

扬子地块西北缘轿子顶新元古代过铝质花岗岩: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和岩石地球化学及其构造意义

裴先治^{1,2}, 李佐臣^{1,2}, 丁仁平^{1,2}, 李瑞保², 冯建赞², 孙雨², 张亚峰², 刘战庆²

1. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054

2. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054

Pei Xianzhi^{1,2}, Li Zuochen^{1,2}, Ding Sapin^{1,2}, Li Ruibao², Feng Jianyun², Sun Yu², Zhang Yafeng², Liu Zhanqing²

1. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2. Faculty of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Pei Xianzhi, Li Zuochen, Ding Sapin, et al. Neoproterozoic Jiaoziding peraluminous granite in the northwest margin of Yangtze Block: Zircon SHRIMP U-Pb age and geochemistry, and their tectonic significance. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(3): 231-249

Abstract: The granite of Jiaoziding dome core is located in back-Longmenshan Area of the northwest margin of Yangtze Block. The study of granite's zircon SHRIMP U-Pb geochronology and geochemistry is aiming at constraining its formation age and petrogenesis. The results show that the zircons of the samples in deformed granite and massive granite of the Jiaoziding granites have internal oscillatory zoning; zircons of the Jiaoziding granites have higher Th/U ratios (0.52-1.23, 0.32-1.16) and are igneous in origin. The results of zircon SHRIMP U-Pb dating for deformed granite and massive granite were (793±11) Ma and (792±11) Ma respectively, which indicates that the granite intrusions formed in Nanhua period of the late Neoproterozoic, and their formation times are fully coincident. The Jiaoziding granite is high in SiO₂ (72.01%-77.65%) and Al₂O₃ (12.12%-14.18%), and its A/CNK=0.95-1.13 (1.04 on average). It is a typical peraluminous granite, with supersaturation in Al and Si, and is identified as S-type granite. The abundance of ΣREE varies in the range of (75.81-79.97)×10⁻⁶ (77.89×10⁻⁶ on average). The rocks show a LREE enrichment pattern and obviously weak to intermediate negative Eu anomalies. The trace element geochemistry is characterized evidently by negative anomaly of Ta, Nb, Ti, etc. and positive anomaly of Rb, Ba, Sr, etc. The granite emplaced by underplating of granitic magma, which formed through partial melting of sedimentary mainly of arenite, and is typical crust source petrogenesis. The Jiaoziding granite shows the characteristics of post-collisional granite, and is regarded as the post-orogenic granite. Thus the granite intrusions are interpreted as syn-collisional granites resulted from the crustal thickening caused by active continental margin subduction and arc-continent collision orogeny during the Neoproterozoic in the northwest margin of Yangtze Block. The granitic intrusion formed in a transi-

收稿日期: 2009-04-02; 修回日期: 2009-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40572121, 40234041); 西北大学大陆动力学国家重点实验室科学技术部专项经费资助项目

作者简介: 裴先治(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事构造地质学、区域地质学和岩石地球化学研究。E-mail: peixzh@263.net

tional environment from syn-collision (compressional environment) to post-collision (extensional environment), and is the product of the initial break-up of Rodinia supercontinent.

Key words: peraluminous granites; geochemistry; zircon SHRIMP U-Pb age; Neoproterozoic; northwest margin of Yangtze Block; Rodinia supercontinent

摘要:对扬子地块西北缘后龙门山地区轿子顶穹窿构造核部的花岗岩类进行了锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究,以便对其形成时代和岩石成因进行约束。研究表明,轿子顶花岗岩体中变形花岗岩和块状花岗岩中锆石均发育岩浆韵律环带结构,具有较高的 Th/U 比值(0.52~1.23, 0.32~1.16),为岩浆成因锆石。对变形花岗岩和块状花岗岩中岩浆锆石的 SHRIMP U-Pb 定年结果分别为(793±11) Ma 和(792±11) Ma,表明它们的形成时代完全一致,均为新元古代晚期南华纪早期。轿子顶花岗岩体的 SiO₂ (72.01%~77.65%) 和 Al₂O₃ (12.12%~14.18%) 含量均很高, A/CNK 在 0.95~1.13 (平均为 1.04), 为硅和铝过饱和类型,属典型的过铝质花岗岩,具有 S 型花岗岩特征;稀土元素总量(∑REE)为(75.81~79.97)×10⁻⁶ (平均为 77.89×10⁻⁶), 稀土元素配分曲线呈右倾型,具有弱—中等的负 Eu 异常;高场强元素(Ta、Nb、Ti 等)具有明显的负异常,大离子亲石元素(Rb、Ba、Sr 等)具有明显的正异常。岩体是以杂砂岩成分为主的沉积岩部分熔融形成的花岗质岩浆上升侵位过程中形成的,是一种典型的壳源成因类型。轿子顶岩体具有后碰撞岩浆活动的特征,是新元古代扬子地块西北缘活动大陆边缘俯冲以及弧陆碰撞造山作用导致的地壳增厚下地壳部分熔融的产物,形成于同碰撞(挤压环境)向碰撞后(伸展环境)转化阶段,即后造山期,是 Rodinia 超大陆初始裂解阶段产物。

关键词: 过铝质花岗岩;地球化学;锆石 SHRIMP U-Pb 年龄;新元古代;扬子地块西北缘;Rodina 超大陆

中图分类号: P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2009)03-0231-19

0 引言

扬子地块周缘地区新元古代构造-岩浆活动非常强烈,形成大量以中酸性火成岩为主的侵入岩浆岩群。这些构造-岩浆岩体的形成时代主要集中在 830~740 Ma,主要侵位于中新元古界扬子型变质基底岩系中,并多被南华系或震旦系不整合覆盖。由于其形成构造环境对研究扬子地块大地构造格局和形成演化以及 Rodinia 超大陆的恢复重建具有重要意义而受到广泛关注^[1-54]。深入了解这些新元古代岩浆岩的成因和形成的构造环境对研究扬子地块大地构造格局和形成演化及其在 Rodinia 超大陆的聚合-裂解演化中的作用具有重要的科学意义^[11]。

目前学术界对这些岩浆岩的成因和形成的构造背景存在 3 种截然不同的认识^[11,52-53]:(1)地幔柱成因,认为华南新元古代早期(≥880 Ma)岩浆岩形成于与 Rodinia 超大陆聚合有关的四堡期造山运动,而新元古代中期(850~740 Ma)的岩浆岩为板内非造山成因,其中 830~795 Ma 和 780~750 Ma 两个主要时期的岩浆活动很可能与导致 Rodinia 超大陆裂解的地幔柱-超级地幔柱活动有关^[1-11,26-29],进而提出超级地幔柱的两阶段模式,两次地幔柱活动导

致华南大规模的地壳抬升、大陆裂谷和广泛的双峰式岩浆作用,并最终导致 Rodinia 超大陆的裂解。(2)岛弧模式:认为华南新元古代岩浆活动(特别是 ≥800 Ma),是与洋壳俯冲消减于扬子地块之下的俯冲造山运动有关的大陆边缘岩浆岛弧,并认为新元古代时期,扬子地块是一个被洋壳包围起来的孤立陆块^[18-25],扬子地块周缘的俯冲造山运动可能持续到 820 Ma 或更晚,一些研究人员还认为华南很可能位于 Rodinia 超大陆的边缘或根本不属于 Rodinia 超大陆的一部分^[18-25,30-33,52]。(3)板块-裂谷模式:介于上述两种观点之间,认为扬子地块周缘新元古代岩浆活动是早期弧-陆碰撞、晚期伸展垮塌和大陆裂谷再造产物^[34-38],认为扬子和华夏地块的造山运动持续到约 820 Ma,大规模的 820~830 Ma 花岗岩形成于造山带垮塌阶段,而随后的岩浆活动形成于岩石圈伸展-裂谷阶段。

以上 3 种对扬子地块周缘新元古代构造属性不同的学术观点的争议主要是由于对岩浆岩构造成因解释的不同造成的。本文对扬子地块西北缘后龙门山构造带轿子顶穹窿构造核部出露的新元古代花岗岩类进行了锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学分析,并探讨其岩石成因和物质来源,为扬子地块西北缘新元古代的构造背景提供新的约束。

1 区域地质背景和岩体地质概况

1.1 区域地质背景

龙门山构造带位于扬子地块西北缘,处于上扬子地块—碧口地块—松潘—东西秦岭交界区域。北以 NEE 向青川断裂为界与碧口地块相邻,东南以 NEE 向安县断裂为界,中部的北川断裂将龙门山分为南北两部分,以北为后龙门山带,以南为前龙门山带。扬子地块西北缘后龙门山构造带的平武—青川地区出露有轿子顶穹隆构造(图 1),是龙门山造山带印支期发生大规模陆内俯冲以及逆冲推覆构造等造山作用之后燕山期区域伸展作用的产物。轿子顶穹隆构造平面形态呈 SWW-NEE 方向延伸的短轴状穹隆构造,与区域构造线平行一致,长度约 22 km,宽约 11 km。轿子顶穹隆构造主要由新元古代基底岩系和南华系—志留系沉积盖层组成。

基底岩系中花岗岩属侵入于轿子顶穹隆核部新元古代通木梁群并被周围上南华统一震旦系地层不整合覆盖的新元古代花岗岩类。最大的核部主岩体呈块状构造,无定向组构发育,而边部为变形花岗岩,发育定向组构甚至糜棱岩化。穹隆构造核部由新元古界通木梁群组成,主要为一套变质的基性—中基性—中酸性火山熔岩及其火山碎屑岩系,变质程度达绿片岩相,主要岩石类型包括绿帘绿泥钠长片岩、绿泥绢云钠长石英片岩、绢云钠长石英片岩夹石英片岩等,透入性片理非常发育,原始层理(S_0)已完全被置换。岩石组合和岩石地球化学特征显示总体为一套岛弧型火山岩系。通木梁群中变质中酸性火山岩中的岩浆成因锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄值介于(829±6)~(1 000±7) Ma,表明其主体形成于新元古代早期的 1 000~800 Ma。

上南华统碓窝梁组围绕轿子顶基底岩系呈环状展布,主要由薄层状变质石英细砂岩、绢云母石英千枚岩、绢云母千枚岩组成,偶夹含砾砂岩,与由新元古代早期通木梁群和新元古代花岗岩类组成的基底岩系之间以基底韧性拆离滑脱带相分隔,原可能为不整合接触关系,已被强烈构造改造。下震旦统胡家寨组主要为绢云母石英千枚岩、绢云母千枚岩夹薄层细砂岩等。上震旦统元吉组主要由白云岩、硅质白云岩、白云质灰岩夹硅质岩、钙质绢云母千枚岩及薄层结晶灰岩组成。寒武系邱家河组主要为一套黑色碳硅质板岩为主夹碳质板岩以及磷块岩和锰矿

层。上震旦统元吉组白云岩和下寒武统邱家河组黑色碳硅质板岩是区域内明显的标志层。下寒武统油房组主要由一套变质细砂岩、粉砂质板岩夹绢云母石英千枚岩组成。上述地层之间为整合接触关系。志留系茂县群主要岩性为绢云母千枚岩、含铁白云石变斑晶绢云石英千枚岩夹少量条带状变质粉砂岩、变质石英细砂岩条带,偶夹透镜状灰岩,代表了早古生代晚期陆内裂陷海盆沉积。

1.2 岩体地质和岩石学特征

轿子顶花岗岩侵入于轿子顶穹隆核部新元古代通木梁群浅变质火山岩系中,并被周围上南华统一震旦系地层不整合覆盖(图 1)。花岗岩体边界向四周倾斜,周围上南华统一震旦系以及志留系茂县群浅变质地层中的面理均向四周倾斜,与岩体边界产状基本一致。由于燕山期的伸展构造变形,基底岩系以及花岗岩体与周围不同时代地层之间多呈滑脱断层接触关系,原来的不整合界面均被构造改造。花岗岩体出露面积约 47.5 km²,主要由黑云母花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩、二长花岗岩、钾长花岗岩等为主组成。

