 元素均以阳离子形式参与计算; δ Ce = $Ce_N/\sqrt{(La_N \times Pr_N)}$; δ Eu = $Eu_N/\sqrt{(Sm_N \times Gd_N)}$

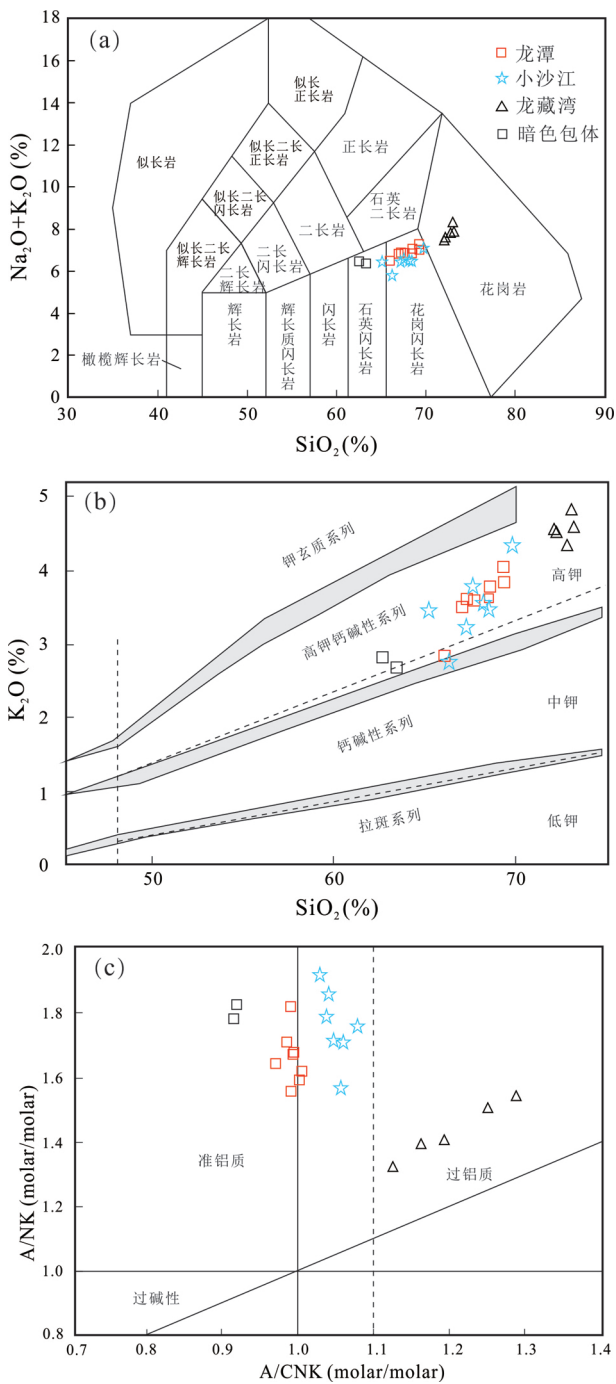


图4 白马山复式岩体花岗岩 TAS (a, 据 Middlemost, 1994)、 K_2O-SiO_2 (b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976) 和 $A/NK-A/CNK$ (c, 据 Middlemost, 1985) 图解

Fig.4 Diagrams of TAS (a, after Middlemost, 1994), K_2O vs. SiO_2 (b, after Peccerillo and Taylor, 1976) and A/NK vs. A/CNK (c, after Middlemost, 1985) of the Baimashan granitic complex

Rb、Th、U、Ta、Pb 正异常和 Ba、Nb、Sr、Ti 负异常 (图 5a), Rb/Ba 为 1.14 ~ 3.64, Rb/Sr 为 4.73 ~ 8.15 (表 3), 均高于中国

东部、全球上地壳平均值 (Taylor and McLennan, 1985; 高山等, 1999)。2 件暗色包体的微量元素配分型式与寄主岩石 (龙潭超单元花岗岩) 基本一致。龙藏湾超单元花岗岩与龙潭、小沙江超单元的微量元素组成有所差异, 前者的岩浆演化程度要稍高后两者。

龙潭超单元花岗岩稀土总量为 $132 \times 10^{-6} \sim 176 \times 10^{-6}$ (表 3) 稀土元素配分模式呈明显的右倾 (图 5b), LREE/HREE 和 $(La/Yb)_N$ 比值为 10.6 ~ 16.0 和 11.2 ~ 20.8, 属轻稀土富集型, $(La/Sm)_N$ 比值为 4.74 ~ 7.08, $(Gd/Yb)_N$ 比值为 1.50 ~ 2.12, δCe 为 0.99 ~ 1.03, δEu 为 0.55 ~ 0.80, 显示出较弱的 Eu 负异常; 小沙江超单元花岗岩稀土总量为 $93 \times 10^{-6} \sim 176 \times 10^{-6}$ (表 3) 稀土元素配分模式呈明显的右倾 (图 5b), LREE/HREE 和 $(La/Yb)_N$ 比值为 7.2 ~ 12.1 和 7.6 ~ 14.9, 属轻稀土富集型, $(La/Sm)_N$ 比值为 3.98 ~ 5.16, $(Gd/Yb)_N$ 比值为 1.40 ~ 1.87, δCe 为 0.99 ~ 1.02, δEu 为 0.61 ~ 1.07, 显示出较弱的 Eu 负异常; 龙藏湾超单元花岗岩稀土总量较低, 介于 $79 \times 10^{-6} \sim 97 \times 10^{-6}$ 之间 (表 3) 稀土元素配分模式亦呈明显的右倾, LREE/HREE 和 $(La/Yb)_N$ 比值为 9.1 ~ 11.7 和 12.3 ~ 18.7, $(La/Sm)_N$ 比值为 3.98 ~ 4.35, $(Gd/Yb)_N$ 比值为 2.13 ~ 2.74, 相对于龙潭和小沙江超单元, 龙藏湾超单元花岗岩轻、重稀土分异更加显著, 花岗岩的 δEu 值为 0.28 ~ 0.51, 显示更强的 Eu 负异常。

暗色包体稀土总量较高, 为 79×10^{-6} 和 97×10^{-6} (表 3), LREE/HREE 和 $(La/Yb)_N$ 比值为 10.3、10.9 和 11.6、13.2, $(La/Sm)_N$ 比值为 4.36 和 4.52, $(Gd/Yb)_N$ 比值为 1.73 和 1.91, δCe 为 1.03 和 1.02, δEu 为 0.63 和 0.59, 整体上与寄主岩石龙潭超单元花岗岩配分模式基本相似。

3.4 全岩 Sr-Nd 同位素组成

全岩 Sr-Nd 同位素分析结果列于表 4。龙潭超单元花岗岩的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值为 0.719027 ~ 0.721297, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -10.5 ~ -9.4, Nd 同位素二阶段模式年龄为 1.76 ~ 1.85Ga (表 4), 为古元古代。岩体内暗色包体的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值为 0.716520, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -8.1, Nd 同位素二阶段模式年龄为 1.64Ga (表 4)。小沙江超单元花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成比较集中, 其 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值为 0.719216 ~ 0.719600, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -10.1 ~ -10.0 (表 4), Nd 同位素二阶段模式年龄均为 1.81Ga, 为古元古代。因此, 在 Sr-Nd 同位素组成上, 龙潭和小沙江超单元的花岗岩非常相似。

龙藏湾超单元花岗岩的 Sr 同位素组成变化较大, 但其 Nd 同位素组成较集中, 其 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值为 0.741441 ~ 0.748761, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -11.3 ~ -10.7 (表 4), Nd 同位素二阶段模式年龄为 1.87 ~ 1.91Ga, 也属于古元古代, 但比龙潭和小沙江超单元的 Nd 同位素二阶段模式年龄更老。

3.5 锆石 Hf 同位素

锆石 Lu-Hf 同位素组成列于表 5。龙潭超单元花岗岩样

表4 白马山复式岩体花岗岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of granites from the Baimashan granitic complex

超单元	样品号	年龄 (Ma)	$\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}$	$\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}$	$\pm 2\sigma$	$\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_i$	$\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}$	$\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{2\text{DM}}$ (Ga)
龙潭超单元	JSQ01	221.4	3.839476	0.731117	0.000010	0.719027	0.109056	0.512032	0.000005	-9.4	1.76
	JSQ04	204*	3.447597	0.726522	0.000010	0.716520	0.109152	0.512106	0.000005	-8.1	1.64
	JSQ11	221.4	2.016695	0.727648	0.000013	0.721297	0.096817	0.511957	0.000005	-10.5	1.85
小沙江超单元	XSJ01	215.4	2.509848	0.726942	0.000012	0.719253	0.112125	0.512004	0.000005	-10.1	1.81
	XSJ02	215.4	2.746390	0.727689	0.000014	0.719276	0.104852	0.511992	0.000005	-10.1	1.81
	XSJ04	210.7	3.020110	0.728265	0.000011	0.719216	0.124055	0.512021	0.000006	-10.1	1.81
	XSJ06	210.7	3.127157	0.728970	0.000011	0.719600	0.110954	0.512006	0.000005	-10.0	1.81
龙藏湾超单元	WYS02	215.6	14.921280	0.787716	0.000015	0.741964	0.129162	0.511964	0.000006	-11.3	1.91
	WYS05	215.6	14.864926	0.787020	0.000010	0.741441	0.127609	0.511963	0.000005	-11.3	1.91
	WYS07	215.6	23.574098	0.821044	0.000013	0.748761	0.129486	0.511964	0.000005	-11.3	1.91
	WYS09	215.6	22.371185	0.816917	0.000013	0.748322	0.114857	0.511974	0.000005	-10.7	1.87

注: JSQ04 年龄数据引自陈卫锋等 (2007) (204Ma^{*}); $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = \text{Rb}(\times 10^{-6}) / \text{Sr}(\times 10^{-6}) \times 2.89359$; $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = \text{Sm}(\times 10^{-6}) / \text{Nd}(\times 10^{-6}) \times 0.604255$

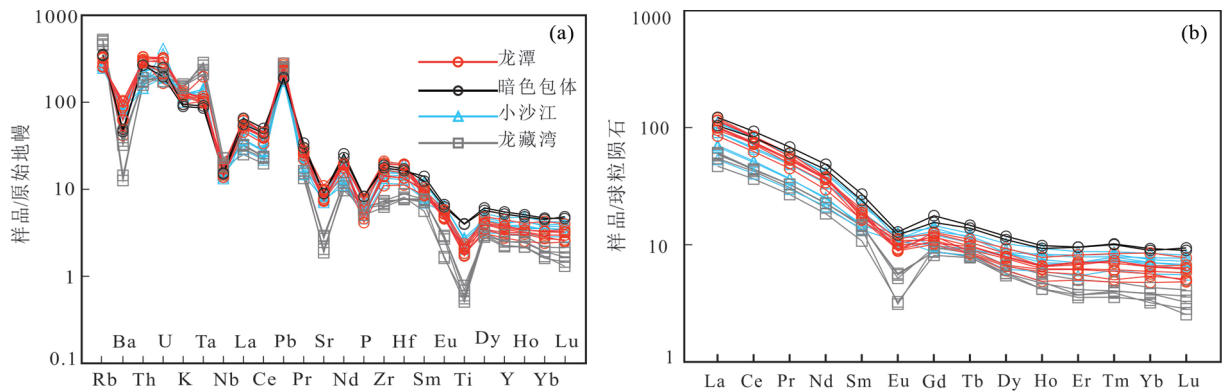


图5 白马山复式岩体花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989) 和球粒陨石标准化稀土元素配分图(b, 标准化值据 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 5 Primitive-normalized trace element (a, normalized values after Sun and McDonough, 1989) and chondrite-normalized REE patterns (b, normalized values after Taylor and McLennan, 1985) of the Baimashan granitic complex

