

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.159>



青藏高原东部巴塘地区亚日贡花岗闪长岩成因及其对斑岩 Cu 矿成矿潜力的约束

杨宗永*, 朱经经, 潘力川, 黄明亮, 汪殿钟

中国科学院地球化学研究所, 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵州贵阳 550081

摘要: 西藏东部的金沙江古特提斯洋闭合在早-中三叠世, 但碰撞后的地质过程还缺乏细致约束, 斑岩 Cu 成矿潜力还缺乏系统评估。对藏东巴塘地区的亚日贡岩体开展年代学、岩石地球化学和矿物成分分析。锆石 U-Pb 定年结果表明其形成于~227 Ma。这些岩石具有高 SiO₂、Mg[#] 特征 (53~64), 富集的 Sr-Nd 同位素组成 (初始 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.709 8~0.711 8, ε_{Nd}(t)=−7.4~−8.0)。亚日贡高 Mg[#] 花岗闪长岩形成是陆壳熔体混染地幔岩石的结果, 与古特提斯洋闭合后的板片断离作用有关。系统的锆石、磷灰石和角闪石成分分析表明, 尽管亚日贡岩体的岩浆具有高的 H₂O 含量 (>5%)、但其氧逸度比典型斑岩 Cu 成矿岩浆偏低, 且 S 含量显著低于全球典型成矿斑岩, 指示区内形成斑岩型 Cu 矿床的潜力较低。

关键词: 高 Mg[#] 酸性岩; 板片断离; 斑岩 Cu 成矿潜力; 晚三叠世; 金沙江古特提斯洋; 岩石学; 矿产勘查。

中图分类号: P61

文章编号: 1000-2383(2025)11-4195-13

收稿日期: 2024-07-19

Petrogenesis of Yarigong Granodiorite in Batang Area and Constraints on Porphyry Cu Fertility, Eastern Tibetan Plateau

Yang Zongyong*, Zhu Jingjing, Pan Lichuan, Huang Mingliang, Wang Dianzhong

State Key Laboratory of Critical Mineral Research and Exploration, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

Abstract: The Paleo-Tethyan Ocean, represented by the Jinshajiang River suture in eastern Tibetan Plateau, was consumed and closed in the Early-Middle Triassic, but the specific process after the oceanic crust demise is still poorly constrained. The potential for porphyry copper mineralization of magma generated in post-subduction setting remains unclear. In present study, geochronological and geochemical analyses were carried out on the Yarigong pluton in Batang area. Magmas were intruded in Late Triassic as corroborated by zircon U-Pb mean age of about 227 Ma. Rocks from this intrusion were characterized by high SiO₂ (65.5% to 67.6%) and Mg[#] (53 to 64), as well as high initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr values (0.709 8 to 0.711 8) and low ε_{Nd}(t) values (−7.4 to −8.0). Magma generation of the Yarigong pluton resulted from interaction between melts derived from continental crust and peridotite mantle, and partial melts of the continental crust was likely associated with the break-off of early subducted Paleo-Tethyan oceanic slab. Geochemical compositions of amphibole and zircon suggest high magma H₂O contents (>5%), the oxygen fugacity of magma is lower than magma related to typical porphyry Cu deposits, and extremely low S in magma was indicated by

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2022YFC2903303); 2020—2021 年贵州省补助资金项目 (Nos.GZ2020SIG, GZ2021SIG)。

作者简介: 杨宗永 (1987—), 男, 助理研究员, 主要从事岩浆岩成因及斑岩 Cu 成矿研究。E-mail: yangzongyong@mail.gyig.ac.cn

* 通讯作者: 杨宗永, E-mail: yangzongyong@mail.gyig.ac.cn

引用格式: 杨宗永, 朱经经, 潘力川, 黄明亮, 汪殿钟, 2025. 青藏高原东部巴塘地区亚日贡花岗闪长岩成因及其对斑岩 Cu 矿成矿潜力的约束。地球科学, 50(11):4195—4207.

Citation: Yang Zongyong, Zhu Jingjing, Pan Lichuan, Huang Mingliang, Wang Dianzhong, 2025. Petrogenesis of Yarigong Granodiorite in Batang Area and Constraints on Porphyry Cu Fertility, Eastern Tibetan Plateau. *Earth Science*, 50(11):4195—4207.

consistent low SO_3 in apatite. These conditions imply barren magma for porphyry Cu deposit formation.

Key words: high Mg[#] felsic rock; slab break-off; porphyry Cu fertility; Late Triassic; Jingshajiang Paleo-Tethys; petrology; mineral exploration.

与大洋岩石圈俯冲活动相关的弧岩浆与斑岩型 Cu 矿床具有密切成因联系,这些岩浆常具有高的岩浆 H_2O 含量、氧逸度 ($\triangle \text{FMQ} = +1 \sim +2$),并富 S 和 Cl 等特征 (Richards, 2015; Lu *et al.*, 2016; Zhu *et al.*, 2018). 这些因素可有效促进成矿金属元素的迁移、后期热液流体出溶和金属沉淀过程,被认为是斑岩 Cu 矿床形成的重要控制因素。近年来研究发现,在俯冲结束后的大陆碰撞后阶段,也发育有许多大型-超大型斑岩铜矿床,代表性成矿区带包括特提斯成矿域的伊朗 Kerman 铜矿带,以及我国藏南冈底斯铜矿带(如,王瑞等,2021). 研究显示,这些碰撞/碰撞后阶段的斑岩型 Cu 矿床成矿岩浆也具有与弧环境成矿斑岩相似的高 H_2O 含量、氧逸度和富 S-Cl 等特征 (Yang *et al.*, 2016; 王瑞等,2021). 这显著拓展了斑岩 Cu 矿找矿空间,表明大洋闭合后的碰撞造山带也是斑岩 Cu 矿床发育的重要潜力区。

青藏高原东部的金沙江古特提斯洋是晚古生代-早中生代时期分隔东羌塘和中咱-义敦地块的地质单元 (Hou *et al.*, 2003; 简平等, 2003). 前人对其构造演化和相关的岩浆开展了大量研究,认为该洋盆向西北可能与青藏高原北部西金乌兰湖蛇绿混杂岩代表的古特提斯洋相连,向东南与哀牢山-Song Ma 蛇绿岩代表的古特提斯洋为同一特提斯分支洋盆 (Jian *et al.*, 2009; Zi *et al.*, 2012; 简平等, 2003). 多数研究者根据藏东地区东羌塘地块发育的江达-维西岩浆弧认为,金沙江古特提斯洋经历了晚古生代向西俯冲作用,导致洋盆缩小关闭 (Hou *et al.*, 2003; Mo *et al.*, 1994; Wang *et al.*, 2014a, 2014b; Zhu *et al.*, 2022 及其中相关参考文献). 在早三叠世时,东羌塘和中咱-义敦地块发生碰撞,稍后形成双峰式火山岩 (Hou *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2014a, 2014b) 和高镁安山岩 (Fan *et al.*, 2020),以及侵位到金沙江构造带中的多个花岗质岩体 (Zhu *et al.*, 2011, 2022). 已有研究显示,古特提斯俯冲阶段弧岩浆岩具有较低的岩浆氧逸度,不利于斑岩型 Cu 矿床的形成 (Zhu *et al.*, 2022). 尽管如此,有关藏东金沙江古特提斯洋盆闭合之后的细节性过程还缺乏有力约束. 古特提斯带三叠纪的岩浆活动强烈,并发育

与岩浆岩相关的矽卡岩型 Cu 矿床(如羊拉铜矿, Zhu *et al.*, 2011, 2015),但相关的斑岩型 Cu 矿床很少发现 (Zhu *et al.*, 2022). 因此,很有必要以古特提斯洋闭合后的相关岩浆岩为研究对象,查明其岩石成因和岩浆的 H_2O 、S、Cl 和氧逸度,为约束金沙江古特提斯构造域三叠纪的地质过程和斑岩铜矿成矿潜力提供证据.

本文以藏东巴塘地区的亚日贡岩体为研究对象,通过地质年代学、矿物学、岩石地球化学工作,结合区域地质研究资料,认为其母岩浆形成可能与被拖拽至地幔的大陆岩石圈发生断离过程有关. 系统的矿物成分数据显示,尽管亚日贡岩体代表的岩浆具有较高的 H_2O 含量,但其相比典型斑岩 Cu 成矿岩浆相对偏低的氧逸度,以及低的 S 含量不利于斑岩型 Cu 矿床的形成.

