

新疆东昆仑木孜塔格地区碎石沟花岗岩 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学 特征及地质意义



鲁浩^{1,2)}, 刘欢^{1,2)}, 万鹏¹⁾, 薄军委¹⁾, 李金涛¹⁾, 孙景耀¹⁾

1) 山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台, 264004; 2) 长安大学地球科学与资源学院, 西安, 710054

内容提要: 碎石沟花岗岩体位于东昆仑造山带西段木孜塔格地区, 是该地区几个主要花岗岩体之一。为了查明该岩体的成因类型、物质来源及形成时代, 并在此基础上进一步探讨木孜塔格地区的区域构造演化过程及东昆仑造山带地球动力学背景, 对该岩体进行了详细的岩石学、地球化学及锆石 U-Pb 年代学研究。岩石学特征表明, 碎石沟花岗岩主要由灰白色中细粒二长花岗岩组成, 在岩体边部可见少量灰白色花岗闪长岩。岩石地球化学研究表明, 该岩体具有高硅($\text{SiO}_2 = 67.54\% \sim 71.56\%$)、高碱($\text{Na}_2\text{O} = 3.08\% \sim 4.50\%$ 、 $\text{K}_2\text{O} = 3.05\% \sim 4.20\%$)、富铝的特点($\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.26\% \sim 16.58\%$), 属于准铝质—弱过铝质高钾钙碱性系列; 稀土元素含量较高($126.31 \times 10^{-6} \sim 160.13 \times 10^{-6}$), 总体表现出轻稀土富集, 重稀土亏损的右倾式配分模式, 具有 Eu 的弱负异常($\delta\text{Eu} = 0.68 \sim 0.85$); 微量元素相对富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Hf、Sr 等高场强元素, 显示出 I 型花岗岩的特征。本次研究获得碎石沟岩体二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 $208.0 \pm 1.1 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.0$), 属于晚三叠世岩浆活动产物。结合区域构造演化特征, 碎石沟花岗岩来源于下地壳物质部分熔融, 并且在形成过程中存在幔源岩浆底侵及壳幔岩浆混合作用, 其构造背景为后碰撞环境。

关键词: I 型花岗岩; U-Pb 年代学; 岩石地球化学; 地质意义; 东昆仑

东昆仑造山带位于中央造山系西段, 青藏高原北缘, 是经历了多期构造运动的复合型大陆造山带(莫宣学等, 2007), 因其独特的构造演化史, 受到了地质学者的广泛关注。东昆仑造山带南邻巴颜喀拉地块, 北邻柴达木地块, 西部通过阿尔金断裂与西昆仑造山带衔接, 东部通过温泉断裂与共和盆地相连, 东西延伸约 1500 km。以祁漫塔格—香日德蛇绿混杂岩带、阿其克库勒湖—昆中蛇绿混杂岩带、木孜塔格—布青山—阿尼玛卿蛇绿混杂岩带为界, 前人将东昆仑造山带自北向南依次划分为北祁漫塔格构造带(东昆北)、东昆中构造带和东昆南构造带(殷鸿福等, 1997; 潘桂堂等, 2013; 吴才来等, 2014; Meng Fancong et al., 2015; 陈国超等, 2017a, 2019; Dong Yunpeng et al., 2018; 高栋等, 2019)。在长期的地质演化过程中, 东昆仑造山带经历了复杂多样的构

造演化, 广泛出露不同时代、不同成因的花岗岩。这些花岗岩从时代上看主要分为早古生代和晚古生代—早中生代两个阶段, 尤其是早中生代(印支期)岩体普遍发育, 几乎遍布全区, 多以岩株、岩脉的形式在空间上呈不规则状、透镜状或长条状沿 NW—SE 向区域性断裂分布(莫宣学等, 2007; 丰成友等, 2012; Ding Qingfeng et al., 2014; Huang Hui et al., 2014; 马昌前等, 2015; 胡朝斌等, 2018; 陈国超等, 2018; 陈邦学等, 2019; 李猛等, 2020)。

大部分学者认为, 东昆仑造山带三叠纪花岗岩类为后碰撞伸展背景下伴随加厚地壳拆沉作用的产物(罗照华等, 2002; 陈国超等, 2013, 2018; 奥琮等, 2015; 邵凤丽, 2017; 高永宝等, 2017; 王疆涛, 2017)。东昆仑地区在晚三叠世已经进入后碰撞阶段, 地壳增厚使下地壳物质部分熔融, “相对松弛”的应力背

注: 本文为新疆地勘基金中心“新疆若羌县大沙沟一带 1:5 万(J45E019019, J45E020018, J45E020019, J45E021018, J45E021019) 区域地质矿产调查项目(编号:XB-DK-2015-1-05)和新疆东昆仑三岔顶一带 1:5 万四幅区域地质矿产调查”项目(编号:K16-1-LQ22)的成果。

收稿日期:2021-03-12; 改回日期:2021-05-27; 网络首发:2021-06-20; 责任编辑:黄道裘、刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.06.061

作者简介: 鲁浩, 男, 1988 年生, 硕士, 工程师, 主要从事地质矿产勘查工作; Email: 347897634@qq.com。通讯作者: 万鹏, 男, 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查工作; Email: 23921283@qq.com。

景使下地壳发生拆沉,引发软流圈物质上涌底侵至下地壳底部,与壳源花岗质岩浆发生不同程度的混合,从而形成东昆仑地区晚三叠世花岗岩类(谌宏伟等,2005;丰成友等,2012;孔会磊等,2016;菅坤坤等,2017;汤鸿伟等,2018;陈国超等,2019)。另有少部分学者认为东昆仑地区在中三叠世以前已经进入后碰撞阶段,花岗岩的形成的主导方式不是岩浆混合作用,而是早期俯冲洋壳部分熔融形成的,并且在这一时期形成具 A 型花岗岩特征的岩脉(Huang Hui et al., 2014; Ding Qingfeng et al., 2014)。

通过对现有资料的研究,东昆仑造山带三叠纪花岗岩类的研究主要集中在东段(刘成东等,2002;罗明非等,2014; Xia Rui et al., 2014; Ding Qingfeng et al., 2014; 陈国超等,2019),对东昆仑造山带西段三叠纪花岗岩类的研究相对薄弱,而且主要集中在东昆北构造带中的祁漫塔格地区(谌宏伟等,2005;刘云华等,2006;吴祥珂等,2011;丰成友等,2012;李猛等,2020),而对位于东昆南构造带的木孜塔格地区三叠纪花岗岩类研究很少,仅有少量关于木孜塔格蛇绿混杂岩带(吴峻等,2001;兰朝利等,2002)和新生代火山岩的相关报道(涂其军等,2007;岳跃破等,2020),指出古特提斯洋于二叠纪—晚三叠世北向俯冲消亡过程中,在木孜塔格地区形成了较成熟的沟—弧—盆体系(吴峻等,2001),但对于该地区洋盆闭合时限及三叠纪构造—岩浆演化特征鲜有报道。

东昆仑造山带西段木孜塔格地区中生代花岗岩类出露相对较少(图 1),本文研究的碎石沟花岗岩,是该地区仅有的几个出露面积较大的中生代花岗岩体之一。作者在野外地质调查的基础上,对碎石沟岩体进行详细的岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学研究,通过查明该岩体的成因类型、岩浆物质来源及其形成机制,讨论碎石沟花岗岩体与古特提斯构造演化的关系,进一步了解木孜塔格地区洋陆转换及壳幔相互作用过程,从而为东昆仑造山带三叠纪构造—岩浆演化的研究提供相关地质证据。

1 地质背景及岩石学特征

东昆仑造山带自北向南主要由东昆北(祁漫塔格)弧后盆地、东昆中微陆块(复合岩浆弧)、昆南增生杂岩带和巴颜喀拉前陆盆地组成(李荣社等,2008),分别对应前述的北祁漫塔格构造带、东昆中构造带和东昆南构造带。

木孜塔格地区在大地构造区划上位于东昆仑造

山带西段南缘(吴峻等,2001),属于昆南增生杂岩带。区内地层较发育,以晚古生代—中生代地层为主,主要为中泥盆统布拉克巴什组(D_2bl)、下石炭统托库孜达坂组(C_1tk)、下二叠统碧云山组(P_1by)、中二叠统卡尔瓦组(P_2krw)、上三叠统桃湖组(T_3th)等,局部出露少量中元古代变质基底(长城系小庙组(Chx))及新生代地层。区内岩浆活动频繁,自元古代至中生代均有岩浆岩活动,活动方式为火山喷发和岩浆侵入,形成一系列侵入岩及火山岩,但普遍规模不大,侵入岩多以岩株、岩脉形式产出,主要岩性有花岗闪长岩、二长花岗岩、闪长岩、辉长岩等。区内构造活动强烈,均具有多期性、继承性特点,其中昆北断裂带、昆中断裂带及昆南断裂带的发生、发展及演化控制着本区的构造岩浆活动、沉积作用及成矿作用。

碎石沟岩体位于木孜塔格峰北东约 100 km 处碎石沟沟口一带,岩体产出状态明显受其北侧向阳泉—花海滩断裂控制,呈北西—南东向展布,东西长约 9 km,南北宽约 800 m,出露面积约 4 km²。岩体主体侵入于下石炭统托库孜达坂组(C_1tk),该组主要为一套碎屑岩夹碳酸盐岩及含放射虫硅质岩组合,局部可见火山岩断块出露,由南向北岩石变质作用逐渐增强,岩性由岩屑砂岩、变质岩屑砂岩向碎裂岩化岩屑砂岩、弱糜棱岩化岩屑砂岩过渡。碎石沟岩体与围岩地层总体呈侵入接触关系,局部与蚀变玄武岩、硅质岩呈断层接触(图 2),由于受到后期构造运动影响,岩石普遍较破碎,野外露头较差,岩体岩性相对较单一,主要为灰白色中细粒二长花岗岩,边部可见少量灰白色花岗闪长岩,二者野外特征相似,接触界线不明显,推测二者可能为渐变过渡关系。岩体内部偶见闪长岩、闪长玢岩、花岗斑岩等,均呈细脉状产出。

灰白色中细粒二长花岗岩:岩石表面风化呈浅灰色、土黄色,新鲜面呈灰白色,局部浅肉红色,中细粒花岗结构,块状构造。岩石主要由斜长石(40%~45%)、钾长石(35%~40%)、石英(20%~25%)和黑云母(0~10%)等组成。副矿物主要为磁铁矿、磷灰石、锆石。斜长石呈半自形板状,中细粒,双晶发育,可见韵律环带,部分具轻微—中等程度绢云母化、隐晶帘石化,种属为奥长石($An=25\sim30$);钾长石呈半自形—他形板状,中细粒,呈不规则状充填,不均匀分布,常见钠质条纹,种属为微斜条纹长石;石英多呈他形粒状,细粒,呈不规则状充填孔隙,不均匀分布;黑云母呈半自形鳞片状,中细粒,星散状分布,多

