

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.01.002

中祁连党河南山碱性系列岩浆岩-埃达克岩成因及其对俯冲带壳幔相互作用的启示

武美云,王超*,李航,喻遵谱,郝江波,孙晓奎,马得青,张帅,李雪

(大陆动力学国家重点实验室,西北大学地质学系,陕西 西安 710069)

摘要:碱性系列岩浆岩和埃达克岩是通常产生于汇聚板块边缘的特殊岩石类型,记录了俯冲物质与地幔橄榄岩相互作用的过程。笔者对中祁连南缘党河南山地区贾公台杂岩体和鸡叫沟岩体进行了岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年表明,鸡叫沟岩体中的二长闪长岩形成于 (467 ± 4.7) Ma,贾公台岩体花岗闪长岩形成于 (445 ± 4.3) Ma。地球化学分析结果表明,鸡叫沟杂岩体中角闪辉石岩、辉长岩和二长闪长岩整体上具有富 K、富 Na 的特征,均属于碱性系列岩浆岩,具有钾玄岩特征;岩体中不同岩石类型具有相似的微量元素配分型式,富集 Sr、Nb、LILE 和 LREE 等,岩浆源区存在金红石残留,其形成过程与弧地幔楔底部富碱的俯冲沉积物和地幔橄榄岩混合、熔融有关。贾公台花岗闪长岩属于中钾钙碱性系列, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值大于 2.5,样品具有高 Sr($>400 \times 10^{-6}$)、低 Y($<7 \times 10^{-6}$) 的特征,高 Sr/Y 值(>70)和 La/Yb 值(>22)具有高硅埃达克岩特征,与俯冲洋壳的榴辉岩相部分熔融有关,源区存在石榴子石残留特征。党河南山碱性岩浆岩-埃达克岩组合指示了俯冲物质深部熔融的特点(大于 50~100 km),揭示了该地区强烈的壳幔相互作用过程,表明俯冲沉积物和俯冲洋壳可以为弧岩浆侵入体形成提供直接的物质来源,进一步说明俯冲物质和地幔橄榄岩相互作用可能是岛弧地壳生长的方式之一。

关键词:碱性系列岩浆岩;埃达克岩;壳幔相互作用;党河南山;祁连山

中图分类号:P518,P588

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)01-019-20

Petrogenesis of Magmatic Rocks and Adakite of Alkaline Series from Danghenanshan Area in Central Qilian Belt: Implications for Crust-Mantle Interaction in Subduction Zone

WU Meiyun, WANG Chao*, LI Hang, YU Zunpu, HAO Jiangbo, SUN Xiaokui,
MA Deqing, ZHANG Shuai, LI Xue

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University,
Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: Magmatic rocks and adakite of alkaline series, often at the convergent plate boundaries, witness the interaction process between subduction material and mantle peridotite. This in-

收稿日期:2021-01-05;修回日期:2021-06-23;网络发表日期:2021-12-06;责任编辑:李辉

基金项目:国家自然科学基金(41672187, 42030307)和科技部大陆动力学国家重点实验室课题资助。

作者简介:武美云(1995-),女,矿物学、岩石学、矿床学专业硕士研究生。E-mail:1749605640@qq.com。

* 通信作者:王超(1979-),男,副研究员,博士生导师,主要从事岩石学与前寒武纪地质研究工作。E-mail:chaowang@nwu.edu.cn。

vestigation of zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry of the Jiagongtai and Jijiaogou plutons in the western Central Qilian belt provides new insights into crust-mantle interaction in subduction zone. LA-ICP-MS zircon dating shows that monzodiorite of the Jijiaogou pluton and granodiorite of the Jiagongtai pluton formed at about (467 ± 4.7) Ma and (445 ± 4.3) Ma, respectively. The compositions of Jijiaogou pluton are alkaline series with the characteristics of shoshonite. The different rock types of Jijiaogou pluton have similar trace element patterns and are enriched in Sr, Nb, LILE and LREE, which shows residual rutile in the magma source. The Jijiaogou alkaline series rocks are generated from hybrid alkali-rich subduction sediments and mantle peridotite at the sub-arc mantle wedge. The Jiagongtai granodiorite is medium potassium calc-alkaline series, with $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ greater than 2.5; the samples show the characteristics of high Sr ($>400 \times 10^{-6}$), low Y ($<7 \times 10^{-6}$), high ratios of Sr/Y (>70) and La/Yb (>22). The Jiagongtai pluton represents high-SiO₂ adakite, formed by partial melting of the subducted oceanic crust under eclogite-facies condition, and left garnet residue in the source. The alkaline magma and adakite in Danghenanshan indicate the characteristic of deep melting of subducted materials (greater than 50~100 km) and intense crust-mantle interaction in the source. It further indicates that subducted sediments and oceanic crust can provide a direct material source for the formation of arc magma, and the interaction between subduction material and mantle peridotite may be one of the ways of arc crust growth.

Keywords: magmatic rocks of alkaline series; adakite; crust-mantle interaction; Danghenanshan; Qilian orogen

碱性系列岩浆岩和埃达克岩是产出于汇聚板块边缘的特殊岩石类型,记录俯冲板片或沉积物与地幔橄榄岩相互作用的过程,对铜金成矿作用研究和找矿勘探具有指示意义(Cruz-Urbe et al., 2018; 王强等, 2020)。祁连造山带记录了早古生代原特提斯洋形成演化过程中的微陆块、洋盆演化和俯冲碰撞造山过程(吴才来等, 2004; Gehrels et al., 2011; 夏林圻等, 2016; Song et al., 2014; 张建新等, 2015; Xiao et al., 2009; Yan et al., 2015; Wang et al., 2017; Yu et al., 2021)。中祁连南缘存在一条延伸长约 2 000 km 的早古生代弧岩浆岩带(Song et al., 2017),包括寒武纪蛇绿混杂岩和奥陶纪洋内弧-弧后盆地杂岩(Gao et al., 2018a, 2018b; Fu et al., 2018; Song et al., 2014; Wang et al., 2017; Yang et al., 2019a; Zhao et al., 2020)。该弧岩浆岩带西段的党河南山地区早古生代弧岩浆岩规模巨大且出露较为连续,反映了俯冲带不同阶段的演化历史,并保留了弧岩浆演化和地壳生长的重要信息(图 1A)(Wang et al., 2017)。党河南山岩浆岩带主体为中基性火山岩和侵入体

(赵虹等, 2004; 刘志武等, 2007; 张莉莉等, 2013; 罗志文等, 2015; Wang et al., 2017; 李五福等, 2019; 计波等, 2019; Zhao et al., 2020)。该岩浆岩带中的侵入岩与金矿床密切伴生,已发现贾公台、鸡叫沟等 10 余处金矿床(李厚民等, 2003; 王宝华, 2013; 张翔等, 2015; 戴霜等, 2016),提供了该弧岩浆岩带复杂的壳幔相互作用和岛弧岩浆演化信息。

鸡叫沟和贾公台岩体是党河南山重要的金矿床集中区(李厚民等, 2003; 戴霜等, 2016)。前人对这 2 个岩体进行了野外地质和地球化学分析,揭示鸡叫沟岩体具有碱性系列岩浆岩的特征(张莉莉等, 2013),贾公台岩体具有高 Sr 低 Y 的特征(刘志武等, 2006)。为探讨岩浆来源及其与金矿成矿关系研究提供了重要证据。然而目前对这些岩体的岩浆源区、成因机制和形成时代尚缺少深入的研究。笔者进一步通过对这 2 个岩体的岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究,探讨了其岩石成因、岩浆源区及其动力学机制,为进一步认识岛弧岩浆成因和祁连山岛弧演化过程提供了新的约束。

1 区域地质与岩石学特征

祁连造山带位于秦祁昆造山系中段,同时也是青藏高原的东北部边界。祁连造山带北部与阿拉善地块毗邻,西北侧被阿尔金走滑断裂所截切,西南侧与柴达木地块相接,东南与秦岭造山带相连,是中国西部地区重要的成矿省(谭文娟等,2013)。祁连造山带由南往北依次划分为南祁连、中祁连和北祁连构造带 3 个大地构造单元(图 1)(冯益民等,1995)。北祁连造山带具有典型的沟-弧-盆体系,发育早古生代蛇绿岩、高压变质岩和与俯冲碰撞相关的火山岩、侵入岩等(Xia et al., 2003; Song et al., 2013);中祁连构造带主要由前寒武纪基底、早古生代岩浆岩和晚古生代—中生代沉积地层组成(冯益民等, 1996);南祁连则主要由原划“志留纪”巴龙贡噶尔组及其上的晚古生代—中生代地层组成,但新的研究表明部分原“志留纪”巴龙贡噶尔组可能为南华纪和寒武—奥陶纪沉积地层(Li et al., 2019)。

中祁连构造带西段早古生代岩浆作用非常发育,主要出露于西段的野马南山一带。前人对中酸性侵入岩进行了许多研究报道,揭示其形成时代主要介于 525~410 Ma,记录了洋壳俯冲、弧后裂谷或碰撞后板片断离(465~440 Ma)、地壳加厚和后造山伸展(415 Ma)等不同构造演化阶段花岗质岩浆成因过程(Wang et al., 2017)。中祁连构造带西段党河南山地区的早古生代岩浆岩主要由中基性弧火山岩和中酸性侵入体构成(赵虹等, 2004; 刘志武等, 2007; 张莉莉等, 2013; 罗志文等, 2015; Wang et al., 2017; 李五福等, 2019; 计波等, 2019; Zhao et al., 2020; 郑英等, 2017)。火山岩由约 475 Ma 的高钾-钾玄质火山岩、高钙玻安岩、OIB 和 MORB 组成的弧后盆地火山岩组合(Zhao et al., 2020)。中酸性侵入体主要分布于西部的清水沟—扎子沟和东部的黑刺沟—鸡叫沟一带。该地区是重要的加里东期金-铜-铅成矿带(张翔等, 2015)。笔者主要以该带东部的鸡叫沟杂岩体和贾公台岩体为研究对象。