1 地质背景和岩石特征

代表金沙江古特提斯洋盆的蛇绿岩带大致沿金沙江分布,该蛇绿岩带受构造作用发生强烈破碎,主要由蛇纹石化超镁铁质构造岩块、辉长岩、洋中脊型玄武岩和含放射虫硅质岩构成,并与晚古生代灰岩碎片构成蛇绿混杂岩(简平等,2003). 该带用角闪辉长岩(锆石 U-Pb 年龄为 328 Ma)代表金沙江古特提斯洋盆扩张岩浆(简平等,2003),哀牢山蛇绿岩带与金沙江蛇绿带具有相同的演化历史 (Jian *et al.*, 2009; Zi *et al.*, 2012). 金沙江古特提斯洋盆俯冲活动启动时间应不晚于约 300 Ma,至少延续到 263 Ma(简平等, 2003),此过程形成了东羌塘地块(即昌都-思茅地块)东缘的江达-维西弧 (Mo *et al.*, 1994; Wang *et al.*, 2014a, 2014b),以及印支地块北缘的雅轩桥、帽盒山等俯冲相关的岩浆岩 (Zi *et al.*, 2012). 早三叠世喷发的崔依比组、攀天阁组、人支雪山组火山岩具有双峰式火山岩特征,可能代表同碰撞岩浆产物 (Wang *et al.*, 2014a, 2014b),这与新近发现的贡觉榴辉岩 (Tang *et al.*, 2023) 和具有板内岩浆地球化学特征的大龙凯基性-超基性侵入岩 (Jian *et al.*, 2009) 将金沙江古特提斯洋闭合-碰撞事件约束在 250~240 Ma.

金沙江蛇绿混杂岩带东侧为中咱-义敦地块(图 1a),它被认为是从扬子克拉通西缘裂解分离出

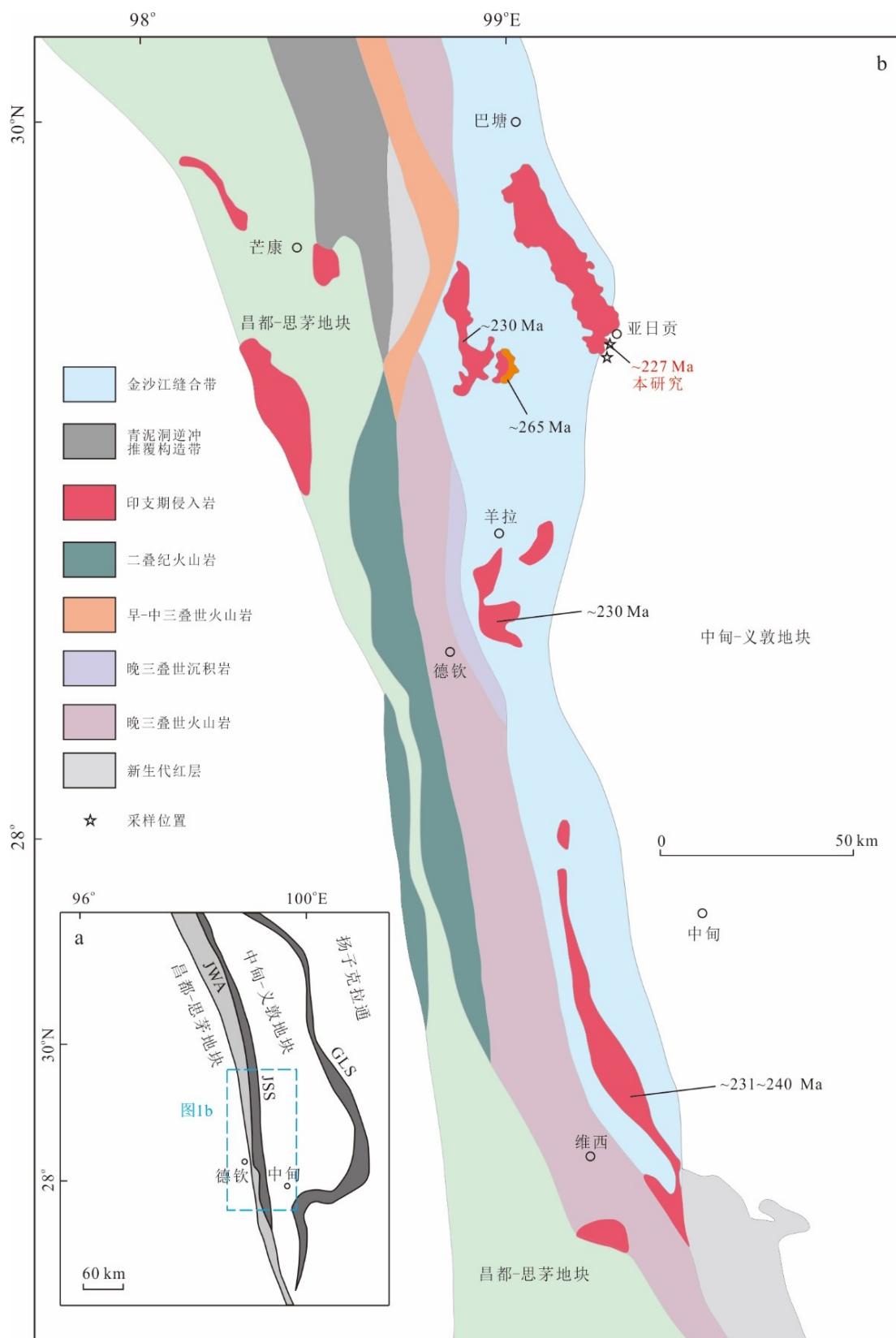


图1 金沙江古特提斯构造带大地构造单元略图(a)和晚古生代-早中生代岩浆岩分布(b)

Fig. 1 Sketch map showing major tectonic units (a) and Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatic rocks (b) in the Jinshajiang Paleo-Tethyan belt

b. 根据 Hou et al. (2003)修编. GLS. 甘孜-理塘蛇绿混杂岩带; JSS. 金沙江缝合带; JWA. 江达-维西岩浆弧; b. 岩浆锆石年龄数据来自文献 Zhu et al. (2011, 2022), Zi et al. (2012)

来的微陆块(如 Wang *et al.*, 2021a). 大致沿 NNW 向乡城–格咱断裂, 可将其进一步分为东西两部分. 其西部主要出露古生代变质沉积岩和少量火山岩夹层, 在稻城–木里地区还出露少量前寒武系变质岩. 其东部出露大面积的火山岩和复理石, 以及晚三叠世火山–侵入岩, 南部区域还发育多个斑岩型铜矿床(Wang *et al.*, 2021a). 昌都–思茅地块

位于金沙江蛇绿混杂岩带西侧, 该地块的变质基底在点仓山–哀牢山局部出露, 主要为一套低角闪岩相到高绿片岩相变质岩(Wang *et al.*, 2014a, 2014b). 最老的沉积盖层见有下奥陶统变质沉积岩, 它们被中泥盆统底砾岩和浅海沉积岩覆盖, 并发育有晚古生代到早中生代浅海碎屑岩、碳酸盐岩和含火山岩地层(Zi *et al.*, 2012).

