

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.005>



湘中白马山复式岩体年代学、Hf 同位素、地球化学及岩石成因

刘贤红¹, 刘德亮^{2*}, 娄元林^{1,3,4*}, 潘思远¹, 肖涛¹, 刘小坚¹, 张珍力¹

1. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙 410600

2. 中国地质大学紧缺战略矿产资源协同创新中心, 湖北武汉 430074

3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 10037

4. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 10083

摘要: 为深入探讨华南早古生代和早中生代的构造演化、岩浆活动及其资源成矿效应, 对湘中地区白马山复式岩体进行了系统的野外调查, 并开展了锆石年代学、Hf 同位素及地球化学研究。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析结果显示, 白马山岩体水车超单元糜棱岩化花岗岩和龙潭一小沙江超单元黑云母花岗闪长岩的加权平均年龄分别为 409 ± 2 Ma 和 211 ± 1 Ma, 二者分别为加里东晚期和印支晚期岩浆活动的产物。加里东期糜棱岩化花岗岩具有高硅、高碱和强过铝质的特征, 表现出强烈的负 Eu 异常, 结合其富集的 Hf 同位素组成 [$\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -13.4 \sim -5.4$], 可推测其应为古元古代沉积岩的部分熔融产生的 S 型花岗岩。印支期黑云母花岗闪长岩则具有低硅、高碱和准铝质的特征, 显示出中等强度的负 Eu 异常, 且其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-10.3 \sim -7.4$) 较负、模式年龄古老 ($1.71 \sim 1.89$ Ga), 为古元古代变火成岩与部分变沉积岩重熔形成的 I 型花岗岩。白马山复式岩体的加里东期和印支期超单元可能均形成于陆内造山的构造环境中。加里东期岩体与区域 W 矿化之间、印支期岩体与区内 Au-Sb-W 矿化之间分别具有密切的成因联系, 表明这些岩体具有良好的 Au-Sb-W 成矿潜力。

关键词: 白马山复式岩体; 年代学; 地球化学; 岩石成因。

中图分类号: P619.22+2

文章编号: 1000-2383(2025)02-609-12

收稿日期: 2024-11-12

Geochronology, Hf Isotope, Geochemistry and Petrogenesis of the Baimashan Granitic Complex in the Central Hunan Province

Liu Xianhong¹, Liu Deliang^{2*}, Lou Yuanlin^{1,3,4*}, Pan Siyuan¹, Xiao Tao¹, Liu Xiaojian¹, Zhang Zhenli¹

1. Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Changsha, Hunan 410600, China

2. Collaborative Innovation Center for Exploration of Strategic Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

4. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: In order to thoroughly investigate the tectonic evolution, magmatic activities, and their effects on mineral resource

基金项目: 中国地质调查局“湖南怀化—邵阳金矿重点调查区调查评价 (No. DD20230386); 湖北省自然科学基金面上类项目 (No. 2021CFB499), 自然资源部新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目“湖南雪峰金锑成矿带控矿构造解析与找矿预测” (No. ZK-KJ202408)。

作者简介: 刘贤红 (1989—), 女, 高级工程师, 从事矿产勘查及地球化学勘查工作。ORCID: 0009-0002-2879-1791. E-mail: 492368381@qq.com

* **通讯作者:** 刘德亮, E-mail: liudl@cug.edu.cn; 娄元林, E-mail: 420418599@qq.com

引用格式: 刘贤红, 刘德亮, 娄元林, 潘思远, 肖涛, 刘小坚, 张珍力, 2025. 湘中白马山复式岩体年代学、Hf 同位素、地球化学及岩石成因. 地球科学, 50(2): 609–620.

Citation: Liu Xianhong, Liu Deliang, Lou Yuanlin, Pan Siyuan, Xiao Tao, Liu Xiaojian, Zhang Zhenli, 2025. Geochronology, Hf Isotope, Geochemistry and Petrogenesis of the Baimashan Granitic Complex in the Central Hunan Province. *Earth Science*, 50(2): 609–620.

formation during the Early Paleozoic and Early Mesozoic eras in South China, systematic field investigations were conducted in the Baimashan complex located in the central Hunan region. Additionally, zircon geochronological analysis, Hf isotope studies, and geochemical assessments were performed. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating illustrates that the weighted mean ages of the Shuiche mylonitized granite and the Longtan-Xiaoshajiang biotite granodiorite within the Baimashan granitic complex are 409 ± 2 Ma and 211 ± 1 Ma, respectively. These ages correspond to the Late Caledonian and Indosinian magmatic events, respectively. The Caledonian mylonitized granite is characterized by high silica, high alkali and strong peraluminosity, accompanied by a pronounced negative Eu anomaly. This, combined with its enriched Hf isotopic composition [$\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -13.4$ to -5.4], indicates that it is likely a S-type granite formed through partial melting of Paleoproterozoic sedimentary rocks. In contrast, the Indosinian biotite granodiorite exhibits low-silica, high-alkalinity and aluminous, displaying a moderate Eu-negative anomaly with a relatively negative $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value (-10.3 to -7.4) and an ancient modal age (1.71 to 1.89 Ga). This granodiorite can be categorised as a Paleoproterozoic meta-igneous mixing of partially metasomatised sedimentary rocks remelted to form I type granites. The Caledonian and Indosinian superunits of the Baimashan complex may have been formed in a tectonic environment of intra-plate orogeny. There is a strong genetic connection between the Caledonian rocks and the regional W mineralization, as well as between the Indosinian granitic rocks and the Au-Sb-W mineralization in the area. These rocks exhibit significant potential for Au-Sb-W mineralization.

Key words: Baimashan granitic complex; geochronology; Hf isotopes; geochemistry; Petrogenesis.

复式岩体是指不同时代的花岗岩在同一空间框架内共生形成的地质体,是探究大陆形成与演化及其资源成矿效应的天然探针(吴福元等,2007;李斌等,2015;付翔等,2020).华南位于欧亚大陆的东南缘,具有多阶段、复杂的地壳演化和大陆改造历史,受到长期、多阶段的陆内造山与板块俯冲事件的影响,形成了大量不同时代的花岗岩及与之相关的多金属矿床(Zhou *et al.*, 2006;毛景文等,2008;蒋少涌等,2020).白马山复式岩体位于华南板块内江南造山带西南段,主要由多期次、多类型的花岗质岩体构成,岩体周缘分布着大量的 Au-Sb-W 多金属矿床,是湘中多金属成矿带的重要组成部分,白马山复式岩体也成为揭示华南显生宙多期次构造—岩浆活动及其资源成矿效应的天然实验室(李伟,2019;柏道远等,2021;彭建堂等,2021).前人对该岩体开展了一些科研工作(陈卫锋等,2007;Chen *et al.*, 2007;罗志高等,2010;Chu *et al.*, 2012;李建华等,2014;刘建清等,2017;王川等,2021;Tang *et al.*, 2022),取得了一定的认识,认为白马山复式岩体的岩浆活动主要集中在加里东期和印支期,分别形成于加里东期和印支期两期陆内造山过程中壳源物质的部分熔融活动.但白马山岩体加里东期和印支期两个峰期岩浆作用分别存在多期多批次岩浆侵入事件,形成了不同时代和岩相的花岗岩类岩石.因此,各期次岩浆活动精确的时代、岩石成因及岩浆源区性质以及成岩地球动力学背景等方面仍存在一定的争议,关于多期岩浆活动的时代和岩石成因及其与 Au-Sb-W 多金属矿化之间相关联系的

研究更为薄弱.

鉴于此,本文在前人研究的基础上,综合运用野外地质调查、岩石学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素、以及元素地球化学等研究手段,对白马山复式岩体进行了系统研究.研究成果精确限定不同期次侵入岩的成岩时代,深入探究了岩石成因及其形成的大地构造背景.最后,本文还探讨了多阶段成岩事件与多金属矿化之间的成因联系,为评估不同时代岩体的成矿潜力提供了理论依据.

