



引文格式: 代新宇, 周斌, 李新林, 等. 西昆仑奇台达坂北中新世石英二长岩侵入岩年代学、地球化学及其构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 191–205. DOI: 10.12401/j.nwg.2023188

Citation: DAI Xinyu, ZHOU Bin, LI Xinlin, et al. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of Miocene Quartz Monzonite from the Northern of Qitai Mountain in Western Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 191–205. DOI: 10.12401/j.nwg.2023188

西昆仑奇台达坂北中新世石英二长岩侵入岩年代学、地球化学及其构造意义

代新宇^{1,2}, 周斌¹, 李新林^{1,2,*}, 杜彪¹, 范鹏¹, 赵江林¹, 杨文博¹, 武忠山¹

(1. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省地质调查规划研究中心, 陕西 西安 710068)

摘要: 奇台达坂位于新疆西昆仑新藏公路 540 km 处, 在其北侧分布有小规模的中酸性侵入岩, 呈 NE 向展布, 岩性主要为石英二长岩。笔者以西昆仑地区东段奇台达坂北石英二长岩侵入体为研究对象, 进行岩石地球化学、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析。结果表明, 石英二长岩锆石 U-Pb 年龄加权平均值为 (10.4 ± 0.2) Ma, 形成时代为中新世; 岩石具有高 SiO_2 (63.16%~68.20%)、贫 Al_2O_3 (13.39%~15.47%)、高 K_2O (4.23%~5.24%)、低 MgO (1.06%~1.49%)、低 TiO_2 (0.60%~0.83%)、准铝质 ($A/\text{CNK}=0.83 \sim 0.90$) 的地球化学性质, 具有 A 型花岗岩特征; 富集 K、Rb、Th、U 而亏损 Ba、Sr 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, δEu 具明显的负异常特征。岩石的地球化学特征和构造环境判别图解均指示, 石英二长岩可能形成于深部岩石圈强烈伸展的环境下, 地壳深部形成高温低压环境, 促使下地壳发生低程度部分熔融并沿深大断裂快速上升侵位, 代表了板内伸展背景作用下的岩浆响应。

关键词: 奇台达坂北; 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; 板内伸展

中图分类号: P588.12; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)04-0191-15

Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of Miocene Quartz Monzonite from the Northern of Qitai Mountain in Western Kunlun

DAI Xinyu^{1,2}, ZHOU Bin¹, LI Xinlin^{1,2,*}, DU Biao¹, FAN Peng¹, ZHAO Jianglin¹, YANG Wenbo¹, WU Zhongshan¹

(1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Geological Survey Planning Research Center, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: Qitai Mountain is located in Xinjiang-Xizang Highway 540 km west of Xinjiang Kunlun area, there are small-scale medium acid intrusive rocks distributed around it, the lithology is mainly composed of the quartz monzonite. Here we present bulk-rock geochemistry, zircon U-Pb geochronology of the Miocene quartz mon-

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2023-08-11; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中国地质调查局项目“新疆西昆仑地区 1:5 万 144E002006 等四幅区调”(1212011220654), 陕西省地质勘查基金“陕西典型小岩体成矿预测与勘查示范”(61201908334)联合资助。

作者简介: 代新宇(1967-), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质调查工作。E-mail: 505971533@qq.com。

* 通讯作者: 李新林(1966-), 男, 正高级工程师, 主要从事区域地质调查和成矿规律研究工作。E-mail: 541475896@qq.com。

zonite in Qitai Mountain in Western Kunlun in order to shed light on this issue. Zircon U–Pb dating yielded Miocene ages of (10.4 ± 0.3) Ma. Geochemically, this early Miocene quartz monzonite is A-type granites with high SiO_2 (63.16%~68.20%), K_2O (4.23%~5.24%), and low Al_2O_3 (13.39%~15.47%), MgO (1.06%~1.49%), TiO_2 (0.60%~0.83%). They are enriched in light rare earth elements (LREEs), large ion lithophile elements (LILEs, including K, Rb, Th, U, Ba and Sr), but depleted in high-field strength elements (Nb, Ta and Ti) and heavy rare earth elements (HREEs), and have obvious negative Eu anomalies. The geochemical characteristics of the rocks and the tectonic setting diagram indicate that the quartz monzonites may have been formed in an environment where the deep lithosphere was strongly extended, and a high temperature and low pressure environment was formed in the deep crust, which prompted a low degree of partial melting of the lower crust and rapid along deep and large faults. The uplift emplacement represents the magmatic response to the intraplate extensional background. We suggest that the Miocene magmas from the northern of Qitai Mountain in Western Kunlun were likely sourced from low-degree partial melting of the lower crust with a high temperature and low pressure environment, there may have formed in the background of strong extension of the deep lithosphere, which promotes the magmas rapid uplift along deep and large faults.

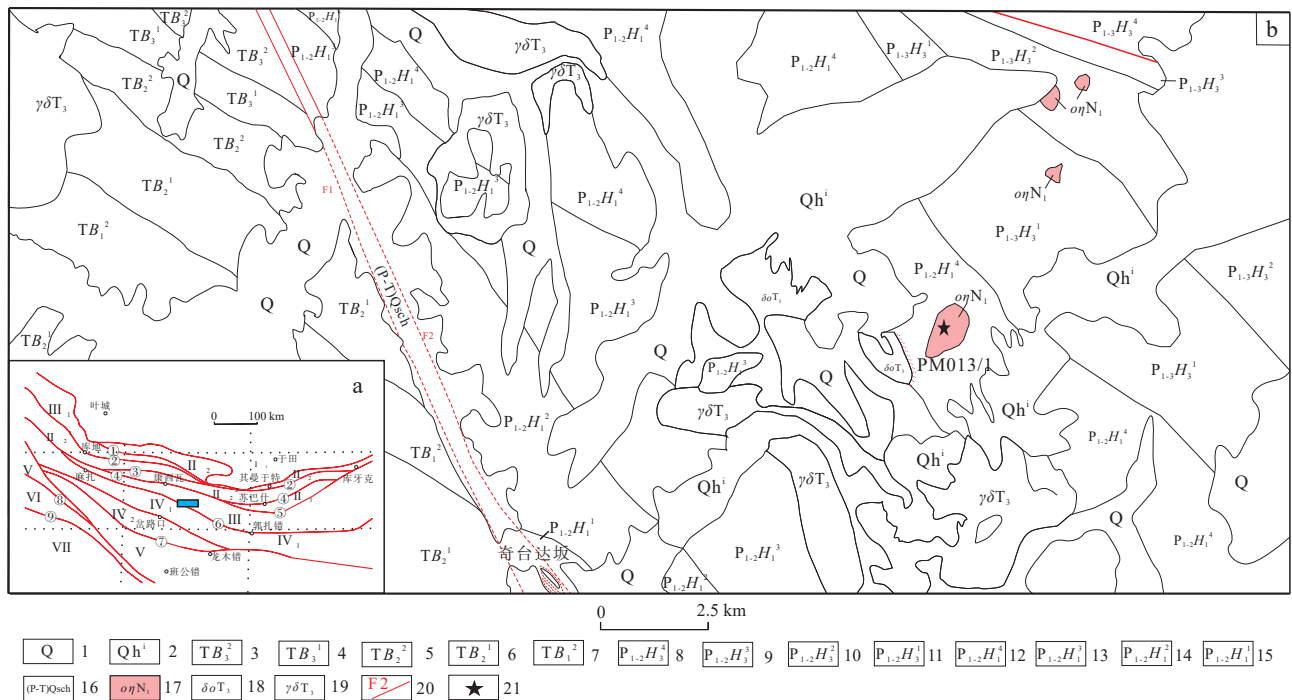
Keywords: the northern of Qitai Mountain; zircon LA-ICP-MS age; geochemistry; intraplate extension

西昆仑地区位于西藏西北部和新疆西南部中间地带,是古亚洲、秦祁昆和特提斯三大古构造域的结合部位(任纪舜, 1999; 计文化, 2005; 莫宣学等, 2006),显生宙以来经历了原特提斯和古特提斯两大构造域的复合演化,形成岩浆活动期次多、岩浆类型复杂的一个大型构造岩浆岩带,岩浆岩主要形成于三叠纪至新近纪,年龄集中在 258~210 Ma, 172 Ma, 18~3 Ma。基于刻画早、中三叠世受印支运动影响而最终导致的古特提斯洋盆闭合和继而发生的碰撞造山过程,前人对西昆仑地区的岩浆岩研究主要集中在三叠世—侏罗世(张玉泉等, 1998; 袁超等, 1999; 姜耀辉等, 1999; 崔建堂等, 2006; 张传林等, 2007; 李荣社等, 2008; 杨文强等, 2011; 康磊等, 2012; 乔耿彪等, 2015; 赵江林等, 2017)。区域上在西昆仑地区和羌塘微板块之间广泛分布着一系列新生代高钾钙碱性火山岩,在众多的前人研究资料中,对新生代岩浆岩研究侧重于火山岩方面,主要分布在普鲁、阿什库勒湖、泉水沟、大红柳滩、奇台达坂等地(刘嘉麒等, 1990, 1999; 边千韬等, 1992; Arnaud, 1992; 张以佛, 1996; 邓万明等, 1998a, 1998b; 丁林等, 1999; 赖绍聪等, 1999; 罗照华等, 2000; 朱弟成等, 2003; 莫宣学等, 2007; Zhang et al., 2008; 肖爱芳等, 2010),而同时代侵入岩鲜为报导。新生代侵入岩作为板块俯冲、碰撞等深部地质过程的浅表响应,是探索新生代以来高原岩石圈的组成和演化、壳幔交互作用以及高原隆升机制的“天然场所”,一直为国内

外地学研究者关注的热点。受地质调查程度和自然条件限制,在奇台达坂北无新近纪侵入岩研究报道。笔者在奇台达坂一带开展基础地质调查工作时,在新藏公路奇台达坂北东约 10~20 km、海拔 5380 m 的黄羊岭群上板岩组、下砂板岩组中新发现中酸性侵入体 4 处(图 1),对其开展了岩石学、全岩地球化学和锆石 U–Pb 年代学分析,对该期侵入体的岩石成因、岩浆源区及构造环境进行了探讨,为新生代构造–岩浆演化提供新的证据。

