

卜涛, 王国强, 李向民等. 2026. 北祁连造山带西段弧后盆地俯冲作用记录——来自高镁安山岩和埃达克质花岗岩的证据. 岩石学报, 42(07): 2449-2464, doi: 10.18654/1000-0569/2026.07.10; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.07.10

北祁连造山带西段弧后盆地俯冲作用记录 ——来自高镁安山岩和埃达克质花岗岩的证据^{*}

卜涛^{1,2} 王国强^{1,2} 李向民^{1,2} 余吉远^{1,2} 孙吉明^{1,2} 关冲^{1,2}
BU Tao^{1,2}, WANG GuoQiang^{1,2}, LI XiangMin^{1,2}, YU JiYuan^{1,2}, SUN JiMing^{1,2} and GUAN Chong^{1,2}

1. 中国地质调查局西安地质调查中心(西北地质科技创新中心), 西安 710119
 2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 西安 710119
 1. Xi'an Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Northwest China), Xi'an 710119, China
 2. Center for Orogenic Belt Geology, China Geological Survey, Xi'an 710119, China
- 2025-09-07 收稿, 2026-03-28 改回.

Bu T, Wang GQ, Li XM, Yu JY, Sun JM and Guan C. 2026. Records of back-arc basin subduction in the western segment of the North Qilian orogenic belt: Evidence from high-Mg andesites and adakitic granites. *Acta Petrologica Sinica*, 42(7): 2449-2464, doi: 10.18654/1000-0569/2026.07.10; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.07.10

Abstract Studies on whether a subduction occurred in the paleo-ocean basin as recorded by ophiolites of the North Qilian back-arc basin and which direction is the corresponding subduction polarity remain relatively limited. This paper focuses on andesites and granodiorites exposed in the Jiayuguan area, which lies in the northern part of the ophiolite belt within the western segment of the North Qilian back-arc basin. We carried out systematic analyses on the petrology, zircon U-Pb geochronology, major and trace element geochemistry, and whole-rock Sr-Nd isotopic compositions of these rocks. Geochronological results show that LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the Jiayuguan andesites and granodiorites are 446 ± 2 Ma and 436 ± 2 Ma, respectively, indicating they were formed during the Late Ordovician to Early Silurian. Whole-rock geochemical data reveal that the andesites are characterized by high MgO (5.54% ~ 6.04%), low Al_2O_3 (13.58% ~ 15.84%), low TiO_2 (0.44% ~ 0.51%), and elevated Cr concentrations ($63.5 \times 10^{-6} \sim 181 \times 10^{-6}$, with an average of 117×10^{-6}), classifying them as a suite of sanukitic high-magnesium andesites. These andesites yield relatively high $\varepsilon_{Nd}(t)$ values (5.2 ~ 6.3) and moderately enriched initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios (I_{Sr} ranging from 0.7041 to 0.7045). Such geochemical signatures imply that the magmas were derived from partial melting of an enriched mantle wedge metasomatized by slab-derived fluids or melts within a subduction zone setting. The granodiorites display typical adakitic features, including high Al_2O_3 and Na_2O , low K_2O , elevated Sr but depleted Y and Yb with Sr/Y ratios of 66 ~ 98 (all greater than 40), and negligible Eu anomalies. These geochemical characteristics demonstrate that they belong to adakitic intrusions, most likely generated by partial melting of subducted oceanic crust. Combined with regional geological constraints and previously published data, we propose that the generation of the Jiayuguan high-magnesium andesites and adakitic granodiorites was linked to intra-oceanic subduction within the North Qilian back-arc basin. The identification of this distinctive rock assemblage provides crucial petrological constraints for better reconstructing the tectonic evolution of the North Qilian back-arc basin.

Key words Adakite; High-magnesium andesite; Petrogenesis; Tectonic setting; Back-arc basin; North Qilian

摘 要 北祁连弧后盆地蛇绿岩所代表的古洋盆是否存在俯冲以及其俯冲极性如何? 这一研究仍很薄弱。本文选取北祁连西段弧后盆地蛇绿岩带之北嘉峪关地区出露的安山岩、花岗闪长岩开展了系统的岩石学、锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学、全岩 Sr-Nd 同位素研究。嘉峪关地区安山岩和花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 446 ± 2 Ma 和 436 ± 2 Ma, 表明其形成于晚奥陶世-早志留世。安山岩全岩样品化学分析结果显示其具有富 MgO (5.54% ~ 6.04%)、低 Al_2O_3 (13.58% ~ 15.84%)、低 TiO_2 (0.44% ~ 0.51%)、高 Cr ($63.5 \times 10^{-6} \sim 181 \times 10^{-6}$, 平均 117×10^{-6}) 等特征, 为一套赞岐质高镁安山岩。岩

^{*} 本文受中国地质调查局地质调查项目 (DD202402075、DD20230215) 和陕西省自然科学基金项目 (2023-JC-YB-267、2023-JC-YB-274) 联合资助。
第一作者简介: 卜涛, 男, 1986 年生, 高级工程师, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: cugbutao@163.com

石具有较高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (5.2 ~ 6.3) 和相对富集的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值 (I_{Sr} 介于 0.7041 ~ 0.7045), 可能是俯冲环境下俯冲板片流体/熔体交代作用下形成的富集地幔楔发生部分熔融作用的产物。花岗闪长岩具有高 Al_2O_3 、富 Na_2O 、贫 K_2O 、高 Sr、低 Y 与 Yb 特征 (Sr/Y 比值介于 66 ~ 98, 均大于 40), 无明显的 Eu 异常, 为一套埃达克质侵入岩, 可能是俯冲洋壳部分熔融作用的产物。结合区域地质资料和研究成果, 认为嘉峪关地区的高镁安山岩、埃达克质花岗闪长岩的形成可能与北祁连弧后盆地洋壳洋内俯冲有关。该套岩石的发现为完善北祁连弧后盆地的演化过程研究提供了关键的岩石学证据。

关键词 埃达克岩; 高镁安山岩; 岩石成因; 构造背景; 弧后盆地; 北祁连

中图法分类号 P588.122; P588.144; P597.3

增生碰撞造山作用过程是地球动力学研究中的重要课题, 也是地球科学研究中的难点与热点 (Cawood *et al.*, 2009; Kusky *et al.*, 2013)。北祁连造山带是典型的增生-碰撞造山带, 发育典型的增生杂岩、蛇绿岩、高压变质岩、岛弧岩浆岩和沉积盆地等重要岩石构造单元 (许志琴等, 1994; 夏林圻等, 1998; Song *et al.*, 2013; Xia *et al.*, 2016), 记录了原特提斯洋北支的构造演化, 是研究增生造山作用过程和原特提斯洋演化的天然实验室。自 20 世纪 70 年代以来, 随着板块构造理论的推广, 前人围绕其基底构造属性、蛇绿岩、沟-弧-盆体系、变质变形作用及大地构造演化等多个关键科学问题, 开展了广泛而深入的讨论, 取得了一系列重要进展 (Song *et al.*, 2006, 2013; Xiao *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2015; Xia *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018; 宋述光等, 2019)。但是, 目前关于北祁连造山带的增生造山作用过程还存在不同认识, 具体如下: (1) 南向俯冲增生碰撞模式, 该模式认为北祁连洋壳曾持续向南俯冲至柴达木地块之下, 造山带内广泛分布的俯冲带型蛇绿岩为向南仰冲于柴达木地块或俯冲于陆壳之下, 最终在碰撞阶段通过底辟作用折返至地表 (Wu *et al.*, 2017; Zuza *et al.*, 2018)。然而, 这一单一俯冲体系模式难以合理解释北祁连造山带内多个增生杂岩带、岛弧以及古老块体的时空分布。(2) 多岛洋俯冲增生模式 (Xiao *et al.*, 2009), 该模型能较好的解释北祁连造山带内多个蛇绿岩带和增生杂岩带的发育, 但该模型尚未对具体构造单元的俯冲极性及其拼合时代等关键细节展开系统阐释。(3) 北向俯冲增生碰撞模式, 该模式强调北祁连洋壳经历了持续的北向俯冲及随后的弧后伸展和扩张 (Song *et al.*, 2013, 2014; Xia *et al.*, 2003, 2016), 该模式能较好解释高压-低温变质岩、增生杂岩、岛弧火山岩及近平行蛇绿岩带的发育, 但对弧后盆地的演化过程的阐释尚不充分。大岔大坂玻安岩 (~490Ma) 的形成标志着弧后盆地伸展和扩展的开始, 九个泉-扁都口-老虎山弧后盆地蛇绿岩带 (北部蛇绿岩带) 的存在表明弧后盆地内的洋壳形成于 490 ~ 449Ma, 持续了约 40Myr (Xia *et al.*, 2003, 2016; Song *et al.*, 2013)。王金荣等 (2006, 2008) 对北祁连弧后盆地东段银洞梁、苏家山等地发育的高镁埃达克质花岗岩的研究显示, 其形成可能与老虎山弧后盆地洋壳的北向俯冲有关, 但该研究缺乏年代学方面的约束。林宜慧等 (2010) 对北祁连九个泉低级蓝片岩带的研究显示, 形成于 415 ~ 413Ma 的低级蓝片岩可能是弧后盆地南向俯冲的产物, 代表了残留洋盆最终闭合时间。近年

来, 在北祁连造山带东段北缘陆续发现有与俯冲有关的角闪岩 (448Ma) (Fu *et al.*, 2019) 及同碰撞型花岗岩 (430 ~ 410Ma) (Chen *et al.*, 2018; Fu *et al.*, 2019), 暗示北祁连弧后盆地可能发生了北向的俯冲作用, 且在 430Ma 左右闭合。赵少卿等 (2023) 对宁夏南部南华山地区出露的石洼里高镁埃达克岩的研究显示, 其形成于老虎山弧后盆地洋壳在晚奥陶世的南向俯冲。由此可见, 对北祁连弧后盆地的研究主要集中在北祁连弧后盆地的东段, 而对北祁连弧后盆地中西段相关研究较少, 且弧后盆地的俯冲极性 (向北、向南、双向?) 和持续时间等问题仍缺少关键的岩石学及同位素年代学方面的证据支持。

近来, 笔者在北祁连造山带西段嘉峪关地区开展工作, 发现了具有俯冲型地球化学亲缘性的高镁安山岩和埃达克质花岗岩。本次工作拟在野外地质调查的基础上, 以系统的岩石学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及全岩 Sr-Nd 同位素分析为手段, 精确厘定火山岩及花岗岩的形成时代, 探讨该地区火山岩及花岗岩的岩石成因及形成环境, 进而为讨论北祁连造山带的构造演化, 特别是北祁连弧后盆地的演化过程提供关键的岩石学证据。

1 区域地质背景及岩石学特征

北祁连造山带位于秦祁昆巨型造山带中段, 夹持于塔里木板块、阿拉善地块与中祁连-柴达木地块之间, 呈 NW-SE 向展布, 经历了早古生代洋壳俯冲及之后的碰撞-拼合过程, 是一个发育有完整沟-弧-盆地体系的造山带 (Xia *et al.*, 2016; Song *et al.*, 2013, 2017; Qiao *et al.*, 2023)。自南向北主要包括南部大洋型蛇绿岩带、中部岛弧火山杂岩带、北部弧后盆地蛇绿岩带及志留纪复理石建造和泥盆纪磨拉石建造五个岩石-构造单元 (许志琴等, 1994; 夏林圻等, 1996; Song *et al.*, 2013; Xia *et al.*, 2016)。本次选择的研究区位于北祁连造山带西段, 大地构造位置属于走廊南山弧后盆地 (图 1a)。区内大面积出露早古生代火山-沉积岩系, 主体沿北西-南东向的构造线方向展布, 岩石类型上, 北部以中基性火山熔岩 (安山岩、玄武岩) 为主, 南部以碎屑沉积岩为主, 两者之间断层接触关系, 在碎屑岩段还可见后期侵入的中细粒的花岗闪长岩小岩株 (图 1b)。前人依据区域地层对比, 将该套地层暂置于奥陶纪阴沟群, 但一直缺乏精确的同位素年龄和地球化学方面的约束。孟勇等 (2018) 对该地区的碎屑岩段开展