1 地质背景

研究区位于扬子板块东南缘的江南造山带.江南造山带是华夏地块与扬子地块在新元古代碰撞拼贴形成的地质单元,随后其先后经历了新元古代晚期的陆内裂谷、早古生代和早中生代的造山作用,以及晚中生代的陆内岩石圈伸展等多期复杂构造事件的改造(Zhou *et al.*, 2006;Shu *et al.*, 2015).因此,江南造山带被视为探究华南构造演化历史的天然实验室(Yao *et al.*, 2019).

白马山复式岩体位于湖南省溆浦、隆回和新化县境内,大地构造位置属于华夏地块与扬子板块结合部,即江南造山带的西南段(图 1a).该复式岩体总体上呈近东西向岩基侵入新元古界、震旦系、寒武系、奥陶系和志留系地层(图 1b),岩体出露面积达 $1\,600\text{ km}^2$ (刘建清等,2017).前人将白马山复式岩体划分为水车、龙潭—小沙江以及龙藏湾等多个超单元,其中,水车超单元形成于加里东—海西期,龙潭—小沙江超单元属于印支期,而龙藏湾超单元

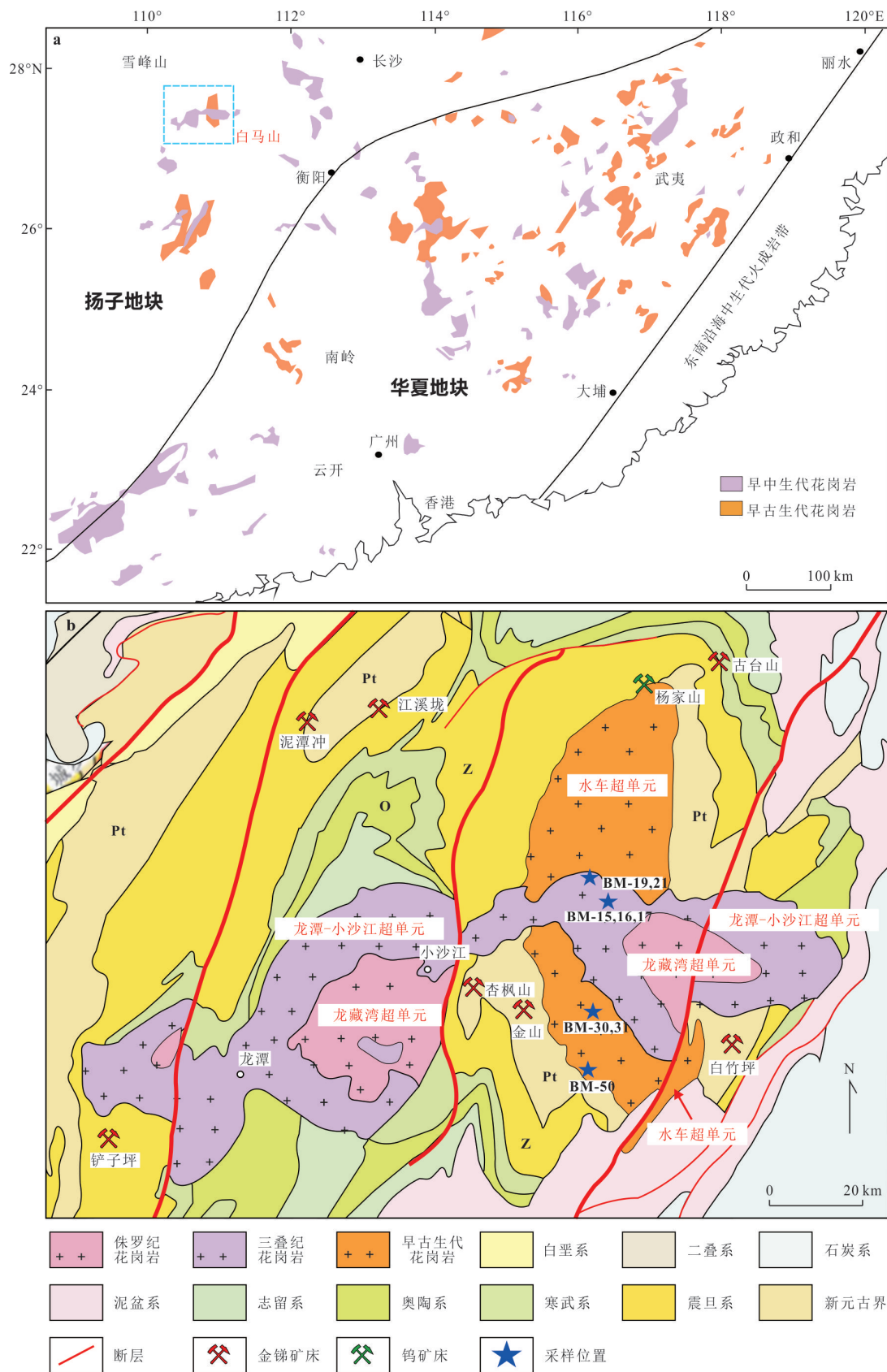


图 1 (a)华南早古生代和早中生代花岗岩分布图;(b)白马山岩体地质图

Fig. 1 (a) Distribution of the Early Paleozoic and Early Mesozoic granites in South China; (b) Geological map of the Baimashan granitic complex

图 a 据 Song *et al.* (2015); 图 b 修改据张义平等 (2015)

则最晚, 归属于燕山期(陈卫锋等, 2007; 王川等, 2021)。

白马山复式岩体周边产出多个金、锑和钨等多金属矿床。例如古台山、杏枫山、金山、铲子坪、泥潭冲、江溪垅等金锑(钨)矿床和杨家山钨矿床等。上述矿床主要赋存在白马山岩体的围岩地层, 即元古代到古生代含碳细碎屑沉积岩和碳酸盐岩之中。该套地层变质程度较低, 普遍为绿片岩相及以下, 与岩体接触部位多见角岩化。金锑矿体主要为石英硫化物脉型, 其次为近脉围岩蚀变型, 在岩体边部围岩中可见矽卡岩型钨矿体。

2 样品及分析方法

2.1 样品岩相学特征

本研究系统地采集了白马山复式岩体东部水车和龙潭超单元的花岗岩样品。

水车超单元的样品编号为 BM-30, BM-31 和 BM-50, 样品的岩性主要为糜棱岩化花岗岩: 颜色为浅灰色至肉红色, 具有花岗结构(图 2a), 并且变形组构发育, 展现出典型的糜棱岩化花岗岩特征(图 2b, 2c)。主要矿物为钾长石(45%~55%)、斜长石(15%~20%)、石英(25%~30%)、黑云母(5%)。副矿物为锆石、磷灰石、磁铁矿。钾长石呈自形一半自形的板状或长柱状, 长约 0.4~0.6 mm, 宽 0.2~0.4 mm, 发育有卡氏双晶, 部分颗粒出现变形和碎裂, 表面则发生泥化和绢云母化现象。斜长石呈自形一半自形板状、长柱状, 长约 0.4~0.6 mm, 宽 0.2~0.3 mm, 发育有聚片双晶和环带状构造, 表面可见泥化和绢云母化蚀变。石英呈它形, 可见因重结晶作用而形成细小的石英颗粒。黑云母呈它形片状, 通常经历强烈变形和蚀变, 大部分颗粒见绿泥石化。

