

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.04.006

云南清水河早古生代过铝质花岗岩的发现及其对保山地块岩石圈地幔拆沉的限定

李光洁, 陈永清*, 尚志

LI Guangjie, CHEN Yongqing*, SHANG Zhi

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

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

摘要: 保山地块早古生代过铝质花岗岩的岩石成因及地壳-地幔相互作用一直是地质学界讨论的热点。本文通过锆石 SHRIMP U-Pb 定年及岩石地球化学研究。结果表明, 清水河花岗岩由二云母花岗岩、黑云母花岗岩组成。二云母花岗岩年龄为 473~462 Ma, 黑云母花岗岩年龄为 479 Ma。岩石具有较高的 SiO_2 (67.48%~74.03%)、 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{Ca}_2\text{O}$ (4.47%~6.46%)、 Al_2O_3 含量, 属过铝质花岗岩; 均富集 Pb、大离子亲石元素 Rb、K 等, 相对亏损高场强元素, 显示明显的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.31\sim0.54$)。Sr-Nd-Pb 同位素及地球化学研究表明, 清水河花岗岩均显示 S-型花岗岩特征, 其源岩物质为古老陆壳富粘土的泥质岩, 受到部分幔源物质的混入。清水河花岗岩与双脉地花岗岩存在可比性, 可能由 460~479 Ma 岩石圈地幔拆沉作用形成。

关键词: 早古生代; 过铝质花岗岩; SHRIMP 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; Sr-Nd-Pb 同位素; 保山地块; 地质调查工程

中图分类号: P618.4; P597+.3; P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)04-0590-21

Li G J, Chen Y Q, Shang Z. Discovery of Early Palaeozoic peraluminous granites the Qingshuihe area of Yunnan Province and constraints on the influence of lithospheric mantle delamination in the Baoshan block. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(4): 590-610

Abstract: The petrogenesis of the Early Palaeozoic peraluminous granites in the Baoshan block remains controversial. This study applied the comprehensive methods of zircon SHRIMP U-Pb dating, Sr-Nd-Pb isotopic and bulk-rock analyses to probe the genesis and magma source of the granites from the Qingshuihe area in the Baoshan block. The results show that the Qingshuihe granites are consist of two-mica granite and biotite granite. The ages of two-mica granite and biotite granite are 473~462 Ma and 479 Ma, respectively. These rocks belonging to the peraluminous S-type granite ($A/\text{CNK}>1.1$) have high SiO_2 (67.48%~74.03%) content. The values of $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{Ca}_2\text{O}$ range from 4.47% to 6.46%, exhibiting calc-alkaline characteristics. The two-mica granite and biotite granite have similar chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle normalized trace element patterns, such as enriched in LILEs (e.g., Rb, K) and Pb, and depleted in HFSEs, with negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu}=0.31\sim0.54$). The geochemical signatures and Sr-Nd-Pb isotopes indicate that the Qingshuihe granites were derived from anatexis of ancient metasedimentary rocks with small amount of mantle components. The Qingshuihe granites are geochemically comparable to the Shuangmaidi granites and both of them were formed in a post-orogene setting where the thickened lithospheric mantle detached due to the amalgamation of exotic microcontinents onto the

收稿日期: 2020-11-15; 修订日期: 2021-04-26

资助项目: 国家自然科学基金项目《成矿系统自组织临界性与矿床定位预测》(批准号: 41972312)、《深部致矿异常信息提取与高精度数字找矿模型建立》(批准号: 41672329), 国家重点研发计划课题《“三联式”数字找矿模型与深部定量成矿预测》(编号: 2016YFC0600509) 和中国地质调查局项目《云南个旧大型—超大型 Sn-Cu-多金属矿床成矿地球动力学背景、过程和定量评价》(编号: 1212011220922)

作者简介: 李光洁(1993-), 男, 硕士, 地质工程专业。E-mail: 2243885496@qq.com

* **通信作者:** 陈永清(1960-), 男, 博士, 教授, 从事矿产综合定量勘查与评价研究。E-mail: yqchen@cugb.edu.cn

East Gondwana margin.

Key words: Early Palaeozoic; peraluminous granitic; SHRIMP zircon U-Pb geochronology; geochemistry; Sr-Nd-Pb isotopes; Baoshan block; geological survey engineering

滇西三江地区位于特提斯构域,经历了多个构造旋回^[1-2],造就了其有利的成矿条件,成为中国具找矿潜力及研究特提斯形成与演化的良好场所^[3]。保山地块位于三江地区中部^[4-5],早古生代位于冈瓦纳大陆北缘。关于其上早古生代岩浆岩的形成主要存在 2 种不同的观点:①大多数学者认为是泛非运动晚期的产物^[6],冈瓦纳大陆北缘处于被动陆缘环境^[7-8]。②是原特提斯洋向冈瓦纳大陆北缘俯冲形成的^[9-12],泛非运动实际上在早古生代早期已经完全结束,原特提斯洋已经向冈瓦纳大陆俯冲消减,且可能与亚洲微陆块碰撞,形成了活动陆缘环境^[13-16]。但是其俯冲方式及俯冲时限存在争议,有学者认为晚寒武世—奥陶纪岩浆岩是由于原特提斯板片后退俯冲—板片断裂形成的^[9-10, 12, 17];部分学者认为原特提斯板片断裂作用在晚寒武世晚期已经结束,而晚寒武世—中奥陶世岩浆岩是板片脱离后,外部微板块的碰撞挤压导致岩石圈增厚和岩石圈拆沉等不同阶段的产物^[11, 18-19]。

Li 等^[11]对双脉地花岗岩(ZK7-1 301~364 m; ZK0-1 290~307 m; ZK212 597~607 m)的研究显示,其在形成过程中有幔源物质混入,结合区域地质特征,认为早古生代保山地块地壳缩短增厚的时间持续到 475 Ma,随后可能使岩石圈地幔变得重力不稳,引起岩石圈地幔拆沉。Shao 等^[19]结合保山地块早古生代花岗岩的年龄分布,认为保山地块地壳缩短增厚的时间持续到 470 Ma。

笔者在清水河地区首次发现了早古生代过铝质花岗岩,对其岩石成因和源区特征的探讨对保山地块的构造背景研究具有特殊的指示意义。本文通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、主量、微量元素地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学方法,探讨了清水河花岗岩源区特征及成因机制,为早古生代保山地块岩石圈地幔拆沉提供岩石地球化学制约。

1 区域地质背景

研究区位于保山板块北部,扬子板块西南缘,三江地区西南部^[1-2]。以昌宁—孟连缝合带及高黎贡—潞西裂谷带为板块边界,东临临沧板块,西临腾

冲地块,北部尖灭于澜沧江断裂与怒江断裂逐渐汇合处(图 1)。保山地块地层具明显的“二元”结构,基底主要由震旦系—中寒武统公养河群复理石砂岩、杂砂岩夹板岩、页岩组成,沉积盖层主要为上寒武统一—中侏罗统碳酸盐岩、砂页岩、碎屑岩及笔石建造,上寒武统核桃坪组、沙河厂组、保山组为本区主要的含矿层位。东西边缘持续强烈的活动,导致多种类型花岗岩发育(图 1-b),其中以东侧的临沧花岗岩和西侧的腾冲弧后花岗岩规模最大^[20-21];而位于高黎贡—潞西裂谷和昌宁—孟连缝合带之间的保山地块却以岩浆活动微弱而著称,岩浆活动以早古生代、中二叠世、中三叠世、早白垩世和晚白垩世 5 个时期为主。西盟老街子是前寒武纪末花岗岩的代表,其 Rb-Sr 年龄为 687 Ma^[22];早古生代的岩浆岩主要出露于保山地块南部平河、勐兴、镇康等地,锆石 U-Pb 年龄介于 502~466 Ma 之间^[23-26],中部双脉地隐伏花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 470~460 Ma^[11, 18],北部也有早古生代岩浆热液活动的迹象,锆石 U-Pb 年龄在 466~457 Ma 之间^[18, 27-28];中生代晚期花岗岩零星分布,同位素年龄介于 80~100 Ma 之间^[23, 29],东部木厂地区印支期花岗岩锆石 U-Pb 年龄介于 235~241 Ma 之间^[30];黄静宁等^[31]对双脉地隐伏花岗岩进行了研究,获得锆石 U-Pb 年龄为 35~36 Ma,成岩时代为晚始新世。保山地块东西两侧分别受澜沧江构造带及怒江构造带制约(图 1),澜沧江构造带被认为是形成于晚三叠世或早侏罗世向东俯冲的古特提斯缝合带(逆冲断裂带)^[32-33],后转化为左行走滑断层^[34-35];怒江构造带则是侏罗纪—白垩纪腾冲地块与保山地块碰撞形成的造山带,晚始新世—中中新世,随着印度大陆持续楔入亚洲大陆和印支地块的逃逸,怒江构造带作为印支地块西界转化为右行走滑断层,与其对应的是作为印支地块东界的哀牢山—红河左行走滑断层^[4, 26, 36]。

2 研究区地质概况

研究区出露地层为上寒武统核桃坪组、沙河厂组、保山组,奥陶系老尖山组、施甸组、蒲缥组、上奥

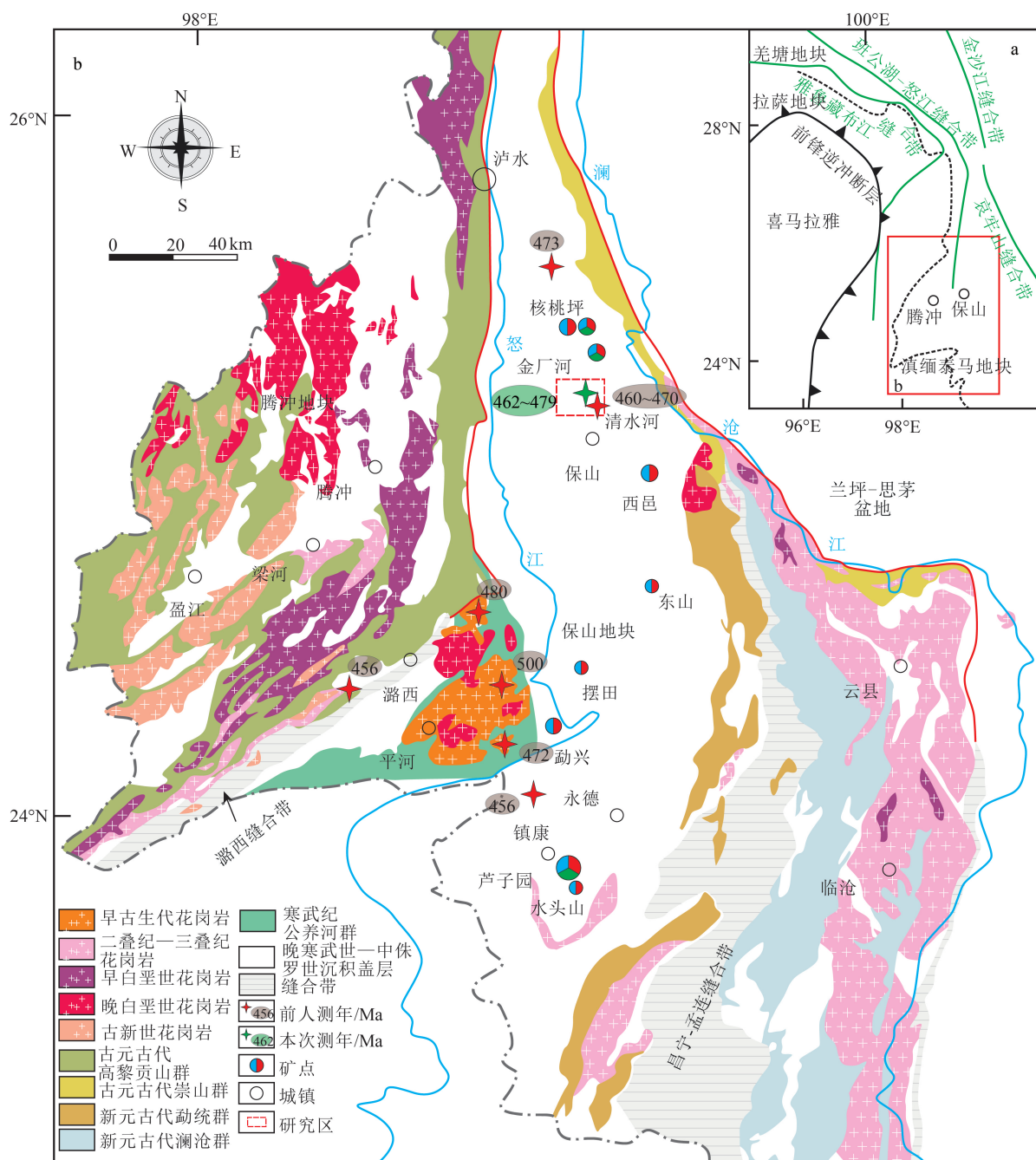


图1 保山地块大地构造格架(a)及区域地质简图(b)(底图据参考文献[1-2,20,23]修改,年龄数据据参考文献[23-24])