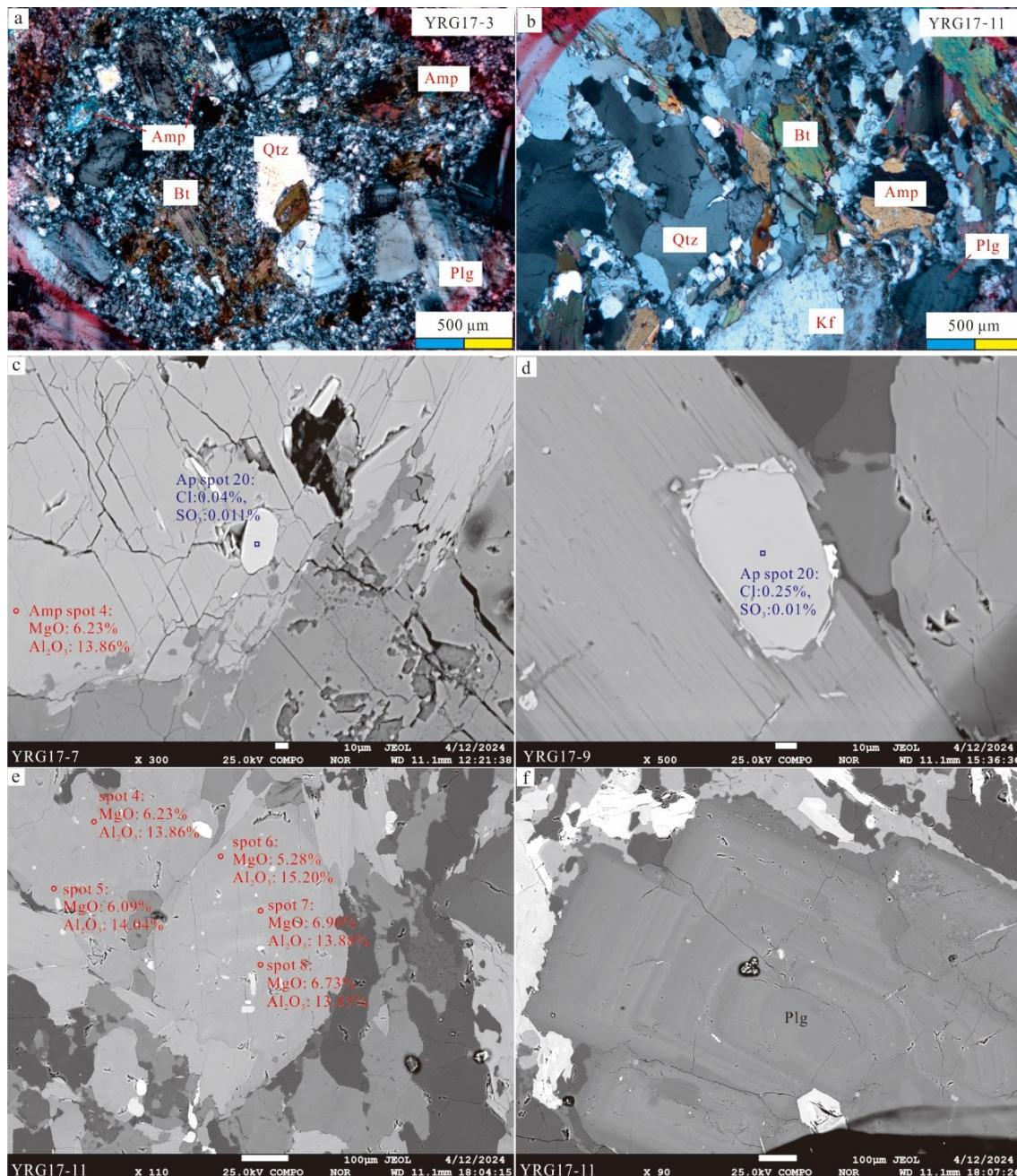


图 2 亚日贡岗闪长岩代表性样品显微图像(a 和 b)和矿物电子背散射图像(c~f)

Fig.2 Representative photomicrographs of the Yarigong granodiorites (a, b) and backscattered electron images of amphibole, apatite and plagioclase (c~f)

图 c~f 中, 红色数据为角闪石(红色圆圈)分析点的 MgO 和 Al_2O_3 含量, 蓝色数据为磷灰石(蓝色方块)分析点的 Cl 和 SO_3 分析值; Amp. 角闪石; Ap. 磷灰石; Bt. 黑云母; Kf. 钾长石; Plg. 斜长石; Qtz. 石英

亚日贡岩体侵入到金沙江蛇绿混杂岩带中(图 1b),其围岩为晚古生代的绿片岩到高角闪岩相变质泥岩、角闪岩和大理岩(Zhu *et al.*, 2011, 2022).该岩体长轴呈 NNW 走向,出露面积>250 km².根据岩体最南部出露的大量花岗质滚石,主要岩性为似斑状到中粒花岗闪长岩(图 2a, 2b).斑状结构的岩石中斑晶含量不超过 20%,主要为自形-半自形斜长石,粒径在 1~2 mm. 主要造岩矿物为石英、斜长石、钾长石、角闪石和黑云母,以及少量单斜辉石,副矿物有锆石、磷灰石等(图 2c~2f).由于该区地形和岩体出露限制,在岩体的南部区域尽可能靠近岩体的两个不同位置采集 11 件岩石样品.

2 分析方法

角闪石和磷灰石主量元素分析在中国科学院地球化学研究所关键矿产成矿与预测全国重点实验室完成. 所用仪器 JEOL JXA8230 型电子探针,分析过程中电压为 25 kV,电流为 10 nA,束斑大小在 3~10 μm. 采用钛角闪石、磷灰石、铬透辉石、镁铝榴石和硅铍铝钠石为标样,并优先分析易挥发和扩散元素,测得元素含量使用 ZAF 校正方法进行校正,分析误差好于 2%.

用作分选锆石的岩石样品每件重约 5 kg,清洗破碎后用常规重磁法分选出锆石,并在双目镜下挑纯. 将锆石粘在环氧树脂上制成靶,然后抛光打磨去掉约 1/3 锆石厚度使其内部暴露,在光学显微镜下观察其形貌特征.

锆石 U-Pb 同位素和微量元素分析在中国科学院地球化学研究所关键矿产成矿与预测全国重点实验室完成,所用仪器为配备 GeoLas Pro 193 nm ArF 准分子激光器的 Agilent 7500 x 四极杆等离子质谱仪. 分析中使用的激光束斑直径为 32 μm,激光脉冲频率为 5 Hz. 锆石 91500 用作同位素分馏校正外部标样,锆石 Plešovice 和 Qinghu 用作外部质量监控样. 微量元素校正标样为 NIST610、BHVO-2G、BCR-1G 和 BIR-1G. 采用多外标-无内标的校正方法进行含量校正,数据离线处理使用 ICPMSData-Cal 10.2 软件进行(Liu *et al.*, 2008),年龄计算和谐和图使用 Isoplot/Ex(ver. 4.2; Ludwig, 2012)完成.

在剔除岩石样品表面肉眼可见的蚀变部分之后,将其破碎成小颗粒之后用清水清洗后晾干,再用碳化钨研钵研磨成不低于 200 目粉末烘干备用. 主量元素氧化物含量分析在广州澳实矿物实验室

完成. 称取适量岩石样品与偏硼酸锂混合均匀后置于铂金坩埚中在 1 000 °C 条件下熔融后制成玻璃片,然后在 X 射线荧光光谱仪上进行分析测试. 全岩微量元素和稀土元素含量分析在中国科学院地球化学研究所关键矿产成矿与预测全国重点实验室完成,分析仪器为 PerkinElmer 公司的 ELAN DRC-e 型电感耦合等离子质谱仪,详细分析流程同 Zhu *et al.* (2022) 中相关参考文献. 称取 50 mg 样品粉末,将其置于洁净的特氟龙(Teflon)溶样杯中,加入 HF-HNO₃ 混合酸,在 190 °C 条件下溶解 48 h. 加入 Rh 标准溶液作为内标校正信号漂移,大多数元素分析精度优于 10%. 全岩 Sr-Nd 同位素分离纯化和测试在南京聚谱检测科技有限公司完成. 将样品置于特氟龙溶样杯中,并加入硝酸和氢氟酸混合酸;在 195 °C 条件下加热 3 d 以确保样品彻底溶解. Sr 分离纯化使用 AG50W-X8 阳离子树脂和 Sr 特效树脂交换柱完成,Nd 分离纯化使用 LN 交换树脂. 同位素分析仪器为 Nu Plasma II MC-ICP-MS. 测试过程中,采用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.119 4 进行内部仪器质量分馏校正,Sr 同位素国际标准物质 NIST SRM 987 作为外标校正仪器漂移;采用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.721 9 内部校正仪器质量分馏,Nd 同位素国际标准物质 JNd-1 作为外标校正仪器漂移. 分析过程中,美国地质调查局岩石标准物质 AGV-2 和 BHVO-2 的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 测试值分别为 0.703 977±0.000 005、0.703 483±0.000 005 和 0.512 774±0.000 002、0.512 981±0.000 002.

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

样品中的锆石多具有长柱状外形,长宽比约 1:1 到 3:1,长轴长度一般 150 μm. 绝大多数锆石具有较高的 Th/U 比值(0.08~0.75),与典型岩浆锆石类似. 样品 YRG17-3 共获得的 25 个分析点中(图 3),一个分析点 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表观年龄为(455±5) Ma,可能为捕捞晶或继承锆石. 另外两个分析点谐和度低于 90%,它们不参与谐和年龄计算. 其余 22 个分析点的加权平均年龄和谐和年龄一致,为(227±2) Ma (*n*=22, MSWD=1.7),代表该岩体形成年龄.

