

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.01.003

南祁连扎子沟埃达克岩年代学、地球化学特征及地质意义

王亮¹, 王凯², 张翔^{3,*}, 黄增保³, 杨涛³, 梁凯鹏³, 胡妍³, 刘子锐³

(1. 甘肃省地质勘查基金管理中心, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省自然资源厅, 甘肃 兰州 730000;

3. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:扎子沟岩体位于南祁连西段党河南山, 由石英闪长岩和花岗闪长岩组成。利用 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 法测得花岗闪长岩年龄(450 ± 12) Ma ($MSWD=0.23, n=24$), 侵位时代为晚奥陶世。岩石主量元素显示, SiO_2 介于 $58.46\% \sim 69.14\%$, Al_2O_3 介于 $13.70\% \sim 16.6\%$, MgO 介于 $1.43\% \sim 4.31\%$, 属高钾钙碱性准铝质花岗岩; 微量元素富集轻稀土和 Ba、Rb、Th、U、Sr 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素和重稀土元素。其中, Sr 含量介于 $130.0 \times 10^{-6} \sim 460.0 \times 10^{-6}$, 平均为 310.93×10^{-6} , Yb 介于 $0.70 \times 10^{-6} \sim 1.81 \times 10^{-6}$, 平均为 1.26×10^{-6} , Y 介于 $6.44 \times 10^{-6} \sim 17.68 \times 10^{-6}$, 平均为 12.96×10^{-6} , 弱负 Eu 异常-正 Eu 异常 ($\delta Eu=0.77 \sim 1.55$), 具较高的 Sr/Y 值 ($20.2 \sim 37.1$), 具有埃达克岩地球化学特征。结合区域地质背景, 认为岩体形成于陆-陆碰撞环境, 可能与晚奥陶世南祁连洋闭合, 两侧欧龙布鲁克地块和中祁连地块发生碰撞导致地壳加厚折沉, 地幔物质上涌诱发下地壳部分熔融有关。

关键词:南祁连; 晚奥陶世; 锆石 U-Pb 年龄; 埃达克岩

中图分类号: P588.121

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2022)01-0039-11

Geochronological and Geochemical Characteristics of the Zhazigou Adakite in South Qilian and the Geological Significance

WANG Liang¹, WANG Kai², ZHANG Xiang^{3,*}, HUANG Zengbao³, YANG Tao³,
LIANG Kaipeng³, HU Yan³, LIU Zirui³

(1. Geological Exploration Fund Management Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Department of Natural Resources of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Zhazigou batholith, which is composed of quartz diorite and granodiorite, is located in Danghenanshan of South Qilian. The LA-ICP-MS and zircon U-Pb age of the granodiorite is (450 ± 12) Ma ($MSWD=0.23, n=24$), and the emplacement age is late Ordovician. The major

收稿日期: 2020-12-24; 修回日期: 2021-06-27; 网络发表日期: 2021-12-06; 责任编辑: 李辉

基金项目: 中国地质调查局“甘肃省五个泉子达坂-大道尔基地区矿产远景调查”(1212010781070)。

作者简介: 王亮(1985-), 男, 大学本科学历, 硕士学位, 主要从事基础地质和矿产勘查工作。E-mail: 24110095@qq.com。

* 通信作者: 张翔(1966-), 男, 正高级工程师, 博士, 长期从事基础地质与矿产地质勘查与研究工作。E-mail: 916685598@qq.com。

elements show that SiO_2 is 58.46%~69.14%, Al_2O_3 is 13.70%~16.6%, and MgO is 1.43%~4.31%, belonging to High-K calc-alkaline quasi-aluminous granite. Trace elements are rich in light rare earth and large ion lithophile elements such as Rb, Ba, Th, U, Sr, and depleted in heavy rare earth and high field strength elements such as Nb, Ta, Ti, P. The content of Sr is $130.0 \times 10^{-6} \sim 460.0 \times 10^{-6}$ with an average content of 310.93×10^{-6} ; the content of Yb is $0.7 \times 10^{-6} \sim 1.81 \times 10^{-6}$ with an average content of 1.26×10^{-6} . The content of Y is $6.44 \times 10^{-6} \sim 17.68 \times 10^{-6}$ with an average content of 12.96×10^{-6} , weak to positive Eu anomaly ($\delta\text{Eu}=0.77 \sim 1.55$) and higher Sr/Y ratio (20.2~37.1), having adakite characteristics geochemically. Combined with the regional geological background, it is believed that Zhazigou batholith formed in the continental collision environment, which was related to the close of south Qilian ocean in the Late Ordovician. The collision of the Oulongbuluke block and the middle Qilian block caused the thickening of the crust and the delamination. Then the hot mantle material upwelled leading to the partial melting of the lower crust.

Keywords: South Qilian; Late Ordovician; zircon U-Pb age; adakite

祁连造山带位于中央造山带中段,北邻阿拉善地块,南接柴达木地块,西为阿尔金断裂所截,与敦煌地块相隔,东与北秦岭相接,是典型的加里东期增生造山带(左国朝等,1997)。由南往北依次为南祁连褶皱带、中祁连地块和北祁连造山带(图 1a)。北祁连造山带因发育典型的早古生代沟-弧-盆体系而备受国内外地质学家的关注(张旗等,1997;张建新等,1997;夏林圻等,1998;宋述光,2009)。对南祁连地区的研究相对薄弱,尤其是中酸性侵入岩资料报道较少,一定程度上影响了对该地区构造演化过程的认识。近年来,在南祁连西段的党河南山地区金矿找矿有新突破,发现了贾公台、乌力沟、鸡叫沟、石块地、敖包沟等一批大中型金矿床和小黑刺沟铜矿。研究表明,这些矿床的形成与中酸性岩体侵入关系密切(张翔,2015;戴双等,2017)。因此,对南祁连西段党河南山一带中酸性岩体开展研究不仅有益于深化南祁连构造演化过程,而且对该地区金矿成因研究有重要意义。

扎子沟岩体是南祁连西段加里东期中酸性岩体中最有代表性岩体。其特点是出露面积大,岩石类型齐全,具有多期侵入的特征。开展年代学和岩石成因研究对探讨南祁连加里东期构造演化有重要意义。前人采用 Rb-Sr 法和 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 法进行了测年,获得 510.85~416.7 Ma(刘志武等,2006;罗志文等,2015;张翔,2015)年龄;形成环境有活动陆缘、洋壳俯冲、造山后伸展等;在岩体时代、成因类型以及构造环境等方面均存在较大差异。

笔者在 1:5 万区域地质调查和地勘基金项目成果基础上,对扎子沟岩体岩石学、地球化学、年代学开展研究,讨论了岩体侵位时代、岩石成因和构造背景,以期在南祁连西段早古生代构造演化提供新的证据和思路。