Fig. 1 Geotectonic framework(a) and regional geological sketch map(b) of the Baoshan block

陶统一下志留统仁和桥组及第四系更新统。沙河厂组及核桃坪组碳酸盐岩为主要富矿围岩(图2)。

研究区位于保山南北向构造(保山-镇康复背斜构造区)与近东西向构造复合部位,地层围绕近东西向短轴背斜核部呈环带分布,背斜构造行迹清楚。主要构造有2期:早期为近东西向短轴背斜及

与其相关的断裂,晚期主要为近南北向断裂,表现为对早期背斜构造、断裂的交切破坏,褶皱应为隐伏岩体向上运动形成^[37]。含矿热液沿破碎带交代碳酸盐岩形成矽卡岩,或沿裂隙充填,局部可见较强烈的硅化破碎带分布于研究区西侧的沙河厂断裂。

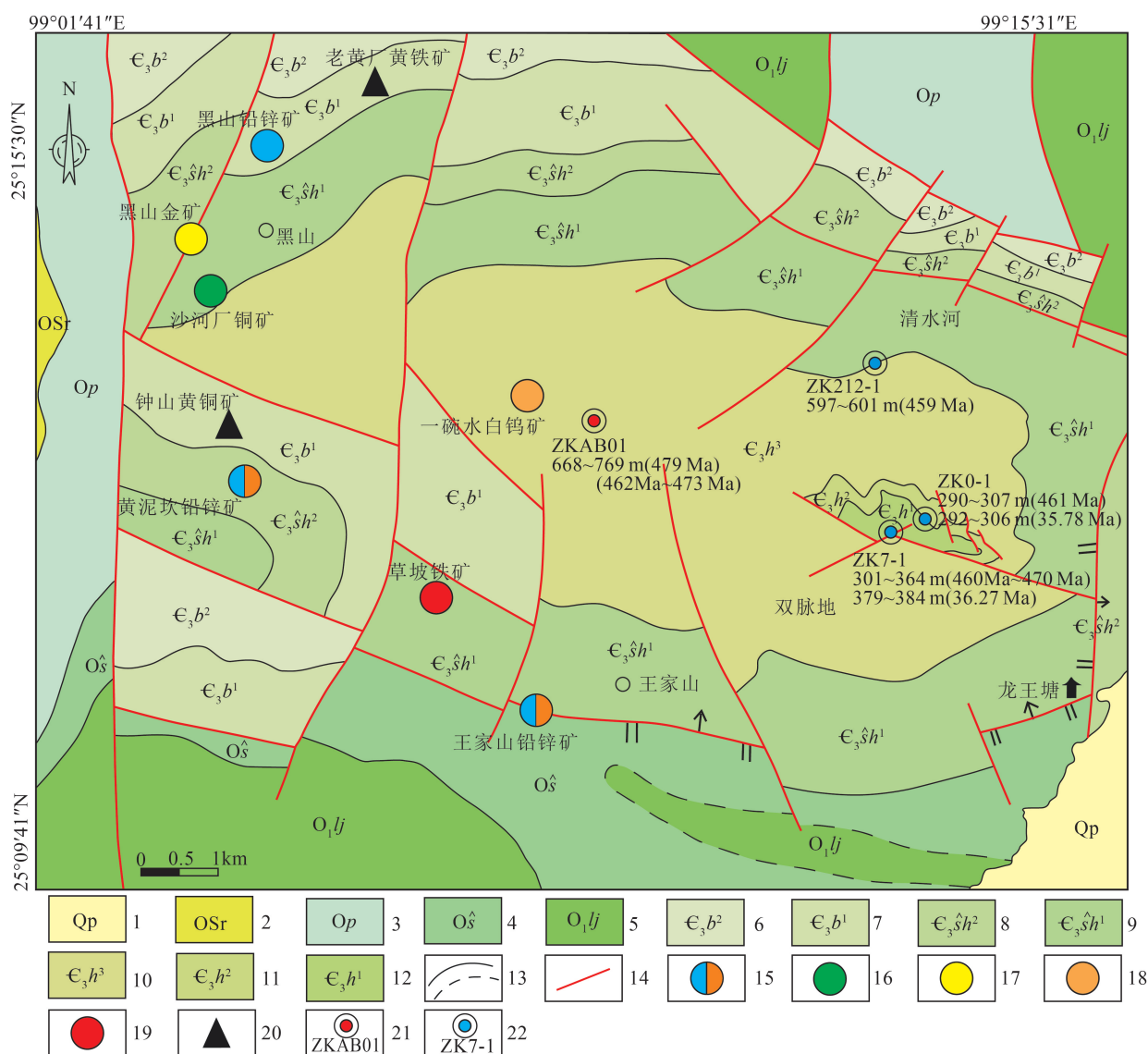


图 2 清水河地区地质简图(底图据参考文献[37]修改, 年龄数据据参考文献[11, 31])

Fig. 2 Simplified geological map of Qingshuihe area

1—更新统; 2—志留系仁和桥组笔石页岩; 3—奥陶系蒲缥组粉砂岩、页岩夹泥灰岩; 4—奥陶系施甸组泥(页)岩夹砂岩、泥灰岩; 5—奥陶系老尖山组页岩、砂岩、下部夹泥灰岩; 6—寒武系保山组上段: 页岩、粉砂质页岩、灰岩夹砂岩; 7—寒武系保山组下段: 页岩夹泥质条带灰岩; 8—寒武系沙河厂组上段: 页岩、粉砂岩; 9—寒武系沙河厂组下段: 下部为粉砂质页岩, 上部为鲕状灰岩, 夹泥质条带灰岩和泥灰岩; 10—寒武系核桃坪组三段: 深绿色千枚岩夹灰岩透镜体; 11—寒武系核桃坪组二段: 薄层状大理岩化灰岩夹千枚岩; 12—寒武系核桃坪组一段: 千枚岩夹灰岩透镜体; 13—推测地质界线; 14—断裂; 15—铅锌矿点; 16—铜矿点; 17—金矿点; 18—钨矿点; 19—铁矿点; 20—黄铁矿点; 21—取样钻孔及编号; 22—前人研究钻孔及编号

地表仅局部出露闪长斑岩脉、辉绿岩脉, 规模均较小。黄静宁等^[31]对双脉地花岗岩进行了研究(ZK7-1 379~384 m; ZK0-1 292~306), 测定的 U-Pb 年龄为 35.78~36.27 Ma, 属喜马拉雅期; Li 等^[11]在相同区域不同深度取样研究(ZK7-1 301~364 m; ZK0-1 290~307 m; ZK212 597~607 m), LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示为早古生代花岗

岩(459~470 Ma)。

清水河花岗岩隐伏于背斜核部, 经钻孔 ZKAB01 验证, 尚未穿透岩体。孔深 668~689 m 为二云母花岗岩, 743~769 m 为黑云母花岗岩, 隐伏花岗岩体外接触带附近岩石具矽卡岩化、硅化、大理岩化。结合双脉地施工的钻孔 ZK0-1 和 ZK7-1, 清水河施工的钻孔 ZK212-1 分别在 289.77 m、

301.55 m、597.16 m 揭露到花岗岩及 1 : 10 万重力异常, 隐伏花岗岩应是侵位于寒武系核桃坪组三段, 面积不小于 12 km² 的小岩株。

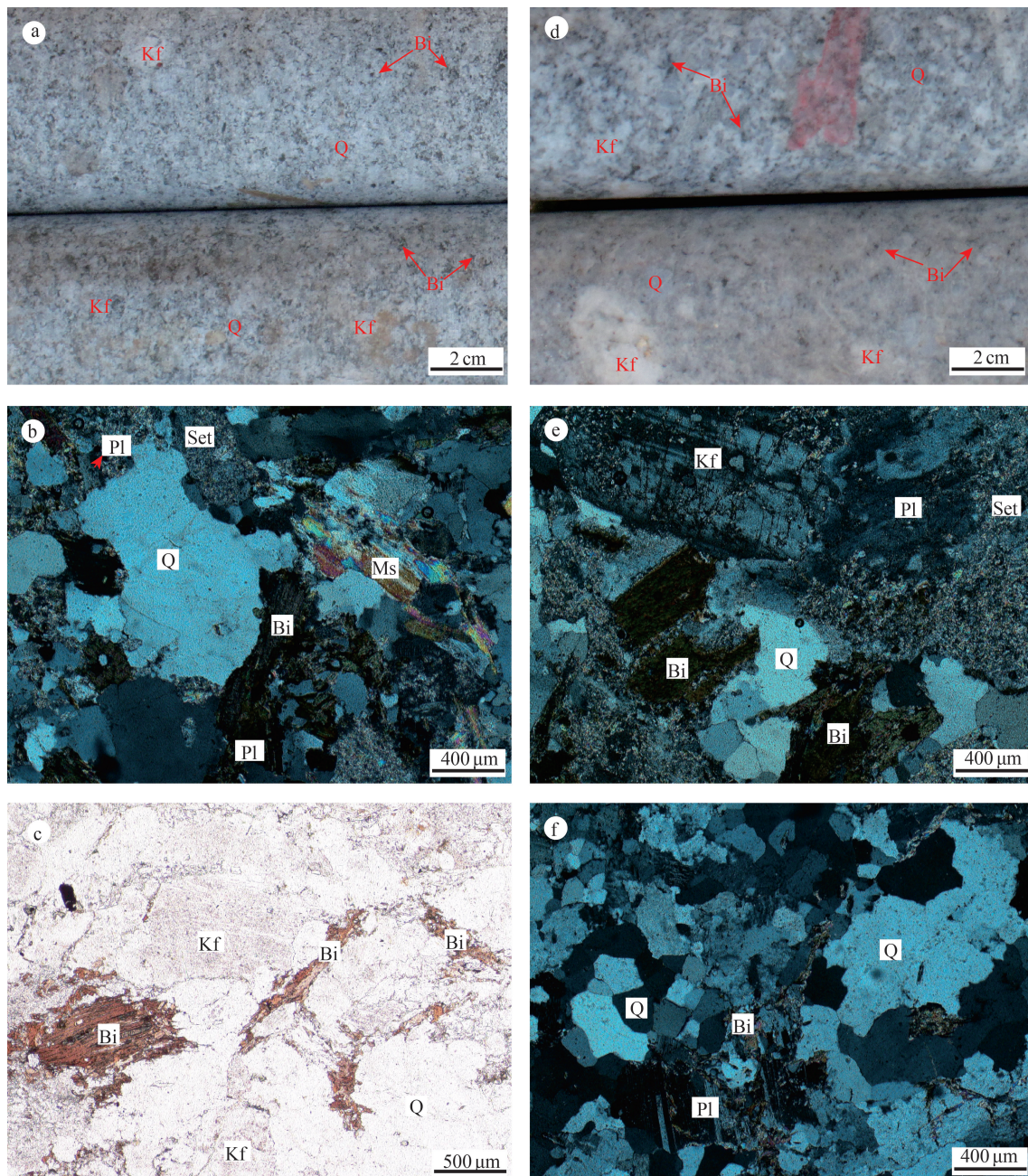
3 岩石学特征

二云母花岗岩: 岩石样品新鲜, 中细粒状, 花岗结构, 局部似斑状结构, 主要由长石、石英、云母等岩石矿物组成, 斑晶主要为钾长石。石英呈他形粒状

(25%~40%), 钾长石为他形-半自形板状, 可见卡式双晶或格子双晶(25%~40%), 斜长石呈半自形-自形板状(4%~7%), 黑云母(3%~7%)、白云母(2%~5%)局部见绢云母化(约 6%); 副矿物有锆石、磁铁矿、钛铁矿, 缺少堇青石等特征矿物(图版 I-a、b、c)。

黑云母花岗岩: 新鲜面灰白色, 中粗粒状, 花岗结构, 局部似斑状结构; 主要由长石、石英、黑云母等岩石矿物组成; 与二云母花岗岩相比, 黑云母花

图版 I Plate I



a、b、c. 保山清水河二云母花岗岩标本及显微照片; d、e、f. 黑云母花岗岩标本及显微照片。Pl—斜长石; Kf—钾长石; Bi—黑云母; Q—石英; Ms—白云母; Set—绢云母

花岗岩结晶颗粒较大且岩石较完整, 含较多的黑云母和较少的白云母。石英呈他形粒状(25%~40%), 钾长石为他形-半自形板状, 可见卡式双晶或格子双晶(25%~40%), 斜长石为半自形-自形板状(4%~7%), 黑云母(4%~10%)、白云母(1%~4%)局部见绢云母化(约7%); 副矿物有锆石、磁铁矿、钛铁矿, 缺少堇青石等特征矿物(图版 I-d~f)。

4 样品采集及分析方法

本次选取二云母花岗岩、黑云母花岗岩各 8 件样品在中国科学院地球物理地球化学勘查研究所利用 XRF 法进行主量元素分析, 精度为 5%~10%; 使用 ICP-MS 法对微量元素进行测试, 精度优于 5%^[38]。