1 区域地质背景及岩体地质特征

研究区处于西昆仑–喀喇昆仑造山带,以郭扎错–金沙江缝合带为界,南、北分别为甜水海–北羌塘微陆块群、巴颜喀拉晚古生代—中生代边缘裂陷带两个二级构造单元,经历了长期的、多体制、多机制的构造演化,形成了复杂的构造格局和物质组成(韩芳林, 2006; 李荣社等, 2008)。研究区地层主体为上古生界二叠系黄羊岭群(PH)、下中生界三叠系巴颜喀拉山群(TB)和第四系沉积物(李新林等, 2006)。其中,二叠系黄羊岭群主要为一套浅海–半深海相的以碎屑岩为主沉积岩建造,层内褶皱发育,三叠系巴颜喀拉山群主要是以细碎屑岩沉积为主的增生杂岩。区内构造发育,褶皱早期为 NE 向 SW 逆冲构造,晚期为转换为 SW 向 NE 逆冲褶皱,断裂构造主要为 NW–SE 向



I₁塔里木陆块; I₂铁克里克断裂带; II₁北昆仑(其曼塔格)晚古生代岩浆弧带; II₂中昆仑微陆块(早古生代与晚古生代构造叠加复合带); II₃中昆仑微陆块北带; II₃²中昆仑微陆块南带; II₃南昆仑晚古生代残弧带; III巴颜喀拉晚古生代—中生代边缘裂谷盆地; IV甜水海—北羌塘微陆块群; IV₁甜水海微陆块; IV₁²神仙湾二叠纪—三叠纪边缘裂陷带; V喀拉昆仑—南羌塘陆块; VI班戈—腾冲燕山期岩浆弧带; VII岗底斯—下察隅晚燕山期岩浆弧带; ①柯岗断裂; ②其曼于特—祁漫塔格蛇绿混杂岩带; ③蒙古—普守蛇绿混杂岩带; ④柳什塔格—向阳泉中昆仑断裂带; ⑤苏巴什—木孜塔格蛇绿混杂岩带; ⑥郭扎错—金沙江结合带; ⑦龙木错—双湖结合带; ⑧班公湖—怒江结合带; ⑨狮泉河结合带; 1.第四系; 2.雪被区; 3.巴颜喀拉山群上组上段; 4.巴颜喀拉山群上组下段; 5.巴颜喀拉山群中组上段; 6.巴颜喀拉山群中组下段; 7.巴颜喀拉山群下组上段; 8.黄羊岭群上板岩组第四段; 9.黄羊岭群上板岩组第三段; 10.黄羊岭群上板岩组第二段; 11.黄羊岭群上板岩组第一段; 12.黄羊岭群下砂板岩组第四段; 13.黄羊岭群下砂板岩组第三段; 14.黄羊岭群下砂板岩组第二段; 15.黄羊岭群下砂板岩组第一段; 16.奇台达坂构造片岩; 17.中新世石英二长岩; 18.晚三叠世石英闪长岩; 19.晚三叠世花岗闪长岩; 20.断层; 21.测年样品位置

图1 研究区大地构造位置(a)及侵入岩分布图(b)

Fig. 1 (a) Geotectonic position and (b) distribution of the study area intrusive rocks

奇台达坂大断裂, 卫片上线性影像特征清楚, 地貌上呈槽形负地形线状延伸。岩浆岩较为发育, 主要为晚三叠纪的石英闪长岩、石英二长岩、花岗闪长岩等, 次为新近纪的石英二长岩(代新宇等, 2015)。

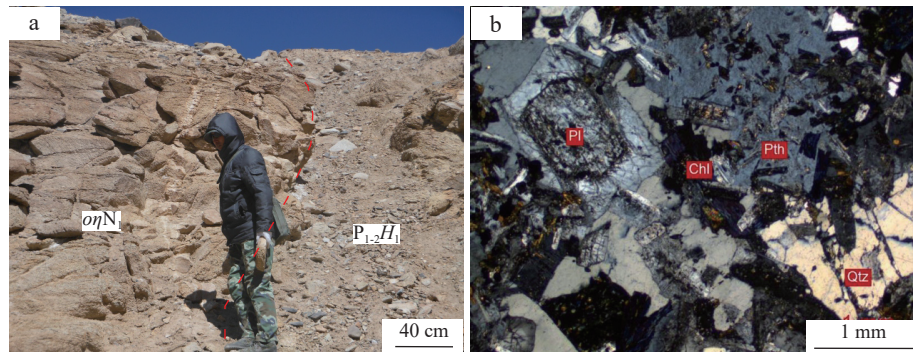
石英二长岩侵入体位于研究区北东一带, 呈小岩枝产出, 岩体受区域构造控制, 多呈 NE 向展布, 出露总面积约 3 km²(图 1)。本次样品野外露头新鲜, 代表性岩性特征如下所述。石英二长岩: 呈浅灰色, 中-细粒花岗结构、块状构造; 主要矿物成分为钾长石(55%~57%)、斜长石(30%~32%)、石英(5%~6%)、黑云母(4%)组成, 矿物颗粒粒径为 0.3~2 mm 和 2~4 mm。钾长石、斜长石多为半自形-自形板状相互嵌连均匀分布, 他形粒状石英则充填于长石间隙。偶见斜长石具环带构造, 以及少许颗粒嵌含在钾长石

内。黑云母棕色片状, 在岩石中不均匀分布(图 2)。

2 样品采集及测试分析方法

笔者研究共采集 5 件样品, 采自实测地质剖面中具代表性的新鲜岩石, 均为石英二长岩。5 件样品主、微量元素测试在核工业二〇三研究所测试中心完成, 1 件样品(PM013/1)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。

锆石的分选和制靶采用标准化流程, 首先在颚式破碎机下进行粗碎和粉碎过程, 再进行浮选和电磁筛选, 然后在双目镜下挑选出晶形完整且透明度高的锆石颗粒, 经环氧树脂粘结固化后, 抛光至锆石中心面出露, 最后经过反射光、透射光和阴极发光图像分析, 筛选出用于测年的锆石靶样品。锆石 U-Pb 同位素分



Qtz.石英; Pth.条纹长石; Pl.斜长石; Chl.绿泥石; onN_1 . 中新世石英二长岩; $P_{1-2}H_1$. 黄羊岭群上板岩组

图2 研究区石英二长岩野外照片(a)和镜下照片(b)

Fig. 2 (a) Outcrop photos and (b) microscopic pictures of the quartz monzonite in the study area

析由美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a 型四极杆质谱仪进行测定,激光剥蚀系统是德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M,激光器为 193 nm ArF 准分子激光器,激光波长为 193 nm,束斑直径为 30 μ m,脉冲为 8 Hz,能量为 32~36 MJ,采样方式为单点剥蚀,实验仪器配置和分析流程参见袁洪林等(2003)。采用标准锆石 91500 作为外标校正元素分馏和仪器质量歧视效应,利用玻璃标样 NIST SRM 610 计算锆石的 U、Th、Pb 含量, ^{29}Si 作为内标元素进行校正,普通铅校正采用 Andersen (2002)的方法,数据处理采用 GLITTER (ver 4.0, Macquarie University)程序,计算年龄与绘制谐和曲线采用 Isoplot(ver3.75)程序。

主量元素分析采用 XRF 方法,使用荷兰帕纳科制造的 Axios 型 X 射线荧光光谱仪进行测定,分析误差小于 5%。经烧失量校正后进行主量元素换算,并借助 Geokit Pro 程序建立标准曲线。微量元素分析采用日本岛津制造的 ICPS-7510 型电感耦合等离子体发射光谱仪与美国 Thermo Fisher 制造的 XSERIES II 型 ICP-MS 进行测定,分析误差小于 5%,对稀土元素测试结果进行球粒陨石数据标准化(Sun et al., 1989),计算主要稀土元素参数。

3 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

本次在 1 件石英二长岩样品 (PM013/1)(N 35°44'30"; E 79°42'18")中挑选出的锆石颗粒呈浅黄色-无色透明,多呈自形长柱状,部分呈短柱状,长宽比约为 2:1~3:1,粒径在 0.4 mm×0.1 mm~0.1 mm×0.05 mm,长宽比多为 2:1~3:1,个别可达 4:1 或 5:1。在阴极发光图像中,结晶程度较好,内部结构简单,显示明显的岩浆型锆石振荡环带结构(图 3)(冉

亚洲等, 2024)。锆石 Th/U 值为 0.59~11.58(平均为 1.35)(表 1),与岩浆锆石 Th/U 值(>0.1)相当(Rubatto, 2002; 俞胜等, 2023; 刘昊等, 2024),表明石英二长岩样品的锆石均为岩浆成因锆石。

对样品 PM013/1 进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,所有测点均位于锆石的振荡环带微区,在 U-Pb 谐和图中显示出良好的谐和性,年龄分布较为集中,并且较为均匀地分布于一致曲线上或附近,表明 U-Pb 体系在锆石形成之后处于封闭状态。样品 PM017/1 共测定 36 个点,有 16 个测点的年龄值明显偏离谐和线,可能为捕获锆石或继承锆石的年龄,不参与计算,其余 20 个测点位于谐和线附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值为 (10.4±0.2) Ma(图 3a),代表区内石英二长岩的成岩年龄。

4 岩石地球化学特征

本次研究样品的主量、微量元素测试结果见表 2。5 件石英二长岩样品具高 SiO_2 (63.16%~68.20%, 平均为 66.49%), 贫铝 Al_2O_3 (13.39%~15.47%, 平均为 13.69%), 高 K_2O (4.23%~5.24%, 平均为 4.71%), 低 MgO (1.06%~1.49%, 平均为 1.21%), 低 TiO_2 (0.60%~0.83%, 平均为 0.70%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 1.13%~1.37%, ALK 为 7.90%~9.87%。在花岗岩类 TAS 分类图解(图 4a)中,多数样品均投入石英二长岩区。在 SiO_2 - K_2O 图解(图 4b)中,绝大部分样品投点位于钾玄岩系列。样品铝饱和指数 $A/\text{CNK}=0.83\sim0.90$, 属偏铝质系列,在 A/CNK - A/NK 图解(图 4c)中,所有样品投点均位于偏铝质区域。在 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ - CaO - SiO_2 图解中,多数样品投点均位于碱钙质区域,处于 A 型花岗岩和 I