分析的锆石均具有低的轻稀土而高重稀土元素含量特征,显示左倾的稀土元素配分模式,多数都具有显著的正 Ce 异常和负 Eu 异常,它们还具有较低的 Ti 含量(<10 × 10⁻⁶). 尽管在分析过程中,

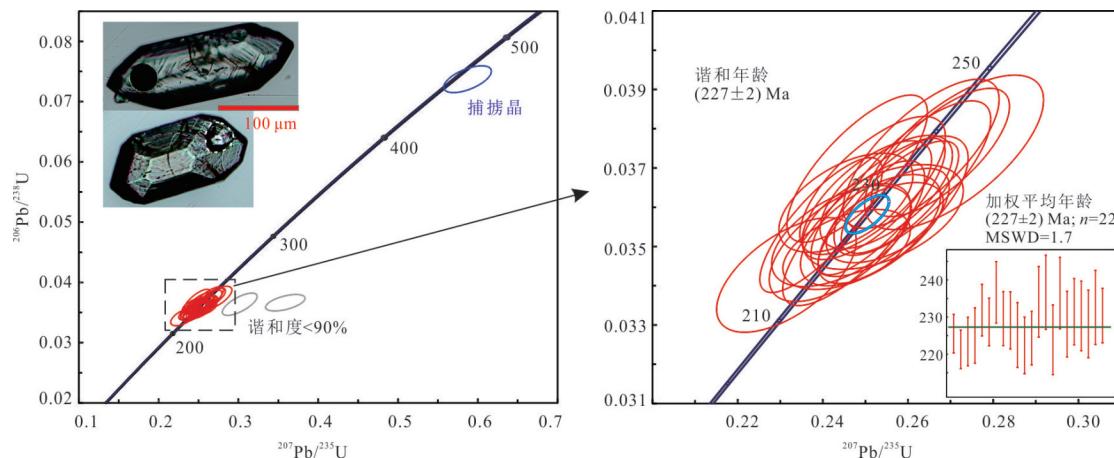


图3 亚日贡岩体锆石U-Pb谐和图和 $^{206}\text{U}/^{238}\text{Pb}$ 加权平均年龄
Fig.3 Zircon U-Pb concordia diagram and $^{206}\text{U}/^{238}\text{Pb}$ weighted mean age

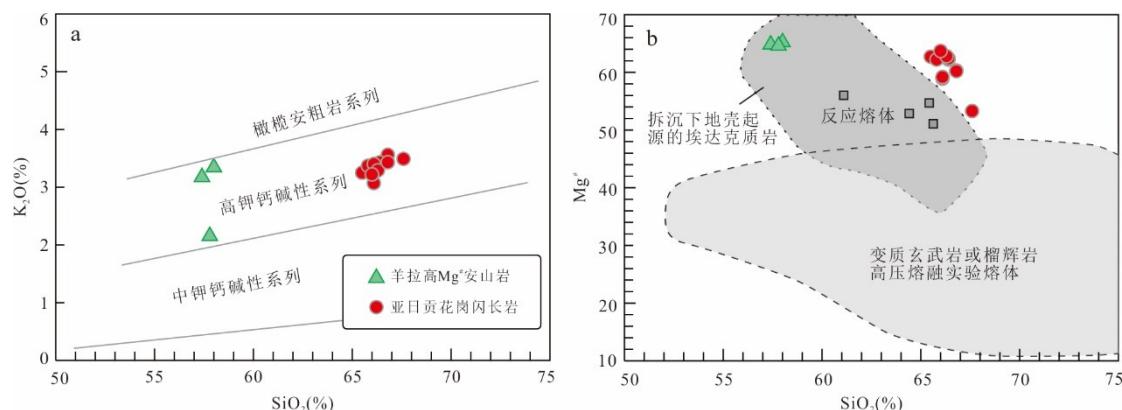


图4 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图(a)和 $\text{Mg}^{\#}-\text{SiO}_2$ 图(b)
Fig.4 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (a) and $\text{Mg}^{\#}-\text{SiO}_2$ (b) plots

准同期的羊拉高 $\text{Mg}^{\#}$ 安山岩用作对比, 数据引自 Fan *et al.* (2020); 图 b 中玄武质熔体与橄榄岩地幔反应熔体据 Rapp *et al.* (1999), 高压变质玄武质岩石熔融实验熔体范围据 Rapp and Watson (1995); 拆沉下地壳起源的埃达克质岩范围据 Wang *et al.* (2006)

我们尽可能地选择没有裂隙和肉眼可见包裹体的位置进行激光剥蚀, 但锆石内部依然存在细小磷灰石等矿物包裹体。分析获得的数据中, 元素 Ca 含量超过 300×10^{-6} 、La 含量高于 0.3×10^{-6} 的可能受细微磷灰石包裹体混染。由此, 对明显受包裹体混染的数据仅列于表中, 不参与后续相关数值计算和分析讨论。

3.2 角闪石和磷灰石成分特征

样品中的角闪石多呈自形-半自形结构, 绝大多数均未显示明显环带结构或筛状结构特征(图 2c, 2e)。这些角闪石主要为钙质角闪石族的镁角闪石, 极少数为阳起石或韭闪石。化学成分特征上, 它们多数具有高的 SiO_2 ($>50\%$) 而低 Al_2O_3 含量 ($<11\%$), 其 MgO 在 $13.3\% \sim 15.6\%$ 。

亚日贡岩体中的磷灰石存在于长石-石英间隙或在角闪石/黑云母中以包裹体形式存在(图 2c,

2d), 它们绝大多数显示均匀的成分特征, 极少数具有相对内部窄而更亮的边部。分析点几乎全部位于在磷灰石内部具有均一成分区域。这些磷灰石具有低 Cl ($0.03\% \sim 0.66\%$, 检出限为 $50 \times 10^{-6} \sim 70 \times 10^{-6}$) 和 SO_3 含量 (低于检测限 $\sim 0.1\%$) 特征, 多数具有较低的 F/Cl 比值 (中值为 10.5, 大多数都低于 30)。

3.3 岩石主量、微量元素

对 11 个样品的分析结果显示, 这些岩石具有较高的 SiO_2 ($65.5\% \sim 67.6\%$) 和全碱含量 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$: $6.26\% \sim 6.81\%$), 属于高钾钙碱性系列花岗闪长岩 (图 4a)。此外, 这些岩石还具有高的 MgO ($2.11\% \sim 3.96\%$) 但偏低的 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{t}}$ 含量 ($3.67\% \sim 4.21\%$), 这使得它们具有高的 $\text{Mg}^{\#}$ ($53 \sim 64$, 图 4b)。

亚日贡岩体的 Cr ($47.8 \times 10^{-6} \sim 133 \times 10^{-6}$)、 Ni 含量 ($14.0 \times 10^{-6} \sim 61.6 \times 10^{-6}$) 相对较高, 显示一定

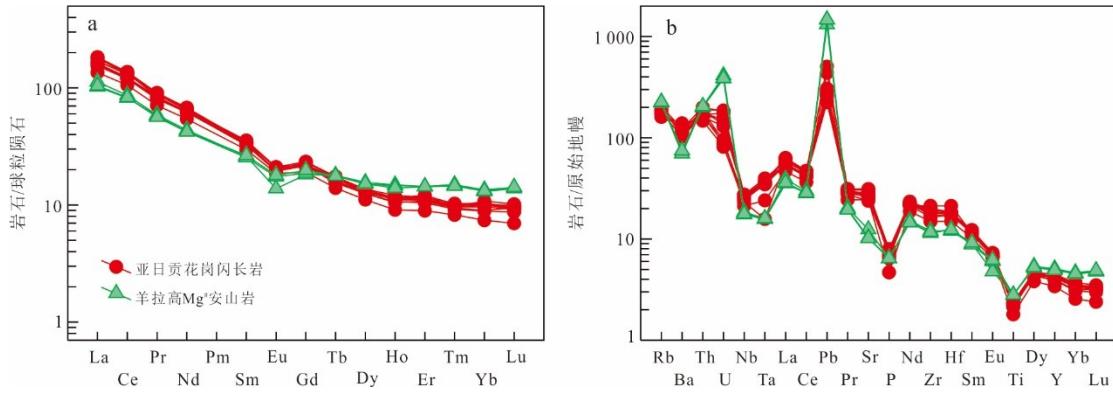


图5 球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b)

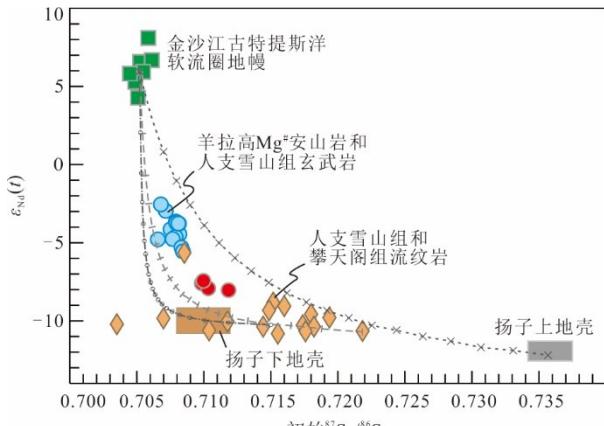
标准化值据 Sun and McDonough(1989), 羊拉高Mg[#]安山岩数据来自 Fan *et al.*(2020)

图6 Sr-Nd同位素

Fig.6 Sr-Nd isotope plots

红色实心圆点代表亚日贡花岗闪长岩. 图中二元混合拟合曲线上的标记指示 5% 端元增量. 金沙江古特提斯软流圈地幔值据 Xu and Castillo (2004), 羊拉高 Mg[#] 安山岩和人支雪山组玄武岩数据引自 Fan *et al.* (2020) 和 Wang *et al.* (2014a, 2014b), 人支雪山组和攀天阁组流纹岩数据引自 Wang *et al.* (2014a, 2014b) 和 Zi *et al.* (2012), 扬子下地壳和上地壳范围据 Zhu *et al.* (2011) 及其中参考文献

的地幔亲缘性. 它们还具有高的 Sr(502×10^{-6} ~ 658×10^{-6}) 和 Y 含量(15.5×10^{-6} ~ 20.2×10^{-6}), 重稀土元素 Yb 含量(1.26×10^{-6} ~ 1.84×10^{-6}) 也较高, 不同于埃达克质岩, 尽管它们具有高的轻稀土元素含量($La: 32.1 \times 10^{-6}$ ~ 43.4×10^{-6}) 和明显分异的轻重稀土元素配分模式($La/Yb: 21.4 \sim 28.1$, 图 5a). 这些样品显示中等程度的 Eu 亏损特征($Eu/Eu^*: 0.70 \sim 0.78$). 在原始地幔标准化蛛网图上, 它们显示明显的 Nb、Ta 和 Ti 相对相邻元素亏损(图 5b), 类似大陆地壳和弧岩浆的地球化学特征.