品 JSQ01 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282420 ~ 0.282490, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.000762 ~ 0.002896。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的变化范围为 -8.0 ~ -5.1 之间(图 6a), 平均值为 -6.8, 两阶段 Hf 模式年龄($t_{2\text{DM}}$) 为 1.59 ~ 1.75Ga。

小沙江超单元花岗岩样品 XSJ01 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282420 ~ 0.282523, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.001003 ~ 0.002802。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 -7.7 ~ -4.1 之间, 两阶段 Hf 模式年龄($t_{2\text{DM}}$) 为 1.51 ~ 1.74 Ga。 样品 XSJ04 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282452 ~ 0.282569, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.001013 ~ 0.001884。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与样品 XSJ01 锆石相近(图 6b), 范围在 -9.2 ~ -2.7 之间(图 6), 两个样品的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均值为 -5.9。 两阶段 Hf 模式年龄($t_{2\text{DM}}$) 为 1.42 ~ 1.83 Ga。

龙藏湾超单元的花岗岩样品 WYS07 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$

比值为 0.282321 ~ 0.282543, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.000755 ~ 0.002164。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 -11.5 ~ -3.5 之间(图 6c), 平均为 -6.7。 两阶段 Hf 模式年龄($t_{2\text{DM}}$) 为 1.47 ~ 1.97Ga。

4 讨论

4.1 成岩时代

白马山复式岩体由多个侵入单元组成, 前人根据花岗岩的野外地质特征、年代学和岩石地球化学特征, 将白马山复式岩体划分为水车超单元、龙潭超单元、小沙江超单元和龙藏湾超单元, 并认为水车超单元形成于晚志留世、龙潭超单元形成于中三叠世、小沙江超单元形成于晚三叠世、龙藏湾

表5 白马山复式岩体花岗岩锆石 Hf 同位素组成

Table 5 Zircon Hf isotopic compositions of the Baimashan granitic complex

测点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm 2\sigma$	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$\pm 2\sigma$	$t_{2\text{DM}}(\text{Ma})$	$\pm 2\sigma$
龙潭超单元 样品号 JSQ01												
-01	0.02991	0.00100	0.00000	0.28241	0.00001	-8.0	0.5	-0.97	1192	20	1761	31
-02	0.07248	0.00230	0.00003	0.28243	0.00002	-7.5	0.7	-0.93	1206	31	1730	47
-03	0.09442	0.00287	0.00002	0.28244	0.00002	-7.3	0.7	-0.91	1215	31	1719	47
-04	0.05085	0.00162	0.00001	0.28248	0.00002	-5.7	0.6	-0.95	1118	24	1620	38
-05	0.03895	0.00136	0.00001	0.28244	0.00002	-7.0	0.6	-0.96	1163	23	1700	36
-06	0.03102	0.00097	0.00001	0.28245	0.00002	-6.5	0.5	-0.97	1131	21	1665	33
-07	0.02232	0.00076	0.00000	0.28249	0.00001	-5.1	0.5	-0.98	1072	18	1579	29
-08	0.03988	0.00134	0.00001	0.28247	0.00001	-6.0	0.5	-0.96	1123	20	1638	31
-09	0.04613	0.00162	0.00000	0.28242	0.00002	-7.7	0.7	-0.95	1197	27	1743	42
-10	0.03244	0.00112	0.00000	0.28248	0.00001	-5.5	0.5	-0.97	1095	18	1603	29
-11	0.04544	0.00148	0.00001	0.28243	0.00002	-7.2	0.6	-0.96	1173	26	1712	40
-12	0.08969	0.00290	0.00002	0.28243	0.00003	-7.5	1.1	-0.91	1220	44	1727	67
-13	0.02863	0.00097	0.00000	0.28243	0.00002	-7.2	0.6	-0.97	1162	22	1714	36
-14	0.02624	0.00088	0.00001	0.28246	0.00001	-6.1	0.4	-0.97	1113	17	1640	27
-15	0.04978	0.00161	0.00002	0.28244	0.00001	-7.1	0.5	-0.95	1173	19	1706	29
-16	0.05006	0.00164	0.00001	0.28247	0.00001	-6.1	0.4	-0.95	1132	17	1641	27
-17	0.04196	0.00136	0.00002	0.28243	0.00001	-7.2	0.4	-0.96	1168	17	1709	27
-18	0.03638	0.00118	0.00001	0.28241	0.00001	-8.1	0.5	-0.96	1201	20	1768	31
-19	0.04939	0.00173	0.00001	0.28247	0.00002	-5.9	0.6	-0.95	1125	24	1628	38
-20	0.04336	0.00143	0.00002	0.28245	0.00001	-6.6	0.5	-0.96	1146	20	1671	31
-21	0.04529	0.00149	0.00000	0.28240	0.00001	-8.7	0.5	-0.96	1226	20	1798	31
-23	0.04464	0.00152	0.00000	0.28245	0.00001	-6.8	0.5	-0.95	1151	20	1680	31
小沙江超单元 样品号 XSJ01												
-01	0.04830	0.00158	0.00001	0.28246	0.00001	-6.4	0.4	-0.95	1140	16	1659	24
-02	0.04959	0.00162	0.00002	0.28247	0.00001	-5.9	0.4	-0.95	1120	16	1627	24
-03	0.04569	0.00147	0.00001	0.28249	0.00002	-5.2	0.6	-0.96	1089	24	1583	38
-04	0.05041	0.00168	0.00000	0.28247	0.00001	-6.2	0.4	-0.95	1134	16	1645	24
-06	0.03622	0.00118	0.00000	0.28245	0.00001	-6.5	0.4	-0.96	1136	17	1668	27
-07	0.04286	0.00148	0.00001	0.28252	0.00002	-4.1	0.6	-0.96	1046	24	1514	38
-08	0.04553	0.00158	0.00000	0.28250	0.00002	-5.1	0.6	-0.95	1086	24	1575	38
-09	0.05509	0.00186	0.00001	0.28237	0.00002	-9.7	0.6	-0.94	1280	24	1863	38
-10	0.02949	0.00095	0.00000	0.28247	0.00002	-5.8	0.6	-0.97	1103	22	1623	36
-11	0.03782	0.00122	0.00000	0.28245	0.00001	-6.5	0.5	-0.96	1137	18	1667	29
-12	0.03538	0.00114	0.00001	0.28247	0.00002	-5.8	0.6	-0.97	1106	23	1620	36
-13	0.05017	0.00162	0.00000	0.28242	0.00002	-7.7	0.7	-0.95	1191	27	1737	42
-14	0.03113	0.00100	0.00000	0.28245	0.00001	-6.7	0.5	-0.97	1140	20	1679	31
-15	0.08476	0.00280	0.00001	0.28250	0.00002	-5.2	0.5	-0.92	1124	22	1587	33
-16	0.03744	0.00130	0.00001	0.28246	0.00001	-6.3	0.5	-0.96	1129	18	1651	29
-17	0.03856	0.00131	0.00001	0.28242	0.00002	-7.6	0.5	-0.96	1182	21	1734	33
-18	0.03558	0.00119	0.00001	0.28251	0.00002	-4.4	0.6	-0.96	1051	24	1534	38
-19	0.03375	0.00112	0.00001	0.28246	0.00002	-6.5	0.6	-0.97	1131	24	1662	38
-20	0.05689	0.00186	0.00000	0.28248	0.00001	-5.6	0.4	-0.94	1115	17	1608	27
-21	0.03399	0.00111	0.00000	0.28242	0.00002	-7.7	0.6	-0.97	1180	23	1740	35
-22	0.06801	0.00217	0.00001	0.28251	0.00001	-4.5	0.5	-0.93	1077	19	1538	29

续表 5

Continued Table 5

测点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm 2\sigma$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$\pm 2\sigma$	$t_{2\text{DM}}(\text{Ma})$	$\pm 2\sigma$
-23	0.04467	0.00136	0.00001	0.28255	0.00003	-3.1	1.1	-0.96	1003	44	1451	69
-24	0.03816	0.00128	0.00001	0.28243	0.00002	-7.3	0.6	-0.96	1169	25	1715	40
-25	0.03372	0.00114	0.00001	0.28236	0.00002	-9.8	0.6	-0.97	1266	24	1873	38
小沙江超单元 样品号 XSJ04												
-01	0.04390	0.00150	0.00001	0.28249	0.00001	-5.6	0.5	-0.95	1100	19	1603	29
-02	0.03632	0.00120	0.00001	0.28247	0.00001	-6.2	0.4	-0.96	1119	16	1644	24
-03	0.04263	0.00137	0.00001	0.28250	0.00001	-5.1	0.4	-0.96	1079	16	1574	24
-04	0.03924	0.00127	0.00001	0.28249	0.00001	-5.6	0.4	-0.96	1093	16	1600	24
-05	0.03109	0.00104	0.00001	0.28238	0.00001	-9.2	0.4	-0.97	1234	17	1831	27
-06	0.08575	0.00282	0.00003	0.28248	0.00001	-6.1	0.5	-0.92	1154	19	1636	29
-07	0.05713	0.00183	0.00001	0.28250	0.00002	-5.1	0.5	-0.94	1089	22	1574	33
-08	0.04503	0.00142	0.00001	0.28251	0.00001	-4.5	0.4	-0.96	1057	16	1537	24
-09	0.05738	0.00188	0.00001	0.28245	0.00001	-6.8	0.4	-0.94	1157	14	1677	22
-11	0.03932	0.00130	0.00001	0.28250	0.00001	-5.2	0.4	-0.96	1080	16	1578	24
-14	0.03440	0.00113	0.00001	0.28246	0.00001	-6.5	0.4	-0.97	1128	17	1661	27
-15	0.03150	0.00105	0.00000	0.28250	0.00001	-5.0	0.4	-0.97	1064	17	1563	27
-16	0.03624	0.00118	0.00001	0.28248	0.00001	-5.7	0.5	-0.96	1096	18	1609	29
-17	0.05972	0.00187	0.00003	0.28249	0.00002	-5.4	0.6	-0.94	1100	26	1589	40
-18	0.03416	0.00112	0.00001	0.28249	0.00001	-5.5	0.5	-0.97	1087	18	1597	29
-19	0.03510	0.00115	0.00001	0.28245	0.00001	-6.8	0.4	-0.97	1137	16	1675	24
-20	0.05069	0.00158	0.00002	0.28257	0.00001	-2.7	0.5	-0.95	983	20	1419	31
-21	0.03465	0.00112	0.00001	0.28248	0.00001	-5.9	0.4	-0.97	1103	17	1622	27
-22	0.03619	0.00118	0.00001	0.28250	0.00001	-4.9	0.5	-0.96	1063	18	1558	29
-23	0.03054	0.00101	0.00001	0.28248	0.00001	-5.9	0.4	-0.97	1098	14	1619	22
-24	0.03191	0.00105	0.00001	0.28250	0.00001	-5.1	0.4	-0.97	1068	15	1570	24
-25	0.03530	0.00116	0.00002	0.28255	0.00001	-3.4	0.4	-0.97	1005	17	1466	27
龙藏湾超单元 样品号 WYS07												
-01	0.03810	0.00133	0.00002	0.28254	0.00001	-3.4	0.4	-0.96	1013	17	1468	27
-02	0.03393	0.00116	0.00001	0.28246	0.00001	-6.3	0.4	-0.96	1120	16	1647	24
-03	0.05186	0.00162	0.00001	0.28247	0.00001	-6.2	0.5	-0.95	1124	19	1636	29
-04	0.02303	0.00078	0.00000	0.28238	0.00001	-9.3	0.4	-0.98	1228	17	1834	27
-05	0.03770	0.00126	0.00001	0.28245	0.00001	-7.0	0.5	-0.96	1147	18	1687	29
-06	0.03272	0.00114	0.00001	0.28240	0.00001	-8.6	0.4	-0.97	1208	17	1787	27
-07	0.06433	0.00216	0.00002	0.28245	0.00002	-6.7	0.5	-0.93	1168	22	1678	33
-08	0.06703	0.00218	0.00006	0.28250	0.00002	-5.3	0.6	-0.93	1100	25	1581	38
-09	0.03512	0.00116	0.00000	0.28241	0.00001	-8.1	0.4	-0.97	1190	17	1758	27
-10	0.02591	0.00082	0.00000	0.28251	0.00002	-4.8	0.5	-0.98	1052	21	1553	33
-11	0.02370	0.00080	0.00001	0.28252	0.00001	-4.3	0.4	-0.98	1031	17	1520	27
-12	0.02238	0.00076	0.00001	0.28251	0.00002	-4.7	0.6	-0.98	1045	24	1543	38
-13	0.03310	0.00108	0.00000	0.28249	0.00002	-5.6	0.6	-0.97	1087	23	1599	36
-14	0.03885	0.00123	0.00000	0.28246	0.00001	-6.5	0.3	-0.96	1126	14	1656	21
-15	0.04477	0.00140	0.00001	0.28244	0.00001	-7.4	0.3	-0.96	1168	14	1713	22
-16	0.03676	0.00122	0.00001	0.28240	0.00001	-8.7	0.4	-0.96	1216	17	1797	27
-17	0.04916	0.00158	0.00001	0.28232	0.00001	-11.5	0.4	-0.95	1337	14	1969	22