龙潭超单元采集的样品编号为 BM-15, BM-16, BM-17, BM-19 和 BM-21。样品的岩性主要为黑云母花岗闪长岩, 呈灰白色, 主要为中细粒等粒结构(图 2d), 局部呈现似斑状结构, 斑晶为斜长石。岩体部分区域经历了强烈的热液蚀变。主要矿物包括斜长石(45%~50%)、钾长石(10%~15%)、石英(20%~25%)、黑云母(10%~12%)、角闪石(2%~3%)(图 2e~2f)。主要副矿物有锆石、磷灰石和磁铁矿。斜长石呈自形一半自形板状和长柱状, 长约 3~4 mm、宽 2 mm, 发育聚片双晶和环带状结构, 表面见绢云母化蚀变。钾长石呈自形一半自形板状, 长 1~2 mm, 宽 1 mm, 多发育条纹结构。石英呈它形粒

状, 填充于长石和暗色矿物晶间, 粒径在 1~3 mm 之间, 波状消光现象明显。黑云母呈它形片状, 具有明显的多色性(淡黄色至褐色), 部分颗粒有绢云母化蚀变。角闪石呈长柱状、菱形或近菱形的六边形, 具有明显的多色性(浅褐色、绿色至深褐色), 普遍发育双晶结构。

2.2 分析方法

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年工作在中国地质大学(武汉)紧缺战略矿产资源协同创新中心完成。该研究将 ESL 193HE 型激光剥蚀系统与 Agilent 7900 型 ICP-MS 相连接。激光束斑直径为 32 μm , 频率和能量密度分别为 3 Hz 和 3.5 J/cm²。在分析过程中, 以锆石标样 91500(1 065.4 Ma)(Wiedenbeck *et al.*, 1995)作为外标进行同位素校正, 同时以锆石标样 Tanz(566.16 \pm 0.77 Ma)(Hu *et al.*, 2021)作为监控样品。本次年代学工作测得的 Tanz 锆石监控标样的加权平均年龄为 (566.2 \pm 1.8 Ma, $n=28$, MSWD=0.1), 与推荐值一致, 说明测年结果可靠。测年数据通过软件 ICPMSDataCal 进行处理, U-Pb 年龄谐和图则使用 IsoplotR 软件生成。

将岩石样品粉碎至 200 目以进行全岩地球化学分析。主量元素和微量元素的分析均由澳实分析检测(广州)有限公司完成。其中, 主量元素采用 X 射线荧光光谱法进行测试, 使用的仪器为荷兰 PANalytical PW5400 型 X 射线荧光光谱仪, 测试精度优于 1%; 微量元素分析则采用 Agilent 7900 型 ICP-MS 进行测定。

锆石微区 Hf 同位素分析在在地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-MC-ICP-MS 技术完成。所使用的 MC-ICP-MS 型号为 Nu Plasma II, 并配备 Resonetics-S155 型激光器。激光束斑直径为 50 μm 。在样品测试过程中, 获得标准锆石 Penglai 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282\ 901\pm0.000\ 008$, 与其推荐值 0.282 906(Li *et al.*, 2010)基本一致。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

锆石的 U、Th 含量及 U-Pb 定年数据列于表 1。尽管各测点表观 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄稍微分散, 但结合上述监控标样的年龄与推荐值较为一致以及各测点均落在谐和线上或附近等特征, 年龄结果能够准确揭示锆石的结晶时代。糜棱岩化花岗岩的 U 含量介于 $8\times10^{-6}\sim31\times10^{-6}$ 之间, Th 含量介于 (50~37) \times

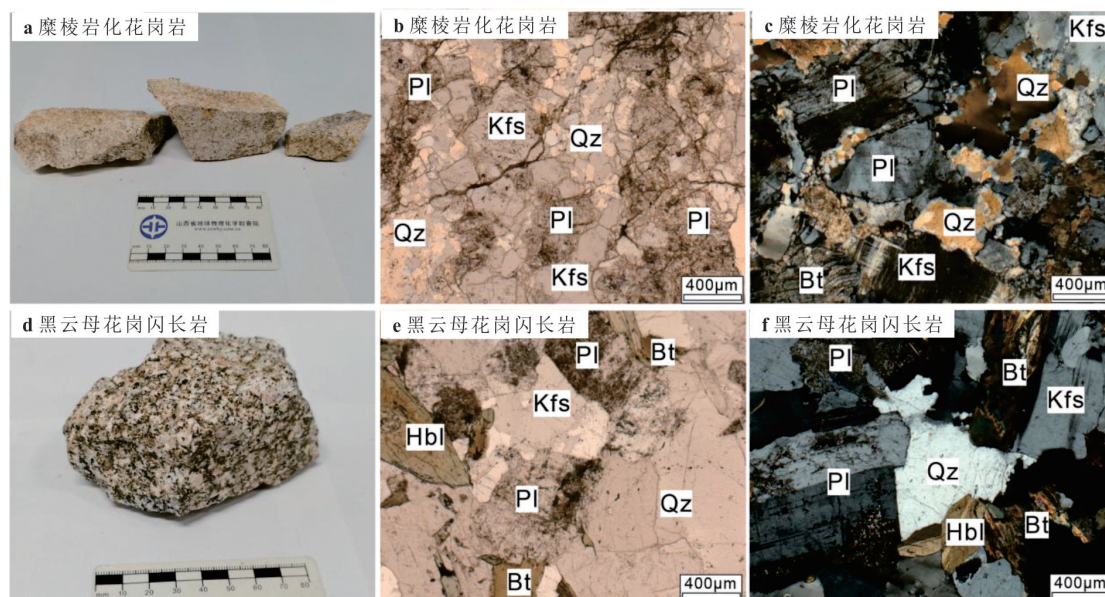


图2 白马山复式岩体岩相学特征

Fig. 2 Petrographic characteristics of the Baimashan granitic complex

糜棱岩化花岗岩手标本(a)、单偏光(b)和正交偏光图像(c);黑云母花岗闪长岩手标本(d)、单偏光(e)和正交偏光图像(f);Bt. 黑云母; Hbl. 角闪石; Kfs. 钾长石; Pl. 斜长石; Qz. 石英

10^{-6} 之间, 13个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为396~425 Ma (Fig. 3a), 加权平均年龄为 409 ± 2 Ma (MSWD=7.8), 这应代表了糜棱岩化花岗岩的结晶年龄. 白马山黑云母花岗闪长岩中锆石的U、Th含量分别为 $4 \sim 50 \times 10^{-6}$ 和 $42 \sim 317 \times 10^{-6}$. 17个分析点在U-Pb谐和图上形成了一簇密集的点, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 211 ± 1 Ma (MSWD=10), 代表了黑云母花岗闪长岩的侵位年龄.

3.2 全岩主微量元素组成

本研究选取了2件糜棱岩化花岗岩和4件黑云母花岗闪长岩样品, 进行了全岩主微量元素分析, 测试结果见表2. 在黑云母花岗闪长岩的部分样品薄片, 可以观察到样品发生了轻微的绢云母化和绿泥石化蚀变, 表明这些样品可能受到了后期热液蚀变的影响. 而经过进一步检查, 我们发现这部分样品具有比较高烧失量($\text{LOI} > 1.00\%$; 样品编号BM-16和BM-17)和较低的 Na_2O 含量. Nb、Ta、Zr和Hf等高场强元素以及稀土元素通常不易受到热液蚀变影响, 而Rb、Na、Ca、Sr和Ba等元素在热液蚀变过程中则表现出较强的活动性. 为了减小相关影响, 在下文讨论中, 当涉及 Na_2O 、CaO和Sr含量及其相关参数时, 高LOI($\text{LOI} > 1.00\%$)样品将被排除.