黑云母花岗闪长岩分布较少,呈灰色,中细粒花岗结构,块状构造。矿物粒径 2~5 mm,主要由中长石(35%~40%)、微斜长石(15%~20%)、石英(20%~25%)及黑云母、角闪石等组成。中长石呈半自形板状,具钠长石聚片双晶,An=30~33,局部被微斜条纹长石、微斜长石和石英等交代。微斜长石和微斜条纹长石呈他形粒状,前者具格子双晶,后者具条纹结构。石英呈他形粒状。黑云母已蚀变为绿泥石、绿帘石集合体。角闪石呈长柱状。副矿物有锆石、磷灰石、榍石、电气石、磁铁矿等。

黑云母二长花岗岩为花岗岩体主体岩石类型,分布面积约 23 km²。岩石呈浅灰色—灰色,中细粒花岗结构,块状构造,粒径 0.5~5 mm。主要矿物成分有:更长石(30%~50%)、微斜长石(20%~40%)、石英(25%~30%)、黑云母(5%~10%)等,副矿物有锆石、磷灰石、榍石、钛磁铁矿、金红石等。更长石呈半自形板状,粒径 0.5~4.5 mm,具钠长石聚片双晶或卡钠双晶,An=10~15,边缘被绢云母、石英、钠长石交代;微斜长石呈他形粒状,粒径 0.8~4.5 mm,具条纹结构,常见简单双晶和格子双晶;石英呈他形粒状,粒径 2~3.5 mm,晶内常含锆石包体;黑云母呈条形及不规则片状,粒径为 0.5~2.5 mm,具多色性(淡黄—黄褐色);石榴石(0%~

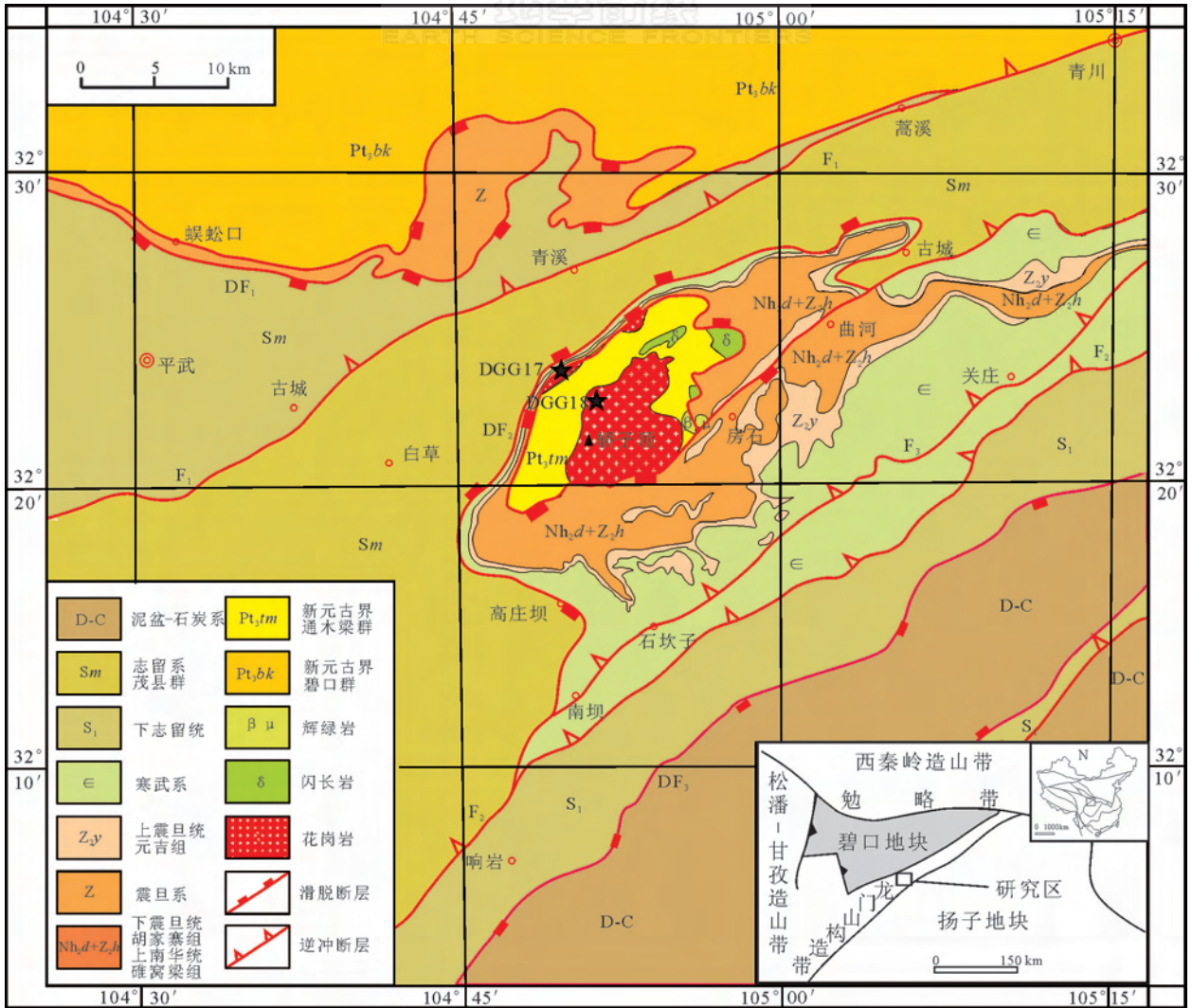


图1 扬子地块西北缘后龙门山轿子顶地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map showing Jiaoziding Area of back-Longmenshan in the northwestern margin of Yangtze Block
F₁—青川断裂; F₂—北川断裂; F₃—关庄断裂; DF₁—碧口地块南缘滑脱断层; DF₂—轿子顶滑脱断层; DF₃—仰天窝滑脱断层。★—同位素年龄采样点

2%)呈六边形粒状, 粒径 0.5~1.5 mm, 已退变为石英、长石、钛磁铁矿、榍石等集合体。岩石中常含有基性、中酸性火山岩捕虏体, 大致在岩体边缘出现, 分布不均, 局部成群出现, 大多呈不规则团块状及棱角状, 大小不一, 数厘米或 20~30 cm 不等。本文中锆石年龄样品 DSG18 即为块状中粒黑云母二长花岗岩。

二长花岗岩出露面积约 7.5 km², 岩石呈浅灰色, 中粒花岗结构, 块状构造, 局部边缘地带发育似斑状结构, 块状构造。主要矿物成分有: 更长石 (25%~40%), 半自形板状, 具钠长石聚片双晶、卡钠双晶, An=25~30; 钾长石 (25%~40%) 以交代正条纹长石为主, 微斜条纹长石次之, 钾长石呈不规则布丁状、树枝状嵌于钠长石晶体中; 石英 (25%~

30%), 它形粒状, 粒经常大于长石, 边缘似港湾状与钾长石接触, 含长石及云母包体; 白云母 (0%~5%) 呈条状、短柱状或它形粒状, 含榍石和钛铁矿包体。分布于轿子顶基底岩系边缘的花岗岩已经发生变形, 发育片麻状构造或甚至糜棱岩化, 本文中锆石年龄样品 DSG17 即为片麻状二长花岗岩。

钾长花岗岩分布较少, 与二长花岗岩呈渐变过渡关系。岩石呈灰白色—浅灰色, 中细粒—中粗粒花岗结构, 块状构造。主要矿物成分有: 钾长石 (35%~60%) 以微斜条纹长石为主, 微斜长石次之, 粒径 2~14 mm, 多为 3~8 mm, 呈他形粒状, 微斜长石具格子双晶, 微斜条纹长石具条纹结构, 主晶为微斜长石, 客晶为富钠斜长石, 具交代成因特征。更长石 (10%~30%), 粒径偏小且不均匀, 一般在 1~

3 mm,半自形长板状为主,见聚片双晶, $An=12\sim 15$,绢云母化强烈。石英(25%~30%),呈他形粒状,粒径4~6 mm居多,分布不均。副矿物有:锆石、磁铁矿、磷灰石、钛铁矿、榍石、石榴石、金红石、电气石等。

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 年龄分析方法

为了获取花岗岩体的形成时代,采用 SHRIMP 法对花岗岩中的岩浆锆石进行 U-Pb 同位素年龄测试。两个样品采自青川县青溪镇南大水沟轿子顶穹隆北侧变形花岗岩(靠近滑脱构造界面)(样品 DSG17)和轿子顶穹隆核部花岗岩(主岩体)(样品 DSG18),岩性分别为变形二长花岗岩和块状黑云母花岗岩闪长岩,采样点 GPS 坐标分别为: $N32^{\circ}23'56.9''$, $E104^{\circ}49'57.3''$ 和 $N32^{\circ}23'29.2''$, $E104^{\circ}50'26.8''$ 。

样品采用常规方法进行粉碎至80~100目,并用浮选和电磁选方法进行分选,再在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒。将锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,对其表面进行抛光至锆石露出。锆石的反射光和透射光显微照相以及阴极发光(CL)显微照相在北京离子探针中心扫描电镜实验室完成。阴极发光(CL)显微照相采用日立 HITACHI S300-N 型扫描电子显微镜和 GATAN 公司 Chroma 阴极发光探头进行。测试点的选取首先根据锆石反射光和透射光显微照片进行初选,再与 CL 图像反复对比,力求避开内部裂隙和包裹体以及不同成因的区域,以期获得较准确的年龄信息。

锆石 U-Pb 同位素分析在北京离子探针中心的 SHRIMP-II 上采用标准测定程序进行,分析仪器采用三阶四极杆离子透镜,保证有最大的离子传输系数。静电分析器半径 1 272 mm,磁铁半径为 1 000 mm,能够获得高质量色散。可调、旋转式入口狭缝,宽度 5~150 μm 。高稳定、低磁滞效应的电磁场,使得不同质量数之间的转换快速。分辨本领可以达到 5 000(1%峰高),灵敏度对 ^{206}Pb 为 18 CPS/ 10^{-6} ,精度标准锆石(SL13)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄误差小于 1%^[55]。应用澳大利亚国家地质调查局标准锆石 TEM 进行元素间的分馏校正,用澳大利亚国立大学地学院标准锆石 SL13(572 Ma, $w(\text{U})=238\times$

10^{-6})标定样品的 U, Th 及 Pb 含量;数据处理采用 Isoplot 软件^[56],普通 Pb 由实测 ^{204}Pb 校正;所有测点的误差均为 1σ ,所采用的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄具 95%的置信度。样品 DSG17 和样品 DSG18 的锆石 SHRIMP U-Pb 测年结果见表 1。

2.2 地球化学分析方法

选择 7 件岩石样品分别进行主量元素和微量元素分析(表 2)。样品磨碎至 200 目后,在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室进行主量和微量元素分析测试。主量元素使用 X-射线荧光光谱仪(XRF-1500)法测试。用 0.6 g 样品和 6 g 四硼酸锂制成的玻璃片在 Shimadzu XRF-1500 上测定氧化物的质量分数值,精度优于 2%~3%。微量元素及稀土元素利用酸溶法制备样品,使用 ICP-MS(Element II)测试,分析精度(按照 GSR-1 和 GSR-2 国家标准):当元素质量分数值大于 10×10^{-6} 时,精度优于 5%,当质量分数值小于 10×10^{-6} 时,精度优于 10%。

3 花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学

3.1 锆石特征

对轿子顶穹隆核部花岗岩(主岩体)和北侧变形花岗岩(靠近伸展滑脱界面)进行的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究表明,两类花岗岩的形成时代完全一致,边部变形花岗岩的韧性变形甚至糜棱岩化及其内部变形几何学和运动学特征显示是后期沿基底与盖层之间发生伸展滑脱剪切变形形成的。从样品(DSG17, DSG18)中选取的测年锆石的 CL 图像显示,锆石多为浅黄色—无色透明,总体为自形、半自形柱状,以中柱状为主,长宽比多为 2:1~3:1,粒度多为 80~180 μm ,表现出典型的岩浆韵律环带结构,属于岩浆结晶产物。样品 DSG17 的锆石 Th/U 比值较高,介于 0.52~1.23;样品 DSG18 的锆石 Th/U 比值较高,介于 0.32~1.16,表明岩浆成因(一般>0.4)的锆石特征(图 2)。

3.2 测试结果

锆石 U-Pb 分析结果(表 1)表明,校正后的锆石有效数据各为 15 个点,这些测点基本都位于明显的岩浆环带上。边缘地带的变形二长花岗岩样品(DSG17)锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(759 \pm 19)~(829 \pm 27) Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和性较好(图 3),