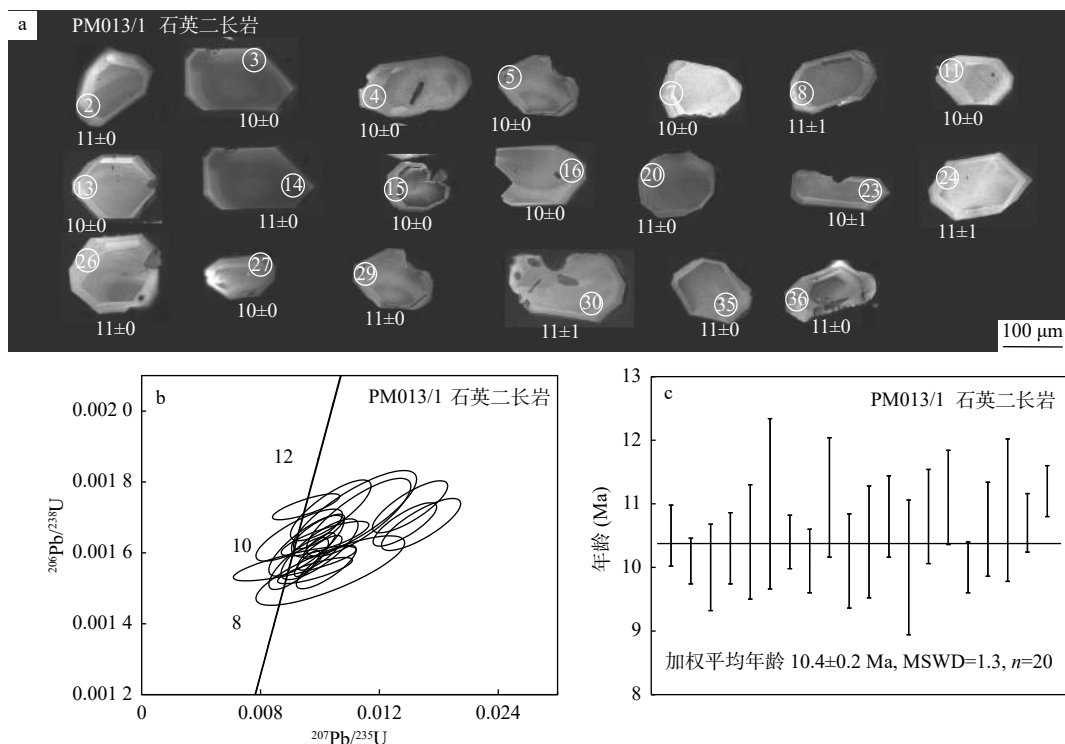


图3 研究区石英二长岩锆石阴极发光照片(a)、U—Pb年龄值(b)以及锆石U—Pb年龄谐和图(c)

Fig. 3 (a) Zircon CL images for microbeam analyzed spost and (b) apparent U-Pb ages and (c) zircon U-Pb Concordia diagram of the quartz monzonite in the study area

型花岗岩重叠区(图4d)。

稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图5a)中, 配分曲线总体呈右倾, 稀土元素总量较高, $\Sigma\text{REE}=396.01 \times 10^{-6} \sim 687.53 \times 10^{-6}$ (平均为 505.24×10^{-6}), 轻、重稀土元素比值 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}=19.84 \sim 29.90$ (平均值为 22.80), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=37.67 \sim 70.97$ (平均值为 46.63), 均表明轻稀土较重稀土富集, 样品的稀土元素分异程度较高。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=5.66 \sim 9.90$ (平均值为 7.18), 表明轻稀土元素存在明显的分馏作用, 而 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=3.79 \sim 5.04$ (平均值为 4.40), 表明重稀土元素也存在一定的分馏作用。 $\delta\text{Eu}=0.46 \sim 0.54$ (平均值为 0.49) 显示明显的负异常, 反映在岩浆源区斜长石有残留或经历了分离结晶作用。稀土元素配分曲线走势基本一致, 反映样品各单元元素相关性较好, 为同源岩浆演化产物。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图5b)中, 曲线整体右倾, 大离子亲石元素 K、Rb、Th、U 等相对富集, Ba、Sr 等相对亏损, Nb、Ta、Ti 等高场强元素相对亏损。Ba、Sr 相对亏损, 反映斜长石的分离结晶作用, 这与 Eu 的负异常一致。Zr 相对富集。样品中 Nb、Ta 亏损反映岩浆源区有壳源物质的混入, Ti 的亏损指示可能岩浆起源于富集地幔或地壳岩石, 也可能与钦

铁矿的分离结晶密切相关。蛛网图曲线上 Rb-Th 呈峰, Nb-Ta 呈槽, 则指示岩浆受到上地壳混染。不同样品微量元素相关性较好, 曲线形态相似, 反映为同源岩浆演化产物。

5 讨论

5.1 成岩时代

近 20 年来, 前人依据区域对比, 一直认为研究区中酸性侵入岩为上中二叠世—晚三叠世(258~210 Ma)(李新林等, 2006)。笔者通过对 1:5 万区域地质调查发现, 侵入于二叠系黄羊岭岩群砂板岩中的石英二长岩进行系统研究, 获得石英二长岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值分别为 (10.4 ± 0.2) Ma, 故将奇台达坂北分布的石英二长岩形成时代新厘定为中新世, 与西昆仑—东昆仑新近纪火山—侵入岩带岩浆活动时间基本一致(邓万明, 1991, 1998; 杨经绥等, 2002; 王权等, 2005; 林清茶等, 2006; 赵江林等, 2017; 赵波等, 2020)。

5.2 岩石成因

花岗岩的分类也一直是花岗岩类研究的主要问

表 1 研究区石英二长岩 LA-ICP-MS U-Pb 年代学测试结果

Tab. 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the quartz monzonite in the study area

分析点	Pb	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb年龄		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U年龄		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U年龄	
	含量 (10 ⁻⁶)				比值 (±1σ)		比值 (±1σ)		比值 (±1σ)		比值 (±1σ)		比值 (±1σ)		比值 (±1σ)	
PM013/1-01	9	651	569	1.14	0.086 48	0.009 02	0.001 57	0.000 04	0.018 71	0.001 91	1 349	189	19	2	10	0
PM013/1-02	10	415	646	0.64	0.054 66	0.010 7	0.001 64	0.000 04	0.012 35	0.002 41	398	388	13	2	11	0
PM013/1-03	11	991	734	1.35	0.051 48	0.003 31	0.001 57	0.000 03	0.011 14	0.000 7	263	141	11	1	10	0
PM013/1-04	6	323	349	0.93	0.057 82	0.007 91	0.001 56	0.000 05	0.012 43	0.001 65	523	275	13	2	10	0
PM013/1-05	7	455	533	0.85	0.054 35	0.005 69	0.001 6	0.000 04	0.011 99	0.001 22	385	220	12	1	10	0
PM013/1-06	9	866	528	1.64	0.196 14	0.040 66	0.001 69	0.000 12	0.045 81	0.008 98	2 794	304	46	9	11	1
PM013/1-07	9	719	925	0.78	0.054 01	0.009 83	0.001 61	0.000 07	0.011 98	0.002 12	372	365	12	2	10	0
PM013/1-08	8	304	253	1.20	0.060 46	0.014 99	0.001 71	0.000 1	0.014 3	0.003 44	620	460	14	3	11	1
PM013/1-09	6	629	562	1.12	0.142 62	0.018 09	0.001 77	0.000 08	0.034 81	0.004 13	2 259	204	35	4	11	1
PM013/1-10	6	484	543	0.89	0.048 32	0.007 25	0.001 94	0.000 07	0.012 94	0.001 89	115	320	13	2	13	0
PM013/1-11	8	652	578	1.13	0.053 57	0.003 99	0.001 62	0.000 03	0.011 95	0.000 87	353	160	12	1	10	0
PM013/1-12	6	531	478	1.11	0.069 5	0.010 88	0.001 48	0.000 06	0.014 23	0.002 15	914	293	14	2	10	0
PM013/1-13	5	5 320	459	11.58	0.047 57	0.015 64	0.001 57	0.000 04	0.010 31	0.003 38	77	638	10	3	10	0
PM013/1-14	5	657	480	1.37	0.053 51	0.009 59	0.001 72	0.000 07	0.012 73	0.002 22	350	361	13	2	11	0
PM013/1-15	11	269	122	2.20	0.048 72	0.007 73	0.001 57	0.000 06	0.010 57	0.001 64	134	335	11	2	10	0
PM013/1-16	10	386	658	0.59	0.049 73	0.009 49	0.001 62	0.000 07	0.011 09	0.002 07	182	393	11	2	10	0
PM013/1-17	10	958	924	1.04	0.189 84	0.014 84	0.001 74	0.000 06	0.045 69	0.003 28	2 741	123	45	3	11	0
PM013/1-18	12	1 523	1 232	1.24	0.107 08	0.024 91	0.001 71	0.000 08	0.025 25	0.005 76	1 750	374	25	6	11	1
PM013/1-19	7	585	765	0.76	0.047 12	0.008 69	0.001 77	0.000 06	0.011 5	0.002 09	55	389	12	2	11	0
PM013/1-20	7	646	643	1.00	0.076 35	0.007 8	0.001 68	0.000 05	0.017 72	0.001 75	1 104	192	18	2	11	0
PM013/1-21	6	558	489	1.14	0.047 3	0.007 86	0.001 78	0.000 05	0.011 62	0.001 91	64	355	12	2	12	0
PM013/1-22	7	426	422	1.01	0.069 49	0.007 99	0.001 59	0.000 05	0.015 22	0.001 69	913	221	15	2	10	0
PM013/1-23	7	684	750	0.91	0.059 5	0.019 39	0.001 55	0.000 08	0.012 7	0.004 09	586	584	13	4	10	1
PM013/1-24	6	822	634	1.30	0.081 37	0.009 77	0.001 68	0.000 06	0.018 81	0.002 18	1 231	219	19	2	11	0
PM013/1-25	13	469	568	0.83	0.509 77	0.018 1	0.005 01	0.000 11	0.352 27	0.010 63	4 270	51	306	8	32	1
PM013/1-26	6	543	637	0.85	0.075 68	0.008 98	0.001 73	0.000 06	0.018 07	0.002 07	1 087	221	18	2	11	0
PM013/1-27	6	759	643	1.18	0.054 4	0.009 66	0.001 55	0.000 03	0.011 67	0.002 06	388	356	12	2	10	0
PM013/1-28	4	327	542	0.60	0.068 92	0.024 28	0.001 56	0.000 11	0.014 87	0.005 14	896	596	15	5	10	1
PM013/1-29	7	590	621	0.95	0.046 7	0.010 6	0.001 65	0.000 06	0.010 61	0.002 38	34	469	11	2	11	0
PM013/1-30	6	432	445	0.97	0.062 39	0.012 65	0.001 7	0.000 09	0.014 61	0.002 87	687	382	15	3	11	1
PM013/1-31	6	567	367	1.54	0.066 95	0.014 86	0.001 78	0.000 07	0.016 48	0.003 6	836	405	17	4	12	0
PM013/1-32	9	785	686	1.14	0.212 36	0.022 95	0.001 9	0.000 09	0.055 82	0.005 48	2 924	165	55	5	12	1
PM013/1-33	9	598	656	0.91	0.058 13	0.023 86	0.001 66	0.000 08	0.013 34	0.005 44	534	711	14	5	11	0
PM013/1-34	7	876	776	1.13	0.063 35	0.007 81	0.001 64	0.000 05	0.014 37	0.001 72	720	242	15	2	11	0
PM013/1-35	7	578	665	0.87	0.052 25	0.006 25	0.001 66	0.000 04	0.011 94	0.001 41	296	252	12	1	11	0
PM013/1-36	7	643	869	0.74	0.046 26	0.007 75	0.001 73	0.000 03	0.011 07	0.001 85	11	360	11	2	11	0