早古生代糜棱岩化花岗岩的主量元素具有以

下特征: SiO_2 含量为 $74.9\% \sim 76.0\%$, Al_2O_3 含量较高, 介于 $13.3\% \sim 13.7\%$, MgO 含量较低($0.14\% \sim 0.16\%$), $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量则在 $8.1\% \sim 8.6\%$ 之间. 在图4a中, 糜棱岩化花岗岩均位于花岗岩的范围内. 糜棱岩化花岗岩具有强过铝质特征, 铝饱和指数为 $1.08 \sim 1.11$ (图4b). 相对而言, 早中生代黑云母花岗闪长岩具有较低的 SiO_2 含量($68.3\% \sim 69.4\%$)和较高的 Al_2O_3 含量($15.0\% \sim 15.7\%$), 在岩石分类图解中(图4a), 早中生代花岗岩落在花岗闪长岩范围内, 弱蚀变样品的A/CNK值为 $1.05 \sim 1.06$, 显示出弱过铝质的特征(图4b). 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图4c)中, 样品落在高钾钙碱性和钾玄岩系列. 在图4d中, 糜棱岩化花岗岩均位于高分异花岗岩区域, 而绝大多数黑云母花岗闪长岩样品则投点于未分异I型和S型范围内.

糜棱岩化花岗岩的REE含量较低($47 \times 10^{-6} \sim 63 \times 10^{-6}$). 该岩石呈现出平坦的稀土元素配分模式 [$(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.9 \sim 3.0$], 并且具有显著的负Eu异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.12 \sim 0.20$) (图5a). 而早中生代黑云母花岗闪长岩则具有相对较高的REE含量($71 \times 10^{-6} \sim 335 \times 10^{-6}$), 并且明显富集轻稀土 [$(\text{La}/\text{Yb})_N = 13 \sim 88$], 在稀土元素配分图(图5a)中, 黑云母花岗闪长岩具有中等程度的负Eu异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.31 \sim 0.62$). 在原始地幔标准化微量元素蜘蛛网图

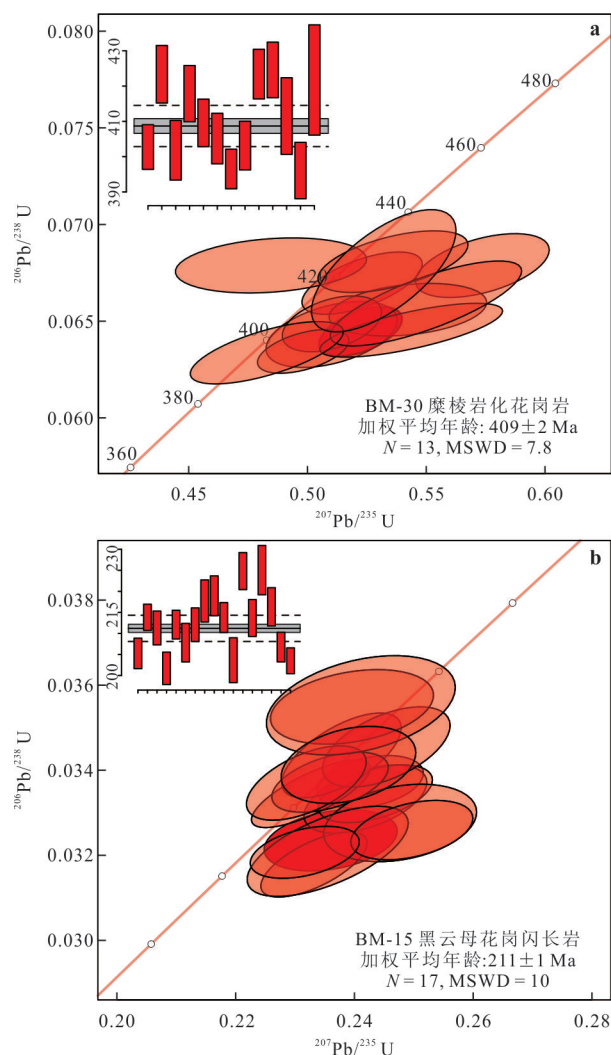


图3 白马山复式岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 U - Pb concordia diagrams of zircons from the Baimashan granitic complex

a. 糜棱岩化花岗岩; b. 黑云母花岗闪长岩

(图 5b) 上, 早古生代糜棱岩化花岗岩表现为 Rb、Th 和 U 的富集与 Ba、P 和 Ti 的亏损, 而早中生代黑云母花岗闪长岩则显示 Nb、Ta 的亏损。

3.3 锆石 Hf 同位素特征

对糜棱岩化花岗岩进行了 10 个点的锆石 Hf 同位素分析 (表 3), 获得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值范围为 0.282 146~0.282 379, 计算获得的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 -13.4~-5.4, 其中大部分数据集集中在 -8.2~-5.4 之间, 其两阶段模式年龄为 1.73~2.24 Ga。对黑云母花岗闪长岩中锆石的 12 个 Hf 同位素测点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 355~0.282 435, 算得的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 -10.3~-7.4, 其两阶段模式年龄为 1.71~1.89 Ga (图 6)。

4 讨论

4.1 白马山复式岩体的成岩年龄

白马山复式岩体由多个侵入体超单元构成。根据花岗岩的岩性特征、年代学、地球化学及同位素组成, 前人将白马山岩体细分为加里东—海西期的水车超单元、印支期的龙潭—小沙江超单元、以及燕山期的龙藏湾超单元 (La Bas *et al.*, 1986; Whalen *et al.*, 1987; Wiedenbeck *et al.*, 1995; Li *et al.*, 2010; Shu *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2015; 张义平等, 2015; 刘建清等, 2017; Yao *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2021; 王川等, 2021; Tang *et al.*, 2022)。然而, 至今尚未对每个超单元的侵位时代一直进行系统研究与总结。因此, 本次研究通过对水车和龙潭—小沙江等超单元开展系统采样, 并进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 结合对前人资料的充分整合, 旨在构建白马山复式岩体精细的多期次成岩年代学框架。

水车超单元: Xie *et al.* (2019) 报道了水车超单元北缘杨家山 W 矿床内黑云母二长花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 406.6 ± 2.8 Ma。这一结果与本研究报道的水车超单元南缘糜棱岩化花岗岩的锆石 U-Pb 年龄 409 ± 2 Ma 相一致, 表明水车超单元花岗岩形成于早泥盆世, 是加里东晚期岩浆活动的产物。

龙潭—小沙江超单元: 本次研究获得的龙潭—小沙江超单元东部黑云母花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 211 ± 1 Ma, 与前人报道的锆石 U-Pb 测年结果基本一致 (228~216 Ma) (罗志高等, 2010; Chu *et al.*, 2012; 李建华等, 2014; 刘建清等, 2017; 王川等, 2021; Tang *et al.*, 2022), 表明龙潭—小沙江超单元是晚三叠世岩浆活动的产物。

龙藏湾超单元: 对于龙藏湾超单元的形成时代, 则存在一定的争议: 陈卫锋等 (2007) 和刘建清等 (2017) 分别获得龙藏湾二云母花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 177 ± 2 Ma 和 176 ± 4 Ma; 而李建华等 (2014) 和王川等 (2021) 则获得了晚三叠世 (216~212 Ma) 的锆石 U-Pb 年龄。因此, 龙藏湾超单元可能是印支晚期至燕山早期岩浆活动的产物。

综上, 综合前人的研究成果和本文提供的年代学数据, 我们认为水车超单元形成于早古生代, 龙潭—小沙江超单元花岗岩侵位于晚三叠世, 而龙藏湾超单元则形成于印支晚期至燕山早期。