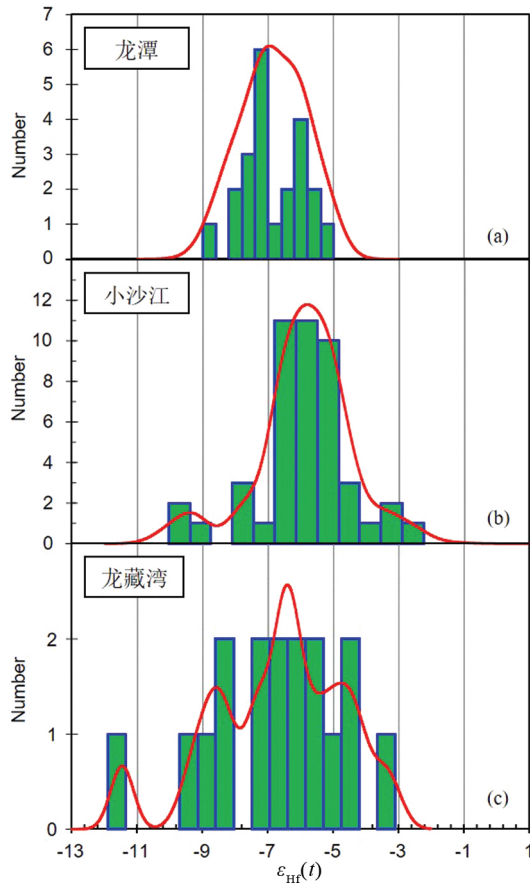


图6 白马山复式岩体各单元花岗岩锆石 Hf 同位素组成柱状图

Fig. 6 Histograms for zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values from granites of the Baimashan granitic complex

超单元形成于早侏罗世(湖南省地矿局区调所,1995)。但每个侵入单元形成的精确时代一直没有得到系统研究,其年代学框架尚未完全搭建。本次通过对每个侵入单元进行系统取样,测定其形成时代,并通过与前人资料的综合分析和对比,来搭建其年代学格架。

水车超单元 本次锆石 U-Pb 同位素分析结果显示水车超单元的侵入年龄为 $424.9 \pm 2.2\text{Ma}$,为加里东时期岩浆活动的产物。

龙潭超单元 前人对龙潭超单元花岗岩的形成时代进行过限定,Chu *et al.* (2012) 获得的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 $217 \pm 2\text{Ma}$,罗志高等(2010)、李建华等(2014) 测得岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为 $223.3 \pm 1.4\text{Ma}$ 和 $215.9 \pm 1.9\text{Ma}$ 。本次研究获得的锆石 U-Pb 同位素年龄为 $228.2 \pm 1.3\text{Ma}$,与罗志高等(2010) 获得的锆石 U-Pb 年龄非常接近,说明龙潭超单元花岗岩形成于晚三叠世,属于印支晚期岩浆活动的产物。

小沙江超单元 对于小沙江超单元花岗岩的形成年龄,目前仅有湖南省地质矿产局(1988) 利用锆石模式年龄法得

到年龄为 $217 \sim 202\text{Ma}$ 。本次研究测得小沙江超单元花岗岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $225.3 \pm 1.1\text{Ma}$ 和 $217.7 \pm 0.9\text{Ma}$,表明小沙江超单元花岗岩形成于晚三叠世,也属于印支晚期岩浆活动的产物。

龙藏湾超单元 关于龙藏湾超单元花岗岩的形成年龄,目前所获得的年龄数据非常分散,如陈卫锋等(2007) 测得其锆石边部年龄为 $176.7 \pm 1.7\text{Ma}$,核部年龄为 $204 \pm 12\text{Ma}$;张义平等(2015) 利用锆石 SHRIMP U-Pb 定年得到岩体形成年龄为 $194 \pm 2\text{Ma}$ 和 $196 \pm 3\text{Ma}$;刘建清等(2013) 测得该岩体锆石边部年龄为 $177.6 \pm 4\text{Ma}$;李建华等(2014) 利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法获得了龙潭超单元 $215.9 \pm 1.9\text{Ma}$ 和 $212.2 \pm 2.1\text{Ma}$ 的成岩年龄;Fu *et al.* (2015) 得到龙藏湾单元锆石 SIMS U-Pb 年龄为 $215.3 \pm 3.1\text{Ma}$ 、 $211.1 \pm 4.2\text{Ma}$ 、 $214.3 \pm 3.4\text{Ma}$ 和 $209.3 \pm 4\text{Ma}$ 。本次研究测得龙藏湾超单元花岗岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $215.0 \pm 1.2\text{Ma}$,与李建华等(2014) 和 Fu *et al.* (2015) 获得的年龄数据相当吻合。这些最新的年龄数据显示,白马山岩体的龙藏湾超单元的侵位时间为晚三叠世,而非前人认为的早侏罗世(湖南省地矿局区调所,1995;刘建清等,2013;张义平等,2015),该单元花岗岩应为印支晚期构造-岩浆作用的产物。无独有偶,近年湘桂赣地区一些早期认为形成于燕山期的花岗岩体也被逐渐证实为印支期岩浆活动的产物,例如湘桂交界处的越城岭($220 \pm 1\text{Ma}$ 、 $215 \pm 1\text{Ma}$,程顺波等,2013)、都庞岭(209Ma ,邹先武等,2009)、五团岩体($220.5 \pm 4.4\text{Ma}$,柏道远等,2014)、湘中的紫云山岩体($222.5 \pm 1.0\text{Ma}$ 、 $222.3 \pm 1.8\text{Ma}$,刘凯等,2014; $227.0 \pm 2.2\text{Ma}$;鲁玉龙等,2017)。

因此,结合前人的年龄数据和本次测得的数据,我们系统建立了白马山复式岩体的年代学框架,其中水车超单元形成于加里东期,而龙潭、小沙江和龙藏湾超单元均形成于印支晚期($215 \sim 225\text{Ma}$)。近年来,随着高精度年龄数据的积累,华南印支期花岗岩主要形成于 $240 \sim 225\text{Ma}$ 和 $225 \sim 205\text{Ma}$ 两幕(Wang *et al.*, 2003, 2007),而白马山复式岩体中印支期花岗岩主要形成于第二幕。

4.2 成因类型

花岗岩的成因类型判别是研究花岗岩重要的一环,其判别结果不仅有助于揭示岩浆源区及岩石成因,而且可为探明其形成的地球动力学背景提供重要依据。通常,S型花岗岩为过铝质花岗岩($A/\text{CNK} > 1.1$),富含堇青石、白云母和电气石等过铝质矿物,成岩温度较低,通常小于 750°C ,具有较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(Lepvrier *et al.*, 1997; Lan *et al.*, 2000; Carter *et al.*, 2001; Miller *et al.*, 2003; Xiang and Shu, 2010; Zhang *et al.*, 2012);I型花岗岩为准铝质-弱过铝质花岗岩($A/\text{CNK} < 1.1$),暗色矿物以黑云母和角闪石为主,缺乏典型的过铝质矿物,成岩温度较高,通常大于 750°C ,具有较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(Miller *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007; Xia *et al.*, 2014)。

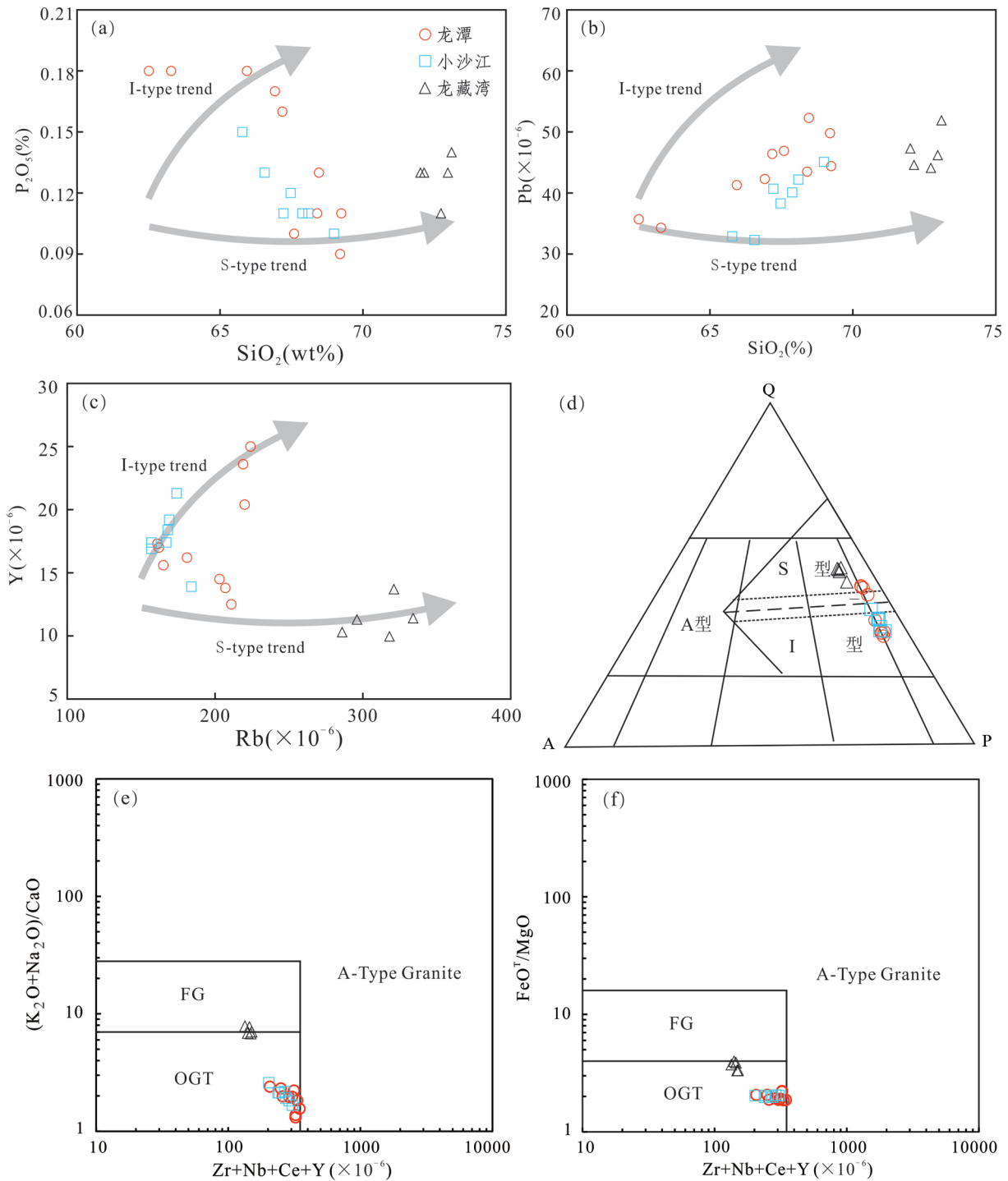


图7 白马山复式岩体花岗岩成因类型判别图

(a) SiO_2 - P_2O_5 协变图 (Li *et al.* 2007); (b) SiO_2 -Pb 协变图 (Li *et al.* 2007); (c) Rb-Y 协变图 (Li *et al.* 2007); (d) Q-A-P 图解 (Bowden and Kinnaird, 1984); (e) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ -(Zr + Nb + Ce + Y) 图解 (Whalen *et al.* 1987); (f) $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ -(Zr + Nb + Ce + Y) 图解 (Whalen *et al.* 1987). I、S、A 分别代表 I 型、S 型、A 型花岗岩; FG 代表分异的长英质花岗岩; OGT 代表未分异的 I、S、M 型花岗岩