1 区域地质背景

研究区位于甘肃省肃北县城东南 10 km,构造上属南祁连褶皱带西段(宋述光等,2019)(图 1a)。该地区广泛出露早古生代奥陶-志留纪地层。其中,下一中奥陶统吾力沟组为一套海相火山-沉积建造,由基性火山熔岩(玄武岩、安山玄武岩)和酸性火山熔岩(流纹岩、英安熔岩及同质火山碎屑岩)及夹灰岩、含砾砂岩、杂砂岩和条带状硅质岩等正常沉积岩组成,岩石组合具有双峰式火山岩套特征(夏林圻等,1998;邱家骧等,1998),在大道尔吉一带与基性-超基性岩构成蛇绿岩套(黄增保等,2016)。上奥陶统一志留系出露广泛,为巨厚残留海盆相复理石建造。区内中酸性岩浆活动强烈,自东向西主要由鸡叫沟岩体、贾公台岩体、乌力沟岩体和扎子沟岩体等组成;岩石类型主要有石英闪长岩、花岗闪长岩、辉石闪长岩、英云闪长岩、二长花岗岩等;形成年龄为 420~476 Ma(Wang C, et al., 2017;戴双等,2017)。目前,围绕中酸性岩体与围岩接触带已发现多处金铜矿床,规模较大的有黑刺沟、小黑刺沟、鸡叫沟、乌力沟、贾公台、石块地等金矿床。

2 岩体地质及岩石学特征

2.1 岩体地质

扎子沟岩体主要分布于祁连山西段党河南山南坡扎子沟一大红沟沟口一带(图 1b),由 26 个侵入体组成,出露面积 158 km²,呈北西向长条状沿南祁连褶皱带北缘产出,明显受区域断裂控制,其南西侧侵入于奥陶系吾力沟群、盐池湾组及哆嗦曲组中,沿接触带见角岩化、绿泥石化等接触变质,北东侧侵入于早元古代野马南山群中。该岩体主要由石英闪长岩、花岗闪长岩及二长花岗岩组成,根据产出关系,结合同位素测年结果,可分为 2 期。

早期:分布于扎子沟、清水沟和三个洼塘一带,由石英闪长岩和花岗闪长岩组成,构成扎子沟岩体的主体,约占岩体出露面积的 2/3 以上。这 2 类岩体中暗色深源包体发育,一般呈椭圆状,个别为拉长或撕裂状,一般直径 5~15 cm,包体岩性主要为细粒闪长岩,呈半自形粒状结构,粒径 1~2 cm,由斜长石、石英,以及普通角闪石和黑云母等矿物组成。斜长石为半自形板状,略具定向排列;石英闪长岩和花岗闪长岩的侵位年龄分别为 442.5 Ma 和 443.9 Ma(罗志文等,2015)。笔者在扎子沟一带的花岗闪长岩中获得(450±12)Ma 的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年龄,表明其侵位时代应为晚奥陶世。

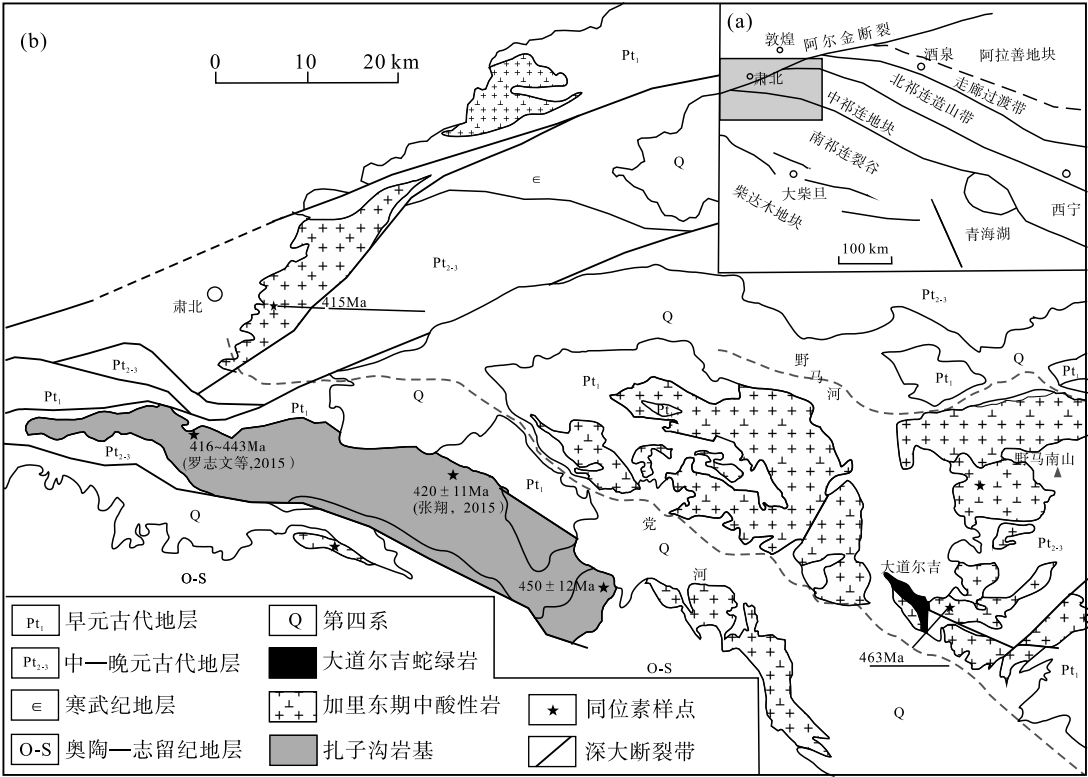


图 1 (a)祁连地区构造简图和(b)扎子沟岩体地质图

Fig. 1 (a) Simplified tectonic framework map of Qilian area and(b)Geological map of Zhazigou batholiths

晚期:分布于三个洼塘、石块地、熬包沟东岔一带,呈小岩株、岩枝产出,岩石类型为二长花岗岩。该岩体侵入于早期花岗闪长岩和石英闪长岩中,局部侵入于早元古代野马南山岩群中。岩体侵位时代为 416.7~420 Ma(罗志文等,2015;张翔,2015),形成于晚志留世。

2.2 岩石学特征

扎子沟岩体主要岩石类型有石英闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩,特征简述如下。

石英闪长岩体:灰色-灰绿色,半自形细粒状结构,粒径 1~2 mm,块状构造;主要由石英、斜长石、角闪石、辉石矿物组成。斜长石:自形-半自形粒状,

具帘石化、绢云母化,含量约 55%;角闪石为长柱状,含量为 35%,多被绿帘石、绿泥石、次闪石等取代;石英呈他形粒状,具强波状消光,含量为 10%左右;副矿物为磷灰石、锆石、磁铁矿等,含量小于 1%。

花岗闪长岩:浅肉红色、似斑状结构,块状构造,由石英(25%)、斜长石(45%)、钾长石(15%)、角闪石(10%)组成;斑晶为自形-半自形斜长石、他形粒状钾长石和石英构成,粒径约 8 mm,含量为 20%左右;基质为中粒花岗结构,粒径约 1 mm,由板柱状斜长石、他形粒状钾长石、石英、长柱状角闪石和片状黑云母组成,含量约 80%;副矿物为榍石、磷灰石、白钛石、锆石,含量小于 1%。