3.4 全岩 Sr-Nd 同位素

对其中的 4 个样品分析了 Sr-Nd 同位素, 它们

显示较为均一而富集的特征(图 6). 其中, 测得的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在 $0.711\,691 \sim 0.713\,842$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值在 $0.512\,094 \sim 0.512\,122$. 根据锆石 U-Pb 年龄结果, 计算得到这些样品的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在 $0.709\,8 \sim 0.711\,8$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t=227\text{ Ma})$ 值介于 $-8.0 \sim -7.4$.

4 讨论

4.1 岩石成因

本研究获得的全岩主量元素数据表明, 亚日贡岩体具有高的 SiO_2 和 $Mg^{\#}$, 表明其不可能由地幔橄榄岩或玄武质中下地壳直接熔融形成. 根据熔融实验结果, 在中下地壳温度-压力条件下, 玄武质岩石熔融形成的熔体的 $Mg^{\#}$ 常常低于 50 (Rapp and Watson, 1995; Rapp *et al.*, 1999); 而地幔橄榄岩低程度熔融时仅可能形成高镁安山质岩浆. 类似的高 $Mg^{\#}$ 花岗闪长质岩浆可能有以下几种成因: a. 原始玄武质或安山质岩浆分离结晶; b. 幕源岩浆与壳源岩浆混合作用; c. 倾冲洋壳熔融形成的熔体混染地幔镁铁质岩石; d. 增厚的大陆地壳拆沉并与地幔发生反应.

原始玄武质或安山质岩浆分异模式 (Wang *et al.*, 2021b) 不可能形成亚日贡岩体代表的高镁酸性岩. 在金沙江蛇绿混杂岩带南部, 羊拉地区的高 $Mg^{\#}$ 安山质岩浆 (Fan *et al.*, 2020) 喷发时代与亚日贡岩浆侵位时代相近或稍早, 这指示后者可能由羊拉高 $Mg^{\#}$ 安山质岩浆经过结晶分异作用形成. 然而, 羊拉高 $Mg^{\#}$ 安山岩的 $\text{Sr} (93.3 \times 10^{-6} \sim 560 \times 10^{-6})$ 、 Sr/Y ($4.4 \sim 28.5$) 和 La/Yb 比值 ($5.8 \sim 11.7$) 明显低于亚日贡花岗闪长岩. 在地壳压力条件下, 要使得演化的岩浆具有相对母岩浆更高的 Sr/Y 和 La/Yb 比值,

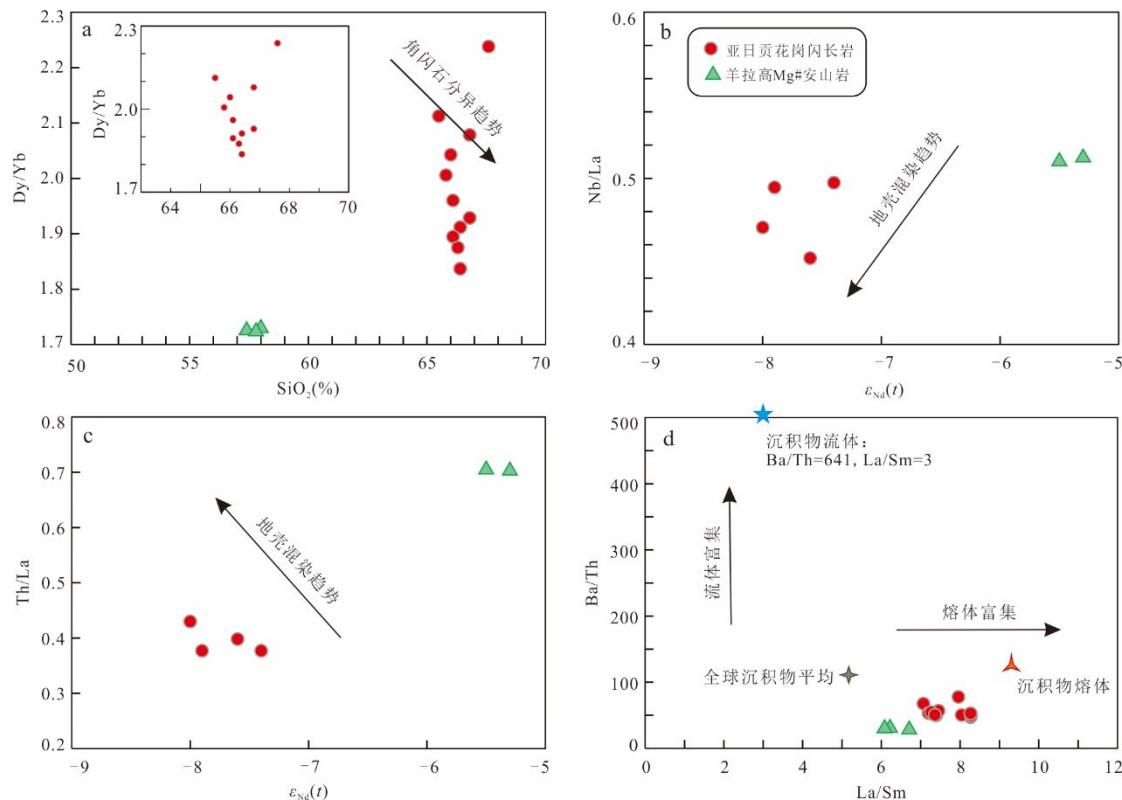


图 7 (a) Dy/Yb-SiO₂ 协变图,(b) Nb/La-ε_{Nd}(t),(c) Th/La-ε_{Nd}(t),(d) Ba/Th-La/Sm 图

Fig.7 (a) Dy/Yb vs. SiO₂ covariant diagram, (b) Nb/La-ε_{Nd}(t), (c) Th/La vs. ε_{Nd}(t) values, and (d) Ba/Th vs. La/Sm plots 据 Tatsumi(2001). 红色实心圆点代表亚日贡花岗闪长岩,羊拉高 Mg#安山岩来自 Fan et al. (2020). 图 a 中角闪石分异趋势据 Davidson et al. (2007),图 d 中全球沉积物平均成分、沉积物流体和熔体成分据 Plank and Langmuir (1998)

则可能的结晶分异矿物组合中必然出现角闪石或石榴子石,而斜长石分异的比例则要求很低。然而,亚日贡这些样品的 Dy/Yb 比值随 SiO₂ 变化趋势(图 7a)显然与大量角闪石分异模型不符(Davidson et al., 2007)。它们的 Dy/Yb 比值随 SiO₂ 升高并未表现出明显的增加趋势,且其高的重稀土元素含量(Yb: $1.26 \times 10^{-6} \sim 1.84 \times 10^{-6}$)也与显著的石榴子石分异模式不同(Wang et al., 2021b)。

地幔和地壳熔融形成的岩浆经过岩浆混合作用(b 模型)被认为是高 Mg# 岩浆形成的一种重要途径(Streck and Leeman, 2018)。然而,该区域缺乏同时期的高 Sr 含量的岩浆岩,而亚日贡岩体的样品均具有高 Sr 含量($>500 \times 10^{-6}$),这使得该模型缺乏合适的混合端元。此外,这些样品未见有石英眼斑、辉石和角闪石等构成的团块等指示岩浆混合作用的典型结构特征(图 2a, 2b)。岩石中角闪石和斜长石等矿物缺乏显著的因岩浆混合作用形成的熔蚀结构、筛状结构、成分回吸面和反环带特征(图 2c, 图 2e~2f)。