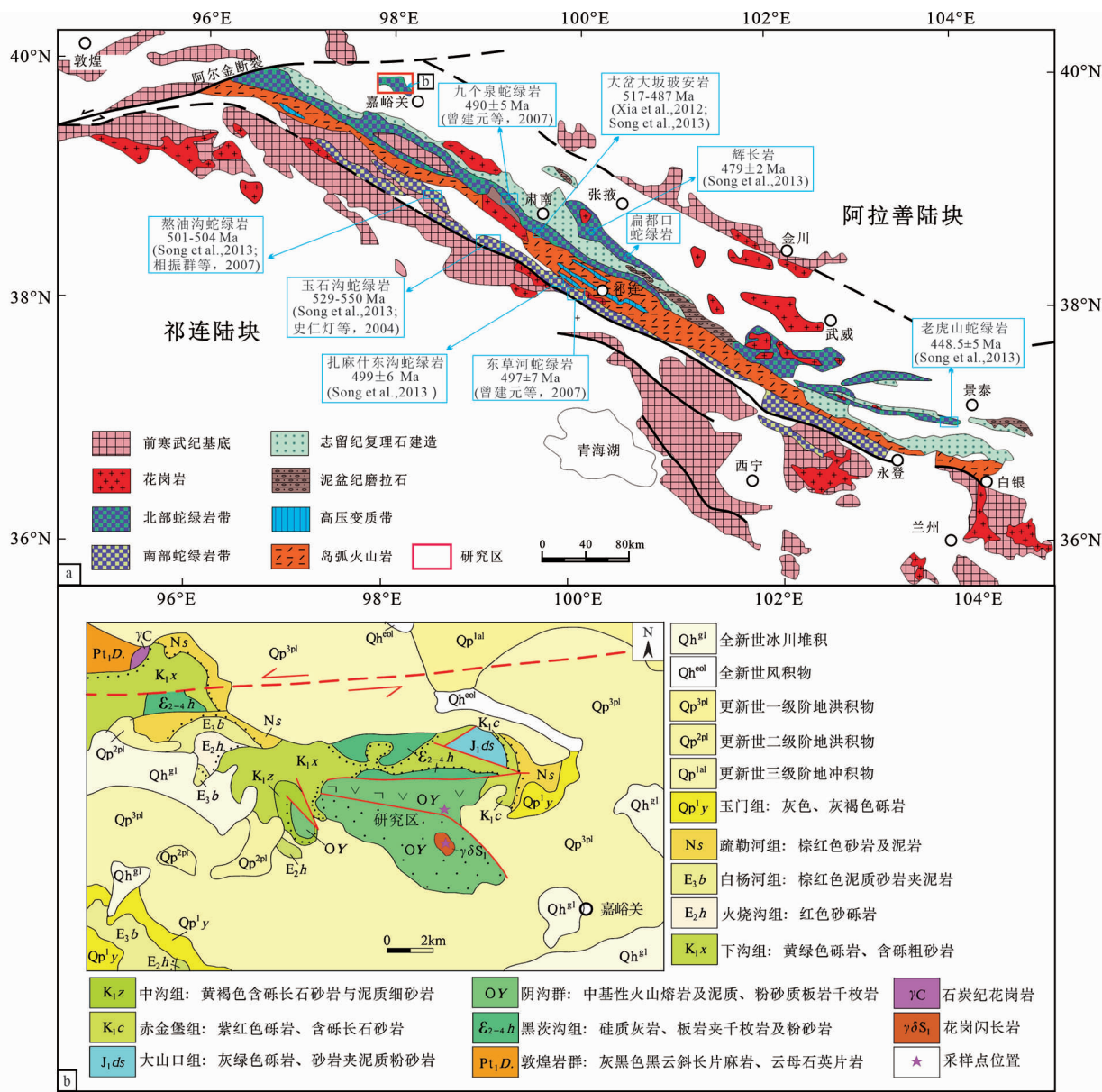


图1 北祁连造山带构造单元划分图(a, 据 Song *et al.*, 2013 修改)及研究区地质简图(b, 据中国地质调查局西安地质调查中心, 2019)

Fig. 1 Tectonic divisions map of North Qilian orogenic belt (a, after Song *et al.*, 2013) and geological map of study area (b, after Xi'an Center, China Geological Survey, 2019)

的碎屑锆石 U-Pb 定年结果显示,碎屑岩中最年轻的一组碎屑锆石年龄为 437Ma,侵入其中的二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 432 ± 2.8 Ma。

本次工作对区内的安山岩、花岗闪长岩开展了系统的采样工作,其中,安山岩主要出露在嘉峪关市的西北角,北侧与寒武纪黑茨沟组呈断层接触关系,西侧被下白垩统下沟组不整合覆盖,东南侧为第四系所掩盖。安山岩岩石风化面灰黑色,灰黑绿色,新鲜面灰黑色,斑状结构,块状构造(图 2a),岩石主要由斑晶(35%)和基质(65%)组成,其中斑晶主要由斜长石斑晶、辉石斑晶和少量的角闪石斑晶组成,斜长石

斑晶粒径一般介于 0.15~2.5mm,聚片双晶发育,镜下混浊,轻微绿泥石化。辉石斑晶粒径一般介于 0.5~10mm,发育典型的辉石式解理,正极高突起,单偏光下呈浅绿色,部分颗粒内部可见斜长石包裹体。角闪石斑晶粒度多在 0.5~3mm,多见绿泥石化蚀变;基质由斜长英质隐微晶和玻璃质等组成,含量较高,其晶体粒度通常小于 0.003mm,玻璃质在正交偏光下全消光(图 2b)。

花岗闪长岩主要出露在南侧碎屑岩段,以小岩株的形式侵入到变石英砂岩中。岩石呈灰白色,中细粒结构,块状构造,主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母组成(图 2c)。其

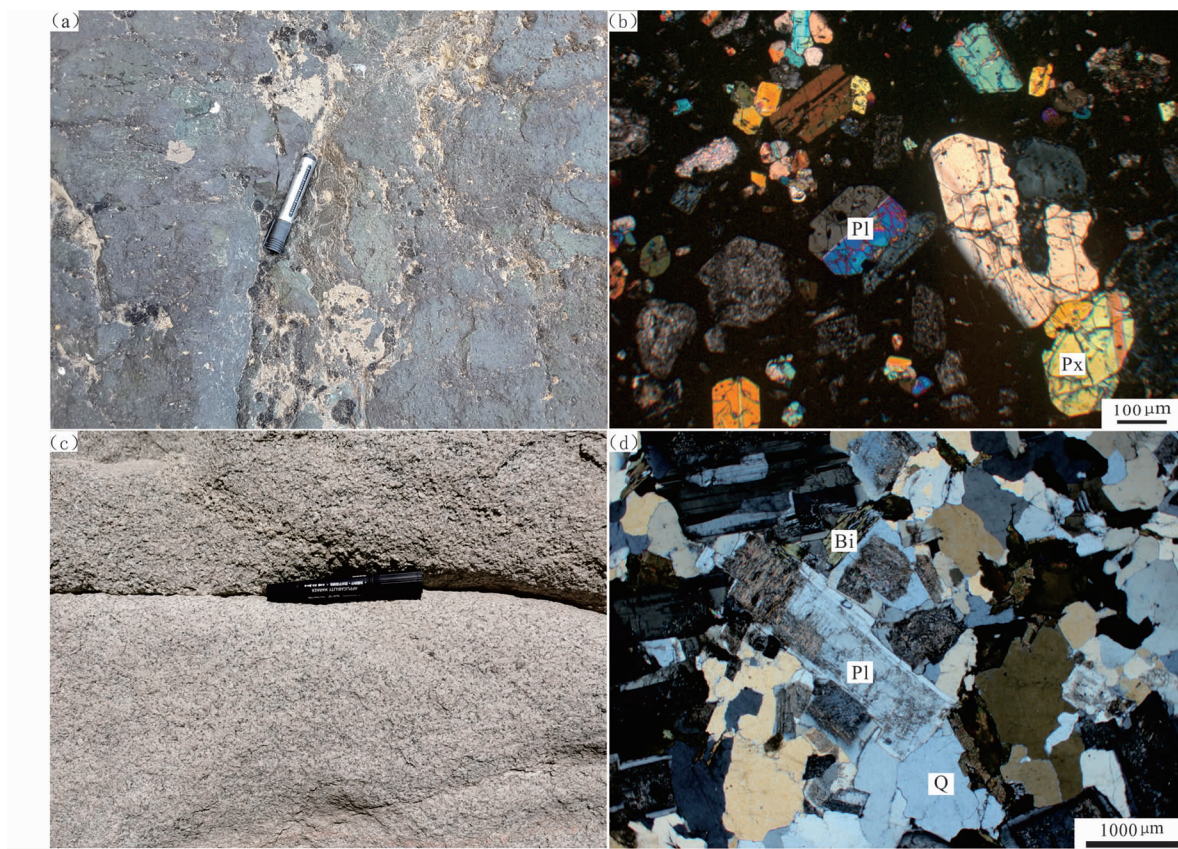


图2 嘉峪关地区安山岩(a,b)和花岗闪长岩(c,d)的野外及显微照片

Q-石英;Pl-斜长石;Px-辉石;Bi-黑云母

Fig. 2 Field photographs and microphotographs of andesite (a-b) and granodiorite (c-d) in the Jiayuguan area

Q-quartz; Pl-plagioclase; Px-pyroxene; Bi-biotite

中,斜长石呈半自形板状,粒径一般为0.2~5mm,含量65%左右,具高岭土化、绢云母化、局部绿泥石化。钾长石呈半自形板状-他形粒状,粒径一般为<1mm的细粒,局部交代斜长石,含量5%左右。石英呈他形粒状,星散分布,粒径大小0.1~3mm不等,含量20%左右,可见波状、带状消光,粒间呈齿状、不规则状接触。黑云母呈鳞片-叶片状,零散状分布,片径一般0.1~1.5mm不等,黑云母局部绿泥石化、褐铁矿化、绿帘石化等,多色性较明显(图2d)。

2 分析方法

本研究所涉及的实验测试分析方法主要包括全岩主微量元素分析、锆石阴极发光检测及LA-ICP-MS锆石U-Pb定年、全岩Sr-Nd同位素分析。仪器型号、样品准备、分析步骤及测试精度等描述如下:

岩石样品的主微量元素分析测试均在中国地质调查局西安地质调查中心实验测试室完成,主量元素中的FeO采用湿化学分析法,其余主量元素用荧光光谱法。测试时,先将样品破碎至200目,然后使用Panalytical公司生产的PW4400

型X-射线荧光光谱仪(XRF)分析样品中氧化物的含量,分析误差优于5%。加热到1000℃后测定烧失量。微量元素测试仪器为Thermo Fisher公司生产的X-Series II型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS),检测限优于 5×10^{-9} ,相对标准偏差低于5%。

锆石阴极发光(CL)图像照相和U-Pb同位素定年均在中国地质调查局西安地质调查中心实验测试室完成,其中,锆石阴极发光(CL)图像照相在MonoCL3系统上完成,检测时其电子束加速电压为10kV;锆石U-Pb同位素测年用LA-ICP-MS完成,等离子体质谱仪为Agilent 7700x,激光剥蚀系统为GeoLas Pro,分析时激光束斑直径为32μm,测试频率为5Hz。实验中采用氦气作为剥蚀物质的载气,少量氩作为补偿气体以调节设备的灵敏度。锆石年龄采用标准锆石91500作为外标,用 ^{29}Si 作内标,NISTSRM610作成标样来校正微量元素含量,采用Glitter 4.4软件完成数据处理。按照Common Pb Correction (ver3.15)方法对普通Pb进行校正(Andersen,2002),应用ISOPLOT3.0程序(Ludwig,2003)进行锆石年龄加权平均值的计算和U-Pb谐和图的绘制。

全岩Sr-Nd同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点

表1 嘉峪关地区安山岩(样品 JYG-1-1TW)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses of andesite (Sample JYG-1-1TW) in the Jiayuguan area

测点号	含量(×10 ⁻⁶)			同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb	±1σ	²⁰⁷ Pb	±1σ	²⁰⁶ Pb	±1σ	²⁰⁷ Pb	±1σ	²⁰⁷ Pb	±1σ	²⁰⁶ Pb	±1σ
				²⁰⁶ Pb		²³⁵ U		²³⁸ U		²⁰⁶ Pb		²³⁵ U		²³⁸ U	
-04	447	641	0.70	0.0560	0.0006	0.5537	0.0051	0.0717	0.0006	453	9	447	3	446	4
-05	77.5	264	0.29	0.0554	0.0007	0.5507	0.0061	0.0721	0.0006	430	12	445	4	448	4
-06	649	708	0.92	0.0562	0.0007	0.5546	0.0060	0.0716	0.0006	459	11	448	4	446	4
-14	76.4	179	0.43	0.0558	0.0010	0.5566	0.0087	0.0723	0.0007	446	19	449	6	450	4
-16	74.6	113	0.66	0.0561	0.0012	0.5514	0.0112	0.0713	0.0007	456	27	446	7	444	4
-17	70.8	94.8	0.75	0.0564	0.0012	0.5517	0.0106	0.0710	0.0007	466	25	446	7	442	4
-18	56.4	117	0.48	0.0565	0.0008	0.5602	0.0073	0.0719	0.0006	474	15	452	5	447	4
-20	364	526	0.69	0.0566	0.0007	0.5621	0.0056	0.0721	0.0006	475	10	453	4	449	4
-22	218	398	0.55	0.0564	0.0009	0.5593	0.0078	0.0720	0.0007	467	16	451	5	448	4
-25	40.3	231	0.17	0.0557	0.0008	0.5503	0.0071	0.0717	0.0006	440	14	445	5	446	4
-26	235	374	0.63	0.0561	0.0007	0.5530	0.0057	0.0715	0.0006	456	10	447	4	445	4
-31	309	897	0.34	0.0550	0.0006	0.5447	0.0051	0.0718	0.0006	414	9	442	3	447	4
-32	50.4	137	0.37	0.0566	0.0009	0.5513	0.0083	0.0707	0.0007	475	18	446	5	440	4
-35	163	209	0.78	0.0559	0.0008	0.5557	0.0067	0.0721	0.0006	450	13	449	4	449	4
-36	106	201	0.53	0.0563	0.0008	0.5580	0.0068	0.0719	0.0006	463	13	450	4	448	4
-38	89.5	234	0.38	0.0567	0.0008	0.5585	0.0065	0.0715	0.0006	479	12	451	4	445	4

