

新疆阿尔泰山西段乞格拉塔乌岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄及其地质意义

王星^{1,2)}, 蔺新望^{1,2)}, 张亚峰^{1,2)}, 何元方^{1,2)}, 赵端昌^{1,2)}, 菅坤坤^{1,2)}, 陈光庭³⁾

1) 陕西省矿产地质调查中心, 西安, 710068;

2) 陕西省地质调查院, 西安, 710054; 3) 青海省地质调查院, 西宁, 810012

内容提要: 新疆阿尔泰山西段发育的花岗岩体缺乏精确地锆石 U-Pb 同位素年龄资料。本次在乞格拉塔乌岩体中获得了 425.1 ± 4.4 Ma 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄数据, 将其形成时代厘定为中志留世。岩石 SiO_2 含量在 64.07%~73.77% 之间, Al_2O_3 含量为 12.40%~15.71%, A/CNK 值为 1.02~1.10, 全碱 (ALK) 含量为 5.85%~7.93%, 里特曼指数 (σ) 为 1.62~2.24, 具有弱过铝质、高钾钙碱性系列花岗岩特征; 稀土总量介于 166.3×10^{-6} ~ 197.2×10^{-6} 之间, 轻、重稀土分馏明显, δEu 值介于 0.47~0.63 之间, 具明显负 Eu 异常。微量元素富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素及 La、Ce、Sm 等, 亏损 Nb、Zr 等高场强元素及 Sr、P、Ti 等, 具有低 Sr 高 Yb 的特征 (Sr 含量在 93.7×10^{-6} ~ 211×10^{-6} , Yb 含量在 2.1×10^{-6} ~ 3.9×10^{-6})。研究表明, 古亚洲洋从奥陶纪开始向北俯冲, 一直持续到晚古生代中晚期。早古生代末期形成的乞格拉塔乌岩体, 既有俯冲环境特征, 又显示了后碰撞花岗岩类特点, 其复杂的成因可能与古亚洲洋存在洋中脊俯冲作用有关。

关键词: 中志留世; 洋脊俯冲; 后碰撞花岗岩; 阿尔泰山西段; 新疆北部

大陆造山带在复杂的演化历史和大陆生长过程中, 即从裂谷、大洋扩张、洋壳俯冲、大洋闭合、大陆碰撞/俯冲、山脉形成和垮塌, 伴随有不同程度的岩浆作用 (Handy et al., 2010; Zheng Yongfei, 2012; Song Shuguang et al., 2014; 宋述光等, 2015)。阿尔泰造山带作为中亚造山带的重要组成部分, 是古亚洲洋演化过程中的一系列块体、岛弧和增生杂岩构成的增生型造山带 (Sengör et al., 1993; Xiao Wenjiao et al., 2004)。古亚洲洋在扩张、俯冲、碰撞过程中形成大量的岩浆产物, 在新疆北部阿尔泰造山带大面积出露的侵入岩以花岗岩类为主, 总面积约占全区的 40% (王中刚等, 1998), 这些花岗岩具有多时代、多类型、多成因、多来源等特征, 是研究阿尔泰造山带构造演化历史的重要载体 (Wang Tao et al., 2006; 曾乔松等, 2007; 王涛等, 2010; 邓晋福等, 2015c)。近年来, 利用花岗岩类地球化学、年代学及 Sr、Nd 同位素等方法, 揭示出阿尔泰造山带经历了不同演化阶段的岩浆作用, 根据阿尔泰地区花岗岩

类年龄数据的统计结果, 可将其划分为 3 个阶段 5 个期次, 分别为早中古生代的 470~440 Ma 和 425~360 Ma、晚古生代的 355~318 Ma 和 245~190 Ma 及早中生代的 245~190 Ma, 其中 425~360 Ma 的花岗岩可细分为 425~390 Ma 和 380~360 两个峰期, 尤以前者的岩浆作用最为剧烈 (曾乔松等, 2007; 王涛等, 2005, 2010)。但有关岩浆活动的成因及方式一直存在较大争议: 一种观点认为古亚洲洋的俯冲作用可以追溯到奥陶纪, 至泥盆纪俯冲达到鼎盛时期, 伴随有剧烈的岩浆活动 (Windley et al., 2002; 王涛等, 2005; Wang Tao et al., 2006; Niu Hecai et al., 2006; 童英, 2006; 童英等, 2007; 曾乔松等, 2009; 柴凤梅等, 2009, 2010; 刘国仁等, 2010; 宋鹏等, 2017; 黄博涛等, 2017); 另一种观点认为古亚洲洋中存在微古陆壳板块, 阿尔泰在早古生代阶段仍处于被动陆缘陆壳增生阶段, 在多岛弧俯冲、碰撞的复杂演化过程中形成了成因复杂的岩浆岩 (张海祥等, 2003a, 2003b; 肖文交等, 2006; 李会军等, 2006, 2010; Yuan