在上述样品中, 2 种花岗岩各选取其中 1 件样品进行 Sr-Nd-Pb 同位素分析, 由中国地质调查局宜昌地质调查中心实验室完成, 利用 MAT.261 可调多接收型质谱仪测试同位素比值, 同位素分析样品制备和分离流程在超净化实验室完成^[39]。Sr、Nd 同位素分别使用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194 和¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219 进行标准化。仪器实验分析过程中 GBW04419 和 NBS-987 标样分别为¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512725±5(2σ), ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.71034±5(2σ)。NBS981 标样²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb=0.512725±5, 分析精度为 0.02%。

此外, 为获得花岗岩的形成时代, 挑选出二云母花岗岩样品 2 件、黑云母花岗岩样品 1 件进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年。样品由河北廊坊区域地质调查研究所地质服务有限公司采用电磁选和浮选法完成。阴极发光(CL)照片在中国地质科学院地质研究所电子探针室获取, 利用 CL 照片选择分析区域, 然后在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心利用 SHRIMP-II 离子探针仪完成锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年, 测试流程见 Liu 等^[40]。运用²⁰⁶Pb/²³⁸Pb 计算年龄加权平均值(2σ), 使用 ICPMS DataCal、Isoplot 等程序对数据进行处理^[41-42]。

5 分析结果

5.1 锆石 U-Pb 年龄

清水河二云母花岗岩样品 IZKAB01-1a(683 m)、IZKAB01-1b(683 m)及黑云母花岗岩 IZKAB01-2(742 m)用于 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位

素定年。样品锆石均为无色透明, 具有良好的结晶程度, 在阴极发光(CL)图像上显示出典型岩浆型特征的振荡环带, 且都含有少量继承性锆石。样品锆石颗粒长 80~300 μm, 长宽比为 1.5:1~4:1。选择锆石清晰振荡环带的边缘处进行打点分析测试, 但是如果锆石具有明显的继承性锆石特征, 选择锆石核部测试继承锆石年龄。每件样品均分析 35 个测点, 分析结果列于表 1。

样品 IZKAB01-1a: 在阴极发光图像上, 呈灰白色-灰黑色, 较透明, 反映 U 含量较高, 结晶程度良好, 多数锆石颗粒呈长柱状, 少量为等轴状, 长 80~300 μm, 长宽比为 1.2:1~2.5:1, 多数锆石颗粒具有明显的振荡环带, 个别锆石可能是继承锆石或捕获锆石, 其中心表现出不完全溶蚀的核(图 3)。²³²Th 和²³⁸U 含量分别为 38.00×10⁻⁶~420.07×10⁻⁶和 208.46×10⁻⁶~1667.15×10⁻⁶, 除 1 颗锆石的²³²Th/²³⁸U 值为 0.03 外, 其余²³²Th/²³⁸U 为 0.11~0.65, 均大于 0.1。其中 22 颗锆石颗粒测试结果显示, 其²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值分布于 440~510 Ma 之间, 几乎都位于谐和曲线上, 表明这些锆石的 U-Pb 体系保持封闭。2 个分析点偏小(433~445 Ma), 6 个分析点偏大(511~809 Ma), 其中 1 个 809 Ma 分析点的 Th/U 值异常, 为 0.03, 另有 4 颗继承锆石核部年龄值为 1035~1316 Ma、2467 Ma(图 3)。排除 13 个离群数据后, 利用剩下的 22 个数据进行年龄加权平均值计算, 得出²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 473.2±8.6 Ma(*n*=22, MSWD=1.5)。

样品 IZKAB01-1b: 类似于 IZKAB01-1a, 锆石颗粒长 80~250 μm, 长宽比为 1.2:1~2.5:1, 多数发育明显的振荡环带, 少部分锆石中心表现出不完全溶蚀的核, 这些锆石可能是继承锆石或捕获锆石(图 3)。²³²Th 和²³⁸U 含量分别为 53.76×10⁻⁶~848.25×10⁻⁶和 254.05×10⁻⁶~1215.44×10⁻⁶, 除 1 颗锆石的²³²Th/²³⁸U 为 0.07 外, 其余²³²Th/²³⁸U 值为 0.09~0.91, 平均值为 0.32, 大于 0.1。其中 28 颗分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值为 430~501 Ma, 且几乎都位于谐和线上。6 个分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄偏大(515~675 Ma), 其中 1 个 618 Ma 分析点的 Th/U 值异常, 为 0.07, 另有 2 颗继承锆石核部年龄值为 1102 Ma、2413 Ma(图 3)。利用 28 个谐和性较好的数据进行年龄加权平均值计算, 得出²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 462.5±7.8 Ma(*n*=28, MSWD=2.5)。

表 1 SHRIMP 锆石 U-Th-Pb 定年结果
Table 1 Results of SHRIMP U-Th-Pb zircon dating

编号	含量/ 10^{-6}		同位素比值								年龄/Ma					
	^{232}Th	^{238}U	$^{232}\text{Th}/$	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{206}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{206}\text{Pb}/$	1σ	
			^{238}U	^{206}Pb		^{235}U		^{238}U		^{206}Pb		^{235}U		^{238}U		
IZKAB01-1a 二云母花岗岩																
1	186.65	465.98	0.40	0.05371	0.00292	0.57054	0.02839	0.07685	0.00265	359	50	458	18	477	16	
2	196.24	351.72	0.56	0.05762	0.00332	0.57215	0.03120	0.07180	0.00248	515	62	459	20	447	15	
3	277.75	658.42	0.42	0.05518	0.00272	0.57311	0.02585	0.07514	0.00258	419	44	460	17	467	15	
4	299.50	494.44	0.61	0.05629	0.00282	0.55509	0.02523	0.07153	0.00249	464	44	448	16	445	15	
5	322.66	1667.15	0.19	0.05570	0.00255	0.60292	0.02420	0.07826	0.00258	440	37	479	15	486	15	
6	168.89	648.21	0.26	0.05668	0.00279	0.59564	0.02631	0.07550	0.00253	479	44	474	17	469	15	
7	152.83	419.55	0.36	0.05881	0.00293	0.73162	0.03393	0.08919	0.00313	560	43	558	20	551	19	
8	166.79	309.41	0.54	0.05142	0.00324	0.53797	0.03191	0.07578	0.00263	260	69	437	21	471	16	
9	420.07	824.24	0.51	0.05306	0.00303	0.60523	0.03270	0.08229	0.00287	331	60	481	21	510	17	
10	110.92	208.46	0.53	0.05378	0.00371	0.55341	0.03603	0.07501	0.00273	362	79	447	24	466	16	
11	95.94	665.23	0.14	0.06718	0.00333	0.97170	0.04533	0.10391	0.00367	843	43	689	23	637	21	
12	71.36	339.86	0.21	0.08152	0.00519	0.91989	0.05318	0.08244	0.00295	1234	57	662	28	511	18	
13	306.05	558.68	0.55	0.05700	0.00288	0.55938	0.02594	0.07060	0.00238	491	46	451	17	440	14	
14	118.39	292.95	0.40	0.05802	0.00332	0.63067	0.03339	0.07903	0.00277	531	58	497	21	490	17	
15	134.59	720.57	0.19	0.07787	0.00444	1.09052	0.05614	0.10132	0.00344	629	126	613	39	609	19	
16	174.69	1622.47	0.11	0.05559	0.00260	0.61892	0.02610	0.08041	0.00270	436	40	489	16	499	16	
17	60.48	395.82	0.15	0.09659	0.00484	3.08074	0.15282	0.23022	0.00865	1312	72	1314	48	1316	43	
18	333.18	612.00	0.54	0.05573	0.00276	0.59170	0.02662	0.07597	0.00252	442	41	472	17	472	15	
19	132.17	245.95	0.54	0.05847	0.00360	0.62891	0.03647	0.07877	0.00288	548	64	495	23	489	17	
20	290.55	440.35	0.66	0.05652	0.00315	0.56642	0.02835	0.07335	0.00250	473	49	456	18	456	15	
21	227.54	438.50	0.52	0.05514	0.00296	0.58773	0.02826	0.07756	0.00270	418	52	469	18	482	16	
22	299.92	620.69	0.48	0.06802	0.00309	0.67191	0.02759	0.07146	0.00239	869	34	522	17	445	14	
23	408.84	809.01	0.51	0.05474	0.00290	0.52603	0.02546	0.06944	0.00237	402	49	429	17	433	14	
24	116.83	331.16	0.35	0.05626	0.00313	0.60511	0.03125	0.07794	0.00271	463	52	480	20	484	16	
25	201.93	443.69	0.46	0.05418	0.00275	0.60161	0.02917	0.08027	0.00284	379	54	478	18	498	17	
26	322.03	985.69	0.33	0.05519	0.00304	0.60832	0.03166	0.08068	0.00284	420	54	483	20	500	17	
27	204.33	361.14	0.57	0.06243	0.00350	0.74201	0.03879	0.08640	0.00305	689	54	564	23	534	18	
28	107.06	721.87	0.15	0.05611	0.00284	0.60802	0.02809	0.07827	0.00265	457	49	482	18	486	16	
29	285.54	717.85	0.40	0.05665	0.00278	0.57418	0.02529	0.07298	0.00242	478	43	461	16	454	15	
30	227.14	516.68	0.44	0.05825	0.00280	0.59483	0.02610	0.07405	0.00253	539	41	474	17	461	15	
31	128.08	521.17	0.25	0.06784	0.00374	0.78212	0.03834	0.08368	0.00298	864	45	587	22	518	18	
32	300.01	740.04	0.41	0.07650	0.00383	1.99599	0.09141	0.18901	0.00673	1108	39	1114	31	1116	36	
33	244.82	417.39	0.59	0.15710	0.00792	10.22836	0.48038	0.46616	0.01715	2425	35	2456	43	2467	75	
34	38.00	1188.53	0.03	0.06183	0.00353	1.13936	0.06002	0.13366	0.00504	668	51	772	28	809	29	
35	207.30	822.40	0.25	0.07569	0.00383	1.82359	0.08516	0.17416	0.00607	1087	45	1054	31	1035	33	

续表 1-1

编号	含量/ 10^{-6}		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值						年龄/Ma						
	^{232}Th	^{238}U		^{238}U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
IZKAB01-1b 二云母花岗岩																
1	172.14	354.19	0.49	0.05893	0.00171	0.56149	0.02929	0.06909	0.00199	565	66	452	19	431	12	
2	151.04	391.85	0.39	0.05753	0.0018	0.57875	0.03235	0.07312	0.00225	512	62	464	21	455	13	
3	227.01	690.57	0.33	0.06716	0.00143	0.76893	0.03319	0.08325	0.00241	843	45	579	19	515	14	
4	98.37	352.70	0.28	0.05737	0.0017	0.5851	0.03097	0.07386	0.00214	506	64	468	20	459	13	
5	139.65	805.83	0.17	0.0565	0.00117	0.57361	0.02401	0.0735	0.00205	472	46	460	15	457	12	
6	157.80	806.63	0.20	0.05471	0.00123	0.59558	0.02627	0.07852	0.0022	400	51	474	17	487	13	
7	119.79	981.16	0.12	0.05796	0.00131	0.57174	0.02512	0.07144	0.00198	528	48	459	16	445	12	
8	305.08	531.84	0.57	0.05732	0.00118	0.55755	0.02314	0.07135	0.00195	504	44	450	15	444	12	
9	115.04	254.05	0.45	0.0507	0.00152	0.53352	0.02838	0.07663	0.00221	227	65	434	19	476	13	
10	209.95	494.46	0.42	0.05773	0.00132	0.61525	0.02729	0.07783	0.00216	520	50	487	17	483	13	
11	67.66	478.83	0.14	0.05753	0.00152	0.61397	0.03015	0.07721	0.00221	512	58	486	19	479	13	
12	357.61	906.54	0.39	0.05627	0.00125	0.53545	0.02341	0.06891	0.00193	463	48	435	15	430	12	
13	155.12	447.67	0.35	0.05612	0.00163	0.59844	0.03113	0.07617	0.00218	457	58	476	20	473	13	
14	69.67	306.75	0.23	0.06274	0.00199	0.64448	0.03587	0.0748	0.00221	700	68	505	22	465	13	
15	261.68	853.29	0.31	0.06627	0.0019	0.82128	0.04208	0.08959	0.00251	815	59	609	23	553	15	
16	141.39	1064.03	0.13	0.05827	0.00116	0.57685	0.0234	0.0718	0.00197	540	42	462	15	447	12	
17	346.49	585.51	0.59	0.05438	0.00122	0.55879	0.02463	0.07457	0.00208	387	48	451	16	464	12	
18	155.62	607.91	0.26	0.05822	0.00141	0.56967	0.02618	0.071	0.00196	538	50	458	17	442	12	
19	158.03	1166.61	0.14	0.0567	0.00132	0.55152	0.02457	0.07048	0.00191	480	50	446	16	439	12	
20	100.39	382.99	0.26	0.0563	0.00153	0.62592	0.03114	0.08078	0.00229	464	57	494	19	501	14	
21	136.80	889.47	0.15	0.05422	0.00124	0.57626	0.02548	0.07701	0.00213	380	45	462	16	478	13	
22	313.06	537.93	0.58	0.05705	0.00157	0.57831	0.02908	0.07346	0.00209	494	58	463	19	457	13	
23	119.42	602.07	0.20	0.05747	0.00133	0.63214	0.02827	0.07968	0.00221	510	49	497	18	494	13	
24	194.83	784.82	0.25	0.06296	0.00133	0.85916	0.03673	0.0989	0.00283	707	45	630	20	608	17	
25	387.23	1215.44	0.32	0.05497	0.00112	0.60797	0.02502	0.0802	0.00221	411	45	482	16	497	13	
26	157.28	512.81	0.31	0.06156	0.00195	0.6275	0.03506	0.07437	0.00223	659	68	495	22	462	13	
27	79.83	498.81	0.16	0.05864	0.00152	0.57568	0.02762	0.07115	0.00198	554	53	462	18	443	12	
28	848.25	934.23	0.91	0.05646	0.00125	0.56985	0.02462	0.07224	0.00198	471	45	458	16	450	12	
29	53.76	604.95	0.09	0.05639	0.00124	0.60816	0.02688	0.07818	0.00229	468	45	482	17	485	14	
30	182.01	421.01	0.43	0.06081	0.00171	0.63894	0.03351	0.07622	0.00236	633	57	502	21	474	14	
31	257.25	406.44	0.63	0.05616	0.00158	0.5942	0.03054	0.07723	0.00226	459	60	474	19	480	14	
32	55.55	752.82	0.07	0.06031	0.00175	0.83621	0.04365	0.10058	0.0029	615	65	617	24	618	17	
33	145.49	373.70	0.39	0.06094	0.00249	0.92307	0.06259	0.11036	0.00362	637	87	664	33	675	21	
34	229.75	945.95	0.24	0.07481	0.00201	1.91213	0.09439	0.18639	0.0053	1064	52	1085	33	1102	29	
35	137.43	605.07	0.23	0.17022	0.00314	10.7476	0.4225	0.45391	0.01298	2560	29	2502	37	2413	58	
IZKAB01-2 黑云母花岗岩																
1	68.87	372.89	0.18	0.05800	0.00204	0.62229	0.03320	0.07864	0.00292	530	55	491	21	488	17	
2	58.60	306.65	0.19	0.05761	0.00255	0.63465	0.03407	0.08038	0.00296	515	58	499	21	498	18	
3	79.14	575.16	0.14	0.05708	0.00227	0.60832	0.03276	0.07779	0.00293	495	55	482	21	483	18	
4	48.74	375.65	0.13	0.06088	0.00268	0.62832	0.03944	0.07538	0.00289	635	73	495	25	468	17	
5	197.96	468.10	0.42	0.05668	0.00201	0.58765	0.03163	0.07572	0.00283	479	55	469	20	471	17	

