



引文格式: 李嘉伟, 唐卫东, 刘天航, 等. 甘肃北山地区沙红山岩体年代学、地球化学特征及岩石成因[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 165–181. DOI: 10.12401/j.nwg.2025077

Citation: LI Jiawei, TANG Weidong, LIU Tianhang, et al. Chronology, Geochemical Characteristics and Rock Genesis of Shahongshan Pluton in Beishan Area, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 165–181. DOI: 10.12401/j.nwg.2025077

甘肃北山地区沙红山岩体年代学、 地球化学特征及岩石成因

李嘉伟¹, 唐卫东¹, 刘天航¹, 杨瀚文¹, 肖佳亮², 李强¹, 潘元¹

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710054;
2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘 要: 甘肃沙红山岩体位于甘蒙交界处, 大地构造位置处于华北板块、塔里木板块和哈萨克斯坦板块的交汇地带, 构造岩浆活动分布广泛。笔者对沙红山岩体中肉红色花岗斑岩和正长花岗岩开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石学和主微量元素分析, 分析岩石侵位时代和成因, 探讨北山造山带构造演化的历程。沙红山岩体中肉红色花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 (294.7 ± 4.0) Ma, 肉红色正长花岗岩的加权平均年龄为 (284.2 ± 4.0) Ma, 为早二叠世。岩石地球化学分析表明, 沙红山岩体为钙碱性-高钾钙碱性岩石系列, 具高硅 (74.79%~76.28%), 富碱 (6.01%~8.30%) 和过铝质 ($A/CNK=1.40 \sim 1.89$) 特征。稀土元素总量较高, 轻稀土总量 (平均为 251.60×10^{-6}) 明显高于重稀土总量 (平均为 45.52×10^{-6}); 球粒陨石标准化曲线明显右倾, 轻重稀土比为 $LREE/HREE=5.35 \sim 5.68$, La_N/Yb_N 值为 $7.93 \sim 9.81$, 轻重稀土分馏较为明显; 样品的具有明显的 Eu 负异常。微量元素相对富集大离子亲石元素 Rb 和强不相容元素 Th、U 及高场强元素 Zr、Hf, 显著亏损高场强元素 Ba、Nb、Ti、P。结合区域地质背景认为, A 型花岗岩以肉红色花岗斑岩为代表, 形成于伸展环境, 具有特定的岩石学、矿物学和地球化学特征, 其岩浆来源主要是壳源物质, 可能混有少量幔源物质。I 型花岗岩以肉红色正长花岗岩为代表, 其成因可能与幔源岩浆的结晶分异、下地壳变质火成岩的部分熔融或幔源岩浆改造的地壳沉积物重熔有关。沙红山岩体的形成与早二叠世的后碰撞拉伸环境及局部挤压应力有关, 经历了复杂的岩浆上升、分离结晶、同化混染和混合作用过程。因此, 笔者认为沙红山岩体形成的构造背景为后碰撞板内裂谷环境。

关键词: 甘肃北山地区; 沙红山岩体; U-Pb 锆石定年; 岩石地球化学

中图分类号: P581

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0165-17

Chronology, Geochemical Characteristics and Rock Genesis of Shahongshan Pluton in Beishan Area, Gansu Province

LI Jiawei¹, TANG Weidong¹, LIU Tianhang¹, YANG Hanwen¹, XIAO Jialiang², LI Qiang¹, PAN Yuan¹

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. School of Earth Science and

收稿日期: 2023-06-13; 修回日期: 2025-04-22; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20211552、DD20243052) 联合资助。

作者简介: 李嘉伟 (1992-), 男, 工程师, 从事矿产资源调查评价。E-mail: 1255127125@qq.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Rosources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Shahongshan pluton is located at the junction of Gansu Province and Inner Mongolia, which is at the intersection of the North China plate, the Tarim plate and the Kazakhstan plate. In addition, the tectonic magmatic activity is widely distributed. In this paper, the LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, petrology, major and trace element analysis were carried out on the rocks of Shahongshan pluton, including granite porphyry and syenogranite, in order to unravel the regional intrusion age, rock genesis and the tectonic evolution of the Beishan orogenic belt. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating show that the weighted average age of the granite porphyry and syenogranite was (294.7 ± 4.0) Ma, and (284.2 ± 4.0) Ma, respectively, indicating that they formed in Early Permian. Petrological geochemical analyses show that granites of the Shahongshan pluton belong to calcium-alkaline to high potassium-calcium alkaline rock series, which are characterized by high silicon ($74.79\% \sim 76.28\%$), alkali-rich ($6.01\% \sim 8.30\%$), and aluminous ($A/CNK=1.40 \sim 1.89$). The total amount of rare earth elements was high, with enrichment in the light rare earth element (LREE; average 251.60×10^{-6}) and depletion in the heavy rare earth element (HREE; average 45.52×10^{-6}). The standardization curve of chondrite meteorite was significantly right-tilted, the LREE/HREE ratios of $5.35 \sim 5.68$ and La_N/Yb_N values of $7.93 \sim 9.81$, indicating a remarkable fractionation of light and heavy rare earths elements. The samples had obvious negative Eu anomalies. Trace elements are relatively enriched with large ionic lipophilic elements Rb, strong incompatible elements Th, U and high field strength elements Zr and Hf, and significant losses are lost to high field strength elements Ba, Nb, Ti and P. In combination with the regional geological background, The A-type granite, represented by the flesh red granite porphyry, was formed in an extensional environment and has specific petrological, mineralogical and geochemical characteristics. Its magma source is mainly crust-derived material, and may be mixed with a small amount of mantle-derived material. The I-type granites, represented by the flesh red syenogranite, may be related to the crystallization differentiation of mantle-derived magma, the partial melting of metamorphic igneous rocks in the lower crust, or the remelting of crust sediments modified by mantle-derived magma. The formation of the Shahongshan pluton is related to the post-collisional tensile environment and local compressive stress in the Early Permian, and has undergone complex processes of magma ascent, separation and crystallization, assimilation and contamination, and mixing. It is concluded that the tectonic background of Shahongshan pluton is the post-collisional plate rift valley environment.

Keywords: Gansu Beishan area; Shahongshan pluton; U-Pb zircon dating; petrogeochemistry

北山地区地处西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块和塔里木板块交汇处。寒武纪来, 历经了两次主要的俯冲-碰撞造山作用, 多期次构造-岩浆演化旋回(左国朝等, 1990)。

花岗岩浆的形成和演化能够制约壳幔物质相互作用关系, 包含着岩石圈演化的重要信息, 直接影响着花岗岩的成因类型以及成分的多样性。研究花岗岩对地球科学研究来说具有重要的实际意义, 不同类型的花岗岩, 岩石矿物组合反映了不同的构造环境和大地动力学背景, 相关手段的研究能够进一步认识到不同花岗岩的起源和演化(王涛, 2000; 吴福元等, 2007; 徐夕生等, 2020)。

自 20 世纪 90 年代以来, 覆盖北山地区的地质科研工作相继展开。不同时期、不同学者研究的侧重点有所不同, 所取得的成果无疑对提高本区的地质研究程度起着推进作用。1991 年, 内蒙古自治区地质矿产局组织编写并出版了《内蒙古自治区区域地质志》及系列图件; 1996 年, 内蒙古自治区地质矿产局组织编写并出版了《内蒙古自治区岩石地层》; 1999~2001 年, 由中国地质科学院矿产资源研究所聂风军等完成“蒙甘新相邻(北山)地区综合找矿预测和评价”专题。2001 年, 邵和明等完成“内蒙古自治区主要成矿区(带)和成矿系列”等专题研究; 2002~2004 年, 甘肃省地质调查院、中国地质调查局西安地质调查中心、

内蒙古自治区地质调查院分别对北山地区进行“甘新蒙北山构造-成矿地质构造环境以及与周边成矿带成矿地质条件对比研究”“北山成矿带找矿重大问题研究”“内蒙古自治区北山成矿远景区找矿方向和选区研究”等专题研究。上述历史研究工作从不同的角度对北山地区成矿环境、成矿地质条件、成矿规律、找矿方向及影响地质的重大问题进行了论述,是提高本区综合研究程度的重要理论依据。

北山地区花岗岩出露面积大,岩浆活动记录和已知的同位素年龄范围从太古宙至中生代可分为前寒武纪,早古生代,晚古生代和中生代等4个时期的构造-岩浆事件,北山地区晚古生代岩浆活动十分频繁,尤其以石炭纪—二叠纪火山岩最为常见,前人研究多集中在该期玄武质火山岩是否来自地幔柱、后碰撞伸展环境与地幔柱作用相互关系、火山作用与成矿等方面(校培喜等, 2010; 郑荣国等, 2012; 王国强等, 2015; 田健等, 2020; 丁书宏, 2021)。北山地区泥盆纪和石炭纪花岗岩类的研究程度较高,而二叠纪花岗岩类的研究比较薄弱,从而对北山地区晚古生代构造岩浆演化缺乏完整的认识,对红柳井—东疙瘩井—月牙山—沙红山一带大规模产出的花岗质侵入杂岩体野外产状、形成时代及与区内产出的铜、铁、金、锑、萤石等矿化关系等认识基本处于空白状态。

本次工作以北山地区的沙红山岩体花岗斑岩、正长花岗岩为研究对象,通过 U-Pb 锆石测年、岩石地球化学主微量分析测试,探讨该岩体的侵位时代及岩石成因等,为研究北山地区早二叠世岩浆活动提供新的依据。笔者初步厘清了区内花岗岩的产状及规模,识别并查明了区内岩体与各类矿化的关系,系统采集月牙山一带产出的花岗岩体样品,对沙红山岩体进行岩相学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学分析,探讨其岩石成因、源区及构造背景,揭示北山造山带中北部构造演化过程,进一步深化北山造山带岩体深部动力学机制的认识,并指导在该区进行矿产资源勘查具有重要的意义。

1 区域地质背景

北山造山带隶属中亚造山带中段南缘,地处塔里木、华北、西伯利亚和哈萨克斯坦板块的交汇部位(图 1a; 陈阳阳等, 2024; 王必任等, 2024)。其西侧以星星峡断裂与东天山构造带相隔,东被巴丹吉林沙漠

所覆盖,南邻敦煌地块,接蒙古增生造山带。研究区位于北山地区中南部,大地构造位置处于北山弧盆系与敦煌陆块之间部位,北部为哈萨克斯坦板块,南测为敦煌陆块。北山造山带是一条具复杂构造演化的多旋回复合造山带,经历了多期次的板块裂解—俯冲—碰撞—拼合的构造运动(龚全胜等, 2003; 杨合群等, 2006; 袁禹, 2019; 查显锋等, 2024)。