二长花岗岩:肉红色,中细粒花岗结构,块状构造,矿物粒径 1~3 mm,石英约 25%~30%,为他形粒状;斜长石约 25%~30%,呈板状,大部分绢云母化、帘石化;钾长石约 25%~30%,具格子双晶,个别具蠕虫状、条纹状结构。

3 样品采集与分析方法

本次挑选扎子沟岩体出露面积较大的石英闪长岩、花岗岩闪长岩样品 6 件,进行了全岩主量元素和稀土微量元素分析。主量元素采用重量法测试,分析精度(相对误差)优于 1%;微量元素在原国土资源部中南测试中心测试,利用 X Series II 等离子体质谱仪进行了微量和稀土元素分析,分析误差小于 5%。

同时,采集了新鲜花岗闪长岩 10kg 作为 LA -

ICPMS 锆石 U - Pb 同位素样品,采样位置(95°21'20",39°13'11")见图 1。锆石挑选在河北地质调查院岩矿测试室进行了锆石分离,在双目镜下挑选出透明且晶形较好的锆石晶体,进行了形态学和矿物学鉴定,选择无包裹体和裂缝具有明显震荡环带的自形晶锆石进行测试。锆石 U - Pb 年龄测试在西北大学大陆动力实验室进行,采用 Agilent7500 型 ICP - MS 和 ComPex102ArF 准分子激光器(工作物质 ArF,波长 193 nm)以及 GeoLas00M 光学系统联机上进行,激光斑束直径 30 μm ,He 作为剥蚀物质的载气,样品剥蚀深度为 20~40 μm ,每测 5 个样点,采用国际标准锆石 91500 作为外标进行校正。原始数据同位素比值计算采用 GLITTER_ver 4.0 程序,利用 Anderson(2002)提出的 ComPbCorr[#] 3.17 校正程序进行普通铅校正,加权平均年龄计算和 U - Pb 谐和图绘制利用 Isoplot/Ex_ver 3(Ludwig,2003)程序完成。同位素比值误差为 1 σ ,年龄值选²⁰⁶Pb/²³⁸U,加权平均年龄的误差为 95%置信度。

4 测试结果

4.1 锆石 U - Pb 年代学

扎子沟岩体花岗闪长岩中锆石呈无色,半自形板状、短柱状,一般长 100~150 μm ,宽 50~100 μm ,长宽比为 2:1~1:1,柱面{110}、{100}和锥面{111}均发育,其 CL 图像(图 2a)显示锆石内部振荡环带结构发育良好。笔者在透射光、反射光图像研究基础上,对 30 粒锆石进行分析,年龄结果见表 1。

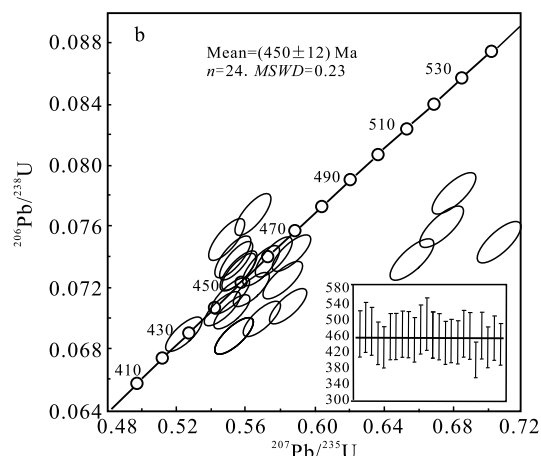
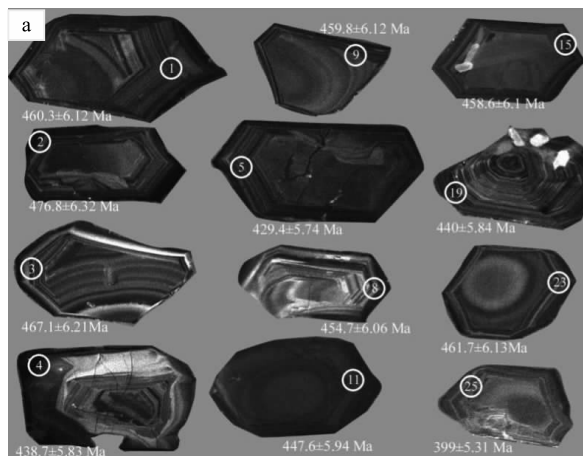


图 2 (a) 扎子沟岩体锆石阴极发光照片和 (b) ²⁰⁷Pb/²³⁵U - ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄谐和曲线图

Fig. 2 (a) CL image of Zircon and (b) ²⁰⁷Pb/²³⁵U vs. ²⁰⁶Pb/²³⁸U Concordia diagram and averaged age of Zhazigou batholith

表 1 扎子沟岩体花岗闪长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年数据表
Tab. 1 Zircon LA-ICPMS U-Pb isotopic data of granodiorite from Zhazigou batholiths