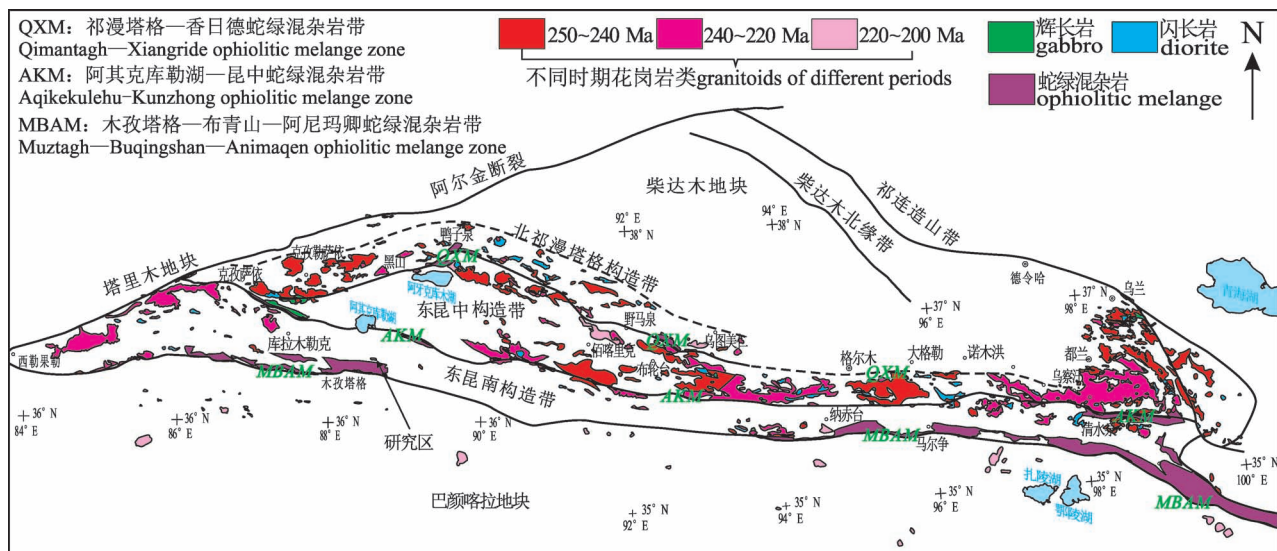
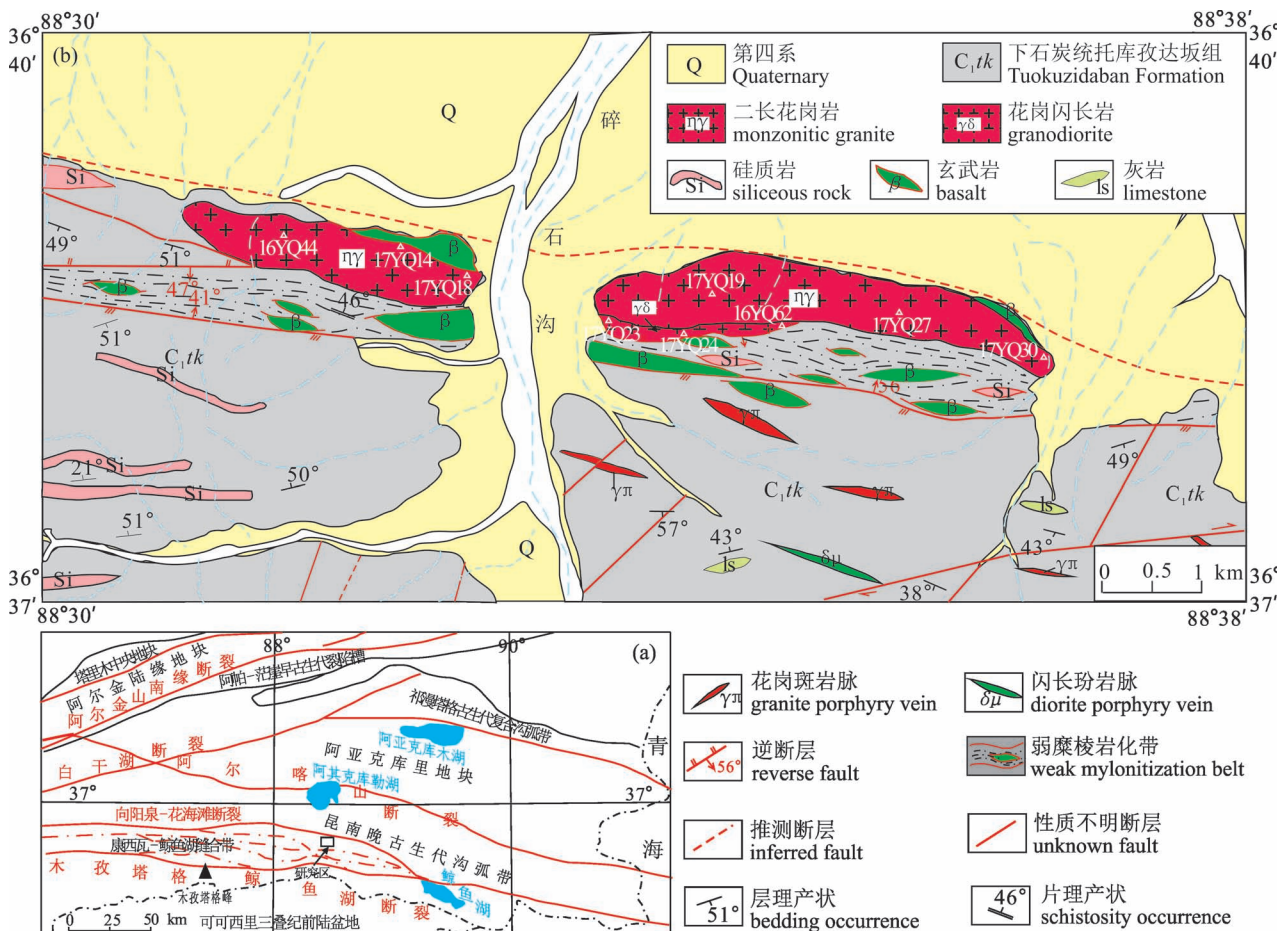


Fig. 1 Distribution of Mesozoic magmatic rocks in the East Kunlun orogenic belt(modifeid from Dong Yunpeng et al. , 2018)



发生绿泥石化蚀变(图 3a、b)。

灰白色(碎裂状)中细粒花岗闪长岩:岩石呈灰白色、灰黄色,中细粒花岗结构—碎裂结构,块状构造。岩石主要由斜长石(55%~60%)、钾长石(5%~10%)、石英(20%~25%)、黑云母(10%~15%)组成,偶见角闪石。副矿物主要为磁铁矿、锆石、磷灰石。斜长石呈半自形板状,中细粒,镶嵌状、杂乱分布,常见聚片双晶、卡钠复合双晶,种属为奥长石($An=25\sim30$)。钾长石近半自形—他形粒状,中细粒,星散状、填隙状分布。内常见格子双晶、钠质条纹,条纹微细脉状,为固溶体出溶产物,种属为微斜条纹长石。石英他形粒状,中粒,填隙状分布。黑云母片状,中粒,星散状分布。个别样品见少量蚀变暗色矿物(<5%),半自形柱状,粒度<1.5~0.5 mm,已完全程度绿泥石化、绿帘石化,残留晶形,判断原矿

物为角闪石或黑云母等,不均匀分布(图 3c、d)。

2 样品采集及分析方法

用于锆石 U-Pb 测年、主量元素、微量元素、稀土元素分析的花岗岩样品均采于碎石沟岩体,其中二长花岗岩样品 6 件,花岗闪长岩样品 3 件,所有样品采自于地表花岗岩露头,岩石新鲜。

主量、微量和稀土元素的测试工作由山东省第三地质矿产勘查院实验测试中心完成。主量元素利用 TAS-990F 型原子吸收分光光度计进行测试,FeO 由氢氟酸、硫酸溶样,采用重铬酸钾滴定的容量法进行测试,误差小于等于 2%;微量和稀土元素利用 ICAP Q 型电感耦合等离子质谱仪完成,误差小于等于 5%。分析结果见表 1。

同位素测年样品的锆石挑选和制靶由河北廊坊



图 3 新疆东昆仑木孜塔格地区碎石沟花岗岩野外手标本及镜下照片:(a)、(b)二长花岗岩;(c)、(d)花岗闪长岩

Fig. 3 Photographs and microscopic photos of Suishigou granite in Muztag area,East Kunlun,Xinjiang:

(a), (b) monzogranite; (c), (d) granodiorite

Bi—黑云母;Kf—钾长石;Pl—斜长石;Q—石英

Bi—biotite;Kf—potash feldspar;Pl—plagioclase;Q—quartz

表 1 新疆东昆仑木孜塔格地区碎石沟花岗岩主量元素(%)和稀土、微量($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 1 Analysis results of major elements (%), rare earth and trace elements ($\times 10^{-6}$) of the Suishigou granite in Muztag area, East Kunlun, Xinjiang

样品号	16YQ44	17YQ14	17YQ18	17YQ19	17YQ27	17YQ30	16YQ62	17YQ23	17YQ24
岩性	二长花岗岩						花岗闪长岩		
SiO ₂	69.05	68.14	69.33	70.59	69.09	69.99	69.51	69.2	65.65
SiO ₂	69.05	68.14	69.33	70.59	69.09	69.99	69.51	69.2	65.65
TiO ₂	0.32	0.44	0.41	0.41	0.42	0.44	0.32	0.43	0.43
Al ₂ O ₃	15.77	15.14	14.52	14.64	13.96	14.06	16.11	15.06	16.12
Fe ₂ O ₃	0.7	0.55	0.45	0.37	0.69	0.8	0.72	0.08	0.43
FeO	2.48	3.41	3.41	3.1	3.12	2.95	2.16	3.55	3.2
MnO	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04
MgO	0.53	0.59	0.47	0.44	0.73	0.49	0.45	0.43	0.46
CaO	2.56	2.81	3.06	2.41	3.53	2.21	2.34	2.54	2.3
Na ₂ O	3.53	3.88	3.81	3.78	3.23	3.38	3.02	3.9	4.37
K ₂ O	3.41	3.64	3.28	3.76	2.98	3.21	3.4	3.58	4.09
P ₂ O ₅	0.11	0.12	0.11	0.09	0.12	0.1	0.1	0.12	0.12
烧失量	1.5	2.44	1.83	1.23	1.59	1.67	1.84	1.63	2.03
总量	100	101.21	100.72	100.92	99.49	99.39	100.01	100.56	99.24
σ	1.83	2.23	1.89	2.06	1.46	1.59	1.54	2.12	3.08
AR	2.26	2.52	2.52	2.59	2.17	2.42	1.97	2.59	2.81
Mg [#]	0.23	0.21	0.18	0.19	0.26	0.19	0.22	0.18	0.19
A/NK	1.66	1.46	1.48	1.42	1.63	1.56	1.86	1.46	1.38
A/CNK	1.1	0.98	0.94	0.99	0.93	1.08	1.25	1.01	1.02
刚玉 _c	1.27	0	0	0.17	0	0.91	2.38	0.27	0.37
La	27.63	27.30	28.80	28.40	27.90	29.50	34.37	28.60	28.10
Ce	63.92	55.00	56.70	56.10	58.10	60.20	75.47	56.50	57.80
Pr	6.26	6.67	7.00	6.82	6.92	7.13	7.75	6.93	7.08
Nd	23.44	25.10	26.00	27.10	26.50	27.10	29.19	25.40	24.70
Sm	4.11	4.48	4.57	4.52	4.56	4.63	5.20	4.59	4.54
Eu	0.98	1.06	1.02	1.06	1.10	1.02	0.99	1.04	1.02
Gd	2.69	3.12	3.17	3.10	3.35	3.26	3.33	3.18	3.23
Tb	0.34	0.41	0.40	0.39	0.41	0.41	0.40	0.41	0.41
Dy	1.79	1.52	1.43	1.40	1.53	1.56	1.92	1.58	1.52
Ho	0.26	0.23	0.20	0.19	0.22	0.22	0.26	0.23	0.21
Er	0.53	0.84	0.50	0.51	0.56	0.58	0.53	0.59	0.54
Tm	0.13	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.13	0.07	0.07
Yb	0.50	0.39	0.34	0.33	0.39	0.38	0.46	0.37	0.37
Lu	0.13	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.13	0.05	0.05
ΣREE	132.71	126.31	130.27	129.98	131.74	135.98	160.13	129.60	129.66
ΣLREE	126.34	119.67	124.12	123.96	125.14	129.44	152.97	123.12	123.25
ΣHREE	6.37	6.64	6.15	6.03	6.60	6.53	7.16	6.48	6.41
L/HREE	19.83	18.02	20.18	20.56	18.97	19.82	21.36	19.01	19.23
δEu	0.85	0.82	0.78	0.82	0.82	0.77	0.68	0.79	0.77
δCe	1.13	0.95	0.93	0.94	0.98	0.97	1.07	0.94	0.96
(La/Sm) _N	4.23	3.84	3.97	3.95	3.85	4.00	4.16	3.92	3.89
(La/Yb) _N	37.26	46.75	57.68	58.09	47.84	52.84	50.37	52.44	50.60
(Gd/Yb) _N	4.34	6.39	7.59	7.60	6.87	7.00	5.84	6.98	6.96
Ba	354.50	497.00	429.60	482.00	425.30	432.20	329.80	485.80	520.80
Rb	112.24	111.40	87.30	115.20	103.20	107.80	116.96	98.10	126.50
Sr	209.22	217.10	196.30	186.90	202.60	181.90	200.47	197.10	189.60
Y	9.08	6.26	5.58	5.60	6.37	5.89	9.27	5.98	6.06
Zr	151.80	162.90	157.80	158.00	170.90	163.50	133.90	163.00	161.30
Nb	13.54	9.16	9.27	9.07	9.42	9.39	13.16	9.25	9.01

样品号	16YQ44	17YQ14	17YQ18	17YQ19	17YQ27	17YQ30	16YQ62	17YQ23	17YQ24
岩性	二长花岗岩						花岗闪长岩		
Th	11.21	9.60	11.10	10.10	10.00	11.00	11.77	10.00	10.20
Ga	18.85	19.80	18.00	19.20	20.40	18.80	18.81	18.20	18.30
V	5.82	9.86	7.91	6.17	9.36	7.63	4.39	5.94	6.08
Hf	1.65	5.70	5.10	5.30	5.40	5.20	1.65	5.10	5.50
Cs	4.67	10.20	5.01	6.33	7.20	6.67	5.95	6.03	6.99
Sc	2.19	3.60	3.10	3.08	3.81	2.98	2.19	2.42	3.24
Ta	1.04	0.87	3.28	0.83	0.97	0.93	1.04	1.00	0.81
U	1.90	1.42	1.51	2.32	1.49	1.34	1.15	1.36	1.73
K	2.83	2.60	2.34	2.75	2.36	2.42	2.82	2.48	2.68
Na	2.62	2.18	2.07	2.09	2.34	2.20	2.24	2.02	2.24
Ti	1979	2648	2511	2491	2580	2677	1952	2595	2654
P	410.6	445.5	410.9	514.7	482.4	575.8	389.7	430.3	431.7
Nb/Ta	13.02	10.49	2.82	10.92	9.68	10.05	12.65	9.20	11.15
Zr/Hf	92.00	28.58	30.94	29.81	31.65	31.44	81.15	31.96	29.33
Rb/Sr	0.44	0.41	0.44	0.52	0.41	0.49	0.48	0.40	0.57
Rb/Ba	0.32	0.22	0.20	0.24	0.24	0.25	0.35	0.20	0.24