表1 轿子顶花岗岩样品(DSG17, DSG18)锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析结果

Table 1 Results of SHRIMP U-Pb dating on zircon from Jiaoziding granite(DSG17, DSG18)

测点	$w(^{206}\text{Pb}_c)$	$w_B/10^{-6}$		Th/U	$w(^{206}\text{Pb}^*)$	$^{207}\text{Pb}^*/$	误差/%	$^{207}\text{Pb}^*/$	误差/%	$^{206}\text{Pb}^*/$	误差/%	年龄/Ma
	/%	U	Th		$/10^{-6}$	$^{206}\text{Pb}^*$		^{235}U		^{238}U		
样品 DSG17 变形二长花岗岩												
DSG17-1.1	0.00	189	150	0.82	21.6	0.066 4	2.5	1.220	3.7	0.133 2	2.7	806 ±20
DSG17-2.1	0.29	230	216	0.97	25.0	0.065 3	3.0	1.138	4.9	0.126 4	3.9	767 ±28
DSG17-3.1	0.18	184	93	0.52	20.6	0.071 6	3.6	1.285	4.5	0.130 2	2.7	789 ±20
DSG17-4.1	0.00	149	110	0.76	17.0	0.068 1	2.8	1.251	4.0	0.133 2	2.7	806 ±21
DSG17-5.1	0.16	381	253	0.67	41.0	0.067 9	2.1	1.171	3.4	0.125 0	2.6	759 ±19
DSG17-6.1	0.00	190	164	0.89	21.1	0.073 2	3.2	1.302	4.3	0.129 0	2.9	782 ±21
DSG17-7.1	0.00	209	197	0.97	22.6	0.070 7	2.5	1.229	4.8	0.126 0	4.1	765 ±29
DSG17-8.1	0.00	199	198	1.03	21.9	0.067 4	3.3	1.190	4.3	0.128 1	2.7	777 ±20
DSG17-9.1	0.00	241	148	0.64	28.4	0.112 1	1.7	2.120	3.9	0.137 2	3.5	829 ±27
DSG17-10.1	0.00	112	67	0.62	12.5	0.074 3	3.2	1.331	4.3	0.129 9	2.8	787 ±21
DSG17-11.1	0.28	91	53	0.60	10.6	0.072 7	4.1	1.348	5.0	0.134 5	2.9	814 ±22
DSG17-12.1	0.00	350	416	1.23	41.3	0.068 6	1.8	1.298	3.2	0.137 3	2.6	829 ±20
DSG17-13.1	0.20	155	96	0.64	17.3	0.065 9	3.5	1.180	4.5	0.129 9	2.8	787 ±21
DSG17-14.1	0.08	283	328	1.20	32.6	0.066 1	2.1	1.221	3.4	0.133 9	2.7	810 ±20
DSG17-15.1	0.00	199	223	1.16	22.0	0.066 1	2.4	1.179	3.6	0.129 2	2.7	783 ±20
样品 DSG18 块状黑云母二长花岗岩												
DSG18-1.1	0.31	513	246	0.49	57.0	0.064 1	1.8	1.137	3.6	0.128 7	3.1	781 ±23
DSG18-2.1	0.00	308	122	0.41	36.1	0.066 1	2.0	1.242	3.5	0.136 4	2.8	824 ±22
DSG18-3.1	0.07	838	416	0.51	92.0	0.065 05	1.3	1.145	2.8	0.127 7	2.5	775 ±19
DSG18-4.1	0.15	155	90	0.60	16.3	0.068 0	3.4	1.145	4.8	0.122 1	3.5	742 ±24
DSG18-5.1	0.13	418	203	0.50	47.2	0.065 8	1.8	1.191	3.1	0.131 3	2.6	795 ±19
DSG18-6.1	0.17	421	121	0.30	48.3	0.062 5	3.9	1.149	4.6	0.133 3	2.6	807 ±20
DSG18-7.1	0.13	278	161	0.60	30.9	0.066 3	2.4	1.181	3.5	0.129 2	2.6	783 ±19
DSG18-8.1	0.21	229	257	1.16	26.8	0.063 4	4.9	1.190	5.6	0.136 2	2.7	823 ±21
DSG18-9.1	0.04	616	175	0.29	71.1	0.065 30	1.4	1.208	2.9	0.134 2	2.6	812 ±19
DSG18-10.1	0.10	382	151	0.41	42.5	0.066 4	2.3	1.184	3.5	0.129 3	2.6	784 ±19
DSG18-11.1	0.13	410	240	0.61	46.2	0.064 0	1.8	1.158	3.1	0.131 2	2.6	795 ±19
DSG18-12.1	0.11	463	215	0.48	52.3	0.064 2	1.9	1.165	3.2	0.131 5	2.6	796 ±19
DSG18-13.1	0.00	885	437	0.51	92.3	0.068 9	2.1	1.154	4.6	0.121 5	4.1	739 ±29
DSG18-14.1	0.07	554	174	0.32	64.3	0.066 1	3.1	1.230	4.0	0.135 0	2.6	816 ±20
DSG18-15.1	0.16	435	214	0.51	47.8	0.068 1	2.0	1.199	3.3	0.127 7	2.6	775 ±19

注:误差为1 σ ;Pb_c和Pb*分别代表普通铅和放射成因铅,普通铅用测定的²⁰⁴Pb校正。

15个分析点均位于U-Pb谐和线上,其²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为(793±11)Ma(MSWD=0.98)。而轿子顶穹隆核部的块状黑云母二长花岗岩(主岩体)样品(DGS18)的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为(739±29)~(824±22)Ma,²⁰⁶Pb/²³⁸U和²⁰⁷Pb/²³⁵U谐和性较好(图3),15个分析点均位于U-Pb谐和线上,其²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为(792±11)Ma(MSWD=1.2),二者年龄在误差范围内基本一致(图3),代表了岩浆锆石结晶的年龄,表明新元古代花岗岩类侵位活动时期在800Ma左右。

同位素年代学测试结果也表明在轿子顶穹隆核部的未变形块状花岗岩体(主岩体)和边部变形花岗岩体具有相同的形成时代,变形是后期构造作用的结果,其上均为上南华统一震旦系地层不整合覆盖。

边部变形花岗岩的韧性变形甚至糜棱岩化及其内部变形几何学和运动学特征显示是后期沿基底与盖层之间发生伸展滑脱剪切变形形成的。

4 轿子顶花岗岩地球化学特征

4.1 主量元素地球化学

轿子顶花岗岩体的主量元素具有如下特征:岩石的 $w(\text{SiO}_2)$ (质量分数)值较高,且变化范围较窄(72.01%~77.65%),显示硅过饱和的特征。在Q-A-P岩石分类图解^[57](图4)上,轿子顶花岗岩体多数落入花岗闪长岩区域内,有3个点落入二长花岗岩区域内。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值较高(12.12%~14.18%),

表 2 轿子顶花岗岩体主量元素和微量元素组成

Table 2 Major element and trace element compositions of Jiaoziding granite

样品	岩性	$w_B/\%$													A/CNK
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	TOTAL	
GQS02	变形花岗岩	73.19	0.27	14.14	0.93	0.97	0.05	0.47	0.87	4.29	3.57	0.07	1.16	100.00	1.13
GQS03		72.05	0.28	13.56	0.97	0.97	0.12	0.43	1.96	4.57	2.97	0.07	2.10	100.05	0.95
GQS04		74.82	0.24	13.20	0.80	0.70	0.05	0.36	0.81	3.40	4.41	0.06	1.22	100.07	1.11
DSG17		72.01	0.27	13.78	0.64	1.18	0.09	0.45	1.40	4.55	3.38	0.07	1.83	99.65	1.01
GQS05	块状花岗岩	77.65	0.16	12.12	0.51	0.65	0.06	0.22	0.87	3.45	4.06	0.03	0.32	100.11	1.04
GQS06		75.98	0.17	12.55	0.62	0.56	0.06	0.22	0.94	3.80	4.06	0.04	0.44	99.43	1.02
DSG18		72.89	0.23	14.18	0.80	1.10	0.06	0.45	1.70	4.13	3.37	0.07	0.67	99.65	1.05

样号	岩性	$w_B/10^{-6}$																
		Sc	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Sn	Cs	Ba	Hf
GQS02	变形花岗岩	6.00	7.65	1.31	11.73	3.46	38.37	15.89	77.24	89.49	17.00	106.03	5.23	0.29	1.42	1.85	670.91	3.77
GQS03		8.03	7.46	1.94	10.77	4.24	38.98	14.52	79.76	118.45	16.31	129.11	5.03	0.45	1.58	3.49	598.89	4.07
GQS04		7.37	6.07	1.89	8.49	3.60	31.73	14.75	127.56	88.95	15.53	117.02	6.19	0.67	1.18	2.54	1235.90	3.85
DSG17		4.19	1.14	1.13	0.98	1.78	56.97	13.71	96.63	135.55	31.65	155.82	7.81	0.11	1.28	2.18	761.03	5.07
GQS05	块状花岗岩	5.91	4.17	1.59	7.67	3.26	19.93	11.43	136.60	84.27	14.26	83.54	6.16	0.25	1.12	1.93	837.22	2.78
GQS06		6.89	7.25	1.69	7.46	2.61	20.53	13.33	143.12	92.00	20.44	99.92	9.01	0.46	1.36	2.43	775.12	3.41
DSG18		3.54	1.84	2.69	1.10	1.63	50.42	13.14	96.81	209.45	16.97	132.08	6.59	0.02	0.96	2.19	961.61	3.64

样号	岩性	$w_B/10^{-6}$																	δEu		
		Ta	Pb	Bi	Th	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm		Yb	Lu
GQS02	变形花岗岩	0.68	8.35	0.12	6.65	0.92	19.08	37.51	4.35	17.36	3.62	0.88	3.87	0.56	3.97	0.77	2.29	0.38	2.29	0.39	0.97
GQS03		0.48	8.16	0.10	6.75	0.86	17.76	34.92	4.20	17.46	3.59	0.94	4.00	0.54	3.66	0.74	2.23	0.36	2.45	0.43	0.85
GQS04		0.53	11.50	0.10	9.83	1.22	20.68	37.87	3.91	14.66	2.71	0.55	2.86	0.44	2.95	0.60	1.90	0.32	2.01	0.33	0.96
DSG17		0.74	8.48	0.15	9.51	2.01	24.40	45.23	5.69	21.60	4.41	0.97	5.17	0.98	5.68	1.29	3.86	0.68	4.61	0.76	0.90
GQS05	块状花岗岩	0.59	9.39	0.06	14.50	2.62	23.22	41.39	4.05	14.27	2.57	0.39	2.57	0.39	2.37	0.48	1.59	0.27	1.80	0.34	0.80
GQS06		0.91	9.45	0.07	18.15	2.95	24.38	44.43	4.48	15.80	3.07	0.54	3.12	0.52	3.22	0.66	2.24	0.36	2.52	0.40	0.90
DSG18		0.64	9.29	0.04	11.23	1.96	29.33	50.93	5.70	21.09	3.76	0.83	3.81	0.61	3.03	0.65	1.95	0.32	2.29	0.41	0.79

A/CNK 在 0.95 ~ 1.13, 平均为 1.04; $w(FeO)/w(FeO+MgO)$ 值较低 (0.59 ~ 0.74), 显示强过铝质特征, 在 A/NK-A/CNK 图解上^[58] (图 5) 数据点大多数落入过铝质区域内, 只有一个点 (GQS03) 落入偏铝质区域内。全碱 (Alk) 质量分数值较高 (6.55% ~ 7.93%), $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 值在 0.64 ~ 1.29, 平均为 0.94, 里特曼指数 σ 在 1.63 ~ 2.17, 在 $w(SiO_2)-w(K_2O)$ 图解中^[59] (图 6) 轿子顶花岗岩体大多落入高钾钙碱性系列范围, 仅有一个数据点落入钙碱性系列范围。分异指数 (DI) 为 87.18 ~ 93.08, 平均为 90.24, 分异指数具有较高的值, 表明原始岩浆的结晶分异强烈。在主量元素与 $w(SiO_2)$ 值的 Harker 图解 (图 7) 中, $w(Al_2O_3)$ 、 $w(Fe_2O_3^f)$ 、 $w(MnO)$ 、 $w(MgO)$ 、 $w(CaO)$ 、 $w(Na_2O)$ 、 $w(P_2O_5)$ 值与 $w(SiO_2)$ 值呈明显的负相关关系; $w(K_2O)$ 值与 $w(SiO_2)$ 值呈明显的正相关关系。这些线性关系反映轿子顶岩体的原始岩浆可能为同源岩浆。轿子顶岩体周围无中性和基性侵入岩的参与, 亦无对应的同期火山岩产出。这说明在花岗岩形成过程中没有