题, M、I、S 和 A 型是目前最常用的花岗岩成因分类方案。而高分异 I 型、S 型花岗岩与 A 型花岗岩在地球化学特征及矿物学特征方面十分相似(King et al.,

1997), 因此有必要对花岗岩是否经历高程度结晶分异作用进行判断。TFeO*/MgO 值较低(3.06~3.81), 全部小于 4, 属于未分异或分异作用相当微弱的花岗

表 2 研究区石英二长岩主量元素(%)、稀土元素以及微量元素(10^{-6}) 分析结果Tab. 2 Major elements(%), rare earth elements(10^{-6}) and trace elements compositions of the quartz monzonite in the study area

样品编号	PM017/1	PM017/2	PM017/3	PM017/4	PM013/1
岩性	石英二长岩				
SiO ₂	68.20	66.52	66.59	67.97	63.16
TiO ₂	0.65	0.73	0.67	0.60	0.83
Al ₂ O ₃	13.39	13.42	13.67	13.83	15.47
Fe ₂ O ₃	1.89	1.97	2.12	1.98	2.63
FeO	2.58	2.79	2.36	2.08	2.19
MnO	0.08	0.09	0.09	0.08	0.13
MgO	1.15	1.23	1.12	1.06	1.49
CaO	2.33	2.74	2.55	2.27	2.52
Na ₂ O	3.67	3.81	3.92	3.79	4.63
K ₂ O	4.23	4.49	4.97	4.60	5.24
P ₂ O ₅	0.26	0.34	0.28	0.30	0.35
LOI	1.05	1.23	1.10	1.01	0.87
Σ	99.48	99.36	99.44	99.57	99.51
TFe ₂ O ₃	4.76	5.07	4.74	4.29	5.06
K ₂ O/Na ₂ O	1.15	1.18	1.27	1.21	1.13
ALK	7.90	8.30	8.89	8.39	9.87
Mg [#]	36	36	36	37	41
AR	3.02	3.11	3.43	3.18	3.43
A/NK	1.26	1.21	1.16	1.23	1.16
A/CNK	0.90	0.83	0.83	0.90	0.87
DI	81	81	83	83	81
T _{zr} (°C)	821	831	808	832	853
σ	2.45	2.89	3.31	2.79	4.76
A/MF	2.51	2.39	2.49	2.75	2.29
C/MF	0.80	0.89	0.84	0.82	0.68
Sr	529	545	534	538	1 042
Zr	306	338	264	343	426
Ba	484	569	627	586	1 364
Rb	247	237	246	260	202
Th	87.2	53.2	55.0	63.8	44.1
U	5.32	5.63	5.21	4.23	8.55
Nb	61.9	67.3	49.9	51.6	44.7
Ta	10.0	12.0	5.76	7.95	3.34
La	162	120	96.1	112	159
Ce	263	223	184	193	324
Pr	24.1	22.8	19.2	18.4	34.6
Nd	74.8	76.7	65.9	60.6	118
Sm	10.3	11.5	10.2	8.89	17.7
Eu	1.57	1.69	1.61	1.32	2.97
Gd	9.47	10.6	9.00	8.07	15.6
Tb	0.71	0.94	0.84	0.72	1.40
Dy	3.46	4.87	4.22	3.64	6.66
Ho	0.54	0.78	0.66	0.60	1.04
Er	1.79	2.39	2.10	1.97	3.45
Tm	0.20	0.29	0.24	0.23	0.35
Yb	1.54	2.13	1.72	1.72	2.50
Lu	0.22	0.29	0.22	0.24	0.36
Y	16.4	22.6	19.6	17.8	33.0
ΣREE	554.00	477.68	396.01	411.00	687.53
LREE	536.07	455.39	377.01	393.81	656.17
HREE	17.93	22.29	19.00	17.19	31.36
LREE/HREE	29.90	20.43	19.84	22.91	20.92
(La/Yb) _N	70.97	37.82	37.67	43.74	42.96
(La/Sm) _N	9.90	6.54	5.93	7.90	5.66
(Gd/Yb) _N	4.96	4.02	4.22	3.79	5.04
δEu	0.48	0.46	0.50	0.47	0.54

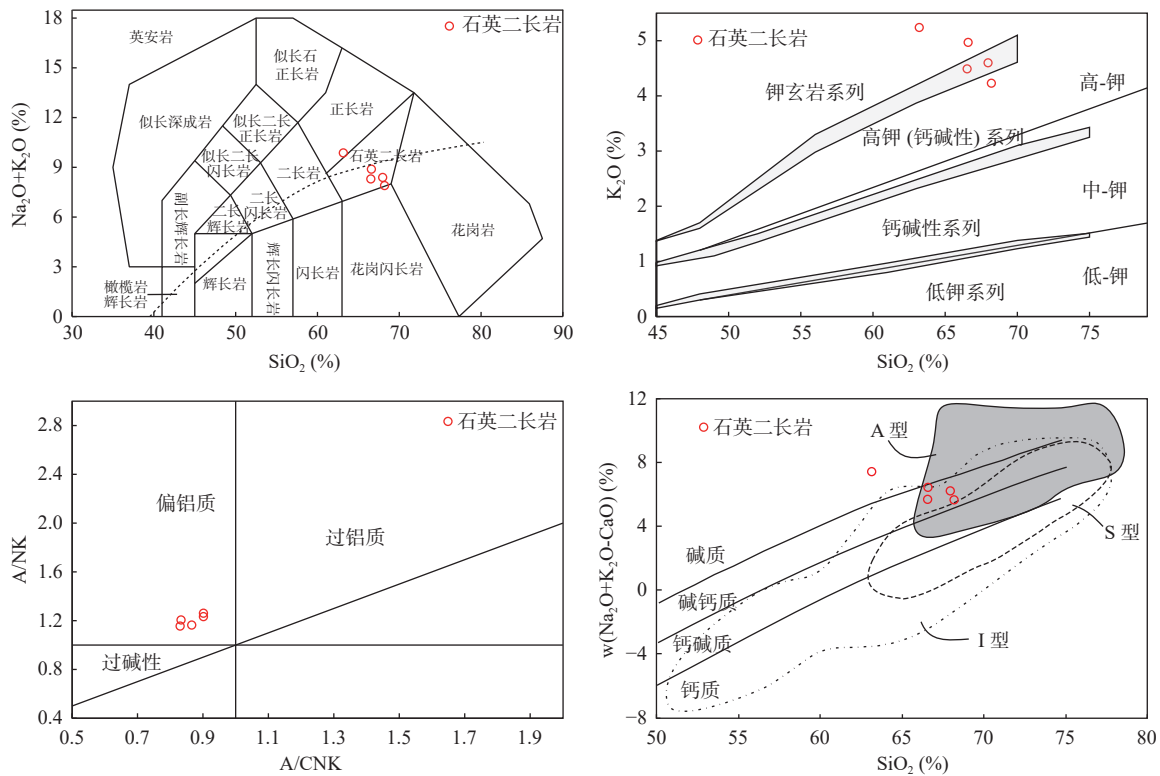


图4 研究区石英二长岩 TAS 图解(据 Middlemoet, 1994)、 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解(Peccerillo et al., 1976)、 A/CNK-A/NK (据 Maniar et al., 1989)图解、 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})\text{-SiO}_2$ 图解(据 Frost et al., 2001)

Fig. 4 TAS, $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$, A/CNK-A/NK and $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})\text{-SiO}_2$ diagrams of the quartz monzonite in the study area