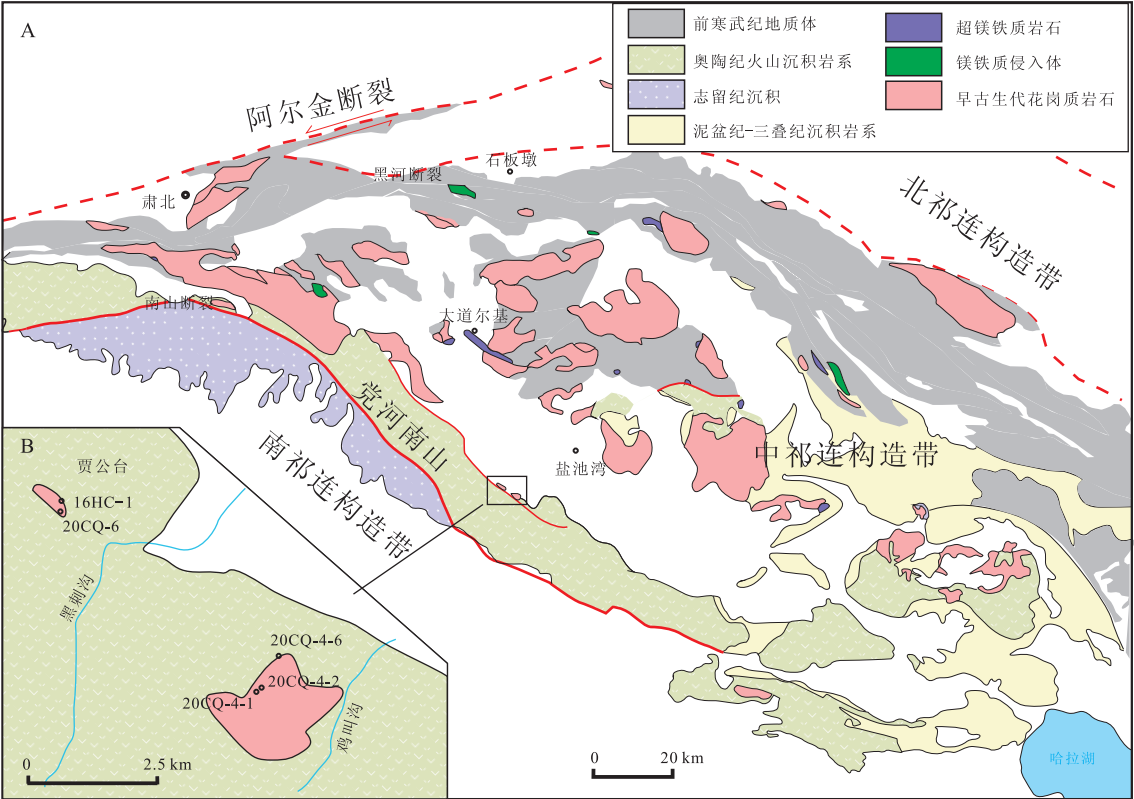


图 1 (A)中祁连西段及(B)黑刺沟地区地质简图(据 Wang et al., 2017 修改)

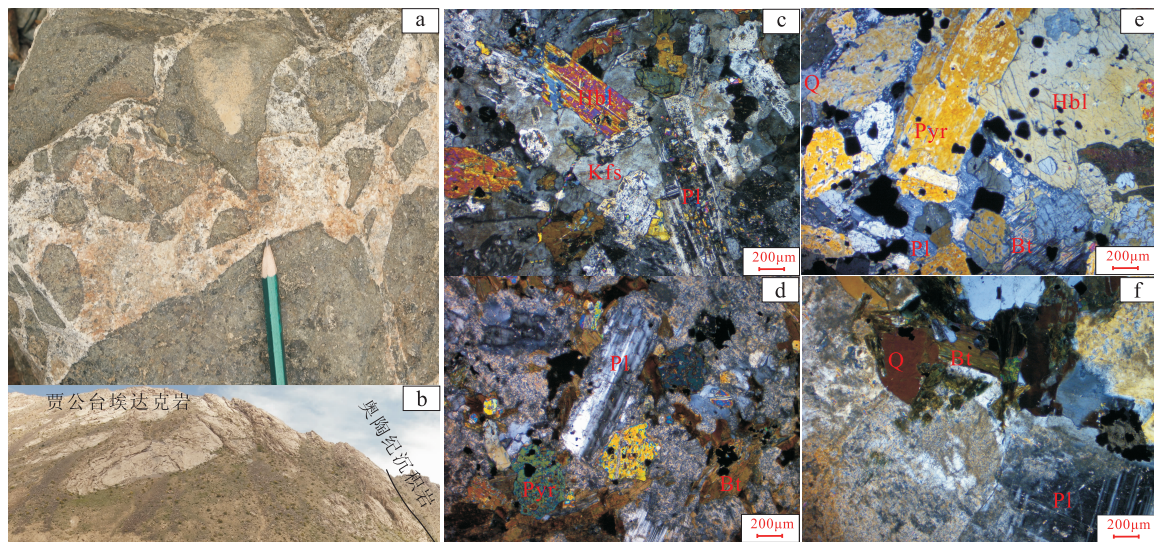
Fig. 1 (A)Simplified geological map of the western part of the Central Qilian belt and (B)Heicigou area

鸡叫沟杂岩体位于黑刺沟南侧,侵位于由灰、灰绿色硬砂岩、长石砂岩、长石质硬砂岩及灰绿、暗灰绿、黑色板岩与砾岩夹层组成的下奥陶统盐池湾组沉积地层组成(图 1B),出露面积约 1.8 km^2 ,主要由角闪辉石岩、辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩及石英二长岩构成的复式岩体。其中,以闪长岩和石英二长闪长岩为主(甘肃省地质局区测二队,1969—1973;刘志武等,2006;张莉莉等,2013)。张莉莉等(2013)将该岩体划分为 4 期岩浆侵入体。第一期以角闪辉石岩、含透辉石正长闪长岩为主;第二期主要为中粗粒二长闪长岩,呈网脉状穿插切割角闪辉石岩,具有浑圆状暗色基性包体(图 2a);第三期以黑云二长花岗岩为主,与二长闪长岩呈侵入接触关系;第四期为肉红色细粒二长花岗岩,主要呈小岩脉状穿插于二长闪长岩和辉石闪长岩中。

二长闪长岩新鲜面呈浅灰色(20CQ-4-1,图 2c),为中-粗粒结构,块状构造,主要矿物为斜长石(45%)、角闪石(25%)、钾长石(约 15%)、黑云母(<5%)和石英(约 5%~10%)。斜长石为半自形板状,粒径约 $0.02 \sim 0.8 \text{ mm}$,普遍发生绿帘石化;钾长石为他形充填于斜长石粒间,粒径为 $0.1 \sim 0.4 \text{ mm}$;角闪石粒径为 $0.02 \sim 0.6 \text{ mm}$,黑云母粒径为 $0.02 \sim 0.2 \text{ mm}$ 。辉长岩(20CQ-4-2,图 2d)呈浅灰黑色,中粗粒辉长结构,块状构造,主要矿物为

辉石(含量约 35%,粒径为 $0.1 \sim 0.8 \text{ mm}$)、斜长石(含量约 40%,粒径为 $0.2 \sim 0.8 \text{ mm}$)、黑云母(20%)。斜长石呈半自形或其他形颗粒,斜长石均发生严重的绿帘石化。副矿物主要为辉石出溶的钛铁矿及磁铁矿等不透明矿物。角闪辉石岩为灰黑色(20CQ-4-6;图 2e),中粗粒结构,块状构造。其主要矿物辉石(约 40%)较自形,多为浑圆或近四边形、近六边形粒状,粒径为 $0.2 \sim 2 \text{ mm}$,单偏光下基本无色,常发生闪石化、绿泥石化;角闪石(约 30%)粒度较大,粒径为 $1 \sim 3 \text{ mm}$;少量黑云母、斜长石和石英,他形斜长石生长在辉石颗粒之间。

贾公台岩体位于黑刺沟北侧,呈岩株状产出,出露面积约 0.5 km^2 ,侵位于下奥陶统吾力沟群砂岩中(图 1B)。该岩体岩性单一,主要为中粗粒花岗闪长岩(图 2b),有花岗伟晶岩脉、石英闪长玢岩脉以及石英岩脉穿插贯入(刘志武等,2006)。贾公台岩体与贾公台金矿关系十分密切(李厚民等,2003;王宝华,2013)。花岗闪长岩(20CQ-6 和 16HC-1)(图 2f)呈浅肉红色,中粗粒花岗结构,块状构造,主要矿物为斜长石(60%~70%,粒径为 $0.2 \sim 4 \text{ mm}$)、石英(约 20%~25%,粒径为 $0.05 \sim 2 \text{ mm}$),少量钾长石和黑云母,几乎不含角闪石。黑云母较自形,多蚀变为绿泥石;斜长石粒度较大,石英和黑云母多在长石粒间生长。



Hbl. 角闪石;Q. 石英;Ryr. 辉石;Kfs. 钾长石;Pl. 斜长石;Bt. 黑云母

图 2 野外及镜下显微照片(a)鸡叫沟二长闪长岩呈脉状侵入辉长岩,(b)贾公台埃达克质花岗闪长岩,(c)鸡叫沟二长闪长岩,(d)鸡叫沟辉长岩,(e)鸡叫沟角闪辉石岩,(f)贾公台花岗闪长岩

Fig. 2 (a) Monzodiorite intrudes into gabbro as veins in Jijiaogou, (b) adakite of the Jiagongtai pluton, (c) monzodiorite, (d) gabbro, (e) hornblende pyroxenite, (f) granodiorite

2 分析方法

锆石分选采用浮选和电磁方法,在双目镜下选择晶形、透明度较好、无裂隙的颗粒,将锆石置于环氧树脂中,待环氧树脂充分固化后,抛光至锆石核部露出,然后进行锆石阴极发光图像(CL)拍摄。锆石的阴极发光(CL)显微照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石 U-Pb 同位素测试在武汉上谱分析科技有限公司完成。采用的激光剥蚀系统为 GeolasPro, ICP-MS 型号为 Agilent7500a,分析的激光束斑直径 32 μm,采用国际标准锆石 91500 作为外标,PLV 以及 GJ-1 作为内标对同位素分馏进行校正;微量元素含量采用国际标样 NIST610 作为外标,采用²⁹Si 作为内标元素,所得原始数据使用 ICPMS-DataCal 软件(Liu Y. S, 2008)进行数据处理,最后使用 IsoplotR 软件(Vermeesch, 2018)进行年龄计算及谐和图绘制,所得数据结果见表 1。

主量元素、微量元素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,分析结果见表 2、表 3。

其中,主量元素在日本理学 RIX2100 XRF 仪上测定;微量元素和稀土元素是在美国 Perkin Elmer 公司 Elan 6100DRC 型电感耦合等离子质谱(ICP-MS) 仪上测试,样品测试中采用 AVG-1 和 BH-VO-1 国际标样监控。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

本次对鸡叫沟杂岩体中的二长闪长岩(20CQ-4-1)以及贾公台岩体的花岗闪长岩(20CQ-6)样品进行锆石 LA-ICP-MS 测年分析,所得数据结果见表 1。

样品 20CQ-4-1 锆石阴极发光(CL)图像主要呈自形-半自形长柱状或短柱状,粒径 20~100 μm,长宽比介于 2:1~1:1。多数锆石具有明显的振荡环带(图 3A),为岩浆锆石的特征,Th/U 值介于 0.6~1.3。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中位于谐和线之上 16 个测点的加权平均年龄为(467±4.7) Ma (图 3B),代表了二长闪长岩的结晶年龄。