续表 1-2

编号	含量/ 10^{-6}		同位素比值								年龄/Ma					
	^{232}Th	^{238}U	$^{232}\text{Th}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
			^{232}Th	^{238}U	1σ	1σ	1σ	1σ								
6	78.12	503.77	0.16	0.05434	0.00199	0.60167	0.03018	0.08081	0.00301	385	55	478	19	501	18	
7	92.59	352.64	0.26	0.05663	0.00377	0.57900	0.04357	0.07453	0.00296	477	94	464	28	463	18	
8	471.47	890.42	0.53	0.05868	0.00291	0.57429	0.03759	0.07149	0.00275	555	75	461	24	445	17	
9	66.25	335.23	0.20	0.05003	0.00264	0.58399	0.04092	0.08521	0.00341	197	85	467	26	527	20	
10	145.31	357.96	0.41	0.05691	0.00288	0.59491	0.03771	0.07646	0.00294	488	72	474	24	475	18	
11	156.09	331.99	0.47	0.05300	0.00286	0.58182	0.03991	0.08041	0.00306	329	77	466	26	499	18	
12	113.62	311.63	0.36	0.05724	0.00297	0.62689	0.04028	0.08034	0.00319	501	71	494	25	498	19	
13	76.94	994.65	0.08	0.05622	0.00189	0.61649	0.03310	0.07995	0.00299	461	52	488	21	496	18	
14	308.27	779.97	0.40	0.05761	0.00179	0.61101	0.03218	0.07745	0.00287	515	55	484	20	481	17	
15	324.61	2296.74	0.14	0.05761	0.00173	0.70372	0.03682	0.08988	0.00348	515	53	541	22	555	21	
16	52.42	525.82	0.10	0.05549	0.00327	0.62529	0.04329	0.08295	0.00327	432	80	493	27	514	19	
17	45.25	290.88	0.16	0.06439	0.00406	0.66463	0.05247	0.07609	0.00309	754	97	517	32	473	19	
18	139.24	526.19	0.26	0.05417	0.00281	0.58380	0.03916	0.07971	0.00297	378	83	467	25	494	18	
19	49.53	434.24	0.11	0.05716	0.00354	0.59527	0.04616	0.07606	0.00295	498	94	474	29	473	18	
20	41.43	238.31	0.17	0.04908	0.00429	0.59084	0.06144	0.08596	0.00374	152	147	471	39	532	22	
21	54.83	618.71	0.09	0.05487	0.00249	0.63447	0.03638	0.08464	0.00322	407	62	499	23	524	19	
22	33.72	470.70	0.07	0.05297	0.00264	0.62274	0.04261	0.08552	0.00353	327	84	492	27	529	21	
23	304.87	780.43	0.39	0.05498	0.00224	0.68607	0.04255	0.09064	0.00359	411	70	530	26	559	21	
24	58.94	430.81	0.14	0.05482	0.00308	0.56690	0.03786	0.07569	0.00301	405	78	456	25	470	18	
25	191.71	452.22	0.42	0.07453	0.00195	1.94930	0.09492	0.19028	0.00709	1056	44	1098	33	1123	38	
26	297.40	919.07	0.32	0.06075	0.00230	0.62388	0.03457	0.07502	0.00279	630	63	492	22	466	17	
27	90.28	430.27	0.21	0.05439	0.00306	0.56483	0.03995	0.07620	0.00292	387	86	455	26	473	17	
28	42.44	250.59	0.17	0.05653	0.00250	0.60457	0.03489	0.07836	0.00307	473	64	480	22	486	18	
29	185.01	299.21	0.62	0.06053	0.00356	0.61600	0.04393	0.07498	0.00310	622	79	487	28	466	19	
30	71.84	1009.16	0.07	0.05695	0.00154	0.60022	0.02901	0.07672	0.00276	490	46	477	18	477	17	
31	132.05	249.45	0.53	0.05414	0.00335	0.53214	0.03760	0.07438	0.00296	377	86	433	25	462	18	
32	76.01	999.70	0.08	0.05739	0.00244	0.66427	0.04096	0.08430	0.00328	507	73	517	25	522	19	
33	638.85	1743.08	0.37	0.06596	0.00187	1.09918	0.05493	0.12123	0.00455	805	47	753	27	738	26	
34	20.06	1840.52	0.01	0.05708	0.00210	0.60258	0.03198	0.07707	0.00297	495	51	479	20	479	18	
35	191.80	342.56	0.56	0.07318	0.00359	1.65233	0.09928	0.16274	0.00638	1019	61	990	38	972	35	

样品 IZKAB01-2: 锆石呈灰白色-灰黑色, 较透明, 表现出较高的 U 含量, 锆石颗粒长 80~250 μm , 长宽比为 1.2 : 1~2.5 : 1, 多数发育明显的振荡环带, 个别锆石具有不完全溶蚀的核, 可能是继承锆石或捕获锆石(图 3)。 ^{232}Th 和 ^{238}U 含量分别为 $20.06\times 10^{-6}\sim 638.85\times 10^{-6}$ 和 $238.31\times 10^{-6}\sim 2296.74\times 10^{-6}$, 除 6 颗锆石的 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值小于 0.1 外, 其余锆石的 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值为 0.10~0.62, 都大于 0.1, 其中

23 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 462~501 Ma, 几乎都位于谐和线上。1 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄偏小(445 Ma), 8 个分析点偏大(514~738 Ma), 另有 2 个继承锆石核部年龄值分别为 972 Ma、1123 Ma(图 3)。排除 12 个离群数据后, 利用剩余 23 颗锆石的分析数据进行年龄加权平均值计算, 得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 479.8 ± 8.6 Ma($n=23$, MSWD=0.5)。

最近的碎屑锆石研究表明, 保山地块的碎屑锆

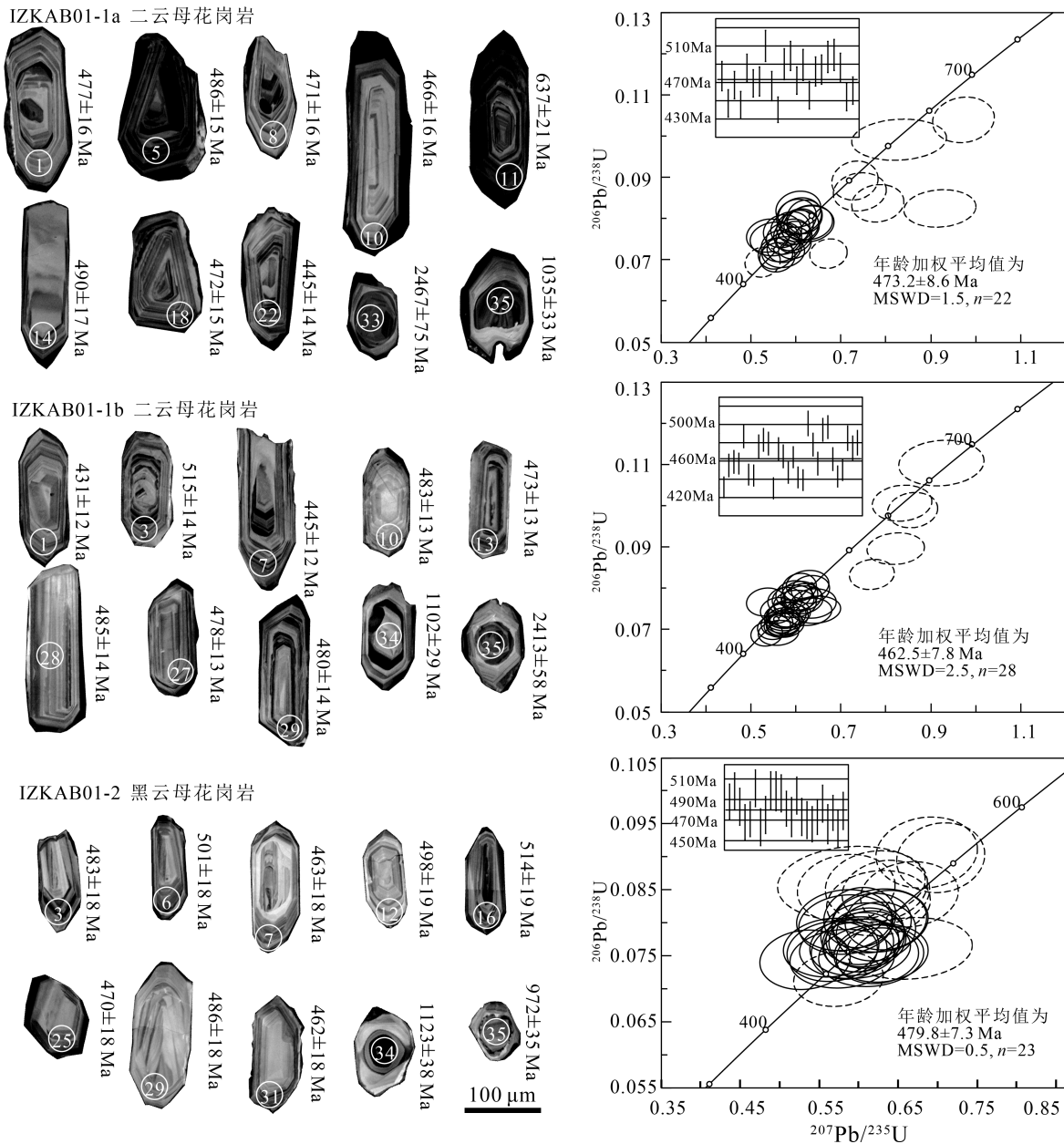


图 3 保山清水河花岗岩代表性锆石阴极发光 (CL) 图像及锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 3 CL images and U-Pb age concordia plots of zircon grains from the Qingshuihe granites

石年龄存在 2500~2400 Ma、1750~1500 Ma、1200~900 Ma、600~500 Ma 的峰值,对应的时代分布于太古宙—早古生代^[43~44]。从上述 3 件样品的年龄结果可以看出,清水河花岗岩于早古生代侵位(462~479 Ma, 早—中奥陶世)。972~1316 Ma、2413~2467 Ma 的锆石为继承锆石,500~600 Ma 的锆石可能代表了更早一期的岩浆活动,与碎屑锆石研究结果一致,433~445 Ma 的锆石可能代表了更晚一期

的岩浆活动。

5.2 主量元素

二云母花岗岩、黑云母花岗岩各测试 8 件样品,分析结果列于表 2。

二云母花岗岩: SiO₂ 含量为 67.48%~70.23%, Al₂O₃ 含量为 13.64%~14.84%, MgO 含量为 1.10%~1.54%, CaO 含量为 0.62%~1.26%, K₂O 含量为 1.97%~3.06%, Na₂O 含量为 2.92%~4.52%, K₂O/Na₂O