注：①测试单位：山东省第三地质矿产勘查院，2017；②表中数据为原始数据。

$\sigma = \frac{[100\omega(\text{Na}_2\text{O}) + 100\omega(\text{K}_2\text{O})]^2}{100\omega(\text{SiO}_2) - 43}$ ； $\text{AR} = \frac{\omega(\text{Al}_2\text{O}_3) + \omega(\text{CaO}) + 2\omega(\text{Na}_2\text{O})}{\omega(\text{Al}_2\text{O}_3) + \omega(\text{CaO}) - 2\omega(\text{Na}_2\text{O})}$ ； $\text{A/NK} = \frac{n(\text{Al}_2\text{O}_3)}{n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})}$ ；

$\text{A/CNK} = \frac{n(\text{Al}_2\text{O}_3)}{n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O}) + n(\text{CaO})}$ （邓晋福等，2015）。

峰泽源实验测试有限公司承担完成。岩石破碎后用常规浮选和电磁选方法进行分选，然后在双目镜下挑选出晶型和透明度较好、无包裹体、无裂痕的锆石颗粒，用于制靶。对其进行透射光、反射光及阴极发光 CL 照相，避开内部裂隙和包裹体的干扰，选定锆石测试点位，以获得准确年龄。锆石测年在 中国地质调查局天津地质调查中心实验室进行，测年仪器为美国 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之相配套的 Newwave UP 193 nm 激光剥蚀系统。激光束斑直径为 35 μm，剥蚀深度为 20 ~ 40 μm，能量密度为 13 ~ 14 J/cm²，频率为 8 Hz。

锆石年龄标样为 GJ-1，以 NIST SRM610 为外标计算 Pb、U、Th 元素含量，普通铅由 ²⁰⁸Pb 校正法进行校正（李怀坤等，2009）。数据处理采用 ICP-MS DataCal 程序，锆石 U-Pb 谐和图用 Isoplot 程序绘制（Ludwig，2003）。测得锆石 U-Pb 同位素数据见表 2，数据误差均为 1σ。

3 分析结果

3.1 岩石地球化学特征

岩石样品主量元素分析结果见表 1，对样品的主量元素在去除烧失量后进行百分化处理，以下的

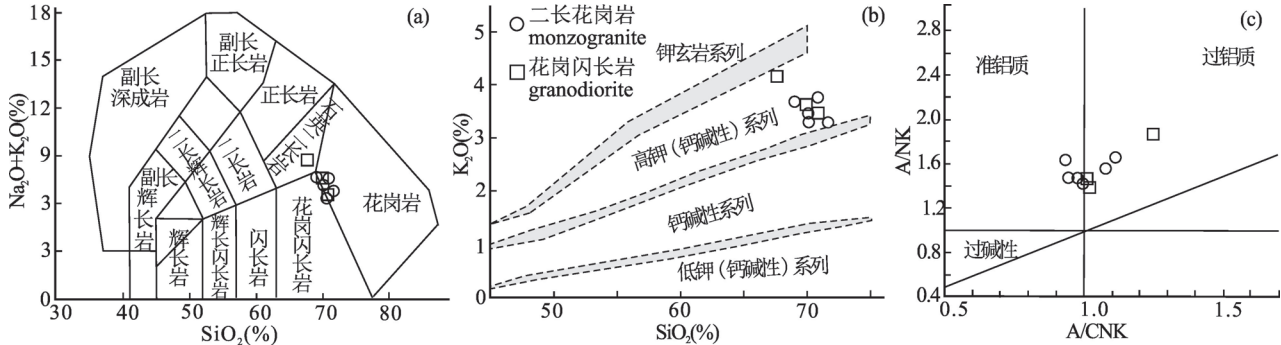


图 4 新疆东昆仑木孜塔格地区碎石沟花岗岩 SiO₂—(Na₂O+K₂O) 分类图解 (底图据 Middlemost, 1994)、Si—K₂O 图 (底图据 Maniar and Piccoli, 1989) 及 A/CNK—A/NK 图解 (底图据 Irvnet and Baragar, 1971)

Fig. 4 SiO₂—(Na₂O + K₂O) classification diagram (after Middlemost, 1994), Si—K₂O diagram (after Maniar and Piccoli, 1989) and A/CNK—A/NK diagram (after Irvnet and Baragar, 1971) of Suishigou granite in Muztag area, East Kunlun, Xinjiang

讨论和作图均按照归一化后的数据进行。从分析结果上看,碎石沟花岗岩总体具有高硅、高碱、富铝的特点。其中:

二长花岗岩样品 SiO_2 含量介于 69.00% ~ 71.56%, 平均 70.38%; Na_2O 为 3.30% ~ 3.93%, 平均 3.65%; K_2O 为 3.05% ~ 3.77%, 平均 3.43%。在 TAS 图解中, 样品点主体落入花岗岩和花岗闪长岩范围(图 4a); 二长花岗岩里特曼指数(σ)为 1.46 ~ 2.23, 平均 1.84, 碱度率(AR)为 2.17 ~ 2.59, 属高钾钙碱性系列(图 4b); Al_2O_3 为 14.26% ~ 16.02%, 平均 14.90%; 铝饱和指数(A/CNK)为 0.93 ~ 1.10, 平均 1.00, 为准铝质—弱过铝质花岗岩(图 4c)。

花岗闪长岩样品 SiO_2 含量介于 67.54% ~ 70.83%, 平均 69.43%; Na_2O 为 3.08% ~ 4.50%, 平均 3.84%; K_2O 为 3.47% ~ 4.20%, 平均 3.76%。在 TAS 图解中, 花岗闪长岩样品点主体落入花岗岩和花岗闪长岩范围(图 4a); 样品里特曼指数(σ)为 1.54 ~ 3.08, 平均 2.25, 碱度率(AR)为 1.97 ~ 2.81, 属高钾钙碱性系列(图 4b); Al_2O_3 为 15.22% ~ 16.58%, 平均 16.07%; 铝饱和指数(A/CNK)为 1.01 ~ 1.25, 平均 1.09, 属于弱过铝质花岗岩(图 4c)。

碎石沟岩体二长花岗岩与花岗闪长岩化学成分基本相似, 均为高钾钙碱性系列准铝质—弱过铝质花岗岩, Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 等氧化物含量与 SiO_2 含量呈明显负相关, 暗示可能存在矿物(斜

长石、磷灰石等)的分离结晶。

稀土元素分析结果见表 1, 二长花岗岩与花岗闪长岩样品稀土总量相当, 前者 $\Sigma\text{REE} = 126.31 \times 10^{-6} \sim 135.98 \times 10^{-6}$, 平均 131.17×10^{-6} , 后者 $\Sigma\text{REE} = 129.60 \times 10^{-6} \sim 160.13 \times 10^{-6}$, 平均 139.80×10^{-6} ; 二长花岗岩 $\text{LREE}/\text{HREE} = 18.02 \sim 20.56$, 平均 19.56, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 50.08$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 3.97$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 6.63$, 花岗闪长岩 $\text{LREE}/\text{HREE} = 19.01 \sim 21.36$, 平均 19.87, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 51.14$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 3.99$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 6.59$, 二者稀土元素配分曲线特征类似, 均表现为轻稀土富集, 重稀土亏损的右倾模式(图 5a), 而且二者轻重稀土分异程度较高, 轻重稀土内部均有一定程度分馏; 二长花岗岩 $\delta\text{Eu} = 0.77 \sim 0.85$, 平均 0.81, 花岗闪长岩 $\delta\text{Eu} = 0.68 \sim 0.79$, 平均 0.75, 二者均表现为 Eu 弱负异常, 可能与斜长石分离结晶有关。

样品微量元素原始地幔标准化蛛网曲线如图 5b, 从图上可以看出, 碎石沟岩体二长花岗岩与花岗闪长岩样品微量元素特征类似, 均富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Hf、Sr 等高场强元素; 曲线中 Ba、Sr、Nb 显示负异常, 说明有斜长石的熔融残留相或结晶分离相存在, Ti 明显亏损, 可能与钛铁矿的分离结晶有关; 相对于 Rb 与 Th 明显亏损 Ba, 显示出大陆弧背景下造山型花岗岩的特征(李昌年, 1992); 二长花岗岩 Nb/Ta 平均为 9.50、Rb/Ba 平均为 0.25、Zr/Hf 平均为 40.74、Rb/Sr 平均为

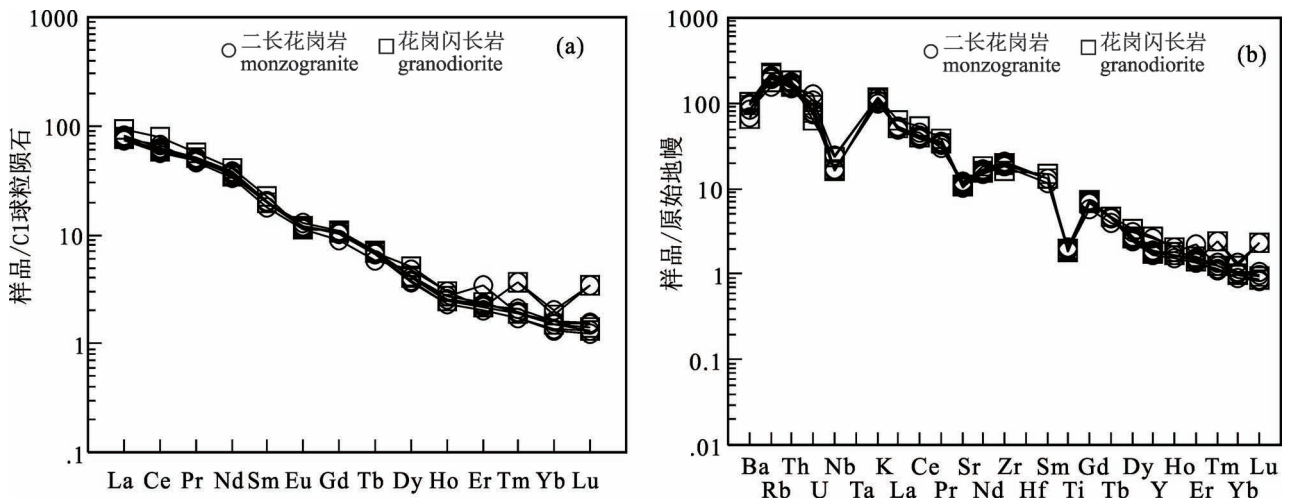


图 5 新疆东昆仑木孜塔格地区碎石沟花岗岩稀土元素球粒陨石标准化曲线(a) (标准化数值据 Boynton, 1984) 及微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) (标准化数值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) (normalization values are from Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace-element spidergrams (b) (normalization values are from Sun and McDonough, 1989) for the Suishigou granite in Muztag area, East Kunlun, Xinjiang

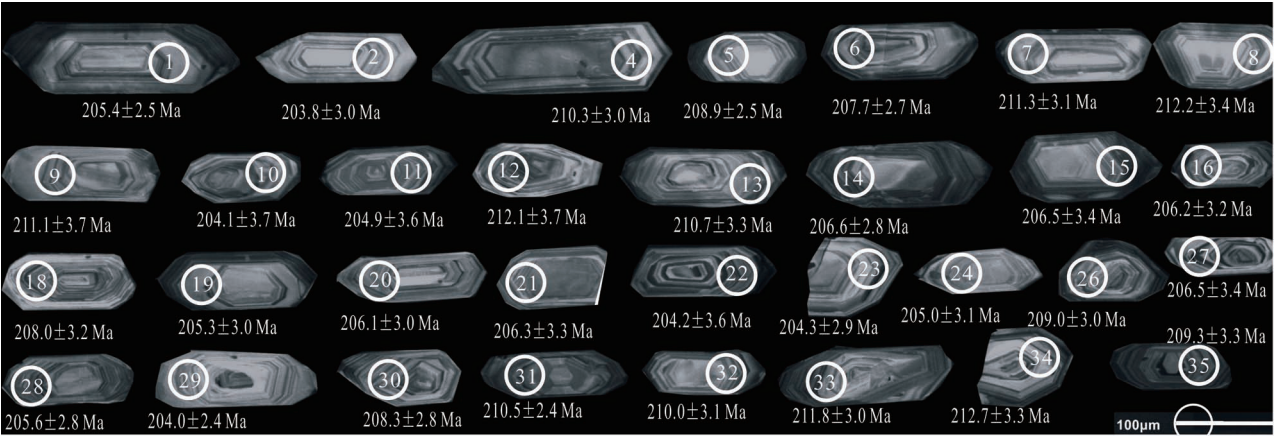


图 6 新疆东昆仑木孜塔格地区碎石沟二长花岗岩锆石阴极发光图

Fig. 6 Zircon cathodoluminescence diagram in Muztag area, East Kunlun, Xinjiang

0.44, 花岗闪长岩 Nb/Ta 平均为 11.00、Zr/Hf 平均为 47.48、Rb/Ba 平均为 0.27、Rb/Sr 平均为 0.48, 与地壳相关元素比值接近 (Nb/Ta = 8.3~16.7、Zr/Hf = 35.5、Rb/Ba = 0.12、Rb/Sr = 0.5; Rudnick et al., 2014)。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

本次选择岩体中部新鲜样品(二长花岗岩)进行测年, 锆石形态以长柱状为主, 个别呈椭圆状, 在阴极发光图像上可见清晰的震荡环带结构(图 6)。分析结果显示, 锆石的 U 和 Th 含量分别为 91.1~347.3、249.9~1212.3, Th/U 值介于 0.11~0.46, 均大于 0.1, 具有岩浆锆石的特征(吴元保等, 2004)。本次共测定 35 个点, 据锆石 U-Pb 定年结果显示, 大部分锆石测点数据都位于谐和线上(图 7), 分布较集中, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄范围介于 203~212 Ma, 其加权平均值为 208.0 ± 1.1 Ma (MSWD = 1.0), 可以代表碎石沟岩体的形成年龄。