地幔的卷入, 是陆壳岩石部分熔融的结果, 岩浆的温度常常不能达到使它喷出至地表的程度。结合其岩石学和地球化学特征, 推断该岩体具有 S 型花岗岩特征。

4.2 微量元素地球化学

轿子顶花岗岩体稀土元素特征表明, ΣREE 较低 ($(75.81 \sim 79.97) \times 10^{-6}$, 平均为 77.89×10^{-6}); 轻、重稀土元素之间分馏较明显 ($\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 为 9.38 ~ 9.95, 平均为 9.66)。LREE 相对富集, HREE 相对亏损, LREE 内部分异较为明显, $(La/Sm)_N$ 为 3.20 ~ 5.83, 平均为 4.44。重稀土明显亏损可能是残留体中高含量的极富重稀土的石榴子石和角闪石^[60] 造成的。 $w(La)/w(Yb)$ 为 5.30 ~ 12.92, 平均为 9.52; $(La/Yb)_N$ 为 3.80 ~ 9.27, 平均为 6.83, 表明是在陆壳底部大压力下源区岩石脱水熔融形成的。Eu 具有弱一中等的负异常, δEu 为 0.47 ~ 0.80, 平均为 0.62, 区别于幔源型花岗岩, Eu 的负异常可能是由斜长石、钾长石的分离引起的。

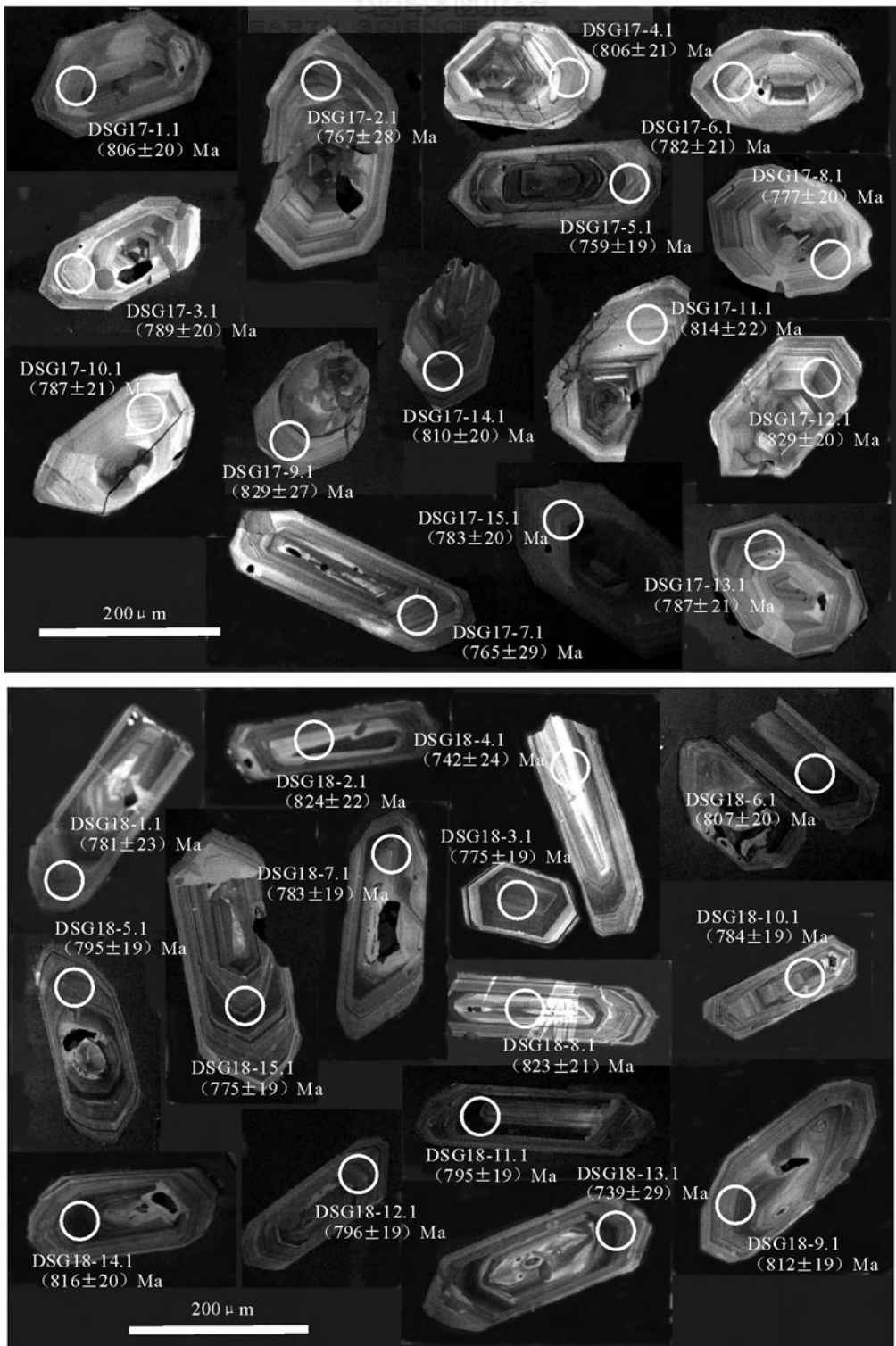


图2 轿子顶穹隆边部变形花岗岩(DSG17)和核部块状花岗岩(DSG18)的单颗粒锆石 CL 图像和年龄值

Fig. 2 CL images and ages of single zircon U-Pb of Jiaoziding granite

稀土元素配分曲线(图8)为略微平坦的“W”型,且其 $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值低于14.5%,具有弱—中等的Eu的负异常,区别于大陆成因的花岗岩,而与大洋或岛弧

花岗岩相似。各样品的微量元素蛛网图与稀土元素配分曲线形态几乎完全一致,表明其为同时代和同来源的产物。

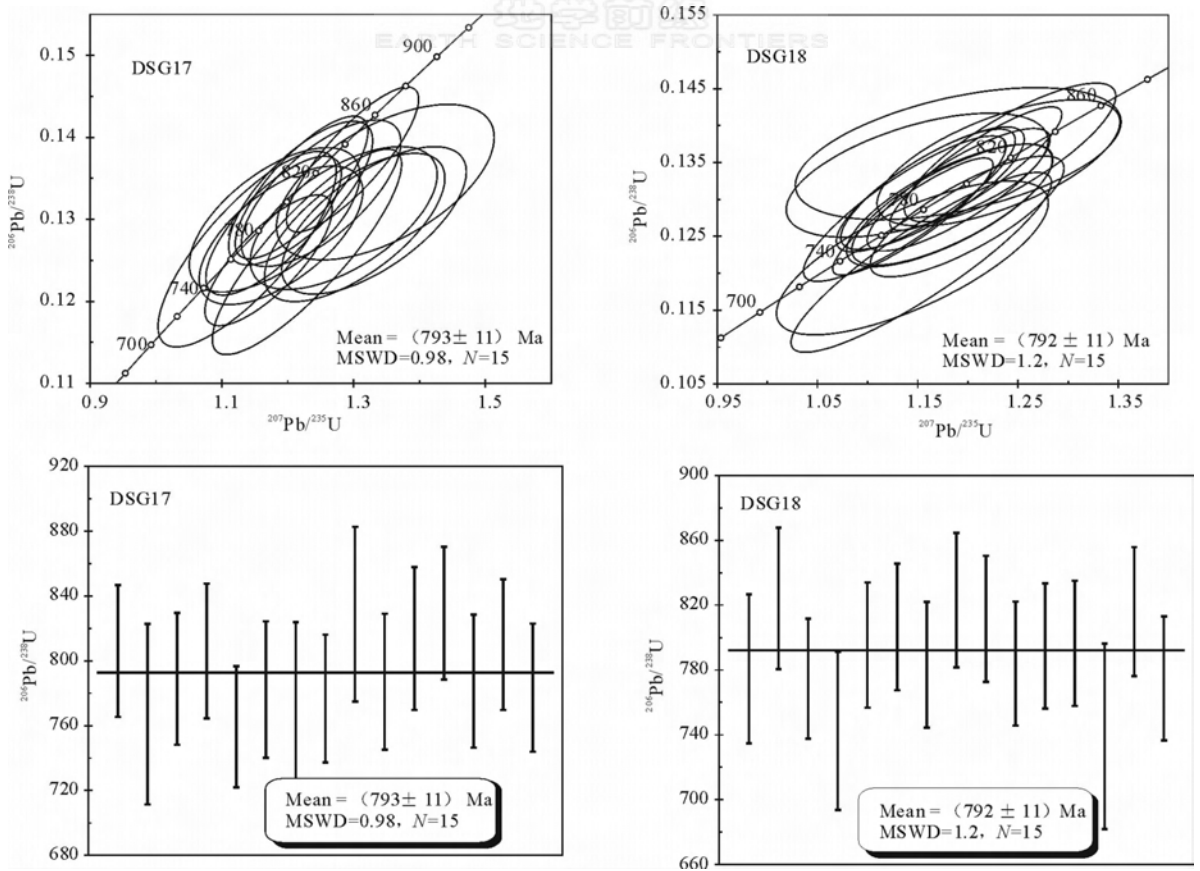


图3 轿子顶穹隆边部变形花岗岩(DSG17)和核部块状花岗岩(DSG18)的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄图

Fig. 3 SHRIMP zircon U-Pb concordia diagram of Jiaoziding granite

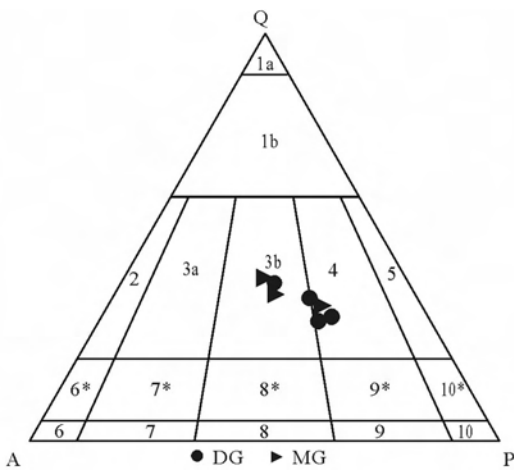


图4 轿子顶花岗岩 Q-A-P 图解

(据 Streckeisen, 1973^[57])

Fig. 4 Q-A-P diagrams for Jiaoziding granite

DG(dormative granodiorites)—变形花岗岩;MG(massive granodiorites)—块状花岗岩;1a—石英岩;1b—富石英花岗岩;2—碱长花岗岩;3a—正长花岗岩;3b—二长花岗岩;4—花岗闪长岩;5—石英闪长岩(斜长花岗岩,奥长花岗岩);6—碱长正长岩;6*—石英碱长正长岩;7*—石英正长岩;7—正长岩;8*—石英二长岩;8—二长岩;9—二长闪长岩/二长辉长岩;9*—石英二长岩/石英二长辉长岩;10—闪长岩/辉长岩/斜长岩;10*—石英闪长岩/石英辉长岩/石英斜长岩

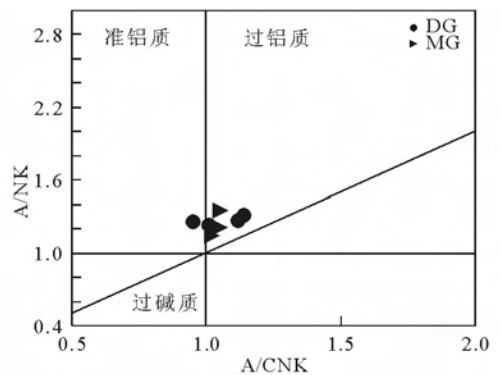


图5 轿子顶花岗岩 A/NK-A/CNK 图解

(据 Maniar 和 Piccoli, 1989^[58])