研究区出露地层以古生界和新生界为主,元古界为次(图 1b),元古界地层仅出露于西南部和北东部,新生界普遍发育。石炭系为海相火山岩碎屑岩沉积,火山喷发岩以蕴藏锑、金、铁、铜等矿化为特征,Sb、Au、As、Cu、Pb、Ag 等元素含量克拉克值相对较高,矿种类型多样、成因复杂,是重要的锑金矿含矿地层。早白垩世赤金堡组以湖泊相碎屑沉积岩为主,气候趋于干燥环境,形成了菱铁矿。研究区侵入岩较发育,北山地区花岗岩类岩石分布广泛,主要发育不同时期的花岗岩,以志留纪、二叠纪和三叠纪侵入岩为主,其中志留纪侵入岩与阿木乌苏金矿点成矿关系密切(江思宏等, 2006)。三叠纪沙红山侵入岩与沙红山萤石矿点成矿关系极为密切。区内构造较发育,褶皱较发育。断裂构造有不同层次、不同期次、不同性质的韧性、脆韧性断层、脆性断层。

侵入岩多沿构造带呈带状分布于五道明水、月牙山、黑石山、沙红山、北卧虎山、多头山等一带。侵入岩空间上总体呈带状展布,时间上跳跃式延续,从古元古代至三叠纪均有出露,显示明显的旋回性和多期次性(修群业, 1999; 袁禹, 2019)。岩石类型复杂,从中基性—中酸性均有产出,以志留纪、二叠纪、三叠纪岩体为代表。志留纪侵入岩与阿木乌苏金矿点成矿关系密切。三叠纪沙红山侵入岩与沙红山萤石矿点成矿关系极为密切。

北山地区由于受构造、岩浆、热液活动的叠加影响,形成有中酸性侵入岩接触蚀变带、韧性剪切变形带及与密切相关的铁、铜、镍、钨、钼、铅、锌等金属矿产,以及萤石、煤矿及白云石、石灰石等沉积矿产。区域上已发现各类矿床和矿(化)点达数十处,而调查区已发现各类矿床、矿(化)点十余处,包括铜、铁、金、锑、萤石等(陈耀等, 2023; 杨镇熙等, 2023; 刘诚等, 2024)。研究区内加里东期、华力西期、印支期花岗岩与古元古代北山群、早古生代公婆泉组、晚古生代红柳园组和干泉组一段接触带普遍发育有角岩化、硅化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化等。其中加里东晚期,

本次工作对北山地区沙红山岩体花岗斑岩和正

长花岗岩进行了样品采集,其中岩石全分析、微量元素2组,共10件,锆石 U-Pb 年龄样2件,尽量采集的是风化、蚀变程度低的新鲜岩石,避开脉体及外来包体。采样地理坐标分别为 N 40°50'49", E 99°43'21"; N 40°51'01", E 99°42'21"。

2.1 LA-ICP-MS 锆石定年

锆石样品制靶及透射光、反射光、阴极(CL)图像采集均在河北省廊坊诚信地质服务有限公司完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试在中国地质调查局西安地质调查中心实验室完成。激光剥蚀系统为 Geolas Pro 准分子固体进样系统, ICP-MS 设备为 Agilent 7700x 等离子体质谱仪。测试过程中,激光束斑直径为 32 μm , 频率为 6 Hz, 能量密度 6 J/cm², 采用 He 作为载气, Ar 气作为补偿气, 以美国国家标准参考物质 NIST610 作为测定微量元素含量的外标, 标准锆石 91500 (²⁰⁶Pb/²³⁸U=1 065 Ma) 作为定年外标(王涛, 2000; 徐夕生等, 2020), 标准锆石 Plešovice 作为监控样品(Sláma et al., 2008)。样品分析过程中, 每测定5个样品点测定两次标准锆石 91500, 每个样品的信号采集时间共 100 s, 其中前 20 s 作为背景信号采集时间, 样品信号采集时间 50 s。岩石试样经锆石单矿物挑选、制备样品靶之后, 拍摄阴极发光图像、透射光图像和反射光图像, 选取分析点位; 用激光剥蚀等离子体质谱仪原位分析锆石微区的铀铅比值(²⁰⁶Pb/²³⁸U、²⁰⁷Pb/²³⁵U 和 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb); 应用 Glitter 计算程序计算锆石的表面年龄及标准偏差, 并对测试过程中产生的元素分馏和质量歧视进行校正; 测试完成后, 采用软件 ICPMSDataCal(Liu et al., 2010)对测试数据进行后期处理, 加权平均 U-Pb 年龄和谐和图使用 ISOPLOT4.0 软件计算得出。

2.2 岩石地球化学测试

样品均采自未遭受矿化蚀变的肉红色花岗斑岩和正长花岗岩, 岩石整体新鲜。样品在中国地质调查局西安矿产资源调查中心实验室进行了主微量及稀土元素分析, 主量元素采用 PW4400X 射线荧光光谱仪测定, 微量和稀土元素采用 X SeriesII 等离子体质谱仪测定, 分析精度优于 5%。利用酸溶法制备样品的微量元素溶液, 利用等离子体质谱法(ICP-MS)分析样品溶液, 采用的仪器为美国产 ThermoFisher X Series II 型四极杆等离子体质谱仪, 当微量元素含量大于 10×10⁻⁶ 时, 分析精度优于 5%; 当含量小于 10×10⁻⁶ 时, 分析精度优于 10%。在测试过程中, 利用平行样

和标样对测试过程进行监控和检验, 以保证数据的准确性与可靠性。

3 研究结果

3.1 岩相学特征

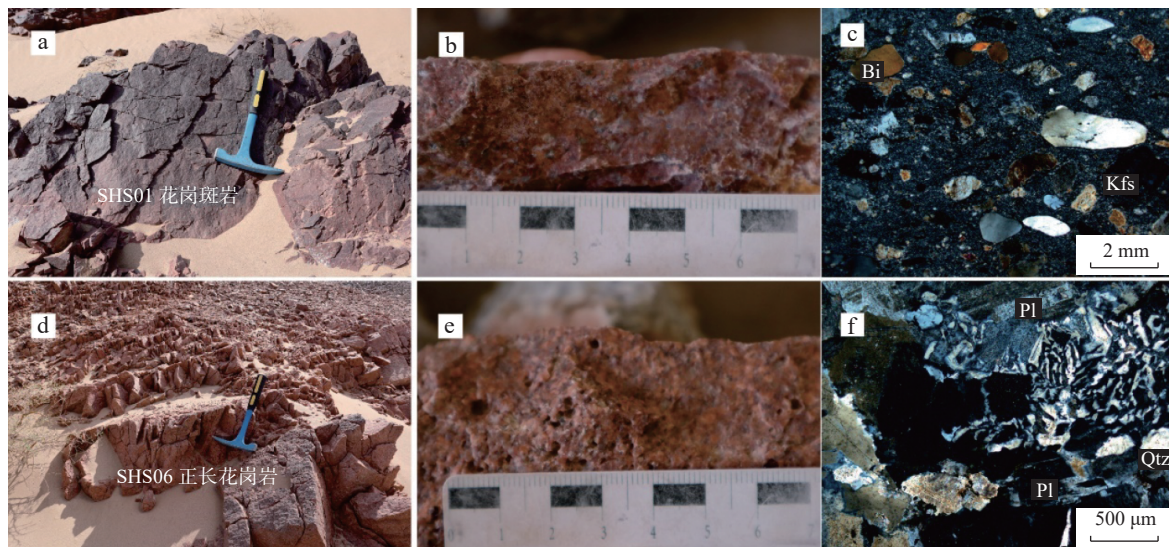
沙红山岩体主体分布于月牙山以东沙红山一带, 由花岗斑岩体、正长花岗岩体和二长花岗岩体3个侵入岩体组成, 侵入岩体与围岩晚石炭世干泉组呈侵入接触关系, 小面积侵入于下二叠统双堡塘组中; 卧虎山西岩株主要侵入于蓟县系平头山组中, 局部与下二叠统双堡塘组为侵入接触关系。总体呈近 EW 向展布, 基岩裸露较好, 地形起伏轻缓。

肉红色花岗斑岩呈斑状结构, 基质具显微粒状结构, 块状构造。矿物成分为斑晶与基质两部分组成, 斑晶包括斜长石(10%)、钾长石(15%)、石英(3%), 基质为长英质(64%)、黑云母(8%)。斑晶斜长石, 为宽板状, 板状, 粒径小于 5.0 mm, 发生较微弱的绢云母化、黏土化、帘石化蚀变, 双晶细密, 为酸性斜长石。钾长石斑晶为他形晶粒状, 为正长石和条纹长石、微斜长石, 条纹长石具条纹结构, 微斜长石具格子双晶, 见不同程度的高岭土化, 粒径小于 4.0 mm。石英斑晶为他形晶粒状, 波状消光明显, 具不同程度的熔蚀港湾, 粒径小于 2.0 mm。斑晶不均匀分布在基质中。基质为长英质, 为显微粒状集合体, 矿物粒径基本上小于 0.2 mm, 光性明显, 基本上能清晰分辨颗粒界限, 基质矿物晶形细小, 杂乱分布, 以钾长石为主, 斜长石和石英次之, 少量黑云母(图 2b、图 2c)。

肉红色正长花岗岩分布于沙红山西侧, 呈不规则状侵入于干泉组中, 岩体边部具角岩化和烘烤现象, 岩体穿插于地层中。岩性为正长花岗岩: 肉红色, 具文象结构, 细-中粒结构, 主要矿物为钾长石、斜长石、石英和黑云母。钾长石: 肉红色, 自形-半自形结构, 含量为 50%~55%, 粒度为 2~4 mm。斜长石: 灰白色, 大小为 1~3 mm, 含量为 10%~15%。石英: 无色, 他形粒状, 含量为 20%~25%。暗色矿物为黑云母, 具绿泥石化, 片状, 大小为 1~3 mm, 含量为 5%~6%(图 2e、图 2f)。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

笔者对沙红山岩体出露的肉红色花岗斑岩和正长花岗岩进行了锆石 U-Pb 定年和锆石阴极发光(CL)拍照。



a. 肉红色花岗斑岩野外露头，野外风化颜色为灰黑色；b. 肉红色花岗斑岩手标本；c. 镜下照片主要有钾长石、斜长石、黑云母的斑晶，基质主要为石英、斜长石等长英质矿物；d. 肉红色正长花岗岩野外露头；e. 肉红色正长花岗岩手标本；f. 镜下照片可见钾长石、斜长石、石英和黑云母等主要矿物；所有显微照片均为正交偏光下；Qtz. 石英；Kfs. 钾长石；Pl. 斜长石；Bi. 黑云母