4 讨论

4.1 岩石成因类型及源区特征

花岗岩成因类型的判定需要综合岩石的主要矿物组成及地球化学特征等综合考虑。一般来讲, 角闪石、堇青石和碱性暗色矿物分别是判别 I 型、S 型和 A 型花岗岩的重要矿物学标志(吴福元等, 2007)。根据岩石学研究, 碎石沟花岗岩体的主要矿物组成为斜长石、钾长石、石英、黑云母等, 副矿物以磁铁矿、锆石、磷灰石为主, 不含堇青石、白云母等富铝矿物, 符合 I 型花岗岩矿物组合特征。根据实验岩石学研究, 磷灰石在弱过铝质及准铝质熔体(I 型)中含量很低并且与 SiO₂ 含量之间呈负相关关

系, 在过铝质熔体(S 型)中与 SiO₂ 含量之间呈正相关关系(Wolf and London, 1994)。在 SiO₂—P₂O₅ 图解中(图 8a), 碎石沟花岗岩体样品 SiO₂ 与 P₂O₅ 含量之间显示负相关关系。在 SiO₂—Y 图解中, 样品点落入 I 型花岗岩区域(图 8b)。此外结合碎石沟花岗岩体高硅、高碱、准铝质—弱过铝质的地球化学特征以及在 CIPW 标准矿物中大部分刚玉分子含量小于 1% 的特征(Chappell and White, 2001), 我们认为碎石沟花岗岩体的成因类型为 I 型花岗岩。

花岗岩一般认为是由地壳物质部分熔融形成的。由于地壳物质成分的不均一性, 不同岩浆物质来源的花岗岩往往具有不同的地球化学特征。碎石

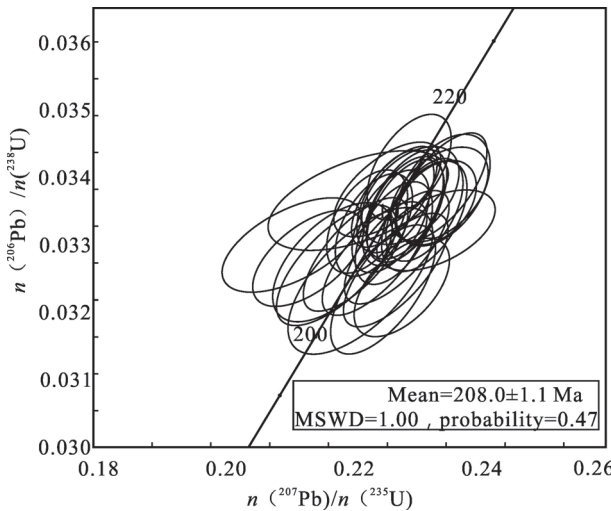


图 7 新疆东昆仑木孜塔格地区碎石沟二长花岗岩锆石 U-Pb 谐和曲线图

Fig. 7 U-Pb concordance curves of Suishigou monzogranite in Muztag area, East Kunlun, Xinjiang

表 2 新疆东昆仑木孜塔格地区碎石沟二长花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析结果表
Table 2 LA-MC-ICP-MS Zircon U-Pb dating results of Suishigou monzogranite in Muztag area, East Kunlun, Xinjiang

测点号	元素含量(×10 ⁻⁶)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度(%)
	Pb	Th	U		n(²⁰⁷ Pb)/n(²³⁵ U)			n(²⁰⁶ Pb)/n(²³⁸ U)			n(²⁰⁷ Pb)/n(²⁰⁶ Pb)			n(²⁰⁷ Pb)/n(²³⁵ U)			
					测值	1σ	n(²⁰⁷ Pb)/n(²³⁵ U)	测值	1σ	n(²⁰⁶ Pb)/n(²³⁸ U)	测值	1σ	n(²⁰⁷ Pb)/n(²⁰⁶ Pb)	测值	1σ	n(²⁰⁶ Pb)/n(²³⁸ U)	
2016RZ05-01	45	188	1167	0.16	0.0508	0.0009	0.2266	0.0045	0.0324	0.0004	231.6	40.7	207.4	3.8	205.4	2.5	99
2016RZ05-02	14	118	362	0.33	0.0512	0.0013	0.226	0.0058	0.0321	0.0005	250.1	57.4	206.9	4.8	203.8	3.0	99
2016RZ05-03	51	242	1128	0.21	0.0611	0.0012	0.3071	0.0071	0.0364	0.0005	642.6	36.1	271.9	5.5	230.4	2.8	93
2016RZ05-04	22	176	530	0.33	0.0518	0.0011	0.2367	0.0054	0.0332	0.0005	276.0	46.3	215.7	4.5	210.3	3.0	99
2016RZ05-05	22	182	542	0.34	0.0524	0.0013	0.2383	0.0065	0.0329	0.0004	301.9	55.6	217.0	5.4	208.9	2.5	99
2016RZ05-06	15	125	376	0.33	0.0475	0.0018	0.2137	0.0077	0.0327	0.0004	76.0	85.2	196.6	6.5	207.7	2.7	99
2016RZ05-07	20	91	512	0.18	0.0518	0.0013	0.2373	0.0062	0.0333	0.0005	276.0	57.4	216.2	5.1	211.3	3.1	98
2016RZ05-08	17	156	418	0.37	0.052	0.0011	0.2398	0.0057	0.0335	0.0006	287.1	46.3	218.3	4.7	212.2	3.4	97
2016RZ05-09	28	215	715	0.30	0.0509	0.0013	0.2351	0.0086	0.0333	0.0006	235.3	62.0	214.4	7.1	211.1	3.7	98
2016RZ05-10	24	218	625	0.35	0.0516	0.0011	0.2288	0.0058	0.0322	0.0006	333.4	50.9	209.2	4.8	204.1	3.7	97
2016RZ05-11	42	261	1077	0.24	0.0517	0.0011	0.2305	0.0059	0.0323	0.0004	333.4	48.1	210.6	4.9	204.9	2.6	96
2016RZ05-12	22	135	564	0.24	0.0513	0.0012	0.2364	0.0067	0.0335	0.0006	253.8	53.7	215.5	5.5	212.1	3.7	97
2016RZ05-13	21	63	545	0.12	0.0508	0.0013	0.2319	0.0061	0.0332	0.0005	227.8	57.4	211.8	5.0	210.7	3.3	99
2016RZ05-14	21	101	543	0.19	0.0481	0.0012	0.2165	0.0062	0.0326	0.0004	105.6	54.6	199.0	5.2	206.6	2.8	98
2016RZ05-15	21	183	534	0.34	0.049	0.0012	0.2213	0.0073	0.0326	0.0005	146.4	52.8	203.0	6.1	206.5	3.4	99
2016RZ05-16	32	180	738	0.24	0.0855	0.0039	0.3841	0.0183	0.0325	0.0005	1327.8	88.9	330.0	13.4	206.2	3.2	99
2016RZ05-17	23	158	579	0.27	0.0498	0.0014	0.23	0.0062	0.0335	0.0004	187.1	64.8	210.2	5.1	212.4	2.6	98
2016RZ05-18	18	156	466	0.33	0.0504	0.0012	0.227	0.0054	0.0328	0.0005	213.0	83.3	207.7	4.5	208.0	3.2	99
2016RZ05-19	21	225	537	0.42	0.0494	0.0013	0.22	0.0058	0.0324	0.0005	168.6	59.2	201.9	4.8	205.3	3.0	96
2016RZ05-20	26	266	669	0.40	0.0514	0.001	0.2299	0.0048	0.0325	0.0005	261.2	46.3	210.1	4.0	206.1	3.0	97
2016RZ05-21	19	161	494	0.33	0.0501	0.0013	0.2251	0.007	0.0325	0.0005	198.2	59.2	206.2	5.8	206.3	3.3	99
2016RZ05-22	18	156	478	0.33	0.0505	0.0018	0.2248	0.0089	0.0322	0.0006	220.4	49.1	205.9	7.4	204.2	3.6	96
2016RZ05-23	46	347	1212	0.29	0.0522	0.001	0.2327	0.0056	0.0322	0.0005	294.5	47.2	212.4	4.6	204.3	2.9	96
2016RZ05-24	25	268	651	0.41	0.0499	0.0012	0.2225	0.0063	0.0323	0.0005	187.1	63.9	204.0	5.2	205.0	3.1	96
2016RZ05-25	30	230	764	0.30	0.0501	0.001	0.2331	0.0047	0.0338	0.0005	211.2	44.4	212.8	3.9	214.0	3.1	97
2016RZ05-26	21	192	508	0.38	0.0641	0.0016	0.2924	0.0088	0.033	0.0005	746.3	49.1	260.4	6.9	209.0	3.0	99
2016RZ05-27	12	138	303	0.46	0.0513	0.0017	0.2302	0.0081	0.0325	0.0005	253.8	77.8	210.3	6.7	206.5	3.4	98
2016RZ05-28	30	236	773	0.31	0.0512	0.0011	0.2294	0.0058	0.0324	0.0005	253.8	43.5	209.7	4.8	205.6	2.8	97
2016RZ05-29	41	266	1018	0.26	0.0628	0.0016	0.2787	0.0071	0.0322	0.0004	701.9	49.8	249.6	5.7	204.0	2.4	96
2016RZ05-30	19	157	478	0.33	0.0501	0.0012	0.2276	0.0062	0.0328	0.0005	211.2	53.7	208.3	5.1	208.3	2.8	99
2016RZ05-31	44	73	1180	0.06	0.0501	0.0008	0.2297	0.0042	0.0332	0.0004	211.2	37.0	209.9	3.5	210.5	2.4	99
2016RZ05-32	42	260	1069	0.24	0.0517	0.0009	0.2358	0.0051	0.0331	0.0005	333.4	47.2	215.0	4.2	210.0	3.1	99
2016RZ05-33	10	59	250	0.23	0.0492	0.0021	0.2265	0.0097	0.0334	0.0005	166.8	98.1	207.3	8.0	211.8	3.0	98
2016RZ05-34	20	91	535	0.17	0.0509	0.0014	0.2362	0.0076	0.0335	0.0005	239.0	63.0	215.3	6.2	212.7	3.3	98
2016RZ05-35	25	165	650	0.25	0.0498	0.0011	0.2266	0.0059	0.033	0.0005	183.4	15.7	207.4	4.9	209.3	3.3	99

测试单位:中国地质调查局天津地质调查中心,2018。

沟岩体样品总体具有高硅、高碱、富铝、低镁铁($Mg^\#$ 平均 0.21)等壳源特征;在微量元素配分模式图上,碎石沟花岗岩体 Rb—Th 处呈峰型、Nb—Ta 处呈槽型,Zr 元素相对富集,Ti 相对亏损,同样显示出壳源花岗岩的部分特征;而且二长花岗岩 Nb/Ta、Rb/Ba、Zr/Hf 平均值分别为 9.50、0.25、40.74,花岗闪长岩 Nb/Ta、Rb/Ba、Zr/Hf 平均值分别为 11.00、0.27、47.48,均与地壳相关元素比值接近(Nb/Ta=8.3~16.7、Zr/Hf=35.5、Rb/Ba=0.12、Rb/Sr=0.5; Rudnick et al., 2014)。根据前人研究,La/Yb—La 协变关系可以判断花岗岩是由结晶分异作用形成还是由部分熔融作用形成(Allègre and Minster, 1978;

高栋等,2019)。在结晶分异作用中,La/Yb 值一般不会随 La 含量的增加发生变化。碎石沟花岗岩样品 La/Yb 与 La 之间具有明显的线性关系(图 8c),说明形成碎石沟岩体的主要来源于地壳物质的部分熔融。

Rb/Sr 是表征源岩的一个重要参数,通常认为幔源岩浆 Rb/Sr 小于 0.05,壳幔混合源介于 0.05~0.5,大于 0.5 者则以壳源为主(Tischendorf, 1986; 张爱奎等,2016)。碎石沟岩体二长花岗岩样品 Rb/Sr 值为 0.41~0.52,平均 0.45,花岗闪长岩 Rb/Sr 值为 0.40~0.57,平均 0.48,推测样品源区可能有