一些天然产出的埃达克质岩具有高的 Mg#, 它

们被认为是俯冲洋壳熔融形成的熔体与地幔反应的结果(c 模型,Gómez-Tuena et al., 2007)。但是,亚日贡岩体样品具有较高的 Y 和 Yb 含量,相对低的 Sr/Y 和 La/Yb, 以及它们高的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和低 ε_{Nd}(t) 值不支持玄武质洋壳熔融并与地幔反应的假设。该岩体侵位到金沙江蛇绿混杂岩带之中,其锆石年龄晚于贡觉榴辉岩记录的超高压变质和快速剥露事件(Tang et al., 2023),也晚于该带的一些具有板内岩浆地球化学特征的基性岩(Jian et al., 2009)、以及类似 A₂型花岗质岩浆的流纹岩和早-中三叠世和更老地层之间的不整合事件(Zi et al., 2012 及其中相关参考文献),是金沙江古特提斯碰撞后的岩浆产物。因此,其有可能是缝合带两侧羌塘和中咱地块碰撞导致地壳增厚并发生榴辉岩相变质,进而因榴辉岩较高的密度发生拆沉熔融形成(d 模型,Gao et al., 2004; Wang et al., 2006),但是这些岩石的高的重稀土元素含量和平坦的重稀土元素配分模式(图 5a)不支持熔融发生在榴辉岩相压力深度范围。同时,在金沙江古特提斯造山带,并未发现同时期增厚地壳熔融形成的埃达克质岩,这

间接地指示该区域可能不存在显著地壳增厚事件,也就不可能发生因地壳增厚而发生拆沉陆壳熔融。

当前获得的亚日贡岩体数据显示,这些岩石具有高K₂O和K₂O/Na₂O比值特征。实验结果表明,这种特征主要是继承其源区(如Rapp and Watson, 1995; Rapp *et al.*, 1999),反映其熔融源岩的高K₂O特性。因此,这指示亚日贡岩体的源岩类似俯冲沉积物或大陆地壳物质,而非低钾玄武质岩石。其次,这些岩石还具有高的Th/La比值(0.32~0.43),较高的La含量和分异的稀土元素配分模式,这些特征与大陆地壳或全球俯冲沉积物类似。此外,这些岩石还具有均一而富集的全岩Sr-Nd同位素特征,由于 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与Nb/La和Th/La比值之间并未显示显著的地壳混染趋势(图7b,7c),故认为这种富集的Sr-Nd同位素反映其源区可能为古老陆壳物质。亚日贡样品高La/Sm且低Ba/Th比值(图7d)也与沉积物熔体相似(Tatsumi, 2001)。在金沙江构造带,稍早时期的玄武质岩石相比较亚日贡高镁花岗闪长岩具有更亏损的Sr-Nd同位素(图6)、更低的La/Yb和Th/La比值(Wang *et al.*, 2014a, 2014b; Zi *et al.*, 2012),这说明早期沉积物俯冲不可能是导致亚日贡岩体富集Sr-Nd同位素的首要因素。考虑到亚日贡岩体就位于碰撞或碰撞后的构造环境,其母岩浆可能为俯冲陆壳物质发生熔融并混染橄榄岩地幔从而形成这些高镁的岩浆。

4.2 岩浆形成的动力学过程

雅轩桥弧火山喷发于264~268 Ma期间(Jian *et al.*, 2009),结合侵入到蛇绿岩中的吉义独花岗闪长岩(263 Ma, 简平等, 2003),表明金沙江古特提斯洋壳俯冲可能持续到260 Ma。金沙江古特提斯东侧中咱-义敦地块和西侧羌塘地块的碰撞事件可能发生在不晚于250 Ma。德钦双峰式火山岩浆喷发发生在249~237 Ma,可能与向西俯冲到昌都(羌塘)地块之下的板片断离作用有关,同时还使得中咱-义敦地块发生抬升剥蚀,西侧的昌都地块由弧后盆地转变成弧后前陆盆地(Wang *et al.*, 2014a, 2014b)。具有A₂型花岗质岩浆特征的攀天阁组流纹岩和崔依比组双峰式火山岩(245~237 Ma, Zi *et al.*, 2012),以及同时发育的同构造沉降、断陷盆地(Mo *et al.*, 1994; Hou *et al.*, 2003)指示地壳伸展构造。此外,新近发现的贡觉榴辉岩中变质锆石年龄为244~240 Ma,榴辉岩围岩中云母Ar-Ar坪年龄在238~225 Ma,指示金沙江蛇绿混杂岩带两侧地体碰

撞拼合时间应不晚于~240 Ma(Tang *et al.*, 2023)。

根据上述资料,亚日贡岩体代表的岩浆形成于碰撞后伸展构造环境。且在更早或更晚时期,在金沙江构造带并未发现典型的具有高钾特征的埃达克质岩,故认为该区域可能没有发生显著地壳增厚和榴辉岩化地壳拆沉作用。而该岩体的高Mg[#]特征指示地幔物质参与其岩浆形成,并且其Sr-Nd同位素指示富集的沉积物(很可能是俯冲的古老陆壳物质)贡献。更可能的情况是,至少部分陆壳物质被俯冲洋壳拖拽进入到浅部地幔,由于俯冲洋壳发生榴辉岩化变质而密度增加,使得其与后侧陆壳发生断离(Davis and von Blanckenburg, 1995)。在此情形下,陆壳物质受软流圈地幔加热而发生熔融,形成的熔体混染橄榄岩地幔,使得其具有高的Mg[#]和Cr含量以及富集的Sr-Nd同位素,随后岩浆侵位至缝合带位置。实验岩石学数据表明,酸性熔体与橄榄岩地幔反应能够有效提高混染后熔体的地幔相容元素含量(Rapp *et al.*, 1999)。类似的,土耳其Central Anatolia的更新世高镁酸性岩浆也被认为其形成于俯冲板片断离有关(Aydin *et al.*, 2022)。

4.3 斑岩Cu成矿潜力

大量研究结果表明,岩浆较高的H₂O含量、氧逸度、S和Cl含量对斑岩型Cu矿床形成具有重要作用,有利于成矿金属元素从源区提取、搬运和沉淀(如Lu *et al.*, 2016; Zhu *et al.*, 2018)。对亚日贡岩体岩浆形成斑岩型Cu矿的成矿潜力,本研究将从上述几个因素对其开展评估。

亚日贡岩体的母岩浆具有较高的H₂O含量特征。这些样品中都发育岩浆成因角闪石,指示岩浆具有较高H₂O含量。根据角闪石化学成分计算的三个不同样品平衡熔体H₂O含量平均值分别为(5.6±0.2)%、(5.6±0.3)%和(5.6±0.2)%,高于藏东玉龙斑岩Cu矿成矿斑岩(4.2%, Huang *et al.*, 2022)。根据锆石微量元素计算结果表明,亚日贡岩体中锆石结晶平衡熔体H₂O含量为(9.4±0.7)%,也稍高于华南德兴((8.4±0.4)%),西藏甲玛((8.8±0.5)%))和驱龙斑岩Cu矿成矿斑岩((8.4±0.4)%))相应值(Ge *et al.*, 2023)。

形成亚日贡岩体的岩浆具有中等偏低的氧逸度特征。锆石微量元素计算(Loucks *et al.*, 2020)结果表明熔体相对氧逸度为 $\triangle \text{FMQ}=1.1\pm0.3$ (n=12, 图8c),根据角闪石计算的岩浆相对氧逸度为 $\triangle \text{FMQ}=2.1\pm0.2$ (图8d)。研究指出(Wang *et al.*, 2014a, 2014b),角闪石计算所得相对氧逸度比磁铁