图2 沙红山岩体野外露头及镜下照片

Fig. 2 Field outcrop and microscopic photographs of Shahongshan pluton

肉红色花岗斑岩的锆石为无色透明或浅黄色，锆石形态完整，结晶良好，大小为 $60\sim 180\ \mu\text{m}$ ，阴极发光中震荡环带清晰，具有典型的岩浆锆石特征，Th/U 值为 $0.65\sim 1.08$ ，指示典型岩浆锆石成因。分析测试数据(表 1)均分布于谐和曲线上或其附近，17 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面分布年龄为 $281.0\sim 314.2\ \text{Ma}$ ， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(294.7\pm 4.0)\text{Ma}$ ($n=17$, $\text{MSWD}=3.0$)，该年龄代表肉红色花岗斑岩的结晶年龄(图 3c)，表明其形成于早二叠世。

肉红色正长花岗岩的锆石大部分呈无色透明状，外形多为半自形—自形柱状或粒状，晶形完好，长为 $50\sim 140\ \mu\text{m}$ ，Th/U 值为 $0.58\sim 0.96$ ，指示典型岩浆锆石成因。17 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面分布年龄为 $273.2\sim 305.3\ \text{Ma}$ (表 2)， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(284.2\pm 4.0)\text{Ma}$ ($n=17$, $\text{MSWD}=2.5$)，该年龄代表肉红色正长花岗岩的结晶年龄(图 3d)，表明其形成于早二叠世。

3.3 主微量和稀土元素

研究区样品的 SiO_2 含量较高 ($74.79\%\sim 76.28\%$)， K_2O 和 Na_2O 含量较高， K_2O 含量为 $4.66\%\sim 6.01\%$ ，平均值为 5.14 ； Na_2O 为 $2.29\%\sim 3.2\%$ ； $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 为 $6.01\%\sim 8.30\%$ ，平均值为 7.78% ，全碱含量偏高； $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 $1.53\sim 2.33$ (平均为 1.74)，钾质含量明显高于钠质含量，属钙碱性—高钾钙碱性系列(表 3，图 4a、图 4c)；

Al_2O_3 含量为 $11.90\%\sim 12.53\%$ ； CaO 含量为 $0.29\%\sim 1.05\%$ ，铝饱和指数 A/CNK 值为 $1.40\sim 1.89$ ，平均值为 1.48 ； A/NK 值为 $1.50\sim 1.98$ ，平均值为 1.59 ，为过铝质系列(表 3，图 4b)。TAS 图解中，样品均落于花岗岩区域(图 4a)。主量元素显示，岩石具有高 Fe、低 Mg 特征(图 4d)。

沙红山岩体在原始地幔标准化蛛网图解中(表 4，图 5a)，样品相对富集大离子亲石元素 Rb 和强不相容元素 Th、U 及高场强元素 Zr、Hf、Sm 等，显著亏损高场强元素 Ba、Ta、Nb、Ti、P 等，与造山带弧岩浆作用形成的钙碱性系列岩石特征相似。沙红山岩体中样品的稀土总量偏低，变化较小 ($180.21\times 10^{-6}\sim 426.23\times 10^{-6}$)，轻稀土总量平均为 251.60×10^{-6} (表 5)，明显高于重稀土总量(平均值为 45.52×10^{-6})。球粒陨石标准化曲线(图 5b)明显右倾(轻重稀土比为 $5.35\sim 5.68$)， La_N/Yb_N 值为 $7.93\sim 9.81$ ，平均值为 8.82 。轻重稀土分馏较为明显；样品的具有明显的 Eu 负异常。

肉红色花岗斑岩中稀土含量比肉红色正长花岗岩高，而 Eu 含量更低。肉红色花岗斑岩中的 Hf、Ta、U、Bi、F、Y、Zr、Nb、的含量明显高于正长花岗岩，Ba、Sr 含量花岗斑岩比正长花岗岩明显要低。

在球粒陨石标准化的稀土配分模式图上显示样品稀土元素分布呈右倾式，轻稀土斜率大于重稀土曲线斜率，说明轻稀土分馏程度高于重稀土。其中曲线

表 1 沙红山肉红色花岗斑岩 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄测试结果

Tab. 1 Shahongshan red granite porphyry LA-ICP MS Zircon U-Pb age test results

测点	含量 (10 ⁻⁶)		Th/U	同位素原子比率						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		1σ
113SH030	88	106	0.84	0.056 0	0.002 22	0.36	0.013 33	0.047 0	0.000 91	450.1	85.42	313.8	9.93	296.0	5.59
114SH031	56	80	0.71	0.055 7	0.002 35	0.36	0.014 13	0.046 9	0.000 93	441.0	90.86	311.9	10.55	295.2	5.71
117SH034	153	158	0.96	0.057 6	0.001 70	0.35	0.009 37	0.044 6	0.000 80	512.9	64.01	307.3	7.03	281.0	4.94
119SH036	91	158	0.58	0.054 8	0.001 64	0.35	0.009 36	0.046 0	0.000 82	402.8	64.99	302.3	7.06	289.6	5.08
123SH037	105	173	0.61	0.052 9	0.001 64	0.33	0.009 34	0.045 6	0.000 82	322.9	68.87	291.5	7.12	287.7	5.08
124SH038	141	157	0.90	0.054 0	0.001 80	0.34	0.010 51	0.046 3	0.000 86	371.7	73.18	300.9	7.93	291.9	5.28
125SH039	28	46	0.61	0.057 0	0.002 74	0.37	0.016 69	0.046 9	0.000 99	491.2	103.17	318.5	12.38	295.3	6.08
126SH040	64	103	0.62	0.054 9	0.001 93	0.34	0.011 14	0.045 6	0.000 86	407.9	76.21	300.8	8.41	287.1	5.30
127SH041	57	76	0.76	0.054 2	0.002 23	0.35	0.013 47	0.046 8	0.000 92	379.9	89.4	304.9	10.13	295.1	5.67
128SH042	115	135	0.85	0.055 4	0.001 76	0.35	0.010 13	0.046 1	0.000 85	426.2	68.96	305.9	7.61	290.2	5.22
129SH043	144	235	0.61	0.055 8	0.001 63	0.38	0.010 07	0.049 9	0.000 90	445.7	63.39	330.5	7.39	314.2	5.51
130SH044	101	161	0.63	0.053 6	0.001 73	0.36	0.010 46	0.048 1	0.000 88	355.7	70.98	309.0	7.83	302.7	5.42
131SH045	68	72	0.95	0.053 2	0.002 08	0.35	0.012 82	0.048 1	0.000 93	338.5	85.96	306.9	9.62	302.6	5.74
132SH046	39	63	0.62	0.052 1	0.002 22	0.33	0.013 37	0.046 3	0.000 90	289.2	94.52	291.9	10.18	292.0	5.57
134SH048	100	157	0.63	0.055 1	0.001 76	0.36	0.010 38	0.046 7	0.000 86	416.5	69.37	308.8	7.77	294.4	5.27
140SH049	76	107	0.71	0.054 1	0.001 99	0.35	0.012 04	0.047 4	0.000 91	374.7	80.37	307.7	9.03	298.3	5.59
141SH050	147	232	0.63	0.055 0	0.001 67	0.37	0.010 06	0.048 2	0.000 88	411.1	65.69	316.7	7.48	303.5	5.41

于 Eu 处呈沟谷状, 存在明显的负 Eu 异常, 反映岩浆源区斜长石的分离结晶作用强烈。

4 讨论

4.1 成岩时代

本次研究采用 LA-ICP-MS 方法分别获得沙红山岩体的肉红色花岗斑岩、正长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(294.7\pm 4.0)\text{Ma}$ 和 $(284.2\pm 4.0)\text{Ma}$ 。前人在研究区也开展过一些年代学测试, 根据锆石 U-Pb 法测定北卧虎山的正长花岗岩成岩年龄为 $(289.8\pm 2.7)\text{Ma}$, 黑石山东正长花岗岩成岩年龄为 $(284.8\pm 3.9)\text{Ma}$, 时代均为早二叠世。测定的年龄与本次研究所获取的年龄数据基本吻合。因此, 本次 LA-ICP-MS 方法测定的年龄代表了沙红山岩体的形成时代。

在晚石炭世末期, 哈萨克斯坦板块与塔里木板块通过弧-弧碰撞, 引发了造山运动, 结束了红石山-百合山-蓬勃山大洋及板块的演化格局。随后, 调查区在早二叠世进入了板内演化阶段, 形成了板内裂谷,

并经历了后造山期的构造活动, 这些活动自北向南逐渐显现。

本次研究使用 LA-ICP-MS 方法测定了沙红山岩体的肉红色花岗斑岩和正长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $(294.7\pm 4.0)\text{Ma}$ 和 $(284.2\pm 4.0)\text{Ma}$, 与之前的研究结果基本吻合, 表明沙红山岩体的形成时代为早二叠世。月牙山和卧虎山岩体的锆石 U-Pb 同位素测年样品也显示出早二叠世的年龄, 分别为 $(287.3\pm 4.6)\text{Ma}$ 和 $(283.8\pm 2.7)\text{Ma}$ (根据《内蒙古自治区阿拉善盟乱石山北等 4 幅 1: 5 万区域矿产地质调查报告》)。

4.2 岩石成因

花岗岩的形成和演化记录了大陆地壳形成、生长和再造的重要信息。活动大陆边缘陆壳的形成与演化涉及大陆的侧向增生和垂向增生和分异, 其标志是伴随着大量花岗岩的形成, 而陆内环境下的大陆再造也可以产生大量的花岗岩 (Raimondo et al., 2010)。I-S-M-A 分类方案是当前地学界最主流的花岗岩分类方案, 不同类型的花岗岩具有特定的岩相学与岩石地球化学特征 (Chappell et al., 1974, 1991; Whalen et al.,