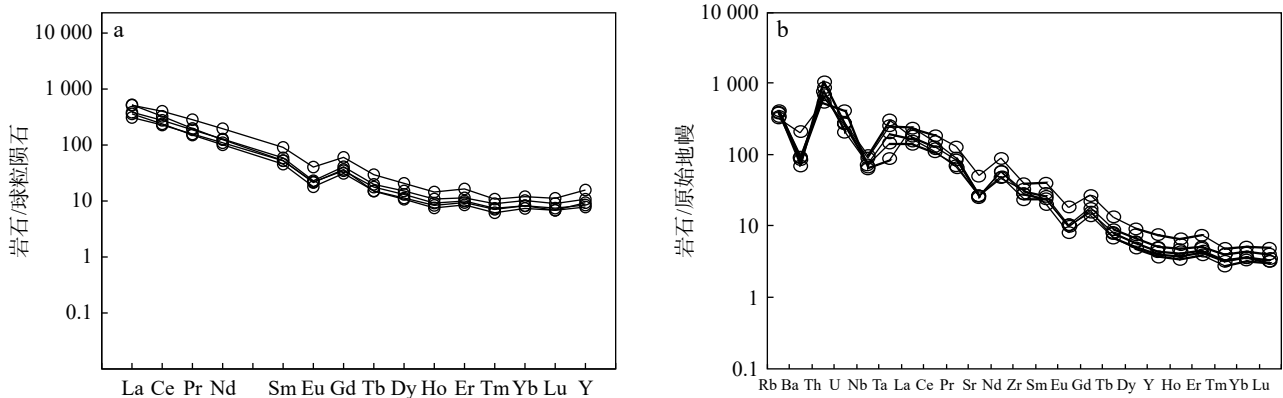


图5 研究区石英二长岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(据 Boynton, 1984)

(a)和球粒陨石标准化稀土元素配模式图(b)(据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 (a) Primitive mantle-normalized trace elements pattern and (b) Chondrite-normalized rare earth elements pattern of the quartz monzonite in the study area

岩。样品 TFe_2O_3 含量为 4.29%~5.07%、 MgO 含量为 1.06%~1.48%、 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 值为 3.02~4.23, 明显区别于高分异 I 型(2.27)、S 型(2.38)及 M 型(2.37)花岗岩(Whalen et al., 1987; Frost et al., 2001; 贾小辉等, 2009; 高原等, 2013; 汪洋等, 2013; 段政等, 2017)。 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 的含量为 $517.5\times 10^{-6}\sim 828.2\times 10^{-6}$, 平均为 649.8×10^{-6} , 与 A 型花岗岩的 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 含量 $>350\times 10^{-6}$ —

致(Whalen et al., 1987; 牛腾等, 2023)。在 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 岩浆岩成因类型判别图中(图 6), 样品均投入 A 型花岗岩区中。利用 Watson 等(2005)提出的全岩锆石饱和温度计算公式, 得到奇台达坂北石英二长岩锆石饱和温度介于 $808\sim 853^\circ\text{C}$, 平均为 829°C , 与 A 型花岗岩平均成岩温度一致(833°C)(Whalen et al., 1987; 张旗等, 2007), 明显高于 S 型花

岗岩形成的平均温度(764 °C)(Chappell, 1999; 张培烈等, 2022)和低于I型花岗岩的平均成岩温度(>900 °C)(张旗等, 2007)。此外, 样品具高 SiO₂(平均为 66.49%), 贫铝 Al₂O₃(平均为 13.69%), 高 K₂O(平均为 4.71%), Sr、Ba、Ti、Eu 等亏损, 具明显的负钕异常等特征, 与张旗等(2012)总结的 A 型花岗岩的地球化学特征(富 SiO₂、贫 Al₂O₃(大多为 12%~13%, 很少有>14%)、富钾(K₂O=4%~6%或更高))一致。因此, 上述岩浆岩成因类型图解及特征参数均指示研究区侵入岩为 A 型花岗岩。

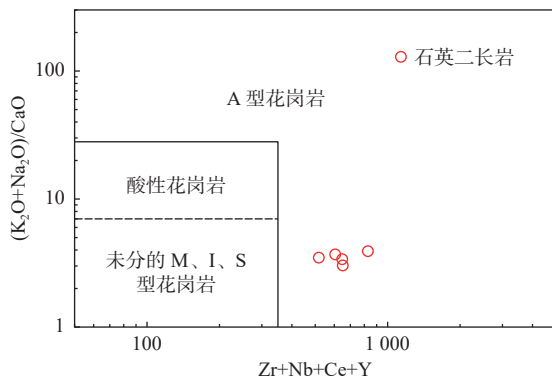


图6 研究区石英二长岩 $Zr+Nb+Ce+Y-(K_2O+Na_2O)/CaO$ 图解(据 Whalen et al., 1987)

Fig. 6 $Zr+Nb+Ce+Y-(K_2O+Na_2O)/CaO$ diagrams of the quartz monzonite in the study area

研究区石英二长岩样品的 Rb、Th、U 等元素富集, Ba、Sr、Ti、Nb 等元素相对亏损, 表明岩体是以岛弧物质为物源的壳源花岗岩(Ma et al., 1998)。Ba、Sr 的弱亏损应与 Eu 的负异常对应, 反映其可能是壳源物质低程度部分熔融的产物(Harris et al., 1992)。对于角闪石和石榴子石来说, Yb 具有比 Y 更高的分配系数, 角闪石或石榴子石的分离结晶会导致残留熔体中 Y/Yb 的值升高, 但是该套岩体 Y/Yb 的变化不大(10.35~13.20, 平均值为 11.24), 说明在岩浆演化过程中可能未发生角闪石和石榴子石的分离结晶(康磊等, 2012)。样品的 Nd/Th=0.86~2.66, Nb/Ta=5.61~13.38, 均明显低于幔源岩石(Nd/Th>15, Nb/Ta≈22, BEA et al., 2001), 而与壳源岩石相近(Nd/Th≈3, Nb/Ta≈12)(Bea et al., 2001), 表明其岩浆源区应以壳源为主。Nb 亏损同时还伴随着 Nb/Ta 值下降, 表明 Nb、Ta 已开始分馏, 这是典型的壳源的成因类型(李佐臣等, 2013; 薛富红等, 2015), Nb/Ta 值(平均为 8.07)也十分接近下地壳(8.3)(Rudnick et al., 2003)。La/Nb(1.78~3.56, 平均 2.41)均大于 1.0 而区别于地幔来源的岩浆

(Depaolo et al., 2000)。样品 $Mg^\# = 36 \sim 41$ (平均值 37), 与来源于地壳部分熔融的岩石一致(<40)(Atherton et al., 1993), 表明其岩浆源区应以地壳物质为主。研究区样品在 La-La/Yb 图解中, 显示该岩体在形成过程中以部分熔融为主, 样品亏损 Sr、Ba、Ti 及 Eu 负异常, 表明部分熔融过程中源区存在斜长石和钛铁矿的残留体, 而不是分离结晶造成的, 这与花岗质岩浆粘度大, 表现为晶粥体(Pitcher, 1997; 张旗等 2007; 武昱东等, 2014), 很难发生分离结晶作用(Reid et al., 1993; 张旗等 2007; 武昱东等, 2014)。花岗岩熔体中 CaO/Na₂O 值与温度和压力无关, 主要受源岩成分的控制(Jung et al., 2007)。因此, 可以用 CaO/Na₂O 值可以用来推断中酸性岩浆的源区特征。花岗岩的 CaO/Na₂O 值可以很好的指示岩浆源区的成分, 富斜长石、贫黏土的砂屑岩熔融生成的花岗岩 CaO/Na₂O 值一般大于 0.3(Skjerlie et al., 1992)。样品的 CaO/Na₂O 介于 0.54~0.73(平均值为 0.63), 反映了岩浆源区主要由杂砂岩的部分熔融形成。在 $(Na_2O+K_2O+FeO+MgO+TiO_2)-(Na_2O+K_2O)/(FeO+MgO+TiO_2)$ (图 7a) 和 C/FM-A/MF 成因判别图(图 7b)中, 样品主要落入变质杂砂岩范围。综上所述, 研究区石英二长岩可能来自下地壳岩石发生部分熔融的产物。

5.3 构造环境分析

研究区石英二长岩属 A 型花岗岩, 张旗等(2012)认为 A 型花岗岩形成于地壳减薄环境, 出现在碰撞后(造山后)和板内构造背景。在 Y-Nb(图 8a)、Y-Ta(图 8b)图解中, 样品全部落在板内环境区域。Eby (1990)系统总结了 A 型花岗岩的岩石学和地球化学特征, 并根据物质来源和构造背景的差异, 将 A 型花岗岩分为 A₁ 和 A₂ 两个亚类, 其中 A₁ 产于非造山环境(大陆裂谷或板内环境), A₂ 产于碰撞后环境, 即形成于板内伸展阶段(Bonin, 2007; 曲晓明等, 2012; 解龙等, 2015)。在 Nb-Y-Ce 图解(图 8c)上, 样品全部投入 A₁ 型花岗岩区域, 同样体现出了板内环境的构造背景。综上所述, 笔者认为研究区石英二长岩形成于板内伸展构造环境。

5.4 地球动力学过程

自古新世以来, 受印度板块与欧亚板块碰撞及碰撞后的远程效应的影响, 对青藏高原的隆升有很大的影响, 西昆仑进入了陆内造山阶段(丁林等, 1999; 莫宣学等, 2006)。受区域性深大断裂多期次活动影响, 新生代青藏高原北缘岩浆活动频繁。邓万明(1993)

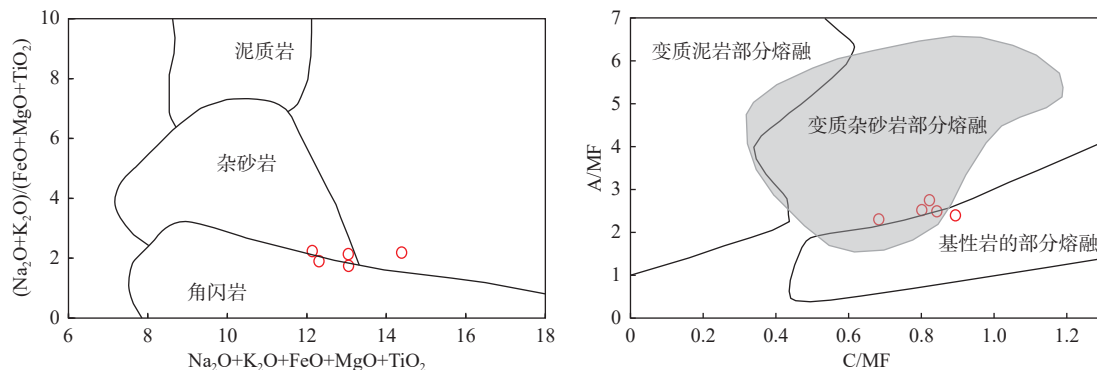


图7 研究区石英二长岩($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{TiO}_2$)—($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)/($\text{FeO}+\text{MgO}+\text{TiO}_2$)图解(a)和 C/FM-A/MF(b)图解(Altherr et al., 2000)