表 2 清水河花岗岩地球化学分析结果
Table 2 Geochemical compositions of Qingshuihe granites

岩性	二云母花岗岩							
样号	ZKAB01-01	ZKAB01-02	ZKAB01-03	ZKAB01-04	ZKAB01-05	ZKAB01-06	ZKAB01-07	ZKAB01-08
SiO ₂	68.80	67.48	69.51	70.23	68.47	69.48	70.17	70.11
TiO ₂	0.48	0.49	0.52	0.48	0.52	0.48	0.46	0.41
Al ₂ O ₃	13.64	14.84	14.23	13.92	14.33	14.02	13.51	13.83
Fe ₂ O ₃	3.42	3.71	3.13	3.47	3.80	3.45	3.36	3.31
FeO	1.25	2.40	2.15	1.80	1.65	2.40	2.45	2.30
MnO	0.04	0.05	0.04	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04
MgO	1.26	1.22	1.52	1.13	1.24	1.54	1.35	1.10
CaO	1.21	0.83	0.62	1.26	1.23	0.69	0.86	1.22
Na ₂ O	3.80	2.92	3.14	3.42	3.13	3.92	4.52	3.84
K ₂ O	2.16	3.61	3.06	2.31	2.75	2.51	1.86	1.97
P ₂ O ₅	0.18	0.16	0.15	0.15	0.18	0.16	0.15	0.16
CO ₂	0.34	0.33	0.45	0.43	0.39	0.52	0.28	0.34
H ₂ O ⁺	0.80	0.83	0.75	0.66	0.85	0.79	0.46	0.71
烧失量	1.09	1.61	1.57	1.29	1.28	1.37	0.84	1.20
总计	98.47	100.48	100.83	100.61	99.89	101.38	100.32	100.54
K ₂ O/Na ₂ O	0.57	1.24	0.97	0.68	0.88	0.64	0.41	0.51
K ₂ O+Na ₂ O	5.96	6.53	6.20	5.73	5.88	6.43	6.38	5.81
CaO/Na ₂ O	0.32	0.28	0.20	0.37	0.39	0.18	0.19	0.32
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	28.43	30.19	27.55	29.02	27.62	29.44	29.37	33.81
A/CNK	1.26	1.45	1.48	1.34	1.38	1.35	1.23	1.30
A/NK	1.59	1.70	1.68	1.71	1.76	1.53	1.43	1.64
石英(Q)	35.53	33.61	37.99	37.86	36.27	35.44	32.93	36.26
钙长石(An)	2.22	0.35	0.00	2.06	2.00	0.00	1.05	2.56
钠长石(Ab)	33.30	25.20	24.54	29.34	27.11	30.39	38.63	32.95
正长石(Or)	13.22	21.76	18.36	13.84	16.63	14.95	11.10	11.81
刚玉(C)	4.42	6.12	6.31	5.12	5.62	5.48	3.71	4.52
紫苏辉石(Hy)	6.21	7.00	7.12	6.34	6.73	7.54	7.09	6.63
钛铁矿(Il)	0.94	0.95	1.00	0.92	1.01	0.91	0.88	0.79
磁铁矿(Mt)	2.64	3.58	3.03	2.91	3.04	3.39	3.38	3.14
磷灰石(Ap)	0.46	0.39	0.37	0.38	0.45	0.40	0.35	0.39
锆石(Zr)	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
铬铁矿(Cm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
萤石(Fr)	0.23	0.29	0.23	0.21	0.22	0.27	0.19	0.16
方解石(Cc)	0.80	0.75	0.57	1.00	0.92	0.60	0.65	0.78
碳酸钠(Nc)	0.00	0.00	0.49	0.00	0.00	0.61	0.00	0.00
合计	100.01	100.04	100.06	100.02	100.05	100.02	100.00	100.03
Li	12.83	19.45	19.89	18.75	21.17	18.78	17.75	14.14
Sc	15.25	15.01	15.78	14.92	16.10	14.95	14.90	14.71
V	52.00	50.00	51.00	51.00	53.00	51.00	49.00	49.00
Cr	26.64	25.19	31.01	27.52	30.21	28.23	28.71	26.12
Co	6.35	7.51	7.27	7.47	8.23	5.37	5.78	10.70
Ni	9.18	9.51	12.63	9.95	10.61	8.62	8.78	13.71
Cu	18.60	22.64	21.24	22.18	26.50	10.43	18.96	34.71

续表 2-1

岩性	二云母花岗岩							
样号	ZKAB01-01	ZKAB01-02	ZKAB01-03	ZKAB01-04	ZKAB01-05	ZKAB01-06	ZKAB01-07	ZKAB01-08
Zn	55.93	136.30	54.26	85.61	73.58	63.47	50.42	41.77
Ga	19.55	19.63	22.95	20.75	22.62	23.54	23.98	22.04
Rb	125.00	172.00	134.00	124.00	144.00	127.00	95.00	94.00
Sr	190.00	147.00	73.00	142.00	153.00	79.00	111.00	146.00
Y	26.36	26.49	34.37	28.65	29.66	27.82	30.55	27.00
Zr	169.00	158.00	175.00	160.00	176.00	165.00	172.00	160.00
Nb	16.00	14.21	14.76	14.51	15.91	14.92	14.39	13.89
Cs	23.25	17.19	17.64	18.88	21.61	16.38	12.04	13.78
Ba	457.00	570.00	492.00	496.00	568.00	335.00	265.00	371.00
La	35.44	35.21	39.81	36.21	38.18	37.54	38.54	33.09
Ce	70.17	68.76	79.23	72.29	71.08	70.02	74.97	64.23
Pr	8.79	8.71	9.63	8.74	9.11	8.89	9.15	8.01
Nd	32.11	32.17	35.50	32.47	34.14	33.17	33.65	29.61
Sm	6.77	6.73	7.42	6.83	7.05	6.79	7.05	6.33
Eu	1.01	0.98	1.10	0.97	1.06	0.92	1.11	0.96
Gd	6.52	6.18	7.07	6.24	6.30	6.08	6.60	5.60
Tb	1.02	0.99	1.14	1.05	1.06	1.01	1.07	0.95
Dy	5.36	5.42	6.37	5.69	5.96	5.54	5.89	5.27
Ho	1.00	0.98	1.25	1.05	1.08	1.00	1.09	0.96
Er	2.62	2.74	3.55	2.79	2.97	2.71	2.97	2.63
Tm	0.40	0.40	0.59	0.43	0.45	0.42	0.46	0.40
Yb	2.40	2.48	3.62	2.60	2.69	2.48	2.76	2.43
Lu	0.36	0.35	0.52	0.37	0.39	0.36	0.39	0.35
Hf	9.55	8.46	8.90	7.80	8.57	8.06	7.72	8.24
Ta	4.37	2.19	2.02	2.15	2.79	2.41	2.31	2.20
Pb	18.09	29.18	8.51	16.96	11.55	9.18	9.13	10.37
Bi	0.28	0.19	0.22	1.41	0.51	0.19	0.18	0.32
Th	18.92	18.96	21.17	19.09	19.40	20.04	21.93	18.40
U	6.29	5.94	4.93	6.93	5.41	6.31	5.40	4.30
W	4.54	3.35	9.00	5.17	4.90	4.29	2.89	3.40
Mo	0.20	0.35	0.71	0.25	0.18	0.42	0.82	0.84
F	1074.82	1282.68	1036.50	967.68	1024.02	1222.44	892.34	789.84
As	1.14	0.49	0.65	0.69	0.37	1.01	0.66	0.68
Sb	0.09	0.12	0.14	0.09	0.06	0.06	0.08	0.10
Ge	1.72	1.70	1.50	1.75	1.75	1.56	1.41	1.44
B	218.30	16.30	15.60	39.20	7.60	46.70	10.30	83.70
Sn	9.38	8.36	10.58	10.58	9.67	9.38	8.19	9.57
Ag	0.05	0.07	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.06

续表 2-2

岩性	二云母花岗岩							
样号	ZKAB01-01	ZKAB01-02	ZKAB01-03	ZKAB01-04	ZKAB01-05	ZKAB01-06	ZKAB01-07	ZKAB01-08
Au	1.01	0.62	0.87	1.77	0.92	0.62	0.89	0.82
ΣREE	173.94	172.09	196.80	177.73	181.52	176.90	185.69	160.83
LREE	154.28	152.56	172.69	157.52	160.62	157.33	164.46	142.23
HREE	19.66	19.54	24.11	20.22	20.89	19.57	21.23	18.60
LREE/HREE	7.85	7.81	7.16	7.79	7.69	8.04	7.75	7.65
(La/Yb) _N	10.61	10.20	7.89	9.97	10.20	10.88	10.01	9.77
δEu	0.46	0.46	0.46	0.45	0.48	0.43	0.49	0.48
δCe	0.95	0.94	0.96	0.97	0.90	0.91	0.95	0.94
T _{Zr} /°C	813	825	842	812	822	830	824	811
岩性	黑云母花岗岩							
样号	ZKAB01-09	ZKAB01-10	ZKAB01-11	ZKAB01-12	ZKAB01-13	ZKAB01-14	ZKAB01-15	ZKAB01-16
SiO ₂	73.38	72.33	72.52	73.70	70.42	71.85	74.03	73.20
TiO ₂	0.21	0.22	0.23	0.22	0.22	0.23	0.17	0.18
Al ₂ O ₃	12.57	13.86	13.49	13.76	12.70	13.97	12.97	13.06
Fe ₂ O ₃	1.74	1.95	1.88	2.02	1.70	2.08	1.74	1.89
FeO	0.45	1.30	1.35	1.25	1.05	0.45	0.30	0.60
MnO	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02
MgO	0.59	0.62	0.69	0.50	0.49	0.47	0.45	0.57
CaO	0.45	0.72	0.41	0.55	0.44	0.55	0.38	0.37
Na ₂ O	5.58	4.07	4.67	3.35	5.04	3.19	5.74	5.50
K ₂ O	1.03	2.14	1.75	3.40	1.41	3.82	1.10	1.27
P ₂ O ₅	0.19	0.18	0.20	0.19	0.19	0.19	0.17	0.17
CO ₂	0.18	0.22	0.62	0.19	0.31	0.16	0.38	0.41
H ₂ O ⁺	0.27	0.43	0.62	0.30	0.39	0.49	0.22	0.45
烧失量	0.56	1.05	0.94	0.83	0.62	1.05	0.48	0.72
总计	97.23	99.11	99.40	100.29	95.00	98.55	98.15	98.41
K ₂ O/Na ₂ O	0.18	0.53	0.37	1.01	0.28	1.20	0.19	0.23
K ₂ O+Na ₂ O	6.61	6.21	6.42	6.75	6.45	7.01	6.84	6.77
CaO/Na ₂ O	0.08	0.18	0.09	0.16	0.09	0.17	0.07	0.07
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	58.69	64.46	58.48	61.93	58.17	59.99	75.20	71.24
A/CNK	1.13	1.34	1.31	1.35	1.20	1.35	1.15	1.18
A/NK	1.22	1.54	1.41	1.50	1.29	1.49	1.22	1.25
石英(Q)	37.37	39.29	42.15	40.08	38.42	38.76	38.63	38.80
钙长石(An)	0.00	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
钠长石(Ab)	48.28	35.26	33.63	28.27	42.38	27.40	46.29	43.53
正长石(Or)	6.32	12.95	10.57	20.26	8.86	23.27	6.67	7.72
刚玉(C)	2.50	4.80	5.31	4.67	3.64	4.81	3.09	3.56
紫苏辉石(Hy)	2.79	3.74	3.82	3.25	3.11	2.64	2.31	2.96
钛铁矿(Il)	0.42	0.42	0.45	0.43	0.44	0.46	0.34	0.36
磁铁矿(Mt)	1.32	1.91	1.92	1.97	1.69	1.54	1.23	1.50
磷灰石(Ap)	0.49	0.45	0.49	0.46	0.49	0.48	0.41	0.42
锆石(Zr)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01