样点	Pb *	Th	U	Th/U	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶		Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵		Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸		Pb ²⁰⁸ /Th ²³²		Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶		Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵		Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸		谐和度		
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ		比值	1σ
Q-01	40.75	308.6	440.44	0.7	0.054 1	0.001 6	0.552 5	0.008 4	0.074 0	0.001 0	0.019 9	0.000 2	375.6	66.8	446.6	5.5	460.3	6.1	397.4	4.8	97
Q-02	39.61	288.17	401.73	0.72	0.053 2	0.001 6	0.563 5	0.008 5	0.076 8	0.001 1	0.023 8	0.000 3	338.0	67.3	453.8	5.5	476.8	6.3	474.3	5.5	95
Q-03	50.4	345.81	520.37	0.66	0.053 0	0.001 6	0.549 2	0.008 5	0.075 2	0.001 0	0.025 5	0.000 3	327.8	67.8	444.4	5.5	467.1	6.2	509.7	6.0	95
Q-04	59.07	588.59	615.73	0.96	0.056 8	0.001 7	0.551 9	0.008 2	0.070 4	0.001 0	0.021 6	0.000 3	483.6	66.1	446.2	5.4	438.7	5.8	432.3	5.0	102
Q-05	52.5	404	592.48	0.68	0.055 1	0.001 7	0.524 0	0.008 2	0.068 9	0.001 0	0.022 1	0.000 3	416.4	66.7	427.8	5.5	429.7	5.7	442.7	5.3	100
Q-06	38.21	271.4	409.72	0.66	0.055 1	0.001 7	0.555 3	0.008 6	0.073 0	0.001 0	0.023 1	0.000 3	416.8	66.5	448.5	5.6	454.5	6.1	462.4	5.5	99
Q-08	42.73	404.29	429.6	0.94	0.055 2	0.001 7	0.556 1	0.008 7	0.073 1	0.001 0	0.022 6	0.000 3	418.5	66.9	449.0	5.7	454.7	6.1	451.2	5.3	99
Q-09	37.67	325.21	377.59	0.86	0.056 5	0.001 7	0.575 8	0.009 0	0.073 9	0.001 0	0.023 8	0.000 3	469.9	67.0	461.8	5.8	459.8	6.1	475.5	5.6	100
Q-10	35.79	252.75	367.81	0.69	0.064 5	0.002 0	0.656 8	0.010 0	0.073 9	0.001 0	0.025 5	0.000 3	757.4	63.4	512.7	6.1	459.3	6.1	508.0	6.0	112
Q-11	48.51	341.55	524.19	0.65	0.056 8	0.001 7	0.563 8	0.008 4	0.071 9	0.001 0	0.023 6	0.000 3	484.8	66.7	454.0	5.5	447.6	5.9	471.4	5.5	101
Q-13	42.19	625.97	414.66	1.51	0.064 3	0.002 0	0.673 1	0.010 8	0.075 9	0.001 1	0.012 9	0.000 2	751.1	64.8	522.6	6.6	471.6	6.3	258.4	3.1	111
Q-14	42.64	287.27	410.07	0.7	0.063 1	0.002 0	0.680 3	0.011 1	0.078 2	0.001 1	0.027 5	0.000 3	711.5	65.6	526.9	6.7	485.2	6.5	548.2	6.6	109
Q-15	40.8	277.86	435.54	0.64	0.054 4	0.001 7	0.553 6	0.008 7	0.073 7	0.001 0	0.022 6	0.000 3	389.1	68.2	447.4	5.7	458.6	6.1	451.5	5.4	98
Q-16	44.09	306.61	444.54	0.69	0.068 4	0.002 1	0.707 6	0.010 6	0.075 0	0.001 0	0.025 2	0.000 3	880.1	62.6	543.3	6.3	466.3	6.2	502.5	5.9	117
Q-18	56.57	424.26	595.38	0.71	0.055 3	0.001 7	0.557 0	0.008 4	0.073 0	0.001 0	0.022 8	0.000 3	423.9	67.2	449.5	5.5	454.4	6.0	456.1	5.3	99
Q-19	56.86	474.99	605.64	0.78	0.056 1	0.001 7	0.546 6	0.008 2	0.070 6	0.001 0	0.022 4	0.000 3	455.8	67.5	442.7	5.4	440.0	5.8	447.0	5.2	101
Q-21	55.69	481.44	583.57	0.82	0.055 9	0.001 7	0.550 9	0.008 4	0.071 4	0.001 0	0.022 0	0.000 3	449.7	67.8	445.6	5.5	444.6	5.9	440.3	5.1	100
Q-22	54.82	390.96	594.46	0.66	0.059 8	0.001 9	0.584 4	0.008 9	0.070 8	0.001 0	0.023 3	0.000 3	598.0	66.2	467.3	5.7	441.0	5.9	464.7	5.5	106
Q-23	51.53	411.61	520.8	0.79	0.057 3	0.001 8	0.586 3	0.009 0	0.074 3	0.001 0	0.023 3	0.000 3	500.7	68.0	468.5	5.8	461.7	6.1	464.9	5.5	101
Q-24	46.22	362	476.88	0.76	0.056 1	0.001 8	0.568 7	0.008 9	0.073 5	0.001 0	0.022 8	0.000 3	457.6	68.5	457.2	5.8	456.9	6.1	455.2	5.4	100
Q-25	49.45	419.17	587.17	0.71	0.059 2	0.001 9	0.521 6	0.007 9	0.063 9	0.000 9	0.020 5	0.000 2	575.4	66.8	426.2	5.3	399.0	5.3	409.8	4.8	107
Q-26	57.49	479.86	577.74	0.83	0.056 2	0.001 8	0.569 2	0.008 8	0.073 5	0.001 0	0.023 5	0.000 3	457.9	68.6	457.5	5.7	457.2	6.1	470.2	5.5	100
Q-28	39.8	382.83	422.15	0.91	0.058 3	0.001 9	0.553 3	0.009 0	0.068 8	0.001 0	0.021 2	0.000 3	541.5	69.3	447.2	5.9	428.8	5.7	423.2	5.1	104
Q-29	34.46	282.21	353.58	0.8	0.058 2	0.001 9	0.581 3	0.009 5	0.072 4	0.001 0	0.023 0	0.000 3	536.0	69.2	465.3	6.1	450.9	6.0	459.3	5.5	103
Q-30	39.01	393.35	406.11	0.97	0.059 0	0.001 9	0.569 2	0.009 2	0.069 9	0.001 0	0.020 2	0.000 2	567.9	68.3	457.5	6.0	435.7	5.8	405.0	4.8	105

从表 1 中可以看出:锆石中 Th 含量为 $252.75 \times 10^{-6} \sim 625.97 \times 10^{-6}$, U 含量为 $367.81 \times 10^{-6} \sim 615.73 \times 10^{-6}$, Th/U 值介于 $0.65 \sim 1.51, >0.1$, 且发育明显震荡环,具有典型的岩浆锆石特征。30 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄变化于 $399 \sim 485\text{ Ma}$, 其中 4 个测点偏离谐和线,其他 26 个测点在谐和线上形成一个年龄集中区(图 2b),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(450 \pm 12)\text{ Ma}$ ($MSWD=0.23$),精确反映岩体侵位时代为晚奥陶世。

4.2 主量元素特征

扎子沟岩体主量元素、稀土和微量元素分析数

据见表 2。从表 2 中可知,岩石 SiO_2 含量介于 $58.46\% \sim 69.14\%$,平均值为 63.33% , K_2O 含量介于 $2.30\% \sim 5.20\%$, Na_2O 含量介于 $3.16\% \sim 4.40\%$,全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)介于 $5.90\% \sim 8.50\%$, δ 值介于 $1.7 \sim 4.7$ 。在硅碱图上(图 3a),绝大多数落入高钾钙碱性系列区; Al_2O_3 含量为 $13.70\% \sim 16.6\%$,平均为 15.14% ,在 $\text{A/NK} - \text{A/CNK}$ 图解(图 3b)落入准铝质花岗岩系列区。 MgO 较低,为 $1.43\% \sim 4.31\%$,平均为 2.34% 。总体特征表明扎子沟岩体属高钾钙碱性准铝质花岗岩。

表 2 扎子沟岩体岩石化学(%)及稀土微量元素(10^{-6})分析结果表
Tab. 2 Analysis of chemical composition(%),REE and trace elements(10^{-6}) of Zhazigou batholith