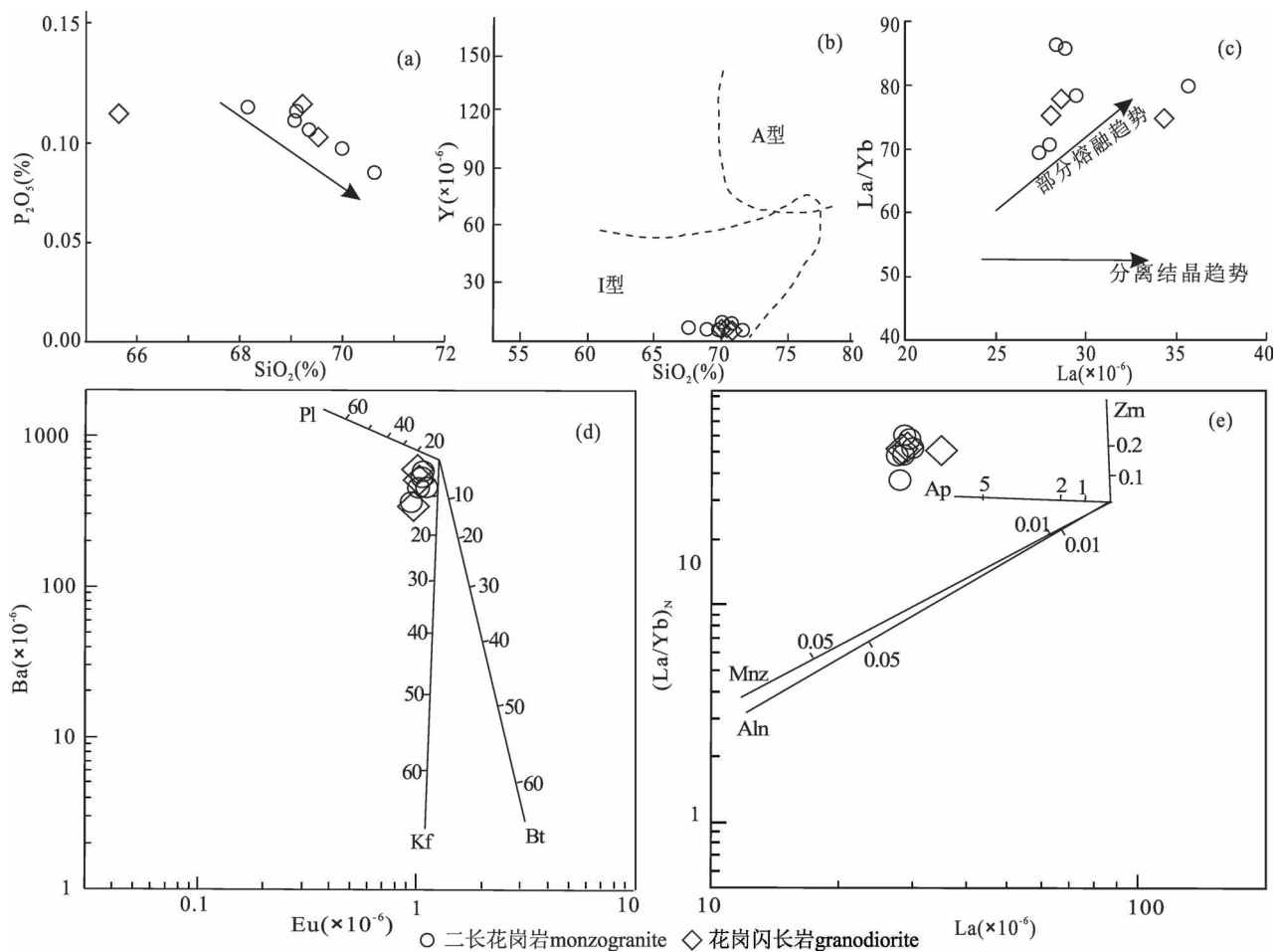


图 8 新疆东昆仑木孜塔格地区碎石沟花岗岩体 P_2O_5 — SiO_2 (a) (据 Chappell, 1999)、 SiO_2 —Y 成因类型判别图解 (b) (据 Collins et al., 1982)、La—(La/Yb) 图解 (c) (据 Allègre and Minster, 1978)、 $\log(Ba)$ — $\log(Eu)$ 图解 (d) (底图据谢建成等, 2016)、 $\log(La/Yb)_N$ — $\log(La)$ 图解 (e) (底图据谢建成等, 2016)

Fig. 8 P_2O_5 — SiO_2 discrimination diagram (a) (after Chappell et al., 1974), SiO_2 —Y discrimination diagram (b) (after Collins et al., 1982) of petrogenetic types; La—(La/Yb) diagram (c) (after Allègre and Minster, 1978), $\log(Ba)$ — $\log(Eu)$ diagram (d) (after Xie Jiancheng et al., 2016) and $\log(La/Yb)_N$ — $\log(La)$ diagram (e) (after Xie Jiancheng et al., 2016) for Shuishiou granitoids in Muztag area, East Kunlun, Xinjiang

Pl—斜长石; Kf—钾长石; Bt—黑云母; Aln—褐帘石; Mnz—独居石; Ap—磷灰石; Zrn—锆石

Pl—plagioclase; Kf—K—feldspar; Bt—biotite; Aln—allantite; Mnz—monazite; Ap—apatite; Zrn—zircon

少量幔源物质的加入。在 Harker 图解中,样品 Al_2O_3 、 FeO^{T} 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 和 K_2O 均与 SiO_2 含量呈负相关(图 9),暗示岩体在形成时可能发生过壳源岩浆与幔源岩浆之间的岩浆混合作用(汤鸿伟等,2018)。

Harker 图解中明显的线性关系反映出岩浆在演化过程中发生过明显的分异作用(图 9),Eu 负异常可能是由于斜长石分离结晶造成的,钾长石分异则产生 Ba 负异常(谢建成等,2016),低 $\text{Mg}^\#$ 特征表明岩浆经历过铁镁矿物的分异作用(如黑云母),在 $\text{Log}(\text{Eu})-\text{Log}(\text{Ba})$ 图解(图 8d),显示碎石沟花岗岩样品发生过斜长石、钾长石和黑云母分异作用。副矿物受 REE 变异控制,在 $\text{La}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解中(图 8e),碎石沟花岗岩在岩浆演化过程中,REE 含量变化可能受到磷灰石和锆石分异作用控制。

通常认为,东昆仑地区三叠纪末古特提斯洋已经关闭,沿昆南断裂带发生了羌塘—东昆仑大陆碰撞(姜春发等,1992;郭正府等,1998),在俯冲—碰撞的动力学背景下容易发生幔源岩浆的底侵作用(刘成东等,2002;谌宏伟等,2005;吴祥柯,2012),这可以从东昆仑地区三叠纪花岗岩带中广泛分布的辉长岩得到证明,如石灰沟外滩岩体中的角闪辉长岩($226.4\pm0.4\text{ Ma}$;罗照华等,2002)、加鲁河岩体中

的角闪辉长岩($239\pm6\text{ Ma}$;谌宏伟等,2005)、肯德可克岩体辉长闪长岩(218 Ma ;吴祥柯,2012)。俯冲板片脱水产生富水和大离子亲石元素、亏损高场强元素的流体,流体交代上覆地幔楔引发其部分熔融,形成的岩浆底侵下地壳(徐博等,2019),底侵岩浆带来的巨大热量导致地壳物质熔融,形成大规模的花岗质岩浆,同时幔源岩浆与壳源花岗质岩浆发生一定程度的混合(刘成东等,2002;莫宣学等,2007;高永宝等,2017;徐博等,2020),最终形成晚三叠世花岗质岩体。

碎石沟二长花岗岩样品的锆石定年结果为 $208.0\pm1.1\text{ Ma}$,为晚三叠世岩浆活动产物,区内灰绿色(碎裂)蚀变细中粒辉长岩年龄为 $211\pm1\text{ Ma}$ (未发表)^①,与前述东昆仑地区三叠纪花岗岩体具有相似性,结合岩石学、岩石地球化学特征,我们认为碎石沟岩体来源于下地壳物质的部分熔融,同时在形成过程中有少量幔源物质的混入,发生了一定程度的幔源岩浆底侵作用及壳幔岩浆混合作用。

4.2 构造背景分析

东昆仑造山带是一个多期次叠加的多旋回造山带(殷鸿福等,1997;钱兵等,2015),经历了多次大洋俯冲到陆内碰撞的转换过程(陈加杰等,2016)。殷鸿福等(1997)认为在晚古生代—中生代期间,东

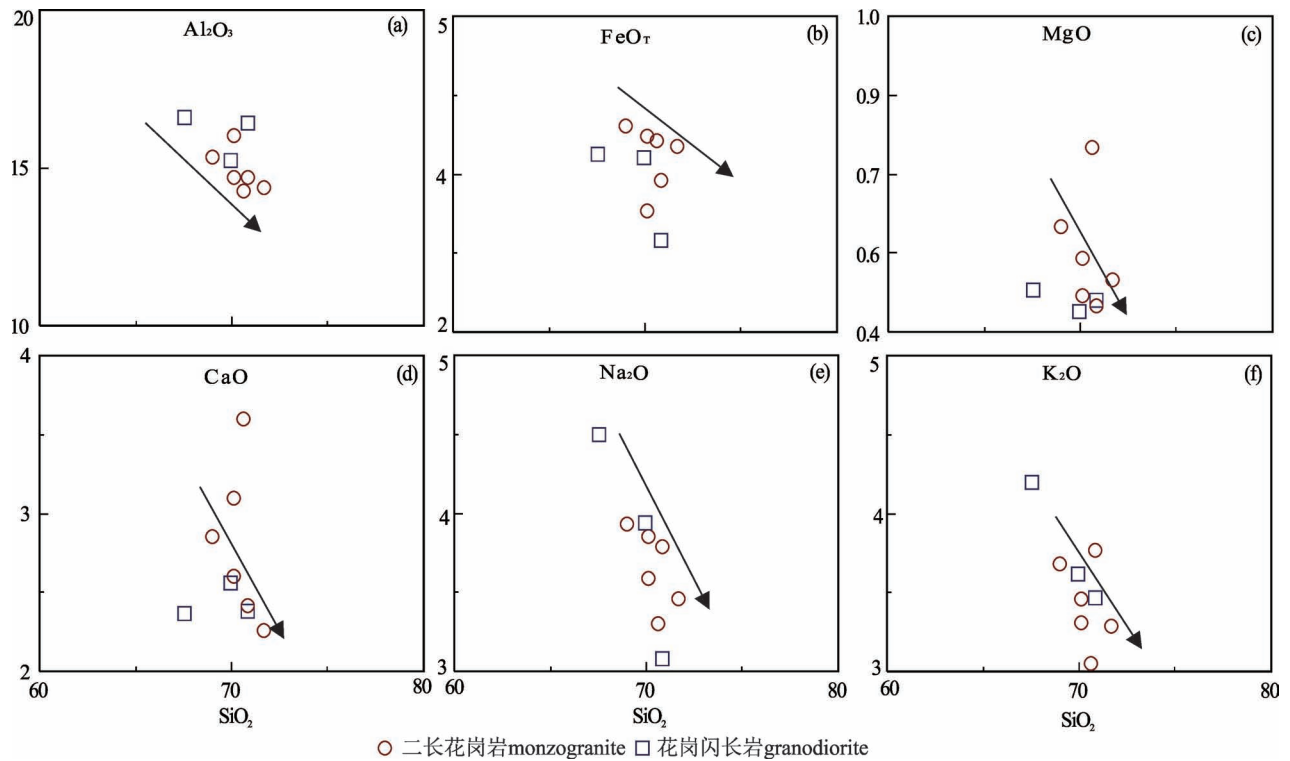


图 9 新疆东昆仑木孜塔格地区碎石沟岩体 Harker 图解

Fig. 9 Harker diagrams for Suishigou pluton in Muztag area, East Kunlun, Xinjiang

昆仑地区经历了一次大洋俯冲(古特提斯洋)到陆内碰撞的转换过程,从而导致东昆仑地区广泛发育与古特提斯构造演化相关的花岗岩(Ding Qingfeng et al., 2014; Huang Hui et al., 2014; Xiong Fuhao et al., 2012; 马昌前等, 2015)。研究表明,中晚二叠世古特提斯洋北支洋盆开始由扩张状态转变为收缩汇聚状态,由南向北朝东昆仑地块之下俯冲(Xiong Fuhao et al., 2012);早—中三叠世洋壳俯冲消减,洋盆消失,发生陆—陆斜向碰撞造山作用(郭正府

等, 1998; 莫宣学等, 2007; 陈国超等, 2017b); 中三叠世晚期—晚三叠世早期东昆仑地区巴颜喀拉地块和东昆仑地块处于陆—陆碰撞阶段(刘金龙等, 2015), 这一时期内岩浆活动相对较弱; 后碰撞造山作用发生在晚三叠世(235 ~ 204 Ma; 莫宣学等, 2007; 张爱奎等, 2012); 晚三叠世末期, 碰撞结束, 东昆仑地区逐渐进入陆内伸展造山阶段, 整个区域上升成陆(丰成友等, 2012)。