注: 本文为中国地质调查局“阿尔泰成矿带喀纳斯与东准地区地质矿产调查”(项目编号: DD20160006)、“新疆阿尔泰 1:5 万 (M45E018012、M45E018013、M45E018014、M45E018015、M45E018016) 五幅区域地质矿产调查”项目 (项目编号: 12120114040601) 的成果。

收稿日期: 2018-05-21; 改回日期: 2019-02-24; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.02.008

作者简介: 王星, 男, 1988 年生, 工程师, 主要从事区域地质调查工作, 通讯地址: 710068, 陕西省西安市碑林区友谊西路 243 号, Email: star_cug@126.com。

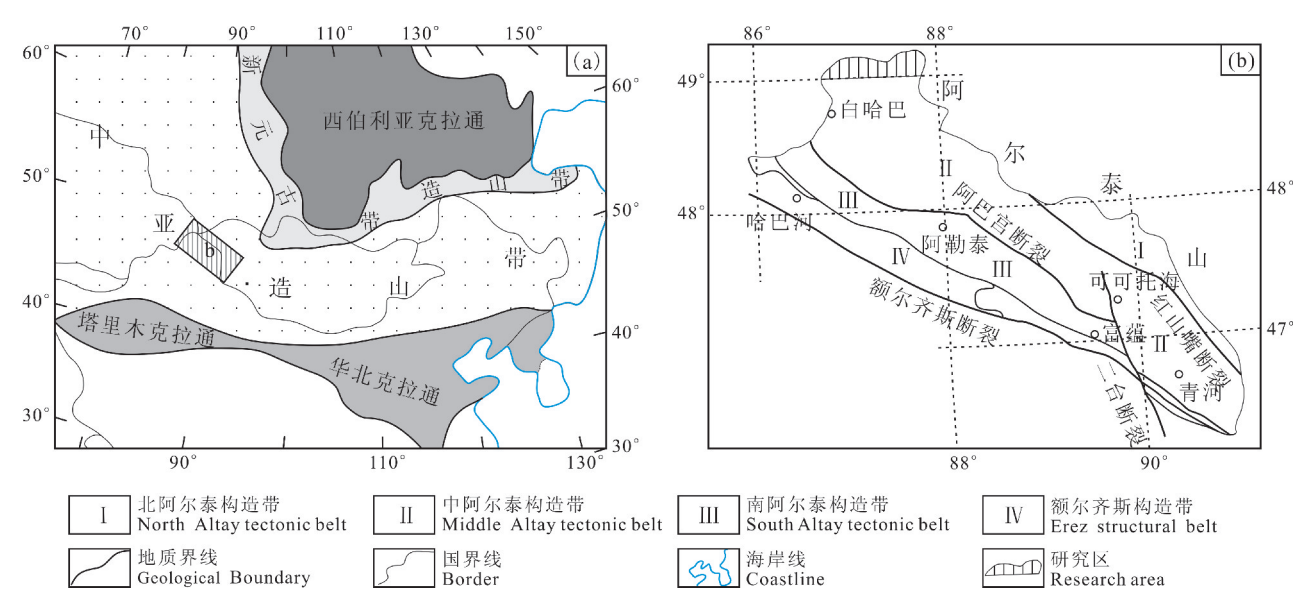


图 1 阿尔泰山造山带构造位置图(a)、构造分区图(b) (据何国琦等,1990; Windley et al.,2002;孙敏等,2009)

Fig. 1 Tectonic position (a) and division of Altay orogenic belt (b)

(after He Guoqi et al. , 1990& ; Windley et al. , 2002; Sun Min et al. , 2009&)

Chao et al.,2007;秦克章等,2017;李晓光等,2018;杨富全等,2018);还有学者认为阿尔泰山造山带丰富多样的岩浆岩组合,可能与洋中脊俯冲有关(刘希军等,2007;杨富全等,2008;孙敏等,2009;沈晓明等,2010;董连慧等,2012)。

新疆北部阿尔泰山西段发育的岩体,因交通、地理、边境等多方面条件限制,研究程度不足,仅有 20 世纪 70 年代末取得的 1 : 20 万基础地质资料,花岗岩类研究的方法仍停留在根据构造岩浆旋回的理论,按期、次、阶段的原则划分岩石的期次,确定岩浆侵入顺序,而缺少精确的年代学、地球化学数据。新疆阿尔泰山友谊峰等 1 : 5 万五幅区域地质调查工作的开展,是补充这一区域新资料的良好契机,本次研究获得的乞格拉塔乌岩体的年代学、岩石地球化学等资料,为完善阿尔泰山造山带岩浆演化的研究提供了有力的证据。