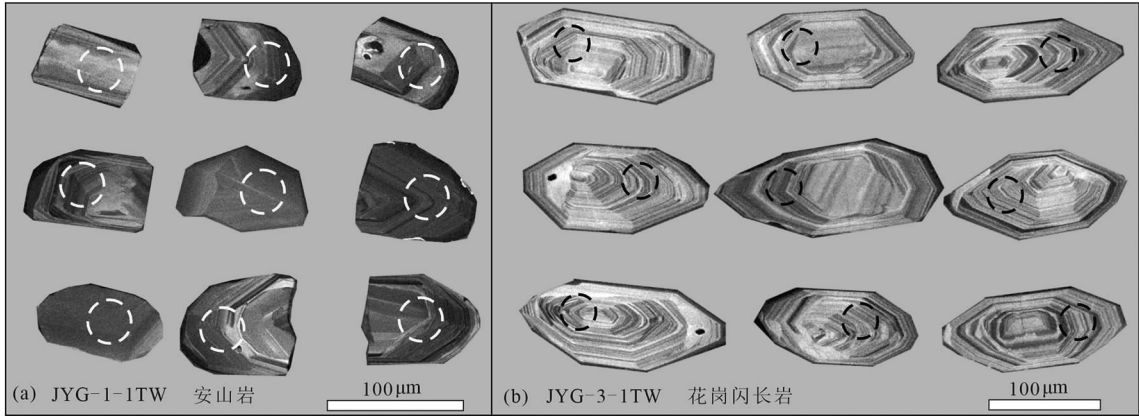


图3 嘉峪关地区安山岩及花岗闪长岩代表性锆石阴极发光(CL)图像及测试位置

Fig.3 CL images and measuring position of representative zircons from andesite and granodiorite in the Jiayuguan area

实验室完成。将约 50mg 粉末溶解在浓 HNO₃, HF 和 HClO₄ 的混合物中。按照 Li *et al.* (2012), 使用标准色谱柱, AG50W-X8 和 di-(2-ethylhexyl) 磷酸(也称为 HDEHP)树脂分离 Sr、Nd 和其他轻稀土元素。在 Nu Plasma MC-ICP-MS 上测量 Sr 和 Nd 同位素组成。通过归一化校正为 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219, 并将 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值归一化为 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194。通过测量国际标准 NBS-987 和 JNdi-1, 以评估数据收集阶段的仪器稳定性。BCR-2 Nd 和 BCR-2 Sr 标准的测量值分别为 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512659 ± 0.000004 和 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.705006 ± 0.000008。JNdi-1 Nd 标准和 NBS-987 标准的测量值分别为 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512122 ± 0.000005 (2σ, n = 5) 和 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710249 ± 0.000008 (2σ, n = 3)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 测年结果

本次分别采集了 1 件安山岩(样号 JYG-1-1TW)和 1 件花岗闪长岩(样号 JYG-3-1TW)开展锆石 U-Pb 定年工作。显微镜下观测结果显示,安山岩中的锆石自形程度较高,多呈短柱状和粒状,长度多在 60~90μm,宽多在 50μm,阴极发光(CL)图像(图 3a)显示较为清晰的岩浆型锆石的振荡环带。安山岩样品(JYG-1-1TW)共进行了 40 个点的 U-Pb 年龄和微量元素分析,分析结果见表 1。测点中 Th 的含量变化范围为 40.3 × 10⁻⁶~649 × 10⁻⁶,U 的含量变化范围为 94.8 × 10⁻⁶~897 × 10⁻⁶,Th/U 值较大,变化于 0.17~8.67,平均值

表 2 嘉峪关地区花岗闪长岩(样品 JYG-3-1TW)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses of granodiorite (Sample JYG-3-1TW) in the Jiayuguan area

测点号	含量(×10 ⁻⁶)		Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
					±1σ		±1σ		±1σ		±1σ		±1σ		±1σ
-1	54.6	119	0.46	0.0556	0.0009	0.5380	0.0076	0.0702	0.0006	436	16	437	5	437	4
-2	56.8	127	0.45	0.0561	0.0009	0.5431	0.0080	0.0702	0.0006	458	17	440	5	437	4
-3	36.3	94.2	0.39	0.0560	0.0009	0.5416	0.0080	0.0701	0.0006	454	18	439	5	437	4
-4	59.9	125	0.48	0.0560	0.0009	0.5384	0.0075	0.0698	0.0006	450	16	437	5	435	4
-5	58.9	107	0.55	0.0559	0.0010	0.5396	0.0088	0.0701	0.0007	448	20	438	6	436	4
-7	127	214	0.60	0.0556	0.0008	0.5358	0.0072	0.0699	0.0006	437	15	436	5	435	4
-9	106	172	0.62	0.0558	0.0010	0.5372	0.0090	0.0699	0.0007	443	21	437	6	436	4
-10	50.8	119	0.43	0.0575	0.0013	0.5540	0.0114	0.0700	0.0007	509	27	448	7	436	4
-11	31.7	73.8	0.43	0.0560	0.0010	0.5423	0.0092	0.0702	0.0007	454	21	440	6	437	4
-15	49.4	114	0.43	0.0569	0.0011	0.5507	0.0099	0.0702	0.0007	487	23	445	6	438	4
-16	39.6	94.6	0.42	0.0559	0.0011	0.5383	0.0096	0.0699	0.0007	448	23	437	6	435	4
-17	24.2	65.8	0.37	0.0565	0.0015	0.5483	0.0132	0.0704	0.0008	472	34	444	9	439	5
-18	40.5	102	0.40	0.0563	0.0013	0.5457	0.0118	0.0703	0.0008	464	29	442	8	438	5
-19	65.7	139	0.47	0.0563	0.0011	0.5423	0.0097	0.0699	0.0007	465	23	440	6	435	4
-20	102	167	0.61	0.0564	0.0015	0.5446	0.0137	0.0701	0.0008	467	35	441	9	437	5
-22	77.2	157	0.49	0.0562	0.0009	0.5407	0.0079	0.0698	0.0006	459	17	439	5	435	4
-24	50.7	121	0.42	0.0559	0.0011	0.5398	0.0094	0.0701	0.0007	448	22	438	6	437	4
-25	111	162	0.69	0.0564	0.0011	0.5394	0.0100	0.0693	0.0007	470	24	438	7	432	4
-26	82.3	171	0.48	0.0558	0.0009	0.5310	0.0081	0.0691	0.0006	444	18	432	5	430	4
-27	85.1	153	0.56	0.0566	0.0013	0.5383	0.0112	0.0690	0.0007	474	27	437	7	430	4

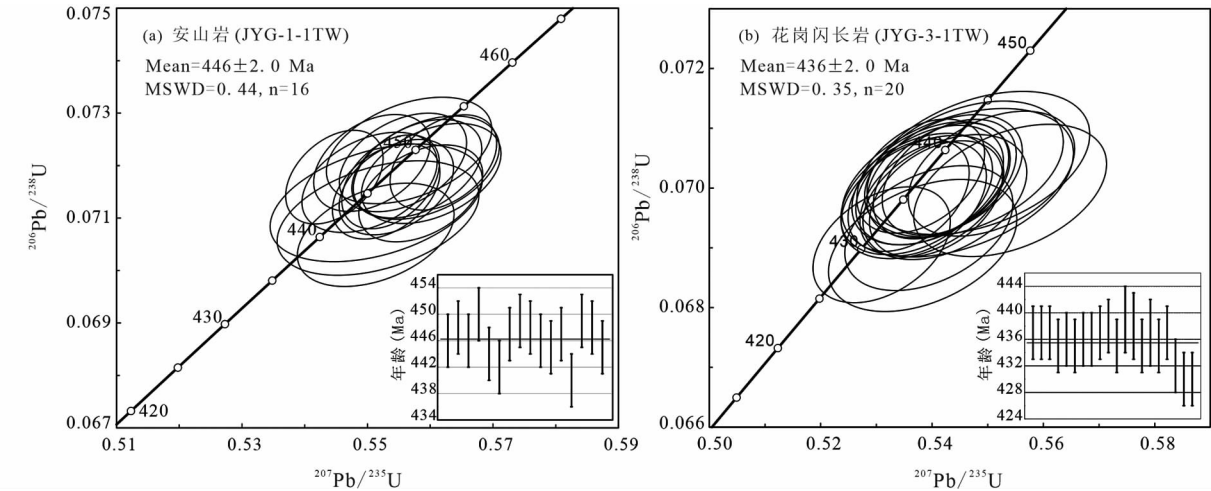


图 4 嘉峪关地区安山岩及花岗闪长岩 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams of zircons from andesite and granodiorite in the Jiayuguan area

0.54,且Th、U之间正相关性较好,说明锆石为岩浆成因(Claesson *et al.*, 2000; Belousova *et al.*, 2002)。剔除无效数据及不谐和点,有16个测点在谐和线上或其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表面年龄范围为 $440 \pm 4\text{Ma} \sim 450 \pm 4\text{Ma}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $446 \pm 2\text{Ma}$,置信度95%,MSWD=0.44(图4a),可代表安山岩的结晶年龄,形成时代为晚奥陶世。

花岗闪长岩中的锆石自形程度较高,多呈长柱状-柱状,长度多在 $100 \sim 150\mu\text{m}$,宽多在 $50 \sim 70\mu\text{m}$,长宽比为2:1,阴

极发光(CL)图像(图3b)显示清晰的岩浆型锆石的振荡环带。花岗闪长岩(JYG-3-1TW)共进行了30个点的U-Pb年龄和微量元素分析,分析结果见表2。测点中Th的含量变化范围为 $24.2 \times 10^{-6} \sim 128 \times 10^{-6}$,U的含量变化范围为 $65.8 \times 10^{-6} \sim 214 \times 10^{-6}$,Th/U值较大,变化于0.37~0.69,平均值0.49,且Th、U之间正相关性较好,说明锆石为岩浆成因(Claesson *et al.*, 2000; Belousova *et al.*, 2002)。剔除无效数据及不谐和点,有20个测点在谐和线上或其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

表 3 嘉峪关地区安山岩和花岗闪长岩主量元素 (wt%) 和微量元素 (×10⁻⁶) 分析结果

Table 3 Major (wt%) and trace (×10⁻⁶) elements compositions of andesite and granodiorite in the Jiayuguan area