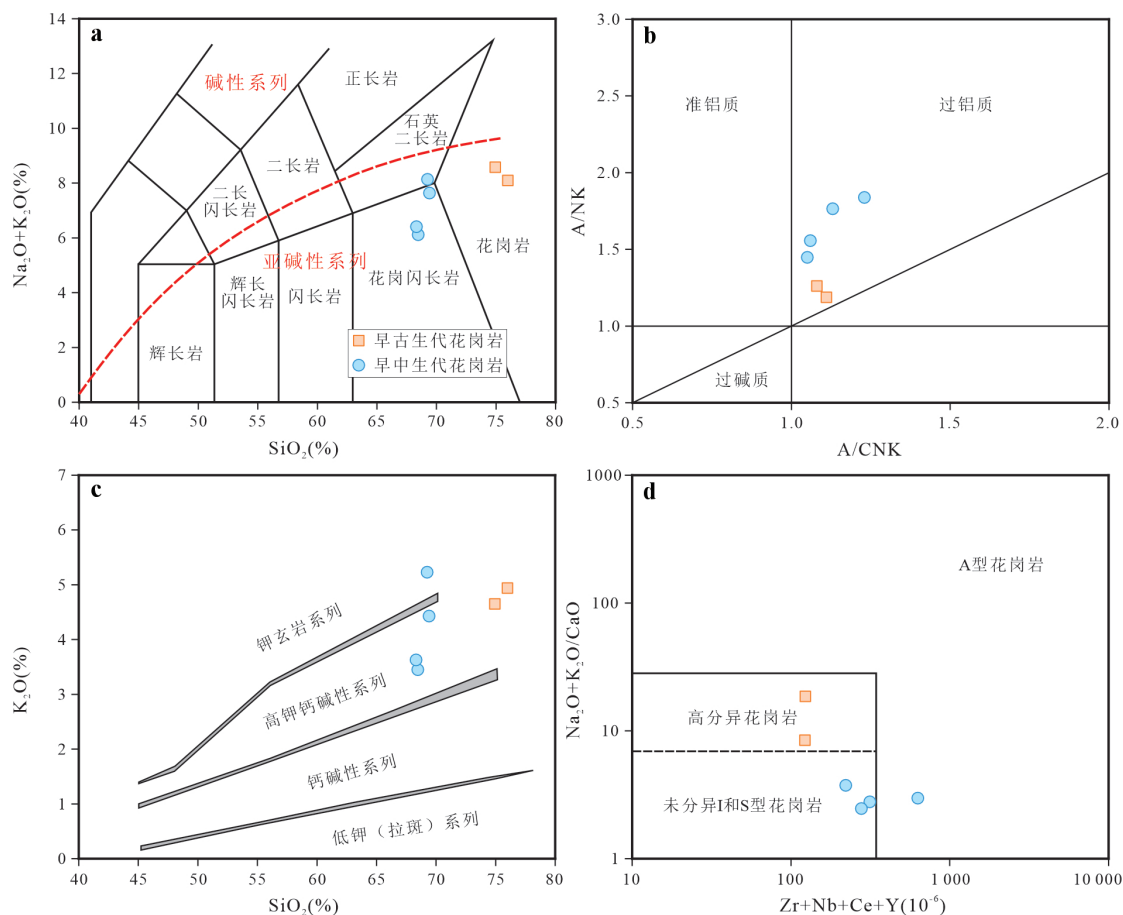


图4 白马山复式岩体岩石分类图解

Fig. 4 Classification of the Baimashan granitic complex on the basis diagrams

a. $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})\text{-SiO}_2$ 图解 (La Bas *et al.*, 1986); b. A/NK-A/CNK 图解; c. $\text{K}_2\text{O-SiO}_2$ 图解; d. $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 图解 (Whalen *et al.*, 1987)

4.2 岩石成因及岩浆源区性质

本研究旨在通过对白马山复式岩体早古生代和早中生代花岗岩进行详细的地球化学及锆石 Hf 同位素对比研究,进一步探讨白马山地区这两个时期花岗岩的岩石成因以及其岩浆源区特征。

4.2.1 岩石成因 根据花岗质岩石源区的性质和地球化学特征的差异,研究者将其划分为I型、S型、M型和A型(Chappel and White, 1974). 其中,M型花岗岩极为罕见,典型代表为产于洋壳的斜长花岗岩. 白马山复式岩体加里东期糜棱岩化花岗岩和印支期黑云母花岗岩闪长岩的矿物组成和Hf同位素显著区别于斜长花岗岩,因此白马山岩体显然不属于M型花岗岩. A型花岗岩一般具有碱性、贫水和非造山的特征,通常表现出高Ga/Al比值和Zr、Nb、Ce、Y等元素的高含量. 然而,白马山复式花岗岩的Ga/Al值较低,在 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/(\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}))$ (图4d)中,绝大部分投点并未落在A型花

岗岩的区域内,显然不应归类于A型花岗岩。I型花岗岩通常表现为准铝质至弱过铝质($A/CNK < 1.1$),多发育角闪石和黑云母等矿物,成岩温度 $> 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Miller *et al.*, 2023)。与之相对,S型花岗岩则以高 A/CNK 值(> 1.1)、富含白云母等过铝质矿物以及较低的成岩温度($< 750\text{ }^{\circ}\text{C}$)为典型特征 (Miller *et al.*, 2023)。

本次研究的早古生代水车超单元的糜棱岩化花岗岩具有较高的铝饱和指数(1.08~1.11),发育少量的白云母和黑云母,锆饱和温度为693~705℃,未见角闪石等典型I型花岗岩的代表性矿物,这种矿物组合及较低的锆石饱和温度均与典型的S型花岗岩非常相似.此外,加里东期糜棱岩化花岗岩具有更强烈的负Eu异常(图5a)、和Ba、P与Ti的负异常特点,指示较强的斜长石、磷灰石等矿物的分离结晶作用(图5b).在图4d中,早古生代糜棱岩化花岗岩落入高分异花岗岩范围内,因此,

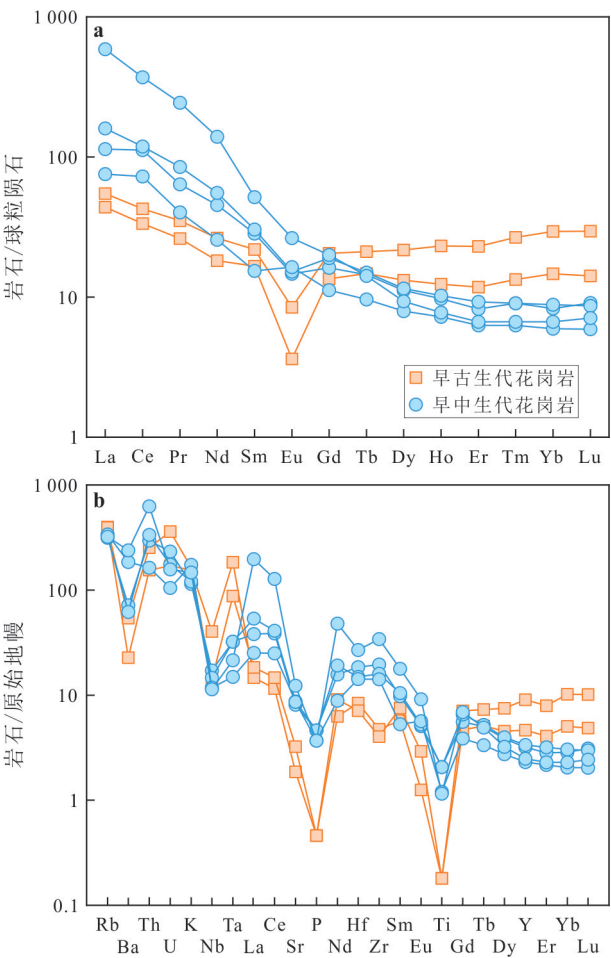


图5 白马山复式岩体球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)及原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 5 Chondrite - normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element diagrams (b) of the Baimashan granitic complex

标准化值据 Sun and McDonough(1989)

水车超单元糜棱岩化花岗岩可归类为高分异的S型花岗岩。

在矿物组成方面,早中生代龙潭一小沙江超单元黑云母花岗闪长岩发育角闪石和黑云母等暗色矿物(图 2e, 2f);在化学组成方面,弱蚀变的黑云母花岗闪长岩具有低的 A/CNK 值(1.05~1.06);在形成温度方面,其具有较高的锆饱和温度(781~865 ℃)。以上特征表明,早中生代黑云母花岗闪长岩的成因类型应为 I 型花岗岩。