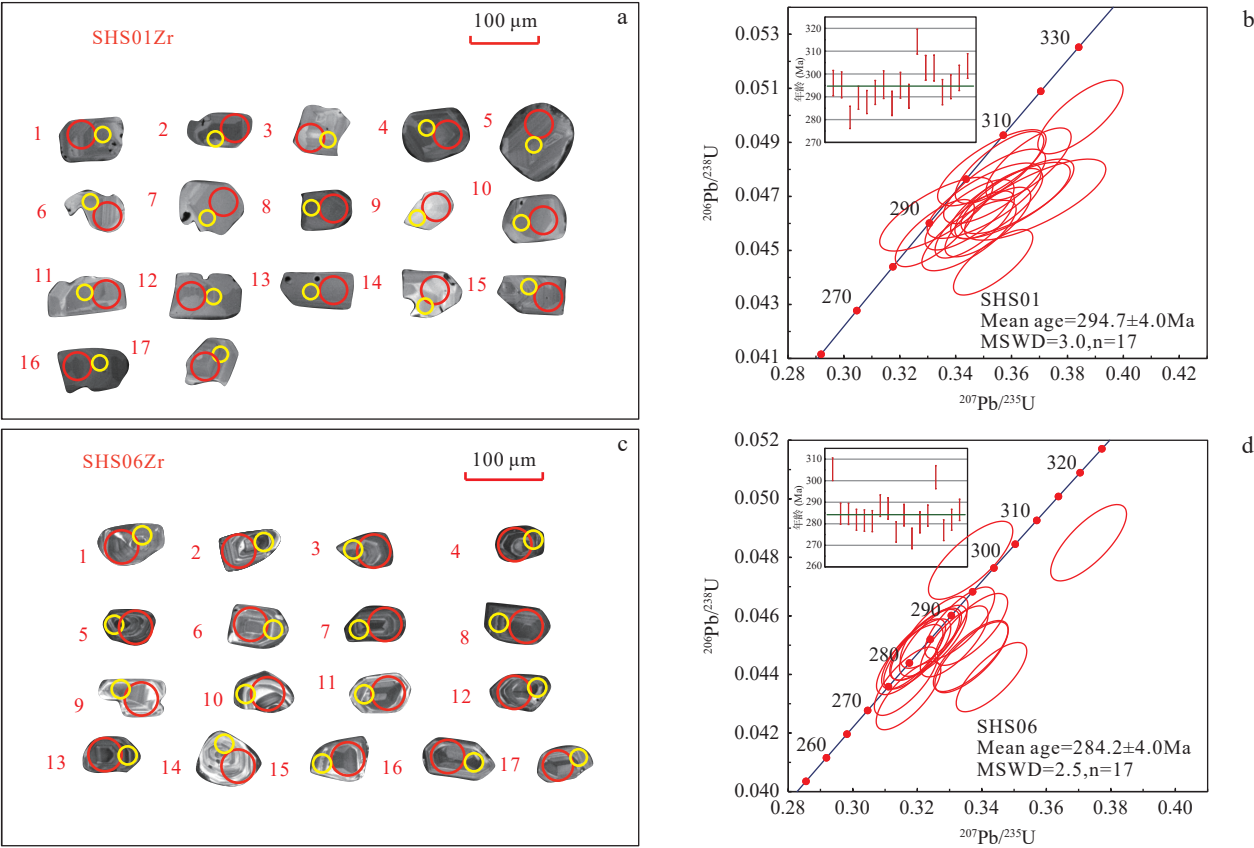


图3 沙红山岩体的锆石 CL 图像(a、b)和锆石 U-Pb 年龄谐和图(c、d)

Fig. 3 (a, b) Zircon CL image of Shahongshan rock mass and (c, d) zircon U-Pb age harmonic diagram

表 2 沙红山肉红色正长花岗岩 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄测试结果

Tab. 2 Shahongshan flesh red regular granite LA-ICP MS Zircon U-Pb age test results

测点	含量 (10 ⁻⁶)		Th/U	同位素原子比率						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
006SH001	428	528	0.81	0.055 8	0.001 31	0.37	0.007 76	0.048 5	0.000 86	443.5	51.1	322.0	5.74	305.3	5.27
008SH003	421	545	0.77	0.052 2	0.001 24	0.32	0.006 89	0.045 2	0.000 80	293.9	53.5	285.7	5.28	284.7	4.94
010SH005	660	611	1.08	0.053 3	0.001 26	0.33	0.006 93	0.045 1	0.000 80	339.9	52.5	290.7	5.29	284.6	4.93
011SH006	495	704	0.70	0.051 9	0.001 25	0.32	0.006 85	0.044 7	0.000 79	281.8	54.0	281.9	5.27	281.9	4.90
012SH007	212	321	0.66	0.054 7	0.001 39	0.34	0.007 66	0.044 6	0.000 80	400.1	55.1	294.6	5.82	281.5	4.95
014SH009	237	415	0.57	0.054 8	0.001 36	0.34	0.007 49	0.044 6	0.000 80	403.2	54.3	294.7	5.69	281.2	4.92
016SH011	404	545	0.74	0.052 8	0.001 27	0.33	0.007 13	0.045 8	0.000 81	320.3	53.6	292.0	5.43	288.4	5.02
017SH012	390	526	0.74	0.053 6	0.001 32	0.34	0.007 42	0.045 5	0.000 81	355.5	54.7	294.7	5.64	287.1	5.02
022SH014	625	735	0.85	0.052 4	0.001 21	0.32	0.006 49	0.043 8	0.000 77	304.8	51.7	279.2	5.01	276.2	4.78
024SH016	382	540	0.71	0.051 9	0.001 31	0.32	0.007 34	0.045 0	0.000 81	282.5	56.8	283.9	5.64	284.0	5.00
026SH018	549	653	0.84	0.053 2	0.001 24	0.32	0.006 61	0.043 3	0.000 77	335.5	52.2	279.8	5.09	273.2	4.75
027SH019	432	573	0.75	0.051 8	0.001 24	0.32	0.006 80	0.044 5	0.000 79	274.6	53.9	280.1	5.24	280.7	4.90
028SH020	290	448	0.65	0.052 0	0.001 26	0.32	0.007 02	0.045 0	0.000 80	283.2	54.6	283.8	5.39	283.8	4.96
029SH021	76	146	0.52	0.051 0	0.001 43	0.34	0.008 63	0.047 9	0.000 88	238.6	63.5	294.5	6.56	301.6	5.41
031SH023	537	623	0.86	0.056 7	0.001 34	0.34	0.007 22	0.043 9	0.000 78	477.1	51.7	299.4	5.46	277.0	4.83
032SH024	831	832	1.00	0.051 7	0.001 19	0.32	0.006 54	0.044 7	0.000 79	273.6	52.0	281.0	5.04	281.9	4.89
036SH025	760	816	0.93	0.051 9	0.001 23	0.33	0.006 92	0.045 4	0.000 81	281.3	53.5	285.9	5.30	286.5	5.00

表 3 沙红山岩体主量元素(%)分析结果统计表

Tab. 3 Major element (%) of Shahongshan pluton

岩性	花岗斑岩					正长花岗岩				
样品编号	SHS01	SHS02	SHS03	SHS04	SHS05	SHS06	SHS07	SHS08	SHS09	SHS10
SiO ₂	75.33	75.40	75.89	74.79	75.55	75.70	75.15	76.28	75.46	75.74
Al ₂ O ₃	12.16	12.13	11.90	12.15	12.53	12.43	12.30	12.41	12.48	12.47
Fe ₂ O ₃	2.55	2.50	2.91	1.98	1.97	2.01	2.19	1.95	2.45	2.00
FeO	2.29	2.25	2.62	1.78	1.77	1.80	1.97	1.76	2.21	1.80
CaO	0.60	0.59	0.29	1.05	0.99	0.46	0.64	0.37	0.43	0.41
MgO	0.15	0.14	0.12	0.17	0.18	0.16	0.30	0.18	0.19	0.18
K ₂ O	5.17	5.22	6.01	5.33	4.66	5.04	4.95	4.97	5.01	5.02
Na ₂ O	2.82	2.68	0.00	2.29	2.71	3.20	3.09	3.15	3.23	3.27
BaO	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
TiO ₂	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15
MnO	0.04	0.04	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
LOI	0.81	0.90	2.22	1.67	1.05	0.61	0.92	0.32	0.39	0.54
K ₂ O/Na ₂ O	1.83	1.95	0.00	2.33	1.72	1.58	1.60	1.58	1.55	1.53
A/CNK	1.42	1.43	1.89	1.40	1.50	1.43	1.42	1.46	1.44	1.43
A/NK	1.52	1.54	1.98	1.60	1.70	1.51	1.53	1.53	1.51	1.50

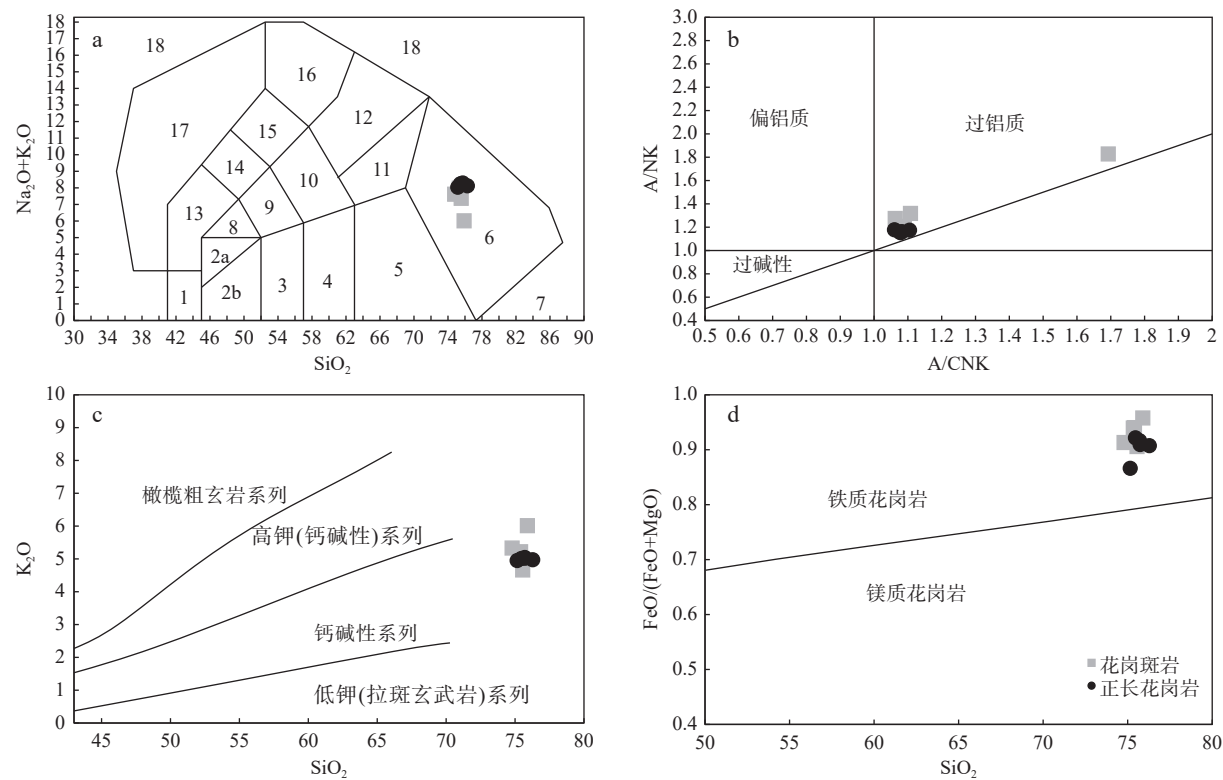


图4 沙红山岩体 TAS 图解(a, 据 Middlemost, 1994)、A/CNK-A/NK 图解(b, 据 Maniar et al., 1989)、亚碱性火山岩分类 K₂O-SiO₂ 图解(c, 据 Peccerillo et al., 1976)、镁铁质花岗岩分类图解(d, 据 Frost et al., 2001)