通常认为, 洋盆闭合后, 碰撞造山阶段, 主体受

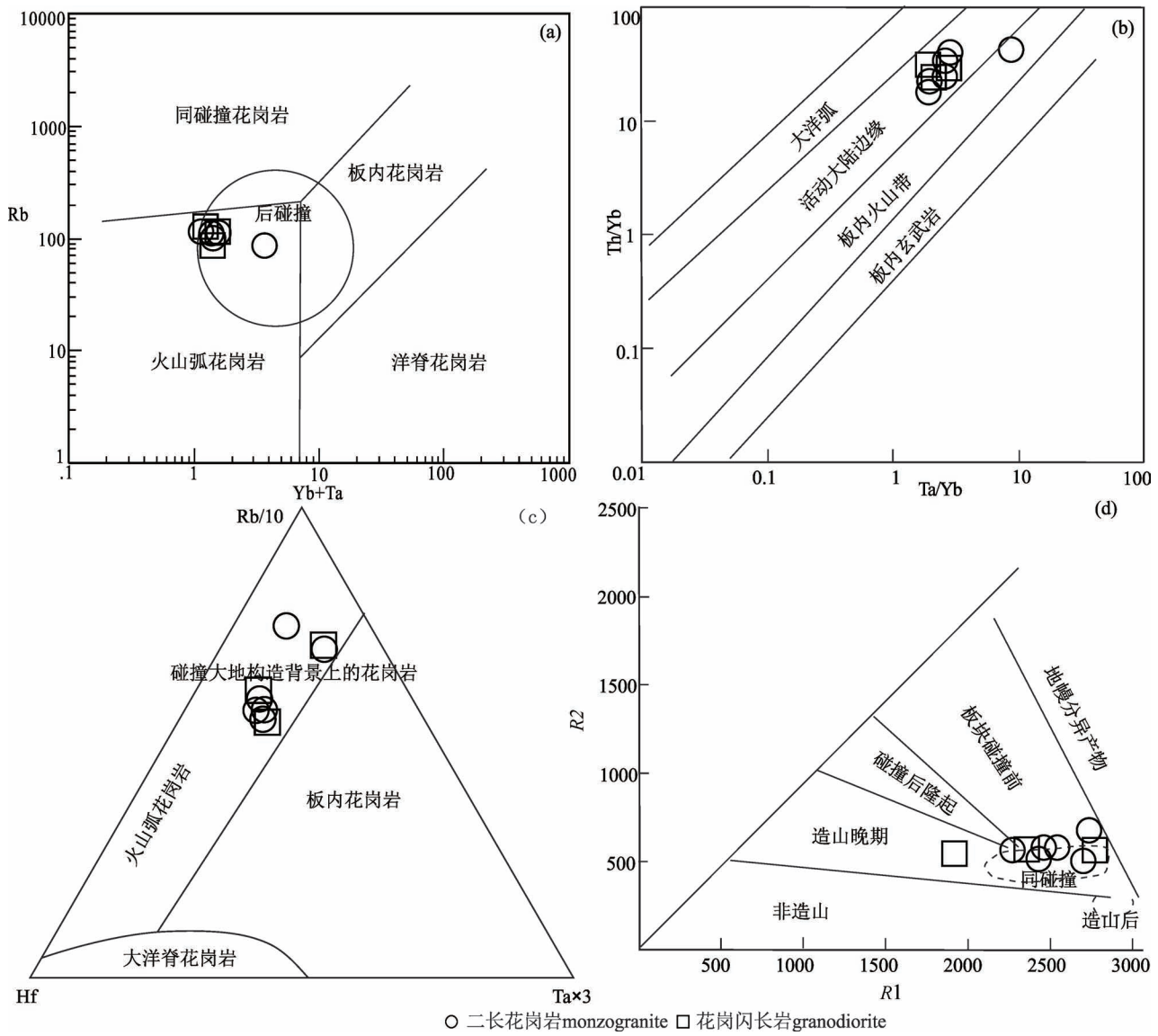


图 10 新疆东昆仑木孜塔格地区碎石沟花岗岩构造环境判别系列图解: (a) Rb—(Yb+Ta) (据 Pearce et al., 1984); (b) Th/Yb—Ta/Yb (据 Gorton and Schandl, 2000); (c) Hf—Rb—Ta (据 Harris et al., 1986); (d) R1—R2 (据 Bachelor et al., 1985; $R1 = 4n(\text{Si}) - 11[n(\text{Na}) + n(\text{K})] - 2[n(\text{Fe}) + n(\text{Ti})]$, $R2 = 6n(\text{Ca}) + 2n(\text{Mg}) + n(\text{Al})$)

Fig. 10 A series of diagrams for distinguishing tectonic environment of Suishigou granite in Muztag area, East Kunlun, Xinjiang: (a) Rb—(Yb+Ta) (after Pearce et al., 1984); (b) Th/Yb—Ta/Yb (after Gorton and Schandl, 2000); (c) Hf—Rb—Ta (after Harris et al., 1986); (d) R1—R2 (after Bachelor et al., 1985; $R1 = 4n(\text{Si}) - 11[n(\text{Na}) + n(\text{K})] - 2[n(\text{Fe}) + n(\text{Ti})]$, $R2 = 6n(\text{Ca}) + 2n(\text{Mg}) + n(\text{Al})$)

挤压应力作用,而后碰撞阶段主体受拉张应力作用,这一阶段经历了挤压环境向陆内伸展—拉张环境的转换过程,同时在这一过程中,由于加厚地壳发生拆沉(离)作用,幔源岩浆底侵作用,导致地壳物质部分熔融,发生壳幔混合作用,形成一系列高钾钙碱性花岗岩(何成等,2018)。从东昆仑地区中晚三叠世形成的大量混合成因花岗岩及基性岩脉来看,该地区存在碰撞后拆沉作用及幔源岩浆底侵事件(邓晋福等,2004),而且在这一时期内(中晚三叠世)区域构造体制由挤压转为伸展。高钾、碱性“A”型花岗岩的出现预示着碰撞造山期结束,即将进入陆内伸展阶段(丰成友等,2012)。

碎石沟花岗岩以二长花岗岩和花岗闪长岩为主,具有高硅、高碱、富铝、低镁铁特征,为准铝质—弱过铝质高钾钙碱性系列岩石;微量元素富集 LREE、Rb、Th、U,亏损 Nb、Ta、Sr、Hf 等,暗示其来源于具有消减带特征的地壳源区。在 Pearce 等(1984)的 Nb—Y 图解中(图 10a),碎石沟花岗岩体样品点主要落于同碰撞花岗岩与火山弧花岗岩交界处;在 Th/Yb—Ta/Yb 构造环境判别图解(图 10b),样品点主要集中在活动大陆边缘环境(Gordon and Schandl, 2000);在 Rb/10—Hf—Ta×3 图解中(图 10c),样品点落在具有碰撞大地构造背景上花岗岩范围内;在花岗岩构造环境 R1—R2 因子判别图解中(图 10d),样品点大多落在同碰撞区与碰撞后隆起区交界处附近,仅个别样品落在造山晚期范围内。总体反映出碎石沟花岗岩形成的构造环境是与碰撞—后碰撞有关的环境。根据 Maniar 等(1989)提出的构造环境判别方法,碎石沟花岗岩属于大陆弧花岗岩类(CAG),是大洋板块俯冲到大陆板块之下形成的。根据 Barbarin(1999)提出的构造环境判别方法,碎石沟花岗岩属于富钾及钾长石斑状钙碱性花岗岩类(KCG),是一种壳幔混源花岗岩(I 型),其形成的地球动力学环境为一种构造体制转化环境。

张宇婷(2018)在充分收集东昆仑二叠纪至三叠纪岩浆岩信息基础上,总结出东昆仑地区印支期岩浆活动可以分为三个阶段,分别为俯冲阶段(240~260 Ma)、同碰撞阶段(230~240 Ma)、后碰撞阶段(210~235 Ma)。碎石沟花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 208.0 ± 1.1 Ma,总体处于后碰撞阶段,对比邻区同时代岩体,如尕斯库勒花岗岩闪长岩(229.4 ± 0.8 Ma,高永宝等,2012)、卡尔却卡二长花岗岩(227 ± 2 Ma,丰城友等,2009)、玛兴达坂二长花岗岩(218 ± 2 Ma,吴祥柯等,2011)、肯德可克外围二长花岗岩($229.0 \pm$

0.5 Ma,肖晔等,2013)、野马泉二长花岗岩(229.5 ± 2.2 Ma,刘建楠等,2017),这些晚三叠世岩体岩石类型以 I 型花岗岩为主,个别为 I—A 过渡型(野马泉二长花岗岩,刘建楠等,2017),形成环境相对松弛,总体处于后碰撞环境。碎石沟花岗岩与上述东昆仑造山带西段花岗岩在岩石地球化学特征、岩石类型及构造环境具有相似性,因此我们认为碎石沟花岗岩为后碰撞阶段产物。

5 结论

(1)碎石沟花岗岩岩性主要为二长花岗岩,锆石 U-Pb 年龄为 208.0 ± 1.1 Ma(MSWD=1.0),代表了碎石沟花岗岩的侵位时代,属于晚三叠世岩浆活动产物。

(2)碎石沟花岗岩具有高硅、高碱、富铝、低铁镁的特征,属于准铝质—弱过铝质高钾钙碱性系列岩石,富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素,相对亏损 Nb、Ta、Hf、Sr 等高场强元素,轻稀土元素明显富集,轻重稀土元素分馏较强,弱负 Eu 异常,具有“I”型花岗岩特征,为下地壳物质部分熔融的产物,同时在形成过程中有少量幔源物质的混入,并且发生了一定程度的幔源岩浆底侵作用及壳幔岩浆混合作用。

(3)碎石沟花岗岩形成于晚三叠世古特提斯洋闭合后碰撞环境,为后碰撞阶段的产物。

注 释 / Note

① 山东省第三地质矿产勘查院. 2018. 新疆若羌县大沙沟一带 1:5 万 (J45E019019、J45E020018、J45E020019、J45E021018、J45E021019)区域地质矿产调查报告. 山东烟台:山东省第三地质矿产勘查院.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

奥琼,孙丰月,李碧乐,王冠,李良,李世金,赵俊伟. 2015. 东昆仑祁漫塔格地区小尖山辉长岩地球化学特征、U-Pb 年代学及其构造意义. 大地构造与成矿学, 39(6): 1176~1184.

陈邦学,徐胜利,杨有生,周能武,朱志新. 2019. 东昆仑西段其木来克一带晚二叠世侵入岩的成因及其构造意义. 地质通报, 38(6): 178~196.

陈国超,裴先治,李瑞保,李佐臣,裴磊,刘战庆,陈有旸,刘成军,高景民,魏方辉. 2013. 东昆仑洪水川地区科科鄂阿龙岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. 地质学报, 87(2): 178~196.

陈国超,裴先治,李瑞保,李佐臣,刘成军,陈有旸,裴磊,王盟,张玉,李小兵. 2017a. 东昆仑东段香加南山花岗岩基斜长石成分组成与岩浆演化和混合作用. 地质学报, 91(12): 2651~2666.

陈国超, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 刘成军, 陈有炘, 裴磊, 张永明, 王盟, 李小兵, 张玉. 2017b. 东昆仑东段香加南山花岗岩基中加鲁河中基性岩体形成时代、成因及其地质意义. 大地构造与成矿学, 41(6): 1097~1115.

陈国超, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 刘成军, 陈有炘, 裴磊, 李小兵. 2018. 东昆仑东段可日正长花岗岩年龄和岩石成因对东昆仑中三叠世构造演化的制约. 岩石学报, 34(3): 567~585.

陈国超, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 裴磊, 刘成军, 陈有炘, 王盟, 高峰, 李小兵. 2019. 东昆仑古特提斯后碰撞阶段伸展作用: 来自晚三叠世岩浆岩的证据. 地学前缘, 26(4): 191~208.

谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 刘成东, 柯珊. 2005. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混成因花岗岩的岩浆底侵作用机制. 中国地质, 32(3): 386~395.

陈加杰, 付乐兵, 魏俊浩, 田宁, 熊乐, 赵玉京, 张玉洁, 齐月清. 2016. 东昆仑沟里地区晚奥陶世花岗岩闪长岩地球化学特征及其对原特提斯洋演化的制约. 地球科学, 41(11): 1863~1882.

邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 莫宣学, 于炳松, 赖兴运, 谌宏伟. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京: 地质出版社: 1~381.

邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 肖庆辉, 狄永军, 苏尚国, 赵国春, 段培新, 戴蒙. 2015. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议. 地质论评, 61(4): 717~734.

丰成友, 李东生, 屈文俊, 杜安道, 王松, 苏生顺, 江军华. 2009. 青海祁漫塔格索拉吉尔砂卡岩型铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其意义. 岩矿测试, 28(3): 223~237.

丰成友, 王松, 李国臣, 马圣钊, 李东生. 2012. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩: 年代学、地球化学及成矿意义. 岩石学报, 28(2): 665~678.

高栋, 吴才来, 郜源红, 张昕, 陈红杰, 郭文峰, 吴迪, 郑坤. 2019. 南阿尔金玉苏普阿勒克塔格花岗岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义. 地球科学, 44(11): 3812~3828.

高永宝, 李文渊, 马晓光, 张照伟, 汤庆艳. 2012. 东昆仑尕斯库勒铁矿床成因年代学及 Hf 同位素制约. 兰州大学学报(自然科学版), 48(2): 36~47.

高永宝, 李文渊, 李侃, 钱兵. 2017. 东昆仑祁漫塔格早中生代大陆地壳增生过程中的岩浆活动与成矿作用. 矿床地质, 36(2): 463~482.

郭正府, 邓晋福, 许志琴, 莫宣学, 罗照华. 1998. 青藏东昆仑晚古生代末中生代中酸性火成岩与陆内造山过程. 现代地质: 12(3): 344~352.

何成, 王力圆, 田立明, 徐净. 2018. 东昆仑哈拉森地区花岗岩类岩石成因及地质意义. 地球科学, 43(4): 1207~1218.

胡朝斌, 李猛, 查显锋, 高晓峰, 李婷. 2018. 东昆仑祁漫塔格晚古生代末期幔源岩浆活动成因及地质意义: 以鹰爪沟岩体为例. 地球科学, 43(12): 4334~4349.

姜春发, 杨经绥, 冯秉贵. 1992. 论开合构造. 北京: 地质出版社: 103~124.

菅坤坤, 朱云海, 王利伟, 高峰, 刘向东, 何元方, 袁璋, 陈继平, 高维强. 2017. 东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石成因及构造意义. 地质论评, 63(3): 659~676.

孔会磊, 李金超, 栗亚芝, 贾群子, 黄军, 南卡俄吾. 2016. 青海祁漫塔格小圆山铁多金属矿区英云闪长岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. 地质科技情报, 5(1): 8~16.