Fig. 5 A/NK-A/CNK diagrams for Jiaoziding granite

由表 2 和图 9 可知,轿子顶花岗岩体微量元素具有如下特征:低 Rb、高 Sr、高 Ba 和较低的 Rb/Sr (0.46~1.62)、Rb/Ba(0.10~0.18)、K/Rb(117.73~191.82)比值。较低的 K/Rb 值和高的分异指数(DI)反映了原始岩浆已经历充分的结晶分异作用。在原始地幔标准化蛛网图上,显示高场强元素 Nb、Ta、P、Sr、Ti 明显亏损,同时也表现出 Ba 的负异常,

而 Rb、U、La、Zr、Hf、Th 等大离子亲石元素具有明显的正异常, Sr 的负异常和 Th 的正异常显示与岛弧型花岗岩相似。Nb、P 的亏损说明斜长石作为熔融残留相或结晶分离相存在, 即在熔融过程中斜长石没有耗尽^[61-65]。Zr 的富集和 Nb、Ta、Ti 的亏损表明岩浆源区岩石中以陆壳组分为主^[66-68]。Ba 的亏损与结晶晚期碱性长石的分离关系密切。Ti 的亏损可能同钛铁矿的分离结晶作用有关。Nb 亏损同时还伴随着 $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ 比值下降, $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ 值较低(7.69~11.69, 平均为 10.16), 这表明 Nb/Ta 这一对互代元素已开始分馏, 是一种典型的壳源的成因类型, 反映岩浆作用过程中 Nb 和 Ta 曾发生较明显的分馏, Nb 趋向亏损而 Ta 相对富集。

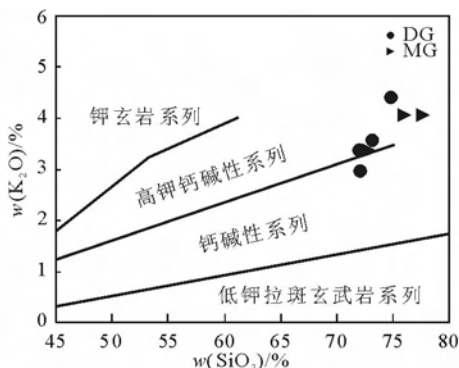


图6 轿子顶花岗岩 $w(\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$ 图解
(据 Rickwood, 1989^[59])

Fig. 6 $w(\text{K}_2\text{O})$ vs. $w(\text{SiO}_2)$ diagrams for Jiaoziding granite

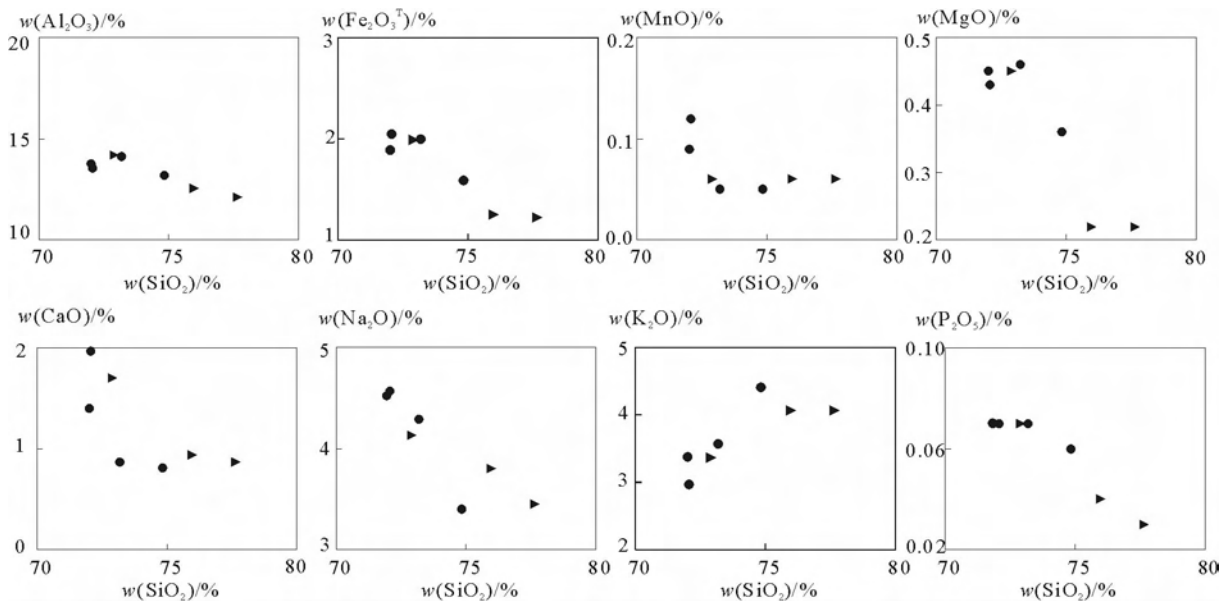


图7 轿子顶花岗岩 Harker 图解
Fig. 7 Harker diagrams of Jiaoziding granite

●—DG; ▶—MG

5 讨论

5.1 岩浆源区判断

轿子顶花岗岩体的 $w(\text{La})/w(\text{Nb})$ 值远远大于 1.0 (区别于地幔来源的岩浆^[69]), 表明该区的花岗岩类可能均来源于陆壳。在 $w(\text{Zn})-w(\text{SiO}_2)$ 图解中^[70-71] (图 10a), 所有数据点均落入 I、M 和 S 型长英质火成岩区内, 属于分异结晶花岗岩类, 随着 SiO_2 增加, Zn 减少, 与 I、M 和 S 型长英质火成岩的趋势一致^[63]。运用高场强元素 $w(\text{Th})/w(\text{Yb})-w(\text{Ta})/w(\text{Yb})$ 比值图解判断岩浆岩的成因^[72-73] 也是一种较为有效的方法, 在图解中这些数据点均落入平均俯冲带附近, 并且具有分离结晶的演化趋势^[66] (图 10b)。在另外的高场强元素 $w(\text{Rb})/w(\text{Y})-w(\text{Nb})/w(\text{Y})$ 比值图解上^[74], 所有数据点均落入总地壳和下地壳范围之内, 均显示出俯冲带富集或地壳混染的趋势 (图 10c)。在 $w(\text{Th})/w(\text{Y})-w(\text{Nb})/w(\text{Y})$ 图解中^[75] (图 10d), 所有数据点均落入大陆上地壳的上方区域内, 反映它们起源于上地壳。可以看出轿子顶花岗岩体的源岩均来自于陆壳物质。

5.2 源区岩石类型判断

实验岩石学研究也表明地壳中基性岩类(玄武质成分)的部分熔融形成化学成分偏基性的准铝质的花岗岩类^[77-80], 而地壳中碎屑沉积岩类部分熔融

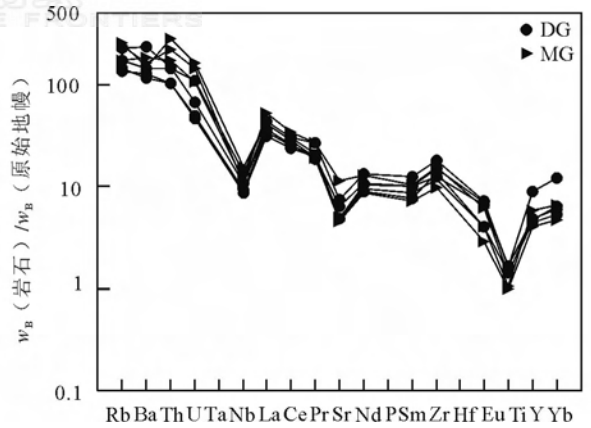
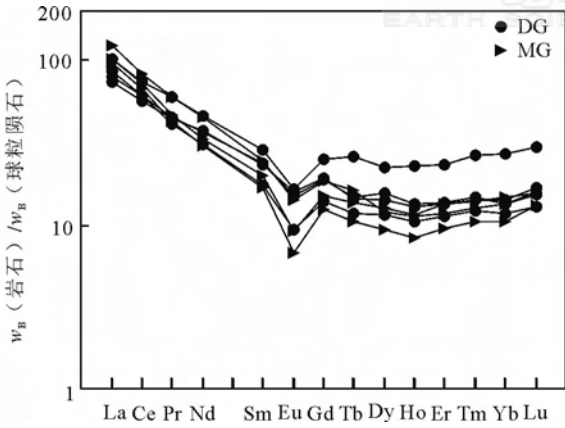


图8 轿子顶花岗岩稀土元素球粒陨石标准化曲线 (球粒陨石标准化数据据 Sun 和 McDonough, 1989^[60])

图9 轿子顶花岗岩微量元素蛛网图 (原始地幔标准化数据据 Sun 和 McDonough, 1989^[60])

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns for Jiaoziding granite

Fig. 9 Trace element spider diagram for Jiaoziding granite

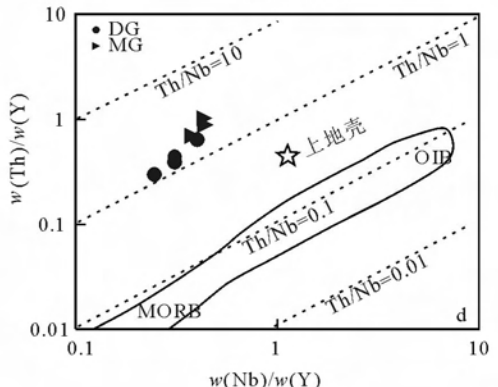
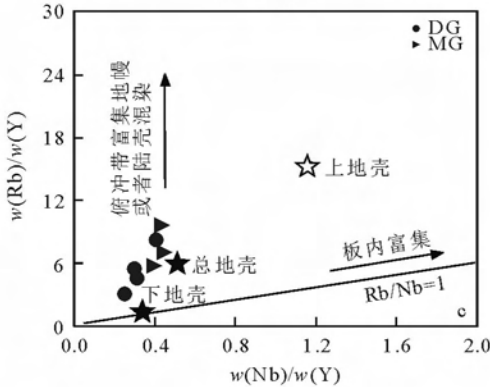
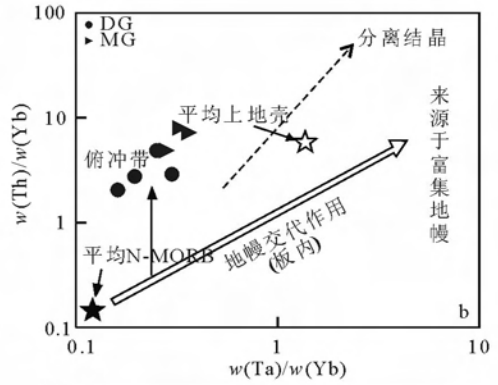
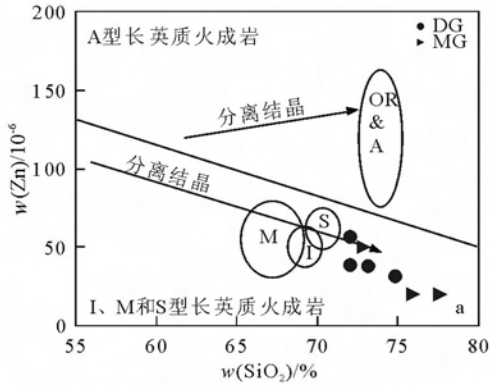


图10 轿子顶花岗岩的物质来源判别图

Fig. 10 Diagrams for discriminating provenances of Jiaoziding granite

a—据 Yang 等, 2008, 修改自 Lentz, 1998^[70-71]; b—据 Jahn 等, 1999^[74]; c—据 Pearce 等, 1990^[73]; d—据 Durmus 等, 2007^[75]; b, c, d, MORB, OIB, UCC (上地壳) 和总地壳组成数据来自 Taylor 和 McLennan, 1985^[76]

形成偏酸性的过铝质花岗岩类^[63-65, 78], 大量的过铝质花岗岩也不可能由基性源岩部分熔融产生^[81], 只有泥砂质沉积岩类部分熔融才可能形成强过铝质花岗岩^[64, 65, 82-84], 其岩浆演化过程中没有明显地幔的参与^[63, 83-86]。轿子顶花岗岩体的地球化学特征和岩