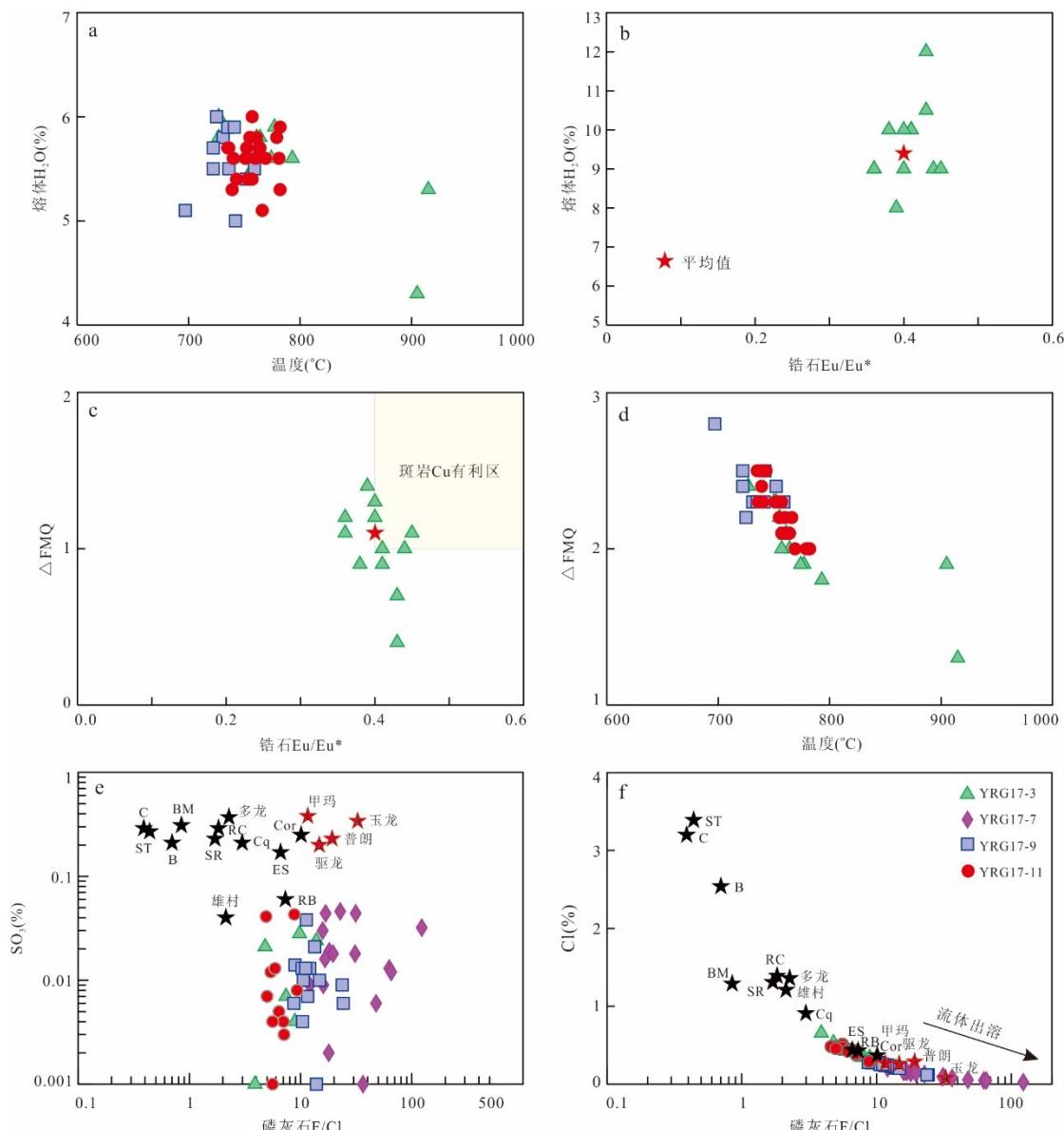


图8 根据角闪石(a. Ridolfi *et al.*, 2010)和锆石(b. Ge *et al.*, 2023)成分计算的平衡熔体H₂O含量,根据锆石(c. Loucks *et al.*, 2020)和角闪石(d. Ridolfi *et al.*, 2010)计算的平衡熔体ΔFMQ氧逸度,磷灰石SO₃(e)和Cl含量与F/Cl比值(f)

Fig. 8 (a) and (b) showing calculated melt H₂O contents in equilibrium with amphibole (Ridolfi *et al.*, 2010) and zircon (Ge *et al.*, 2023), (c) and (d) showing calculated ΔFMQ values of equilibrated melt crystallized zircon (Loucks *et al.*, 2020) and amphibole (Ridolfi *et al.*, 2010); apatite SO₃(e) and Cl contents (f) vs. F/Cl values

图e~f中黑色(字母简写指代依次为B: Bumolo; BM: Black Mountain; C: Clifton; Cor: Corocochuayco; Cq: Chuquicamata; ES: El Salvador; RB: Rio Blanco; RC: Red Chirs; ST: Santo Tomas II)和红色五星分别代表俯冲和碰撞阶段斑岩系统Cu矿床,根据Huang *et al.*(2023)文中整理数据绘制

矿-钛铁矿矿物对计算值更高(可达1 log单位)。亚日贡岩体中锆石Eu/Eu*值在0.36~0.45,与全球斑岩Cu矿床成矿斑岩大致相同(Lu *et al.*, 2016)。变价元素可作为岩浆氧逸度的指示,亚日贡花岗闪长岩的V/Sc比值小于7,这低于藏南冈底斯中新世多个斑岩Cu矿床成矿斑岩的相应值(王瑞等,2021)。结合该岩体中极低的磷

灰石S含量(见后文)认为,亚日贡岩体反映的岩浆氧逸度相对典型斑岩Cu矿成矿斑岩偏低。

这些岩石样品中的磷灰石具有低S含量(图8e),显著低于西藏玉龙和Red Chris成矿斑岩磷灰石SO₃(Zhu *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2022)。由于锆石微量数据和角闪石都指示亚日贡岩体所代表的岩浆具有中等氧逸度特征,因此,这种低S含量不

太可能是源区存在的S未能有效提取或经历早期硫化物饱和消耗所致。尽管这些样品变化的F/Cl比值指示岩浆可能遭受不同程度的流体出溶(Huang et al., 2023),但不同赋存状态的磷灰石均显示系统性的低S特征,因此,这很可能反映了岩浆低S的性质。同时,这些磷灰石也以中等偏低的Cl含量为特征(图8f)。尽管部分可能是受流体出溶的影响,但大部分Cl高于0.2%的数据并未显示极高的F/Cl比值。且大多数情况下电子探针分析位置都位于均一的磷灰石中部,由此,可认为磷灰石Cl反映了岩浆整体低Cl特征。

硫含量是铜硫化物沉淀的关键要素之一,岩浆低的S含量不利于Cu的沉淀和矿床的形成(Jugo, 2009);而Cl则是重要的矿化剂,对Cu在流体中的迁移起到关键作用(Zhu et al., 2018; Huang et al., 2023)。综合认为,亚日贡岩体很可能不具有形成斑岩型Cu矿床的潜力,这可能主要是由于岩浆较低的氧逸度和S含量所控制,它们不利于成矿元素Cu的迁移和沉淀。

5 结论

对青藏高原东部巴塘地区的亚日贡岩体开展了地质年代学、岩石地球化学研究,根据获得数据和区域地质资料得到如下几点认识:

(1)亚日贡花岗闪长岩具有高Mg[#]和富集的Sr-Nd同位素特征,是晚三叠世中咱和东羌塘-昌都地块碰撞后岩浆产物。

(2)其形成与俯冲洋壳和后侧陆壳的断离作用有关,断离处的陆壳受热熔融形成的酸性熔体与地幔反应形成高Mg[#]酸性岩浆。

(3)亚日贡岩体代表的岩浆具有较高H₂O含量,但磷灰石低S和锆石成分指示其低于典型斑岩Cu成矿岩浆氧逸度,故区内同期岩浆可能不具有较高的斑岩Cu成矿潜力。

致谢:感谢两位审稿专家的详细审阅和宝贵修改意见。实验室分析工作得到关键矿产成矿与预测全国重点实验室漆亮、郑文勤、胡静等人帮助,一并致谢!

References

- Aydin, F., Sönmez, M., Siebel, W., et al., 2022. Slab Break-off-Related Magnesian Andesites and Dacites with Adakitic Affinity from the Early Quaternary Keçiboydurun Stratovolcano, Cappadocia Province, Central Turkey: Evidence for Slab/Sediment Melt - Mantle Interaction and Magma Mixing. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 177(7): 65. <https://doi.org/10.1007/s00410-022-01931-8>
- Davidson, J., Turner, S., Handley, H., et al., 2007. Amphibole "Sponge" in Arc Crust? *Geology*, 35(9): 787. <https://doi.org/10.1130/g23637a.1>
- Davis, J. H., von Blanckenburg, F., 1995. Slab Breakoff: A Model of Lithosphere Detachment and Its Test in the Magmatism and Deformation of Collisional Orogenes. *Earth and Planetary Science Letters*, 129(1-4): 85–102. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)00237-S](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)00237-S)
- Fan, H. P., Li, B., Zhou, J. X., et al., 2020. Subduction-Modified Mantle-Derived Triassic High-Mg Andesites in the Sanjiang Tethys, Eastern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 191: 104216. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2019.104216>
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892–897. <https://doi.org/10.1038/nature03162>
- Ge, R. F., Wilde, S. A., Zhu, W. B., et al., 2023. Earth's Early Continental Crust Formed from Wet and Oxidizing Arc Magmas. *Nature*, 623(7986): 334–339. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06552-0>
- Gómez-Tuena, A., Langmuir, C. H., Goldstein, S. L., et al., 2007. Geochemical Evidence for Slab Melting in the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Petrology*, 48(3): 537–562. <https://doi.org/10.1093/petrology/egl071>
- Hou, Z. Q., Wang, L. Q., Zaw, K., et al., 2003. Post-Collisional Crustal Extension Setting and VHMS Mineralization in the Jinshajiang Orogenic Belt, Southwestern China. *Ore Geology Reviews*, 22(3–4): 177–199. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(02\)00141-5](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(02)00141-5)
- Huang, M. L., Zhu, J. J., Bi, X. W., et al., 2022. Low Magmatic Cl Contents in Giant Porphyry Cu Deposits Caused by Early Fluid Exsolution: A Case Study of the Yulong Belt and Implication for Exploration. *Ore Geology Reviews*, 141: 104664. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104664>
- Huang, M. L., Zhu, J. J., Chiaradia, M., et al., 2023. Apatite Volatile Contents of Porphyry Cu Deposits Controlled by Depth-Related Fluid Exsolution Processes. *Economic Geology*, 118(5): 1201–1217. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5000>
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2009. Devonian to Permian Plate Tectonic Cycle of the Paleo-Tethys Oro-