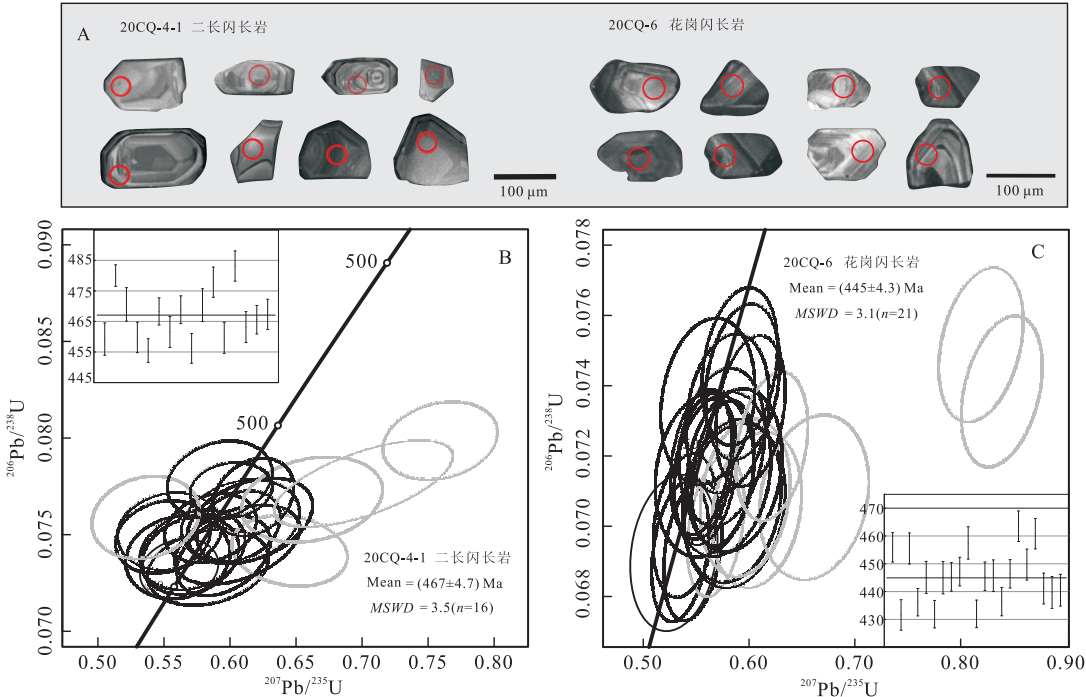


图 3 (A)鸡叫沟杂岩体和贾公台岩体锆石 CL 图像、(B)锆石 U-Pb 年龄谐和图(C)灰色测点不在谐和线上未计入加权平均年龄计算)

Fig. 3 (A)CL images of typical zircons; (B)U-Pb isotopic data and concordia diagrams of 20-CQ-4-1 and (C)samle 20CQ-6 for zircons

表 1 中祁连西段鸡叫沟二长闪长岩(20CQ-4-1)和贾公台花岗岩(20CQ-6)锆石 U-Pb 年龄分析结果表
Tab.1 U-Pb data for zircons of monzodiorite in Jijiaogou and granodiorite in Jiagongtai, western Qilian

测点号	Th		U	Th/U	同位素比值				同位素年龄				谐和度			
	(10 ⁻⁶)				²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	(%)	
20CQ-4-1-01	200	610	0.33	0.058 15	0.001 36	0.642 40	0.015 17	0.079 70	0.000 83	600.03	51.85	503.79	9.39	494.31	4.98	98
20CQ-4-1-02	244	249	0.98	0.055 32	0.001 66	0.560 90	0.016 27	0.073 83	0.000 88	433.38	69.44	452.11	10.59	459.21	5.29	98
20CQ-4-1-03	354	501	0.71	0.068 78	0.001 62	0.759 21	0.017 82	0.079 86	0.000 83	892.28	48.15	573.56	10.29	495.28	4.96	85
20CQ-4-1-04	888	691	1.29	0.056 13	0.001 22	0.601 09	0.012 76	0.077 31	0.000 59	457.45	50.92	477.92	8.10	480.02	3.52	99
20CQ-4-1-05	386	409	0.94	0.063 96	0.002 14	0.700 97	0.027 83	0.077 65	0.000 92	740.44	91.65	539.37	16.62	482.11	5.53	88
20CQ-4-1-06	230	258	0.89	0.058 50	0.001 73	0.615 34	0.019 48	0.075 73	0.000 91	550.04	64.80	486.92	12.25	470.58	5.48	96
20CQ-4-1-07	637	513	1.24	0.055 90	0.001 49	0.570 11	0.015 08	0.073 93	0.000 83	455.60	59.25	458.09	9.76	459.77	4.98	99
20CQ-4-1-08	250	276	0.91	0.053 61	0.001 60	0.554 70	0.016 22	0.075 18	0.000 83	353.76	66.66	448.07	10.60	467.31	4.96	95
20CQ-4-1-09	284	256	1.11	0.051 30	0.001 62	0.536 37	0.016 75	0.075 91	0.000 88	253.77	74.06	436.03	11.07	471.66	5.26	92
20CQ-4-1-10	599	680	0.88	0.058 18	0.001 23	0.606 50	0.013 04	0.075 44	0.000 76	600.03	46.29	481.35	8.25	468.82	4.54	97
20CQ-4-1-11	262	264	1.00	0.063 63	0.001 99	0.645 14	0.017 94	0.074 18	0.000 76	727.79	33.18	505.48	11.08	461.31	4.55	90
20CQ-4-1-12	178	214	0.83	0.057 56	0.001 81	0.583 56	0.018 77	0.073 33	0.000 81	522.26	73.14	466.75	12.04	456.17	4.86	97
20CQ-4-1-13	689	586	1.18	0.055 30	0.001 21	0.561 49	0.012 12	0.073 21	0.000 64	433.38	48.14	452.49	7.89	455.48	3.86	99
20CQ-4-1-14	255	271	0.94	0.058 08	0.001 74	0.608 31	0.018 30	0.075 69	0.000 89	531.52	64.80	482.49	11.56	470.36	5.35	97
20CQ-4-1-15	810	742	1.09	0.058 13	0.001 20	0.617 88	0.012 62	0.076 94	0.000 83	600.03	50.92	488.52	7.93	477.85	4.95	97
20CQ-4-1-16	499	449	1.11	0.058 12	0.001 33	0.595 20	0.014 57	0.073 90	0.000 85	600.03	49.99	474.18	9.28	459.64	5.09	96
20CQ-4-1-18	259	316	0.82	0.055 26	0.001 52	0.592 36	0.016 39	0.077 83	0.000 83	433.38	61.11	472.37	10.46	483.15	4.94	92
20CQ-4-1-19	215	210	1.03	0.062 51	0.002 04	0.662 31	0.021 94	0.076 83	0.000 91	700.01	70.36	516.02	13.40	477.15	5.44	96
20CQ-4-1-20	488	460	1.06	0.058 72	0.001 73	0.605 66	0.019 47	0.074 49	0.000 84	566.70	106.47	480.82	12.31	463.15	5.06	95
20CQ-4-1-21	372	326	1.14	0.053 26	0.001 44	0.549 27	0.014 79	0.074 89	0.000 78	338.95	61.11	444.52	9.70	465.56	4.66	99
20CQ-4-1-22	333	361	0.92	0.056 21	0.001 35	0.585 57	0.014 30	0.075 35	0.000 74	461.16	21.30	468.04	9.16	468.28	4.44	76
20CQ-4-1-23	233	300	0.78	0.077 15	0.002 12	0.839 71	0.025 73	0.078 66	0.001 32	1125.00	27.78	618.99	14.21	488.13	7.91	99
20CQ-4-1-24	406	319	1.27	0.055 66	0.001 56	0.571 51	0.016 38	0.074 22	0.000 84	438.94	62.96	458.99	10.59	461.54	5.06	68
20CQ-6-01	451	457	0.99	0.059 50	0.001 33	0.601 21	0.013 46	0.073 28	0.000 88	585.40	47.75	478.00	8.54	455.90	5.29	95
20CQ-6-02	28.8	81.7	0.36	0.055 40	0.001 79	0.528 94	0.016 87	0.069 24	0.000 91	428.20	70.05	431.10	11.20	431.60	5.48	99
20CQ-6-03	27.0	77.5	0.35	0.057 40	0.001 62	0.579 46	0.016 22	0.073 21	0.000 93	506.60	61.29	464.10	10.43	455.50	5.57	98
20CQ-6-04	8.87	282	0.03	0.058 91	0.001 14	0.568 65	0.011 12	0.070 00	0.000 82	563.80	41.54	457.10	7.20	436.20	4.94	95

续表 1

测点号	Th/U		同位素比值						同位素年龄						谐和度 (%)	
	Th (10 ⁻⁶)	U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ		
20CQ-6-05	8.63	274.	0.03	0.058 25	0.001 95	0.574 20	0.019 02	0.071 49	0.000 96	538.40	72.34	460.70	12.27	445.10	5.75	97
20CQ-6-06	170	1203	0.14	0.055 97	0.001 16	0.534 82	0.011 14	0.069 29	0.000 82	451.00	45.00	435.00	7.37	431.90	4.93	99
20CQ-6-07	67.3	691	0.10	0.056 61	0.001 99	0.557 82	0.019 32	0.071 47	0.000 96	475.60	76.44	450.10	12.59	445.00	5.80	99
20CQ-6-08	26.7	76.8	0.35	0.058 34	0.001 23	0.575 31	0.012 20	0.071 51	0.000 85	542.70	45.44	461.40	7.87	445.30	5.11	97
20CQ-6-09	27.6	80.3	0.34	0.055 97	0.001 19	0.554 34	0.011 90	0.071 84	0.000 85	450.60	46.50	447.80	7.77	447.20	5.13	99
20CQ-6-11	19.5	379	0.05	0.082 36	0.001 54	0.838 51	0.015 82	0.073 84	0.000 88	1254.10	36.09	618.30	8.74	459.20	5.27	74
20CQ-6-12	63.3	477	0.13	0.061 04	0.001 82	0.596 01	0.017 57	0.070 81	0.000 92	640.70	62.79	474.70	11.18	441.10	5.53	93
20CQ-6-13	229	1150	0.20	0.060 24	0.002 05	0.586 33	0.019 64	0.070 59	0.000 96	612.20	71.75	468.50	12.57	439.70	5.75	94
20CQ-6-14	29.3	296	0.10	0.067 71	0.002 20	0.661 15	0.021 19	0.070 82	0.000 96	859.50	66.15	515.30	12.95	441.10	5.79	86
20CQ-6-15	239	993	0.24	0.055 30	0.001 82	0.560 79	0.018 25	0.073 55	0.000 97	424.10	71.36	452.00	11.87	457.50	5.81	99
20CQ-6-16	27.6	78.7	0.35	0.059 86	0.001 99	0.583 73	0.019 14	0.070 73	0.000 95	598.40	70.36	466.90	12.27	440.50	5.71	94
20CQ-6-17	27.0	75.8	0.36	0.057 20	0.001 19	0.546 66	0.011 48	0.069 31	0.000 82	498.90	45.78	442.80	7.53	432.00	4.95	98
20CQ-6-18	28.8	295	0.10	0.079 04	0.001 58	0.819 05	0.016 43	0.075 16	0.000 90	1173.10	39.05	607.50	9.17	467.20	5.41	77
20CQ-6-19	215	960	0.22	0.056 67	0.001 23	0.558 98	0.012 17	0.071 55	0.000 85	477.80	47.60	450.90	7.93	445.50	5.13	99
20CQ-6-20	145	923	0.16	0.062 49	0.001 82	0.607 21	0.017 46	0.070 47	0.000 91	691.00	60.76	481.80	11.03	439.00	5.48	91
20CQ-6-21	0.20	0.18	1.11	0.062 34	0.001 40	0.621 25	0.013 99	0.072 28	0.000 87	685.80	47.29	490.60	8.76	449.90	5.25	92
20CQ-6-22	267	994	0.27	0.204 65	0.008 41	2.268 59	0.087 11	0.080 40	0.001 60	2863.60	65.36	1202.60	27.06	498.50	9.57	41
20CQ-6-23	15.7	418	0.04	0.059 35	0.001 90	0.585 83	0.018 55	0.071 59	0.000 95	580.10	68.13	468.20	11.88	445.70	5.69	95
20CQ-6-24	26.8	76.9	0.35	0.055 86	0.001 30	0.539 39	0.012 53	0.070 03	0.000 84	446.50	50.53	438.00	8.27	436.40	5.09	99
20CQ-6-25	27.8	79.2	0.35	0.056 39	0.001 17	0.557 40	0.011 66	0.071 70	0.000 85	467.00	45.74	449.80	7.60	446.40	5.10	99
20CQ-6-26	24.1	275	0.09	0.057 55	0.001 43	0.591 46	0.014 71	0.074 54	0.000 92	512.30	54.21	471.80	9.39	463.50	5.49	98
20CQ-6-27	13.4	295	0.05	0.057 67	0.001 69	0.574 53	0.016 69	0.072 25	0.000 92	517.10	63.33	460.90	10.76	449.70	5.56	98
20CQ-6-28	40.6	312	0.13	0.056 65	0.001 57	0.513 13	0.014 09	0.065 70	0.000 83	477.10	60.07	420.60	9.45	410.20	5.00	98
20CQ-6-29	28.0	287	0.10	0.058 12	0.001 43	0.593 78	0.014 54	0.074 11	0.000 91	533.60	53.33	473.30	9.27	460.80	5.44	97
20CQ-6-30	207	953	0.22	0.091 17	0.002 85	0.905 90	0.027 68	0.072 07	0.001 01	1450.00	58.48	654.90	14.75	448.60	6.08	68