样品编号	DB281*	DB282*	DB285*	DB180*	DB186*	9P9YQ1	9yQ ₆₉₆	9YQ836	9YQ906	9P5YQ2	9YQ236
SiO ₂	65.48	59.14	67.80	69.14	62.76	60.08	58.46	65.52	62.78	66.54	62.18
TiO ₂	0.70	0.56	0.24	0.20	0.50	0.79	0.46	0.48	0.70	0.40	0.55
Al ₂ O ₃	15.12	16.60	14.64	14.69	15.78	15.68	15.23	15.20	14.08	13.70	15.79
Fe ₂ O ₃	2.96	4.39	1.96	1.81	2.11	2.98	3.36	1.62	2.18	2.81	1.79
FeO	2.54	3.70	2.09	1.87	4.10	3.58	3.20	3.02	2.96	1.12	3.36
MnO	0.12	0.15	0.10	0.08	0.13	0.30	0.13	0.29	0.09	0.08	0.10
MgO	1.97	3.01	1.43	1.55	2.29	2.98	4.31	2.14	1.91	1.53	2.67
CaO	3.09	5.38	2.69	3.24	4.58	5.99	6.68	1.80	3.31	3.19	5.67
Na ₂ O	3.88	3.78	3.36	3.25	3.16	3.40	3.30	4.40	3.60	3.70	3.60
K ₂ O	2.99	2.30	4.18	3.37	3.18	2.60	5.20	3.00	3.90	4.00	2.30
P ₂ O ₅	0.13	0.18	0.15	0.11	0.18	0.26	0.23	0.12	0.18	0.18	0.24
LOI	1.02	0.81	1.36	0.69	1.23	1.46	0.10	1.99	3.76	0.61	1.42
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.1	100.7	99.6	99.5	97.9	99.7
Rb	100.22	71.82	118.65	73.98	121.02	62.00	16.00	10.00	8.00	—	—
Ba	994.17	889.72	1367.10	732.82	702.85	940.00	150.00	130.00	230.00	—	—
Th	16.56	11.39	39.80	27.61	18.11	6.80	1.00	0.64	1.96	—	—
U	3.16	1.71	5.62	5.83	1.35	0.80	0.20	0.40	0.20	—	—
Ta	0.68	1.51	1.41	0.53	1.03	0.53	0.15	0.35	3.70	—	—
Nb	7.84	9.66	12.50	5.37	10.68	6.30	1.60	1.60	1.80	—	—
Sr	344.17	446.60	313.06	316.38	328.20	460.00	220.00	240.00	130.00	—	—
Zr	90.91	95.35	127.31	55.92	144.98	100.00	62.00	56.00	45.00	—	—
Hf	3.11	2.94	4.56	2.42	4.13	2.20	1.10	1.20	1.20	—	—
Cr	27.83	21.47	14.69	2.79	31.67	15.80	12.10	25.90	37.00	—	—
Co	10.51	15.88	6.34	8.05	11.36	—	—	—	—	—	—
Ni	12.27	11.09	6.45	13.96	9.53	—	—	—	—	—	—

续表 2

样品编号	DB281 *	DB282 *	DB285 *	DB180 *	DB186 *	9P9YQ1	9yQ ₆₉₆	9YQ836	9YQ906	9P5YQ2	9YQ236
Cs	3.88	2.41	3.22	1.92	4.28	3.00	2.50	1.70	1.80	—	—
La	29.64	26.08	26.99	23.34	41.28	43.80	6.88	44.50	11.50	36.80	49.70
Ce	54.36	53.28	58.21	39.54	79.94	74.80	14.20	73.70	21.50	61.50	61.10
Pr	5.46	6.21	5.83	4.14	8.19	10.20	1.40	8.28	2.04	6.44	8.63
Nd	18.14	22.38	20.79	13.77	29.49	45.50	6.95	32.30	7.26	25.30	34.70
Sm	2.64	4.49	3.39	2.52	5.04	7.13	2.05	4.99	1.84	4.72	5.71
Eu	1.11	1.78	1.71	0.93	1.32	1.87	0.53	1.30	0.40	1.09	1.38
Gd	3.85	3.27	3.29	2.04	4.14	5.61	1.60	3.37	1.22	3.32	4.17
Tb	0.36	0.61	0.46	0.35	0.63	0.67	0.28	0.44	0.21	0.61	0.61
Dy	1.83	3.21	1.69	1.28	2.56	3.88	1.87	2.53	1.34	3.43	3.61
Ho	0.34	0.57	0.45	0.36	0.56	0.77	0.41	0.43	0.26	0.64	0.75
Er	1.11	1.74	1.32	0.98	1.28	2.06	1.30	1.02	0.82	1.63	2.06
Tm	0.17	0.30	0.21	0.15	0.26	0.27	0.18	0.14	0.09	0.25	0.28
Yb	1.34	1.81	1.65	0.78	1.41	1.37	1.00	0.77	0.70	1.50	1.49
Lu	0.20	0.24	0.23	0.16	0.25	0.21	0.14	0.11	0.10	0.23	0.21
Y	11.72	17.68	12.25	8.53	16.07	16.70	10.20	10.40	6.44	15.50	17.10
ΣREE	120.55	125.97	126.22	90.34	176.35	214.84	48.99	184.28	55.72	162.96	191.5
La _N /Yb _N	14.9	9.7	11.0	20.2	19.7	21.6	4.6	39.0	11.1	16.5	22.5
δEu	1.06	1.36	1.54	1.21	0.86	0.87	0.86	0.91	0.77	0.80	0.83
Sr/Y	29.4	25.3	25.6	37.1	20.4	27.5	21.6	23.1	20.2	—	—

注：* 样品数据刘志武等,2006。

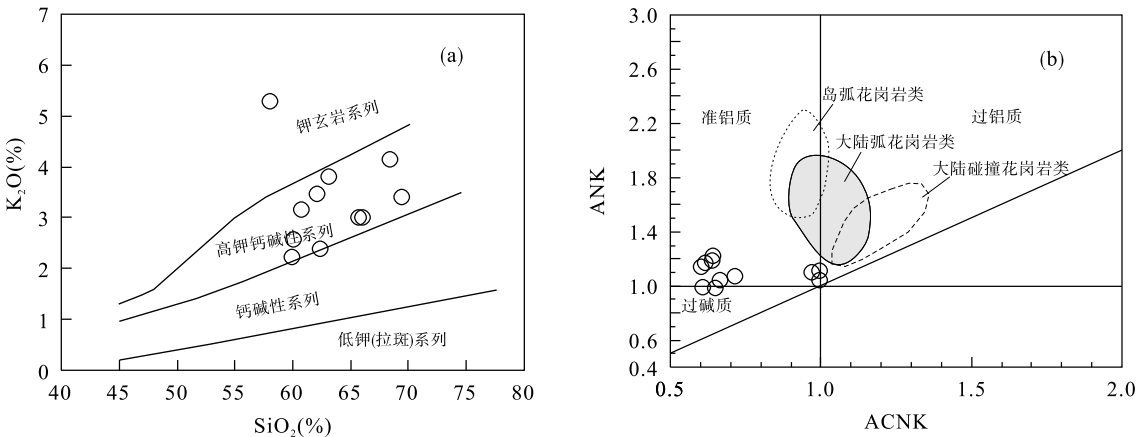


图 3 (a)SiO₂ - K₂O 图和(b)A/NK - A/CNK 图解

Fig. 3 (a)SiO₂ vs. K₂O and (b)A/NK vs. A/CNK diagrams of Zhazigou batholith

4.3 稀土微量元素特征

由表 2 可知,扎子沟岩体稀土元素总量较低,ΣREE 介于 $48.99 \times 10^{-6} \sim 214.84 \times 10^{-6}$, 平均为 137.71×10^{-6} 。其中 $LREE = 32.01 \times 10^{-6} \sim 183.30 \times 10^{-6}$, $HREE = 4.74 \times 10^{-6} \sim 13.84 \times 10^{-6}$, $LREE/HREE = 4.72 \sim 18.74$, $(La/Yb)_N =$