Fig. 7 Classification diagrams of genetic type for granites of the Baimashan granitic complex

(a) SiO_2 vs. P_2O_5 classification diagram (Li *et al.* 2007); (b) SiO_2 vs. Pb classification diagram (Li *et al.* 2007); (c) Rb vs. Y classification diagram (Li *et al.* 2007); (d) Q-A-P diagram (Li *et al.* 2007); (e) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ vs. (Zr + Nb + Ce + Y) diagram (Whalen *et al.* 1987); (f) $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ vs. (Zr + Nb + Ce + Y) diagram (Whalen *et al.* 1987). I: I-type granite; S: S-type granite; A: A-type granite; FG: fractionated felsic granite; OGT: unfractionated M-, I- and S-type granite

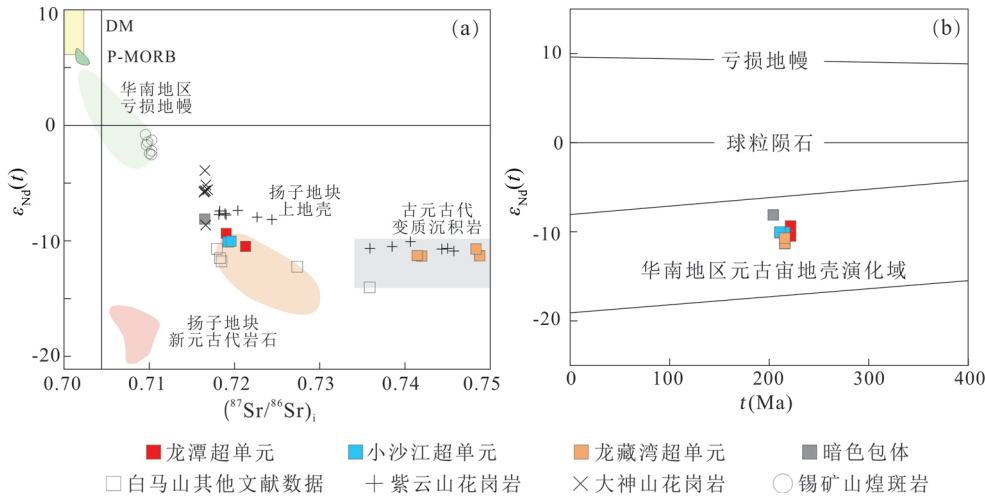


图8 白马山复式岩体花岗岩 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a) 和 $\epsilon_{Nd}(t) - \text{年龄}$ (b) 图解 (据孙涛等 2003 修改)

数据来源: 华南地区亏损地幔 (Li *et al.*, 2004); 扬子地块新元古代岩石 (Zhang *et al.*, 2009); 扬子地块上地壳 (祁昌实等, 2007); 古元古代变质沉积岩 (袁忠信等, 1991); DM 和 P-MORB (Zindler and Hart, 1986); 白马山其他文献 (陈卫锋等, 2007); 紫云山花岗岩和大神山花岗岩 (本课题组未发表的数据); 锡矿山煌斑岩数据 (胡阿香和彭建堂, 2016)

Fig. 8 Diagrams of $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a) and $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. Age (b) of granites from the Baimashan granitic complex (modified after Sun *et al.*, 2003)

Data sources: Depleted mantle of South China Block from Li *et al.* (2004); Neoproterozoic rock of Yangtz Block from Zhang *et al.* (2009); upper crust data of Yangtz Block from Qi *et al.* (2007); Paleoproterozoic metamorphic-sedimentary rock from Yuan *et al.* (1991); DM and P-MORB from Zindler and Hart (1986); Baimashan other granite from Chen *et al.* (2007); Ziyunshan granite and Dashenshan granite from our unpublished data; Xikuangshan lamprophyre from Hu and Peng (2016)

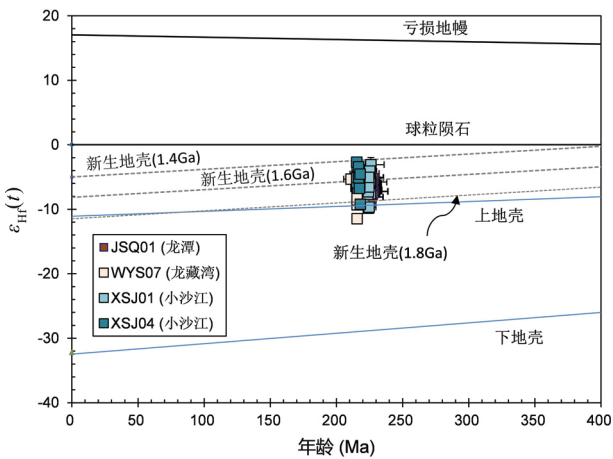


图9 白马山复式岩体锆石年龄- $\epsilon_{Hf}(t)$ 协变图

Fig. 9 Zircon age vs. $\epsilon_{Hf}(t)$ plot for the Baimashan complex

龙潭和小沙江超单元花岗岩,在矿物学上,都有较高含量的黑云母和角闪石。在化学组成上,铝饱和指数较低, A/CNK 为 0.97 ~ 1.07,属于准铝质;在 Rb-Y 协变图和 Q-A-P 图解中,这两个超单元大部分样品的变化趋势与 I 型花岗岩的演化趋势相似,个别样品处在 I-S 过渡类型花岗岩范围(图 7c, d)。在形成的温度上,龙潭和小沙江超单元花岗岩形成的温度为 753 ~ 803℃,均高于 750℃。在矿物学、化学组成

和形成温度上,龙潭和小沙江超单元大部分花岗岩都与 I 型花岗岩相似,少数几个样品显示 I-S 过渡类型性质。在 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{CaO} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 和 $\text{FeO}^T / (\text{MgO} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 图解中,这两个超单元花岗岩的样品均落入未分异的 I-S 型花岗岩区域内(图 7e, f)。根据以上特征可知,龙潭和小沙江超单元花岗岩主要为未分异的 I 型花岗岩,少数为 I-S 过渡类型。

龙藏湾超单元花岗岩中白云母含量较高,含有少量电气石, A/CNK 介于 1.12 ~ 1.29 之间,属于强过铝质,铝饱和和温度为 729 ~ 750℃,与 S 型花岗岩特征相似 (Lepvrier *et al.*, 1997; Carter *et al.*, 2001; Miller *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2007; Xiang and Shu, 2010; Zhang *et al.*, 2012)。在 Rb-Y 协变图解中,龙藏湾超单元样品变化的趋势与 S 型花岗岩的演化趋势相似(图 7c)。在 Q-A-P 图解中,龙藏湾超单元样品落入 S 型花岗岩的区域内(图 7d)。在 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{CaO} - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 和 $\text{FeO}^T / \text{MgO} - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 图解中,龙藏湾超单元样品落入分异的长英质花岗岩区域内(图 7e, f)。综合以上特征,龙藏湾超单元花岗岩为高分异的 S 型花岗岩。

4.3 岩浆源区

前人已有研究表明,花岗岩全岩 Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素是判别岩浆源区较为理想的示踪剂,这是因为地壳和地幔储库的 Sr-Nd-Hf 同位素比值存在明显的差异,利用 Sr-

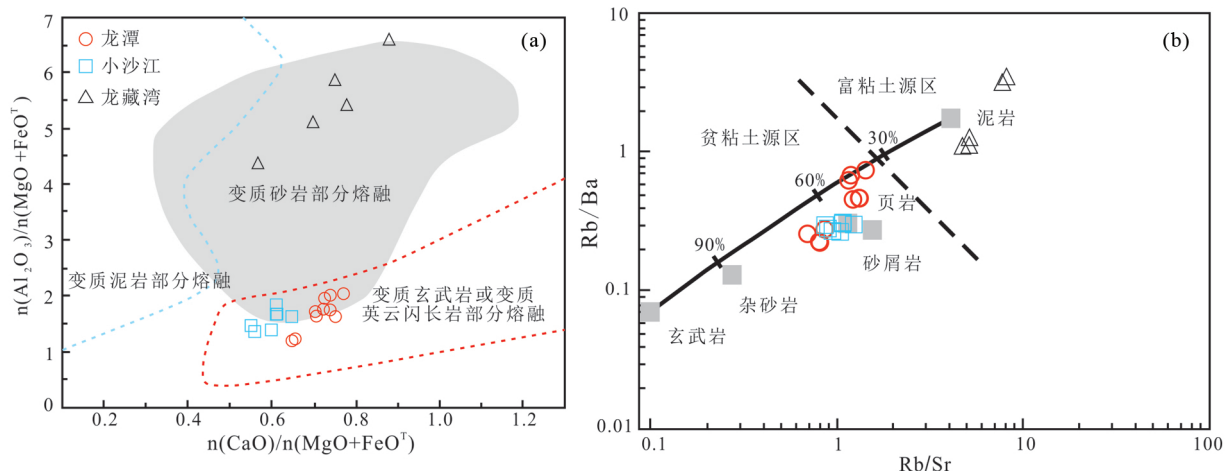


图 10 白马山复式岩体花岗岩源区性质判别图解

(a) A/MF-C/MF 图解 (Altherr *et al.*, 2000); (b) Rb/Ba-Rb/Sr 图解 (Sylvester, 1998)

Fig. 10 Classification diagrams of the sources for granites of the Baimashan granitic complex

(a) A/MF vs. C/MF diagram (Altherr *et al.*, 2000); (b) Rb/Ba vs. Rb/Sr diagram (Sylvester, 1998)

Nd 和 Hf 同位素体系可以有效地判别壳、幔物质来源和壳/幔相互作用 (肖庆辉等 2003; Kemp *et al.*, 2007; Dai *et al.*, 2008; 李献华等 2009)。本次对白马山复式岩体的龙潭、小沙江和龙藏湾超单元印支期花岗岩进行了系统的全岩 Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素分析。研究表明,龙潭和小沙江超单元花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成,均与扬子地块上地壳 Sr-Nd 同位素组成相似 (图 8a),而龙藏湾超单元花岗岩具有更高的放射成因 Sr 同位素组成, Sr-Nd 同位素与华南古元古代变质沉积岩相似 (图 8a)。所有花岗岩的 Nd 同位素演化,基本与华南地区古元古代地壳 Nd 同位素演化趋势一致,同时,龙潭超单元花岗岩中暗色包体 Sr-Nd 同位素也与华南地区古元古代地壳 Sr-Nd 同位素组成一致 (图 8b)。白马山岩体中所有花岗岩的锆石 Hf 同位素组成都与古老地壳 Hf 同位素组成一致 (图 9)。同时,这些花岗岩具有古老的二阶段 Nd 模式年龄 (1.76 ~ 1.91Ga) 和 Hf 模式年龄 (1.6 ~ 18Ga)。因此,全岩 Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素组成一致表明,白马山复式岩体中的印支期花岗岩,都是由华南地区古老地壳物质重熔产生的。