Fig. 4 (a) Illustration of Shahongshan pluton TAS, (b) diagram of A/CNK-A/NK, (c) K₂O-SiO₂ diagram of subbasic volcanic rock classification, (d) illustration of classification of mafic granite

表 4 沙红山岩体微量元素(10^{-6})分析结果统计表

Tab. 4 Trace element (10^{-6}) of Shahongshan pluton

岩性	花岗斑岩					正长花岗岩				
野外编号	SHS01	SHS02	SHS03	SHS04	SHS05	SHS06	SHS07	SHS08	SHS09	SHS10
Hf	9.43	9.57	8.39	9.57	9.56	4.84	4.72	5.16	5.19	5.11
Ta	1.44	1.52	1.30	1.47	1.51	0.92	1.00	0.99	0.97	0.99
W	10.8	9.80	7.55	7.59	8.39	5.46	6.32	6.83	6.10	5.72
U	2.49	2.49	3.35	2.47	2.45	2.09	1.90	1.83	2.01	1.87
Bi	0.51	0.42	1.10	0.37	0.42	0.11	0.23	0.32	0.12	0.095
Th	20.4	20.5	19.6	20.3	20.1	21.5	20.6	20.2	20.4	20.4
K	42 896	43 319	49 913	44 257	38 711	41 868	41 097	41 298	41 618	41 690
Ti	1 010	998	1 014	1 028	936	867	900	882	881	906
P	96.3	81.8	87.1	102.5	98.7	102.6	98.8	93.3	108.7	102.3
Ba	83.2	146.9	147.2	178.8	125.4	473.8	459.0	457.2	488.4	451.2
F	517	607	546	764	327	351	315	397	321	296
Sn	6.84	6.68	6.29	6.78	6.65	8.72	6.34	8.20	7.46	5.19
Cr	6.92	5.35	5.32	4.53	6.90	7.45	5.73	2.87	7.10	4.73
Li	9.60	10.4	26.2	9.91	6.35	10.5	13.9	10.4	13.7	9.76
Be	1.88	1.96	1.66	2.45	2.16	2.24	2.08	2.12	2.12	2.29
V	6.69	2.99	7.37	5.33	4.08	5.42	6.16	5.32	7.39	5.57
Co	1.47	1.46	0.90	1.04	1.20	1.22	1.53	1.38	1.50	1.36
Ni	1.81	1.87	1.72	1.71	1.57	1.74	1.75	1.44	1.83	1.47
Ga	23.7	24.5	21.0	24.2	24.0	17.0	17.5	17.1	17.4	17.4
Rb	192	200	230	216	183	204	217	206	208	213
Sr	18.7	19.9	19.3	20.1	19.6	30.1	30.2	29.9	33.0	29.1
Y	64.3	69.1	60.1	66.0	68.2	31.1	34.4	31.4	33.2	31.9
Zr	369	363	324	375	368	181	173	188	199	189
Nb	22.1	23.1	20.3	23.0	22.9	10.2	10.8	11.2	10.8	10.4
Cs	3.67	3.54	3.56	3.70	3.49	1.98	2.38	2.00	2.10	1.77

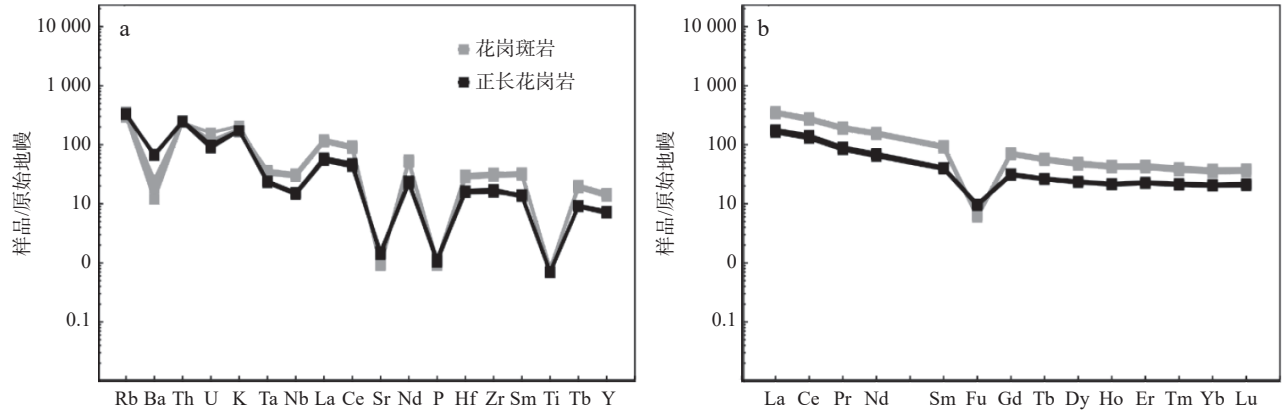


图5 沙红山岩体微量元素原始地幔标准化图(a, 据 Taylor et al., 1985)、
球类陨石标准化稀土元素配分曲线(b, 据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 (a) Standardized diagram of rare earth elements of Shahongshan pluton, and (b) standardized map of trace element

表 5 沙红山岩体稀土元素(10^{-6})分析结果统计表Tab. 5 Rare earth elements (10^{-6}) of Shahongshan pluton

岩性	花岗斑岩					正长花岗岩				
样品编号	SHS01	SHS02	SHS03	SHS04	SHS05	SHS06	SHS07	SHS08	SHS09	SHS10
La	80.2	87.3	77.7	83.2	79.8	37.6	43.0	40.4	40.8	41.7
Ce	161	178	156	170	167	77.2	89.3	84.5	84.1	87.4
Pr	17.7	19.3	17.1	18.2	17.8	7.72	8.75	8.29	8.25	8.48
Nd	70.7	76.8	68.3	73.2	71.0	29.3	33.4	31.8	31.5	32.2
Sm	13.8	15.0	13.3	14.3	14.2	5.83	6.38	6.31	6.08	6.24
Eu	0.37	0.38	0.34	0.37	0.36	0.54	0.57	0.57	0.58	0.58
Gd	14.2	15.3	13.7	14.6	14.5	6.12	6.70	6.62	6.47	6.48
Tb	2.09	2.24	1.98	2.17	2.15	0.95	1.02	1.00	1.00	1.00
Dy	12.1	13.0	11.3	12.6	12.8	5.72	6.18	5.99	6.02	6.00
Ho	2.39	2.58	2.26	2.48	2.54	1.17	1.26	1.20	1.23	1.21
Er	7.10	7.62	6.59	7.35	7.48	3.60	3.89	3.60	3.72	3.69
Tm	0.97	1.06	0.91	1.01	1.04	0.53	0.57	0.52	0.54	0.54
Yb	6.19	6.64	5.68	6.35	6.59	3.40	3.66	3.36	3.54	3.58
Lu	0.94	1.01	0.87	0.97	0.99	0.53	0.56	0.51	0.54	0.55
Σ REE	389.75	426.23	376.03	406.80	398.25	180.21	205.24	194.67	194.37	199.65
LREE	329.60	361.40	319.10	344.60	335.60	151.82	174.45	164.99	164.65	169.78
HREE	60.15	64.83	56.93	62.20	62.65	28.39	30.79	29.68	29.72	29.87

1987; King et al., 2001)。其中 A 型花岗岩自提出以来就一直一直是地质学家热议的话题,从定义、成因、特征到构造环境意义受到广泛的关注与讨论。传统意义上的 A 型花岗岩被定义为“3A”,即贫水的(anhydrous)、碱性的(alkaline)、非造山的(anorogenic)(Loiselle et al., 1979)。随着研究的深入,这些观点在渐渐地过时,定义已经有了很大的变化。A 型花岗岩作为一种形成于伸展环境下特殊的岩石,有着显著的岩石学、矿物学和地球化学特征,对构造环境有着重要的指示意义。早期研究一般认为, I 型花岗岩由壳内变质中基性火成岩部分熔融而来(Chappell et al., 1974)。I 型花岗岩 I 型花岗岩源岩主要是未经地表风化的火成岩,一般是基性程度较高的火成岩、变质火成岩等,显然会继承火成岩的一些性质特征,从地球化学特征上看, I 型花岗岩中 Na 含量比较高, A/CNK(铝饱和指数) <1.1 (杨合群等, 2009; 朱弟成等, 2009; 吴庆, 2014; 张辉等, 2015)。

根据岩石的 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 、Nb、Ce 等参数可以有效区分 A 型花岗岩, 样品中肉红色花岗斑岩 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 平均值为 3.64, Zr 含量平均值为 360×10^{-6} , Ce

含量平均值为 166×10^{-6} , 数据全部高于 A 型花岗岩下限值($10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}=2.6$, $\text{Zr}=250 \times 10^{-6}$, $\text{Ce}=148 \times 10^{-6}$)(Whalen et al., 1987)。肉红色正长花岗岩 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 平均值为 2.63, Zr 含量平均值为 186×10^{-6} , Ce 含量平均值为 85×10^{-6} , Zr、Ce 的含量低于 A 型花岗岩下限值。在 SiO_2 -Nb 图解和 SiO_2 -Ce 图解上, 花岗斑岩和正长花岗岩分别落于 A 型、I 型花岗岩区域; 在 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ -Zr 图解、 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ -Ce、 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ -Nb 图解中(图 6), 肉红色花岗斑岩样品落入 A 型花岗岩区域, 肉红色正长花岗岩落入 I 型花岗岩区域和 A 型花岗岩的分界线上。因此判定肉红色花岗斑岩和正长花岗岩的分别是 A 型花岗岩和 I 型花岗岩。