表 2 中祁连西段鸡叫沟杂岩体的主量元素(10^{-6})和微量元素(10^{-6})组成表
Tab. 2 Composition of major(%) and trace(10^{-6}) elements of samples in Jijiaogou pluton, western Central Qilian

样品号	20CQ - 4 - 1(2)				20CQ - 4 - 1(3)				20CQ - 4 - 1(4)				GPIJ - 20				GPIJ - 25				DB63				DB64				DB329				DB480				DB323				GPIJ - 1				20CQ - 4 - 2(1)				20CQ - 4 - 2(2)				20CQ - 4 - 2(3)				20CQ - 4 - 2(4)				20CQ - 4 - 6(1)				20CQ - 4 - 6(2)				20CQ - 4 - 6(3)			
	二长闪长岩																				辉长岩																				角闪辉石岩																															
岩石类型																																																																								
SiO ₂	57.14	59.35	58.00	58.71	60.35	57.74	53.82	58.46	62.6	51.43	50.88	49.38	47.14	48.75	50.82	41.05	40.31	39.83																																																						
TiO ₂	0.52	0.49	0.51	0.53	0.51	0.7	1.1	0.56	0.4	0.9	1.19	1.06	1.28	1.12	0.90	1.77	2.13	2.16																																																						
Al ₂ O ₃	18.29	17.23	18.05	17.47	17.26	17.05	13.56	16.43	16.49	16.82	15.82	14.77	16.34	15.56	16.25	6.95	11.80	11.54																																																						
Fe ₂ O ₃ T	5.81	5.21	5.70	5.55	4.84	5.78	7.89	8.00	4.66	10.9	10.5	10.65	11.46	10.48	9.25	19.97	15.18	15.67																																																						
MnO	0.12	0.09	0.12	0.11	0.09	0.14	0.21	0.16	0.09	0.19	0.19	0.22	0.20	0.19	0.19	0.23	0.21	0.21																																																						
MgO	1.84	2.26	1.84	2.28	1.94	1.67	5.86	2.28	1.73	4.01	6.4	6.12	5.57	6.18	4.82	10.33	10.34	10.36																																																						
CaO	4.72	4.61	4.55	5.82	4.57	5.03	6.83	4.7	3.18	7.19	9.23	10.08	9.58	9.33	8.66	15.61	10.97	11.34																																																						
Na ₂ O	4.76	4.38	4.60	4.88	5.21	5.21	3.91	4.59	6.1	4.27	2.67	3.23	3.12	3.39	3.70	1.10	2.20	2.16																																																						
K ₂ O	4.83	4.83	4.89	4.58	5.12	2.97	3.62	3.72	4.13	3.09	3.19	2.12	2.51	2.40	2.86	0.95	2.40	2.35																																																						
P ₂ O ₅	0.31	0.29	0.31	0.37	0.38	0.34	0.31	0.36	0.22	0.73	0.68	0.52	0.84	0.75	0.51	0.74	1.61	1.83																																																						
LOI	1.44	1.13	1.28	/	/	/	/	/	/	/	/	/	1.44	1.79	1.70	1.02	2.40	2.34																																																						
TOTAL	99.78	99.87	99.85	/	/	/	/	/	/	/	/	99.59	99.83	99.92	99.66	99.72	99.55	99.79																																																						
Cr	19.9	47.0	19.5	/	/	37.1	168	50.1	47.5	52.8	/	115	72.5	158	108	237	136	130																																																						
Ni	13.3	22.0	13.4	/	/	15.3	134	27.1	14.9	19.3	/	37.7	43.2	86.5	54.5	112	143	139																																																						
Rb	154	135	140	58.5	53.5	98.8	132	105	117	125.9	105	77.8	102	90.8	73.6	26.9	75.3	71.4																																																						
Sr	1280	1120	1095	968	854	491	373	1219	109	1101	1215	1108	1560	1462	1269	501	506	471																																																						
Y	24.3	19.6	25.8	23	20.6	27.7	45.5	20.8	14.8	19.6	28.1	29.5	29.2	28.0	27.2	28.9	49.4	51.7																																																						
Zr	258	217	249	222	239	83.5	101	123	68.9	67.5	147	130	63.2	79.7	111	112	141	162																																																						
Nb	16.7	11.9	15.5	14.1	13.3	11.7	12.4	15.3	10.2	12.1	12.1	9.24	10.0	9.84	9.89	5.92	20.9	22.0																																																						
Ba	1811	1942	1862	1542	1407	3581	4486	1283	1853	1933	1325	912	1716	1634	1686	668	981	849																																																						
La	73.6	85.6	66.0	58.4	53.2	101	107	67.3	56.9	82.5	68.4	50.2	67.0	67.9	61.6	35.7	83.6	90.3																																																						
Ce	141	152	129	122	110	183	194	135	108	175	145	112	148	146	129	92.9	208	224																																																						
Pr	15.0	15.2	14.1	15.1	13.5	19.7	21.7	15.3	11.9	21	17.9	13.8	18.0	17.6	15.2	13.1	27.1	28.8																																																						

注：样品号为 GPJ1 - n 的数据引自文献(张莉莉等, 2013)；样品号以 DB 为起始的数据引自文献(刘志武等, 2006)。

表 3 中祁连西段贾公台岩体岩石的主量元素(%)和微量元素(10⁻⁶)组成表
Tab. 3 Composition of major and trace elements of samples in Jiagongtai pluton, western Central Qilian

样品号	DB123	DB131	DB135	DB140	DB492	16HC-1(1)	16HC-1(2)	16HC-1(3)	16HC-1(4)	16HC-1(5)	16HC-1(6)	20CQ-6(1)
岩石类型	花岗岩长岩											
SiO ₂	63.1	63.86	64.64	64.08	62.9	64.78	64.09	65.57	65.01	65.95	64.27	63.69
TiO ₂	0.44	0.4	0.76	0.1	0.5	0.38	0.36	0.64	0.38	0.39	0.42	0.57
Al ₂ O ₃	17.33	16.7	15.09	17.12	16.63	17.29	16.26	14.48	17.28	16.65	17.00	14.61
Fe ₂ O ₃ T	4.33	5.33	6.44	5.17	6.44	3.43	3.27	5.33	3.54	3.80	3.72	4.59
MnO	0.09	0.09	0.1	0.08	0.08	0.05	0.05	0.07	0.05	0.04	0.06	0.06
MgO	1.25	1.57	2	1.42	1.79	1.45	1.34	2.10	1.46	1.47	1.53	2.18
CaO	3.64	4.05	3.85	3.62	3.57	3.74	4.02	2.73	3.61	3.71	3.96	4.11
Na ₂ O	5.33	4.73	4.1	4.58	4.88	5.00	4.72	4.30	4.98	4.61	4.95	4.17
K ₂ O	2.05	1.65	1.78	1.64	1.44	1.17	1.71	1.33	1.19	1.02	1.33	1.44
P ₂ O ₅	0.14	0.21	0.18	0.11	0.21	0.15	0.14	0.20	0.16	0.16	0.16	0.18
LOI	2.52	1.7	1.49	2.52	2.04	2.10	4.02	3.22	2.15	2.11	2.71	4.10
TOTAL	/	/	/	/	/	99.54	99.98	99.97	99.81	99.91	100.11	99.70
Rb	52.0	35.3	68.5	36.4	34.1	9.14	14.3	15.8	8.85	5.78	9.11	34.7
Sr	763	742.	847	763	584	872	649	464	775	715	687	416
Y	4.10	5.03	8.49	4.21	5.18	3.49	4.35	6.19	3.49	3.66	4.63	5.60
Zr	55.7	65.0	84.1	46.7	74.4	54.2	60.2	79.5	55.8	61.1	60.9	79.8
Nb	3.86	3.84	8.22	3.35	3.25	3.18	3.30	5.25	3.16	3.01	3.62	4.09
Ba	747	954	1476	969	787	866	705	917	826	767	761	590
La	13.6	16.8	20.2	15.0	14.8	16.3	14.7	11.4	12.8	14.7	13.3	12.3
Ce	26.4	33.4	42.1	28.2	29.6	29.3	28.1	24.2	23.8	27.1	26.2	24.1
Pr	3.21	3.53	5.05	3.33	3.20	3.31	3.11	2.80	2.85	3.14	3.02	2.63
Nd	12.8	13.5	18.0	12.4	12.8	12.3	11.8	11.2	10.7	11.9	11.5	11.1
Sm	2.42	1.93	4.89	2.45	2.08	2.12	2.23	2.46	1.90	2.17	2.25	2.31
Eu	0.82	1.10	1.70	1.22	1.10	0.65	0.64	0.74	0.62	0.62	0.67	0.69

续表 3

样品号	DB123	DB131	DB135	DB140	DB492	16HC-1(1)	16HC-1(2)	16HC-1(3)	16HC-1(4)	16HC-1(5)	16HC-1(6)	20CQ-6(1)
岩石类型	花岗岩长岩											
Gd	2.02	1.81	3.70	2.07	2.05	1.51	1.67	2.01	1.40	1.58	1.73	1.91
Tb	0.24	0.28	0.39	0.23	0.26	0.16	0.19	0.26	0.16	0.18	0.20	0.24
Dy	0.72	1.24	1.66	0.95	1.35	0.79	0.95	1.32	0.78	0.83	1.01	1.18
Ho	0.17	0.24	0.34	0.13	0.20	0.13	0.16	0.22	0.13	0.14	0.17	0.20
Er	0.33	0.36	0.83	0.46	0.38	0.33	0.41	0.58	0.33	0.35	0.42	0.52
Tm	0.05	0.07	0.13	0.04	0.05	0.043	0.055	0.079	0.043	0.047	0.058	0.072
Yb	0.24	0.37	0.64	0.21	0.45	0.27	0.35	0.50	0.28	0.29	0.37	0.44
Lu	0.05	0.06	0.10	0.04	0.07	0.041	0.050	0.073	0.041	0.044	0.050	0.067
Hf	2.35	2.59	2.94	1.84	2.94	1.51	1.75	2.35	1.53	1.81	1.77	2.24
Ta	0.22	0.27	0.34	0.30	0.27	0.21	0.24	0.29	0.20	0.23	0.24	0.31
Pb	/	/	/	/	/	14.1	14.2	13.7	10.8	11.6	21.9	15.7
Th	5.04	6.20	6.70	4.69	5.14	4.77	4.93	4.35	4.13	4.69	4.69	4.07
U	1.06	1.03	1.64	0.85	1.03	0.77	1.21	1.64	0.81	0.51	1.26	1.20
Na ₂ O/K ₂ O	2.60	2.87	2.30	2.79	3.39	4.27	2.76	3.23	4.18	4.52	3.72	2.90
Mg [#]	40.2	40.7	42.0	39.0	39.3	49.6	48.8	47.9	49.0	47.4	48.9	52.5
Sr/Y	186	148	100	181	113	250	149	75	222	195	148	74
La/Yb	56.8	45.3	31.5	71.2	32.9	60.3	42.4	22.7	45.5	49.9	36.3	27.9
Gd/Yb	8.42	4.89	5.78	9.86	4.56	5.59	4.85	4.01	4.99	5.35	4.72	4.32
Sr/Nd	59.6	54.9	47.1	61.4	45.6	71.1	55.0	41.5	72.7	60.1	59.5	37.4
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	/	/	0.707 2	0.706 6	0.707 1	/	/	/	/	/	/	/