前人研究表明,不同物质熔融形成的花岗岩具有特定的主量和微量元素 (主要是高场强元素) 组成,因此,利用某些元素的比值可以判别花岗岩的源区物质组成 (Miller, 1985; Sylvester, 1998; Patiño Douce, 1999; Altherr *et al.*, 2000)。主量元素组成上,龙潭和小沙江超单元花岗岩样品大部分落入变质中基性岩石 (变质玄武岩或变质英云闪长岩) 部分熔融区域,少数落入处在变质砂岩与变质中基性岩石部分熔融重叠区域内 (图 10a)。相比龙藏湾超单元,龙潭和小沙江超单元花岗岩具有更低的 Rb/Ba 和 Rb/Sr 比值,暗示岩浆源区具有低的粘土含量。相反,龙藏湾超单元花岗岩样品全部落入变质砂岩部分熔融区域内 (图 10a),其 Rb/Ba 和 Rb/Sr 的比值较高,暗示龙藏湾超单元岩体的源区可能为富粘土的古

老杂砂岩地层的部分熔融形成 (图 10b)。因此,龙潭和小沙江超单元花岗岩主要由贫粘土的古老基性变质火成岩混入变质沉积岩重熔产生,而龙藏湾超单元花岗岩的成岩物质可能主要为华南上地壳古元古代富粘土的变质沉积岩发生部分熔融所致。

4.4 构造背景

华南板块由扬子陆块与华夏陆块在新元古代碰撞拼贴,晚古生代末华南大陆形成 (Shu and Charvet, 1996; Li *et al.*, 2002, 2008; Charvet, 2013),中生代与印支板块、华北板块等连为一体 (Lepvrier *et al.*, 1997; Nam, 1998; Lan *et al.*, 2000; Carter *et al.*, 2001; Nam *et al.*, 2001) 构成中国大陆的雏形。前人研究认为华南地区在中二叠世 (267 ~ 262Ma) 开始进入印支运动 (Li *et al.*, 2006),印支板块向北运动与华南板块发生碰撞拼合,并在 258 ~ 243Ma 达到高峰 (Lepvrier *et al.*, 1997; Nam, 1998; Lan *et al.*, 2000; Carter *et al.*, 2001; Nam *et al.*, 2001),华南板块受到印支板块的挤压,地壳从南向北递进增厚 (Zhou *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007; Mao *et al.*, 2011; 张龙升等 2012; Zhao *et al.*, 2013),随后,受热-应力的松弛作用,华南地块进入伸展应力体制 (周新民, 2003; Wang *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2012; 张龙升等 2012)。Wang *et al.* (2007) 认为华南印支早期花岗岩 (243 ~ 228Ma) 为挤压环境下的同碰撞花岗岩,而印支晚期 (220 ~ 206Ma) 则转变为伸展环境下的后碰撞花岗岩。同时,华南地区陆续确认了湖南锡田岩体、浙江大爽岩体、江西蔡江岩体和福建高溪岩体等为印支晚期 A 型花岗岩 (马振东和陈颖军 2000; Wang *et al.*, 2007; 柏道远等 2007; Sun *et al.*, 2011; 郭春丽等 2012; Mao *et al.*, 2013; Xia and Xu, 2020),也证实了华南地区在印支晚期由同碰撞挤压环境转为碰撞后伸展环境。湖南省内的印支期花岗岩年龄主要集中在 225 ~ 202Ma (丁

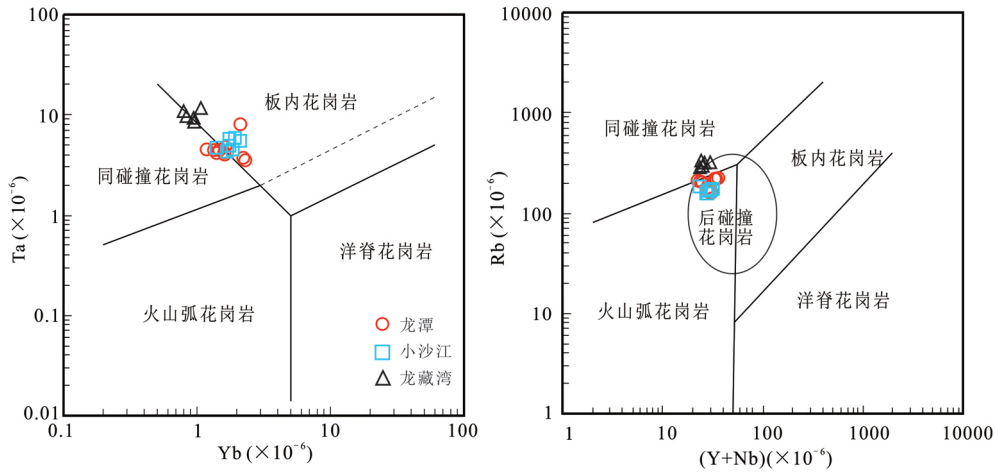


图 11 白马山复式岩体花岗岩 Ta-Yb 判别图解(a, 据 Pearce *et al.* , 1984) 和 Rb-(Y + Nb) 判别图解(b, 据 Pearce ,1996)

Fig. 11 Discrimination diagrams of Ta vs. Yb (a , after Pearce *et al.* , 1984) and Rb vs. (Y + Nb) (b , after Pearce , 1996) for granites of the Baimashan granitic complex

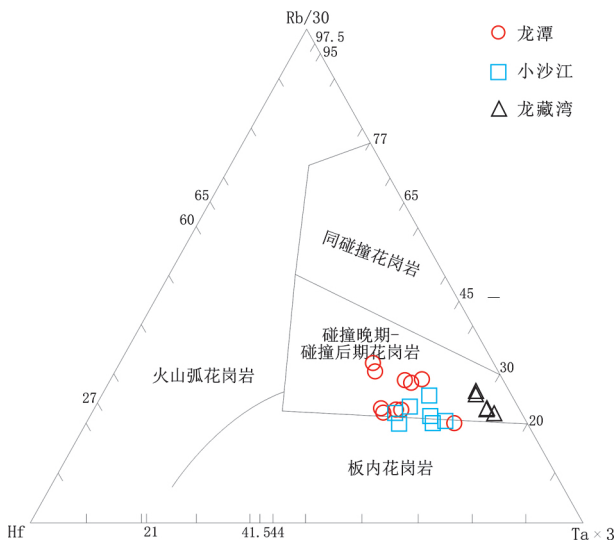


图 12 白马山复式岩体花岗岩 Rb-Hf-Ta 图解(据 Harris *et al.* , 1986)

Fig. 12 Rb-Hf-Ta diagram for granites of the Baimashan granitic complex (after Harris *et al.* , 1986)

兴等 2005; 刘伟等 2014) ,例如阳明山、邓阜仙、紫云山、沅山、大神山、锡田等岩体都被认为形成于碰撞后的伸展构造环境(丁兴等 2005; 陈卫锋等 2006; 柏道远等 2007; 张龙升等 2012; 郑佳浩和郭春丽 2012; 蔡杨等 2013; 刘凯等 2014; 刘伟等 2014) 。

根据前文的分析可知,白马山岩体中龙潭和小沙江超单元花岗岩属于 I 型或者 I-S 过渡型花岗岩,成岩物质主要为古元古代扬子地块上地壳中基性火成岩混有变质沉积岩发生部分熔融形成。通过 Ta-Yb 和 Rb-(Y + Nb) 图解(图 11) 以及 Rb-Hf-Ta 图解(图 12) 可以看出龙潭和小沙江超单元花岗岩属于板内碰撞后花岗岩,形成于碰撞后构造环境。对比

华南地区的印支期花岗岩可以发现,紫云山、沅山、大神山、锡田、十万大山等岩体具有与龙潭和小沙江超单元花岗岩相似的地球化学特征,都具有较高的 FeO^T 、 MgO 、 TiO_2 、 Sr 、 Ba 、 Zr 含量、 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值,岩体属于 I 型花岗岩,成岩物质主要为古元古代变质火成岩混有变质沉积岩部分熔融产生(丁兴等 2005; 柏道远等 2007; 张龙升等 2012; 刘凯等, 2014; 鲁玉龙等 2017) 。本文认为龙潭和小沙江超单元花岗岩可能是华南板块受印支板块碰撞挤压后地壳发生伸展减薄,地幔物质底侵诱发扬子地块变质基底的中基性火成岩和沉积岩发生部分熔融。

龙藏湾超单元花岗岩的地球化学特征与同样形成于印支晚期的龙潭、小沙江超单元花岗岩截然不同: 龙藏湾超单元花岗岩具有较高的 SiO_2 、 $K_2O + Na_2O$ 含量、铝饱和指数以及 Rb/Sr 、 Rb/Ba 比值; 稀土元素总量明显偏低,且具有较强的 Eu 负异常; 岩体属于 S 型花岗岩,源区为杂砂岩和泥岩。与区域内栗木、阳明山、王仙岭、冒峰、柯树岭、邓阜仙等岩体相似(陈卫锋等 2006; 柏道远等 2007; 郭春丽等 2012; 郑佳浩和郭春丽 2012; 蔡杨等 2013) 。通过 Ta-Yb 和 Rb-(Y + Nb) 图解(图 11) 以及 Rb-Hf-Ta 图解(图 12) 可以看出,龙藏湾超单元花岗岩也属于板内碰撞后花岗岩,形成于碰撞后构造环境。本文认为龙藏湾超单元花岗岩可能是华南板块受印支板块碰撞挤压后地壳发生伸展减薄,挤压加厚的华夏地块内变质沉积岩基底部分熔融形成的。

因此,本文认为龙潭、小沙江和龙藏湾超单元花岗岩形成于印支造山运动后的伸展构造环境中,是地壳伸展-减薄的构造背景下部分熔融的产物。华南中生代三叠纪构造-岩浆演化过程可能为: 晚二叠世-早三叠世,华南板块受南部印支板块和北部华北板块的碰撞挤压,华南块体南北两侧的古特提斯洋闭合,随后,由于岩石圈物质重力不稳发生垮塌以及热应力松弛作用的影响,华南进入后造山期的陆内伸展构

表6 白马山复式岩体周缘金、钨矿床的形成时间

Table 6 Metallogenic ages of Au-Sb-W polymetallic deposits close to the Baimashan granitic complex

矿床名称	定年对象及方法	年龄 (Ma)	参考文献
大坪金矿	含金石英脉流体包裹体, Rb-Sr 等时线法	204.8 ± 6.3	李华芹等, 2008
铲子坪金矿	含金石英脉流体包裹体, Rb-Sr 等时线法	205.6 ± 6.3	李华芹等, 2008
杏枫山金钨矿	砂卡岩中的榍石, U-Pb	215.2 ± 2.7	吕沅峻等, 2021
古台山金锑矿	云母 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	223.6 ± 5.3	Li <i>et al.</i> , 2018
杨家山钨铜矿	辉钼矿 Re-Os	404.2 ± 3.2	Xie <i>et al.</i> , 2019b