前文提到沙红山岩体的肉红色花岗斑岩为 A 型花岗岩。花岗质岩石主要来源于地壳岩石的部分熔融(吴福元等, 2007), 幔源岩浆和壳源岩浆的 Nb/Ta 值分别为 17.5 和 11~12, 肉红色花岗斑岩的 Nb/Ta 值为 15.17~15.65, 平均值为 15.39, 稍高于壳源岩浆的 Nb/Ta 值。笔者认为肉红色花岗斑岩的花岗质岩浆来源主要是壳源物质, 岩浆形成过程中可能有少量的幔源物质混入。

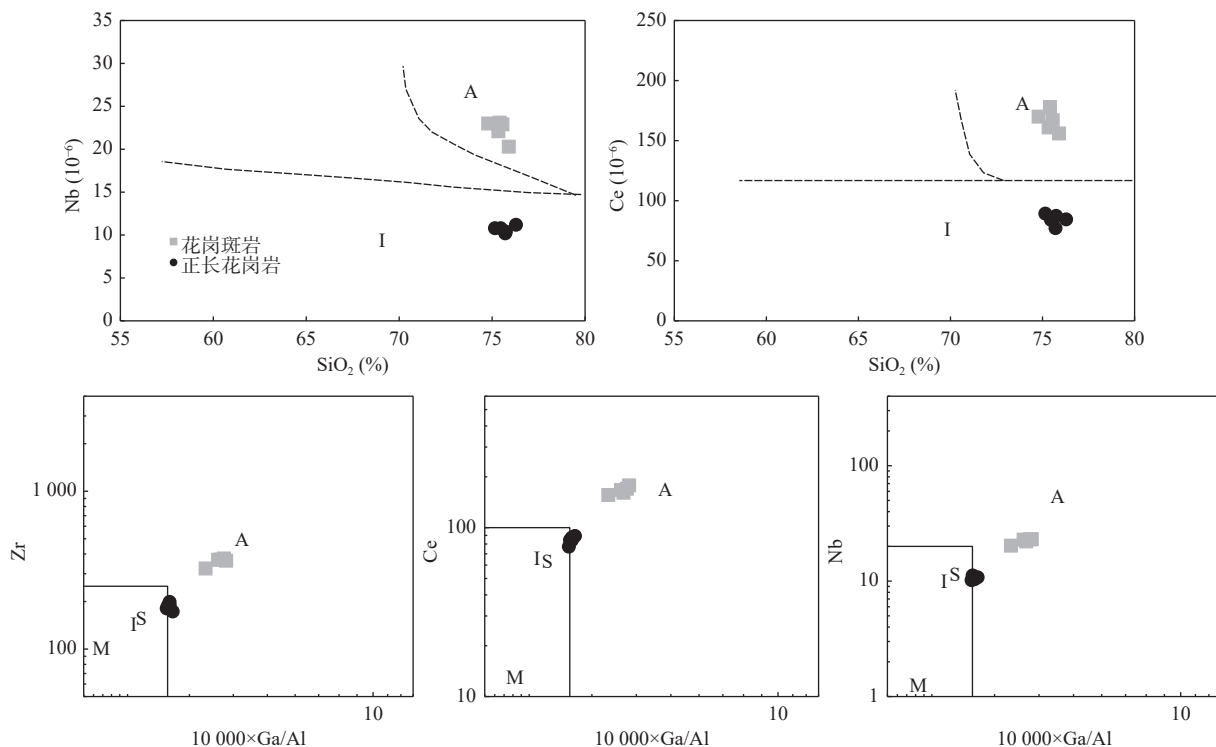


图6 沙红山岩体花岗岩分类图解(底图据 Eby, 1990, 1992)

Fig. 6 Classification diagram of granite of Shahongshan pluton

沙红山岩体的正长花岗岩属于I型花岗岩,I型花岗岩的成因一般主流观点有以下3个:①幔源岩浆侵位发生大范围的结晶分异和同化混染作用产生的岩浆形成I型花岗岩(Chappell et al., 1974, 1991),这个模式形成的I型花岗岩具有较为宽泛的成分变化范围,并且通常与一系列同源的堆晶岩等中基性岩石密切共生;②由下地壳变质火成岩部分熔融形成,可能会有地幔物质的参与(Kemp et al., 2007);③由幔源岩浆改造的地壳沉积物重熔而成,此过程形成的I型花岗岩多具有成分不均一的锆石 Hf 同位素(Collins et al., 2008)。

研究区在早二叠世,进入后碰撞拉伸环境,但造山作用尚未结束,局部存在挤压应力。部分脆弱的岩石圈过早地发生拆沉作用,引起地幔底辟上升部分熔融而形成玄武岩浆,这种原始岩浆在上升过程中引起下地壳基性火成岩的熔融,熔融体上升侵位,经过强烈的分离结晶。随后,玄武岩浆底侵作用又导致下地壳物质及上地壳物质的部分熔融,在岩浆上升过程中可能发生不同程度的调整作用,包括分离结晶作用、同化混染作用及混合作用,最终形成沙红山岩体中的肉红色正长花岗岩。

在元古代经历了漫长的地质演化之后,调查区及

其邻近地区的陆壳逐渐成熟。进入古生代,北山地区迎来了陆块裂解和陆内裂谷发展演化的重要阶段。

在早古生代,北山地区受到塔里木东北缘板块活动的影响,开始了新一轮的裂解过程。在凤凰山幅图幅北部的古铜井地区,寒武纪时期沉积了一套由碳泥质岩、碳酸盐岩和含磷碎屑岩组成的建造。到了早奥陶世,裂解规模进一步扩大,部分地区在加里东晚期出现了洋盆型的沉积建造。早志留世早期,阿木乌苏地区主要处于拉张环境,这期间形成了工作区南西部早古生代中酸性侵入岩,这些侵入岩侵入了北山群。随后,随着区域应力由拉张转变为相对挤压,早古生代中晚期的裂陷海盆开始收缩,形成了以玄武岩为主的岛弧相公婆泉组,以及浅海相的碎屑岩和火山碎屑岩沉积建造。志留纪末期,加里东运动的发生导致早古生代的裂解海槽受到挤压而闭合,地层经历了浅变质和弱变形。与此同时,在调查区北东部的多头山一带,形成了总体属于挤压-地壳重熔型的花岗岩。晚古生代,特别是石炭纪—二叠纪,调查区进入了构造岩浆作用的活跃期。石炭纪开始,新的大规模拉张导致北山陆内裂谷自东向西扩展,影响了调查区,使其卷入裂谷构造活动。早石炭世,随着拉张作用的持续,在旱山地块和敦煌地块之间发育了规模较大的区域

性断裂,主要沉积区位于黑石山一带。晚石炭世晚期,区域应力由拉张转为挤压,裂谷海盆收缩,海水变浅,火山活动加剧。华力西中期构造运动导致石炭纪裂谷海盆闭合,表现为浅变质和强变形特征,同时发生了区域低温动力热流变质,局部形成了变质沉积型铁矿。进入二叠纪早期,区域应力再次转为拉张,调查区及相邻地区出现新的拉张裂解,虽然裂解范围较小,强度不大,但伴随着裂解作用,沙红山、月牙山、黑石山和北卧虎山等地发生了岩浆活动。二叠纪早期沉积区位于红柳井、凤凰山一带,沉积了一套浅海相细碎屑岩建造。中二叠世末期,华力西晚期构造运动导致二叠纪裂谷彻底关闭,地层褶皱回返造山,结束了海相沉积历史。调查区发育了一系列逆冲断层和褶皱,地层发生了低绿片岩相变质。强烈的收缩挤压作用导致地壳下部物质局部熔融,形成了中酸性岩浆,并在构造薄弱地带多次侵位,形成了、月牙山、黑石山、北卧虎山、阿木乌苏等中酸性侵入岩和辉长岩基性侵入岩,以及一系列近EW向、NW向的基性岩脉。至此,北山地区完成了盆山转化,调查区及相邻地区的地形地貌和地质构造格局基本形成。

构造背景、形成时代和主微量元素特征的综合分析表明,沙红山岩体的岩石成因与以下因素密切相关。北山地区在晚石炭世末至早二叠世期间,经历了哈萨克斯坦板块和塔里木板块的弧-弧碰撞,导致了碰撞造山作用,结束了大洋及板块的演化格局,并进入了板内裂谷阶段。这一碰撞造山事件与古亚洲洋的闭合有关,发生在二叠纪—早三叠世,随后进入后造山环境。北山地区的构造活动与北侧汇聚岛弧边界大致平行,表明该地区的岩浆活动与区域构造线展布方向一致,是同一构造活动的产物。LA-ICP-MS方法测定的沙红山岩体的锆石 U-Pb 年龄为 $(294.7 \pm 4.0)\text{Ma}$ 和 $(284.2 \pm 4.0)\text{Ma}$, 表明其形成时代为早二叠世,与区域构造演化阶段相符。

在主微量元素特征上,沙红山岩体的花岗斑岩和正长花岗岩具有高 SiO_2 、 K_2O 和 Na_2O 含量,属于钙碱性-高钾钙碱性系列,过铝质系列,显示出高铁低镁的特征。微量元素和稀土元素特征表明,岩石相对富集大离子亲石元素和强不相容元素,亏损高场强元素,这与造山带弧岩浆作用形成的钙碱性系列岩石特征相似。稀土元素总量偏低,轻重稀土分馏明显,具有明显的 Eu 负异常,这反映了岩浆源区斜长石的分离结晶作用。

综合判断分析,沙红山岩体的岩石成因与晚石炭世至早二叠世的弧-弧碰撞造山作用密切相关,这一过程导致了岩浆的上升和侵入。岩体的主微量元素特征表明,其源区可能经历了斜长石的分离结晶作用,形成了具有特定地球化学特征的岩石。沙红山岩体的形成是古亚洲洋闭合过程中的一个重要地质事件,其岩石成因反映了区域构造演化与岩浆活动的相互作用。因此,沙红山岩体的岩石成因可以解释为在古亚洲洋闭合背景下,由板块碰撞造山作用引发的岩浆活动所形成的结果。