样品号	JYG-1 -1YQ	JYG-1 -2YQ	JYG-1 -3YQ	JYG-1 -4YQ	JYG-1 -5YQ	JYG-1 -6YQ	JYG-3 -1YQ	JYG-3 -2YQ	JYG-3 -3YQ	JYG-3 -4YQ	JYG-3 -5YQ	JYG-3 -6YQ
SiO ₂	54.06	54.93	55.36	54.28	55.30	57.62	70.21	68.72	71.00	69.87	69.46	71.27
Al ₂ O ₃	15.70	15.84	14.75	14.87	13.93	13.58	15.29	15.49	14.51	15.33	15.32	14.69
Fe ₂ O ₃	2.45	3.00	3.02	3.06	3.14	2.54	0.46	0.64	0.47	0.17	0.31	0.18
FeO	5.60	5.45	5.35	5.10	5.00	4.99	1.50	1.70	1.55	1.65	1.56	1.65
CaO	7.69	5.98	7.17	7.41	8.62	7.43	2.85	3.01	2.59	2.40	2.56	2.56
MgO	5.68	5.54	5.57	6.04	5.94	5.90	1.73	1.99	1.92	1.76	1.79	1.75
K ₂ O	0.61	1.66	1.37	1.26	0.82	0.92	1.02	1.03	1.20	1.12	1.10	1.22
Na ₂ O	2.64	2.89	2.93	2.79	2.12	2.44	4.83	4.87	4.47	5.03	5.10	4.57
TiO ₂	0.51	0.46	0.48	0.47	0.47	0.44	0.25	0.26	0.28	0.26	0.26	0.26
P ₂ O ₅	0.11	0.096	0.14	0.10	0.12	0.10	0.082	0.080	0.088	0.080	0.081	0.088
MnO	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.045	0.054	0.047	0.047	0.047	0.045
LOI	4.70	3.89	3.56	4.31	4.30	3.78	1.54	1.89	1.69	2.08	2.21	1.45
H ₂ O ⁺	3.90	3.24	2.60	2.96	3.42	3.15	1.08	1.28	0.94	1.18	1.09	1.02
Total	99.9	99.88	99.84	99.83	99.9	99.88	99.81	99.73	99.82	99.8	99.8	99.73
A/CNK	0.83	0.91	0.76	0.77	0.69	0.73	1.07	1.06	1.09	1.11	1.08	1.09
Mg [#]	64.39	64.44	64.98	67.86	67.92	67.82	67.27	67.60	68.83	65.53	67.16	65.40
La	7.65	6.59	7.56	7.38	6.37	6.52	6.02	5.22	11.40	6.49	6.82	7.85
Ce	17.0	15.6	16.9	17.9	14.6	15.2	11.6	10.1	22.3	12.4	12.4	14.6
Pr	2.31	2.14	2.33	2.42	2.06	2.08	1.56	1.41	2.95	1.74	1.72	1.95
Nd	10.4	9.12	10.2	10.4	9.13	9.00	6.77	5.97	12.1	7.33	7.14	7.81
Sm	2.47	2.22	2.48	2.51	2.27	2.18	1.50	1.31	2.75	1.63	1.59	1.72
Eu	0.83	0.69	0.77	0.86	0.73	0.68	0.44	0.37	0.46	0.41	0.45	0.40
Gd	2.37	2.00	2.29	2.31	2.15	2.02	1.37	1.27	2.13	1.46	1.40	1.64
Tb	0.40	0.33	0.37	0.38	0.35	0.32	0.19	0.18	0.28	0.20	0.20	0.23
Dy	2.45	1.93	2.22	2.20	2.06	1.90	1.09	0.97	1.51	1.15	1.08	1.24
Ho	0.52	0.40	0.47	0.45	0.44	0.39	0.20	0.18	0.25	0.21	0.20	0.24
Er	1.54	1.18	1.34	1.32	1.22	1.14	0.58	0.52	0.76	0.61	0.60	0.74
Tm	0.24	0.18	0.21	0.20	0.19	0.17	0.079	0.072	0.092	0.081	0.078	0.097
Yb	1.66	1.22	1.40	1.36	1.29	1.16	0.54	0.47	0.61	0.49	0.52	0.65
Lu	0.27	0.19	0.22	0.21	0.20	0.18	0.087	0.069	0.091	0.075	0.076	0.097
Y	19.5	11.6	13.8	13.0	12.7	11.2	5.18	4.64	6.94	5.63	5.42	6.56
ΣREE	69.6	55.4	62.6	62.9	55.8	54.2	37.2	32.8	64.6	39.9	39.7	45.8
δEu	1.04	0.98	0.98	1.07	0.99	0.98	0.92	0.87	0.56	0.80	0.90	0.72
Cu	70.7	32.0	25.2	37.3	33.0	49.4	59.4	388	26.9	20.2	20.8	22.3
Pb	1.99	2.02	1.76	1.90	1.73	1.97	14.1	38.7	12.3	10.6	11.0	12.1
Zn	67.7	68.6	66.3	70.4	67.6	66.4	37.0	57.6	35.9	33.2	38.8	33.8
Cr	63.5	82.3	146	181	114	126	33.8	31.4	35.1	32.3	36.7	32.0
Ni	21.4	27.4	32.2	35.8	32.0	30.4	25.5	26.8	26.2	24.4	26.6	24.7
Co	27.6	31.6	31.6	34.4	31.2	30.6	8.42	8.69	9.22	8.05	8.50	8.72
Li	9.52	9.71	8.55	10.0	8.34	9.30	14.3	13.6	16.3	17.8	16.2	16.2
Rb	21.0	39.6	34.1	33.7	21.7	19.9	20.8	17.9	27.0	27.8	31.9	25.7
Cs	0.36	0.94	0.72	1.21	0.44	0.40	1.72	1.96	1.68	3.45	3.74	2.05
Sr	619	648	724	766	428	642	462	400	458	515	531	467
Ba	121	274	276	273	132	278	193	152	234	209	208	249
V	260	276	290	307	276	236	34.8	42.5	33.9	27.8	29.2	29.9
Sc	34.6	37.6	38.5	41.9	37.4	33.0	6.15	5.87	6.41	5.55	6.36	6.09
Nb	0.88	0.69	0.79	0.85	0.77	0.70	2.15	1.92	2.60	2.45	2.44	2.38
Ta	0.068	0.060	0.067	0.069	0.058	0.058	0.28	0.25	0.36	0.29	0.30	0.32
Zr	42.2	35.9	41.9	44.4	35.6	37.8	83.4	48.3	74.6	62.5	68.2	88.5
Hf	1.35	1.16	1.32	1.39	1.08	1.14	2.64	1.56	2.45	1.90	2.06	2.70
Be	0.37	0.37	0.41	0.38	0.33	0.29	1.18	1.05	1.35	1.28	1.29	1.29
Ga	15.1	16.2	16.7	16.4	15.0	13.6	15.0	13.5	15.3	15.3	15.2	15.2
U	0.27	0.33	0.27	0.32	0.20	0.25	0.69	0.56	0.88	0.62	0.65	0.85
Th	0.88	0.91	0.91	0.97	0.63	0.75	2.49	1.97	5.25	2.59	2.82	2.44

注: Mg[#] = (MgO/40.31) / (MgO/40.31 + FeO/71.85) × 100

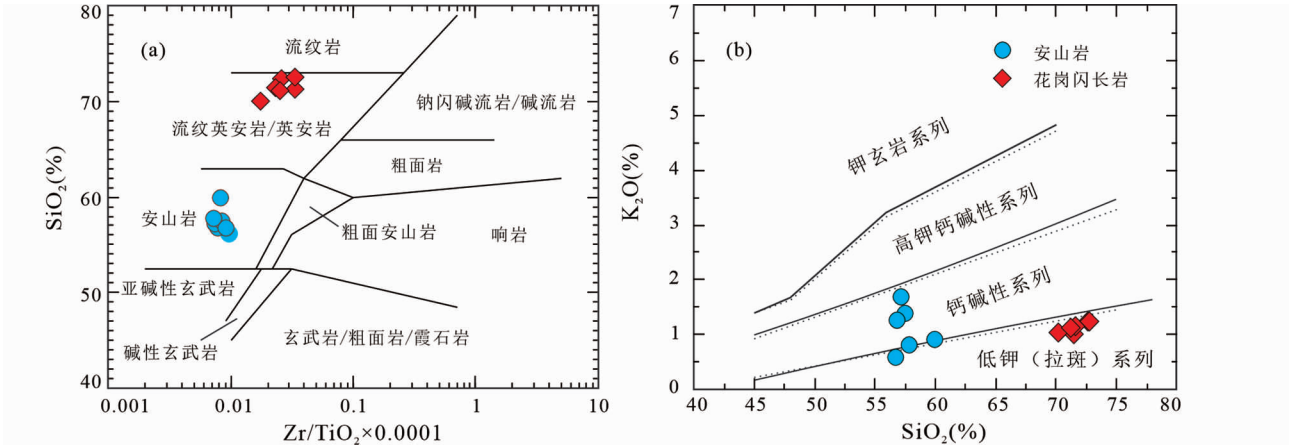


图5 嘉峪关地区安山岩和花岗闪长岩 $Zr/TiO_2 \times 0.0001$ - SiO_2 (a, 据 Winchester and Floyd, 1977) 和 SiO_2 - K_2O 图解 (b, 据 Rickwood, 1989)

Fig. 5 Diagrams of $Zr/TiO_2 \times 0.0001$ vs. SiO_2 (a, after Winchester and Floyd, 1977) and SiO_2 vs. K_2O (b, after Rickwood, 1989) for andesites and granodiorites in the Jiayuguan area

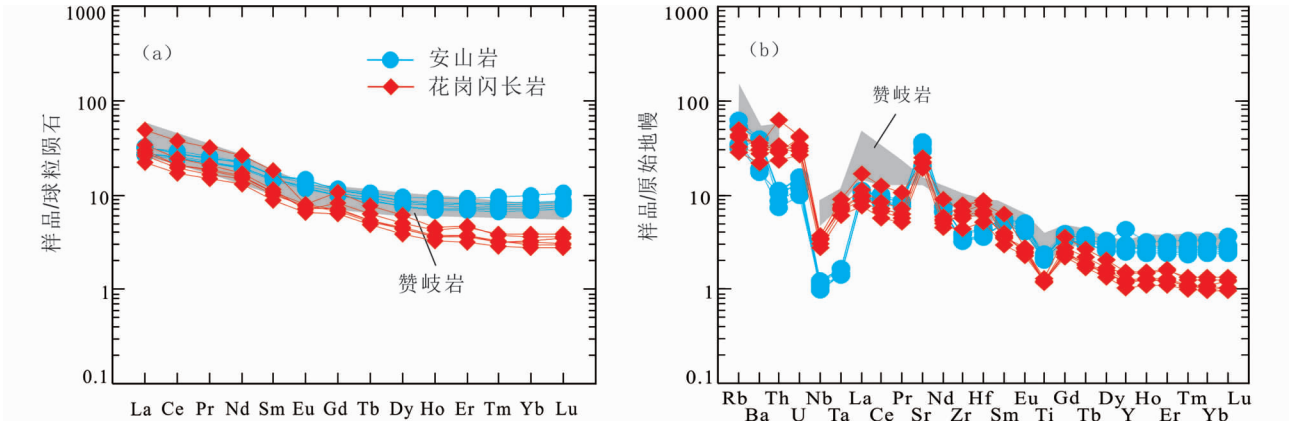


图6 嘉峪关地区安山岩和花岗闪长岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化的微量元素蛛网图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

赞岐岩数据来源: Tatsumi and Ishizaka, 1981, 1982; Shimoda *et al.*, 1998; Tatsumi *et al.*, 2003; Tatsumi, 2006

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spidergrams (b) of andesite and granodiorite in the Jiayuguan area (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

Sanukite data after Tatsumi and Ishizaka, 1981, 1982; Shimoda *et al.*, 1998; Tatsumi *et al.*, 2003; Tatsumi, 2006

的表面年龄范围为 $430 \pm 4\text{Ma} \sim 439 \pm 5\text{Ma}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $436 \pm 2\text{Ma}$, 置信度 95%, $\text{MSWD} = 0.35$ (图 4b), 可代表花岗闪长岩的结晶年龄, 形成时代为早志留世。

3.2 岩石地球化学特征

嘉峪关安山岩、花岗闪长岩的主量、微量元素的分析结果见表 3。镜下可见蚀变矿物, 岩石地球化学分析显示岩石的烧失量偏高, 表明岩石经历了一定程度的蚀变作用, 一些活动性强的元素 (Ba、Rb、K、Na 等) 的浓度可能会受到影响, 本次主要采用受蚀变作用影响较小的高场强元素 (Zr、Nb、Ta、Ti 等)、相容元素 (Cr、Ni) 及稀土元素讨论岩石的类

型和成因。据表 3 可知, 安山岩的 SiO_2 含量介于 $54.06\% \sim 57.62\%$, 平均 55.26% ; Al_2O_3 含量介于 $13.58\% \sim 15.84\%$, 平均 15.11% ; MgO 含量介于 $5.54\% \sim 6.04\%$, 平均 5.78% ; CaO 含量介于 $5.98\% \sim 8.62\%$, 平均 7.38% ; $Mg^\#$ 介于 $64.39 \sim 67.92$, 平均 66.23 ; FeO^T 含量为 $7.28\% \sim 8.15\%$, 平均 7.83% ; FeO^T/MgO 介于 $1.23 \sim 1.47$, 平均 1.36 ; 符合高镁安山岩特征。花岗闪长岩的 SiO_2 含量介于 $68.72\% \sim 71.27\%$, 平均 70.09% ; Na_2O 含量在 $4.47\% \sim 5.10\%$, 平均 4.84% ; K_2O 含量介于 $1.02\% \sim 1.22\%$, 平均 1.12% ; Al_2O_3 含量介于 $14.51\% \sim 15.49\%$, 平均 15.11% ; MgO 含量介于 $1.73\% \sim 1.99\%$, 平均 1.82% ; CaO 含量介于 $2.40\% \sim$

表 4 嘉峪关地区安山岩全岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 4 Whole-rock Sr-Nd isotopes of andesites from the Jiayuguan area