Fig. 7 (a) ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{TiO}_2$)—($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)/($\text{FeO}+\text{MgO}+\text{TiO}_2$) and (b) C/FM-A/MF diagrams of the quartz monzonite in the study area

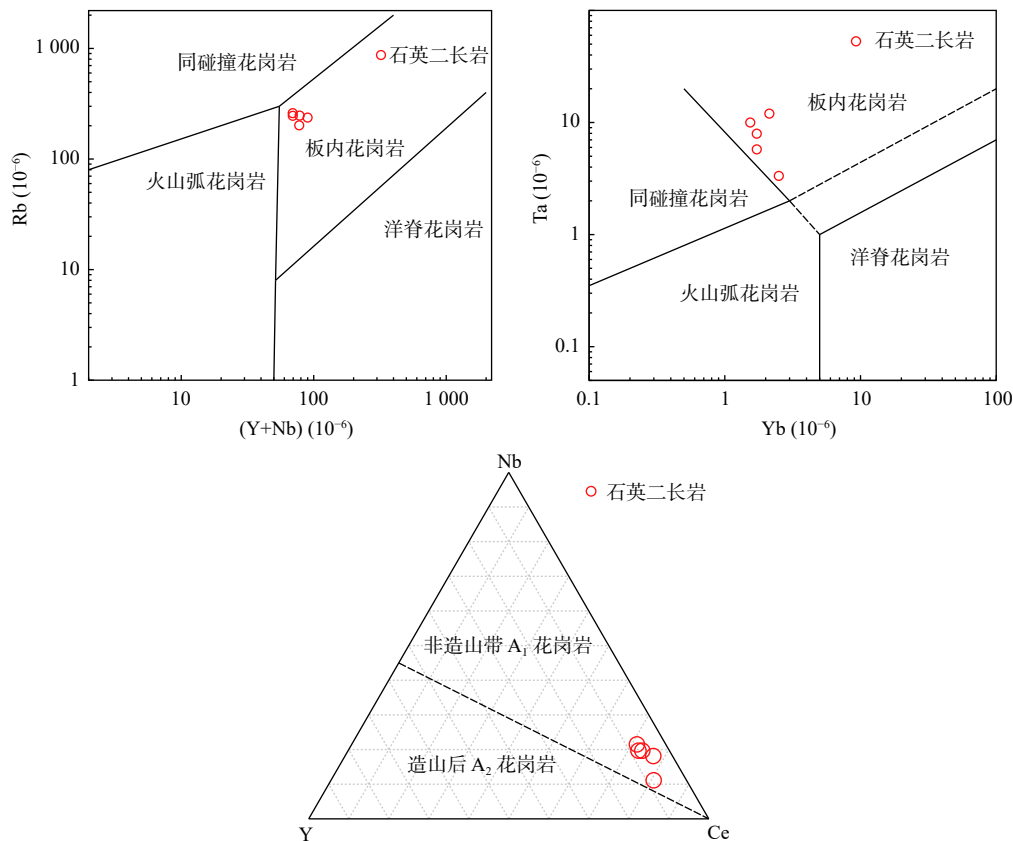


图8 研究区石英二长岩(Y+Nb)-Rb(a)、Yb-Ta(b)(据 Pearce et al., 1984)和 Nb-Y-Ce 图解(c)(Eby, 1992)

Fig. 8 (a) (Y+Nb)-Rb, (b) Yb-Ta and (c) Nb-Y-Ce diagrams of the quartz monzonite in the study area

认为青藏高原北部的岩浆岩和塔里木、昆仑山之间的板内相互作用密切相关, 相对较冷而刚性较强的塔里木地体的南向俯冲是昆仑山快速隆升、岩浆活动、地震等动力学机制, 但 Gao 等(2001)认为在可可西里—西昆仑岩浆活动区缺少塔里木岩石圈向南深俯冲的证据。肖爱芳等(2010)认为青藏高原北缘晚新生代火山岩的分布规律显示大型断裂为青藏高原北缘的

岩浆活动提供了良好的通道。但多数学者认为青藏高原北缘的晚新生代火山岩浆的形成与印度板块和欧亚板块碰撞后的地幔拆沉作用引起的大规模减薄作用有关, 软流圈上涌引起岩石圈地幔发生部分熔融是西昆仑地区晚新生代火山岩浆形成的直接原因(罗照华等, 2001)。地震层析成像推测在可可西里—西昆仑钾质火山岩带下可能存在 EW 向巨型地幔低速体

(Replumaz et al., 2010)。另有研究提出在该地幔低速体之下未发现高密度块体,推测地幔低速体的上涌是软流圈深部作用引起,而非岩石圈拆沉引发的,巨型地幔低速体的上涌是原因,岩石圈地幔的对流减薄是结果。岩石圈地幔减薄,引起岩浆活动向外迁移,这导致了青藏高原新生代钾质-超钾质岩浆活动由羌塘地区开始,并向南北两侧迁移(迟效国等, 2017);也控制着可可西里-昆仑中新世以来岩浆活动和分布(许志琴等, 2006)。区域上,沿康西瓦-大红柳滩-泉水沟断裂分布一系列的火山岩,均发生在 10~8 Ma(李海兵等, 2007; 赵振明等, 2009; 肖爱芳, 2010),而研究区样品在构造环境判别图上均落入为非造山环境,且石英二长岩侵入体总体呈 NE 向展布,南邻区域 NE 向深大断裂,研究区在深部岩石圈强烈伸展的背景下,导致壳幔作用加剧和区域深大断裂带活化,在地壳深部形成高温低压环境,并促使下地壳在贫水条件下发生低程度部分熔融,深部形成 A₁ 型花岗质岩浆沿断裂快速上升侵位。

6 结论

(1)奇台达坂北石英二长岩 LA-ICP-MS 测年显示锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(10.4\pm 0.2)\text{Ma}$,形成于中新世,代表了板内伸展背景作用下的岩浆响应。

(2)岩石化学、岩石地球化学及同位素地球化学研究表明:奇台达坂北的石英二长岩具高 SiO_2 , 贫铝 Al_2O_3 , 高 K_2O , 富集大离子亲石元素 K、Rb、Th、U 和轻稀土元素, Sr、Ba、Ti、Eu 等亏损以及明显的负铈异常,为 A 型花岗岩特征。

(3)奇台达坂北石英二长岩形成于深部岩石圈强烈伸展的环境下,地壳深部形成高温低压环境,促使下地壳发生低程度部分熔融并沿深大断裂快速上升侵位。

致谢: 成文过程中得到了审稿专家提出的恳切意见与建议,在此表示由衷的感谢,同时感谢野外工作同事的帮助。

参考文献(References):

边千韬, 郑祥身. 青海可可西里地区构造特征与构造演化, 大陆岩石圈构造与资源[M]. 北京: 海洋出版社, 1992, 2: 19-20.
迟效国, 张蕊, 范乐夫, 等. 藏北新生代玄武质火山岩起源的深部机制-大陆俯冲和板片断离驱动的地幔对流上涌模式[J]. 岩石学报, 2017, 33(10): 3011-3026.

CHI Xiaoguo, ZHANG Rui, FAN Lefu, et al. The Formatting Mechanism of Cenozoic Basaltic Volcanic Rocks in the Northern Tibet: Continental Subduction and Slab Break-off Driven by Mantle Convection and Upwelling[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(10): 3011-3026.

崔建堂, 王炬川, 边小卫, 等. 西昆仑康西瓦北侧早古生代角闪闪长岩、英云闪长岩的地质特征及其锆石 SHRIMP U-Pb 测年[J]. 地质通报, 2006, 25(12): 1441-1449.

CUI Jiantang, WANG Juchuan, BIAN Xiaowei, et al. Geological characteristics of Early Paleozoic amphibolite and tonalite in northern Kangxiwar, West Kunlun, China and their zircon SHRIMP U-Pb dating[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(12): 1441-1449.

代新宇, 杜彪, 赵江林, 等. 新疆西昆仑甜水海地区 4 幅 1: 5 万区域地质调查成果报告[R]. 西安: 陕西省地质调查中心, 2015.

邓万明. 中昆仑造山带钾玄岩质火山岩的地质、地球化学和时代[J]. 地质科学, 1991, 26(3): 201-213.

DENG Wangming. The geology geochemistry and forming age of the shoshonites from middle Kunlun mountain[J]. Chinese Journal of Geology, 1991, 26(3): 201-213.

邓万明. 青藏北部新生代钾质火山岩微量元素和 Sr、Nd 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 1993, 9(4): 379-387.

DENG Wangming. Trace element and Sr, Nd isotopic features of the Cenozoic potassium-volcanic rocks from northern Qinghai-Tibet plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 1993, 9(4): 379-387.

邓万明. 青藏高原北部新生代板内火山岩[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-179.

DENG Wanming. Cenozoic intraplate volcanic rocks in the northern Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Press, 1998: 1-179.

邓万明, 孙宏娟. 青藏北部板内火山岩的同位素地球化学与源区特征[J]. 地学前缘, 1998, 5(4): 307-317.

DENG Wangming, SUN Hongjuan. Features of isotopic geochemistry and source region for the intraplate volcanic rocks from northern Qinghai-Tibet plateau[J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(4): 307-317.

丁林, 张进江, 周勇, 等. 青藏高原岩石圈演化的记录: 藏北超钾质及钠质火山岩的岩石学与地球化学特征[J]. 岩石学报, 1999, 15(3): 408-421.

DING Lin, ZHANG Jinjiang, ZHOU Yong, et al. Tectonic implication on the lithosphere evolution of the Tibet Plateau: Petrology and geochemistry of sodic and ultrapotassic volcanism in Northern Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(3): 408-421.

段政, 邢光福, 余明刚, 等. 浙江外北山铝质 A-1 型花岗岩成因: 矿物学、年代学、地球化学及 Hf 同位素制约[J]. 地质学报, 2017, 91(1): 180-197.