石学特征表明其属于强过铝质花岗岩, 主要应由以碎屑沉积岩为主的地壳部分熔融形成。

Sylvester(1998)^[87]认为 $w(\text{SiO}_2)$ 值在 67%~77% 的强过铝质花岗岩, 其 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值反映其源区成分特征。由砂岩(或正变质岩)部分熔融

形成的花岗质熔体的 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值高于由泥岩部分熔融形成的熔体。泥岩生成的过铝质花岗岩中的 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值一般小于 0.3, 而砂屑岩生成的过铝质花岗岩所含的 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值一般大于 0.3。强过铝质花岗岩的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{TiO}_2)$ 值反映岩浆形成温度, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{TiO}_2)$ 值大于 100 为低温 ($<875^\circ\text{C}$), $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{TiO}_2)$ 值小于 100 为高温 ($>875^\circ\text{C}$)^[87]。轿子顶花岗岩体的 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值 (0.20~0.43) 平均为 0.3, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{TiO}_2)$ 值在 48.96~74.18, 均小于 100, 反映其岩浆源区岩石成分可能为砂屑岩和泥岩, 其部分熔融温度为高温 (大于 875°C)。在 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})-w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{TiO}_2)$ 图解中^[87] (图 11a), 随着 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{TiO}_2)$ 值的减小, 熔融温度随之增加, 随着 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值的减少越靠近粘土岩派生, 所有数据点都在粘土岩派生岩浆为一端员与玄武岩浆为另一端员的混合曲线上, 以砂屑岩和泥岩派生的区域内, 岩浆温度在 900°C 和 10% 熔融附近。据此可判断这些岩体的源岩是从砂屑岩和泥岩派生的, 其形成温度大于 875°C 。过铝质花岗岩 Rb-Sr-Ba 的变化与它们源岩中起作用的泥质岩及砂屑岩的源区一致, 轿子顶花岗岩体具有低的 Rb/Sr 和 Rb/Ba 值, 显然与砂屑岩或杂砂岩或粘土岩派生的花岗岩相似, 而与火成变质岩派生的花岗岩有别^[87] (图 11b)。

综上所述, 轿子顶花岗岩体岩浆源区岩石成分可能为砂屑岩和泥岩成分为主的沉积岩, 其岩浆形成温度较高。源区岩石以砂屑岩和泥岩为主, 表明它是成熟度较低的陆壳部分熔融作用的结果^[87]。

5.3 构造环境

在 $\lg[w(\text{CaO})/(w(\text{K}_2\text{O})+w(\text{Na}_2\text{O}))]-w(\text{SiO}_2)$ 图解中^[88] (图 12), 轿子顶岩体数据点均落入挤压型与伸展型重叠区界线上, 暗示岩浆形成于挤压环境向伸展环境转变的后造山期, 在这一过程中主要处于降压和升温的构造环境, 降压和升温可能是岩石发生熔融的主要因素^[89], 轿子顶花岗岩体形成温度大于 875°C , 也表明其不可能处于升压降温的挤压环境。

在 $w(\text{Rb})-w(\text{Yb}+\text{Ta})$ 、 $w(\text{Ta})-w(\text{Yb})$ 图解^[90-91] (图 13a, b) 上, 数据点均落入火山弧花岗岩 (VAG) 区域内。在 $w(\text{Rb})-w(\text{Y}+\text{Nb})$ 图解^[91] (图 13c) 上, 数据点大多数落入火山弧花岗岩 (VAG) 和后碰撞花岗岩 (Post-COLG) 重叠区域内, 显示轿子

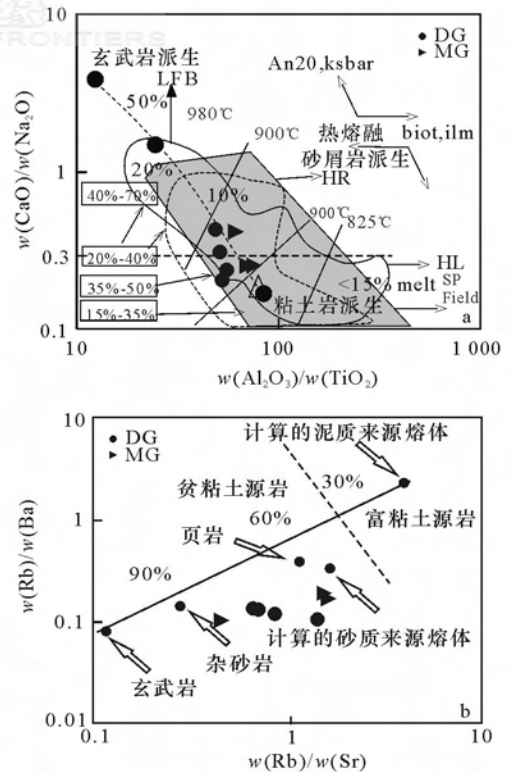


图 11 轿子顶花岗岩的源岩成分判别图

(据 Sylvester, 1998^[87])

Fig. 11 Diagram for discriminating composition of source rocks for Jiaoziding granite

HL—喜马拉雅强过铝质花岗岩; HR—海西强过铝质花岗岩; LFB—拉克兰河褶皱带强过铝质花岗岩; $A/MF = x(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$; $C/MF = x(\text{CaO})/x(\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$

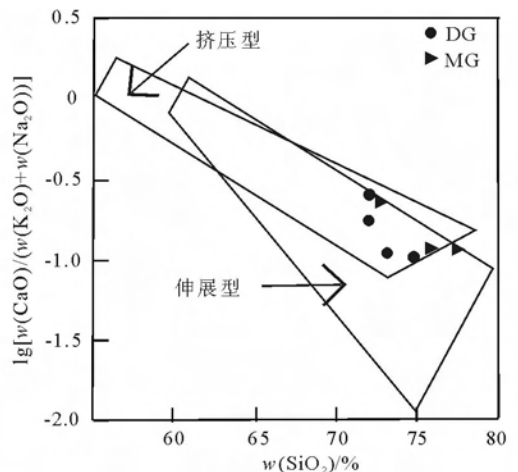


图 12 轿子顶花岗岩 $\lg[w(\text{CaO})/(w(\text{K}_2\text{O})+w(\text{Na}_2\text{O}))]-w(\text{SiO}_2)$ 图解

(据 Brown, 1982^[89])

Fig. 12 Diagrams of $\lg[w(\text{CaO})/(w(\text{K}_2\text{O})+w(\text{Na}_2\text{O}))]-w(\text{SiO}_2)$ for Jiaoziding granite

顶花岗岩体形成于后碰撞环境。在 Rb/30-Hf-3Ta 图解^[92] (图 13d) 数据点较集中地落入火山弧花岗

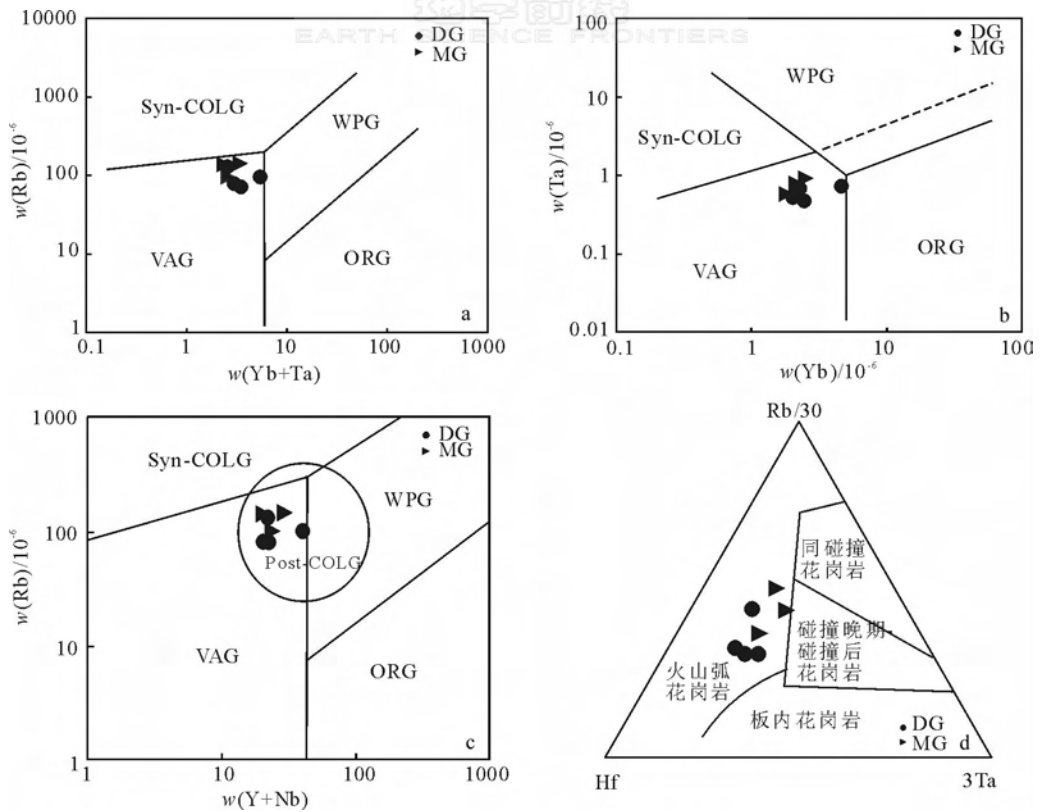


图 13 轿子顶花岗岩微量元素构造环境判别图解

(a, b—据 Pearce 等, 1984^[90]; c—据 Pearce, 1996^[91]; d—据 Harris 等, 1986^[92])

Fig. 13 Diagrams of tectonic settings of trace elements for Jiaoziding granite

VAG—火山弧花岗岩; Syn-COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; Post-COLG—后碰撞花岗岩

岩区域内。由于轿子顶花岗岩类富集大离子亲石元素 Ba、K 和 LILE, 而 Nd、Ta 亏损, 因此这些图解多显示为岛弧花岗岩。一般认为, 花岗岩的地球化学特征主要受到源区岩石成分和岩浆演化过程等因素的制约, 而构造环境的影响相对于源区组成而言要小得多。因此可以认为轿子顶花岗岩体总体属于后造山花岗岩, 形成的构造环境应为同碰撞和碰撞后转化阶段。

5.4 构造意义

根据区域构造以及构造地层、岩浆岩岩石学和地球化学、同位素年代学等综合研究, 结合区域地质资料, 扬子地块西北缘新元古代时期发育弧沟系活动大陆边缘与俯冲碰撞造山作用。后龙门山轿子顶穹隆构造核部基底岩系中的通木梁群岛弧型钙碱性火山岩系、刘家坪穹隆构造基底岩系中的刘家坪群岛弧型中酸性火山岩系, 以及碧口地块中以碧口群火山岩为代表的发育有洋中脊玄武岩、洋岛碱性玄武岩、洋岛拉斑玄武岩等几种残余洋壳的组成单元^[93], 代表了新元古代晋宁期扬子地块西北缘活动

大陆边缘构造体系, 是对新元古代晋宁期扬子地块周缘 Rodinia 超大陆聚合事件的响应。碧口地块西段碧口一带董家河蛇绿岩中辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(839.2 \pm 8.2) \text{ Ma}$ ^[93], 碧口地块北侧横丹群浊积岩系碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 测年结果为 $850 \sim 750 \text{ Ma}$ ^[94], 碧口地块东段勉(县)一略(阳)一宁(强)三角区的蛇绿岩中镁铁质岩的形成时代为 $(815 \pm 24) \sim (827 \pm 14) \text{ Ma}$ ^[95]。而后龙门山轿子顶穹隆构造核部通木梁群变质中酸性火山岩中的岩浆成因锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄值介于 $(829 \pm 6) \sim (1000 \pm 7) \text{ Ma}$ 。因此, 扬子地块西北缘活动大陆边缘的发育主要在新元古代青白口纪, 而发生自北西向南东方向的洋壳俯冲以及弧陆碰撞造山作用时间主要在 800 Ma 左右。反映出碧口地块中以碧口群火山岩为代表的古洋壳向南的俯冲作用形成了新元古代通木梁群岛弧型火山岩系, 应是扬子地块北缘地区与 Rodinia 超大陆聚合事件的响应。800 Ma 之后才进入 Rodinia 超大陆的裂解阶段, 而侵入新元古代早期通木梁群中的轿子顶过铝