4.6~39.0,反映轻稀土富集,且轻重稀土分馏明显, $\delta\text{Eu}=0.77\sim1.55$,弱负Eu异常-正Eu异常。球粒陨石标准化稀土元素配分曲线也显示相似特征,曲线左倾,轻稀土富集(图4a),Eu异常不明显。岩石Sr含量较高,介于 $130.0\times10^{-6}\sim460.0\times10^{-6}$,平均为 310.93×10^{-6} ,Y、Yb含量较低,其中Y介于 $6.44\times10^{-6}\sim17.68\times10^{-6}$,Yb介于 $0.70\times10^{-6}\sim$

1.81×10^{-6} ,具有高Sr和Sr/Y值(20.2~37.1),低Y、Yb特征。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图4b),表现为Rb、Ba、Th、U等大离子亲石元素强烈富集,Nb、Ta、Ti、P等高场强元素的亏损,具有成熟岛弧或大陆地壳岩石的一般特征。

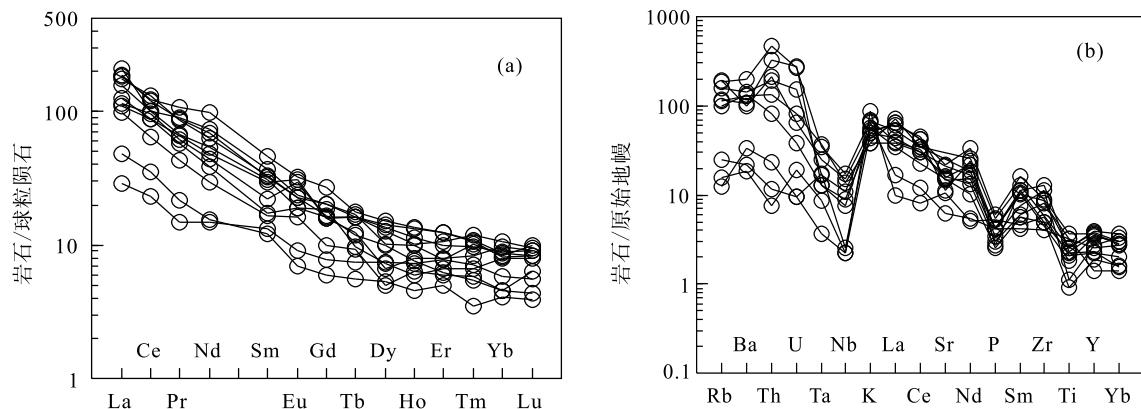


图4 (a)稀土元素球粒陨石标准化配分模式和(b)微量元素地幔标准化蛛网图

Fig. 4 (a)Chondrite-normalized REE patterns and (b)Primitive mantle normalized trace element spider diagrams

5 讨论

5.1 成岩时代

扎子沟岩体侵入最晚地层为晚奥陶世盐池湾组和哆嗦曲组,表明其侵位于晚奥陶世之后。刘志武等(2006)曾获得扎子沟岩体中石英闪长岩全岩Rb-Sr等时线年龄为510.85 Ma;罗志文等(2015)获得三个洼塘一带该岩体早期侵入石英闪长岩和花岗闪长岩的侵位年龄分别为 (442.5 ± 4.7) Ma和 (443.9 ± 1.3) Ma,晚期侵入的二长花岗岩年龄为 (416.7 ± 4.3) Ma;张翔(2015)测得石块地一带该岩体二长花岗岩的LA-ICPMS锆石U-Pb年龄为 (420 ± 11) Ma。表明扎子沟岩体具多期次、多阶段侵入特征,早期形成于晚奥陶世,晚期为晚志留世。

笔者利用LA-ICPMS锆石U-Pb法对扎子沟岩体东段花岗闪长岩进行了测年(图2,表1),获得 (450 ± 12) Ma的LA-ICPMS锆石U-Pb年龄,对应侵位时代为晚奥陶世,为扎子沟岩体早期中酸性岩浆活动的产物。

5.2 岩石成因

刘志武等(2006)研究表明扎子沟岩体属于活动

陆缘环境I型花岗岩,为祁连造山带加里东期构造岩浆活动产物。罗志文等(2015)研究认为扎子沟岩体花岗闪长岩和石英闪长岩具有I型花岗岩特征,可能与洋壳俯冲环境下引起岛弧岩浆活动有关。

笔者对扎子沟岩体主体岩性石英闪长岩和花岗闪长岩进行了研究,结果表明岩石主要矿物组成为斜长石+石英+角闪石±黑云母,未见斜方辉石和单斜辉石;副矿物主要由榍石、磷灰石、锆石及钛铁矿;岩体中普遍见闪长质暗色深源包体。岩石具有典型埃达克质岩石地球化学特征(Defant,1990),主要表现主量元素 SiO_2 为58.46%~69.14%,平均为63.33%(>56%), Al_2O_3 为13.70%~16.6%,平均为15.14%,(多数 $\geq 15\%$),MgO为1.43%~4.31%,平均为2.34%(多数<3%);微量元素表现Y、Yb含量低,其中Y含量介于 $6.44\times10^{-6}\sim17.68\times10^{-6}$,平均为 12.96×10^{-6} ($Y<18\times10^{-6}$),Yb含量为 $0.70\times10^{-6}\sim1.81\times10^{-6}$,平均为 1.26×10^{-6} ($<1.9\times10^{-6}$),Sr/Y值介于20.2~37.1,在Sr/Y-Y(图5a)和 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-\text{Yb}_{\text{N}}$ (图5b)等鉴别埃达克岩的地球化学图解上,样点均落入埃达克岩区域。但与典型埃达克岩相比,Sr含量偏低,

介于 $130.0 \times 10^{-6} \sim 460.0 \times 10^{-6}$, 平均为 310.93×10^{-6} , 仅有 2 件样品含量大于 400×10^{-6} 。岩石具弱负 Eu 异常-正 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.77 \sim 1.55$), 推测岩浆源区残留相可能存在极

少量的斜长石。在 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} - \text{Yb}_{\text{N}}$ 图解上 (图 5b), 样品点全部落在 10% 石榴角闪岩部分熔融曲线附近, 说明其源区残留相主要为石榴石+角闪石±斜长石。