样品号	年龄 (Ma)	Sm ($\times 10^{-6}$)		Nd	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}$	I_{Sr}	$\varepsilon_{\text{Sr}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$	$f_{\text{Rb/Sr}}$	I_{Nd}	$\frac{t_{\text{DM}}}{t_{\text{DM2}}}$ (Ma)	$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$f_{\text{Sm/Nd}}$
BJYG-1-1S	446	2.47	10.4	0.1436	0.512779	0.7041	3.40	1.9	0.19	0.512360	810	713	2.8	5.8	-0.27
BJYG-1-2S	446	2.22	9.12	0.1472	0.512814	0.7042	11.0	2.5	1.14	0.512384	774	674	3.4	6.3	-0.25
BJYG-1-3S	446	2.48	10.2	0.1470	0.512803	0.7044	10.4	5.5	0.65	0.512374	797	691	3.2	6.1	-0.25
BJYG-1-4S	446	2.51	10.4	0.1459	0.512793	0.7045	11.4	7.5	0.54	0.512367	806	701	3.0	5.9	-0.26
BJYG-1-5S	446	2.27	9.13	0.1503	0.512767	0.7043	10.4	4.6	0.78	0.512328	924	763	2.5	5.2	-0.24

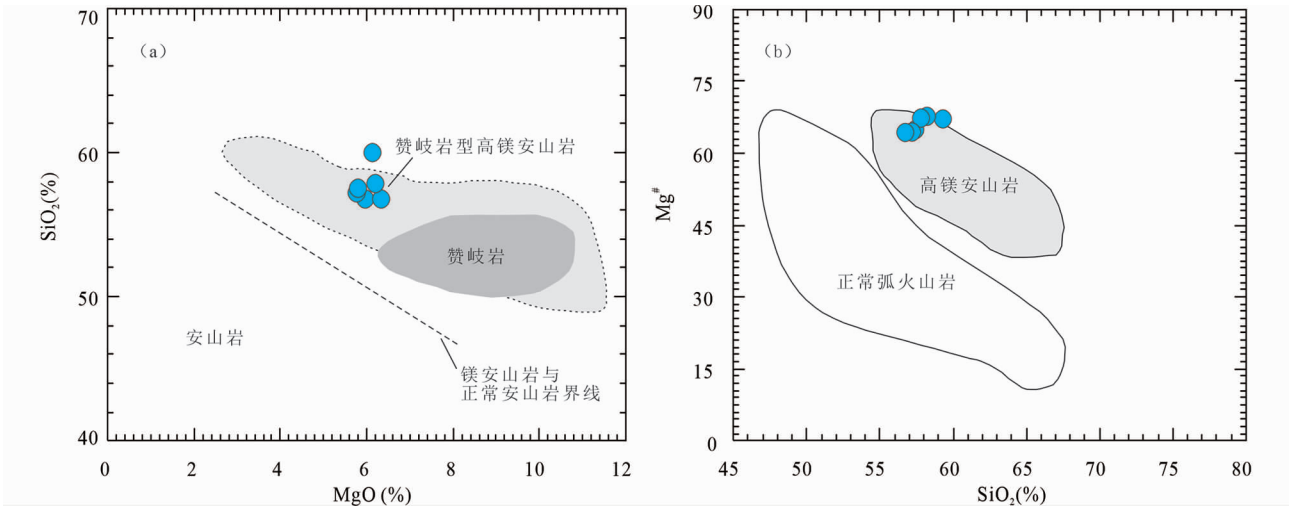


图 7 嘉峪关地区安山岩 MgO-SiO₂ (a, 据 McCarron and Smellie,1998) 和 SiO₂-Mg[#] (b, 据 Kelemen,1995) 判别图
赞岐岩型高镁安山岩数据范围据 Ishizaka and Carlson,1983;Shimoda *et al.* ,1998. 赞岐岩数据范围引自 Tatsumi *et al.* ,2003
Fig. 7 MgO vs. SiO₂ diagram (a, after McCarron and Smellie,1998) and SiO₂ vs. Mg[#] diagram (b, after Kelemen,1995) of andesite in the Jiayuguan area
Setouchi HMA data after Ishizaka and Carlson,1983;Shimoda *et al.* ,1998. Setouchi Sanukite data after Tatsumi *et al.* ,2003

3.01%, 平均 2.66%; 岩石 A/CNK 值 1.06 ~ 1.11, 平均 1.08; Mg[#] 介于 65.40 ~ 68.83, 平均 66.97。在 SiO₂-Zr/TiO₂ × 0.0001 岩石分类图解中, 安山岩样品全部落入安山岩区域内, 花岗闪长岩样品全部落入英安流纹岩 (花岗闪长岩) 区域内 (图 5a), 在 SiO₂-K₂O 图解上, 安山岩主要位于钙碱性系列区域内, 花岗闪长岩位于低钾 (拉斑) 系列区域内 (图 5b)。

安山岩样品稀土元素含量较低, 总量 (ΣREE) 介于 54.2 × 10⁻⁶ ~ 69.6 × 10⁻⁶ 之间; LREE/HREE 比值为 1.40 ~ 1.94, 平均 1.78; (La/Yb)_N 比值为 3.31 ~ 4.03, 平均 3.75; 表明轻稀土相对富集, 重稀土相对亏损, 轻重稀土分馏较好。 (La/Sm)_N 介于 1.66 ~ 2.00, (Gd/Yb)_N 在 1.18 ~ 1.44 之间, 显示轻稀土相对于重稀土内部分馏较好。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上 (图 6a), 稀土分馏不明显, 基本没有 Eu 异常, δEu 介于 0.98 ~ 1.07 之间, 平均 1.01; 在原始地幔标准化微量元素蛛网图 (图 6b) 上, 普遍表现出 Nb、Ta、Ti 等高场强元素的亏损和 Rb、U、Sr 等元素的富集。

花岗闪长岩的微量元素分析结果及特征参数见表 3。数据显示, 花岗闪长岩样品总体稀土含量较低, 稀土总量

(ΣREE) 介于 32.8 × 10⁻⁶ ~ 64.6 × 10⁻⁶ 之间, LREE/HREE 比值为 2.91 ~ 4.10 (平均为 3.20), (La/Yb)_N 比值为 7.97 ~ 13.41 (平均为 9.49), (La/Sm)_N 介于 2.59 ~ 2.95 (平均为 2.69), (Gd/Yb)_N 在 2.10 ~ 2.89 之间 (平均为 2.33)。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上, 岩石总体表现出轻稀土相对富集, 重稀土相对亏损, 总体上呈右倾型曲线特征 (图 6a), 并具有轻微的负 Eu 异常 (δEu = 0.56 ~ 0.92, 平均 0.79)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 普遍表现出 Rb、Sr、U 等元素的富集和 Nb、Ta、Ti 等元素的亏损 (图 6b)。

3.3 Sr-Nd 同位素地球化学特征

本文选取 5 件安山岩样品进行 Sr-Nd 同位素分析, 测试结果见表 4。安山岩初始 Sr、Nd 同位素初始比值计算基于安山岩相应的锆石 U-Pb 定年结果 (446Ma)。嘉峪关地区安山岩的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.704736 ~ 0.705306, 变化范围较小, 对应的初始 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值 (*I*_{Sr}) 为 0.704110 ~ 0.704500; ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 的值为 0.512767 ~ 0.512814, 对应的初始 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd

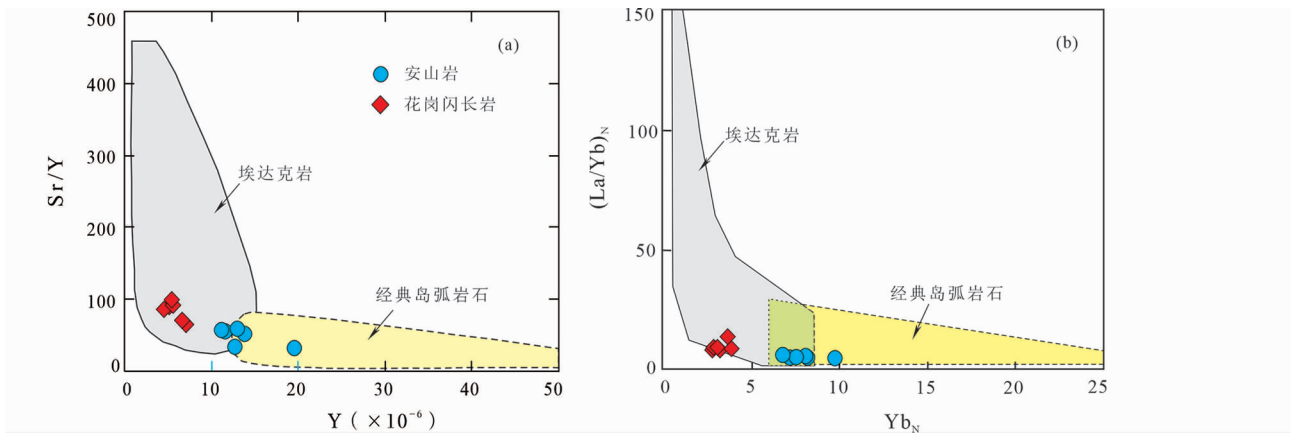


图8 嘉峪关地区安山岩和花岗闪长岩的 Y-Sr/Y (a, 据 Defant and Drummond, 1990) 和 Yb_N -(La/Yb) $_N$ 判别图 (b, 据 Martin *et al.*, 2005)

Fig. 8 Diagrams of Y vs. Sr/Y (a, after Defant and Drummond, 1990) and Yb_N vs. (La/Yb) $_N$ (b, after Martin *et al.*, 2005) for andesites and granodiorites in the Jiayuguan area

比值(I_{Nd})为 0.512328 ~ 0.512384。 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值为 5.2 ~ 6.3, Nd 同位素两阶段模式年龄(t_{DM2})为 674 ~ 763 Ma。

4 讨论

4.1 岩石成因

嘉峪关地区的安山岩具有较高的 MgO 含量和 $Mg^\#$ 值, 较低的 FeO^T/MgO 比值 (FeO^T/MgO 介于 1.23 ~ 1.47, 平均 1.36), 符合高镁安山岩地球化学特征 (Kelemen, 1995; Tatsumi, 2001)。在 $MgO-SiO_2$ 和 $SiO_2-Mg^\#$ 判别图上 (图 7), 也主要位于高镁安山岩区域内。高镁安山岩主要包括 4 种类型, 即埃达克型 (Adakites)、巴哈岩型 (bajaite)、赞岐岩型 (sanukitoids) 和玻安岩型 (boninites) (Defant and Drummond, 1990; Kelemen, 1995; Tatsumi, 2001, 2006; Kamei *et al.*, 2004)。本文的高镁安山岩 MgO 含量介于 5.54% ~ 6.04%, 平均 5.78%; TiO_2 含量介于 0.44% ~ 0.51%, 平均 0.47%; 与典型的玻安岩 ($MgO > 8\%$, $TiO_2 < 0.2\%$) 不同 (Kamei *et al.*, 2004)。嘉峪关高镁安山岩的 Ba 含量为 121×10^{-6} ~ 278×10^{-6} , 平均 226×10^{-6} , Sr 含量为 428×10^{-6} ~ 766×10^{-6} , 平均 637×10^{-6} , 也明显低于巴哈岩 Ba、Sr 含量 (巴哈岩的 Ba 含量大于 1000×10^{-6} , Sr 含量大于 1000×10^{-6}) (Yogodzinski *et al.*, 1995)。嘉峪关高镁安山岩的 Y 含量介于 9.02×10^{-6} ~ 19.5×10^{-6} , 平均 12.97×10^{-6} , Sr/Y 比值较高, 为 32 ~ 64, 平均 51, 有类似于埃达克型高镁安山岩的特征。然而, 在球粒陨石标准化稀土元素配分图和原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 显示出与赞岐岩类似的地球化学特征; 在 Y-Sr/Y 和 Yb_N -(La/Yb) $_N$ 判别图上 (图 8), 安山岩主要位于埃达克岩与经典岛弧火山岩相交区域内, 也与赞岐岩的地球化学性质一致。加之安山岩具有较低的 SiO_2 含量, 富集相容性