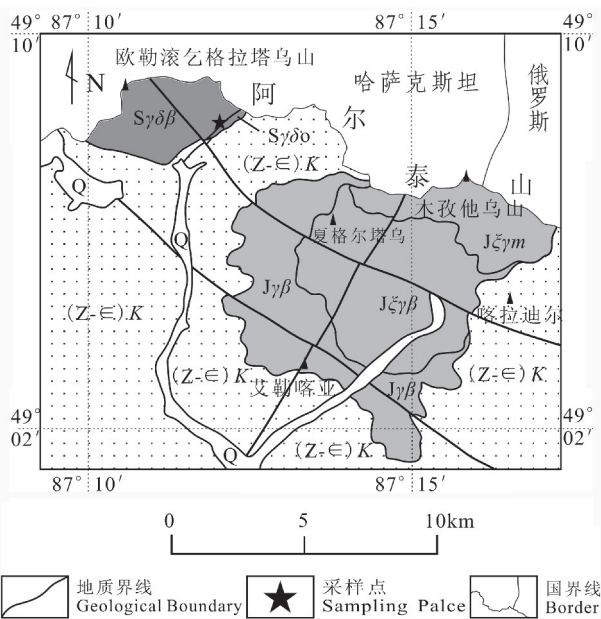
1 区域地质概况

阿尔泰山造山带位于新疆北部,沿北西—南东向横贯中—蒙—俄—哈四国,北邻西萨彦岭岛弧带,南侧以额尔齐斯断裂与准噶尔地块相接,全长约 2000 km,是中亚造山带的重要组成部分(图 1a)。中国阿尔泰山位于其西南缘,在中国境内的部分约有 500 km,大地构造位置属西伯利亚板块南部大陆边缘增生区,为古亚洲洋域的北带(何国琦等,1990;

Windley et al.,2002)。以红山嘴—诺尔特断裂和阿巴宫—库尔特提断裂为界,可将阿尔泰山造山带由北向南依次划分为:北阿尔泰、中阿尔泰和南阿尔泰三个地块(图 1b)(Xiao Wenjiao et al.,2004)。北阿尔泰块体主要由震旦—寒武系、上泥盆统—下石炭统火山—沉积岩组成;中阿尔泰块体主要由震旦系—下古生界深变质岩系和奥陶—侏罗纪侵入岩组成,多个时期的花岗岩在该区均有发育,以早中古生代为主;南阿尔泰块体主要由元古宇片麻岩和泥盆纪火山—沉积岩系组成。本次研究区属中阿尔泰块体。

2 岩体及岩石学特征

乞格拉塔乌岩体位于新疆北部阿尔泰山西段(图 2),国内最高海拔 3000m 左右,岩体中心坐标为东经 87°07'15",北纬 49°08'27",出露面积约 7 km²,以最高峰乞格拉塔为界,北部延伸至哈萨克斯坦,本次仅对国内部分进行了研究。岩体呈不规则状小岩枝侵入震旦系—寒武系喀纳斯群中,侵入界线弯曲,侵入关系清楚,接触面倾向东、倾角约 50°,并有岩体脉枝穿入地层砂岩中。围绕岩体边缘,外围地层发生角岩化、硅化、绿泥石化和绿帘石化等,内接触带仅有混染现象。岩体中发育暗色闪长质包体,受应力作用影响,拉伸变形,呈透镜状或条带状(图 3a),未见地层捕虏体。该岩体岩性较为单一,主体为一套灰—灰白色中粒黑云母花岗闪长岩,构



成岩体的中心相,岩体东部有宽 0.5~1 km 的中细粒边缘相,岩性为中细粒黑云母英云闪长岩,岩体中心局部出现斑状结构。

黑云英云闪长岩:灰色,中细粒半自形柱状结构、块状构造。主要组成矿物为斜长石(64%~65%),呈半自形柱状、稍洁净、钠长石双晶清楚,显示环形消光,利用最大消光角法测得 $An=22\sim24$,为更长石,粒径可分为 1~1.5 mm 细粒级和 2~3 mm 中粒级;石英(23%~24%),它形填隙粒状;黑云母(9%~10%),半自形片状,浅黄绿色;另有少量钾长

图 2 新疆阿尔泰西段乞格拉塔乌岩体地质简图
(据简新望等^①修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Qigelatawu intrusion in western Altay Mountains, Xinjiang (revised from Lin Xinwang et al.^①)