质花岗岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(793±11) 和(792±11) Ma, 则代表了后碰撞型花岗岩是碰撞造山过程中地壳加厚阶段形成的, 形成于同碰撞挤压体制向碰撞后伸展体制的转化阶段, 是 Rodinia 超大陆的初始裂解阶段产物。

6 结论

通过对扬子地块西北缘后龙门山轿子顶花岗岩的锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究, 可以得到如下结论:

(1) 轿子顶花岗岩体中变形花岗岩和块状花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果分别为(793±11) Ma 和(792±11) Ma, 表明它们的形成时代完全一致, 均为新元古代南华纪早期。

(2) 轿子顶花岗岩为 S 型花岗岩, 具有铝和硅过饱和、过铝质特征。原始岩浆已经历充分的结晶分异作用, 岩浆来源为壳源。它们是在陆壳底部大压力下源区岩石脱水熔融形成的, 其物源是以砂屑岩成分为主的沉积岩部分熔融形成的花岗质岩浆上升侵位形成的。

(3) 轿子顶岩体具有后碰撞岩浆活动的特征, 是新元古代扬子地块西北缘活动大陆边缘俯冲以及弧陆碰撞造山作用导致的地壳增厚、下地壳部分熔融的产物, 形成于同碰撞(挤压环境)向碰撞后(伸展环境)转化阶段, 即后造山期, 为后造山花岗岩类, 是 Rodinia 超大陆初始裂解阶段产物。

西北大学张国伟院士自始至终指导研究工作的进行。锆石阴极发光(CL)显微照相得到北京离子探针中心扫描电镜及阴极发光实验室周慧工程师、杨之青研究员的热心帮助; SHRIMP 锆石 U-Pb 测年得到北京离子探针中心王彦斌、闫全人研究员的热心指导; 主量元素、微量元素分析测试得到中国科学院地质与地球物理研究所李禾、阎欣工程师的大力支持, 在此谨致谢忱!

References:

[1] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China[J]? Earth and Planetary Science Letters, 1999, 173: 171-181.

[2] Li Z X, Li X H, Zhou H, et al. Grenville-aged continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implication for Rodinia configuration[J]. Geology, 2002, 30: 163-166.

[3] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. Precambrian Research, 2003, 122(1-4): 85-109.

[4] Li Z X, Wartho J A, Occhipinti S, et al. Early history of the eastern Sibao Orogen (South China) during the assembly of Rodinia: New mica $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and SHRIMP U-Pb detrital zircon provenance constraints[J]. Precambrian Research, 2007, 59(1-2): 79-94.

[5] Li X H, Zhou H W, Li Z X, et al. Zircon U-Pb age and petrochemical characteristics of the Neoproterozoic bimodal volcanics from west Yangtze Block[J]. Geochimica, 2001, 30(4): 315-322(in Chinese).

[6] Li X H, Zheng X L, Zhou H W, et al. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kang-Dian Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia[J]. Precambrian Research, 2002, 113: 135-154.

[7] Li X H, Li Z X, Zhou H W, et al. U-Pb zircon geochronological, geochemical and Nd isotopic study of Neoproterozoic basaltic magmatism in the West Sichuan: Petrogenesis and geodynamic implications[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(4): 329-338(in Chinese).

[8] Li X H, Li Z X, Zhou H W, et al. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd isotope of the Guandaoshan Pluton in SW Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance[J]. Science in China: Series D, 2003, 46(Suppl): 73-83.

[9] Li X H, Li Z X, Ge W C, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma[J]? Precambrian Research, 2003, 122: 45-83.

[10] Li X H, Li Z X, Sinclair J A, et al. Revisiting the "Yanbian Terrane": Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze, South China[J]. Precambrian Research, 2006, 151(1-2): 14-30.

[11] Li X H, Wang X C, Li W X, et al. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: From orogenesis to intracontinental rifting[J]. Geochimica, 2008, 37(4): 382-399(in Chinese).

[12] Ling H F, Shen W Z, Wang R C, et al. Geochemical characteristics and genesis of Neoproterozoic granitoids in the north-western margin of the Yangtze Block[J]. Phys Chem Earth, 2001, 26(9-10): 805-819.

[13] Ling W L, Gao S, Zhang B R, et al. Neoproterozoic tectonic evolution of the northern Yangtze Craton, South China: Implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent[J]. Precambrian Research, 2003, 122: 111-140.

- [14] Ling W L, Wang X H, Cheng J P. Geochemical features and its tectonic implication of the Jinningian Wangjiangshan gabbros in the north margin of Yangtze Block[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(4): 218-222(in Chinese).
- [15] Ling W L, Gao S, Cheng J P, et al. Neoproterozoic magmatic events within the Yangtze continental interior and along its northern margin and their implication: Constraint from ELA-ICP-MS U-Pb geochronology of zircon from the Huangling and Hannan Complexes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(2): 387-397(in Chinese).
- [16] Ling W L, Gao S, Ouyang J P, et al. Timing and tectonic setting of the Xixiang Group: Constraints from the zircon U-Pb geochronology and geochemistry[J]. *Science in China; Series D*, 2002, 32(2): 101-112(in Chinese).
- [17] Lin G C, Li X H, Li W X. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd-Hf isotope of Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian Area, SW China[J]. *Science in China; Series D*, 2007, 50(1): 1-16.
- [18] Munteanu M, Yao Y. The Gaojiacun Intrusion: Rift or subduction-related? Comment on "Revisiting the Yanbian Terrane": Implication for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 2007, 155: 324-327.
- [19] Yan D P, Zhou M F, Song H L, et al. Where was South China located in the reconstruction of Rodinia[J]? *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(4): 249-256(in Chinese).
- [20] Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, et al. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the northern margin of South China: Implications for accretion of Rodinia[J]. *Journal of Geology*, 2002, 110: 611-618.
- [21] Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196: 51-67.
- [22] Zhou M F, Ma Y X, Yan D P, et al. The Yanbian terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 2006, 144: 19-38.
- [23] Zhou M F, Yan D P, Wang C L, et al. Subduction-related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): Implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 248: 286-300.
- [24] Zhou M F, Zhao J H, Xia X P, et al. Comment on "Revisiting the Yanbian Terrane": Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 2007, 155: 313-317.
- [25] Zhao J H, Zhou M F. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua District (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle[J]. *Precambrian Research*, 2007, 152: 27-47.
- [26] Zhu W G, Zhong H, Deng H L, et al. SHRIMP zircon U-Pb age, geochemistry, and Nd-Sr isotopic of Gaojiacun mafic-ultramafic intrusive complex, Southwest China[J]. *International Geology Review*, 2006, 48: 650-668.
- [27] Zhu W G, Zhong H, Deng H L, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, elemental, and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian Area, SW China[J]. *Precambrian Research*, 2008, 164(1-2): 66-85.
- [28] Zhu W G, Deng H L, Liu B G, et al. The age of the Gaojiacun mafic-ultramafic intrusive complex in the Yanbian Area, Sichuan Province: Geochronological constraints by U-Pb dating of single zircon grains and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of hornblende[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(10): 1077-1085.
- [29] Zhu W G, Liu B G, Deng H L, et al. Advance in the study of Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks in the western margin of the Yangtze Craton[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2004, 23(3): 255-264(in Chinese).
- [30] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. Geochemistry of the Meso- to Neoproterozoic basic-acid rocks from Hunan Province, South China: Implication for the evolution of western Jiangnan orogen[J]. *Precambrian Research*, 2004, 135: 79-103.
- [31] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. LA-ICP-MS zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from northern Guangxi, South China: Implication for tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 2006, 145: 111-130.
- [32] Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, et al. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *Precambrian Research*, 2007, 159: 117-131.
- [33] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic mafic rocks from western Hunan, South China: Implication for petrogenesis and post-orogenic extension[J]. *Geological Magazine*, 2008, 145: 215-233.
- [34] Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen[J]. *Chemical Geology*, 2006, 231: 135-138.
- [35] Zheng Y F, Zhang S B, Zhao Z F, et al. Contrasting zircon Hf and O isotope in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking

- of continental crust[J]. *Lithos*, 2007, 96: 127-150.
- [36] Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, et al. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan orogen, South China[J]. *Precambrian Research*, 2008, 163(3-4): 351-383.
- [37] Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granitoids in South China[J]. *Precambrian Research*, 2006, 146: 179-212.
- [38] Wu Y B, Zheng Y F, Tang J, et al. Zircon U-Pb dating of water-rock interaction during Neoproterozoic rift magmatism in South China[J]. *Chemical Geology*, 2007, 246: 65-86.
- [39] Du L L, Geng Y S, Yang C H, et al. Geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon chronology of basalts from the Yanbian Group in the western Yangtze Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 805-813(in Chinese).
- [40] Du L L, Geng Y S, Yang C H, et al. The stipulation of Neoproterozoic TTG in western Yangtze Block and its significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2006, 25(4): 273-281 (in Chinese).
- [41] Du L L, Geng Y S, Yang C H, et al. New understanding on Kangding Group on western margin of Yangtze Block: Evidence from geochemistry and chronology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(11): 1562-1577(in Chinese).
- [42] Geng Y S, Yang C H, Wang X S, et al. Age of crystalline basement in western margin of Yangtze Terrane[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(3): 429-441 (in Chinese).
- [43] Li Z H, Luo Z H, Chen Y L, et al. Geochronological and geochemical characteristics of Kangding metamorphosed intrusions[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26(Suppl): 87-89 (in Chinese).
- [44] Li Z H, Luo Z H, Chen Y L, et al. Geology and geochemistry of the Kangding-Luding metamorphosed intrusions and implication for tectonic setting[J]. *Geoscience*, 2008, 22(2): 181-189 (in Chinese).
- [45] Li D P, Chen Y L, Luo Z H, et al. The petro-chemistry and Nd isotopes study of metamorphic intrusions in Kangding-Mianning, Sichuan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(6): 1251-1260(in Chinese).
- [46] Zhao J X, Chen Y L, Li Z H. Zircon U-Pb SHRIMP dating for the Kangding Complex and its geological significance[J]. *Geoscience*, 2006, 20(3): 378-385 (in Chinese).
- [47] Shen W Z, Ling H F, Xu S J, et al. Geochemical characteristics and genesis of some Neoproterozoic granitoids in the northern part of the western margin of the Yangtze Block[J]. *Geological Review*, 2000, 46(5): 512-519(in Chinese).
- [48] Shen W Z, Gao J F, Xu S J, et al. Geochemical characteristics and genesis of the Qiaotou basic complex, Luding County, western Yangtze Block[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2002, 8(4): 380-389 (in Chinese).
- [49] Shen W Z, Gao J F, Xu S J, et al. Format on age and geochemical characteristics of the Lengshuiqing Body, Yanbian, Sichuan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(1): 27-37 (in Chinese).
- [50] Shen W Z, Gao J F, Xu S J, et al. Geochemical characteristics of the Shimian ophiolite, Sichuan Province and its tectonic significance[J]. *Geological Review*, 2003, 49(1): 17-27 (in Chinese).
- [51] Li P C, Chen G H, Xu D R, et al. Petrological and geochemical characteristics and petrogenesis of Neoproterozoic peraluminous granites in northwestern Hunan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(1): 126-136(in Chinese).
- [52] Zhang P, Zhou Z Y, Xu C H, et al. Geochemistry of Pengguan Complex in the Longmenshan Region, west Sichuan Province, SW China: Petrogenesis and tectonic implication [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2008, 32(1): 105-116(in Chinese).
- [53] Xie S W, Gao S, Liu X M, et al. U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircon of Nanhua sedimentary rocks from the Yangtze Gorge: Implication for genesis of Neoproterozoic magmatism South China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 2009, 34(1): 117-126 (in Chinese).
- [54] Zhao F Q, Zhao W P, Zuo Y C, et al. U-Pb geochronology of Neoproterozoic magmatic rocks in Hanzhong, Southern Shaanxi, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(3): 383-389 (in Chinese).
- [55] Song B, Zhang Y H, Liu D Y. Introduction to the Naissance of SHRIMP and its contribution to isotope geology[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2002, 23(1): 58-62 (in Chinese).
- [56] Ludwig K R. Isoplot 3.0—A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. U. S. :Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003(4): 1-70.
- [57] Streckeisen A L. Plutonic rocks: Classification and nomenclature recommended by the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks[J]. *Geotimes*, 1973, 18(7): 26-30.
- [58] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 1989, 101: 635-643.
- [59] Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247-263.
- [60] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and