元素 Cr (63.5×10^{-6} ~ 181×10^{-6} , 平均 117×10^{-6}), 本文认为嘉峪关地区的安山岩应属于赞岐岩型高镁安山岩。

关于高镁安山岩的岩石成因, 目前主要有以下 4 种不同的认识: (1) 幔源基性岩浆和壳源酸性岩浆的混合 (Boettcher, 1973; Tatsumi *et al.*, 2003; Streck *et al.*, 2007); (2) 富集地幔的部分熔融, 富集组分来自俯冲带的流体 (Stern *et al.*, 1989; Stern and Hanson, 1991); (3) 俯冲板片 (包括俯冲沉积物) 部分熔融产生的熔体与地幔橄榄岩的相互反应 (Kelemen, 1995; Kelemen *et al.*, 2014; Rapp *et al.*, 1999; Tatsumi, 2006); (4) 拆沉下地壳部分熔融产生的熔体与地幔橄榄岩的反应 (Kay *et al.*, 1993; Kelemen *et al.*, 1998; Gao *et al.*, 2004)。研究区未见有岩浆混合现象 (如镁铁质包体及矿物的反环带), 且 Sr、Nd 同位素也未显示出明显的壳源物质的贡献, 因此, 研究区的高镁安山岩不大可能是岩浆混合成因。研究区高镁安山岩具有高的 Sr 含量 (428×10^{-6} ~ 766×10^{-6} , 平均 637×10^{-6}) 和 Sr/Y 比值 (32 ~ 64, 平均 51), 暗示其源区可能涉及俯冲洋壳或拆沉下地壳的熔融组分 (Rapp *et al.*, 1999; Tatsumi and Hanyu, 2003; Gao *et al.*, 2004)。然而, 拆沉下地壳熔体通常具有低 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 、高 ($^{87}Sr/^{86}Sr$) $_i$ 的特征, 与研究区安山岩较高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值 (5.2 ~ 6.3) 和略高的锶同位素初始值 (I_{Sr} 介于 0.7041 ~ 0.7045) 同位素特征不符。研究区安山岩富集大离子亲石元素 Rb、K、Pb、Sr, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 等, 呈现俯冲带岩浆岩特征, 其 Th/Yb 比值很低, 介于 0.49 ~ 0.74, 平均 0.63, 而 Ba/La 比值却很高 (15.82 ~ 42.64, 平均 32.38), 暗示普通沉积物对岩浆成分的贡献很小, 来自俯冲板片的流体可能是其岩浆作用过程的主要参与者。然而, 安山岩高的 Sr/Y 比值、较高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值 (5.2 ~ 6.3) 和略高的锶同位素初始值 (I_{Sr} 介于 0.7041 ~ 0.7045), 又似乎指示其亏损地幔源区可能受到了俯冲带熔体的交代作用。因为, 若交代介质为俯冲板片释放的流体,

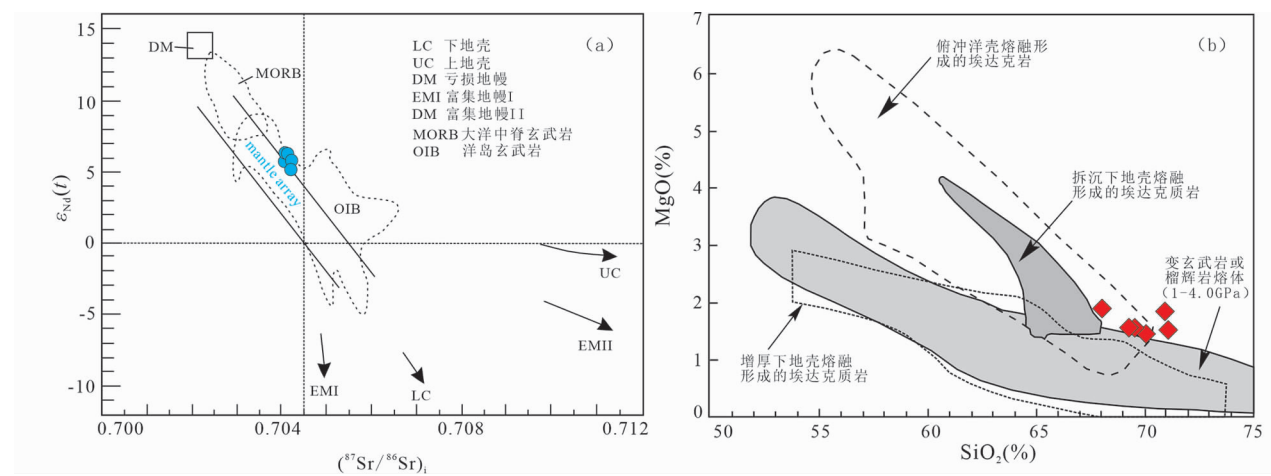


图9 嘉峪关地区安山岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{Nd}(t)$ 图(a, 底图据 Zindler and Hart, 1986) 和花岗闪长岩 SiO_2 -MgO 判别图(b, 底图据 Wang *et al.*, 2006 及其所引文献)

Fig. 9 Diagrams of $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ vs. $\epsilon_{Nd}(t)$ of andesite (a, after Zindler and Hart, 1986) and SiO_2 vs. MgO diagram of granodiorite (b, after Wang *et al.* (2006) and references therein) in the Jiayuguan area

通常只会提升锶同位素比值而基本不影响钕同位素, 无法解释 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的适度降低——唯有来自俯冲板片(如年轻洋壳或沉积物)的熔体, 才能在带来放射成因锶的同时也带入钕, 并使地幔的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值从极高水平(8~10)拉低至 5.2~6.3。典型洋壳熔体通常具有强烈亏损的重稀土元素(HREE)配分模式, 而本区安山岩表现为相对平坦的 HREE 配分模式, 似乎又与完全的熔体交代不同。研究表明, 若交代地幔在相对较浅的位置发生部分熔融, HREE 的亏损信号可能被稀释(Zheng and Zhao, 2017)。综上, 本研究认为单一的流体/熔体交代模型不能完全解释研究区安山岩的地球化学特征, 为此我们提出研究区高镁安山岩可能的形成机制是: 普通的地幔橄榄岩在俯冲板片流体、少量洋壳熔体的交代作用下形成富集地幔楔, 接着富集的地幔楔在较浅的位置发生部分熔融形成高镁的安山质熔体, 进而形成研究区的高镁安山岩。

花岗闪长岩具有高 SiO_2 (68.72%~71.27%, 平均 70.09%), Al_2O_3 (14.51%~15.49%); 富 Na、贫 K (Na_2O 含量在 4.47%~5.10%, 平均 4.84%, K_2O 含量介于 1.02%~1.22%, 平均 1.12%); MgO 含量介于 1.73%~1.99%, 平均 1.82%; CaO 含量介于 2.40%~3.01%, 平均 2.66%; 高 Sr 含(400×10^{-6} ~ 531×10^{-6}), 低 Y 和 Yb (Y 含量在 4.64×10^{-6} ~ 6.94×10^{-6} , Yb 含量在 0.47×10^{-6} ~ 0.65×10^{-6}) 等特征; 此外, 其 Sr/Y 比值介于 66~98, 均大于 40, 并且无明显的 Eu 异常。这些均符合埃达克质岩地球化学特征, 而且与 Y-Sr/Y 和 Yb_N -(La/Yb)_N 图上(图 8)投影点均位于埃达克区域内判别结果一致。

关于埃达克质岩石的成因, 主要有 4 个方面的认识: (1) 年轻的 (<25Ma) 热洋壳俯冲到一定深度发生部分熔融的产物 (Defant and Drummond, 1990; Kay *et al.*, 1993; Yogodzinski *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 2007); (2) 幔源岩浆的地壳混染与

分离结晶过程 (AFC 过程) (Castillo *et al.*, 1999; Macpherson *et al.*, 2006; Richards and Kerrich, 2007; Petrone and Ferrari, 2008); (3) 加厚下地壳部分熔融 (Chung *et al.*, 2003); (4) 拆沉下地壳熔融形成 (Gao *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006)。幔源岩浆的地壳混染与分离结晶过程 (AFC 过程) 形成的埃达克质岩石通常为中性岩石 (赵少卿等, 2015), 而嘉峪关花岗闪长岩高的 SiO_2 含量暗示其并非来源于幔源岩浆的结晶分异。加厚下地壳部分熔融形成的埃达克岩通常富钾 ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 大于 0.7 (Moyen, 2009)), 低 MgO 和 $\text{Mg}^\#$ (一般小于 40), 而嘉峪关地区的埃达克质花岗闪长岩具有低的 K_2O 含量 ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 介于 0.21~0.27, 平均 0.23) 和高的 $\text{Mg}^\#$ 值 (64.70~67.22), 与其明显不同。拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克岩由于形成过程中部分熔融形成的熔体会与地幔橄榄岩发生反应, 因此, 通常具有较高的 MgO 、Ni、Cr 含量和较低的 Si 和 Al 含量, 而研究区花岗闪长岩具有较低的 MgO (1.73%~1.99%), Ni (24.4×10^{-6} ~ 26.8×10^{-6}), Cr (31.4×10^{-6} ~ 36.7×10^{-6}) 及较高的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量, 也明显与拆沉下地壳模式形成的埃达克岩不同。俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克岩一般富钠贫钾, 亏损 Nb、Ta 等高场强元素 (Wang *et al.*, 2006; Martin *et al.*, 2005; Hastie *et al.*, 2015), 研究区的埃达克质花岗闪长岩具有类似特征。在 SiO_2 -MgO 判别图 (图 9), 花岗闪长岩也主要落入俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩范围内, 表明研究区埃达克质岩石的形成可能与俯冲洋壳的部分熔融有关。

4.2 构造背景及地质意义

构造环境研究表明, 除极少数高镁安山岩形成于后碰撞环境外 (Gao *et al.*, 2004; Rao *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2008), 其他高镁安山岩都形成于汇聚板块边界, 并且大都与

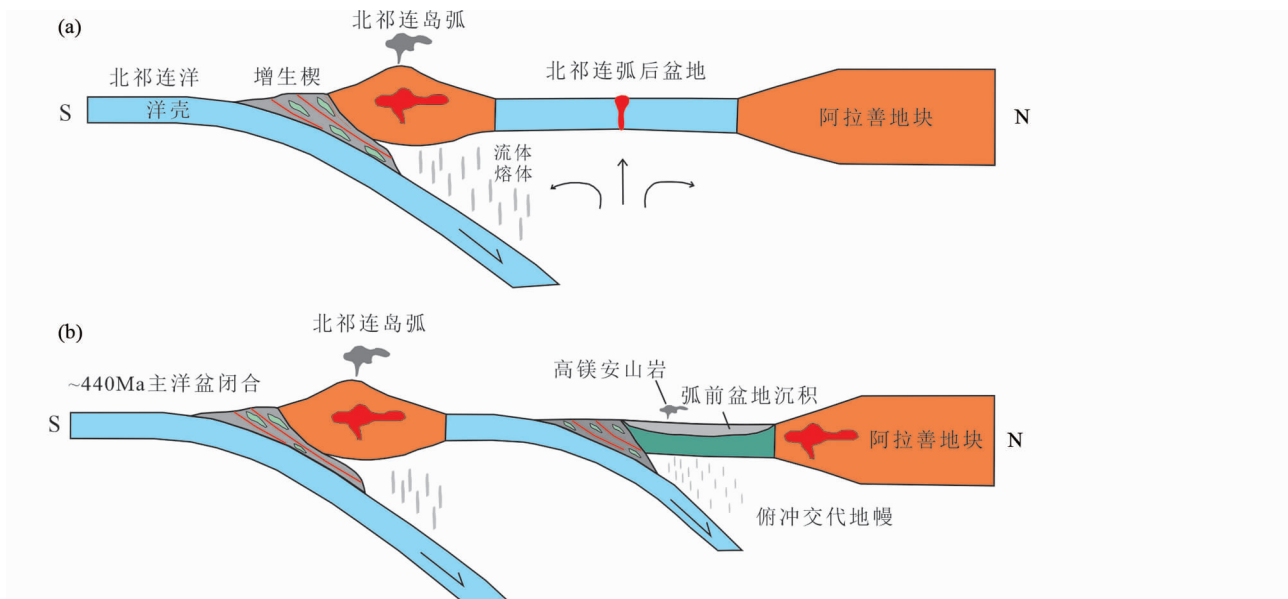


图 10 北祁连后盆地构造演化模式简图

Fig. 10 Schematic diagrams of the tectonic evolution model of the North Qilian back-arc basin