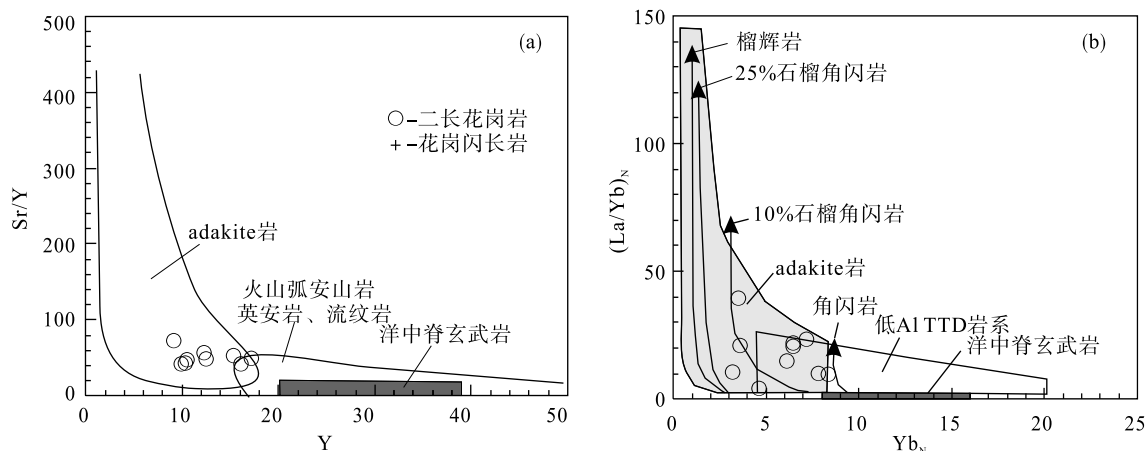


图 5 (a) 孔子沟岩体 Sr/Y - Y 图解和 (b) $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} - \text{Yb}_{\text{N}}$ 图解 (据 Defant, 1990; Drummond, 1990)

Fig. 5 (a) Sr/Y vs. Y and (b) $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ vs. Yb_{N} diagrams of Zhazigou batholith

5.3 构造环境

对区域构造演化研究表明, 祁连地区裂解始于新元古代, 其北部至晚寒武世 ($\sim 505 \text{ Ma}$) 已形成北祁连洋盆, 发育 MORB 特征的基性熔岩; 南部至早奥陶世, 自东向西持续在裂谷化, 形成南祁连裂谷盆地, 发育双峰式火山岩系为特征。南祁连洋、北祁连洋以及欧龙布鲁克地块、中祁连地块和阿拉善地块共同构成了祁连地区“三块夹两洋”的构造格局。早奥陶世—中奥陶世末 ($490 \sim 460 \text{ Ma}$) 北祁连洋盆俯冲消减, 形成较完整的沟-弧-盆体系 (宋述光, 2009), 南祁连也进入大规模的洋壳俯冲。越来越多的证据表明, 晚奥陶世的“古浪运动” ($460 \sim 420 \text{ Ma}$) 是造成北祁连洋盆闭合的主要原因 (甘肃地质矿产局, 1989)。重要证据有北祁连地区上奥陶统与中奥陶统之间普遍存在的不整合接触; 北祁连高压变质带中榴辉岩等折返退变质形成蓝闪石和多硅白云母, Ar-Ar 年龄也集中在 $442 \sim 455 \text{ Ma}$ (林宜慧等, 2012; Liu, 2006; Song, 2013); 以及祁连地区广泛发育志留纪残留海盆相复理石建造 (Gao Shan et al., 2004)。早泥盆世后, 祁连地区进入造山后伸展阶段, 形成泥盆纪老君山群磨拉石建造。

本次研究获得孔子沟岩体花岗闪长岩的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 $(450 \pm 12) \text{ Ma}$ (晚奥陶

世), 发生在“古浪运动”早期, 岩石属高钾钙碱性准铝质系列, 具有典型埃达克质岩石地球化学特征, 其形成应该与祁连地区的碰撞造山有关。同期的埃达克岩在邻区的野马南山一带也有发现, 如黑沟梁子花岗岩、野马南山花岗岩体等 (444 Ma) (苏建平等, 2004a; 2004b), 形成于同碰撞造山阶段。由此可以推断, 晚奥陶世发生的“古浪运动”导致北祁连洋和南祁连洋盆闭合, 其两侧的欧龙布鲁克地块、中祁连地块和阿拉善地块最终发生碰撞作用, 进而地壳加厚, 下地壳密度增大而发生榴辉岩化。由于下地壳密度的增加造成重力不稳而发生拆沉作用, 热地幔物质上涌, 诱发下地壳部分熔融, 形成孔子沟岩基早期具有埃达克质岩石地球化学特征的中酸性岩石。区域上同期形成的埃达克岩还有黑沟梁子花岗岩、野马南山花岗岩体等 (444 Ma) (苏建平等, 2004a; 2004b)。

5.4 岩体与金矿化的关系

南祁连西段的党河南山地区是祁连山地区重要的金成矿带, 已发现和探明金矿 10 余处, 多沿中酸性岩体内外接触带或断裂带产出, 如乌力沟金矿、鸡叫沟金矿、黑刺沟金矿、贾台金矿、振兴梁金矿和石块地金矿等, 这些矿床具有中低温热液成矿特征, 成矿作用与中酸性岩浆侵入关系密切 (张翔, 2015)。

扎子沟岩体岩石中 Au、Ag、As、Sb 等元素含量较高,其中 Au 丰度介于 $5.68 \times 10^{-9} \sim 8.63 \times 10^{-9}$ (刘志武,2007),1:50000 区域矿产调查在扎子沟岩体分布区内或近旁圈定出 HS1、HS2、HS3、HS7 等以 Au 为主的化探异常。目前,发现石块地 1 个小型金矿床和清水沟金矿点、小黑刺沟铜矿点(魏志军等,2012)等,表明扎子沟岩体的侵入与区内金矿化关系密切,岩浆活动提供了一定的成矿物质和热源。

6 结语

(1)笔者获得南祁连西段党河南山扎子沟岩体花岗闪长岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 (450 ± 12) Ma,表明其侵位时代为晚奥陶世,为扎子沟岩体早期中酸性岩浆活动的产物,可能与晚奥陶世发生的“古浪运动”有关,形成于碰撞造山环境。

(2)通过岩石学和地球化学研究,表明扎子沟岩体早期中酸性岩石具有埃达克岩相似的地球化学特征,可能与晚奥陶世南祁连洋闭合、两侧欧龙布鲁克地块和中祁连地块发生碰撞作用导致地壳加厚、下地壳物质因密度增加造成重力不稳而发生拆沉作用及地幔物质上涌诱发下地壳部分熔融有关。

致谢:本文为甘肃 1:5 万五个泉子达坂-大道尔基铬铁矿 8 幅区域矿产调查项目和黑刺沟一带铜矿普查项目的成果之一。感谢甘肃省地质调查院魏志军高级工程师、漆玮工程师、程旭工程师在野外调查过程中的帮助。

参考文献(References):

戴霜,张翔. 南祁连党河南山早古生代构造演化与金矿成矿[M]. 北京:科学出版社,2017.

DAI Shuang, ZHANG Xiang. Early Paleozoic tectonic evolution and gold mineralization in Danghe Nanshan, South Qilian[M]. Beijing: Science Press, 2017.

甘肃地质矿产局. 甘肃省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1989.

Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. Regional Geology of Gansu province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.

黄增保,郑建平,李葆华,等. 南祁连大道尔吉早古生代弧后盆地型蛇绿岩的年代学、地球化学及意义[J]. 大地构造与成矿,2016,40(4): 826-838.

HUANG Zengbao, ZHENG Jianpin, LI Baohua, et al. Geochronology, geochemistry and significance of the Early Paleozoic back-arc type ophiolite in Dadaoerji area, South Qilian, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016,40(4): 826-838.