4.2.2 岩浆源区性质 白马山岩体早古生代和早中生代花岗岩均具有较负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,这与古老地壳物质的 Hf 同位素特征相一致(图 6a),结合其古老的 Hf 同位素二阶段模式年龄(糜棱岩化花岗岩:1.73~2.24 Ga;黑云母花岗闪长岩:1.71~1.89 Ga;图 6b),

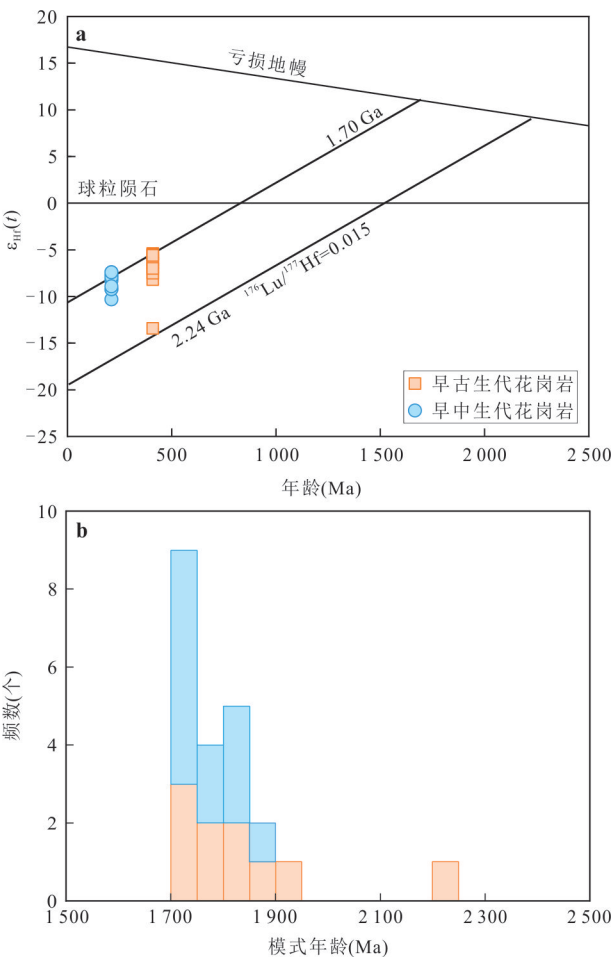


图6 白马山复式岩体锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图解(a)和 Hf 同位素二阶段模式年龄分布柱状图

Fig. 6 Diagrams of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. U-Pb ages (a) and frequency histogram of two - stage Hf model ages for the Baimashan granitic complex

我们认为白马山岩体加里东期与印支期花岗岩均为古老地壳物质部分熔融形成。

岩浆源区岩石(即变火成岩和变碎屑岩)比例的差异会导致侵入岩元素的不同(Sylvester, 1998)。本研究中,早古生代和早中生代花岗岩的 CaO/Na₂O 值分别为 0.12~0.30 和 0.75~0.94,表明其源区为泥质和玄武质源区的重熔(图 7a)。在 Rb/Ba-Rb/Sr 图解(图 7b)中,早古生代糜棱岩化花岗岩投在富粘土—贫斜长石的区域,而早中生代黑云母花岗闪长岩则落在贫粘土—富斜长石的区域内。结合其地球化学特征和 Hf 同位素组成,我们认为早古生代糜棱岩化花岗岩来源于古元古代富粘土变质碎屑岩的重熔,而早中生代黑云母花岗闪长岩则是由混入了变质碎屑岩的古老变质火山岩熔融形成。

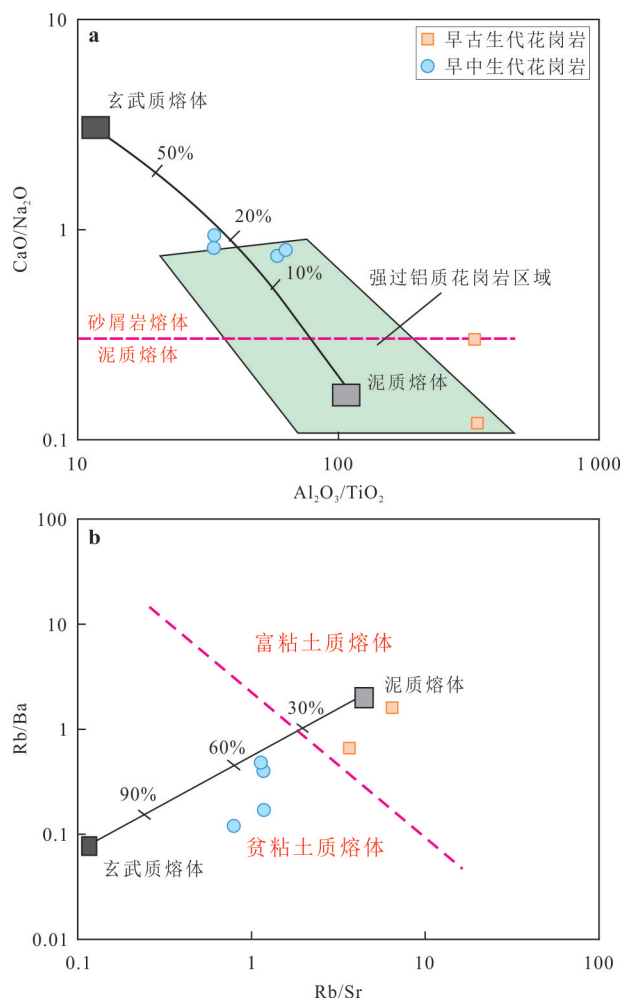


图7 白马山复式岩体的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (a)和 $\text{Rb}/\text{Ba}-\text{Rb}/\text{Sr}$ (b)图解

Fig. 7 (a) $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ vs. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ and (b) Rb/Ba vs. Rb/Sr diagrams for the Baimashan granitic complex
底图据 Sylvester (1998)

4.3 构造及成矿意义

4.3.1 构造意义 已有研究表明,华南早古生代的岩浆活动发生于460~380 Ma,主要集中在450~420 Ma之间(Huang and Wang, 2019). 目前,华南加里东期造山事件的陆内造山特征已被广泛认可(Li *et al.*, 2010; Shu *et al.*, 2015),主要基于以下地质事实:(1)早古生代蛇绿岩和岛弧岩石等洋壳残留记录的缺失;(2)加里东期花岗岩呈弥散状分布,从沿海到内陆没有明显的时间分布规律,且以过铝质和富集的Hf-Nd同位素组成为特征,表明其主要来源于地壳重熔,幔源物质的贡献较弱,其形成与俯冲作用无关;(3)近等温降压趋势的变质 P - T - t 轨迹印证了地壳增厚后的快速剥蚀减薄过程. 在造山过程中,区域花岗岩从同碰撞I-S型花岗岩(460~

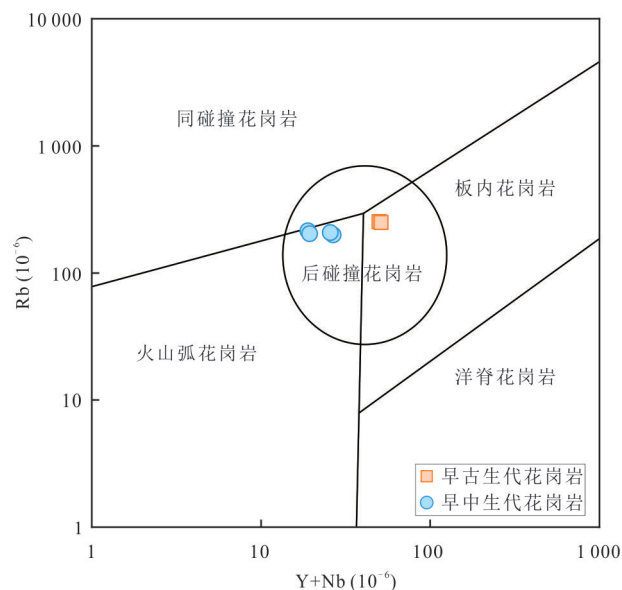


图8 白马山复式岩体的 $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$ 判别图解

Fig. 8 Discrimination diagram of Rb vs. $(\text{Y}+\text{Nb})$ for the Baimashan granitic complex