年轻且热的洋壳或洋脊的俯冲有关 (Kay, 1978; Tatsumi and Ishizaka, 1981, 1982; Rogers *et al.*, 1985; Kelemen, 1995; Shimoda *et al.*, 1998; Tatsumi *et al.*, 2003)。嘉峪关地区的高镁安山岩形成时代明显早于北祁连地区已发现的同碰撞-后碰撞性质的岩浆岩的形成时代 (430 ~ 374Ma) (吴才来等, 2010; Song *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2018; Fu *et al.*, 2019), 所以不太可能形成于后碰撞环境。一直以来, 本研究区的镁铁质岩石被认为是北祁连后盆地蛇绿岩的一部分, 但一直缺乏年代学和地球化学方面的约束, 本次获得安山岩的锆石 U-Pb 年龄为 $446 \pm 2.0\text{Ma}$, 与北祁连西段九个泉蛇绿岩 (490Ma) (夏小洪和宋述光, 2010) 及弧后盆地火山岩的形成时代相距甚远。Fu *et al.* (2020) 通过对北祁连东段老虎山地区的蛇绿构造混杂岩的地球化学、年代学和同位素地球化学分析, 识别出两期洋壳形成事件, 包括早期增生杂岩中具有俯冲特征的约 473Ma 的斜长花岗岩和约 479Ma 的 SSZ 型辉长岩块以及晚期蛇绿岩岩片中 454 ~ 449Ma 的斜长花岗岩和约 449Ma 的 SSZ 型辉长岩, 提出洋内俯冲的模型解释不同特征超镁铁质-镁铁质岩石的空间展布, 其中早期 (479 ~ 473Ma) 超镁铁质-镁铁质和长英质岩石形成于北祁连后盆地扩张阶段, 而晚期 (454 ~ 449Ma) 则为弧后洋壳洋内俯冲的产物。另外, 结合区域上北祁连造山带东段北缘和阿拉善地块南缘发育的与俯冲有关的 460 ~ 430Ma 岩浆作用 (王金荣等, 2006, 2008; Tseng *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017; Fu *et al.*, 2019; 赵少卿等, 2023) 及阿拉善南缘中二叠世岩石碎屑锆石频谱特征 (Song *et al.*, 2018)、北祁连中段北缘大野口地区与俯冲有关的埃达克质闪长玢岩 (440Ma, 未发表资料) (唐卓等, 2018)、辉长岩 (452Ma, 内部资料), 本文认为嘉峪关地区的高镁安山岩、埃达克质花岗闪长岩可能

与北祁连造山带东段老虎山地区晚期的岩石具有类似的成因机制, 即随着北祁连洋盆持续的北向俯冲, 导致与俯冲有关的弧岩岩浆岩 (517 ~ 483Ma) 的形成 (Xia *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014, 2020) 和弧后盆地扩张及弧后洋壳的形成 (490 ~ 474Ma) (Xia *et al.*, 2003, 2016; Song *et al.*, 2013; Fu *et al.*, 2020), 这些洋壳残片构成北祁连后盆地蛇绿岩的一部分 (图 10a)。之后, 北祁连后盆地洋壳在大约 450Ma 开始北向俯冲, 形成了 449Ma 的 SSZ 型基性-超基性岩 (Song *et al.*, 2013)、与俯冲相关的弧岩岩浆岩 (王金荣等, 2006, 2008; Tseng *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017; Fu *et al.*, 2019; 赵少卿等, 2023) 及本次研究的高镁安山岩和埃达克质花岗闪长岩 (图 10b)。在 430Ma 左右, 伴随着大规模的同碰撞相关的岩浆岩的出现 (Song *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2017; Fu *et al.*, 2019), 北祁连后盆地洋盆闭合。本次北祁连后盆地西段具有俯冲型地球化学亲缘性的晚奥陶世-早志留世高镁安山岩、埃达克岩的发现为完善北祁连大地构造演化研究, 特别是弧后盆地的演化过程研究提供新的岩石学证据。

5 结论

(1) 北祁连造山带西段嘉峪关地区安山岩和花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 $446 \pm 2.0\text{Ma}$ 和 $436 \pm 1.8\text{Ma}$, 形成于晚奥陶世至早志留世。

(2) 嘉峪关地区安山岩具有较高的 MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值, 较低的 $\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO}$ 比值, 普遍表现出 Nb、Ta、Ti 等高场强元素的亏损和 Cs、Rb、K、Pb、Sr 等元素的富集, 有类似于赞岐岩

型高镁安山岩的地球化学特征,可能是俯冲板片流体/熔体交代作用下形成富集地幔楔发生部分熔融作用的产物。

(3)嘉峪关地区花岗闪长岩具有高 Al_2O_3 , 富 Na_2O , 贫 K_2O , 高 Sr, 低 Y 与 Yb 特征, Sr/Y 比值介于 66 ~ 98, 均大于 40, 无明显的 Eu 异常, 为一套埃达克质侵入岩, 可能是俯冲洋壳部分熔融作用的产物。

(4)嘉峪关地区的高镁安山岩、埃达克质花岗闪长岩的形成可能与北祁连弧后盆地洋壳洋内俯冲有关。该套岩石的发现为完善北祁连弧后盆地的演化过程研究提供了关键的岩石学证据。

致谢 实验测试工作得到了中国地质调查局西安地质调查中心实验测试室的大力支持与协助; 西安地质调查中心高晓峰研究员在论文撰写过程中给予了诸多建设性意见帮助; 匿名审稿人提出的宝贵意见和建议使本文受益良多; 本刊编辑为本文修改完善付出了辛勤劳动与专业指导; 在此一并表示感谢。

References

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79

Belousova E, Griffin W, O'Reilly SY and Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622

Boettcher AL. 1973. Volcanism and orogenic belts: The origin of andesites. *Tectonophysics*, 17(3): 223-240

Cawood PA, Kröner A, Collins WJ, Kuskus TM, Mooney WD and Windley BF. 2009. Accretionary orogens through Earth history. In: Cawood PA and Kröner A (eds.). *Earth Accretionary Systems in Space and Time*. Geological Society, London, Special Publications, 318(1): 1-36

Chen S, Niu YL and Xue QQ. 2018. Syn-collisional felsic magmatism and continental crust growth: A case study from the North Qilian Orogenic Belt at the northern margin of the Tibetan Plateau. *Lithos*, 308-309: 53-64

Chen YX, Song SG, Niu YL and Wei CJ. 2014. Melting of continental crust during subduction initiation: A case study from the Chaidanuo peraluminous granite in the North Qilian suture zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 132: 311-336

Chen YX, Cui Y, Song SG, Fu SM, Zhang LP, Sun WD and Xiao TF. 2020. Late Cambrian tonalite-trondhjemite association in the eastern segment of North Qilian suture zone: Petrogenesis and geodynamic implications. *International Geology Review*, 64(10): 1431-1449

Chung SL, Liu DY, Ji JQ, Chu MF, Lee HY, Wen DJ, Lo CH, Lee TY, Qian Q and Zhang Q. 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31(11): 1021-1024

Claesson S, Vetrin V, Bayanova T and Downes H. 2000. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: A record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic. *Lithos*, 51(1-2): 95-108

Castillo PR, Janney PE and Solidum RU. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134: 33-51

Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665

Fu D, Kuskus T, Wilde SA, Polat A, Huang B and Zhou ZP. 2019. Early Paleozoic collision-related magmatism in the eastern North Qilian orogen, northern Tibet: A linkage between accretionary and collisional orogenesis. *GSA Bulletin*, 131(5-6): 1031-1056

Fu D, Kuskus TM, Wilde SA, Windley BF, Polat A, Huang B and Zhou ZP. 2020. Structural anatomy of the Early Paleozoic Laohushan ophiolite and subduction complex: Implications for accretionary tectonics of the Proto-Tethyan North Qilian orogenic belt, northeastern Tibet. *GSA Bulletin*, 132(9-10): 2175-2201

Gao S, Rudnick RL, Yuan HL, Liu XM, Liu YS, Xu WL, Ling WL, Ayers J, Wang XC and Wang QH. 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892-897

Hastie AR, Fitton JG, Mitchell SF, Neill I, Nowell GM and Millar IL. 2015. Can fractional crystallization, mixing and assimilation processes be responsible for Jamaican-type adakites? Implications for generating Eoarchean continental crust. *Journal of Petrology*, 56(7): 1251-1284

Ishizaka K and Carlson RW. 1983. Nd-Sr systematics of the Setouchi volcanic rocks, southwest Japan: A clue to the origin of orogenic andesite. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(3): 327-340

Kamei A, Owada M, Nagao T and Shiraki K. 2004. High-Mg diorites derived from sanukitic HMA magmas, Kyushu Island, southwest Japan arc: Evidence from clinopyroxene and whole rock compositions. *Lithos*, 75(3-4): 359-371

Kay RW. 1978. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4(1-2): 117-132

Kay SM, Ramos VA and Marquez M. 1993. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America. *The Journal of Geology*, 101(6): 703-714

Kelemen PB. 1995. Genesis of high $\text{Mg}^\#$ andesites and the continental crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 120(1): 1-19

Kelemen PB, Hart SR and Bernstein S. 1998. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 164(1-2): 387-406

Kelemen PB, Hangehøj K and Greene AR. 2014. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. *Treatise on Geochemistry*, 4: 749-806

Kuskus TM, Windley BF, Safonova I, Wakita K, Wakabayashi J, Polat A and Santosh M. 2013. Recognition of ocean plate stratigraphy in accretionary orogens through Earth history: A record of 3.8 billion years of sea floor spreading, subduction, and accretion. *Gondwana Research*, 24(2): 501-547

Li CF, Li XH, Li LQ, Guo JH, Li XH and Yang YH. 2012. Rapid and precise determination of Sr and Nd isotopic ratios in geological samples from the same filament loading by thermal ionization mass spectrometry employing a single-step separation scheme. *Analytica Chimica Acta*, 727: 54-60

Lin YH, Zhang LF, Ji JQ, Wang QJ and Song SG. 2010. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isochron ages of lawsonite blueschists from Jiuguan in the northern Qilian Mountain, NW China, and their tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 55(19): 2021-2027

Liu Q, Zhao GC, Sun M, Han YG, Eizenhöfer PR, Hou WZ, Zhang XR, Zhu YL, Wang B, Liu DX and Xu B. 2016. Early Paleozoic subduction processes of the Paleo-Asian Ocean: Insights from geochronology and geochemistry of Paleozoic plutons in the Alxa Terrane. *Lithos*, 262: 546-560

Ludwig KR. 2003. *ISOPLLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 1-70

Martin H, Smithies RH, Rapp R, Moyaen JF and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1-2): 1-24

McCarron JJ and Smellie JL. 1998. Tectonic implications of fore-arc magmatism and generation of high-magnesian andesites: Alexander Island, Antarctica. *Journal of the Geological Society*, 155(2): 269-