DUAN Zheng, XING, Guangfu, YU Minggang, et al. The petrogenesis of Waibeishan aluminous A1-type granite in Zhejiang province: Constraints from mineralogy, zircon U-Pb dating,

- geochemistry and Hf isotope[J]. *Acta Geological Sinica*, 2017, 91(1): 180–197.
- 高原, 郑常青, 姚文贵, 等. 大兴安岭北段哈多河地区骆驼脖子岩体地球化学和锆石 U-Pb 年代学[J]. *地质学报*, 2013, 87(9): 1293–1310.
- GAO Yuan, ZHENG Changqing, YAO Wenggui, et al. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the Luotuobozi Pluton in the Haduohe Area in the northern Daxing'anling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(9): 1293–1310.
- 韩芳林. 西昆仑增生造山带演化及成矿背景[M]. 中国地质大学(北京), 2006, 141–160.
- 姜耀辉, 周珣若. 西昆仑造山带花岗岩岩石学及构造岩浆动力学[J]. *现代地质*, 1999, 13(4): 378.
- JIANG Yaohui, ZHOU Xunruo. The petrology and tectonic magmatic dynamics of the Western Kunlun[J]. *Geoscience*, 1999, 13(4): 378.
- 计文化. 西昆仑-喀喇昆仑晚古生代-早中生代构造格局[D]. 北京: 中国地质大学, 2005, 16–106.
- JI Wenhua. Western Kunlun-Karakoram Late Paleozoic-Early Mesozoic Tectonic Pattern[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2005, 16–106.
- 贾小辉, 王强, 唐功建. A 型花岗岩的研究进展及意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(3): 465–480.
- JIA Xiaohui, WANG Qiang, TANG Gongjian. A-type granites: Research progress and implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(3): 465–480.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑慕士塔格岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年: 对古特提斯碰撞时限的制约[J]. *地质论评*, 2012, 42(3): 533–552.
- KANG Lei, XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, et al. Neopaleozoic and Mesozoic granitoid magmatism and tectonic? evolution of the western West Kunlun Mountains[J]. *Geology in China*, 2012, 42(3): 533–552.
- 赖绍聪. 青藏高原北部新生代火山岩的成因机制[J]. *岩石学报*, 1999, 15(1): 98–101.
- LAI Shaocong. The genetic mechanism of Cenozoic volcanic rocks in the northern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Petrology*, 1999, 15(1): 98–101.
- 李佐臣, 裴先治, 李瑞保, 等. 西秦岭糜屠岭花岗岩体年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(8): 2617–2634.
- LI Zuocheng, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemistry of the Mishuling intrusion in western Qinling and their tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(8): 2617–2634.
- 李荣社, 计文化, 杨永成. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出版社, 2008, 1–5.
- 李新林, 周小康, 黎敦朋, 等. 新疆西昆仑甜水海地区 4 幅 1: 5 万区域地质调查成果报告[R]. 西安: 陕西省地质调查院, 2006.
- 李海兵, 许志琴, 杨经绥, 等. 阿尔金断裂带最大累积走滑位移量—900 km?[J]. *地质通报*, 2007, 26(10): 1288–1298.
- LI Haibin, XU Zhiqin, YANG Jingsui, et al. The maximum cumulative strike-slip displacement of the Altyn Tagh fault—900 km?[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(10): 1288–1298.
- 牛腾, 倪志耀, 孟宝航, 等. 冀北康保芦家营巨斑状花岗岩: 华北克拉通北缘中段 1.3~1.2 Ga B.P. 伸展-裂解事件的地质记录[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(4): 486–503.
- NIU Teng, NI Zhiyao, MENG Baohang, et al. The Lujiaying megaporphyritic granite in Kangbao area, North Hebei: A geological record of extension and breakup event at 1.3~1.2 Ga B.P. in the central segment of northern margin of North China Craton [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2023, 50(4): 486–503.
- 刘嘉麒, 买买提·依明. 西昆仑山第四纪火山的分布与 K-Ar 年龄[J]. *中国科学 B 辑: 化学, 生命科学, 地学*, 1990, 20(2): 180–187.
- LIU Jiaqi, Maimaiti Yiming. K-Ar Age and distribution of Xikunlun Volcano in Quaternary[J]. *Science in China (Series D)*, 1990, 20(2): 180–187.
- 刘嘉麒. 中国火山[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 75–90.
- 刘昊, 崔军平, 金玮, 等. 松辽盆地东部地区花岗岩地球化学特征及其地质意义[J]. *西北地质*, 2024, 57(2): 46–58.
- LIU Hao, CUI Junping, JIN Wei, et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Granites in Eastern Songliao Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(2): 46–58.
- 林清茶, 夏斌, 张玉泉. 西昆仑-喀喇昆仑地区钾质碱性岩 Ar-Ar 年龄—以羊湖、答坎和苦子干岩体为例[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(2): 66–70.
- LIN Qingcha, XIA Bin, ZHANG Yuquan. Ar-Ar dating of Potassic Alkali-Rocks in the Western Kunlun-Kalako-rum Mountains [J]. *Mineral Petrology*, 2006, 26(2): 66–70.
- 罗照华, 肖序常, 曹永清, 等. 青藏高原北缘新生代幔源岩浆活动及构造运动性质[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2001, 44(S1): 8–13.
- LUO Zhaohua, XIAO Xuchang, CAO Yongqing, et al. The Cenozoic mantle magmatism and motion of lithosphere on the north margin of the Tibetan Plateau[J]. *Science in China(Series D)*, 2001, 44(S1): 8–13.
- 罗照华, 张文会, 邓晋福, 等. 西昆仑地区新生代火山岩中的深源包体[J]. *地学前缘*, 2000, 7(1): 295–298.
- LUO Zhaohua, ZHANG Wenhui, DENG Jinfu, et al. Characteristic and geological significance of the deep-seated xenoliths in Cenozoic basalt in Kangxiwa, western Kunlun Mountains, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(1): 295–298.
- 莫宣学, 潘桂堂. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. *地学前缘*, 2006, 13(6): 43–51.

- MO Xuanxue, PAN Guitang. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: constrained by tectono-magmatic events [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6): 43–51.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 青藏新生代钾质火山活动的时空迁移及向东部玄武岩省的过渡: 壳幔深部物质流的暗示[J]. *现代地质*, 2007, 21(2): 255–264.
- MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, DENG Jinfu, et al. Migration of the Tibetan Cenozoic potassic volcanism and its transition to eastern basaltic province: Implications for crustal and mantle flow [J]. *Geoscience*, 2007, 21(2): 255–264.
- 乔耿彪, 张汉德, 伍跃中, 等. 西昆仑大红柳滩岩体地质和地球化学特征及对岩石成因的制约[J]. *地质学报*, 2015, 89(7): 1180–1194.
- QIAO Gengbiao, ZHANG Hande, WU Yuezhong, et al. Petrogenesis of the Dahongliutan monzogranite in Western Kunlun: Constraints from SHRIMP Zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(7): 1180–1194.
- 曲晓明, 辛洪波, 杜德道, 等. 西藏班公湖—怒江缝合带中段碰撞后 A 型花岗岩的时代及其对洋盆闭合时间的约束[J]. *地球化学*, 2012, 41(1): 1–14.
- QU Xiaoming, XIN Hongbo, DU Dedao, et al. Ages of Post-Collisional A-Type Granite and Constraints on the Closure of the Oceanic Basin in the Middle Segment of the Bangonghu-Nujiang Suture, the Tibetan Plateau [J]. *Geochimica*, 2012, 41(1): 1–14.
- 冉亚洲, 陈涛, 梁文天, 等. 西秦岭郎木寺组火山岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *西北地质*, 2024, 57(1): 110–121.
- RAN Yazhou, CHEN Tao, LIANG Wentian, et al. Zircon U-Pb Age of Volcanic Rocks from the Langmusi Formation in the Western Qinling Mountains and Its Tectonic Significance [J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(1): 110–121.
- 汪洋, 焦永玲, 仝立华, 等. 再论 A 型花岗岩的实质—与张旗先生等商榷[J]. *岩石矿物学杂志*, 2013, 32(2): 260–266.
- WANG Yang, JIAO Yongling, TONG Lihua, et al. The essence of A-type granitoids: A discussion on the opinions held by Prof. Zhang Qi and some other researchers [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2013, 32(2): 260–266.
- 王权, 杨五宝, 张振福, 等. 藏西北黑石北湖一带新近纪火山岩的特征及构造意义[J]. *地质通报*, 2005, 24(1): 80–86.
- WANG Quan, YANG Wubao, ZHANG Zhenfu, et al. Geological characteristics of Neogene volcanic rocks in the Heshi North lake area, northwestern Tibet, and their implication for the Neogene tectonic evolution [J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(1): 80–86.
- 武昱东, 王宗起, 罗金海, 等. 滇东北东川下田坝 A 型花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, 地球化学特征及其构造意义[J]. *地质通报*, 2014, 33(6): 860–873.
- WU Yudong, WANG Zongqi, LUO Jinhai, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemistry of Xiatianba A-type granites in Dongchuan, Northeast Yunnan, and their tectonic significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(6): 860–873.
- 肖爱芳, 黎敦朋. 新藏公路奇台达坂晚中新世火山岩的发现及 ^{40}Ar – ^{39}Ar 定年[J]. *地质通报*, 2010, 29(2/3): 237–242.
- XIAO Aifang, LI Dunpeng. Discovery of Late Miocene volcanic rocks at Qitaidaban of Xinjiang-Tibet Highway, China and its ^{40}Ar – ^{39}Ar dating [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(2/3): 237–242.
- 解龙, 顿都, 朱利东, 等. 西藏北冈底斯扎独顶 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. *中国地质*, 2015, 42(5): 1214–1227.
- XIE Long, DUN Du, ZHU Lidong, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and geological significance of the Zhaduding A-type granites in northern Gangdise, Tibet [J]. *Geology in China*, 2015, 42(5): 1214–1227.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力[J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 221–238.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Haibing, et al. The Qinghai—plateau and continental dynamics: A review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and mechanisms for the rise of the plateau [J]. *Geology in China*, 2006, 33(2): 221–238.
- 薛富红, 张晓晖, 邓江夏, 等. 内蒙古中部达来地区晚侏罗世 A 型花岗岩: 地球化学特征、岩石成因与地质意义[J]. *岩石学报*, 2015, 31(6): 1774–1788.
- XUE Fuhong, ZHANG Xiaohui, DENG Jiangxia, et al. Late Jurassic A-type granite from the Dalai region of central Inner Mongolia: Geochemistry, petrogenesis and tectonic implication [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(6): 1774–1788.
- 杨文强, 刘良, 曹玉亭, 等. 西昆仑塔什库尔干印支期 (高压) 变质事件的确定及其构造地质意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(8): 1047–1060.
- YANG Wengqiang, LIU Liang, CAO Yuting, et al. Geochronological evidence of Indosinian (high-pressure) metamorphic event and its tectonic significance in Taxkorgan area of the Western Kunlun Mountains, NW China [J]. *Science China (Earth Science)*, 2010, 53(10): 1445–1459.
- 杨经绥, 吴才来, 史仁灯, 等. 青藏高原北部鲸鱼湖地区中新世和更新世两期橄榄玄粗质系列火山岩[J]. *岩石学报*, 2002, 18(2): 161–176.
- YANG Jingsui, WU Cailai, SHI Rendeng, et al. Miocene and Pleistocene shoshonitic volcanic rocks in the Jingyuhu area, north of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(2): 161–176.
- 俞胜, 贾轩, 姚皓骞, 等. 西秦岭白龙江地区志留系迭部组岩石地球化学特征及碎屑锆石原位 U-Pb 年代学研究[J]. *西北地质*, 2023, 56(5): 245–261.
- YU Sheng, JIA Xuan, YAO Haoqian, et al. Geochemistry Character-