兰朝利, 李继亮, 何顺利, 魏俊之. 2002. 新疆东昆仑木孜塔格俯冲带蛇绿岩—地幔橄榄岩尖晶石证据. 矿物岩石, 22(3): 1~4.

李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社: 94~125.

李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究. 矿物岩石地球化学通报, 29(增刊): 600~601.

李荣社, 计文化, 杨永成. 2008. 昆仑山及邻区地质. 北京: 地质出版社: 1~400.

李猛, 胡朝斌, 查显锋, 高晓峰, 李婷, 姚志亮. 2020. 东昆仑西段阿确墩地区晚古生代花岗岩成因、锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地球科学, 45(7): 2598~2609.

刘成东, 张文秦, 莫宣学, 罗照华, 喻学惠, 李述为, 赵欣. 2002. 东昆仑约格鲁岩体暗色微粒包体特征及成因. 地质通报, 21(11): 739~744.

刘建楠, 丰城友, 何书跃, 裴荣富, 李大新, 瞿泓滢, 白生龙. 2017. 青海野马泉铁锌矿床二长花岗岩锆石 U-Pb 何金云母 Ar-Ar 测年及地质意义. 大地构造与成矿学, 41(6): 1158~1170.

刘金龙, 孙丰月, 李良, 赵菲菲, 王英德, 王硕, 张宇婷. 2015. 青海阿尼玛卿蛇绿混杂岩带西段哥日卓托杂岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素. 地球科学——中国地质大学学报, 40(6): 965~981.

刘云华, 莫宣学, 喻学惠, 张雪亭, 许国武. 2006. 东昆仑野马泉地区忍忍花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 21(11): 739~744.

罗明非, 莫宣学, 喻学惠, 李小伟, 黄雄飞, 于俊川. 2014. 东昆仑香日德地区晚三叠世花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石成因和构造意义. 岩石学报, 30(11): 3229~3241.

罗照华, 柯珊, 曹永清, 邓晋福, 谌宏伟. 2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动. 基础地质, 21(6): 292~297.

马昌前, 熊富浩, 尹烁, 王连训, 高珂. 2015. 造山带岩浆作用的强度和旋回性: 以东昆仑古特提斯花岗岩类岩基为例. 岩石学报, 31(12): 3555~3568.

莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 喻学惠, 刘成东, 谌宏伟, 袁万明, 刘云华. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长. 高校地质学报, 13(3): 403~414.

潘桂堂, 王立全, 李荣社, 王保弟. 2013. 青藏高原及邻区大地构造图及说明书: 1: 1500000. 北京: 地质出版社: 1~208.

钱兵, 高永宝, 李侃, 张照伟, 周安顺, 吴玉诗. 2015. 新疆东昆仑于沟子地区与铁—稀有多金属成矿有关的碱性花岗岩地球化学、年代学及 Hf 同位素研究. 岩石学报, 31(9): 2508~2520.

邵凤丽. 2017. 东昆仑造山带三叠纪花岗岩类和流纹岩类的成因: 洋壳到陆壳的转化. 导师: 牛耀龄. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士学位论文: 1~146.

汤鸿伟, 侯明才, 张杰, 杨伟, 史俊波, 陈琳. 2018. 东昆仑大岔沟地区晚三叠世侵入岩年代学、岩石地球化学特征及 Hf 同位素研究. 地球化学, 47(5): 491~505.

涂其军, 王新昆, 杨子江, 王小虎. 2007. 木孜塔格—鲸鱼湖地区新生代火山岩地球化学特征及其构造意义. 新疆地质, 25(1): 11~17.

王疆涛. 2017. 东昆仑西段平长梁岩体和大沙沟岩体年代学、地球化学及其构造意义. 导师: 董云鹏. 西安: 西北大学硕士学位论文: 1~60.

吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217~1238.

吴才来, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏, 刘春花, 李名则, Frost B R, Joseph L W. 2014. 南阿尔金茫崖地区花岗岩类锆石 SHRIMP U-Pb 定年、Lu—Hf 同位素特征及岩石成因. 岩石学报, 30(8): 2297~2323.

吴峻, 兰朝利, 李继亮, 俞良军. 2001. 新疆东昆仑阿其克库勒湖西缘地区蛇绿岩的确证. 地质科技情报, 20(3): 6~10.

吴祥珂, 孟繁聪, 许虹, 崔美慧. 2011. 青海祁漫塔格玛兴达坂晚三叠世花岗岩年代学、地球化学及 Nd—Hf 同位素组成. 岩石学

报, 27(11): 3380~3394.

吴祥珂. 2012. 东昆仑玛兴达坂地区印支期侵入岩岩石成因. 导师: 许虹. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1~97.

吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589~1604.

徐博, 李海宾, 南燕云, 王成勇, 岳涛, 赵明福. 2019. 祁漫塔格山阿格腾地区晚三叠世火成岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义. 地质论评, 65(2): 353~369.

徐博, 刘建栋, 王成勇, 岳涛, 杨映春, 魏有宁, 史连昌, 柴云. 2020. 东昆仑乌兰拜兴南中三叠世花岗岩成因探讨——LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、元素地球化学及 Sr—Nd—Pb 同位素证据. 地质论评, 66(6): 1516~1529.

谢建成, 夏冬梅, 方德, 闫峻, 杨晓勇, 孙卫东, 李全忠. 2016. 皖南晚中生代花岗岩闪长岩地球化学: 成岩成矿制约. 岩石学报, 32(2): 339~455.

肖晔, 丰城友, 刘建楠, 于森, 周建厚, 李大新, 赵一鸣. 2013. 青海肯德可克铁多金属矿区年代学及硫同位素特征. 矿床地质, 32(1): 177~186.

岳跃破, 程蓉蓉, 姜玉丽. 2020. 东昆仑三岔顶地区鲸鱼湖组火山岩地球化学、年代学特征及其构造意义. 西部资源, (5): 166~171.

殷鸿福, 张克信. 1997. 东昆仑造山带的一些特点. 地球科学—中国地质大学学报, 22(4): 339~342.

张爱奎, 刘光莲, 莫宣学, 刘军培, 张文权, 陈海福, 李云平. 2012. 青海祁漫塔格晚古生代—早中生代侵入岩构造背景与成矿关系. 西北地质, 45(1): 9~19.

张爱奎, 莫宣学, 袁万明, 刘光莲, 朱传宝, 郝娜娜. 2016. 东昆仑西部野马泉地区三叠纪花岗岩成因与构造背景. 矿物学报, 36(2): 157~173.

张宇婷. 2018. 青海东昆仑中段五龙沟矿集区金矿成矿作用研究. 导师: 孙丰月. 长春: 吉林大学博士学位论文: 1~214.

Allègre C J, Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. Earth and Planetary Science Letters, 38(1): 1~25.

Ao Cong, Sun Fengyue, Li Bile, Wang Guan, Li Liang, Li Shijin, Zhao Junwei. 2015&. U-Pb dating, geochemistry and tectonic implications of Xiaojianshan gabbro in Qimantage Mountain, Eastern Kunlun orogenic belt. Geotectonica et Metallogenia, 39(6): 1176~1184.

Bachelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. Hemical Geology, 48(1~4): 43~55.

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. Lithos, 46(3): 605~626.

Boynnton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; Meteorite Studies In; Henderson P (ed.). Rare Earth Element Geocheenistry. Amsterdam: Elsevier, 63~114.

Chappell B W, White A J. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. Australian Journal of EarthSciences, 48(4): 489~499.

Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. Lithos, 46(3): 535~551.

Chen bangxue, Xu Shengli, Yang Yousheng, Zhou Nengwu, Zhu Zhixin. 2019&. Genesis and tectonic significance of Late Permian Qimulaike intrusive rocks in the west of East Kunlun Mountains, Xinjiang. Geological Bulletin of China, 38(6): 178~196.

Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuozhen, Pei Lei, Liu Zhanqing, Chen Youxin, Liu Chengjun, Gao Jingmin, Wei Fanghui. 2013&. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geological significance of Cocoe A'Long Quartz Diorites Body from the Hongshuichuan Area in East Kunlun. Acta Geologica Sinica, 87(2): 178~196.

Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuochen, Liu Chengjun, Chen Youxin, Pei Lei, Wang Meng, Zhang Yu, Li Xiaobing. 2017a&. Components of the plagioclase of granitic batholith in Xiangjiananshan in the eastern section of East Kunlun and their implications for Magma evolution and mixing effect. Acta Geologica Sinica, 91(12): 2651~2666.

Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li zuochen, Liu Chengjun, Chen Youxin, Pei Lei, Zhang Yongming, Wang Meng, Li Xiaobing, Zhang Yu. 2017b&. Age and petrogenesis of Jialuhe basic—intermediate pluton in Xiangjia'nanshan granite batholith in the eastern part of East Kunlun Orogenic Belt, and its geological significance. Geotectonica et Metallogenia, 41(6): 1097~1115.

Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li zuochen, Liu Chengjun, Chen Youxin, Pei Lei, Li Xiaobing. 2018&. Age and lithogenesis of Keri syenogranite from eastern part of East Kunlun Orogenic Belt: Constraint on the Middle Triassic tectonic evolution of East Kunlun. Acta Petrologica Sinica, 34(3): 567~585.

Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li zuochen, Pei Lei, Liu Chengjun, Chen Youxin, Wang Meng, Gao Feng, Li Xiaobing. 2019&. Lithospheric extension of the post-collision stage of the Paleo-Tethys oceanic system in the East Kunlun Orogenic Belt: insights from Late Triassic plutons. Earth Science Frontiers, 26(4): 191~208.

Chen Hongwei, Luo Zhaozhua, Mo Xuanxue, Liu Chengdong, Ke Shan. 2005&. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the East Kunlun orogenic belt. Geology China, 32(3): 386~395.

Chen Jiajie, Fu lebing, Wei Junhao, Tian Ning, Xiong Le, Zhao Yujing, Zhang Yujie. 2016&. Geochemical characteristics of Late Ordovician granodiorite in Gouli area, Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province: Implications on the evolution of Proto-Tethys Ocean. Editorial Committee of Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 41(11): 1863~1882.

Collins W, Beams S, White A. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. Contributions to Mineralogy and Petrology, 80(2): 189~200.

Deng Jinfu, Luo Zhaozhua, Su Shangguo, Mo Xuanxue, Yu Bingsong, Lai Xingyun, Chen Hongwei. 2004#. Petrogenesis, Tectonic Setting and Mineralization. Beijing: Geological Publishing House: 1~381.

Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo,Zhao Guochun, Duan Peixin,Dai Meng. 2015&. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: Discussion and suggestion. Geological Review,61(4):717~734.

Ding Qingfeng, Jiang Shaoyong, Sun Fengyue. 2014. Zircon U-Pb geochronology, geochemical and Sr—Nd—Hf isotopic compositions of the Triassic granite and diorite dikes from the Wulonggou mining area in the Eastern Kunlun Orogen, NW China: petrogenesis and tectonic implications. Lithos, 205: 266~283.

Dong Yunpeng, He Dengfeng, Sun Shengsi, Liu Xiaoming, Zhou Xiaohu, Zhang Feifei, Yang Zhao, Cheng Bin, Zhao Guochun, Li Jianhua. 2018. Subduction and accretionary tectonics of the East Kunlun orogen, western segment of the Central China Orogenic System. Earth-Science Reviews, 186: 231~261.