造环境,地壳减压熔融,幔源基性岩浆上升底侵,诱发不均一的古老地壳发生部分熔融。

4.5 成矿效应

白马山复式岩体周围发生强烈的金、钨成矿作用,但以往对白马山岩体和这些金属矿床的成因联系一直没有明确。近年来,随着研究程度的不断深入,在白马山复式岩体周围的金、钨矿床,除杨家山钨铜矿形成于加里东期(404.2 ± 3.2Ma, Xie *et al.*, 2019b)以外,其余的金、钨矿床均形成于印支期晚期(表6)如大坪金矿形成于204.8Ma(李华芹等, 2008),铲子坪金矿形成于205.6Ma(李华芹等, 2008),古台山金锑矿形成于223.6Ma(Li *et al.*, 2018),杏枫山金钨矿形成于215.2 ± 2.7Ma(吕沅峻等, 2021)。这些金、钨矿床的形成时代与白马山复式岩体花岗岩的形成年龄基本一致(图1b)。区域上,湘中盆地周围一些金、钨矿床也形成于印支期,如渣滓溪矿区细脉型钨矿床形成于227.3 ± 6.2Ma(王永磊等, 2012)、大溶溪砂卡岩型钨矿床形成于223.3 ± 3.9Ma(张龙升等, 2014)、最近新发现的木瓜园斑岩型钨矿床形成于225.4 ± 1.4Ma(陕亮等, 2019)、谢家山石英脉型钨矿形成时间为209.5 ± 2.4Ma(Zhang *et al.*, 2019)、包金山石英脉型金钨矿床形成于207.8 ± 1.5Ma(彭建堂等, 2021),位于湘中盆地中的曹家坝砂卡岩型钨矿床的成矿时间为196 ~ 206Ma(Xie *et al.*, 2019a),也形成于印支晚期。上述这些矿床均围绕印支期花岗岩或隐伏花岗岩分布(彭建堂等, 2017),且其成矿年龄数据,与区域上白马山、紫云山、大神山、桃江等侵入岩的成岩年龄吻合较好,因此,湘中地区金、钨矿床,均是与花岗质侵入岩有关的矿床,包括白马山岩体在内的湘中印支期花岗岩,具有良好金、钨成矿潜力。

5 结论

(1) 白马山岩体是一个复式花岗质侵入体,水车超单元形成于424.9 ± 2.2Ma,为加里东期岩浆活动产物;龙潭超单元形成于228.2 ± 1.3Ma、小沙江超单元形成于225.3 ± 1.1Ma和217.7 ± 0.8Ma之间、龙藏湾超单元形成于215.0 ± 1.2Ma,均为印支晚期岩浆活动的产物。

(2) 龙潭和小沙江超单元花岗岩主要由华南古元古代上

地壳中变质中基性火成岩混有部分沉积岩发生部分熔融形成,具有I型或I-S过渡型花岗岩的特征;而龙藏湾超单元主要由华南古元古代上地壳变泥质岩发生部分熔融形成,是典型S型花岗岩。白马山复式岩体印支期花岗岩可能是华南板块受印支板块碰撞挤压后地壳发生伸展减薄背景下形成的。

(3) 白马山复式岩体中印支期花岗岩在时间、空间上与周缘的金、钨矿床基本一致,暗示其具有良好的成矿潜力,与金、钨矿床可能具有内在的成因联系。

致谢 本文实验测试和分析过程中得到中南大学地球科学与信息物理学院张德贤老师、南京聚谱检测科技有限责任公司李亮老师、中国科学院地球化学研究所黄金川博士的热心帮助,在此表示衷心的感谢!感谢审稿专家提出的宝贵修改意见!

References

- Altherr R, Holl A, Hegner E, Langer C and Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1-3): 51-73
- Bai DY, Jia BH, Ma TQ, Wang XH, Zhang XY and Chen BH. 2007. Relationship of petro-geochemical characteristics to metallogenic capacity differences between Indosinian and Early Yanshanian granites in southeastern Hunan. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 387-398 (in Chinese with English abstract)
- Bai DY, Chen BH, Zhong X, Jia PY and Xiong X. 2014. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemistry and tectonic setting of Indosinian Wutuan pluton in southwestern Hunan Province. *Geology in China*, 41(6): 2002-2018 (in Chinese with English abstract)
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-4): 243-258
- Bowden Pand Kinnaird JA. 1984. The petrology and geochemistry of alkaline granites from Nigeria. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 35(1-3): 199-211
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hunan Province. 1988. *Regional Geology of Hunan Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1-719 (in Chinese)
- Cai Y, Lu JJ, Ma DS, Huang Hand Zhang HF. 2013. Chronology and geochemical characteristics of Late Indosinian Dengfuxian two-mica granite in eastern Hunan Province, China, and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4215-4231 (in Chinese with English abstract)
- Carter A, Roques D, Bristow Cand Kinny P. 2001. Understanding

- Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam. *Geology*, 29 (3): 211–214
- Charvet J. 2013. The Neoproterozoic–Early Paleozoic tectonic evolution of the South China Block: An overview. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 198–209
- Chen J, Wang RC, Zhu JC, Lu JJ and Ma DS. 2014. Multiple-aged granitoids and related tungsten-tin mineralization in the Nanling Range, South China. *Scientia Sinica (Terrae)*, 44(1): 11–121 (in Chinese)
- Chen WF, Chen PR, Zhou XM, Huang HY, Ding X and Sun T. 2006. Single-zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the Yangmingshan granitic pluton in Hunan, South China and its petrogenetic study. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1065–1077 (in Chinese with English abstract)
- Chen WF, Chen PR, Huang HY, Ding X and Sun T. 2007. The geochronology and geochemistry studies on the Baimashan granite, Hunan. *Science in China (Series D)*, 37(7): 873–893 (in Chinese)
- Cheng SB, Fu JM, Ma LY, Jiang GX, Chen XQ, Lu YY and Tong XR. 2013. Indosinian metallogenic activity in Yuechengling-Miaoaershan area, northeastern Guangxi: Implications from zircon U-Pb ages and Hf isotopic constraint on ore-forming granites in Youmaling and Jiepai deposits. *Geology in China*, 40(4): 1189–1201 (in Chinese with English abstract)
- Chu Y, Lin W, Faure M, Wang QC and Ji WB. 2012. Phanerozoic tectonothermal events of the Xuefengshan Belt, central South China: Implications from U-Pb age and Lu-Hf determinations of granites. *Lithos*, 150: 243–255
- Dai BZ, Jiang SY, Jiang YH, Zhao KD and Liu DY. 2008. Geochronology, geochemistry and Hf-Sr-Nd isotopic compositions of Huziyuan mafic xenoliths, southern Hunan Province, South China: Petrogenesis and implications for lower crust evolution. *Lithos*, 102(1–2): 65–87
- Ding X, Chen PR, Chen WF, Huang HY and Zhou XM. 2005. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for granite in Weishan, Hunan: Its petrogenetic implications and significance. *Science in China (Series D)*, 37(7): 606–616 (in Chinese)
- Fu SL, Hu RZ, Bi XW, Chen YW, Yang JH and Huang Y. 2015. Origin of Triassic granites in central Hunan Province, South China: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf and O isotopes. *International Geology Review*, 57(2): 97–111
- Gao S, Luo TC, Zhang BR, Zhang HF, Han YW and Zhao ZD, Kern H. 1999. The structure and composition of the crust in the eastern China. *Science in China (Series D)*, 29(3): 204–213 (in Chinese)
- Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson SE, O'Reilly SY, Xu XS and Zhou XM. 2002. Zircon chemistry and magma genesis, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61: 237–269
- Griffin WL, Belousova EA and Shee SR. 2004. Crustal evolution in the northern Yilarn Craton: U-Pb and Hf isotope evidence from detrital zircons. *Precambrian Research*, 131(3–4): 231–282
- Guo CL, Zhang JH, Luo FS and Zeng ZL. 2012. Petrography, genetic types and geological dynamical settings of the Indosinian granitoids in South China. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(3): 457–472 (in Chinese with English abstract)
- Harris NBW, Pearce JA and Tindle AG. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. *Geological Society, London, Special Publications*, 19: 67–81
- He ZY, Xu XS and Niu YL. 2010. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite-syenite-gabbro association from inland South China. *Lithos*, 119(3–4): 621–641
- Hu AX and Peng JT. 2016. Mesozoic lamprophyre and its origin in the Xikuangshan district, central Hunan. *Acta Petrologica Sinica*, 32(7): 2041–2056 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Mao JW, Hua RM, Bi XW, Zhong H, Song XY and Tao Y. 2010. Some scientific questions on the intra-continental metallogeny in the South China continent. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 13–26 (in Chinese with English abstract)
- Hu ZC, Gao S, Liu YS, Hu SH, Chen HH and Yuan HL. 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8): 1093–1101
- Hu ZC, Liu YS, Chen L, Zhou L, Li M, Zong KQ, Zhu LY and Gao S. 2011. Contrasting matrix induced elemental fractionation in NIST SRM and rock glasses during laser ablation ICP-MS analysis at high spatial resolution. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(2): 425–430
- Hu ZC, Liu YS, Gao S, Liu WG, Zhang W, Tong XR, Lin L, Zong KQ, Li M, Chen HH, Zhou L and Yang L. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391–1399
- Kemp AIS, Hawkesworth CJ, Foster GL, Paterson BA, Woodhead JD, Hergt JM, Gray CM and Whitehouse MJ. 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon. *Science*, 315(5814): 980–983
- Lan CY, Chung SL, Shen JJS, Lo CH, Wang PL, Hoa TT, Thanh HH and Mertzman SA. 2000. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of granitic rocks from northern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 267–280
- Lepvrier C, Maluski H, Van Vuong N, Roques D, Axente V and Rangin C. 1997. Indosinian NW-trending shear zones within the Truong Son belt (Vietnam) ⁴⁰Ar/³⁹Ar Triassic ages and Cretaceous to Cenozoic overprints. *Tectonophysics*, 283(1–4): 105–127
- Li HQ, Wang DH, Chen FW, Mei YP and Cai H. 2008. Study on chronology of the Chanziping and Daping gold deposit in Xuefeng mountains, Hunan Province. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 900–905 (in Chinese with English abstract)
- Li JH, Zhang YQ, Xu XB, Li HL, Dong SW and Li TD. 2014. SHRIMP U-Pb dating of zircons from the Baimashan Longtan super-unit and Wawutang granites in Hunan Province and its geological implication. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(1): 158–175 (in Chinese with English abstract)
- Li W, Xie GQ, Mao JW, Zhang ZY, Fu B and Lu S. 2018. Muscovite-⁴⁰Ar/³⁹Ar and in situ sulfur isotope analyses of the slate-hosted Gutaishan Au-Sb deposit, South China: Implications for possible Late Triassic magmatic-hydrothermal mineralization. *Ore Geology Reviews*, 101: 839–853
- Li XH, Chung SL, Zhou HW, Lo CH, Liu Y and Chen CW. 2004. Jurassic intraplate magmatism in southern Hunan-eastern Guangxi: ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating, geochemistry, Sr-Nd isotopes and implications for the tectonic evolution of SE China. *Geological Society, London, Special Publications*, 226: 193–215
- Li XH, Li ZX, Li WX and Wang YJ. 2006. Initiation of the Indosinian orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island. *The Journal of Geology*, 114(3): 341–353
- Li XH, Li ZX, Li WX, Liu Y, Yuan C, Wei GJ and Qi CS. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96(1–2): 186–204
- Li XH, Li WX, Li ZX and Liu Ying. 2008. 850–790 Ma bimodal volcanic and intrusive rocks in northern Zhejiang, South China: A major episode of continental rift magmatism during the breakup of Rodinia. *Lithos*, 102(1–2): 341–357
- Li XH, Li WX, Wang XC, Li QL, Liu Y and Tang GQ. 2009. Effect of mantle-derived magma during the Early Yanshanian granite plutons: Constraints from the in-situ analysis of Hf and O isotopes in zircon. *Science in China (Series D)*, 39(7): 872–887 (in Chinese)
- Li ZX, Li XH, Zhou HW and Kinny PD. 2002. Grenvillian continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. *Geology*, 30(2): 163–166