Pearce *et al.* (1984)

440 Ma) 过渡为晚碰撞—碰撞后S-A型花岗岩(440~400 Ma)(Li *et al.*, 2010; Huang and Wang, 2019; Xin *et al.*, 2020). 在 $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$ 构造判别图解(图8)中,白马山糜棱岩化花岗岩落在后碰撞花岗岩的范围内,结合其侵位年龄(409 ± 2 Ma),我们认为其形成于后碰撞伸展的构造环境中. 造山带垮塌引起大规模的软流圈上涌和玄武岩底侵,提供了大量热量,使得地壳物质发生部分熔融,形成了白马山复式岩体水车超单元花岗岩.

与华南早古生代陆内造山运动类似,早中生代洋壳相关记录的缺失、广泛分布且无明确时空分布规律的过铝质花岗岩以及集中分布板块内部的区域强烈变质—变形作用,同样指示了华南早中生代构造事件的陆内造山特征(Wiedenbeck *et al.*, 1995; Shu *et al.*, 2015). 在早中生代期间,印支板块和华北克拉通分别在南北两侧与华南板块碰撞和挤压,挤压应力水平传播至华南板块内部,导致地壳增厚,同时产生大量热量,使得地壳发生重熔,形成了早中生代的白马山复式岩体龙潭—小沙江超单元花岗质岩石.

4.3.2 成矿意义 湘中地区白马山岩体周缘产出了大量的Au-Sb-W矿床. 以往的研究对区域岩浆活动和Au-Sb-W成矿事件之间的联系进行了部分探讨. Xie *et al.* (2019)报道了分布在水车超单元岩体和地层交界部位的杨家山W矿床中,与白钨矿密切共生的锡石

U-Pb 年龄 (410 ± 6 Ma) 和辉钼矿 Re-Os 年龄 (404 ± 3 Ma), 结合指示岩浆来源的 S ($\delta^{34}\text{S} = -2.9\text{‰} \sim -0.7\text{‰}$) 和 H-O 同位素 ($\delta\text{D} = -87\text{‰} \sim -68\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}} = -1.2\text{‰} \sim 3.4\text{‰}$) 组成, 认为矿床 W 矿化与加里东期白马山岩体水车超单元的岩浆活动关系密切。白马山岩体周缘的其余 Au-Sb-W 矿床大多形成于三叠纪, 例如, 古台山 Au-Sb 矿床 (云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 224 ± 5 Ma) (Li *et al.*, 2018)、杏枫山 Au-W 矿床 (热液榴石与磷灰石 U-Pb 年龄分别为 215 ± 3 Ma 和 215 ± 8 Ma) (吕沅峻等, 2021; 娄元林等, 2024)、铲子坪和大坪 Au 矿床 (石英 Rb-Sr 等时线年龄分别为 205.6 Ma 和 204.8 Ma) (李华芹等, 2008)。在白马山岩体东侧, Xie *et al.* (2019) 报道了曹家坝矽卡岩型 W 矿床的成矿年龄为 206~196 Ma, Zhang *et al.* (2017) 获得了龙山 Sb-Au 矿床中白钨矿 Sm-Nd 等时线年龄为 210 Ma。以上年代学证据表明, 区域 Au-Sb-W 矿床的矿化与印支期白马山岩体的侵位具有时间耦合性。娄元林等 (2024) 则基于杏枫山矿床的矿化蚀变与同位素特征, 认为该矿床属于与侵入岩有关的岩浆热液型金矿床, 因此白马山岩体具有良好的 Au-Sb-W 成矿潜力与找矿前景。

5 结论

(1) 白马山复式岩体水车超单元糜棱岩化花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 409 ± 2 Ma, 为加里东晚期岩浆活动的产物, 龙潭一小沙江超单元黑云母花岗闪长岩的侵位时间为 211 ± 1 Ma, 代表了晚三叠世岩浆活动。

(2) 水车超单元糜棱岩化花岗岩为 S 型花岗岩, 可能产生于古元古代沉积岩的部分熔融。龙潭一小沙江超单元黑云母花岗闪长岩属于 I 型花岗岩, 主要来源于古元古代变火成岩混合部分变沉积岩的部分熔融。

(3) 白马山复式岩体加里东期和印支期均产于陆内造山的构造环境中。加里东期花岗岩具有一定的 W 成矿潜力, 印支期岩体与区内大规模的 Au-Sb-W 矿化具有密切的成因联系。

致谢: 参加野外考察工作的人员还有中国地质大学 (武汉) 马盈博士、马慧敏博士、马浩羽、李雯恬、张浩翔、陈宇阳和中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心项目组相关成员; 苏慧敏副教授、赵葵东教授、马浩羽协助进行了锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素测试分析, 马盈博士在论文写作过程中提供了帮助, 编委和审稿人提出了建设性修改意见, 向他们致以诚挚的感谢!

附表见: <https://doi.org/10.3799/dqkx2025.005>

References

- Bai, D. Y., Li, B., Zhou, C., et al., 2021. Gold Mineralization Events of the Jiangnan Orogen in Hunan and Their Tectonic Settings. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40: 897—922 (in Chinese with English abstract).
- Chappel, B. W., White, A. J. R., 1974. Two Contrasting Granite Types. *Pacific Geology*, 8: 173—174.
- Chen, W. F., Chen, P. R., Huang, H. Y., et al., 2007. Chronological and Geochemical Studies of Granite and Enclave in Baimashan Pluton, Hunan, South China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50: 1606—1627. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-0073-1>
- Chu, Y., Lin, W., Faure, M., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.005>
- Fu, X., Zhang, D. Y., Jiang, H., et al., 2020. Genesis of the Xianxia Batholith in the Jiangnan Orogenic Belt and Its Geological Significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 176: 543—560 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z., Li, X. H., Luo, T., et al., 2021. Tanz Zircon Megacrysts: a New Zircon Reference Material for the Microbeam Determination of U-Pb Ages and Zr-O Isotopes. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 36: 2715—2734. <https://doi.org/10.1039/D1JA00311A>
- Huang, D. L., Wang, X. L., 2019. Reviews of Geochronology, Geochemistry, and Geodynamic Processes of Ordovician-Devonian Granitic Rocks in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 184: 104001.
- Jiang, S. Y., Zhao, K. D., Jiang, H., et al., 2020. Spatiotemporal Distribution, Geological Characteristics and Metallogenic Mechanism of Tungsten and Tin Deposits in China. *Chin. Sci. Bull.*, 65: 3730—3745.
- La Bas, M. J. L., Maitre, R. W. L., Streckeisen, A., et al., 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745—750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Li, B., Zhao, K. D., Zhang, Q., et al., 2015. Petrogenesis and Geochemical Characteristics of the Zijinshan Granitic Complex from Fujian Province, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(3): 811—828 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Q., Wang, D. H., Chen, F. W., et al., 2008. Study on Chronology of the Chanziping and Daping Gold Deposit in Xuefeng Mountains, Hunan Province. *Acta Geologica*