- istics and Detrital Zircon In-Site U-Pb Geochronology of Silurian Diebu Formation in Bailongjiang Area, West Qinling Mountains[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(5): 245-261.
- 袁超, 孙敏, 李继亮. 西昆仑中带两个花岗岩的年龄和可能的源区[J]. *科学通报*, 1999, 44(5): 534-537.
- YUAN Chao, SUN Ming, LI Jiliang. Two granitic plutons in central western Kunlun belt: Their ages and possible sources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(19): 534-537.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. *科学通报*, 2003, 48(14): 1511-1520.
- YUAN Honglin, WU Fuyuan, GAO Shan, et al. Zircon laser probe U-Pb age determination and REE composition analysis of Cenozoic intrusions in Northeast China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(14): 1511-1520.
- 张以佛, 郑祥身, 郑健康. 青海可可西里地区地质演化[M]. 北京: 科学出版社, 1996, 50-55.
- 张旗, 潘国强, 李承东, 等. 花岗岩结晶分离作用问题——关于花岗岩研究的思考之二[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1239-1251.
- ZHANG Qi, PAN Guoqiang, LI Chengdong, et al. Does fractional crystallization occur in granitic magma? Some crucial questions on granite study (2)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1239-1251.
- 张旗, 冉白皋, 李承东. A 型花岗岩的实质是什么? [J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(4), 621-626.
- ZHANG, Qi, Ran Baigao, LI Chengdong. The criteria and discrimination for A-type granites: A reply to the question put forward by Wang Yang and some other persons for “A-type granite: what is the essence?” [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2013, 33(2): 267-274.
- 张玉泉, 朱炳泉, 谢应雯, 等. 青藏高原西部的抬升速率: 叶城—狮泉河花岗岩⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄的地质解释[J]. *岩石学报*, 1998, 14(1): 11-21.
- ZHANG Yuquan, ZHU Bingquan, XIE Yingwen, et al. The uplifting rates for the western Qinghai-Xizang Plateau: interpretation of ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating data for the granites in the area from Yecheng to Shiquanhe[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(1): 11-21.
- 张传林, 陆松年, 于海峰, 等. 西昆仑造山带构造演化: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 2007, 37(2): 145-155.
- ZHANG Chuanlin, LU Songnian, YU Haifeng, et al. Tectonic evolution of the Western Kunlun orogenic belt in northern Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb geochronology[J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 37(2): 145-155.
- 张培烈, 王根厚, 冯翼鹏, 等. 古特提斯洋闭合时限: 来自南羌塘唐古拉岩带查吾拉岩体的证据[J]. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, 2022, 49(3): 311-323.
- ZHANG Peilie, WANG Genhou, FENG Jipeng, et al. Closure time of the Paleo-Tethys Ocean: Evidence from the southern Qiangtang Tanggula magmatic belt, Tibet, China [J], *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022, 49(3): 311-323.
- 赵波, 李有波, 陈思尧, 等. 西昆仑甜水海地区新近纪侵入岩地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄[J]. *新疆地质*, 2020, 38(03): 319-324.
- ZHAO Bo, LI Youbo, CHEN Siyao, et al. Geochemical Characteristics and Zircon U-Pb Dating of Neogene Period Intrusive Rock in the Tianshuihai Area, West Kunlun[J]. *Xinjiang Geology*, 2020, 38(03): 319-324.
- 赵江林, 曾忠诚, 贺宁强, 等. 新疆大红柳滩地区奇台达坂北侧新近系泉水沟组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 2017, 36(7): 1129-1146.
- ZHAO Jianglin, ZENG Zhongcheng, HE Ningqiang, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Neogene Quanshuigou Formation Volcanic Rocks in the North of Dahongliutan - Qitaidaban Area, Xinjiang[J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(7): 1129-1146.
- 赵江林, 贺宁强, 杜彪, 等. 西昆仑奇台达坂一带晚三叠世中酸性侵入岩锆石 LA-ICP-MS 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. *地质论评*, 2017, 63(5): 1337-1360.
- ZHAO Jianglin, HE Ningqiang, DU Biao, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics of Late Triassic Intermediate-Acid intrusive rocks in Qitaidaban area, Western Kunlun and their tectonic significance[J]. *Geological Review*, 2017, 63(5): 1337-1360.
- 赵振明, 计文化, 李荣社, 等. 青藏高原北部巴颜喀拉与东昆仑地区新近纪以来火山岩的地球化学特征及其成因[J]. *地球化学*, 2009, 38(3): 205-230.
- ZHAO Zhenming, JI Wenhua, LI Rongshe, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of volcanic rocks since the Neogene in the Bayankala and East Kunlun region, northern Tibetan Plateau[J]. *Geochimica*, 2009, 38(3): 205-230.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 青藏高原及邻区新生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 2003, 23(3): 1-11.
- ZHU Dicheng, PAN Guitang, MO Xuanxue, et al. Sr-Nd-Pb isotopic variations of the Cenozoic volcanic rocks from the Qinghai Xizang Plateau and its adjacent areas[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2003, 23(3): 1-11.
- 任纪舜. 从全球看中国大地构造 (中国及邻区大地构造图)[M]. 北京: 地质出版社, 1999, 1-15.
- Altherr R, Holl A, Heger E, et al. High potassium calc-alkaline I-type plutism in the European Variscides[M]. *Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany)*, 2000.

- Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1-2): 59-79.
- Arnaud N O, Vidal P H, Tapponnier P, et al. The high K_2O volcanism of northwestern Tibet: Geochemistry and tectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 111: 351-367.
- Atherton M, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 1993, 362(6416): 144-146.
- Bea F, Arzamastsev A, Montero P, et al. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: evidence of mantle derived metasomatic fluids affecting crustal materials[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 140: 554-566.
- Bonin B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 2007, 97(1): 1-29.
- Boynton W V. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies[J]. In: Henderson P (Ed). *Rare Earth Element Geochemistry*[M]. Elsevier, Amsterdam, 1984, 63-114.
- Chappell B W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 1999, 46: 535-551.
- 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(1-2): 157-185.
- Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641-644.
- Eby G N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 1990, 26: 115-134.
- Frost B R, Arculus R J, Barnes C G, et al. A geochemical classification of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42: 2033-2048.
- Gao R, Li P W, Li Q S, et al. Deep process of the collision and deformation on the northern margin of the Tibetan Plateau: Revelation from investigation of the deep seismic profiles[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44(S1): 71-78.
- Harris N B W, Inger S. Trace element modeling of pelite-derived granites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1992, 110: 46-56.
- King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and Origin of Aluminous A-type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. *Petrology*, 1997, 38: 371-391.
- Jung S, Pfander J A. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoid: constraints from $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ and accessory mineral saturation thermometry[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2007, 19: 859-870.
- Ma Changqian, Li Zhichang, Ehlers Carl, et al. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China[J]. *Lithos*, 1998, 45(1-4): 431-456.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101: 615-643.
- Middlemoet E A. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3-4): 215-224.
- Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58: 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.
- Pitcher W S. The nature and origin of granite[M]. Springer Science & Business Media, 1997.
- Reid J B, Murray D P, Hermes O D, et al. Fractional crystallization in granites of the Sierra Nevada: How important is it?[J]. *Geology*, 1993, 21(7): 587-590.
- Replumaz A, Negredo A M, Villasenor A, et al. Indian continental subduction and slab break-off during Tertiary collision[J]. *Terra Nova*, 2010, 22(4): 290-296.
- Rubatto D. Zircon Trace Element Geochemistry: Partitioning with Garnet and the Link between U-Pb Ages and Metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 2002, 184(1-2): 123-138.
- Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust[M]. *Treatise on Geochemistry*, Oxford: Elsevier, 2003, 3: 1-64.
- Skjerlie K P, Johnston A D. Vapor-absent melting at 10 k bar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites[J]. *Geology*, 1992, 20(3): 263-266.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts[J]. *Implications for mantle composition and processes*. Geological Society of London Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- Watson E B, Harrison T M. Zircon Thermometer Reveals Minimum Melting Conditions on Earliest Earth[J]. *Science*, 2005, 308(5723): 841-844.
- 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: 407-419.
- Zhang Zhaochong, Xiao Xuchang, Wang Jun, et al. Post-Collisional Plio-Pleistocene Shoshonitic Volcanism in the Western Kunlun Mountains, NW China: Geochemical Constraints on Mantle Source Characteristics and Petrogenesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 31: 379-403.