- Li ZX and Li XH. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179–182
- Li ZX, Li XH, Chung SL, Lo CH, Xu XS and Li WX. 2012. Magmatic switch-on and switch-off along the South China continental margin since the Permian: Transition from an Andean-type to a Western Pacific-type plate boundary. *Tectonophysics*, 532–535: 271–290
- Liu JQ, Xie Y, Zhao Z, Lin JS, Feng WM and Huang XP. 2013. The geochronologic characteristics of Baimashan granite in western Hunan Province and its tectonic significance. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 25–35 (in Chinese with English abstract)
- Liu K, Mao JR, Zhao XL, Ye HM and Hu Q. 2014. Geological and geochemical characteristics and genetic significance of the Ziyunshan pluton in Hunan Province. *Acta Geologica Sinica*, 88(2): 208–227 (in Chinese with English abstract)
- Liu W, Zeng ZX, Chen DL, He CC, Mo HR, Zeng ZF, Wei YX and Xu DL. 2014. Petrogenesis of the Yangmingshan composite granites in South Hunan Province: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1485–1504 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010a. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010b. 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
- Lu YL, Peng JT, Yang JH, Hu AX, Li YK, Tan HY and Xiao QY. 2017. Petrogenesis of the Ziyunshan pluton in central Hunan, South China: Constraints from zircon U-Pb dating, element geochemistry and Hf-O isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 33(6): 1705–1728 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2008. User's Manual for Isoplot 3.70: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel, 1–77
- Luo ZG, Wang YJ, Zhang FF, Zhang AM and Zhang YZ. 2010. LA-ICPMS zircon U-Pb dating for baimashan and Jintan Indosinian granitic plutons and its petrogenetic implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(2): 282–290 (in Chinese with English abstract)
- Lv YJ, Peng JT and Cai YF. 2021. Geochemical characteristics, U-Pb dating of hydrothermal titanite from the Xingfengshan tungsten deposit in Hunan Province and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 37(3): 830–846 (in Chinese with English abstract)
- Ma ZD and Chen YJ. 2000. Geochemical discussion on Paleo-Mesoproterozoic basement crust of Yangtze and Cathaysia cratons in southern China: Using trace elements as tracers. *Geochimica*, 29(6): 525–531 (in Chinese with English abstract)
- Mao JR, Takahashi Y, Kee WS, Li ZL, Ye HM, Zhao XL, Liu K and Zhou J. 2011. Characteristics and geodynamic evolution of Indosinian magmatism in South China: A case study of the Guikeng pluton. *Lithos*, 127(3–4): 535–551
- Mao JR, Ye HM, Liu K, Li ZL, Takahashi Y, Zhao XL and Kee WS. 2013. The Indosinian collision-extension event between the South China Block and the Palaeo-Pacific plate: Evidence from Indosinian alkaline granitic rocks in Dashuang, eastern Zhejiang, South China. *Lithos*, 172–173: 81–97
- Mao JW and Wang ZL. 2000. A preliminary study on the time limit of large-scale mineralization in eastern China and its geodynamic background. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 403–405 (in Chinese)
- Mao JW, Xie GQ, Li XF, Zhang CQ and Mei YX. 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45–55 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Ouyang HG, Song SW, Santosh M, Yuan SD, Zhou ZH, Zheng W, Liu H, Liu P, Cheng YB and Chen MH. 2019. Geology and metallogeny of tungsten and tin deposits in China. *Society of Economic Geologists Special Publications*, 22: 411–482
- Mao JW, Zheng W, Xie GQ, Lehmann B and Goldfarb R. 2021. Recognition of a Middle-Late Jurassic arc-related porphyry copper belt along the southeast China coast: Geological characteristics and metallogenetic implications. *Geology*, 49: doi: 10.1130/G48615.1
- Mearns EW. 1986. Sm-Nd ages for Norwegian garnet peridotite. *Lithos*, 19(3–4): 269–278
- Middlemost EAK. 1985. *Magmas and Magmatic Rocks*. London: Longman, 1–266
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 215–224
- Miller CF. 1985. Are strongly peraluminous magmas derived from pelitic sedimentary sources? *The Journal of Geology*, 93(6): 673–689
- Miller CF, McDowell SM and Mapes RW. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31(6): 529–532
- Nam TN. 1998. Thermotectonic events from Early Proterozoic to Miocene in the Indochina craton: Implication of K-Ar ages in Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16(5–6): 475–484
- Nam TN, Sano Y, Terada K, Toriumi M, Van Quynh P and Dung LT. 2001. First SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites from the Kontum massif (Vietnam) and tectonothermal implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19(1–2): 77–84
- Patiño Douce AE. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? In: Castro A, Fernandez C and Vigneresse JL (eds.). *Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques*. Geological Society, London, Special Publications, 168: 55–75
- Pearce J. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4): 120–125
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81
- Peng JT, Zhou MF, Hu RZ, Shen NP, Yuan SD, Bi XW, Du AD and Qu WJ. 2006. Precise molybdenite Re-Os and mica Ar-Ar dating of the Mesozoic Yaogangxian tungsten deposit, central Nanling district, South China. *Mineralium Deposita*, 41(7): 661–669
- Peng JT, Hu RZ, Yuan SD, Bi XW and Shen NP. 2008. The time ranges of granitoid emplacement and related nonferrous metallic mineralization in southern Hunan. *Geological Review*, 54(5): 617–625 (in Chinese with English abstract)
- Peng JT, Hu AX, Xiao JY, Guo N and Xie Q. 2017. Mineralization of two different gold deposits hosted in metamorphic terrane. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(Supp. 1): 146 (in Chinese)
- Peng JT, Wang C, Li YK, Hu AX, Lu YL and Chen XJ. 2021. Geochemical characteristics and Sm-Nd geochronology of scheelite in the Baojinshan ore district, central Hunan. *Acta Petrologica Sinica*, 37(3): 665–682 (in Chinese with English abstract)
- Qi CS, Deng XG, Li WX, Li XH, Yang YH and Xie LW. 2007. Origin of the Darongshan-Shiwandashan S-type granitoid belt from southeastern Guangxi: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 403–412 (in Chinese with English abstract)
- Qi L, Hu J and Gregoire DC. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51(3): 507–513
- Qiu L, Yan DP, Zhou MF, Arndt NT, Tang SL and Qi L. 2014. Geochronology and geochemistry of the Late Triassic Longtan pluton in South China: Termination of the crustal melting and Indosinian orogenesis. *International Journal of Earth Sciences*, 103(3): 649–666
- Regional Geological Investigation of Bureau of Geology and Mineral Resource of Hunan Province. 1995. Classification of unit and super-unit for granite and its metallogenetic specialization, Hunan. Hunan

- Geology, (A08): 1–84 (in Chinese)
- Shang L, Pang YC, Ke XZ, Liu JJ, Chen WH, Niu ZJ, Xu DM, Long WG and Wang BQ. 2019. Diagenetic and metallogenic age of the Muguayuan tungsten polymetallic deposit and its effect on regional mineralization, Taojiang County, northeastern Hunan Province, China. *Geological Science and Technology Information*, 38(1): 100–112 (in Chinese with English abstract)
- Shu L and Charvet J. 1996. Kinematics and geochronology of the Proterozoic Dongxiang–Shexian ductile shear zone: With HP metamorphism and ophiolitic melange (Jiangnan Region, South China). *Tectonophysics*, 267(1–4): 291–302
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Sun T, Zhou XM, Chen PR, Li HM, Zhou HY, Wang ZC and Shen WZ. 2003. Strongly peraluminous granites of Mesozoic in eastern Nanling Range, southern China: Petrogenesis and implications for tectonics. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1209–1218 (in Chinese)
- Sun Y, Ma CQ, Liu YY and She ZB. 2011. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of Late Triassic aluminous A-type granites in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42: 1117–1131
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1–4): 29–44
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Carlton: Blackwell Scientific Publication, 1–312
- Wang YJ, Zhang YH, Fan WM, Xi XW, Guo F and Lin G. 2002. Numerical modeling for generation of Indosinian peraluminous granitoids Hunan Province: Basaltic underplating vs tectonic thickening. *Science in China (Series D)*, 32(6): 491–499 (in Chinese)
- Wang YJ, Fan WM, Guo F, Peng TP and Li CW. 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou–Linwu fault, South China: Implications for the lithospheric boundary between the Yangtze and Cathaysia blocks. *International Geology Review*, 45(3): 263–286
- Wang YJ, Zhang YH, Fan WM and Peng TP. 2005. Structural signatures and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Indosinian Xuefengshan tectonic belt, South China Block. *Journal of Structural Geology*, 27(6): 985–998
- Wang YJ, Fan WM, Liang XQ, Peng TP and Shi YR. 2005. SHRIMP zircon U–Pb geochronology of Indosinian granites in Hunan province and its petrogenetic implications. *Chinese Science Bulletin*, 50(12): 1259–1266 (in Chinese)
- Wang YJ, Fan WM, Sun M, Liang XQ, Zhang YH and Peng TP. 2007. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province. *Lithos*, 96(3–4): 475–502
- Wang YL, Chen YC, Wang DH, Xu J and Chen ZH. 2012. Scheelite Sm–Nd dating of the Zhazixi W–Sb deposit in Hunan and its geological significance. *Geology of China*, 39(5): 1339–1344 (in Chinese with English abstract)
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419
- Xia Y, Xu XS, Zou HB and Liu L. 2014. Early Paleozoic crust–mantle interaction and lithosphere delamination in South China Block: Evidence from geochronology, geochemistry, and Sr–Nd–Hf isotopes of granites. *Lithos*, 184–187: 416–435
- Xia Y and Xu XS. 2020. The epilogue of Paleo–Tethyan tectonics in the South China Block: Insights from the Triassic aluminous A-type granitic and bimodal magmatism. *Journal of Asian Earth Sciences*, 190: 104129, doi: 10.1016/j.jseas.2019.104129
- Xiang L and Shu LS. 2010. Pre–Devonian tectonic evolution of the eastern South China Block: Geochronological evidence from detrital zircons. *Science China (Earth Sciences)*, 53(10): 1427–1444 (in Chinese)
- Xiao QH, Xing ZY, Zhang Y, Wu GY and Tong JS. 2003. The major frontiers of the recent studies of granite. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 221–229 (in Chinese with English abstract)
- Xie GQ, Mao JW, Bagas L, Fu B and Zhang ZY. 2019a. Mineralogy and titanite geochronology of the Caojiaba W deposit, Xiangzhong metallogenic province, southern China: Implications for a distal reduced skarn W formation. *Mineralium Deposita*, 54(3): 459–472
- Xie GQ, Mao JW, Li W, Fu B and Zhang ZY. 2019b. Granite-related Yangjiashan tungsten deposit, southern China. *Mineralium Deposita*, 54: 67–80
- Yang JH, Kang LF, Peng JT, Zhong H, Gao JF and Liu L. 2018. In-situ elemental and isotopic compositions of apatite and zircon from the Shuikoushan and Xihuashan granitic plutons: Implication for Jurassic granitoid-related Cu–Pb–Zn and W mineralization in the Nanling Range, South China. *Ore Geology Reviews*, 93: 382–403
- Yuan SD, Williams–Jones AE, Mao JW, Zhao PL, Yan C and Zhang DL. 2018a. 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 SD, Williams–Jones AE, Romer RL, Zhao PL and Mao JW. 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 YB, Yuan SD, Mao JW, Zhao PL, Yan C, Zhao HJ, Zhang DL, Shuang Y and Peng JT. 2018b. Recognition of Late Jurassic W–Sn mineralization and its exploration potential on the western margin of the Caledonian Guidong granite batholith, Nanling Range, South China: Geochronological evidence from the Liuyuan Sn and Zhuyuanli W deposits. *Ore Geology Reviews*, 93: 200–210
- Yuan ZX, Wu LS, Zhang ZQ and Ye XJ. 1991. The Sm–Nd, Re–Sr isotopic age-dating of Mayuan Group in northern Fujian. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 10(2): 127–132 (in Chinese with English abstract)
- Zhang FF, Wang YJ, Zhang AM, Fan WM, Zhang YZ and Zi JW. 2012. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of Middle Paleozoic (Kwangian) massive granites in the eastern South China Block. *Lithos*, 150: 188–208
- Zhang LS, Peng JT, Zhang DL, Hu AX and Yang JH. 2012. Geochemistry and petrogenesis of the Indosinian Dashenshan granite, western Hunan, South China. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(1): 137–148 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LS, Peng JT, Hu AX, Lin FM and Zhang T. 2014. Re–Os dating of molybdenite from Darongxi tungsten deposit in western Hunan and its geological implications. *Mineral Deposits*, 33(1): 181–189 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SB, Zheng YF, Zhao ZF, Wu YB, Yuan HL and Wu FY. 2009. Origin of TTG-like rocks from anatexis of ancient lower crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic granitoids in South China. *Lithos*, 113(3–4): 347–368
- Zhang YP, Zhang J, Chen BH, Wang ZX, Zhang BH and Zhao H. 2015. Geochronology of Baimashan granitic composite batholith of Hunan Province and its constraints on the timing of regional deformation. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 1–17 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZY, Xie GQ, Mao JW, Liu WG, Olin P and Li W. 2019. Sm–Nd dating and in-situ LA–ICP–MS trace element analyses of scheelite from the Longshan Sb–Au deposit, Xiangzhong metallogenic province, South China. *Minerals*, 9(2): 87, doi: 10.3390/min9020087
- Zhao KD, Jiang SY, Sun T, Chen WF, Ling HF and Chen PR. 2013. Zircon U–Pb dating, trace element and Sr–Nd–Hf isotope geochemistry of Paleozoic granites in the Miao’ershan–Yuechengling batholith, South China: Implication for petrogenesis and tectonic–

- magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 244 – 264
- Zheng JH and Guo CL. 2012. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Wangxianling granitic intrusion in South Hunan Province and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (1): 75 – 90 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM. 2003. My thinking about granite geneses of South China. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 556 – 565 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM, Sun T, Shen WZ, Shu LS and Niu YL. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26 – 33
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493 – 571
- Zou XW, Cui S, Qu WJ, Bai YS and Chen XQ. 2009. Re-Os isotope dating of the Ligufu tungsten-tin polymetallic deposit in Dupangling area, Guangxi. *Geology in China*, 36(4): 837 – 844 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 柏道远, 贾宝华, 马铁球, 王先辉, 张晓阳, 陈必河. 2007. 湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力差异与岩石地球化学特征关系探讨. *岩石矿物学杂志*, 26(5): 387 – 398
- 柏道远, 陈必河, 钟响, 贾朋远, 熊雄. 2014. 湘西南印支期五团岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及形成背景. *中国地质*, 41(6): 2002 – 2018
- 蔡杨, 陆建军, 马东升, 黄卉, 张怀峰. 2013. 湖南邓阜仙印支晚期二云母花岗岩年代学、地球化学特征及其意义. *岩石学报*, 29(12): 4215 – 4231
- 陈骏, 王汝成, 朱金初, 陆建军, 马东升. 2014. 南岭多时代花岗岩的锡钨成矿作用. *中国科学(地球科学)*, 44(1): 111 – 121
- 陈卫锋, 陈培荣, 周新民, 黄宏业, 丁兴, 孙涛. 2006. 湖南阳明山岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成因研究. *地质学报*, 80(7): 1065 – 1077
- 陈卫锋, 陈培荣, 黄宏业, 丁兴, 孙涛. 2007. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究. *中国科学(D 辑)*, 37(7): 873 – 893
- 程顺波, 付建明, 马丽艳, 蒋桂新, 陈希清, 卢友月, 童喜润. 2013. 桂东北越城岭-苗儿山地区印支期成矿作用: 油麻岭和界牌矿区成矿花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. *中国地质*, 40(4): 1189 – 1201
- 丁兴, 陈培荣, 陈卫锋, 黄宏业, 周新民. 2005. 湖南沅山花岗岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年: 成矿启示和意义. *中国科学(D 辑)*, 35(7): 606 – 616
- 高山, 骆庭川, 张本仁, 张宏飞, 韩吟文, 赵志丹, Kern H. 1999. 中国东部地壳的结构和组成. *中国科学(D 辑)*, 29(3): 204 – 213
- 郭春丽, 郑佳浩, 楼法生, 曾载淋. 2012. 华南印支期花岗岩类的岩石特征、成因类型及其构造动力学背景探讨. *大地构造与成矿学*, 36(3): 457 – 472
- 胡阿香, 彭建堂. 2016. 湘中锡矿中生代煌斑岩及其成因研究. *岩石学报*, 32(7): 2041 – 2056
- 胡瑞忠, 毛景文, 范蔚茗, 华仁民, 毕献武, 钟宏, 宋谢炎, 陶琰. 2010. 华南陆块内成矿作用的一些科学问题. *地学前缘*, 17(2): 13 – 26
- 湖南省地矿局区调所. 1995. 湖南省花岗岩单元-超单元划分及其成矿专属性. *湖南地质*, (A08): 1 – 84
- 湖南省地质矿产局. 1988. 湖南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 719
- 李华芹, 王登红, 陈富文, 梅玉萍, 蔡红. 2008. 湖南雪峰山地区铲子坪和大坪金矿成矿作用年代学研究. *地质学报*, 82(7): 900 – 905
- 李建华, 张岳桥, 徐先兵, 李海龙, 董树文, 李廷栋. 2014. 湖南白马山龙潭超单元、瓦屋塘花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(1): 158 – 175
- 李献华, 李武显, 王选策, 李秋立, 刘宇, 唐国强. 2009. 幔源岩浆在南岭燕山早期花岗岩形成中的作用: 锆石原位 Hf-O 同位素制约. *中国科学(D 辑)*, 39(7): 872 – 887
- 刘建清, 谢渊, 赵瞻, 林家善, 冯伟明, 黄学平. 2013. 湖南雪峰山地区白马山花岗岩年代学特征及构造意义. *地学前缘*, 20(5): 25 – 35
- 刘凯, 毛建仁, 赵希林, 叶海敏, 胡青. 2014. 湖南紫云山岩体的地质地球化学特征及其成因意义. *地质学报*, 88(2): 208 – 227
- 刘伟, 曾佐勋, 陈德立, 贺赤诚, 莫皓然, 曾志方, 魏运许, 徐大良. 2014. 湖南阳明山复式花岗岩的岩石成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素约束. *岩石学报*, 30(5): 1485 – 1504
- 鲁玉龙, 彭建堂, 阳杰华, 胡阿香, 李玉坤, 谭辉跃, 肖秋越. 2017. 湘中紫云山岩体的成因: 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学及 Hf-O 同位素制约. *岩石学报*, 33(6): 1705 – 1728
- 罗志高, 王岳军, 张菲菲, 张爱梅, 张玉芝. 2010. 金滩和白马山印支期花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其成矿启示. *大地构造与成矿学*, 34(2): 282 – 290
- 吕沅峻, 彭建堂, 蔡亚飞. 2021. 湖南杏枫山砂卡岩钨矿中热液榴石的矿物学、地球化学及 U-Pb 年代学研究. *岩石学报*, 37(3): 830 – 846
- 马振东, 陈颖军. 2000. 华南扬子与华夏陆块古-中元古代基底地壳微量元素地球化学示踪探讨. *地球化学*, 29(6): 525 – 531
- 毛景文, 王志良. 2000. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨. *矿物岩石地球化学通报*, 19(4): 403 – 405
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. *地学前缘*, 11(1): 45 – 55
- 彭建堂, 胡瑞忠, 袁顺达, 毕献武, 沈能平. 2008. 湘南中生代花岗岩质岩石成矿成矿的时限. *地质评论*, 54(5): 617 – 625
- 彭建堂, 胡阿香, 肖静芸, 郭宁, 谢青. 2017. 湖南变质岩体中两类金矿床的成矿作用研究. *矿物学报*, 37(增1): 146
- 彭建堂, 王川, 李玉坤, 胡阿香, 鲁玉龙, 陈宪佳. 2021. 湘中包金山矿区白钨矿的地球化学特征及 Sm-Nd 同位素年代学. *岩石学报*, 37(3): 665 – 682
- 祁昌实, 邓希光, 李武显, 李献华, 杨岳衡, 谢烈文. 2007. 桂东南大容山-十万大山 S 型花岗岩带的成因: 地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约. *岩石学报*, 23(2): 403 – 412
- 陕亮, 庞迎春, 柯贤忠, 刘家军, 陈文辉, 牛志军, 徐德明, 龙文国, 王滨清. 2019. 湖南省东北部地区桃江县木瓜园钨多金属矿成矿时代及其对区域成矿作用的启示. *地质科技情报*, 38(1): 100 – 112
- 孙涛, 周新民, 陈培荣, 李惠民, 周红英, 王志成, 沈渭洲. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义. *中国科学*

- (D 辑), 33(12): 1209 - 1218
- 王永磊, 陈毓川, 王登红, 徐珏, 陈郑辉. 2012. 湖南渣滓溪 W-Sb 矿床白钨矿 Sm-Nd 测年及其地质意义. 中国地质, 39(5): 1339 - 1344
- 王岳军, Zhang YH, 范蔚茗, 席先武, 郭锋, 林舸. 2002. 湖南印支期过铝质花岗岩的形成: 岩浆底侵与地壳加厚热效应的数值模拟. 中国科学(D 辑), 32(6): 491 - 499
- 王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 彭头平, 石玉若. 2005. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示. 科学通报, 50(12): 1259 - 1266
- 肖庆辉, 邢作云, 张昱, 伍光英, 董劲松. 2003. 当代花岗岩研究的几个重要前沿. 地学前缘, 10(3): 221 - 229
- 袁忠信, 吴良士, 张宗清, 叶笑江. 1991. 闽北麻源群 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素年龄研究. 岩石矿物学杂志, 10(2): 127 - 132
- 张龙升, 彭建堂, 张东亮, 胡阿香, 阳杰华. 2012. 湘西大神山印支期花岗岩的岩石学和地球化学特征. 大地构造与成矿学, 36(1): 137 - 148
- 张龙升, 彭建堂, 胡阿香, 林芳梅, 张婷. 2014. 湘西大溶溪钨矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义. 矿床地质, 33(1): 181 - 189
- 张义平, 张进, 陈必河, 王宗秀, 张北航, 赵衡. 2015. 湖南白马山复式花岗岩基年代学及对区域构造变形时间的约束. 地质学报, 89(1): 1 - 17
- 郑佳浩, 郭春丽. 2012. 湘南王仙岭花岗岩体的锆石 U-Pb 年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 28(1): 75 - 90
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. 高校地质学报, 9(4): 556 - 565
- 邹先武, 崔森, 屈文俊, 白云山, 陈希清. 2009. 广西都庞岭李贵福钨锡多金属矿 Re-Os 同位素定年研究. 中国地质, 36(4): 837 - 844