注:样品号以 DB 为起始的数据引自文献(刘志武等, 2006)。

样品 20CQ-6 锆石阴极发光(CL)图像显示锆石主要为短柱状、粒状,长宽比主要为 1:1~2:1,多数具有岩浆锆石特征的振荡环带(图 3A)。Th/U 值介于 0.03~1.1。锆石中多数年龄存在不谐和。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中位于谐和线之上 21 个测点的加权平均年龄为 (445 ± 4.3) Ma (图 3C),代表了花岗闪长岩的结晶年龄。

3.2 岩石地球化学特征

在 TAS 图解中,鸡叫沟杂岩体角闪辉石岩主要为橄榄辉长岩-似长辉长岩。辉长岩为二长辉长岩和二长闪长岩,二长闪长岩主体为二长岩,它们具有富 K、富 Na 的特征,均属于碱性系列(图 4A),并且具有钾玄岩特征(图 4B)。样品 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值介于 0.84~1.75,主体上大于 1(图 4C)。角闪辉石岩的 SiO_2 含量介于 40%~41%, $\text{Mg}^\#$ 介于 55~61;辉长岩的 SiO_2 含量介于 47%~51%, MgO 介于 7%~10%, $\text{Mg}^\#$ 主体介于 53~59(表 2)。在微量元素原始地幔标准化图中,鸡叫沟岩体中的不同岩石类型具有相似的微量元素配分型式(图 5A),均富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE);与相邻元素相比,Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素具有不同程度的亏损。样品主体 Sr 含量大于 400×10^{-6} ,但不同岩石类型 Th、U 和 Sr 含量具有不同程度的变化。鸡叫沟岩体中不同类型岩性的稀土元素配分型式(图 5B)变化规律较为一致,为右倾平行曲线,轻、重稀土元素分馏明显,稀土元素总量相对富集,从角闪辉石岩到辉长岩、二长闪长岩稀土元素含量基本呈逐渐降低的趋势,均显示微弱的负 Eu 异常。

贾公台花岗闪长岩属于中钾钙碱性系列(图 4B), SiO_2 含量介于 62.9%~66.0%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值大于 2.5, $\text{Mg}^\#$ 介于 40~53。与鸡叫沟岩体相比,贾公台花岗闪长岩具有低 Rb、Th、U 和低稀土元素含量,Sr 具有正异常,Zr 和 Hf 亏损较弱且 Nb 和 Ta 亏损更明显(图 6A)。样品具有高 Sr($>400 \times 10^{-6}$)、低 Y($<7 \times 10^{-6}$)的特征,高 Sr/Y 值(>70)和 La/Yb 值(>22)显示埃达克岩特征(图 4E、图 F)(Defant et al., 1990)。在球粒陨石标准化稀土元素配分图(图 6B)中,贾公台花岗闪长岩显示为轻稀土元素富集型右倾型曲线,稀土元素总量较低,轻稀土元素略富集,重稀土元素亏损明显,基本无 Eu 异常。

4 讨论

4.1 岩石成因

4.1.1 鸡叫沟杂岩体

鸡叫沟杂岩体中不同岩石类型均具有 Nb、Ta、Zr、Hf 不同程度的亏损,显示了岛弧岩浆的特征。由于部分熔融可以导致岩浆中不相容元素含量降低,轻重稀土元素分异降低,而结晶分异作用可以导致岩浆中的不相容元素含量增加,并且轻重稀土元素比值变化不大。从角闪辉石岩到辉长岩、二长闪长岩稀土元素含量逐渐降低(图 5A),指示它们不应该是同一个岩浆源区结晶分异的产物。另外,二长闪长岩的 La/Sm 值大于角闪辉石岩和辉长岩的比值(图 7A),说明二长闪长岩也不是角闪辉石岩或辉长岩的熔融产物。因此,这 3 种岩石类型不是来自于一个统一的岩浆源区。另外,辉长岩和二长闪长岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值不随着 SiO_2 含量升高,说明地壳混染作用不明显(表 3)。角闪辉石岩和辉长岩具有相似的 $\text{Mg}^\#$ 值(50~60),并且均低于地幔熔融平衡熔体的 $\text{Mg}^\#$ 值(65~75)、堆晶岩的 $\text{Mg}^\#$ 值(>85)(Ulmer, 2001; Kelemen et al., 2014)以及角闪岩熔融的残留体和熔体的 $\text{Mg}^\#$ 值(>61)(Wolf et al., 1994)。鸡叫沟杂岩体不同类型岩性内部的 Al_2O_3 、 $\text{Mg}^\#$ 、Sr 和 Nb 含量随着 SiO_2 值变化不明显(表 2)(图 4D、图 7B、图 7C),说明岩浆结晶分异作用不强,主要反映了源区地球化学特征。

弧岩浆微量元素特征多反映了深部地幔楔初始熔融的特征(Grove et al., 2019)。与高 Mg 地幔平衡熔体相比,这种低 Si、低 Mg 和富 K LILE 和 LREE 碱性岩浆特征可能反映了弧下地幔受到了板片熔/流体的强烈改造作用。角闪辉石岩样品具有高 Nb 含量($21 \times 10^{-6} \sim 22 \times 10^{-6}$)指示俯冲板片深部熔体的加入(Hastie et al., 2011)。辉长岩中非常高的 Sr 含量($>1\,000 \times 10^{-6}$)进一步说明岩浆来自于受板片熔体交代的地幔源区(Martin et al., 2005)。大多数二长闪长岩样品具有高 Sr(最高为 $1\,280 \times 10^{-6}$)、Zr(最高为 258×10^{-6})和 Nb(最高为 17×10^{-6})含量及高 Th/Yb 值(最高为 22.7)、Sr/Y 值(最高为 57.1)和 La/Yb 值(最高为 47.2)(表 2)(图 7A、图 7B),指示了源区有富锆石和金红石俯冲沉积物的加入(Kay et al., 1990)。鸡叫沟岩体中

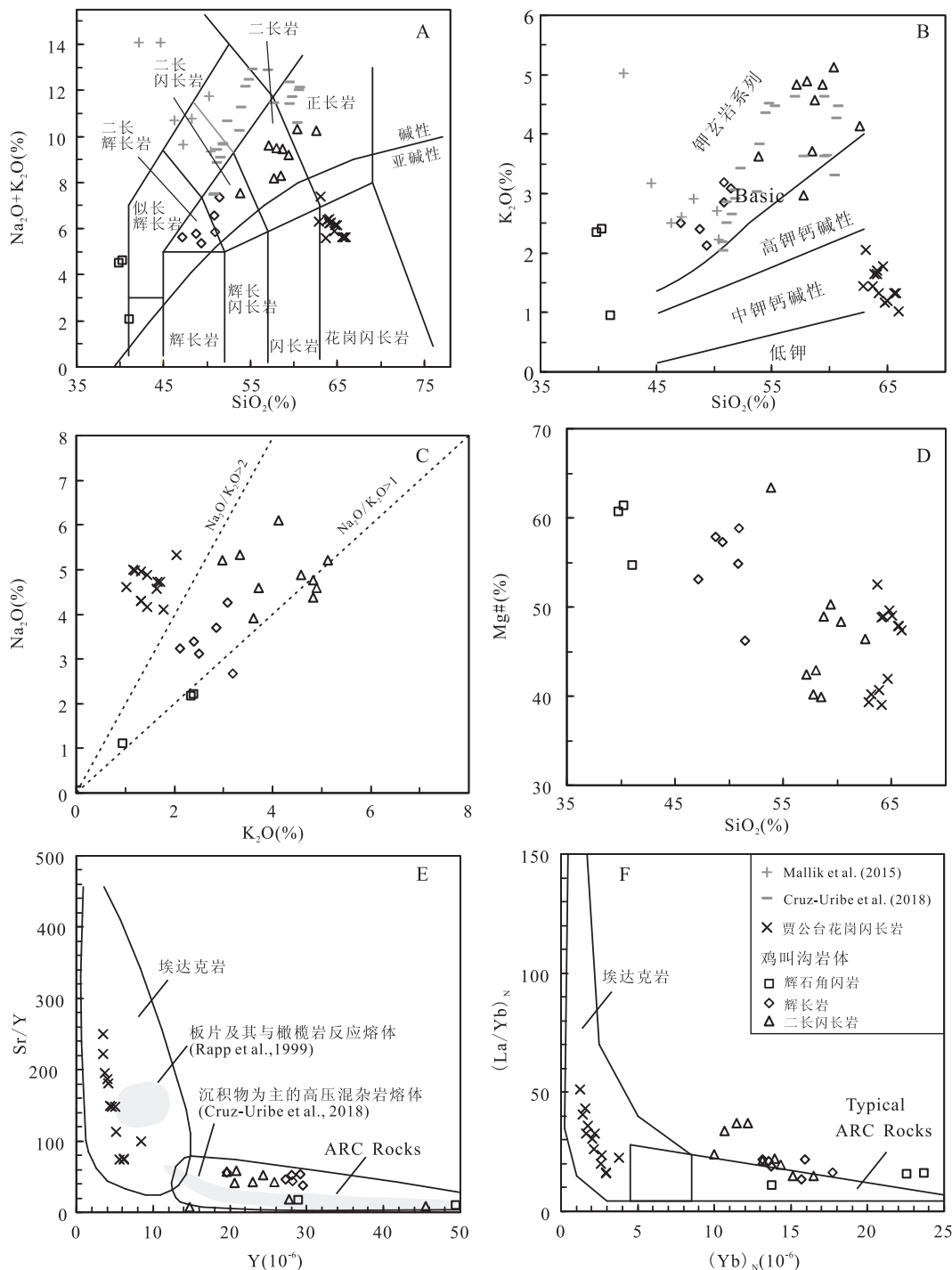


图 4 元素变化相关图解:(A) TAS 图解 (Le Bas et al., 1986), 碱性与亚碱性系列的分界线见文献 (McDonald and Katsura, 1964), (B) SiO_2 - K_2O 图解 (Gill, 1981), (C) K_2O - Na_2O 图解 (Peccherillo and Taylor, 1976), (D) SiO_2 - $\text{Mg}^\#$ 图解, (E) Sr/Y - Y 图解 [Defant and Drummond, 1990], 沉积物-地幔混合熔体据文献 (Mallik et al., 2015), 弧下地幔楔沉积为主的混杂岩熔体据文献 (Cruz-Uribe et al., 2018) 板片及其与橄榄岩反应熔融熔体据文献 (Rapp et al., 1999), (F) $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - Yb_N 图解 (Defant & Drummond, 1990)