- Feng Chengyou, Li Dongsheng, Qu Wenjun, Du Andao, Wang Song, Su Sheng-sun, Jiang Junhua. 2009&. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Suolajier skarn-type copper—molybdenum deposit of Qimantage mountain in Qinghai Province and its geological significance. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 223~237.
- Feng Chengyou, Wang Song, Li Guoheng, Ma Shengqian, Li Dongsheng. 2012&. Middle to Late Triassic granitoids in the Qimantage area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 665~678.
- Gao Dong, Wu Cailai, Gao Yuanhong, Guo Wenfeng, Wu Di, Zheng Kun. 2019&. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions of the Yusupuleke granitic pluton from the south Altyn and its implication on the Early Paleozoic tectonic evolution of the south Altyn. *Earth Science*, 44(11): 3812~3828.
- Gao Yongbao, Li Wen yuan, Ma Xiaoguang, Zhang Zhaowei, Tang Qingyan. 2012&. Genesis, geochronology and Hf isotopic compositions of the magmatic rocks in Galinge iron deposit, eastern Kunlun. *Journal of Lanzhou University(Natural Science)*, 48(2): 36~47.
- Gao Yongbao, Li Wen yuan, Li Kan, Qian Bing. 2017&. Magmatism and mineralization during Early Mesozoic continental accretion process in Qimantag, East Kunlun Mountains. *Mineral Deposits*, 36(2): 463~482.
- Gorton M P, Schandl E S. 2000. From continents to Island Arcs: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *Canadian Mineralogist*, 38(5): 1065~1073.
- Guo Zhengfu, Deng Jin fu, Xu Zhi qin, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua. 1998&. Late Paleozoic Mesozoic intermediate acid igneous rocks and intracontinental orogeny in Eastern Kunlun, Qinghai Tibet. *Geoscience*, 12(03): 344~352.
- He Cheng, Wang Li yuan, tianliming, Xujing. 2018&. Petrogenesis and geological implications of granitoids from Halasen, East Kunlun. *Earth Science*, 43(4): 1207~1218.
- Harris N B W, Pearce J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward M P and Reis A C, Collision tectonics. Spec. Publ. Grol. Soc. Lond., 19: 67~81.
- Hu Chaobin, Li Meng, Cha Xianfeng, Gao Xiaofeng, Li Ting. 2018&. Genesis and geological significance of Late Paleozoic mantle-derived magmatism in Qimantag, East Kunlun; A case study of intrusion in Yingzhuagou. Editorial Committee of Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 43(12): 4334~4349.
- Huang Hui, Niu Yaoling, Nowell Geoff, Zhao Zhidan, Yu Xuehui, Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Ding Shuo. 2014. Geochemical constraints on the petrogenesis of granitoids in the East Kunlun Orogenic belt, northern Tibetan Plateau: implications for continental crust growth through syn-collisional felsic magmatism. *Chemical Gology*, 370: 1~18.
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523~548.
- Jian Kunkun, Zhu Yunhai, Wang Liwei, Gao Feng, Liu Xiangdong, He Yuanfang, Yuan Zhang, Chen Jiping, Gao Weiqiang. 2017&. Zircon LA-ICP MS age dating, petrogenesis and tectonic implications of the Middle Triassic granites from the Zhongzaohuo area, East Kunlun. *Geological Review*, 63(3): 659~676.
- Kong Huilei, Li Jinchao, Li Yazhi, Jia Qunzi, Huang Jun, Namkha Norbu. 2016&. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating and its geological implications of the Tonalite from Xiaoyuanshan iron—polymetallic ore district in Qimantag Mountain, Qinghai Province. *Geological Science and Technology Information*, 5(1): 8~16.
- Lan Chaoli, Li Jiliang, He Shunli, Wei Junzhi. 2002&. Mineralogical evidence for subduction zone ophiolite, Muztag, East Kunlun of Xinjiang. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 22(3): 1~4.
- Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, Zhang Yongqing, Li Huimin. 2009#. Determination of U-Pb isotopic age of zircon by laser ablation multi receiver plasma mass spectrometer (LA-MC-ICP MS). *Acta Mineralogica Sinica*, 29(zl): 600~601.
- Li Meng, Hu Chaobin, Zha Xianfeng, Gao Xiaofeng, Li Ting, Yao Zhiliang. 2020&. Genesis, zircon U-Pb geochronology and geological significance of Late Paleozoic granite in Aquedun, the west of East Kunlun Mountains. Editorial Committee of Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 45(7): 2598~2609.
- Liu Chengdong, Zhang Wenqin, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Yu Shuwei, Zhao Xin. 2002&. Features and origin of mafic microgranular enclaves in the Yuegelu granite in the Eastern Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 739~744.
- Liu Jiannan, Feng Chengyou, He Shuyue, Pei Rongfu, Li Daxin, Qu Hongying, Bai Shenglong. 2017&. Zircon U-Pb and phlogopite Ar-Ar ages of the monzogranite from Yemaquan iron—zinc deposit in Qinghai Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(6): 1158~1170.
- Liu Jinlong, Sun Fengyue, Li liang, Zhao Feifei, Wang Yingde, Wang Shuo, Zhang Yuting. 2015&. Geochronology, geochemistry and Hf isotopes of Gerizhuotuo complex intrusion in west of Anyemaqen suture zone. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(6): 965~981.
- Liu Yunhua, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, Zhang Xueting, Xu Guowu. 2006&. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Jingren granite, Yemaquan region of the east Kunlun and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21(11): 739~744.
- Luo Mingfei, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, Li Xiaowei, Huang Xiongfei, Yu Junchuan. 2014&. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age dating, petrogenesis and tectonic implications of the Late Triassic granites from the Xiangride area, East Kunlun. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3229~3241.
- Luo Zhaohua, Ke Shan, Cao Yongqing, Deng Jin fu, Chen Hongwei. 2002&. Late Indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 292~297.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3. 0: A Geo-chronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geo-chronology Center, Berkeley.
- Ma changqian, Xiong Fuhao, yinshuo, Wang lianxun, Gao Ke. 2015&. Intensity and cyclicity of orogenic magmatism: An example from a Paleo-Tethyan granitoid batholith, Eastern Kunlun, northern Qinghai—Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3555~3568.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Meng Fancong, Cui Meihui, Wu Xiangke, Ren Yufeng. 2015. Heishan mafic—ultramafic rocks in the Qimantag area of Eastern Kunlun, NW China: remnants of an early Paleozoic incipient island arc. *Gondwana Research*, 27(2): 745~759.

- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/ igneous rocksystem. *Earth-Science Reviews*, 37: 215~224.
- Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, Yu Xuehui, Liu Chengdong, Chen Hongwei, Yuan Wanming, Liu Yunhua. 2007&. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun orogenic belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403~414.
- Pearce J A, Harris N B M and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Qian Bing, Gao Yongbao, Li Kan, Zhang Zhaowei, Zhou Anshun, Wu Yushi. 2015&. Zircon U—Pb—Hf isotopes and whole rock geochemistry constraints on the petrogenesis of iron—rare metal mineralization related alkaline granitic intrusive rock in Yugouzi area, eastern Kunlun, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2508~2520.
- Rudnick R, Gao Shan. 2014. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*, 4: 1~51.
- Shao Fengli. 2017&. Petrogenesis of Triassic granitoids and rhyolites in the East Kunlun Orogenic Belt and their tectonic implications. Dissertation Supervisor: Professor Niu Yaoling. Qingdao: Doctoral Dissertation of The University of Chinese Academy of Science: 1~146.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313~345.
- Tang Hongwei, Hou Mingcai, Zhang Jie, Yang Wei, Shi Junbo, Chen Lin. 2018&. Geochronology, geochemistry, and Hf isotopic composition of the Late Triassic intrusive rocks from Dachagou area, East Kunlun. *Geochimica*, 47(5): 491~505.
- Tischendorf G. 1986. Classification of grantioids. *Abroad Geological Science and Technology*, 7: 25~33.
- Tu Qijun, Wang Xinkun, Yang Zijiang, Wang Xiaohu. 2007&. Geochemical characteristics and tectonic significance of Cenozoic volcanic rocks in Muztag cetacean Lake area. *Xinjiang Geology*, 25(1): 11~17.
- Wang Jiangtao. 2014&. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of the Pingchangliang and Dashagou plutons, West Segment of East Kunlun Orogen. Supervisor: Professor Dong Yunpeng. Xi'an: Master's thesis of Northwest University: 1~60.
- Wolf M B, London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts; an experimental study of solubilities and mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(19): 4127~4145.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007&. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrol Sinica*, 23(6): 1217~1238.
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Lei Min, Qin Haipeng, Liu Chunhua, Li Mingze, FROST B R, Joseph L W. 2014&. Zircon SHRIMP U-Pb dating, Lu—Hf isotopic characteristics and petrogenesis of the Palaeozoic granites in Mangya area, southern Altun, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2297~2323.
- Wu Jun, Lan Chaoli, Li Ji liang, Yu liangjun. 2001&. Determination of ophiolite at the western margin of Aqikekule Lake, East Kunlun Of Xinjiang. *Geological Science and Technology Information*, 20(3): 6~10.
- Wu Xiangke, Meng Fancong, Xu Hong, Cui Meihui. 2011&. Zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd—Hf isotopic compositions of the Maxingdaban Late Triassic granitic pluton from Qimantag in the eastern Kunlun. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3380~3394.
- Wu Xiangke. 2012&. A Study on Petrogenesis of the Intrusive Rocks of Maxindaban Area of the East Kunlun Region during Indosinian. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfe. 2004#. Genetic mineralogy of zircons and its constraints on U-Pb age interpretation. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589~1604.
- Xu Bo, Li Haibin, Nan Yanyun, Wang Chengyong, Yue Tao, Zhao Mingfu. 2019&. LA- MC- ICP- MS Zircon U- Pb ages, geochemical characteristics and tectonic significance of the Late Triassic igneous rocks in Agateng area, Qimantage Mountains. *Geological Review*, 65(2): 353~369.
- Xu Bo, Liu Jiandong, Wang Chengyong, Yue Tao, Yang Yingchun, Wei Youning, Shi Lianchang, Chai Yun. 2020&. Genesis of the Middle Triassic granites in southern Wulanbaixing, Eastern Kunlun: Constraints from LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb ages, element geochemical and Sr—Nd—Pb isotopic evidences. *Geological Review*, 66(6): 1516~1529.
- Xia Rui, Wang Changming, Deng Jun, Emmanuel John M. Carranza, Li Wenliang, Qing Min. 2014. Crustal thickening prior to 220 Ma in the East Kunlun Orogenic Belt: insights from the Late Triassic granitoids in the Xiao-Nuomuhong pluton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 93(1): 193~210.
- Xie Jiancheng, Xia Dongmei, Fang De, Yan Jun, Yang Xiaoyong, Sun Weidong, Li Quanzhong. 2016&. Geochemistry of Late Mesozoic granodiorites in southern Anhui Province: Constraints for rock- and ore-forming. *Acta Petrologica Sinica*, 32(2): 339~455.
- Xiong Fuhao, Ma Changqian, Zhang Jinyang, Liu Bin. 2012. The origin of mafic microgranular enclaves and their host granodiorites from East Kunlun, Northern Qinghai—Tibet Plateau: implications for magma mixing during subduction of Paleo-Tethyan lithosphere. *Mineralogy and Petrology*, 104: 211~224.
- Yin Hongfu, Zhang Kexin. 1997#. Some Characteristics of the East Kunlun Orogenic Belt. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(4): 339~342.
- Yue Yuepo, Cheng Rongrong, Jiang Yuli. 2020&. Volcanic rock geochemical, chronological characteristics and tectonic significance of the Jingyuhu Formation in the sanchading area of Eastern Kunlun. *Western Resources*, (5): 166~171.
- Zhang Aikui, Liu Guanglian, Mo Xuanxue, Liu Junpei, Zhang Wenquan, Chen Haifu, Li Yunping. 2012&. Relationship between tectonic settings and metallo genesis of Late Paleozoic—Early Mesozoic intrusive rock in Qimantage, Qinghai Province. *Northwestern Geology*, 45(1): 9~19.
- Zhang Aikui, Mo Xuanxue, Yuan Wanming, Liu Guanglian, Zhu Chuanbao, Ha Na. 2016&. Petrogenesis and tectonic setting of Yemaquan Triassic granite from the west of the Eastern Kunlun Mountain Range, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 36(2): 157~173.
- Zhang Yuting. 2018&. Research on metallogenesis of gold deposits in the Wulongou ore concentration area, central segment of the east Kunlun Mountains, Qinghai Province. Supervisor: Professor Sun Fengyue. Changchun: Doctoral Dissertation of Jilin University: 1~214.

LA-MC-ICP-MS Zircon U-Pb age, petrogeochemical features of
Suishigou granitic pluton in Muztag area, east Kunlun,
Xinjiang, and their geological implications

LU Hao^{1, 2)}, LIU Huan^{1, 2)}, WAN Peng¹⁾, BO Junwei¹⁾, LI Jintao¹⁾, SUN Jingyao¹⁾

1) Shandong No. 3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai, Shandong, 264004;

2) School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an, 710054

Objectives: The Suishigou granitic pluton is located in Muztag area, western part of the east Kunlun orogenic belt and is one of the main granitic plutons within the area. In order to find out the genetic types, material sources and formation ages of the pluton, and further discuss the regional tectonic evolution history of Muztag area in East Kunlun.

Methods: Detailed geological survey, petrology, LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of monzogranite and whole rock geochemical of the Suishigou igneous rocks in Muztag area, East Kunlun, Xinjiang.

Results: Petrological study shows that the pluton is characterized by high silicon, high alkali and rich aluminum ($\text{SiO}_2 = 67.54\% \sim 71.56\%$), $\text{Na}_2\text{O} = 3.08\% \sim 4.50\%$, $\text{K}_2\text{O} = 3.05\% \sim 4.20\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.26\% \sim 16.58\%$), belonging to the metaaluminous to weakly peraluminous high-K calc alkaline series. They display high REE contents ($126.25 \times 10^{-6} \sim 160.13 \times 10^{-6}$), enrichment in LREE, Rb, Th, K, depletion in HREE, Nb, Ta, Hf, Sr, and slightly negative Eu anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.68 \sim 0.84$). On this basis, we suggest that the studied granitoids belong to I-type granite. The zircon U-Pb age of the pluton is $208.0 \pm 1.1 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.0$), indicating the Suishigou granitic pluton is formed in the Late Triassic.

Conclusions: Combined with the characteristics of regional tectonic evolution, the Shizigou granite was derived from partial melting of lower crust, and there was underplating of mantle derived magma and mixing of crust mantle magma during its formation. Its tectonic setting was post collisional environment.

Keywords: I-type granite; U-Pb geochronology; geochemistry; geological implication; East Kunlun

Acknowledgements: This research was supported by the project of 1 : 50000 regional geological and mineral survey in Dashagou area, Ruoqiang, Xin Jiang (No. XB-DK-2015-1-05) and 1 : 50000 regional geological and mineral survey in Sanchading area, East Kunlun, Xinjiang (No. K16-1-LQ22)

First author: LU Hao, male, born in 1988, master degree graduate, Geological and Mineral Exploration Engineer; Email: 347897634@qq.com

Corresponding author: WAN Peng, male, born in 1983, master degree graduate, Senior engineer of Geology and mineral exploration; Email: 23921283@qq.com

Manuscript received on: 2021-03-12; Acceptedon: 2021-05-27; Network published on: 2021-06-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 06. 061 **Edited by:** HUANG Daomao, LIU Zhiqiang