4.3 构造背景

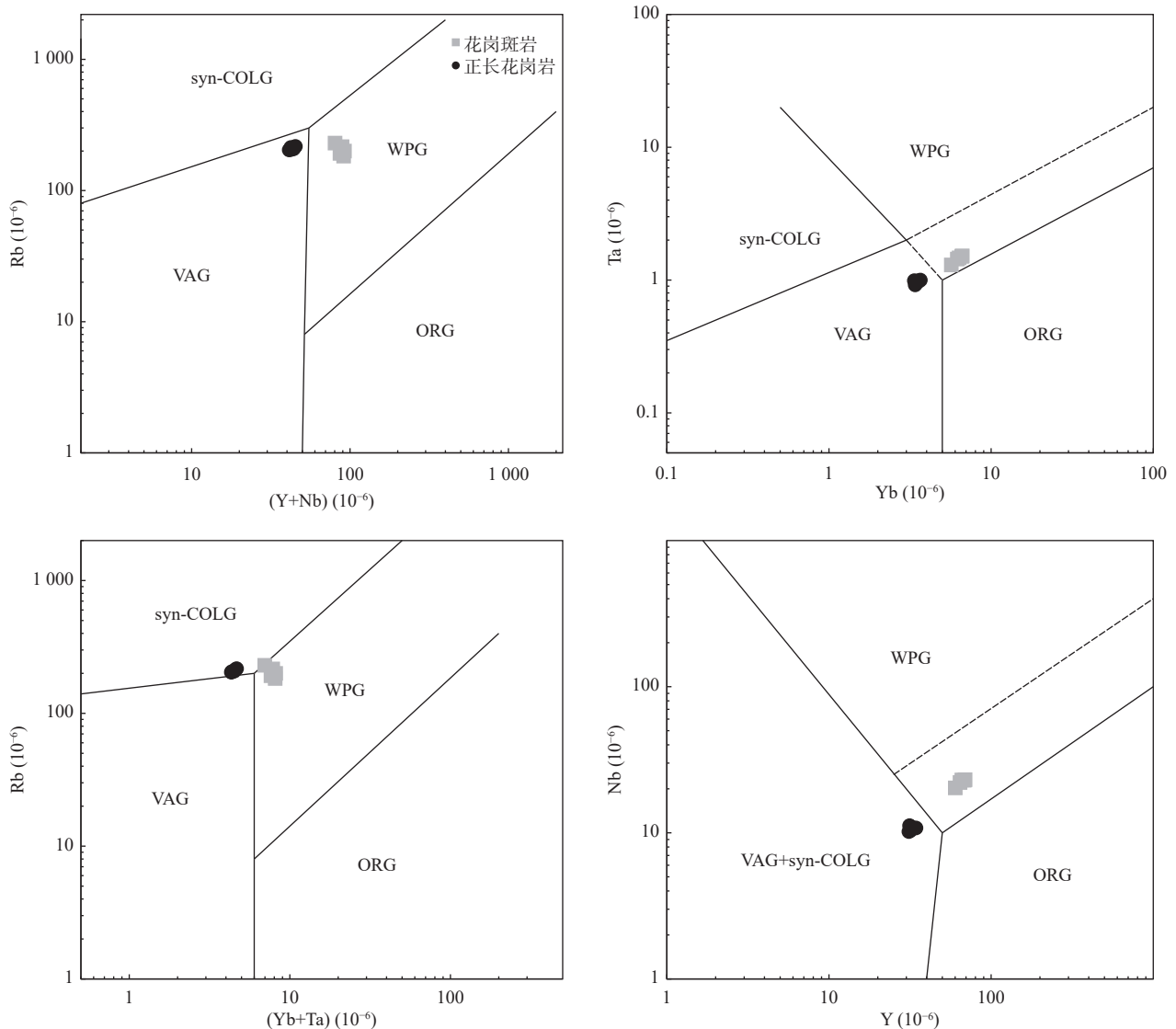
结合区域上来看,研究区内发育多期的岩浆活动,并不是孤立的岩浆事件,通过近年来的不断研究,越来越多的证据表明北山地区与古亚洲洋闭合有关的造山作用发生在二叠纪—早三叠世,于中—晚三叠世进入后造山环境,这是基于北山造山带西段大区域范围缺失三叠纪的沉积记录或局部发育磨拉石建造所反映强烈隆升作用提出的(左国朝等, 1990; 袁禹, 2019; 李敏等, 2019)。北山西侧相邻的中南天山地区发现三叠纪的高压—超高压榴辉岩,而在东侧相邻的内蒙古地区发育三叠纪的同碰撞花岗岩。北山地区上二叠统为陆相火山岩(如方山口组)和陆源碎屑岩建造,如红岩井组具残留盆地建造特征,说明该地区初始碰撞可能发生于早二叠世末(李敏等, 2019; 赵鹏彬等, 2019)。这些证据表明,北山地区最终碰撞造山作用应大体发生在晚古生代晚期,并有可能持续到早中生代初。北卧虎山正长花岗岩体、黑石山东二长—正长花岗岩体与区域构造线展布方向一致,同时也与北侧汇聚岛弧边界大致平行,其成岩时代大致相近,符合构造活动的规律(修群业, 1999)。这印证了沙红山岩体正长花岗岩和花岗斑岩经历了同一时期的造山运动和古亚洲洋的闭合过程,在时空上是属于同一时代的产物。

甘肃北山地区古生代主要经历3个构造演化阶段:①长城纪蓟县纪为古陆裂解及洋盆扩张阶段;②志留纪泥盆纪为板块俯冲及碰撞造山阶段;③石炭纪二叠纪为陆内裂谷阶段(左国朝等, 1990; 杨合群等, 2006; 袁禹, 2019)。北山造山带南缘区域岩浆活动强烈,侵入岩极为发育,以加里东期中酸性、华力西期中酸性侵入岩、印支期酸性侵入岩为主,构成小岩基或岩株(杨合群等, 2009; 王二腾等, 2022)。根据岩体侵入地层的时代、同位素测年资料、岩体的空间展布及

穿插关系、变质变形等特征。研究区区域上北侧在晚石炭世末哈萨克斯坦板块和塔里木板块以弧—弧碰撞的方式发生碰撞造山,结束了红石山—百合山—蓬勃山大洋及板块演化格局,早二叠世进入板内演化阶段,主要形成板内裂谷环境(王廷印等, 1993; 杨建国等, 2012)。受此次碰撞造山的远程效应影响,区内由北向南经历了后造山期构造活动(王廷印等, 1993)。

为了判别沙红山岩体的构造环境,笔者利用 Rb-Y+Nb, Ta-Yb, Rb-Yb+Ta, Nb-Y 等构造判别图(图 7),所有判别图落入至同碰撞火山弧花岗岩和板内花岗岩区域。结合区域构造演化。研究发现,沙红山岩体整体表现为亏损高场强元素 Ba、Ta、Nb、Ti、P 等,与

造山带弧岩浆作用形成的钙碱性系列岩石特征相似,岩体具有显著的 Nb、Ta 亏损,指示其壳源的性质。沙红山岩体稀土总量偏低,变化范围较小,轻稀土总量明显高于重稀土总量,球粒陨石标准化曲线明显右倾, La_N/Yb_N 值为 7.93~9.81,平均值为 8.82。轻重稀土分馏较为明显;样品具有明显的 Eu 负异常。目前越来越多的证据表明,北山地区发生在二叠纪—早三叠世的造山作用和古亚洲洋闭合联系紧密。综合判断认为古亚洲洋在早二叠世的构造演化阶段应该属于俯冲—碰撞环境。在晚石炭世调查区碰撞挤压造山,至晚石炭世末,主要造山阶段结束,早二叠世早期,区内进入后碰撞拉伸环境,但造山作用尚未结束,局部存



syn-COLG. 同碰撞型; VAG. 火山弧型; WPG. 板内型; ORG. 洋中脊型; post-COLG. 后碰撞型

图7 沙红山岩体构造环境判别图解(据 Pearce et al., 1984)

Fig. 7 Illustration of the tectonic environment of Shahongshan pluton

在短暂的挤压应力。沙红山岩体具有很低的 Sr 与高 Yb 特征, 这指示地壳减薄即拉伸的地壳环境, 与石炭纪至晚二叠世之前处于板内裂谷环境观点一致。综上所述, 笔者认为沙红山岩体形成于板内构造环境。

5 结论

(1) 沙红山岩体具有肉红色花岗斑岩和肉红色正长花岗岩两种岩性的花岗质岩石。锆石 U-Pb 同位素研究表明, 两种岩性的锆石 U-Pb 年龄加权平均值分别为 (294.7 ± 4.0) Ma、 (284.2 ± 4.0) Ma, 表示沙红山岩体属于早二叠世岩浆活动的产物。

(2) 沙红山花岗岩体属于钙碱性-高钾钙碱性系列的花岗质岩石, 肉红色花岗斑岩具 A 型花岗岩特征, 肉红色正长花岗岩具有 I 型花岗岩特征, 岩浆源区指示花岗岩的源区主要为下地壳, 可能有少量的幔源物质混入。

(3) 构造环境判别显示该岩体形成于拉伸及地壳减薄的板内裂谷环境, 形成于早二叠世后碰撞伸展环境, 为北山南带于早二叠世晚期进入后碰撞裂谷阶段提供了依据。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献 (References):