Fig. 4 Diagrams showing the element's change (A) Total alkali versus silica classification diagram, (B) SiO_2 vs K_2O diagram, (C) K_2O vs Na_2O diagram, (D) SiO_2 vs $\text{Mg}^\#$, (E) Sr/Y vs Y and (F) $(\text{La}/\text{Yb})_N$ vs Yb_N

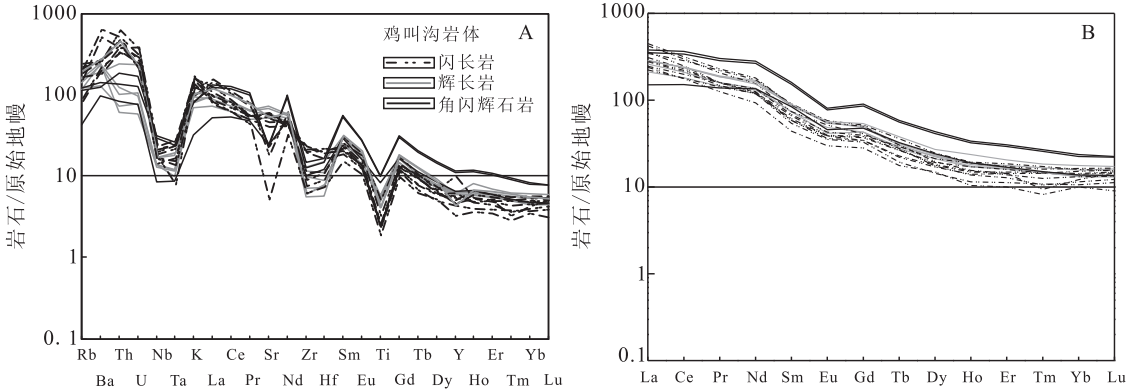


图 5 (A)鸡叫沟岩体微量元素原始地幔标准化图解及(B)球粒陨石标准化稀土配分模式图(标准化值来自文献(Sun et al. , 1989))

Fig. 5 (A)Primitive mantle normalized diagrams and(B) Chondrite-normalized REE distribution patterns showing the rocks of the Jijiaogou pluton. Normalizing values are after the reference (Sun et al. , 1989)

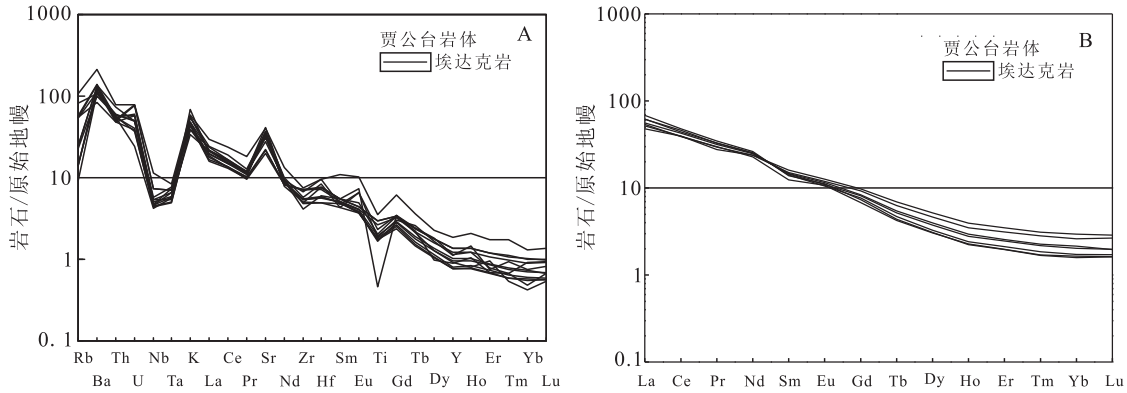


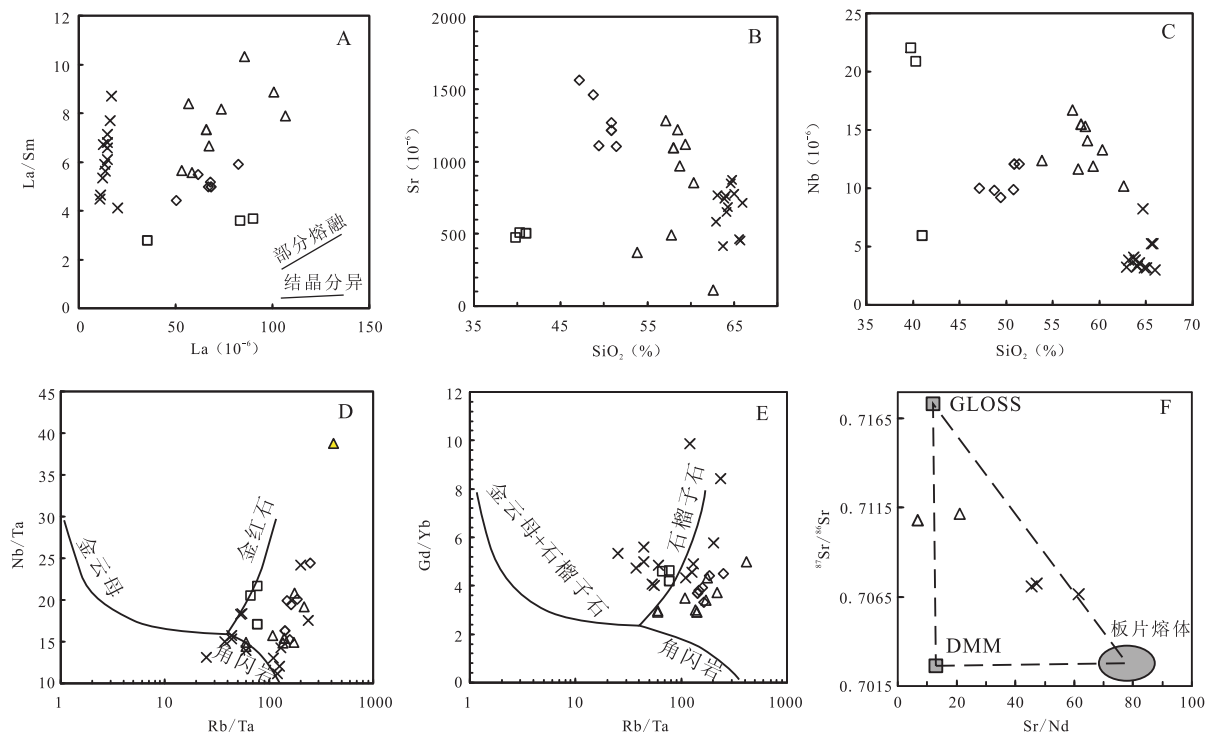
图 6 (A)贾公台岩体微量元素原始地幔标准化图解及(B)球粒陨石标准化稀土配分模式图(标准化值来自文献(Sun et al. , 1989))

Fig. 6 (A)Chondrite-normalized REE distribution patterns showing the rocks of the Jiagongtai pluton and (B) Normalizing values are after the reference (Sun et al. , 1989).

部分样品 Nb/Ta 值介于 20~24,说明存在俯冲物质的深部熔融,源区存在金红石残留,压力大于 2.0 Gpa (Xiong et al. , 2005; Koenig et al. , 2011)。

弧岩浆岩带中的碱性系列岩浆常被解释为地幔楔橄榄岩受板片熔流体交代形成的金云母或者角闪石脉发生部分熔融而形成 (Foley, 1992; Peccerillo, 1999; Schmidt et al. , 2004)。金云母富集 Rb, 它的持续分解将造成岩浆 Rb/Ta 值的降低和 Nb/Ta 值的分异 (Gómez-Tuena et al. , 2018),而岩浆源区金红石残留主导 Nb/Ta 值升高 (Davidson et al. , 2007),石榴子石残留导致 Gd/Yb 值升高 (Cruz-Uribe et al. , 2018)。在图 7D 中,鸡叫沟岩体中的角闪辉石岩和辉长岩总体反映了源区受金红

石控制,而受金云母和角闪岩影响不大。辉石角闪岩和闪长岩具有高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值和低 Sr/Nd 值可以解释为洋壳熔体、亏损地幔和大洋沉积物的混合产物(图 7F)。新的实验岩石学表明,俯冲带中的碱性岩浆系列可以由弧地幔楔底部俯冲物质和橄榄岩形成的混杂岩部分熔融形成 (Cruz-Uribe et al. , 2018)。鸡叫沟闪长岩样品特征与以沉积物为主的高压混杂岩部分熔融的熔体成分一致(图 4A、图 B、图 7A)。因此,鸡叫沟岩体不同岩石类型均具有富 K、富 Na 的碱性岩浆特征,以及富集 Sr、LILE 和 LREE 等特征可能与弧地幔楔底部富碱的俯冲沉积物和地幔橄榄岩混合熔融有关。



A. La/Sm - La 图解; B. Sr - SiO₂ 图解; C. Nb - SiO₂ 图解; D. Nb/Ta - Rb/Ta 图解; E. Gd/Yb - Rb/Ta 图解; F. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr - Sr/Nd 图解, GLOSS. 大洋沉积物(数据来自文献 Plank et al., 1998); DMM. 亏损地幔源区(数据来自 Workmana et al., 2005; 板片熔体数据来自 Walowski et al., 2016)。(图例同图 4, 同位素数据见张莉莉等, 2013; 刘志武等, 2006)

图 7 微量元素及比值变化图解

Fig. 7 The variation diagrams of trace elements and ratios

4.1.2 贾公台岩体

贾公台岩体与鸡叫沟杂岩体的地球化学特征明显不同。贾公台岩体中钾钙碱性花岗闪长岩具有强烈的轻重稀土元素分异和高 Sr/Y 值, 具有高 Si 埃达克岩的典型特征(Martin et al., 2005)。富 Na 埃达克岩通常被揭示为俯冲洋壳高压熔融的产物(~15 kbar)(Defant et al., 1990; Martin et al., 2005); 高 Sr ($416 \times 10^{-6} \sim 872 \times 10^{-6}$) 含量和 Gd/Yb (4.01~5.59) 值、低 Y ($3.49 \times 10^{-6} \sim 6.19 \times 10^{-6}$) 含量说明深部源区熔融存在石榴子石残留(表 3); 高 Sr/Nd (>40) 值说明贾公台埃达克岩可能来自俯冲洋壳的榴辉岩相条件下熔融形成的熔体, 而不是下地壳熔体(Kelemen et al., 2014)。在 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr - Sr/Nd 图中, 说明贾公台岩体中钾钙碱性花岗闪长岩源区具有板片熔体、大洋沉积物和弧下地幔混合的特点, 其中来自板片熔体比重最大(图 7F)。

4.2 党河南山弧岩浆成因意义

安山质弧岩浆的成因是地学界长期关注的热点问题之一。传统观点认为, 俯冲板片的熔流体交代

地幔楔橄榄岩形成钙碱性原始岛弧岩浆(Ryan et al., 2014; Schmidt et al., 2014)或者来自俯冲板片含水硅酸盐熔体交代地幔楔橄榄岩形成不同成分的辉石岩, 而辉石岩在地幔楔浅部发生部分熔融形成更富 Si、富 K 的岩浆(Straub et al., 2011; Kimura et al., 2014)。近年来, 新的研究表明, 在俯冲板片和地幔楔橄榄岩之间俯冲物质(俯冲洋壳、俯冲沉积物、地幔楔橄榄岩、俯冲的上覆地壳)发生物理混合, 可以形成低密度“混杂岩”(Marschall et al., 2012)。该“混杂岩”可以通过底辟作用直接底垫到岩浆弧地壳底部(Castro et al., 2010; Behn et al., 2011; Hacker et al., 2011; Marschall et al., 2012), 或者输送至地幔楔, 并与橄榄岩熔体反应, 发生部分熔融, 形成不同组分的原始岛弧岩浆(Nielsen et al., 2017)。这种模型可以揭示弧岩浆地球化学特征(Codillo et al., 2018)和俯冲带碱性系列岩浆的成因(Cruz-Urbe et al., 2018)。这种来自弧下地幔的高粘度富 Si 岩浆更易于以侵入体的形式就位于地壳中, 而不是以火山岩喷发于地表(Straub et al.,