续表 2-3

岩性	黑云母花岗岩							
样号	ZKAB01-09	ZKAB01-10	ZKAB01-11	ZKAB01-12	ZKAB01-13	ZKAB01-14	ZKAB01-15	ZKAB01-16
铬铁矿 (Cm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
萤石 (Fr)	0.09	0.23	0.12	0.18	0.17	0.26	0.10	0.15
方解石 (Cc)	0.28	0.51	0.16	0.38	0.19	0.30	0.20	0.12
碳酸钠 (Nc)	0.14	0.00	1.37	0.06	0.60	0.09	0.72	0.88
合计	100.02	100.04	100.01	100.03	100.00	100.03	100.00	100.01
Li	8.80	18.12	11.78	19.46	17.10	17.12	16.12	16.52
Sc	10.55	10.45	10.51	10.40	11.52	11.31	10.19	10.14
V	28.00	27.00	28.00	26.00	26.00	26.00	25.00	26.00
Cr	9.06	7.70	8.44	9.62	10.46	9.58	6.89	7.33
Co	2.31	2.19	1.98	2.94	2.90	2.36	1.51	2.75
Ni	1.14	0.85	0.74	5.73	1.15	1.46	0.81	0.87
Cu	6.83	9.28	6.98	17.90	20.71	4.57	3.70	7.19
Zn	23.68	24.41	17.45	31.78	28.48	43.42	19.40	25.07
Ga	17.62	24.14	20.33	22.46	17.09	25.46	16.70	17.19
Rb	59.00	127.00	103.00	171.00	98.00	206.00	77.00	95.00
Sr	52.0	65.0	33.0	83.0	37.0	101	57.0	49.0
Y	25.3	25.0	26.2	26.9	24.3	27.1	25.4	25.1
Zr	77.0	84.0	85.0	82.0	72.0	93.0	70.0	63.0
Nb	14.4	13.2	14.3	14.7	14.0	15.2	12.9	15.1
Cs	6.53	9.33	10.8	9.73	7.30	15.1	6.25	8.83
Ba	116	371	191	290	92.0	322	74.0	80.0
La	18.4	19.2	22.8	21.6	18.4	21.2	15.1	14.3
Ce	37.3	37.8	44.6	43.2	37.1	43.4	30.3	28.6
Pr	4.58	4.66	5.47	5.43	4.79	5.43	3.79	3.63
Nd	16.8	16.8	20.1	19.8	17.3	19.6	13.7	13.3
Sm	4.27	4.03	4.78	4.91	4.26	4.87	3.55	3.59
Eu	0.51	0.71	0.64	0.74	0.55	0.72	0.35	0.35
Gd	3.66	3.86	4.38	4.60	3.84	4.14	3.32	3.14
Tb	0.75	0.75	0.84	0.85	0.74	0.84	0.72	0.70
Dy	4.81	4.75	5.16	5.29	4.76	5.44	4.86	4.82
Ho	0.87	0.85	0.88	0.93	0.85	0.97	0.85	0.86
Er	2.22	2.24	2.30	2.39	2.16	2.48	2.13	2.12
Tm	0.35	0.36	0.36	0.37	0.35	0.38	0.35	0.34
Yb	2.13	2.08	2.11	2.10	1.97	2.25	1.88	1.85
Lu	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.33	0.26	0.28
Hf	3.40	3.79	3.72	3.57	3.28	4.28	3.03	2.87
Ta	2.78	2.65	3.14	3.19	2.93	2.53	2.92	3.13
Pb	5.56	8.09	4.33	19.4	8.76	23.7	5.89	6.34

续表 2-4

岩性	黑云母花岗岩							
样号	ZKAB01-09	ZKAB01-10	ZKAB01-11	ZKAB01-12	ZKAB01-13	ZKAB01-14	ZKAB01-15	ZKAB01-16
Bi	0.40	0.61	2.10	1.12	1.21	1.12	1.60	0.79
Th	13.1	12.5	14.6	13.4	13.4	14.1	13.2	12.6
U	9.09	11.9	14.0	14.0	12.4	10.3	10.0	11.3
W	6.56	5.11	4.09	7.85	5.27	6.91	5.94	5.05
Mo	1.58	0.99	0.90	0.64	0.49	0.47	0.32	0.44
F	513.15	1070.50	638.46	885.13	829.40	1193.35	523.87	727.92
As	0.69	1.03	0.74	3.06	3.01	1.67	1.18	1.83
Sb	0.08	0.08	0.08	0.11	0.19	0.08	0.11	0.10
Ge	1.41	1.73	1.39	1.94	1.49	1.92	1.35	1.44
B	2.80	8.60	29.10	7.90	9.40	6.80	4.70	34.70
Sn	8.18	12.54	11.37	10.16	7.78	8.85	10.70	10.37
Ag	0.04	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.05
Au	0.51	0.61	3.48	0.44	0.57	0.58	12.09	1.24
ΣREE	96.88	98.36	114.78	112.48	97.23	112.10	81.17	77.89
LREE	81.80	83.18	98.43	95.65	82.29	95.26	66.80	63.80
HREE	15.09	15.18	16.34	16.83	14.94	16.84	14.38	14.09
LREE/HREE	5.42	5.48	6.02	5.69	5.51	5.66	4.65	4.53
(La/Yb) _N	6.19	6.62	7.76	7.39	6.71	6.76	5.76	5.54
δEu	0.39	0.54	0.42	0.47	0.41	0.47	0.31	0.31
δCe	0.97	0.95	0.95	0.95	0.95	0.97	0.96	0.95
T _{Zr} /°C	761	771	778	774	756	783	757	749

注:主量元素含量单位为%;除 Au 含量单位为 10⁻⁹外,其余微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

含量为 0.41%~1.24%,CaO/Na₂O 含量为 0.18%~0.39%,属于钙碱性序列,与双脉地同期花岗岩的投点范围一致,但 SiO₂ 含量更低(图 4-a)。A/CNK = 1.26~1.48,均大于 1.1,略高于双脉地同期花岗岩,属于强过铝质序列,利用样品 A/NK 及 A/CNK 值进行投点,落在 S 型花岗岩一侧(图 4-b)。标准矿物 CIPW 计算结果中,所有样品都含有大于 1%的刚玉分子(3.17%~6.31%),二云母花岗岩样品分异指数为 DI=80~83,类似于双脉地花岗岩。

黑云母花岗岩:SiO₂ 含量为 70.42%~74.03%,高于二云母花岗岩(图 4-a),MgO 含量为 0.45%~0.69%,Al₂O₃ 含量为 12.57%~13.86%,CaO 含量为 0.37%~0.72%,K₂O 含量为 1.03%~3.82%,Na₂O 含量为 3.19%~5.58%,K₂O/Na₂O 含量为 0.18%~0.53%,CaO/Na₂O 含量为 0.08%~0.18%,属于钙碱性序列(图 4-a),与双脉地同期花岗岩的投点范

围一致。铝饱和指数 A/CNK = 1.22~1.50,大于 1.1,略低于二云母花岗,但都属于强过铝质序列,利用样品 A/NK 及 A/CNK 值进行投点,落在 S 型花岗岩一侧(图 4-b)。标准刚玉分子含量为 2.5%~5.31%,大于 1%,黑云母花岗岩样品分异指数为 DI=87~92,分异程度大于二云母花岗岩。

5.3 微量元素

样品微量元素分析结果见表 2。二云母花岗岩稀土元素总量为 160.83×10⁻⁶~196.80×10⁻⁶,平均值 178.18×10⁻⁶,配分曲线呈平缓右倾型(图 5-a),相对富集轻稀土元素,(La/Yb)_N 值为 7.88~10.88,LREE/HREE 值为 7.16~8.04,δEu = 0.43~0.49,显示出明显的负 Eu 异常。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5-b)中,Pb 及其左侧元素具有更强不相容性的元素是原始地幔丰度的 10~1000 倍,显示更强烈的富集,Rb、K 等大离子亲石元素(LILEs)和

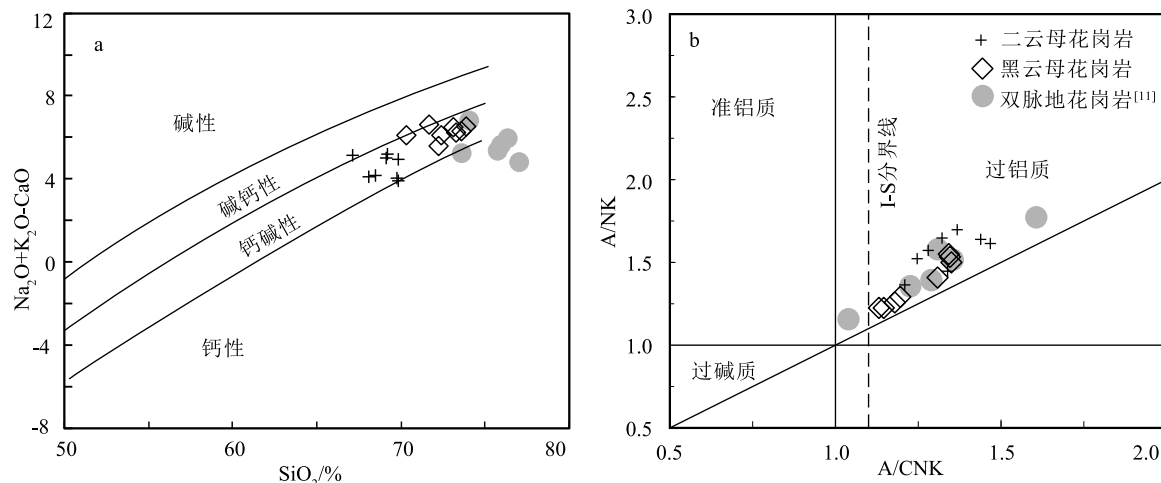


图 4 清水河花岗岩 $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{Ca}_2\text{O})$ ^[45] (a) 及 $\text{A/CNK} - \text{A/NK}$ 图解 ^[46] (b)

Fig. 4 Diagrams of $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{Ca}_2\text{O})$ (a) and $\text{A/CNK} - \text{A/NK}$ (b) for Qingshuihe granites

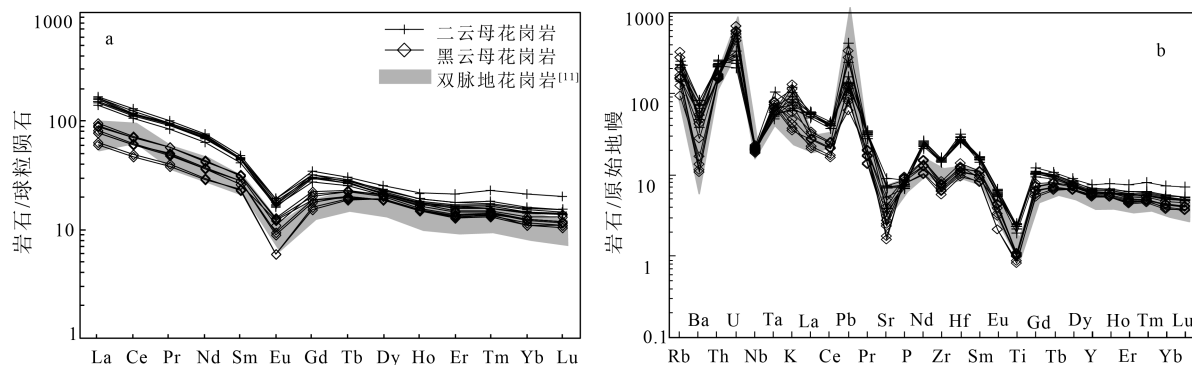


图 5 清水河花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分图解 ^[47] (a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 ^[48] (b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) for the Qingshuihe granites

Pb、U 为明显的正异常, K 为正异常, 而明显亏损 Nb、Zr、Ta、Ti 等高场强元素 (HFSEs)。Sr、Ba 元素负异常, 表明该岩体在形成过程中有斜长石和钾长石的分离。相对于二云母花岗岩, 黑云母花岗岩具有较低的稀土元素总量 ($77.89 \times 10^{-6} \sim 114.78 \times 10^{-6}$), 稀土元素分配曲线平缓右倾 (图 5-a), 与双脉地花岗岩一致, 轻、重稀土元素比值较低 ($\text{LREE}/\text{HREE} = 4.53 \sim 6.02$)、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 5.54 \sim 6.02$, Eu 元素呈现出更明显的负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.31 \sim 0.54$), 类似于二云母花岗岩。在微量元素标准化蛛网图 (图 5-b) 中, 富集 Rb、K 等大离子亲石元素及 Pb、U 等元素, 亏损 Nb、Ta、Zr、Ti、Sr、Ba 等元素。清水河花岗岩微量元素蛛网图及稀土元素配分曲线相似, 表明二者来源相同。

5.4 Sr-Nd-Pb 同位素

清水河花岗岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征 (表 3、表 4) 如下: 二云母花岗岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.71430, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值为 0.511564, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -9.1$, 两阶段模式年龄为 1.9 Ga, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 初始比值 = 18.023, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 初始比值 = 15.710, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 初始比值为 38.351; Sr-Nd 同位素组成类似于 Wang 等 ^[17] 报道的同期平达花岗岩, 其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.70972 ~ 0.72434, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值为 0.511610 ~ 0.511772, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -5.3 \sim -8.2$, 两阶段模式年龄为 1.6 ~ 1.8 Ga。黑云母花岗岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.69474, 小于 0.70300, 具明显低异常, 而 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值为 0.511605, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -8.1$, 两阶段 Nd 模式年龄为 1.9 Ga, 类似于二云母花岗岩;

表 3 清水河花岗岩 Sr-Nd 同位素测试结果
Table 3 Sr-Nd isotopic analyses of Qingshuihe granites

岩性	<i>t</i> /Ma	Rb/10 ⁻⁶	Sr/10 ⁻⁶	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i
二云母花岗岩	473	134.2	198.8	1.95	0.72744	0.71430
黑云母花岗岩	479	112	36.79	8.82	0.75494	0.69474
岩性	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	ε _{Nd} (<i>t</i>)	<i>T</i> _{DM2} /Ma	
二云母花岗岩	0.1263	0.511955	0.511564	-9.1	1942	
黑云母花岗岩	0.1454	0.512061	0.511605	-8.1	1869	