- gen in Southwest China (I): Geochemistry of Ophiolites, Arc/back-Arc Assemblages and Within-Plate Igneous Rocks. *Lithos*, 113(3–4): 748–766. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.004>
- Jian, P., Liu, D. Y., Sun, X. M., 2003. SHRIMP Dating of Carboniferous Jinshajiang Ophiolite in Western Yunnan and Sichuan: Geochronological Constraints on the Evolution of the Paleo-Tethys Oceanic Crust. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 217–228, 291–292 (in Chinese with English abstract).
- Jugo, P. J., 2009. Sulfur Content at Sulfide Saturation in Oxidized Magmas. *Geology*, 37(5): 415–418. <https://doi.org/10.1130/G25527A.1>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Loucks, R. R., Fiorentini, M. L., Henríquez, G. J., 2020. New Magmatic Oxybarometer Using Trace Elements in Zircon. *Journal of Petrology*, 61(3): egaa034. <https://doi.org/10.1093/petrology/egaa034>
- Lu, Y.J., Loucks, R.R., Fiorentini, M., et al., 2016. Zircon Compositions as A Pathfinder for Porphyry Cu±Mo±Au Deposits. In: Richards, J.P., ed., Tectonics and Metallogeny of the Tethyan Orogenic Belt. Society of Economic Geologists, Colorado, 329–347. <https://doi.org/10.5382/sp.19.13>
- Ludwig, K.R., 2012. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publications, Berkeley, 75.
- Mo, X. X., Deng, J. F., Lu, F. X., 1994. Volcanism and the Evolution of Tethys in Sanjiang Area, Southwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 9(4): 325–333. [https://doi.org/10.1016/0743-9547\(94\)90043-4](https://doi.org/10.1016/0743-9547(94)90043-4)
- Plank, T., Langmuir, C. H., 1998. The Chemical Composition of Subducting Sediment and Its Consequences for the Crust and Mantle. *Chemical Geology*, 145(3–4): 325–394. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00150-2)
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D., et al., 1999. Reaction between Slab-Derived Melts and Peridotite in the Mantle Wedge: Experimental Constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335–356. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00106-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00106-0)
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8–32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- Richards, J. P., 2015. The Oxidation State, and Sulfur and Cu Contents of Arc Magmas: Implications for Metallogeny. *Lithos*, 233: 27–45. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.12.011>
- Ridolfi, F., Renzulli, A., Puerini, M., 2010. Stability and Chemical Equilibrium of Amphibole in Calc-Alkaline Magmas: An Overview, New Thermobarometric Formulations and Application to Subduction-Related Volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1): 45–66. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0465-7>
- Streck, M. J., Leeman, W. P., 2018. Petrology of “Mt. Shasta” High-Magnesian Andesite (HMA): A Product of Multi-Stage Crustal Assembly. *American Mineralogist*, 103(2): 216–240. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6151>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Tang, Y., Qin, Y. D., Gong, X. D., et al., 2023. Petrology, Geochemistry and Ar-Ar Geochronology of Eclogites in Jinshajiang Orogenic Belt, Gonjo Area, Eastern Tibet and Restriction on Paleo-Tethyan Evolution. *China Geology*, 6(2): 285–302. <https://doi.org/10.31035/cg2023025>
- Tatsumi, Y., 2001. Geochemical Modeling of Partial Melting of Subducting Sediments and Subsequent Melt-Mantle Interaction: Generation of High-Mg Andesites in the Setouchi Volcanic Belt, Southwest Japan. *Geology*, 29(4): 323–326. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0323:GMOPMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0323:GMOPMO>2.0.CO;2)
- Wang, B. D., Wang, L. Q., Chen, J. L., et al., 2014a. Triassic Three-Stage Collision in the Paleo-Tethys: Constraints from Magmatism in the Jiangda-Deqen-Weixi Continental Margin Arc, SW China. *Gondwana Research*, 26(2): 475–491. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.07.023>
- Wang, R., Richards, J. P., Hou, Z. Q., et al., 2014b. Increasing Magmatic Oxidation State from Paleocene to Miocene in the Eastern Gangdese Belt, Tibet: Implication for Collision-Related Porphyry Cu-Mo Au Mineralization. *Economic Geology*, 109(7): 1943–1965. <https://doi.org/10.2113/econgeo.109.7.1943>
- Wang, D. Z., Hu, R. Z., Hollings, P., et al., 2021a. Re-

- melting of a Neoproterozoic Arc Root: Origin of the Pulong and Songnuo Porphyry Cu Deposits, Southwest China. *Mineralium Deposita*, 56(6): 1043–1070. <https://doi.org/10.1007/s00126-021-01049-0>
- Wang, J., Dan, W., Wang, Q., et al., 2021b. High-Mg[#] Adakitic Rocks Formed by Lower-Crustal Magma Differentiation: Mineralogical and Geochemical Evidence from Garnet-Bearing Diorite Porphyries in Central Tibet. *Journal of Petrology*, 62(4): egaa099. <https://doi.org/10.1093/petrology/egaa099>
- Wang, R., Luo, C. H., Xia, W. J., et al., 2021. Progresses in the Study of High Magmatic Water and Oxidation State of Post-Collisional Magmas in the Gangdese Porphyry Deposit Belt. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(5): 1061–1077, 997 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Xu, J. F., Jian, P., et al., 2006. Petrogenesis of Adakitic Porphyries in an Extensional Tectonic Setting, Dexing, South China: Implications for the Genesis of Porphyry Copper Mineralization. *Journal of Petrology*, 47(1): 119–144. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi070>
- Xu, J. F., Castillo, P. R., 2004. Geochemical and Nd-Pb Isotopic Characteristics of the Tethyan Asthenosphere: Implications for the Origin of the Indian Ocean Mantle Domain. *Tectonophysics*, 393(1–4): 9–27. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.07.028>
- Yang, Z. M., Goldfarb, R., Chang, Z. S., 2016. Generation of Postcollisional Porphyry Copper Deposits in Southern Tibet Triggered by Subduction of the Indian Continental Plate. In: Richards, J. P., ed., *Tectonics and Metallogeny of the Tethyan Orogenic Belt*. Society of Economic Geologists, Colorado, 279–300. <https://doi.org/10.5382/sp.19.11>
- Zhu, J. J., Hu, R. Z., Bi, X. W., et al., 2011. Zircon U-Pb Ages, Hf-O Isotopes and Whole-Rock Sr-Nd-Pb Isotopic Geochemistry of Granitoids in the Jinshajiang Suture Zone, SW China: Constraints on Petrogenesis and Tectonic Evolution of the Paleo-Tethys Ocean. *Lithos*, 126(3–4): 248–264. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.003>
- Zhu, J. J., Hu, R. Z., Bi, X. W., et al., 2022. Porphyry Cu Fertility of Eastern Paleo-Tethyan Arc Magmas: Evidence from Zircon and Apatite Compositions. *Lithos*, 424: 106775. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106775>
- Zhu, J. J., Hu, R. Z., Richards, J. P., et al., 2015. Genesis and Magmatic-Hydrothermal Evolution of the Yan-gla Skarn Cu Deposit, Southwest China. *Economic Geology*, 110(3): 631–652. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.3.631>
- Zhu, J. J., Richards, J. P., Rees, C., et al., 2018. Elevated Magmatic Sulfur and Chlorine Contents in Ore-Forming Magmas at the Red Chris Porphyry Cu-Au Deposit, Northern British Columbia, Canada. *Economic Geology*, 113(5): 1047–1075. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4581>
- Zi, J. W., Cawood, P. A., Fan, W. M., et al., 2012. Triassic Collision in the Paleo-Tethys Ocean Constrained by Volcanic Activity in SW China. *Lithos*, 144: 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.020>

中文参考文献

- 简平, 刘敦一, 孙晓猛, 2003. 滇川西部金沙江石炭纪蛇绿岩 SHRIMP 测年: 古特提斯洋壳演化的同位素年代学制约. *地质学报*, 77(2): 217–228, 291–292.
- 王瑞, 罗晨皓, 夏文杰, 等, 2021. 冈底斯后碰撞斑岩成矿带高水、高氧逸度岩浆成因研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 40(5): 1061–1077, 997.