- Sinica*, 82:900—905(in Chinese with English abstract).
- Li, J.H., Zhang, Y.Q., Xu, X.B., et al., 2014. SHRIMP U-Pb Dating of Zircon From the Baimashan Longtan Superunit and Wawutang Granites in Hunan Province and Its Geological Implication. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44: 157—175(in Chinese with English abstract).
- Li, W., 2019. Nature and Genesis of the Gutaishan and Yuhengtang Au-Sb Deposits, Xiangzhong District, China (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Li, W., Xie, G. Q., Mao J. W., et al., 2018. Muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 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. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.08.006>
- Li, X.H., Long, W.G., Li, Q.L., et al., 2020. Penglai Zircon Megacrysts: a Potential New Working Reference Material for Microbeam Determination of Hf-O Isotopes and U-Pb Age. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34: 117—134.
- Li, Z.X., Li, X.H., Wartho, J.A., et al., 2010. Magmatic and Metamorphic Events During the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai Orogeny, Southeastern South China: New Age Constraints and Pressure-Temperature Conditions. *GSA Bulletin*, 122: 772—793. <https://doi.org/10.1130/B30021.1>
- Liu, J.Q., Xie, Y., Zhao, Z., et al., 2017. The Geochronologic Characteristics of Baimashan Granite in Western Hunan Province and Its Geotectonic Significance. *Earth Science Frontiers*, 20:25—35(in Chinese with English abstract).
- Lou, Y.L., Liu, X.H., Zeng, H., et al., 2024. Hydrothermal Apatite U-Pb Dating and In-Situ S Isotope Constraints on the Genesis of the Xingfengshan Au-W Deposit in the Central Hunan Province. *Earth Science*, 49: 1—13(in Chinese with English abstract).
- Luo, Z.G., Wang, Y.J., Zhang, F.F., et al., 2010. LA-ICPMS Zircon U-Pb Dating of Jintan and Baimashan Indosinian Granitoids and Its Implications for Diagenesis. *Geotectonica et Metallogenia*, 134:282—290(in Chinese).
- Lv, Y.J., Peng, J.T., Cai, Y.T., 2021. Geochemical Characteristics, U-Pb Dating of Hydrothermal Titanite from the Xingfengshan Tungsten Deposit in Hunan Province and Their Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 37:830—846(in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2021.03.12>
- Mao, J.W., Xie, G.Q., Guo, C.L., et al., 2008. Spatial-Temporal Distribution of Mesozoic Ore Deposits in South China and Their Metallogenic Settings. *Geological Journal of China Universities*, 14: 510—526(in Chinese with English abstract).
- Miller, C.F., McDowell, S.M., Mapes, R.W., 2023. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance. *Geology*, 31: 529—532. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0529:hacgio>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0529:hacgio>2.0.co;2)
- Pearce, J. A., Harris, N. B., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25:956—983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Peng, J. T., Wang, C., Li, Y. K., et al., 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). <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2021.03.02>
- Shu, L.S., Wang, B., Cawood, P.A., et al., 2015. Early Paleozoic and Early Mesozoic Intraplate Tectonic and Magmatic Events in the Cathaysia Block, South China. *Tectonics*, 34: 1600—1621. <https://doi.org/10.1002/2015TC003835>
- Song, M.J., Shu, L.S., Santosh, M., et al., 2015. Late Early Paleozoic and Early Mesozoic Intracontinental Orogeny in the South China Craton: Geochronological and Geochemical Evidence. *Lithos*, 232: 360—374. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.019>
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42:313—345.
- Sylvester, P.J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45:29—44.
- Tang, Y., Wang, Q., Yang, Y.L., et al., 2022. Petrogenesis and Geodynamic Implications of the Baimashan Granitic Complex in Central Hunan, South China. *Geological Journal*, 1—28. <https://doi.org/10.1002/gj.4568>
- Wang, C., Peng, J.T., Xu, J.B., et al., 2021. Petrogenesis and Metallogenic Effect of the Baimashan Granitic Complex in Central Hunan, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 37:805—829(in Chinese with English abstract).
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95:407—419. <https://doi.org/10.1007/BF00402202>
- Wiedenbeck, M., Alle, P., Corfu, F., et al., 1995. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Ele-

- ment and REE Analyses. *Geostandards Newsletter*, 19: 1–23.
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. W., et al., 2007. Discussions on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (6):1217–1238(in Chinese with English abstract).
- Xie, G. Q., Mao, J. W., Li, W., et al., 2019. Granite-Related Yangjiashan Tungsten Deposit, Southern China. *Mineralium Deposita*, 54: 67–80. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0805-5>
- Xie, G. Q., Mao, J. W., Bagas, L., et al., 2019. Mineralogy and Titanite Geochronology of the Caojiaba W Deposit, Xiangzhong Metallogenic Province, Southern China: Implications for a Distal Educed Skarn W Formation. *Mineralium Deposita*, 54: 459–472. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0816-2>
- Xin, Y. J., Li, J. H., Ratschbacher, L., et al., 2020. Early Devonian (415–400 Ma) A-Type Granitoids and Diabases in the Wuyishan, Eastern Cathaysia: A Signal of Crustal Extension Coeval with the Separation of South China from Gondwana. *GSA Bulletin*, 132:2295–2317. <https://doi.org/10.1130/B35412.1>
- Yao, J. L., Cawood, P. A., Shu, L. S., et al., 2019. Jiangnan Orogen, South China: A ~970–820 Ma Rodinia Margin Accretionary Belt. *Earth-Science Reviews*, 196:102872. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.05.016>
- Zhang, Y. P., Zhang, J., Chen, B. H., et al., 2015. Geochronology of Baimashan Granitic Composite Batholith of Hunan Province and Its Constraints on the Timing of Regional Deformation. *Acta Geologica Sinica*, 89: 1–17(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Y., Xie, G. Q., Mao, J. W., et al., 2017. 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: 87. <https://doi.org/10.3390/min9020087>
- Zhou, X. M., Sun, T., Shen, W. Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: a Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, 29: 26–33.
- 中文参考文献**
- 柏道远, 李彬, 周超, 等, 2021. 江南造山带湖南段金矿成矿事件及其构造背景. *岩石矿物学杂志*, 40:897–922.
- 陈卫锋, 陈培荣, 黄宏业, 等, 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:地球科学)*, 37:873–893.
- 付翔, 张达玉, 蒋华, 等, 2020. 江南造山带仙霞复式岩体的成因研究. *大地构造与成矿学*, 176:543–560.
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜海, 等, 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: 3730–3745.
- 李斌, 赵葵东, 张倩, 等, 2015. 福建紫金山复式岩体的地球化学特征和成因. *岩石学报*, 31:811–828.
- 李建华, 张岳桥, 徐先兵, 等, 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)*, 44:158–175.
- 李华芹, 王登红, 陈富文, 等, 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: 900–905.
- 李伟, 2019. 湘中地区古台山和玉横塘 Au-Sb 矿床成矿机制研究(博士学位论文). 武汉:中国地质大学.
- 刘建清, 谢渊, 赵瞻, 等, 2017. 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*, 20:25–35.
- 娄元林, 刘贤红, 曾昊, 等, 2024. 湘中杏枫山金钨矿床成因: 热液磷灰石 U-Pb 定年和原位 S 同位素制约. *地球科学*, 49:1–13.
- 罗志高, 王岳军, 张菲菲, 等, 2010. 金滩和白马山印支期花岗岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及其成岩启示. *大地构造与成矿学*, 34:282–290.
- 吕沅峻, 彭建堂, 蔡亚飞, 2021. 湖南杏枫山钨矿床热液榴石的地球化学特征、U-Pb 定年及其地质意义. *岩石学报*, 37:830–846.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等, 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. *高校地质学报*, 14: 510–526.
- 彭建堂, 王川, 李玉坤, 等, 2021. 湖南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: 665–682.
- 王川, 彭建堂, 徐接标, 等, 2021. 湘中白马山复式岩体成因及其成矿效应. *岩石学报*, 37:805–829.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等, 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23:1217–1238.
- 张义平, 张进, 陈必河, 等, 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: 1–17.