刘志武,王崇礼,石小虎. 南祁连党河南山花岗岩类特征及其构造环境[J]. 现代地质,2006,20(4):545-555.

LIU ZW, WANG CL, SHI XH. Granitoids Characteristics and Tectonic Setting of Danghenanshan Area in South Qilian Mountain[J]. Geoscience, 2006, 20(4):545-555.

刘志武,王崇礼. 南祁连党河南山花岗岩类地球化学及其金铜矿化[J]. 地质与勘探,2007,43(1):64-74.

LIU Zhiwu, WANG Chongli. Granitoids Geochemistry and Gold-Copper mineralization in the Danghenanshan Area, Southern Qilian Mountains[J]. Geology and Prospecting, 2007,43(1):64-74.

林宜慧,张李飞. 北祁连山清水沟蓝片岩带中含硬柱石蓝片岩和榴辉岩的岩石学, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及其意义[J]. 地质学报,2012, 86(9): 1503-1524.

LIN Yihui, ZHANG Lifei. Petrology and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of the Lawsonite-Bearing Blueschist and Eclogite from the Qingshuigou Blueschist Belt in North Qilian Mountains in NW China and Their Tectonic Implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(9): 1503-1524.

罗志文,张志成,李建锋,等. 中南祁连西缘肃北三个洼塘地区古生代两类花岗质侵入岩年代学及其地质意义[J]. 岩石学报,2015,31(1):176-188.

LUO Zhiwen, ZHANG Zhicheng, LI Jianfeng, et al. Geochronology of two kinds of Paleozoic granitic plutons from Sangewatang in Subei, the western margin of Central-South Qilian and their geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(1): 176-188.

邱家骧,曾广策,朱云海,等. 北秦岭-南祁连早古生代裂谷造山带: 火山岩与小洋盆蛇绿岩套特征及纬向对比[J]. 高校地质学报,1998,4(4): 393-405.

QIU Jiaxiang, ZENG Guangce, ZHU Yunhai, et al. Characteristics and latitudinal comparative research on the early Palaeozoic volcanic rocks of rifted orogenic belts and small ocean basin ophiolite suit from Northern Qilian Mountains and Southern Qilian Mountains[J]. Geological Journal of China Universities, 1998,4(4): 393-405.

苏建平,胡能高,张海峰,等. 中祁连西段黑沟梁子花岗岩的锆石 U-Pb 同位素年龄及成因[J]. 现代地质,2004a,18(1):70-75.

- SU Jianping, HU Nenggao, ZHANG Haifeng, et al. U-Pb Zircon dating and Genesis of the Heigouliangzi Granitic intrusion in the western segment of the middle Qilian Mountains[J]. *Geoscience*, 2004a, 18(1): 70-75.
- 苏建平, 胡能高, 张海峰, 等. 中祁连西段野马南山埃达克质花岗岩的地球化学特征及成因[J]. *中国地质*, 2004b, 31(4): 365-371.
- SU Jianping, HU Nenggao, ZHANG Haifeng, et al. Geochemical characteristics and genesis of adakite-like granites at Yema Nanshan in the western segment of the Central Qilian Mountains[J]. *Geology in China*, 2004b, 31(4): 365-371.
- 宋述光. 北祁连山古大洋俯冲带高压变质岩研究评述[J]. *地质通报*, 2009, 28(12): 1769-1778.
- SONG Shuguang. High-pressure metamorphic rocks in the North Qilian oceanic subduction zone, China: A review [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(12): 1769-1778.
- 宋述光, 吴珍珠, 杨立明, 等. 祁连山蛇绿岩带和原特提斯洋演化[J]. *岩石学报*, 2019, 35(10): 2948-2970.
- SONG Shuguang, WU Zhenzhu, YANG Liming, et al. , Ophiolite belts and evolution of the Proto-Tethys Ocean in the Qilian Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(10) : 2948-2970.
- 魏志军, 黄增保, 许延龙. 甘肃省五个泉子达坂-大道尔基地区矿产远景调查成果报告[R]. 兰州: 甘肃省地质调查院, 2012.
- WEI Zhijun, HUANG Zengbao, XU Yanlong. Report on the prospective survey of mineral resources in Wugequanzidaban- dadaoerji area, Gansu Province [R]. Lanzhou: Geological Survey of Gansu Province, 2012.
- 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 祁连山及邻区火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, REN Youxiang. The Volcanism and Mineralization from Qilian Mountains and Adjacent Regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998 (in Chinese).
- 左国朝, 吴汉泉. 北祁连山中段早古生代双向俯冲-碰撞造山模式剖析[J]. *地球科学进展*, 1997, 12(4): 315-323.
- ZUO Guochao, WU Hanquan. A bisubduction-collision orogenic model of early Paleozoic in the middle part of north Qilian area[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1997, 12(4): 315-323.
- 张建新, 许志琴, 陈文, 等. 北祁连中段俯冲-增生杂岩/火山弧的时代探讨[J]. *岩石矿物杂志*, 1997, 16: 112-119.
- ZHANG Jianxin, XU Zhiqin, CHEN Wen, et al. A tentative discussion on the ages of the subduction-accretionary complex/volcanic arc in the middle sector of North Qilian Mountain [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1997, 16: 112-119.
- 张旗, 孙晓猛, 周德进. 祁连蛇绿岩的特征、形成环境及构造意义[J]. *地球科学进展*, 1997, 12(4): 366-393.
- ZHANG Qi, SUN Xiaomeng, ZHOU Dejing, et al. The characteristic of North Qilian ophiolites, forming settings and their tectonic significance[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1997, 12(4): 366-393.
- 张翔. 南祁连党河南山早古生代中酸性侵入岩年代学、岩石地球化学与金矿成矿[R]. 兰州: 兰州大学研究生院, 2015.
- ZHANG Xiang. Chronology and geochemistry of the Early Paleozoic intermediate-acid plutons and its implications on gold mineralization in Danghenanshan Mt., South Qilian [R]. Lanzhou: Graduate School of Lanzhou University, 2015.
- 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.
- Defant M J, Drummond MS. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 34: 662-665.
- Drummond MS, Defant MJ. A model for trondhjemite-tonalites-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons [J]. *Journal of Geophysics Research*, 1990, 95(B13): 21503-21521.
- Gao Shan, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton [J]. *Nature*, 2004, 432: 892-897.
- Liu YJ, Neubauer F, Genser J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of blueschist facies Delititic schists from Qingshuigou in the Northern Qilian Mountains, western China [J]. *Island Arc*, 2006, 15(1): 187-198.
- Ludwig K R. ISOPLOT3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. California, Berkeley: Berkeley Geochronol Center Spec Publ, 2003, 4: 1-71.
- Song SG, Niu YL, Su L and Xia XH. Tectonics of the North Qilian Orogen, NW China [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1378-1401.
- Wang, C, Li, RS., Smithies, R. H., et al., Early Paleozoic felsic magmatic evolution of the western Central Qilian belt, Northwestern China, and constraints on convergent margin processes [J]. *Gondwana Research*, 2017, 41, 301-324.