表 4 清水河花岗岩 Pb 同位素测试结果
Table 4 Pb isotopic analyses of Qingshuihe granites

岩性	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	±1σ	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	±1σ
二云母花岗岩	19.7760	0.003	15.8090	0.002	40.0460	0.005
黑云母花岗岩	30.5540	0.005	16.3620	0.003	41.3640	0.008
岩性	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _t		(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _t		(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _t	表面年龄/Ma
二云母花岗岩	0.511564		-9.1		1942	-569
黑云母花岗岩	0.511605		-8.1		1869	-1000

同时其²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 初始比值为11.335,也出现明显的低异常,但是²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 初始比值和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 初始比值分别为 15.272 和 34.929,类似二云母花岗岩。

将数据投点在(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb)_t-(²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)_t 初始比值图解(图 6-a)上,二云母花岗岩类似于 Zhao 等^[18]报道的高黎贡花岗岩,都落在上地壳演化线上方;在(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i-ε_{Nd}(*t*)同位素图解(图 6-b)中,二云母花岗岩和 Wang 等^[17]报道的同期平达花岗岩类似,靠近上地壳演化线。结合相似的两阶段 Nd

模式年龄 *T*_{DM2}(1.6~1.9 Ga),该花岗岩源岩具有上地壳岩石的特征,这种岩石通常来自相对古老的大陆地壳。

6 讨论

6.1 成因类型

对于花岗岩的成因分类,有 20 多种方案,而 M (mantle - edvived)、A (alkaline, anorogenic and anhydrous)、I (infracrustal or igneous)、S (supracrustal or sedimentary)是现在普遍使用的分类方案。A 型

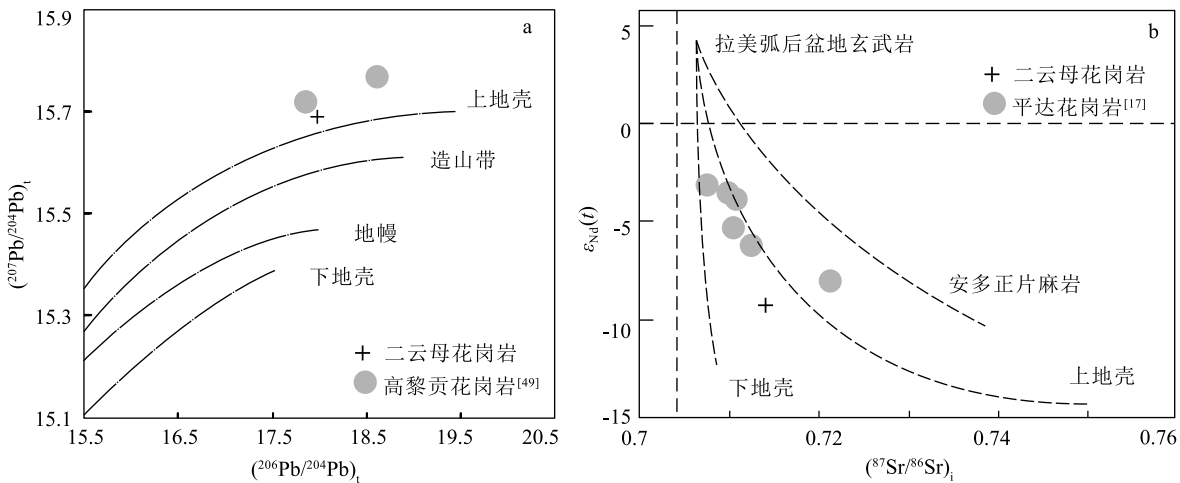


图 6 清水河花岗岩(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb)_t-(²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)_t图解^[50](a)和(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i-ε_{Nd}(*t*)图解^[51](b)

Fig. 6 Diagrams of (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb)_t-(²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)_t(a) and (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i-ε_{Nd}(*t*)(b) for Qingshuihe granites

花岗岩主要物源为幔源,其碱性含量最高(碱性序列);I型花岗岩为壳幔混源,S型花岗岩主要为壳源,两者具中等碱性含量(钙碱性序列或高钾钙碱性序列);M型花岗岩为幔源,钾性含量最低(拉斑玄武岩序列)。本次研究的清水河花岗岩为钙钾性序列,类似于S型或I型花岗岩,而不同于幔源岩石M型花岗岩(拉斑玄武岩序列)和A型花岗岩(碱性序列)。清水河花岗岩铝饱和指数含量较高,具有S型花岗岩特征。研究发现,16个样品都含有大于1%的标准刚玉分子,且没有透辉石,进一步表明为S型花岗岩。对于微量元素,清水河花岗岩样品大多数Rb/Sr值大于1,而Sr和Ba的比值大多数小于0.5,这些微量元素比值特征类似于邻区的S型花岗岩。因此可排除I型花岗岩。

虽然清水河花岗岩的分异指数较高(80~92),在矿物学研究上因为花岗岩的高分异,A型与S型花岗岩具有类似的特征。事实上,笔者研究发现,清水河花岗岩确实没有出现堇青石等划分S型与A型花岗岩的特征矿物,但是可以通过化学元素或化合物分析对这2类花岗岩进行区分,比如微量元素和稀土元素配分模式图体现出S型花岗岩的特征,而不同于A型花岗岩的分布型式,清水河花岗岩所有样品的 FeO^*/MgO 值较低(3.27~6.14),也不同于A型花岗岩高 FeO^*/MgO 值(大于10)的特征,且清水河花岗岩Zr、Nb、Ce、Y等元素含量较低,其总和明显小于划分A型花岗岩的最低值^[52]。

综上所述,清水河花岗岩属于S型花岗岩。

6.2 源区性质

前人研究表明,变沉积岩原岩的部分熔融可以

产生强过铝质花岗岩,包括贫粘土的变杂砂岩(如砂岩、易分解的火山碎屑岩)和富粘土质的泥质岩^[53-55]。此外,包括镁铁质(角闪岩)和长英质(正片麻岩)的准铝质变岩浆岩源区,均可在较低程度的部分熔融和缺水条件下产生过铝质长英质溶体^[56-58]。

花岗岩中CaO与 Na_2O 的比值受到源区中斜长石和粘土比例大小的控制,因此 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值可以作为识别过铝质花岗岩源区的重要标志^[56,59]。如果物源富粘土、贫斜长石,形成的过铝-强过铝花岗岩其 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}<0.3$,而由富斜长石、贫粘土源产生的同类花岗岩该比值大于0.3^[60]。此外,如果有部分基性岩浆在花岗岩形成时发生混染,会导致原本来自泥质岩源区的强过铝质花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 出现矛盾,显示出砂屑岩的特征,即比值小于0.3。清水河花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值分布于0.07~0.39,在 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ - $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 图解(图7-a)中,其16个样品有4个落在砂屑岩源区,12个落在泥质岩源区,在 $\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO}^*)$ - $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO}^*)$ 图解(图7-b)中,所有样品均投在泥质岩区,说明该样品可能来源于富粘土质岩石,并可能有幔源溶体的加入,且在Rb/Sr-Rb/Ba图解(图7-c)中,大多数样品均投在贫粘土源区,进一步说明幔源溶体加入泥质源岩中,导致其具有更低的Rb/Ba、Rb/Sr值,这种特征与双脉地同期花岗岩一致^[11]。

结合二云母花岗岩($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_t=18.023, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_t=15.710, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_t=38.351投图显示其位于上地壳演化线上方(图6-a),而 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)=$

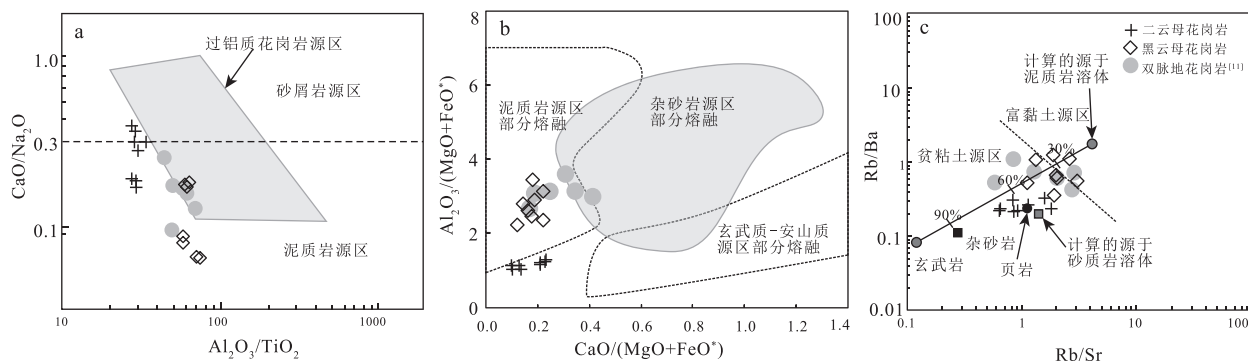


图 7 清水河花岗岩 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ - $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ ^[55] (a)、 $\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO}^*)$ - $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO}^*)$ ^[61] (b) 和 Rb/Sr - Rb/Ba 图解^[55] (c)

Fig. 7 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ - $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ (a), $\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO}^*)$ - $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO}^*)$ (b) and Rb/Sr - Rb/Ba (c) diagrams of the Qingshuihe granites

-9.1, Nd 模式年龄计算结果为 1.9 Ga, 投图显示其位于上地壳演化线下方(图 6-b), 表明其是古老地壳重熔的产物, 且在源岩熔融过程中混入了幔源物质。

随着花岗岩源区熔融温度的提高, 过铝质花岗岩中 Al_2O_3 与 TiO_2 比值逐渐减小, 当该值大于 100 时^[55], 源区熔融温度小于 875℃, 小于 100 时, 源区熔融温度大于 875℃。清水河花岗岩样品的分析结果显示, Al_2O_3 与 TiO_2 比值介于 27.55~75.20 之间, 小于 100。结合较高的全岩锆饱和温度 (738~920℃) (表 2), 表明清水河花岗岩形成的温度较高。

综上所述, 清水河花岗岩可能是古老地壳物质 (以泥质源岩为主) 在较高温度条件下经部分熔融形成的, 并有不同程度幔源物质的混入。

6.3 岩浆事件

本文同位素年龄数据表明, 清水河过铝质花岗岩侵位于早古生代 (462~479 Ma)。早古生代过铝质花岗岩在保山地块很普遍, 如平河花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 448~502 Ma^[9, 17, 23], 勐冒花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 480~455 Ma^[17, 23-24], 双脉地花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 460~470 Ma^[11]。这些年龄数据表明, 保山地块存在 448~502 Ma 的岩浆活动。此外, 其他地区也有早古生代岩浆活动的迹象, 如腾冲地块存在锆石 U-Pb 年龄 484~518 Ma 的岩浆岩^[10, 17, 62-63]。区域上, 晚寒武世—中奥陶世岩浆岩 (伊拉克中部、土耳其、喜马拉雅、拉萨、羌塘、腾冲、保山) 不仅包括基性—酸性火山岩、深成侵入岩, 也包括变质岩, 它们的年龄分布于 448~530 Ma。以上研究表明, 早古生代东冈瓦纳边缘发生了广泛的、几乎同期的岩浆活动^[9, 12]。

6.4 构造背景

对于早古生代构造背景的认识: ①早期认为, 早古生代冈瓦纳大陆北缘处于被动陆缘环境^[7-8], 直到晚古生代冈瓦纳大陆北部古特提斯洋板块才开始向冈瓦纳大陆俯冲, 使其变为活动大陆边缘^[8]。②更多的证据指明是活动大陆边缘环境^[9-12]。认为板块汇聚形成冈瓦纳大陆实际在早古生代早期已经完全结束, 原特提斯洋在这个时期已经向冈瓦纳大陆俯冲消减, 冈瓦纳大陆边缘在这个时期的性质不是被动陆缘而是活动陆缘, 并且可能与亚洲微陆块碰撞, 形成了类似于安第斯型造山带的构造环境^[13-16]; 在喜马拉雅造山带和印度西北部^[64]、尼泊尔喜马拉雅中部^[65-66] 和青藏高原南部^[67] 均发现了寒武纪—奥陶纪变质岩和变形构造; 拉萨地块^[68]、

特提斯喜马拉雅^[69-70]、保山地块广泛发育寒武纪—早奥陶世的角度不整合, 保山地块中部和南部缺失下奥陶统^[32], 印度—澳大利亚边缘的亚洲微陆块内, 发现 510~480 Ma 的超高压变质作用。说明在这一时期, 一些微板块在经历了原特提斯洋消减之后, 与印度—澳大利亚边缘碰撞 (包括保山地块), 导致地壳缩短增厚。这期地壳缩短增厚的时限约与 Cawood 等^[15] 和 Gehrels 等^[66] 的推断一致, 为 475~500 Ma。