- 陈阳阳, 段俊, 徐刚, 等. 甘肃北山地区晚三叠世煌斑岩地球化学特征及构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 78-94.
- CHEN Yangyang, DUAN Jun, XU Gang, et al. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Late Triassic Lamprophyre in the Beishan Region, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 78-94.
- 丁书宏. 甘肃北山前红泉金矿床绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(2): 173-183.
- DING Shuhong. ^{40}Ar - ^{39}Ar Age of Sericite and Its Geological Significance in Qianhongquan Gold Deposit, Beishan Area, Gansu Province[J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(2): 173-183.
- 陈耀, 张成, 张青, 等. 内蒙古北山成矿带月牙山-老硐沟地区金多金属矿床成矿预测[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 151-162.
- CHEN Yao, ZHANG Cheng, ZHANG Qing, et al. Metallogenic Regularity and Prospecting Prediction of Gold Polymetallic Deposits in Yueyashan-Laodonggou Area of Beishan Metallogenic Belt, Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 151-162.
- 龚全胜, 刘明强, 梁明宏, 等. 北山造山带大地构造相及构造演化[J]. 西北地质, 2003, 36(1): 11-17.
- GONG Quansheng, LIU Mingqiang, LIANG Minghong, et al. The tectonic facies and tectonic evolution of Beishan orogenic belt, Gansu[J]. Northwestern Geology, 2003, 36(1): 11-17.
- 江思宏, 聂凤军. 北山地区花岗岩类成因的 Nd 同位素制约[J]. 地质学报, 2006, 80(6): 826-842.
- JIANG Sihong, NIE Fengjun. Nd-Isotope Constraints on Origin of Granitoids in Beishan Mountain Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(6): 826-842.
- 李敏, 辛后田, 任邦方, 等. 内蒙古哈珠地区晚古生代花岗岩类成因及其构造意义[J]. 地球科学, 2019, 44(1): 328-343.
- LI Min, XIN Houtian, REN Bangfang, et al. Petrogenesis and Tectonic Significance of the Late Palaeozoic Granitoids in Hazhu Area, Inner Mongolia[J]. Earth Science, 2019, 44(1): 328-343.
- 刘诚, 唐卫东, 杨凯, 等. 荒漠浅覆盖区萤石矿定位预测技术研究[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 144-156.
- LIU Cheng, TANG Weidong, YANG Kai, et al. Research on Location and Prediction Technology of Fluorite Deposits in Shallow Desert Coverage Area[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 144-156.
- 刘天航, 唐卫东, 高永宝, 等. 内蒙古北山花石头山萤石矿床成因: 萤石微量、稀土和 H-O 同位素制约[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 66-79.
- LIU Tianhang, TANG Weidong, GAO Yongbao, et al. Genesis of the Huashitoushan Fluorite Deposit, Beishan, Inner Mongolia: Constraints from Trace Elements, REE and H-O Isotope Geochemistry of Fluorite[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 66-79.
- 田健, 滕学建, 辛后田, 等. 北山造山带白云山地区蛇绿混杂岩结构、组成特征与形成时代[J]. 岩石学报, 2020, 36(12): 3741-3756.
- TIAN Jian, TENG Xuejian, XIN Houtian, et al. Structure, composition and ages of ophiolitic mélanges in the Baiyunshan area, Beishan Orogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(12): 3741-3756.
- 王必任, 滕超, 白相东, 等. 北山造山带尖山子新元古代早期似斑状花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 44-57.
- WANG Biren, TENG Chao, BAI Xiangdong, et al. Age, Geochemistry and Geological Significance of an Early Neoproterozoic Porphyritic Granite in the Jianshanzi Area of the Beishan Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 44-57.
- 王二腾, 武磊, 翟新伟, 等. 中亚造山带南缘甘肃北山地区花牛山闪长玢岩地球化学特征及地质意义[J]. 地球科学, 2022,

- 47(9): 3285–3300.
- WANG Erteng, WU Lei, ZHAI Xinwei, et al. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Implications of Huaniushan Diorite Porphyrite from the Gansu Beishan Area in the Southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Earth Science*, 2022, 47(9): 3285–3300.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 甘肃北山墩墩山一带泥盆系三个井组与墩墩山群火山岩地球化学特征及形成环境[J]. *地质论评*, 2015, 61(S1): 730–732.
- WANG Guoqiang, LI Xiangmin, XU Xueyi, et al. Geochemical characteristics and formation environment of volcanic rocks in three Devonian well formations and Dendunshan Group in Dendunshan, Beishan, Gansu[J]. *Geological Review*, 2015, 61(S1): 730–732.
- 王涛. 花岗岩研究与大陆动力学[J]. *地学前缘*, 2000, 7(S2): 137–146.
- WANG Tao. Studies on granites and continental dynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(S2): 137–146.
- 王廷印, 王金荣, 刘金坤, 等. 华北板块和塔里木板块之关系[J]. *地质学报*, 1993, 67(4): 287–300+387.
- WANG Tingyin, WANG Jinrong, LIU Jinkun, et al. Relationships between the north China and tarim Plates[J]. *Acta Geological Sinica*, 1993, 67(4): 287–300+387.
- 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.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, YANG Jinghui, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- 吴庆. 内蒙古科右中旗地区花岗斑岩岩石成因及构造背景[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- WU Qing. Petrogenesis and tectonic setting of granite porphyry in Keyouzhongqi area, Inner Mongolia[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- 校培喜, 由伟丰, 董增产, 等. 甘肃北山小草湖火山岩系形成时代的重新厘定[J]. *地质通报*, 2010, 29(9): 1268–1274.
- XIAO Peixi, YOU Weifeng, DONG Zengchan, et al. The re-definition of formation age of Xiaocaohu volcanic rocks in Beishan area, Gansu Province, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(9): 1268–1274.
- 修群业. 甘肃北山地区花岗岩类地球化学特征及大地构造意义[J]. *前寒武纪研究进展*, 1999, 22(1): 31–39.
- XIU Qunye. Geochemical characteristics and tectonic significance of the granitoids in Beishan area, gansu province[J]. *Progress In Precambrian Research*, 1999, 22(1): 31–39.
- 徐夕生, 王孝磊, 赵凯, 等. 新时期花岗岩研究的进展和趋势[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2020, 39(5): 899–911+1069.
- XU Xisheng, WANG Xiaolei, ZHAO Kai, et al. Progresses and Tendencies of Granite Researches in Last Decade: A Review[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2020, 39(5): 899–911+1069.
- 杨合群, 李英, 杨建国, 等. 北山造山带的基本成矿特征[J]. *西北地质*, 2006, 39(2): 78–95.
- YANG Hequn, YANG Ying, YANG Jianguo, et al. Main Metallogenic Characteristics in the Beishan Orogen[J]. *Northwestern Geology*, 2006, 39(2): 78–95.
- 杨合群, 李英, 李文明, 等. 北山花岗岩 S 型/I 型空间变化规律及含矿性[J]. *地球学报*, 2009, 30(5): 627–633.
- YANG Hequn, LI Ying, LI Wenming, et al. Spatial Variation Regularity and Ore Potential of S-type and I-type Granites in the Beishan Mountain[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2009, 30(5): 627–633.
- 杨建国, 谢春林, 王小红, 等. 甘肃北山地区基本构造格局和成矿系列特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(S1): 422–438.
- YANG Jianguo, XIE Chunlin, WAN Xiaohong, et al. Basic tectonic framework and features of metallogenic series in Beishan area, Gansu Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(S1): 422–438.
- 杨镇熙, 丁书宏, 张晶, 等. 甘肃北山南带前红泉金矿的发现及其找矿意义[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 274–284.
- YANG Zhenxi, DING Shuhong, ZHANG Jing, et al. The Discovery and Prospecting Significance of the Qianhongquan Gold Deposit in the South Beishan Orogenic Belt, Gansu Province, China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 274–284.
- 袁禹. 北山造山带大陆地壳的形成与演化[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- YUAN Yu. The continental crust formation and evolution of the Beishan Orogenic Belt[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.
- 查显锋, 黄博涛, 罗克勇, 等. 北山造山带南缘潘家井子二叠纪弧岩浆岩的识别及构造意义[J]. *西北地质*, 2024, 57(6): 58–77.
- ZHA Xianfeng, HUANG Botao, LUO Keyong, et al. Identification of the Permian Arc-Related Magmatic Rocks and Its Significance in Panjiayingzi Area, Southern Margin of Beishan Orogenic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(6): 58–77.
- 张辉, 戴朝成, 闫秋实, 等. 内蒙古大桦背 I 型花岗岩地球化学特征及其成因意义[J]. *地质与资源*, 2015, 24(1): 12–19+69.
- ZHANG Hui, DAI Chaocheng, YAN Qiushi, et al. Geochemical characteristics and petrogenetic implication of the I-type DahuaBei granite platon in Inner Mongolia[J]. *Geology and Resources*, 2015, 24(1): 12–19+69.
- 赵鹏彬, 李维成, 罗乾周, 等. 内蒙北山鹰嘴红山花岗岩体形成时代及构造环境分析[J]. *西北地质*, 2019, 52(4): 1–13.
- ZHAO Pengbin, LI Weicheng, LUO Qianzhou, et al. Formation Age and Tectonic Environment of Yingzuihongshan Granite in Beishan, Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 1–13.

- 郑荣国, 吴泰然, 张文, 等. 北山地区月牙山-洗肠井蛇绿岩的地球化学特征及形成环境[J]. 地质学报, 2012, 86(6): 961–971.
- ZHENG Rongguo, WU Tairan, ZHANG Wen, et al. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting and of the Yueyashan-Xichangjing Ophiolite in the Beishan Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(6): 961–971.
- 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 等. 西藏冈底斯东部察隅高分异I型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2009, 39(7): 833–848.
- ZHU Dicheng, MO Xuanxue, WANG Quanli, et al. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Chayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. Science in China(Series D), 2009, 39(7): 833–848.
- 左国朝, 何国琦, 张扬, 等. 北山板块构造及成矿规律 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1990.
- Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geology, 1974, 8: 173–174.
- Chappell B W, White A J R. Restite enclaves and the restite model. Enclaves and granite petrology[J]. Elsevier Amsterdam, 1991, 13: 479–492.
- Collins W J, Richards S W. Geodynamic significance of S-type granites in circum-Pacific orogens[J]. Geology, 2008, 36(7): 559.
- Eby G Nelson. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. Lithos, 1990, 26(1–2): 115–134.
- Eby G Nelson. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. Geology, 1992, 20(7): 641.
- Frost B Ronald, Barnes Calvin G, Collins William J, et al. A Geochemical Classification for Granitic Rocks[J]. Journal of Petrology, 2001, 42(11): 2033–2048.
- King P L, Chappell B W, Allen C M, et al. Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangra Suite[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2001, 48(4): 501–514.
- Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G L, et al. Magmatic and Crustal Differentiation History of Granitic Rocks from Hf-O Isotopes in Zircon[J]. Science, 2007, 315(5814): 980–983.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1535–1546.
- Loiselle M C. Characteristics and origin of anorogenic granites[A]. Geological Society of America Abstracts with Programs[C], 1979, 11: 468.
- Middlemost Eric A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37(3): 215–224.
- Maniar Papu D, Piccoli Philip M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635–643.
- Peccerillo Angelo, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63–81.
- 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.
- Raimondo Tom, Collins Alan S, Hand Martin, et al. The anatomy of a deep intracontinental orogen[J]. Tectonics, 2010, 29(4): n/a–n/a.
- Sláma Jiří, Košler Jan, Condon Daniel J, et al. Plešovice zircon — A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. Chemical Geology, 2008, 249(1–2): 1–35.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- Taylor Stuart R, McLennan Scott M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution: An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- Whalen Joseph B, Currie Kenneth L, Chappell Bruce W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407–419.