2011)。党河南山岩浆岩带大道尔基花岗岩质岩体也具有俯冲板片、俯冲沉积物混合并与地幔橄榄岩反应的成因特征(Wang et al., 2017)。笔者对鸡叫沟杂岩体和贾公台岩体的研究均指示了俯冲板片或沉积物深部熔融特征(大于 50~100 km),记录了弧下地幔楔和俯冲物质强烈相互作用的信息。这种俯冲带沉积物和橄榄岩混合形成的“混杂岩”底辟熔融模式可以用来解释该岩浆岩带中具有强烈壳幔相互作用特征的侵入体成因过程。党河南山 470~445 Ma 的埃达克岩和碱性岩浆的确定为进一步解释祁连山弧岩浆演化过程提供了新的研究资料。

近年来,在中祁连南缘东段的拉脊山地区识别出了 534~500 Ma 的洋岛海山和 490~440 Ma 由玻安岩、OIB 和岛弧火山岩组成的洋内弧盆体系(Zhang et al., 2017; Gao et al., 2018a, 2018b; Fu et al., 2018; Song et al., 2014; Wang et al., 2018; Yang et al., 2019a)。宋述光等(2017)认为形成于 525~500Ma 的拉脊山-永靖蛇绿岩为典型的洋底高原型蛇绿岩,是大洋板内地幔柱活动的产物。Fu 等(2019)认为,在拉脊山蛇绿岩带的西沟橄榄岩体中发现由俯冲带型橄榄岩、类 MORB 镁铁质岩和玻安岩构成的一个不完整的弧前壳幔剖面,标志着原特提斯洋的洋内俯冲不会晚于 535 Ma。也有学者认为拉脊山地区经历了从大陆弧裂解到弧后盆地扩张的演化过程,形成弧后玄武岩(约 494 Ma)(Gao et al., 2018b)和具有类似洋岛玄武岩地球化学特征的辉绿岩(约 491 Ma)(付长奎, 2014)、玻安岩(约 483 Ma~460Ma)(Gao et al., 2018a; Wang et al., 2018)和 OIB 型玄武岩(约 468Ma)(Gao et al., 2018b)等一系列岩石。在木里地区,前人报道了 540~520 Ma 辉长岩(Yan et al., 2019)和 453~444 Ma 埃达克质岛弧火山岩(Yang et al., 2019b)。中祁连南缘西段党河南山地区约 470~445 Ma 的埃达克岩和碱性系列岩浆岩与区域上弧背/弧后盆地玄武岩、玄武安山岩,以及代表弧后盆地的 N-MORB、OIB 和玻安岩等岩石的形成时代较为一致(Zhao et al., 2020),可能代表了弧背岩浆演化-弧后盆地伸展过程。这些研究进展表明,中祁连南缘构成一条巨型弧岩浆岩带,它们共同记录了俯冲带不同阶段的演化历史,为揭示弧岩浆演化、地壳生长和祁连山构造演化过程提供了重要信息。

5 结论

(1)鸡叫沟杂岩体由角闪辉石岩、辉长岩、二长闪长岩组成,不同岩石类型均具有富 K、富 Na 的碱性岩浆系列特征,其中的二长闪长岩形成于约 (467 ± 4.7) Ma,其成因与弧地幔楔底部富碱俯冲沉积物和地幔楔橄榄岩混合、部分熔融有关。

(2)贾公台岩体中钾钙碱性花岗闪长岩具有高 Si 埃达克岩的典型特征,形成于约 (445 ± 4.3) Ma,可能来自俯冲洋壳的榴辉岩相熔融。

(3)中祁连党河南山碱性岩浆岩-埃达克岩组合揭示了该地区强烈的弧下地幔楔壳幔相互作用的过程,进一步说明俯冲物质(沉积物、俯冲洋壳)和橄榄岩相互作用是弧岩浆侵入体的形成方式之一。

参考文献(References):

- 戴霜, 刘博, 闫宁云, 等. 南祁连党河南山地区中酸性浅成侵入体和岩脉岩石地球化学特征及其与金矿成矿关系[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(6): 753-765.
- DAI Shuang, LIU Bo, YAN Ningyun, et al. Geochemical Characteristics of Intermediate-acid Hypabyssal Intrusions and Dykes in Danghenanshan Area of South Qilian and Its Implications on the Gold Mineralization [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(6): 753-765.
- 范俊杰, 路彦明, 丛润祥, 等. 祁连山西段党河南山北坡 3 个不同特征的金矿床研究[J]. 地质找矿论丛, 2008, 23(1): 48-53.
- FAN Junjie, LU Yanming, CONG Runxiang, et al. Study on 3 gold deposits varied in characteristics at the north slope of the Danghe Nanshan Mountain in the west Qilian Mountains [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2008, 23(1): 48-53.
- 冯益民, 何世平. 北祁连蛇绿岩的地质地球化学研究[J]. 岩石学报, 1995(S1): 125-140.
- FENG Yimin, HE Shiping. Research for Geology and Geochemistry of Several Ophiolites in the North Qilian Mountains, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1995 (S1): 125-140.
- 冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用 [M]. 北京: 地质出版社. 1996.
- FENG Yimin, HE Shiping. Geotectonics and orogeny of the Qilian Mountains, China [M]. Beijing: Geological Pub-

- lishing House, 1996.
- 付长垒, 闫臻, 郭现轻, 等. 拉脊山口蛇绿混杂岩中辉绿岩的地球化学特征及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1695-1706.
- FU Changlei, YAN Zhen, GUO Xianqing, et al. 2014. Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb age of diabases in the Lajishankou ophiolitic mélange, South Qilian terrane [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30 (6): 1695-1706.
- 计波, 黄博涛, 李向民, 等. 南祁连西北缘肃北红庙沟地区早奥陶世花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 西北地质, 2019, 52(04): 63-75.
- JI Bo, HUANG Botao, LI Xiangmin, et al. Geochronology and Geochemical Characteristics of the Early Ordovician Granite from Hongmiaogou Area in Northwest Margin of South Qilian and Its Geological Significance [J]. Northwestern Geology, 2019, 52(4): 63-75.
- 李厚民, 王崇礼, 刘志武, 等. 南祁连党河南山北坡两个不同特征的金矿床[J]. 矿床地质, 2003, 22(2): 191-198.
- LI Houmin, WANG Chongli, LIU Zhiwu, et al. Two Different Kinds of Gold Deposits on Northern Slope of Danghenanshan Area in South Qilian Mountains [J]. Mineral Deposits, 2003, 22(2): 191-198.
- 李五福, 张新远, 王春涛, 等. 祁连山哈拉湖地区奥陶纪岛弧火山岩及其构造意义[J]. 地质通报, 2019, 38(8): 1287-1296.
- LI Wufu, ZHANG Xinyuan, WANG Chuntao, et al. Ordovician island arc volcanic rocks in Halahu area of Qilian Mountain and their tectonic significance [J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(8): 1287-1296.
- 刘博, 戴霜, 张翔, 等. 南祁连党河南山地区加里东期碰撞后的地壳伸展: 来自煌斑岩的证据[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2016, 52(2): 153-160.
- LIU Bo, DAI Shuang, ZHANG Xiang, et al. Post-caledonian collisional extension in the crust of the Danghe' nanshan area, south Qilian Mountains: evidence from the geochemistry of lamprophyres [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2016, 52(2): 153-160.
- 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): 545-554.
- LIU Zhiwu, WANG Chongli, SHI Xiaohu. Granitoids Characteristics and Tectonic Setting of Danghenanshan Area in South Qilian Mountains [J]. Geoscience, 2006, 20 (4): 545-554.
- 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): 64-73.
- LIU Zhiwu, WANG Chongli. Granitoid geochemistry and gold-copper mineralization in the Danghe Nanshan area, Southern Qilian Mountains [J]. Geology and Exploration, 2007, 43(1): 64-73.
- 路彦明, 范俊杰, 赵新峰, 等. 甘肃黑刺沟金矿床地质特征及类型归属[J]. 黄金地质, 2004, 10(3): 1-6.
- LU Yanming, FAN Junjie, ZHAO Xinfeng, et al. Geological features and types of the Heicigou gold deposit, Gansu [J]. Gold Geology, 2004, 10(3): 1-6.
- 罗志文, 张志诚, 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岩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.
- 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.
- 谭文娟, 杨合群, 姜寒冰, 等. 祁连成矿省成矿系列概论[J]. 地质科技情报, 2013, 32(3): 135-146.
- TAN Wenjuan, YANG Hequn, JIANG Hanbing, et al. Introduction on Metallogenic Series of Qilian Metallogenic Province [J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(3): 135-146.
- 王宝华. 甘肃党河南山贾公台金矿成矿模式探讨[J]. 甘肃地质, 2013, 22(2): 50-55.
- WANG Baohua. Geological characteristics of Jiagongtai gold deposit in Subei County of Gansu Province [J]. Gansu Geology, 2013, 22(2): 50-55.
- 王强, 郝露露, 张修政, 等. 汇聚板块边缘的埃达克质岩: 成分和成因[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(12): 1845-1873.
- WANG Qiang, HAO Lulu, ZHANG Xiuzheng, et al. Adakitic rocks at convergent plate boundaries: Compositions and petrogenesis [J]. Science China: Earth Sciences, 2020, 50(12): 1845-1873.
- 吴才来, 杨经绥, 杨宏仪, 等. 北祁连东部两类 I 型花岗岩定年及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2004, 20 (3): 425-432.
- WU Cailai, YANG Jingsui, YANG Hongyi, et al. Dating of two types of granite from north Qilian, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20 (3): 425-432.
- 夏林圻, 李向民, 余吉远, 等. 祁连山新元古代中一晚期至早古生代火山作用与构造演化[J]. 中国地质, 2016, 43 (04): 1087-1138.
- XIA Linqi, LI Xiangmin, YU Jiyan, et al. Mid-Late Neo-

- proterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain [J]. *Geology in China*, 2016, 43(04): 1087-1138.
- 张建新, 于胜尧, 李云帅, 等. 原特提斯洋的俯冲、增生及闭合: 阿尔金-祁连-柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用 [J]. *岩石学报*, 2015, 31(12): 3531-3554.
- ZHANG Jianxin, YU Shengyao, LI Yunshuai, et al. Subduction, accretion and closure of Proto-Tethyan Ocean: Early Paleozoic accretion/collision orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam orogenic system [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(12): 3531-3554.
- 张莉莉, 戴霜, 张翔, 等. 南祁连党河南山地区鸡叫沟复式岩体岩石地球化学特征及构造环境 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(6): 733-740.
- ZHANG Lili, DAI Shuang, ZHANG Xiang, et al. Litho-geochemistry of Jijiaogou intrusive complex in the Danghenanshan area, South Qilian Mountain and its tectonic implications [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2013, 49(6): 733-740.
- 张翔, 张莉莉, 汪禄波, 等. 党河南山乌里沟中酸性岩体锆石 U-Pb 年龄-地球化学特征及与金矿成矿关系 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2015, 42(5): 596-607.
- ZHANG Xiang, ZHANG Lili, WANG Lubo, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics of neutral-acidic intrusions of Wuligou in South Qilian Mountains: their implications on forming gold deposit [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2015, 42(5): 596-607.
- 赵虹, 党彝, 王崇礼. 甘肃南祁连党河南山中奥陶世火山岩的地球化特征 [J]. *现代地质*, 2004, 18(1): 64-69.
- ZHAO Hong, DANG Ben, WANG Chongli. The Geochemical characteristics of Ordovician volcanic rocks in southern Danghe Mountain in Southern Qilian Mountains, Gansu Province [J]. *Geoscience*, 2004, 18(1): 64-69.
- 赵虹, 金治鹏, 党彝, 等. 甘肃党河南山北坡早古生代火山岩时代探讨 [J]. *西安工程学院学报*, 2001, 23(3): 26-29.
- ZHAO Hong, JIN Zhipeng, DANG Ben, et al. Recognizing the time of early Paleozoic volcanic rock in the north slope of Danghe southern Mountain in Subei County, Gansu Province [J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 2001, 23(3): 26-29.
- 郑英, 陈光庭, 张小永, 等. 中祁连苏里地区奥陶纪石英闪长岩地球化学特征及年代学意义 [J]. *西北地质*, 2017, 50(4): 9-17.
- ZHENG Ying, CHEN Guangting, ZHANG Xiaoyong, et al. Geochemical Characteristics and Chronology Significance of Ordovician Quartz Diorite from Suli Area in Middle Qilian Mountains [J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(4): 9-17.
- 甘肃省地质局区测二队. 1:20 盐池湾区域地质调查报告 [R]. 1969—1973.
- Behn M D, Kelemen P B, Hirth G, et al. Diapirs as the source of the sediment signature in arc lavas [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(9): 641-646.
- Cao Y T, Liu L, Chen D L, et al. Partial melting during exhumation of Paleozoic retrograde eclogite in North Qaidam, western China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 148(15): 223-240.
- Castro A, Gerya T, García-Casco A, et al. Melting relations of MORB-sediment mélanges in underplated mantle wedge plumes: Implications for the origin of cordilleran-type batholiths [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(6): 1267-1295.
- Codillo E A, Roux V L, Marschall H R. Arc-like magmas generated by mélange-peridotite interaction in the mantle wedge [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2864.
- Cruz-Uribe A M, Marschall H R, Gaetani G A, et al. Generation of alkaline magmas in subduction zones by partial melting of mélange diapirs—An experimental study [J]. *Geology*, 2018, 46(4): 343-346.
- Davidson J, Turner S, Handley H, et al. Amphibole “sponge” in arc crust? [J]. *Geology*, 2007, 35(9): 787-790.
- Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 662-665.
- Donald G A M, Katsura T. Chemical composition of Hawaiian lavas [J]. *Journal of Petrology*, 1964, 5: 82-133.
- Foley S. Petrological characterization of the source components of potassic magmas: geochemical and experimental constraints [J]. *Lithos*, 1992, 28(3-6): 187-204.
- Fu C, Yan Z, Aitchison J C, et al. Abyssal and Suprasubduction Peridotites in the Lajishan Ophiolite Belt: Implication for Initial Subduction of the Proto-Tethyan Ocean [J]. *The Journal of Geology*, 2019, 127(4): 393-410.
- Fu C, Yan Z, Wang Z, et al. Lajishankou Ophiolite Complex: Implications for Paleozoic Multiple Accretionary and Collisional Events in the South Qilian Belt [J]. *Tectonics*, 2018, 37(5-6): 1321-1346.
- Gao Z, Zhang H F, Yang H, et al. Back-arc basin development: Constraints on geochronology and geochemistry of arc-like and OIB-like basalts in the Central Qilian block (Northwest China) [J]. *Lithos*, 2018b, 310-311: 255-268.
- Gao Z, Zhang H F, Yang H, et al. Geochemistry of Early

- Paleozoic boninites from the Central Qilian block, Northwest China: Constraints on petrogenesis and back-arc basin development[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018a, 158(JUN. 1):227-239.
- Gehrels G, Kapp P, DeCelles P, et al. Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen [J]. *Tectonics*, 2011, 30: TC5016.
- Gill J B. Orogenic andesites and plate tectonics[M]. Springer-Verlag, 1981.
- Gómez-Tuena, Arturo, Mori L, Straub S M. Geochemical and petrological insights into the tectonic origin of the Transmexican Volcanic Belt [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 413(12):153-181.
- Grove T L, Till C B. H₂O-rich mantle melting near the slab-wedge interface[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2019, 174(10): 80.
- Hacker B R, Kelemen P B, Behn M D. Differentiation of the continental crust by relamination[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2011, 307(3-4): 501-516.
- Hastie A R, Mitchell S F, Kerr A C, et al. Geochemistry of rare high-Nb basalt lavas: Are they derived from a mantle wedge metasomatised by slab melts? [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(17): 5049-5072.
- Kay S M, Rapela C W. Plutonism from Antarctica to Alaska [J]. *Geological Society of America Special Paper*, 1990, 244: 233-255.
- Kelemen P B, Hanghøj K, Greene A R. One View of the Geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust[J]. *Treatise on Geochemistry* (second edition) 2014, 4: 794-806.
- Kimura J I, Gill J B, Kunikiyo T, et al. Diverse magmatic effects of subducting a hot slab in SW Japan: Results from forward modeling[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2014, 15(3): 691-739.
- Koenig S, Schuth S. Deep melting of old subducted oceanic crust recorded by superchondritic Nb/Ta in modern island arc lavas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 301(1-2): 265-274.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram[J]. *Jour. Petrol*, 1986, 27(3): 745-750.
- Liu Y, Hu Z, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1):34-43.
- Li M, Wang C, Li R, et al. Identifying late Neoproterozoic-early Paleozoic sediments in the South Qilian Belt, China: A peri-Gondwana connection in the northern Tibetan Plateau [J]. *Gondwana Research*, 2019, 76: 173-184.
- Mallik A, Nelson J, Dasgupta R. Partial melting of fertile peridotite fluxed by hydrous rhyolitic melt at 2-3 GPa: implications for mantle wedge hybridization by sediment melt and generation of ultrapotassic magmas in convergent margins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2015, 169(5):1-24.
- Marschall H R, Schumacher J C. Arc magmas sourced from melange diapirs in subduction zones[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(12): 862-867.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 2005, 79(1-2):1-24.
- Nielsen S G, Marschall H R. Geochemical evidence for mélange melting in global arcs[J]. *Science Advances*, 2017, 3(4): e1602402.
- Peccherillo A, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1976, 58(1):63-81.
- Peccherillo A. Multiple mantle metasomatism in central-southern Italy: Geochemical effects, timing and geodynamic implications[J]. *Geology*, 1999, 27(4):315-318.
- Vermeesch P. Isoplot R: A free and open toolbox for geochronology[J]. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(5): 1479-1493.
- Plank T, Langmuir C H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle [J]. *Chemical Geology*, 1998, 145(3-4): 325-394.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa[J]. *Chemical Geology*, 1999, 160(4):335-356.
- Ryan J G, Chauvel C. The Subduction-Zone Filter and the Impact of Recycled Materials on the Evolution of the Mantle[J]. *The Mantle and Core*, 2014, 3: 479-508.
- Schmidt M W, Poli S. Devolatilization During Subduction [J]. *Treatise on Geochemistry* (Second Edition), 2014, 4: 669-701.
- Schmidt M W, Vielzeuf D, Auzanneau E. Melting and dissolution of subducting crust at high pressures: the key role of white mica[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2004, 228(1-2): 65-84.
- Song S G, Niu Y L, Su L., et al. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China [J]. *Gondwana Research*,

- 2013, 23(4):1378-1401.
- Song S G, Niu Y L, Su L, et al. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China [J]. *Earth Science Reviews*, 2014, 129: 59-84.
- Song S G, Yang L M, Zhang Y Q, et al. 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[J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(15):1035-1038.
- Straub S M, Gomez-Tuena A, Stuart F M, et al. Formation of hybrid arc andesites beneath thick continental crust [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2011, 303(3-4): 337-347.
- Sun, McDonough. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- Ulmer P. Partial melting in the mantle wedge-The role of H₂O in the genesis of mantle-derived 'arc-related' magmas[J]. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 2001, 127(1):215-232.
- Walowski K J, Wallace P J, Hauri E H, et al. Slab melting beneath the Cascade Arc driven by dehydration of altered oceanic peridotite[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(5): 404-408.
- Wang C, Li R S, 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.
- Wang T, D Wang, Wang Z, et al. Geochemical and geochronological study of early Paleozoic volcanic rocks from the Lajishan accretionary complex, NW China: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Lithos*, 2018,314-315: 323-336.
- Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1994, 115(4):369-383.
- Workman R K, Hart S R. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM)[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2005, 231(1-2): 53-72.
- Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y. Magmagenesis in the Ordovician backarc basins of the Northern Qilian Mountains, China [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2003, 115(12):1510-1522.
- Xiao W J, Windley B F, Yong Y, et al. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, N W China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(3-4): 323-333.
- Xiong X L, Adam J, Green T H. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis[J]. *Chemical Geology*, 2005, 218: 339-359.
- Yan Z, Aitchison J, Fu C, et al. Hualong Complex, South Qilian terrane: U-Pb and Lu-Hf constraints on Neoproterozoic micro-continental fragments accreted to the northern Proto-Tethyan margin[J]. *Precambrian Research*, 2015, 266:65-85.
- Yan Z, Fu C, Aitchison J C, et al. Early Cambrian Muli arc-ophiolite complex: a relic of the Proto-Tethys oceanic lithosphere in the Qilian Orogen, NW China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2019, 108(4): 1147-1164.
- Yang L M, Song S G, Su L, et al. Heterogeneous Oceanic Arc Volcanic Rocks in the South Qilian Accretionary Belt (Qilian Orogen, NW China) [J]. *Journal of Petrology*, 2019a, 60(1):85-116.
- Yang L M, Su L, Song S G, et al. Interaction between oceanic slab and metasomatized mantle wedge: Constraints from sodic lavas from the Qilian Orogen, NW China [J]. *Lithos*, 2019b, 348-349.
- Yang W R, Deng Q L, Wu X L. Major Characteristics of the Lajishan Orogenic Belt of the South Qilian Mountains and Its Geotectonic Attribute[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010(1):110-117.
- Yu S Y, Peng Y B, Zhang J X, et al. Tectono-thermal evolution of the Qilian orogenic system: Tracing the subduction, accretion and closure of the Proto-Tethys Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021,215:10357.
- Zhang Y Q, Song S G, Yang L M, et al. Basalts and picrites from a plume-type ophiolite in the South Qilian Accretionary Belt, Qilian Orogen: Accretion of a Cambrian Oceanic Plateau? [J]. *Lithos*, 2017, 278-281: 97-110.
- Zhao G J, Wang C, Zhu X H, et al. Intraoceanic back-arc magma diversity: Insights from a relic of the Proto-Tethys oceanic lithosphere in the western Qilian Orogen, NW China[J]. *Chemical Geology*, 2020,550:119756.
- McDonald G A, Katsura T. Chemical composition of Hawaiian Lavas [J]. *Journal of Petrology*, 1964, 5: 82-133.