另外, Li 等^[11] 对保山地块双脉地过铝质花岗岩的研究认为, 东冈瓦纳边缘广泛存在的早奥陶世底砾岩, 457 Ma 高喜马拉雅基性岩地球化学显示板内构造环境的特征, 指示该时期东冈瓦纳边缘已由挤压环境转变为伸展环境, 而 460~470 Ma 双脉地过铝质花岗岩同样显示伸展扩张环境的特征, 结合地壳挤压缩短的时限及变化的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (-11.6~+7), 提出地壳缩短增厚的时间持续到 475 Ma, 随后可能使岩石圈地幔变得重力不稳, 引起岩石圈地幔拆沉, 诱发软流圈物质上涌, 通过底垫作用将热量传导至古老的地壳, 导致泥质沉积物的重熔, 产生保山地块过铝质花岗岩。考虑到清水河过铝质花岗岩 (462~479 Ma) 与双脉地过铝质花岗岩 (460~470 Ma) 具有相似的岩浆结晶年龄, 类似的主量和微量元素组成 (图 4、图 5), 以及相同的构造记录, 笔者认为, 保山清水河过铝质花岗岩是由于岩石圈地幔拆沉作用形成, 其源岩来自于古老的大陆地壳, 并且都伴随着不同程度幔源物质的混入。

7 结 论

(1) SHRIMP 锆石 U-Pb 定年表明, 清水河二云母花岗岩年龄为 462~473 Ma, 黑云母花岗岩年龄为 479 Ma, 形成时代为早—中奥陶世。

(2) Sr-Nd-Pb 同位素及地球化学研究表明, 清水河花岗岩均具备 S 型花岗岩特征, 其物质来源为古老陆壳富粘土的泥质岩, 有幔源物质的混入。

(3) 清水河花岗岩和保山地块 460~475 Ma 的过铝质花岗岩在时代、地球化学特征方面的可对比性显示, 清水河花岗岩可能由岩石圈拆沉作用形成。

致谢: 感谢审稿专家的建设性意见, 镜下鉴定实验得到了中国地质大学 (北京) 郭向国博士的指导, 在资料收集整理过程中得到同门师弟的帮助, 在此一并感谢。

参考文献

- [1] Deng J, Wang Q, Li G, et al. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(2): 419–437.
- [2] Deng J, Wang Q, Li G, et al. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 268–299.
- [3] 莫宣学. 三江中段火山岩-蛇绿岩与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [4] 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [5] Metcalfe I. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 1–33.
- [6] 林仕良, 丛峰, 高永娟, 等. 滇西腾冲地块东南缘高黎贡山群片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质通报*, 2012, 31(2/3): 258–263.
- [7] Miller C, Thni M, Frank W, et al. The Early Palaeozoic magmatic event in the Northwest Himalaya, India: Source, tectonic setting and age of emplacement[J]. *Geological Magazine*, 2001, 138(3): 237–251.
- [8] 潘桂棠, 土立全, 张万平, 等. 青藏高原及邻区大地构造图及说明书 (1: 150 万)[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- [9] 董美玲, 董国臣, 莫宣学, 等. 滇西保山地块早古生代花岗岩类的年代学、地球化学及意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(5): 1453–1464.
- [10] 蔡志慧, 许志琴, 段向东, 等. 青藏高原东南缘滇西早古生代早期造山事件[J]. *岩石学报*, 2013, 29(6): 2123–2140.
- [11] Li G J, Wang Q F, Huang Y H, et al. Petrogenesis of middle Ordovician peraluminous granites in the Baoshan block: Implications for the early Paleozoic tectonic evolution along East Gondwana[J]. *Lithos*, 2016, 245: 76–92.
- [12] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1429–1454.
- [13] Hoffman P F. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? [J]. *Science*, 1991, 252(5011): 1409–1412.
- [14] DeCelles P G, Gehrels G E, Quade J, et al. Tectonic implications of U-Pb zircon ages of the Himalayan orogenic belt in Nepal[J]. *Science*, 2000, 288(5465): 497–499.
- [15] Cawood P A, Buchan C. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly[J]. *Earth-Science Reviews*, 2007, 82(3/4): 217–256.
- [16] Cawood P A, Johnson M R W, Nemchin A A. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: tectonic response to Gondwana assembly[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 255(1/2): 70–84.
- [17] Wang Y J, Xing X W, Cawood P A, et al. Petrogenesis of early Paleozoic peraluminous granite in the Sibumasu Block of SW Yunnan and diachronous accretionary orogenesis along the northern margin of Gondwana[J]. *Lithos*, 2013, 182/183: 67–85.
- [18] Li G J, Wang Q F, Huang Y H, et al. Discovery of Hadean-Mesoarchean crustal materials in the northern Sibumasu block and its significance for Gondwana reconstruction[J]. *Precambrian Research*, 2015, 271: 118–137.
- [19] Zhao S W, Lai S C, Gao L, et al. Evolution of the Proto-Tethys in the Baoshan block along the East Gondwana margin: constraints from early Palaeozoic magmatism[J]. *International Geology Review*, 2016, 59(1): 1–15.
- [20] 陈吉琛. 滇西花岗岩类形成的构造环境及岩石特征[J]. *云南地质*, 1989, (Z1): 205–212.
- [21] 陈吉琛. 滇西花岗岩类 Pb, Sr 同位素组成特征及其基底时代和性质[J]. *地质科学*, 1991, (2): 174–183.
- [22] 李文昌. 西南“三江”多岛弧盆碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [23] Chen F, Li X H, Wang X L, et al. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2007, 96(6): 1179–1194.
- [24] 董美玲. 滇西保山地块早古生代花岗岩类的地球化学、年代学及其构造意义[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2013.
- [25] 陈吉琛. 滇西花岗岩类时代划分及同位素年龄值选用的讨论[J]. *云南地质*, 1987, (2): 3–15.
- [26] Lin T H, Lo C H, Chung S L, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Jiali and Gaoligong shear zones: Implications for crustal deformation around the Eastern Himalayan Syntaxis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(5): 674–685.
- [27] 邓军, 王长明, 李龚健. 三江特提斯叠加成矿作用样式及过程[J]. *岩石学报*, 2012, 28(5): 1349–1361.
- [28] 刘琦胜, 叶培盛, 吴中海. 滇西高黎贡山南段奥陶纪花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年和地球化学特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(2/3): 250–257.
- [29] 金世昌, 庄凤良. 龙陵—潞西地区花岗岩矿物中熔融包裹体研究[J]. *昆明理工学报*, 1988, 13(5): 1–15.
- [30] 李庆. 云南镇康木厂花岗岩锆石定年, 地球化学, 构造环境与找矿意义[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2016.
- [31] 黄静宁, 陈永清, Zhai X M, 等. 滇西保山地块双脉地晚始新世过铝质花岗岩: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年、地球化学和成因[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 54(4): 452–467.
- [32] Wang X, Metcalfe I, Jian P, et al. The Jinshajiang-Ailaoshan Suture Zone, China: tectonostratigraphy, age and evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(6): 675–690.
- [33] Heppe K, Helmcke D, Wemmer K, et al. The Lancang River Zone of south western Yunnan, China: A questionable location for the active continental margin of Paleotethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 30: 706–720.
- [34] 刘俊来, 王安建, 曹殿华, 等. 三江造山带后碰撞断裂构造带的结构与演化: 以新生代剑川—兰坪盆地为例[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(4): 488–499.
- [35] Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H, et al. Kinematics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar geochronology of the Gaoligong and Chong shan shear systems, western Yunnan, China: Implications for early Oligocene tectonic extrusion of SE Asia[J]. *Tectonophysics*, 2006, 418(3/4): 235–254.
- [36] 吕伯西, 王增, 张能德. 三江地区花岗岩类及其成矿专属性[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1–328.
- [37] 何志魁, 苏兰, 等. 保山市清水河铜铅锌多金属矿外围找矿新思路[J]. *云南地质*, 2010, 29(3): 307–310.
- [38] Gao S, Liu X M, Yuan H L, et al. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM glasses by LAICPMS[J]. *Geostand News*, 2002, 22: 181–195.
- [39] Zhang H, Shan G, Zhong Z, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb

- isotopic compositions of Cretaceous granitoids: constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China[J]. *Chemical Geology*, 2002, 186(3): 281–299.
- [40] Liu D, Ping J, Kröner A, et al. Dating of prograde metamorphic events deciphered from episodic zircon growth in rocks of the Dabie–Sulu UHP complex, China[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2006, 250(3): 650–666.
- [41] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U–Pb isotope and trace element analyses by LA–ICP–MS[J]. *Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535–1546.
- [42] Ludwig K R. *Isoplot 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003.
- [43] 马泽良, 蔡志慧, 戚学祥, 等. 保山地区新元古代—早古生代沉积岩碎屑锆石年代学及其构造意义[J]. *地质通报*, 2019, 38(4): 547–561.
- [44] Song Y T, Su L, Dong J L, et al. Detrital zircons from Late Paleozoic to Triassic sedimentary rocks of the Gongshan–Baoshan Block, SE Tibet: implications for episodic crustal growth of Eastern Gondwana[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 188: 1–10.
- [45] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A Geochemical Classification for Granitic Rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(11): 2033–2048.
- [46] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635–643.
- [47] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. *Rare Earth Elements Geochemistry*, 1984: 63–114.
- [48] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]// Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publications, 1989, 42: 313–345.
- [49] Zhao S W, Lai S C, Qin J F, et al. Tectono–magmatic evolution of the Gaoligong belt, southeastern margin of the Tibetan plateau: Constraints from granitic gneisses and granitoid intrusions [J]. *Gondwana Research*, 2016, 35(1): 238–256.
- [50] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics – the Model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1/2): 135–162.
- [51] Zhu D C, Mo X X, Wang L Q, et al. Petrogenesis of highly fractionated I–type granites in the Zayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U–Pb geochronology, geochemistry and Sr–Nd–Hf isotopes[J]. *Science China Earth Sciences*, 2009, 52(9): 1223–1239.
- [52] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A – type granites: Geochemical characteristics discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407–419.
- [53] Clemens J D. S–type granitic magmas – petrogenetic issues, models and evidence[J]. *Earth–Science Reviews*, 2003, 61(1/2): 1–18.
- [54] Miller C F. Are strongly peraluminous magmas derived from pelitic sedimentary sources? [J]. *Journal of Geology*, 1985, 93(6): 673–689.
- [55] Sylvester P J. Post – collisional strongly peraluminous granites [J]. *Lithos*, 1998, 45(1): 29–44.
- [56] Beard J S, Abirz R J, Lofgren G E. Experimental melting of crustal xenoliths from Kilbourne Hole, New Mexico and implications for the contamination and genesis of magmas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1993, 115(1): 88–102.
- [57] Patiño Douce A E, Beard J S. Dehydration – melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(3): 707–738.
- [58] Springer W, Seck H A. Partial fusion of basic granulites at 5 to 15 kbar: implications for the origin of TTG magmas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1997, 127(1/2): 30–45.
- [59] Chappell B W, White A J R. I– and S–type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1992, 83(1/2): 1–26.
- [60] Patiño Douce A E, Johnston A D. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1991, 107(2): 202–218.
- [61] Altherr R, Holl A, Hegner E, et al. High – potassium, calc – alkaline I–type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 2000, 50 (1/3): 51–73.
- [62] 李再会, 林仕良, 丛峰, 谢韬, 邹光富. 滇西高黎贡山群变质岩的锆石年龄及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(5): 1529–1541.
- [63] Song S G, Ji J Q, Wei C J, et al. Early Paleozoic granite in Nujiang River of Northwest Yunnan in southwestern China and its tectonic implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(17): 2404–2406.
- [64] Argles T W, Prince C L, Foster G L, et al. New garnets for old? Cautionary tales from young mountain belts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 172(3/4): 301–309.
- [65] Gehrels G E, DeCelles P G, Martin A, et al. Initiation of the Himalayan Orogen as an early Paleozoic thin – skinned thrust belt[J]. *GSA Today*, 2003, 13(9): 4–9.
- [66] Gehrels G E, DeCelles P G, Ojha T P, et al. Geologic and U–Th–Pb geochronologic evidence for early Paleozoic tectonism in the Kathmandu thrust sheet, central Nepal Himalaya [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2006, 118(1/2): 185–198.
- [67] 许志琴, 杨经绥, 梁凤华, 等. 喜马拉雅地体的泛非—早古生代造山事件年龄记录[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 1–12.
- [68] 李才, 吴彦旺, 王明, 等. 青藏高原泛非—早古生代造山事件研究重大进展——冈底斯地区寒武系和泛非造山不整合的发现[J]. *地质通报*, 2010, 29(12): 1733–1736.
- [69] Garzanti E, Casnedi R, Jadoul F. Sedimentary evidence of a Cambro–Ordovician orogenic event in the northwestern Himalaya [J]. *Sedimentary Geology*, 1986, 48(3/4): 237–265.
- [70] Myrow P M, Thompson K R, Hughes N C, et al. Cambrian stratigraphy and depositional history of the northern Indian Himalaya, Spiti Valley, north – central India [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2006, 118(3/4): 491–510.