- Macpherson CG, Dreher ST and Thirlwall MF. 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth Planet Science Letters*, 243: 581-593
- Moyen JF. 2009. High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the "adakitic signature". *Lithos*, 112(3): 556-574
- Meng Y, Tang SL, Li XM, Li YG and Bu T. 2018. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Early Silurian clastic rocks in Dacootan of Jiayuguan, North Qilian orogenic belt. *Geological Bulletin of China*, 37(4): 734-746 (in Chinese with English abstract)
- Petrone CM and Ferrari L. 2008. Quaternary adakite-Nb-enriched basalt association in the western Trans-Mexican Volcanic Belt: Is there any slab melt evidence? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156: 73-86
- Qiao JR, Dong J, Song, SG, Allen MB, Wang C, Xia XH and Su L. 2023. Development of a modern-style trench-arc-backarc system in the Proto-Tethys Ocean (Qilian orogenic belt, NW China). *Journal of Petrology*, 64(5): egad029
- Rao DVS, Balaram V, Rao TG and Raju KN. 2006. Paleoproterozoic boninite-like rocks in an intracratonic setting from Central Indian Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18S): A516
- Rapp RP, Shimizu N, Norman MD and Applegate GS. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335-356
- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247-263
- Rogers G, Saunders AD, Terrell DJ, Verma SP and Marriner GF. 1985. Geochemistry of Holocene volcanic rocks associated with ridge subduction in Baja California, Mexico. *Nature*, 315(6018): 389-392
- Richards JP and Kerrich R. 2007. Special paper: Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 102: 537-576
- Shi RD, Yang JS, Wu CL and Wooden J. 2004. First SHRIMP dating for the formation of the Late Sinian Yushigou ophiolite, North Qilian Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 78(5): 649-657 (in Chinese with English abstract)
- Shimoda G, Tatsumi Y, Nohda S, Ishizaka K and Jahn BM. 1998. Setouchi high-Mg andesites revisited: Geochemical evidence for melting of subducting sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 160(3-4): 479-492
- Song SG, Zhang LF, Niu YL, Su L, Song B and Liu DY. 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study from the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data. *Journal of Petrology*, 47(3): 435-455
- Song SG, Niu YL, Su L and Xia XH. 2013. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China. *Gondwana Research*, 23(4): 1378-1401
- Song SG, Niu YL, Su L, Wei CJ and Zhang LF. 2014. Adakitic (tonalitic-trondhjemitic) magmas resulting from eclogite decompression and dehydration melting during exhumation in response to continental collision. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 130: 42-62
- Song SG, Yang LM, Zhang YQ, Niu YL, Wang C, Su L and Gao YL. 2017. Qi-Qin Accretionary Belt in Central China Orogen: Accretion by trench jam of oceanic Plateau and formation of intra-oceanic arc in the Early Paleozoic Qin-Qi-Kun Ocean. *Science Bulletin*, 62(15): 1035-1038
- Song SG, Bi HZ, Qi SS, Yang LM, Allen MB, Niu YL, Su L and Li WF. 2018. HP-UHP metamorphic belt in the East Kunlun Orogen: Final closure of the Proto-Tethys Ocean and formation of the Pan-North-China continent. *Journal of Petrology*, 59(11): 2043-2060
- Song SG, Wu ZZ, Yang LM, Su L, Xia XH, Wang C, Dong JL, Zhou CA and Bi HZ. 2019. Ophiolite belts and evolution of the Proto-Tethys Ocean in the Qilian Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 35(10): 2948-2970 (in Chinese with English abstract)
- Stern RA, Hanson GN and Shirey SB. 1989. Petrogenesis of mantle-derived, LILE-enriched Archean monzodiorites and trachyandesites (sanukitoids) in southwestern Superior Province. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26(9): 1688-1712
- Stern RA and Hanson GN. 1991. Archean high-Mg granodiorite: A derivative of light rare earth element-enriched monzodiorite of mantle origin. *Journal of Petrology*, 32(1): 201-238
- Streck MJ, Leeman WP and Chesley J. 2007. High-magnesian andesite from Mount Shasta: A product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt. *Geology*, 35(4): 351-354
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313-345
- Tang Z, Wang GQ, Li XM, Zhu T, Luo GG, Ji B and Bu T. 2018. Genesis and tectonic implications of Caledonian Dayekou adakite diorite porphyry of Xishui area, Zoulangnanshan, North Qilian Mountain. *Geological Bulletin of China*, 37(4): 716-723 (in Chinese with English abstract)
- Tatsumi Y and Ishizaka K. 1981. Existence of andesitic primary magma: An example from southwest Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 53(1): 124-130
- Tatsumi Y and Ishizaka K. 1982. Origin of high-magnesian andesites in the Setouchi volcanic belt, southwest Japan, I. Petrographical and chemical characteristics. *Earth and Planetary Science Letters*, 60(2): 293-304
- Tatsumi Y. 2001. Geochemical modeling of partial melting of subducting sediments and subsequent melt-mantle interaction: Generation of high-Mg andesites in the Setouchi volcanic belt, southwest Japan. *Geology*, 29(4): 323-326
- Tatsumi Y and Hanyu T. 2003. Geochemical modeling of dehydration and partial melting of subducting lithosphere: Toward a comprehensive understanding of high-Mg andesite formation in the Setouchi volcanic belt, SW Japan. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(9): 1-19
- Tatsumi Y, Shukuno H, Sato K, Shibata T and Yoshikawa M. 2003. The petrology and geochemistry of high-magnesian Andesites at the western tip of the Setouchi Volcanic Belt, SW Japan. *Journal of Petrology*, 44(9): 1561-1578
- Tatsumi Y. 2006. High-Mg andesites in the setouchi volcanic belt, southwestern Japan: Analogy to Archean magmatism and continental crust formation? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34: 467-499
- Tseng CY, Yang HJ, Yang HY, Liu DY, Tsai CL, Wu HQ and Zuo GC. 2007. The Dongciaohe ophiolite from the North Qilian Mountains: A fossil oceanic crust of the Paleozoic-Qilian ocean. *Chinese Science Bulletin*, 52(17): 2390-2401
- Tseng CY, Yang HJ, Yang HY, Liu DY, Wu CL, Cheng CK, Chen CH and Ker CM. 2009. Continuity of the North Qilian and North Qinling orogenic belts, Central Orogenic System of China: Evidence from newly discovered Paleozoic adakitic rocks. *Gondwana Research*, 16(2): 285-293
- Wang JR, Wu CJ, Cai ZH, Guo YS, Wu JC and Liu XH. 2006. Early Paleozoic high-Mg adakite from Yindongliang in the eastern section of the North Qilian: Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2655-2664 (in Chinese with English abstract)
- Wang JR, Wu CJ and Jia ZL. 2008. Sujiashan high-Mg adakite in the eastern section of the North Qilian Mountains: Implications for geodynamics. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 44(3): 16-23, 27 (in Chinese with English abstract)
- Wang N, Wu CL, Lei M and Chen HJ. 2018. Petrogenesis and tectonic implications of the Early Paleozoic granites in the western segment of the North Qilian orogenic belt, China. *Lithos*, 312-313: 89-107
- Wang Q, Xu JF, Jian P, Bao ZW, Zhao ZH, Li CF, Xiong XL and Ma JL. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47(1): 119-144

- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Jian P, Zhao ZH, Li CF, Xu W, Ma JL and He B. 2007. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10): 2609-2636
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Dong YH, Vasconcelos PM, Pearson N, Wan YS, Dong H, Li CF, Yu YS, Zhu TX, Feng XT, Zhang QY, Zi F and Chu ZY. 2008. Eocene melting of subducting continental crust and early uplifting of central Tibet: Evidence from central-western Qiangtang high-K calc-alkaline andesites, dacites and rhyolites. *Earth and Planetary Science Letters*, 272(1-2): 158-171
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325-343
- Wu C, Zuza AV, Yin A, Li CF, Reith RC, Zhang JY, Liu WC and Zhou ZG. 2017. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic granitoids in the central Qilian Shan of northern Tibet: Reconstructing the amalgamation processes and tectonic history of Asia. *Lithosphere*, 9(4): 609-636
- Wu CL, Xu XY, Gao QM, Li XM, Lei M, Gao YH, Frost RB and Wooden JL. 2010. Early Palaeozoic granitoid magmatism and tectonic evolution in North Qilian, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1027-1044 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC and Xu XY. 1996. Petrogenesis of Marine Volcanic Rocks in the North Qilian Mountains. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Xia LQ, Xia ZC and Xu XY. 1998. Early Palaeozoic mid-ocean ridge-ocean island and back-arc basin volcanism in the north Qilian Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 72(4): 301-312 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC and Xu XY. 2003. Magmagenesis in the Ordovician backarc basins of the Northern Qilian Mountains, China. *GSA Bulletin*, 115(12): 1510-1522
- Xia LQ, Li XM, Yu JY and Wang GQ. 2016. Mid-late Neoproterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilianshan, NW China. *GeoResJ*, 9-12: 1-41
- Xia XH and Song SG. 2010. Forming age and tectono-petrogenesis of the Jiugequan ophiolite in the North Qilian Mountain, NW China. *Chinese Science Bulletin*, 55(18): 1899-1907
- Xia XH, Song SG and Niu YL. 2012. Tholeiite-Boninite terrane in the North Qilian suture zone: Implications for subduction initiation and back-arc basin development. *Chemical Geology*, 328: 259-277
- Xiang ZQ, Lu SN, Li HK, Li HM, Song B and Zheng JK. 2007. SHRIMP U-Pb zircon age of gabbro in Aoyougou in the western segment of the North Qilian Mountains, China and its geological implications. *Geological Bulletin of China*, 26(12): 1686-1691 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Windley BF, Yong Y, Yan Z, Yuan C, Liu CZ and Li JL. 2009. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3-4): 323-333
- Xu JF, Shinjo R, Defant MJ, Wang Q and Rapp RP. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30(12): 1111-1114
- Xu ZQ, Xu HF, Zhang JX, Li HB, Zhu ZZ, Qu JC, Chen DZ, Chen JL and Yang KC. 1994. The Zhenyuanmashan Caledonian Subductive complex in the northern Qilian Mountains and its dynamics. *Acta Geologica Sinica*, 68(1): 1-15 (in Chinese with English abstract)
- Yogodzinski GM, Kay RW, Volynets ON, Koloskov AV and Kay SM. 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge. *GSA Bulletin*, 107(5): 505-519
- Yu SY, Zhang JX, Qin HP, Su DY, Zhao XL, Cong F and Li YS. 2015. Petrogenesis of the Early Paleozoic low-Mg and high-Mg adakitic rocks in the North Qilian orogenic belt, NW China: Implications for transition from crustal thickening to extension thinning. *Journal of Asian Earth Sciences*, 107: 122-139
- Zhang JX, Li JP, Yu SY, Meng FC, Mattinson CG, Yang HJ and Ker CM. 2012. Provenance of eclogitic metasediments in the north Qilian HP/LT metamorphic terrane, western China: Geodynamic implications for Early Paleozoic subduction-erosion. *Tectonophysics*, 570-571: 78-101
- Zhang LQ, Zhang HF, Zhang SS, Xiong ZL, Luo BJ, Yang H, Pan FB, Zhou XC, Xu WC and Guo L. 2017. Lithospheric delamination in post-collisional setting: Evidence from intrusive magmatism from the North Qilian orogen to southern margin of the Alxa block, NW China. *Lithos*, 288-289: 20-34
- Zhao SQ, Fu LB, Wei JH, Tan J, Wang XC, Zhao ZX and Li X. 2015. Petrogenesis and geodynamic setting of Late Triassic quartz diorites in Zhiduo area, Qinghai Province. *Earth Science*, 40(1): 61-76 (in Chinese with English abstract)
- Zhao SQ, Hai LF, Sun YL, Mei C, Mu CX, Wei XC, Xu QH and Guo R. 2023. A record of Early Paleozoic subduction of oceanic crust in the eastern part of the North Qilian Mountains: Evidence from the Late Ordovician high-Mg adakites. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 42(4): 465-482 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YF and Zhao ZF. 2017. Introduction to the structures and processes of subduction zones. *Journal of Asian Earth Sciences*, 146: 352-366
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493-571
- Zuza AV, Wu C, Reith RC, Yin A, Li JH, Zhang JY, Zhang YX, Wu L and Liu WC. 2018. Tectonic evolution of the Qilian Shan: An Early Paleozoic orogen reactivated in the Cenozoic. *GSA Bulletin*, 130(5-6): 881-925

附中文参考文献

- 林宜慧, 张立飞, 李建清, 王乾杰, 宋述光. 2010. 北祁连山九个泉硬柱石蓝片岩⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其地质意义. *科学通报*, 55(17): 1710-1716
- 孟勇, 唐淑兰, 李向明, 李艳广, 卜涛. 2018. 北祁连造山带嘉峪关北大草滩地区早志留世碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义. *地质通报*, 37(4): 734-746
- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, Wooden J. 2004. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据. *地质学报*, 78(5): 649-657
- 宋述光, 吴珍珠, 杨立明, 苏犁, 夏小洪, 王潮, 董金龙, 周辰傲, 毕衡哲. 2019. 祁连山蛇绿岩带和原特提斯洋演化. *岩石学报*, 35(10): 2948-2970
- 唐卓, 王国强, 李向民, 朱涛, 罗根根, 计波, 卜涛. 2018. 北祁连走廊南山西水地区加里东期大野口埃达克质闪长玢岩的成因及其地质意义. *地质通报*, 37(4): 716-723
- 王金荣, 吴春俊, 蔡郑红, 郭原生, 吴继承, 刘晓煌. 2006. 北祁连山东段银洞梁早古生代高镁埃达克岩: 地球动力学及成矿意义. *岩石学报*, 22(11): 2655-2664
- 王金荣, 吴继承, 贾志磊. 2008. 北祁连山东段苏家山高 Mg 埃达克岩地球动力学意义. *兰州大学学报(自然科学版)*, 44(3): 16-23, 27
- 吴才来, 徐学义, 高前民, 李向民, 雷敏, 邵源红, Frost RB, Wooden JL. 2010. 北祁连早古生代花岗质岩浆作用及构造演化. *岩石学报*, 26(4): 1027-1044
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 北祁连山海相火山岩岩石成因. 北京: 地质出版社
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1998. 北祁连山早古生代洋脊-洋岛和弧后盆地火山作用. *地质学报*, 72(4): 301-312
- 夏小洪, 宋述光. 2010. 北祁连山肃南九个泉蛇绿岩形成年龄和构

造环境. 科学通报, 55(15): 1465-1473

相振群, 陆松年, 李怀坤, 李惠民, 宋彪, 郑健康. 2007. 北祁连西段熬油沟辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义. 地质通报, 26(12): 1686-1691

许志琴, 徐惠芬, 张建新, 李海兵, 朱志直, 曲景川, 陈代璋, 陈金禄, 杨开春. 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学. 地质学报, 68(1): 1-15

曾建元, 杨怀仁, 杨宏仪, 刘敦一, 蔡金郎, 吴汉泉, 左国朝. 2007. 北祁连东草河蛇绿岩: 一个早古生代的洋壳残片. 科学通报, 52(7): 825-835

赵少卿, 付乐兵, 魏俊浩, 谭俊, 王旭春, 赵志新, 李翔. 2015. 青海治多地区晚三叠世石英闪长岩地球化学特征及成岩动力学背景. 地球科学, 40(1): 61-76

赵少卿, 海连富, 孙永亮, 梅超, 母彩霞, 魏向成, 徐清海, 郭蓉. 2023. 北祁连东段早古生代洋壳俯冲作用记录——来自晚奥陶世高镁埃达克岩的证据. 岩石矿物学杂志, 42(4): 465-482

中国地质调查局西安地质调查中心. 2019. 祁连山及邻区地质图 (1:1000000). 北京: 地质出版社