- processes[M]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society of London, Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [61] Patino-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.
- [62] Patino-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.
- [63] Patino-Douce A E. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas[M]//Castro A, Fernandez C, Vigneresse J. Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques. Geological Society of London, Special Publications, 1999, 168: 55-75.
- [64] Patino-Douce A E, Harris N. Experimental constraints on Himalayan anatexis[J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39 (4): 689-710.
- [65] Patino-Douce A E, McCarty T C. Melting of crustal rocks during continental collision and subduction[M]//Hacker B R, Liu J G. When Continents Collide; Geodynamics of Ultra-high Pressure Rocks. Netherlands; Kluwer Academic Publisher, 1998; 27-55.
- [66] Green T H, Pearson N J. An experimental study of Nb and Ta partitioning between Ti-rich minerals and silicate liquids at high pressure and temperature[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(1): 55-62.
- [67] Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3-4): 347-359.
- [68] Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. *Chemical Geology*, 2000, 165(3-4): 197-213.
- [69] DePaolo D J, Daley E E. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension[J]. *Chemical Geology*, 2000, 169, 157-185.
- [70] Yang X M, Lentz D R, Chi G X, et al. Thorne geochemical characteristics of gold-related granitoids in southwestern New Brunswick, Canada[J]. *Lithos*, 2008, 104: 355-377.
- [71] Lentz D R. Petrogenetic evolution of felsic volcanic sequences associated with Phanerozoic volcanic-hosted massive sulphide systems: The role of extensional geodynamics[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 12: 289-327.
- [72] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[M]//Thorpe R S. Andesites. New York: John Wiley and Sons, 1982; 525-548.
- [73] Pearce J A, Bender J F, De Long S E, et al. Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia, Turkey[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1990, 44: 189-229.
- [74] John B M, Wu F, Lo C H, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie Complex, central China[J]. *Chemical Geology*, 1999, 157: 119-146.
- [75] Durmus Boztug, Yehudit Harlavan, Aehart G B, et al. K-Ar age, whole-rock and isotope geochemistry of A-type granitoids in the Divrii-Sivas Region, eastern-central Anatolia, Turkey[J]. *Lithos*, 2007, 97(1-2): 193-218.
- [76] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific, 1985: 312.
- [77] Wolf M B, Wyllie P J. The formation of tonalitic liquids during the vapor-absent partial melting of amphibolite at 10 kbar [J]. *Eos*, 1989, 70: 506-518.
- [78] Beard J S, Lofgren G E. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1.3 and 6.9 kbar [J]. *Journal of Petrology*, 1991, 32: 365-402.
- [79] Johannes W, Holtz F. Petrogenesis and Experiment Petrology of Granitic Rock[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- [80] Sisson T W, Ratajeski K, Hankins W B, et al. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 2005, 148(5): 635-661.
- [81] Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geology*, 1974, 8: 173-174.
- [82] Vielzeuf D, Montel J M. Partial melting of metagreywackes. Part I: Fluid-absent experiments and phase relationships[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1994, 117(4): 375-393
- [83] Montel J M, Vielzeuf D. Partial melting of metagreywackes. Part II: Compositions of minerals and melts[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1997, 128: 176-196.
- [84] Castro A, Patino-Douce A E, Corregge L G, et al. Origin of peraluminous granites and granodiorites, Liberian massif, Spain: An experimental test of granite petrogenesis[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1999, 135(2-3): 255-276.
- [85] Ferrara G, Lombardo B, Tonarini S, et al. Sr, Nd and O isotopic characterization of the Gopu La and Gumburanjun leucogranites (High Himalaya)[J]. *Schweizerische Mineral Petrogr Mitteilungen*, 1991, 71: 35-51.
- [86] Harris N B W, Inger S. Trace element modelling of pelite-derived granites[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*,

- 1992, 110(1): 46-56.
- [87] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. *Lithos*, 1998, 45(1): 29-44.
- [88] Brown G C. Calc-alkaline intrusive rocks: Their diversity, evolution and relation to volcanic arcs [M]//Thorpe R S. *Andesites—Orogenic andesites and Related Rocks* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1982: 437-464.
- [89] Wu F Y, Li X H, Yang J H, et al. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217-1238 (in Chinese).
- [90] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [91] Pearce J A. Sources and setting of granitic rocks [J]. *Epi-sodes*, 1996, 19(4): 120-125.
- [92] Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. *Geochemical characteristics of collision-zone magmatism* [M]//Coward M P, Reis A C. *Collision Tectonics*. Geological Society of London, Special Publication, 1986, 19: 67-81.
- [93] Lai S C, Li Y F, Qin J F. Geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Dongjiahe ophiolite complex from the western Bikou terrane [J]. *Science in China: Series D*, 2007, 50(Suppl II): 305-313.
- [94] Druschke P A, Hanson A D, Yan Q R, et al. Stratigraphic and U-Pb SHRIMP detrital zircon evidence for a Neoproterozoic continental arc, Central China: Rodinia implications [J]. *The Journal of Geology*, 2006, 114: 627-636.
- [95] Yan Q R, Wang Z Q, Yan Z, et al. SHRIMP analyses for ophiolitic-mafic blocks in the Kangxian-Mianxian section of the Mianxian-Lueyang mélange: Their geological implications [J]. *Geological Review*, 2007, 53(6): 755-764 (in Chinese).
- [5] 李献华,周汉文,李正祥,等. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石化学特征 [J]. *地球化学*, 2001, 30(4): 315-322.
- [7] 李献华,李正祥,周汉文,等. 川西新元古代玄武质岩浆岩的锆石 U-Pb 年代学、元素和 Nd 同位素研究: 岩石成因与地球动力学意义 [J]. *地学前缘*, 2002, 9(4): 329-338.
- [8] 李献华,李正祥,周汉文,等. 川西南关刀山岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd 同位素地球化学-岩石成因与构造意义 [J]. *中国科学: D 辑*, 2002, 32(增刊): 60-68.
- [11] 李献华,王选策,李武显,等. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷 [J]. *地球化学*, 2008, 37(4): 382-399.
- [14] 凌文黎,王歆华,程建萍. 扬子北缘晋宁期望江山基性岩体的地球化学特征及其构造背景 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(4): 218-222.
- [15] 凌文黎,高山,程建萍,等. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义——来自黄陵和汉南侵入杂岩 ELA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学的约束 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(2): 387-397.
- [16] 凌文黎,高山,欧阳建平,等. 西乡群的时代与构造背景: 同位素年代学及地球化学制约 [J]. *中国科学: D 辑*, 2002, 32(2): 101-112.
- [17] 林广春,李献华,李武显. 川西新元古代基性岩墙群的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd-Hf 同位素地球化学: 岩石成因与构造意义 [J]. *中国科学: D 辑*, 2006, 36(7): 630-645.
- [19] 颜丹平,周美夫,宋鸿林,等. 华南在 Rodinia 古陆中位置的讨论——扬子地块西缘变质-岩浆杂岩证据及其与 Seychelles 地块的对比 [J]. *地学前缘*, 2002, 9(4): 249-256.
- [28] 朱维光,邓海琳,刘秉光,等. 四川盐边高家村镁铁-超镁铁质杂岩体的形成时代: 单颗粒锆石 U-Pb 和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学制约 [J]. *科学通报*, 2004, 49(10): 985-992.
- [29] 朱维光,刘秉光,邓海琳,等. 扬子地块西缘新元古代镁铁-超镁铁质岩研究进展 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23(3): 255-264.
- [39] 杜利林,耿元生,杨崇辉,等. 扬子地台西缘盐边群玄武质岩石地球化学特征及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 [J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 805-813.
- [40] 杜利林,耿元生,杨崇辉,等. 扬子地台西缘新元古代 TTG 的厘定及其意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(4): 273-281.
- [41] 杜利林,耿元生,杨崇辉,等. 扬子地台西缘康定群的再认识: 来自地球化学和年代学证据 [J]. *地质学报*, 2007, 81(11): 1562-1577.
- [42] 耿元生,杨崇辉,王新社,等. 扬子地台西缘结晶基底的时代 [J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 429-441.
- [43] 李志红,罗照华,陈岳龙,等. 康定变质侵入岩的年代学及岩石地球化学特征 [J]. *地球学报*, 2005, 26(增刊): 87-89.
- [44] 李志红,罗照华,陈岳龙,等. 康定—泸定地区变质侵入岩的地质地球化学特征及其构造环境 [J]. *现代地质*, 2008, 22(2): 181-189.
- [45] 李大鹏,陈岳龙,罗照华,等. 四川康定—冕宁地区变质侵入岩的地球化学及 Nd 同位素研究 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(6): 1251-1260.
- [46] 赵俊香,陈岳龙,李志红. 康定杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义 [J]. *现代地质*, 2006, 20(3): 378-385.
- [47] 沈渭洲,凌洪飞,徐士进,等. 扬子板块西缘北段新元古代花岗岩类的地球化学特征和成因 [J]. *地质论评*, 2000, 46(5): 512-519.
- [48] 沈渭洲,高剑锋,徐士进,等. 扬子板块西缘泸定桥头基性

参考文献:

- 杂岩体的地球化学特征和成因[J]. 高校地质学报, 2002, 8 (4): 380-389.
- [49] 沈渭洲, 高剑锋, 徐士进, 等. 四川盐边冷水管岩体的形成时代和地球化学特征[J]. 岩石学报, 2003, 19 (1): 27-37.
- [50] 沈渭洲, 高剑锋, 徐士进, 等. 四川石棉蛇绿岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质论评, 2003, 49 (1): 17-27.
- [51] 李鹏春, 陈广浩, 许德如, 等. 湘东北新元古代过铝质花岗岩的岩石地球化学特征及其成因讨论[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1): 126-136.
- [52] 张沛, 周祖翼, 许长海, 等. 川西龙门山彭灌杂岩地球化学特征: 岩石成因与构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(1): 105-116.
- [53] 谢士稳, 高山, 柳小明, 等. 扬子克拉通南华纪碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素对华南新元古代岩浆事件的指示[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2009, 34(1): 117-126.
- [54] 赵凤清, 赵文平, 左义成, 等. 陕西汉中地区新元古代岩浆岩 U-Pb 年代学[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 383-389.
- [55] 宋彪, 张玉海, 刘敦一. 微量原位分析仪器 SHRIMP 的产生与锆石同位素地质年代学[J]. 质谱学报, 2002, 23(1): 58-62.
- [89] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [93] 赖绍聪, 李永飞, 秦江峰. 碧口群西段董家河蛇绿岩地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(增刊): 262-270.
- [95] 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等. 秦岭勉略构造混杂带康县—勉县段蛇绿岩块——铁镁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义[J]. 地质论评, 2007, 53(6): 755-764.

投稿预告

欢迎主题专辑投稿 也欢迎非主题投稿

《地学前缘》为双月主题性期刊, 欢迎按专辑主题投稿, 也欢迎非主题投稿, 因本刊设有“非主题来稿选登”。

- (1)2009 年第 5,6 期“地球表层科学”主题:
具体专辑名为“地球表层系统”。
- (2)2010 年第 1,2 期“地球物质科学”主题:
具体专辑名为“成岩成矿的物理过程”, “矿床地球化学”。
- (3)2010 年第 3,4 期“地球结构、构造与动力学”主题:
具体专辑名为“大陆构造与动力学”。
- (4)2010 年第 5,6 期“地球表层科学”主题:
具体专辑名为“汶川地震研究”, “水资源与环境”。
- (5)2011 年第 1,2 期“地球物质科学”主题:
具体专辑名为“花岗岩成因”, “变质作用与造山带演化”。

* * * * *

《地学前缘》国际版已由爱思唯尔(Elsevier)公司出版, 可在其在线平台上(<http://www.sciencedirect.com/science/journal/18725791>)浏览、查阅、下载。