Q—第四系;(Z—Є)K—震旦系—寒武系喀纳斯群;
J $\gamma\beta$ —侏罗纪黑云母花岗岩;J $\xi\gamma\beta$ —侏罗纪黑云母正长花岗岩;J $\xi\gamma m$ —侏罗纪白云母正长花岗岩;S $\gamma\delta o$ —志留纪英云闪长岩;S $\gamma\delta\beta$ —志留纪黑云母花岗岩闪长岩
Q—Quaternary;(Z—Є)K—Sinian to Cambrian Kanas Group;J $\gamma\beta$ —Jurassic Biotite Granite;J $\xi\gamma\beta$ —Jurassic Biotite Syenogranite;J $\xi\gamma m$ —Jurassic Muscovite Syenogranite;S $\gamma\delta o$ —Silurian Tonalite; S $\gamma\delta\beta$ —Silurian Biotite Granodiorite

石和次生绢云母矿物(图 3b)。副矿物主要为磁铁矿、榍石、磷灰石、锆石等。

黑云花岗岩闪长岩:灰色,中粒它形粒状结构、块状构造。主要组成矿物为斜长石(48%~49%),呈它形—半自形柱粒状、混浊、钠长石双晶不清,粒径多为 2~3 mm 中粒级,个别 4 mm;石英(24%~25%),它形填隙粒状;钾长石(22%~23%),呈它形粒状,洁净,格子双晶清晰,系微斜长石;黑云母(3%~4%),半自形片状,为浅黄绿色。副矿物主要为褐帘石、榍石、钛铁矿、磷灰石、锆石等。岩石蚀变特征表现为斜长石具明显的绿帘石化、绢云母化,造成晶体混浊,黑云母个别绿泥石化。

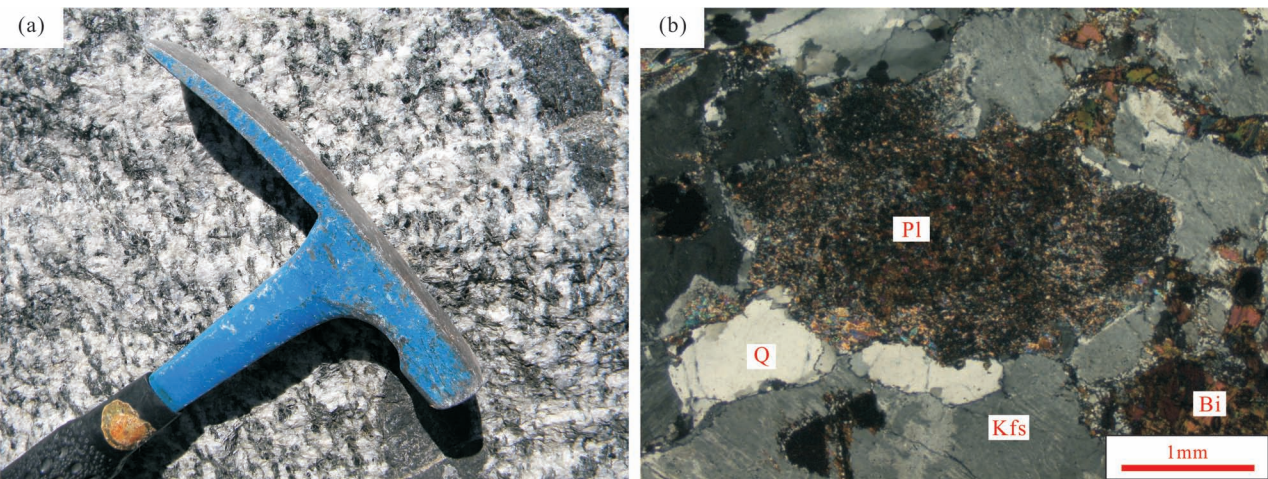


图 3 新疆阿尔泰西段乞格拉塔乌岩体野外照片(a)和显微岩相照片(b)

Fig. 3 Outcrop-scale photograph(a)and micro-scale photograph(b)of the Qigelatawu intrusion in western Altay Mountains

Pl—斜长石;Kfs—钾长石;Q—石英;Bi—黑云母
Pl—Plagioclase; Kfs—K-feldspar; Q—Quartz; Bi—Biotite

3 样品采集和数据处理

本次工作在乞格拉塔乌岩体中心相中粒黑云母花岗闪长岩中采集了同位素测年样品 1 件 (PM04-3), 地理坐标为: 北纬 49°03'24"、东经 86°54'09" (图 2)。

3.1 数据处理

采集约 10 kg 岩石样品, 按常规方法粉碎, 用磁选、电磁选方法分选得到重砂矿物, 再淘洗获得锆石精矿, 最后在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石晶体作为锆石 U—Th—Pb 同位素测定对象。首先将锆石颗粒粘在双面胶上, 然后用无色透明的环氧树脂固定, 待环氧树脂充分固化后, 对其表面进行抛光至锆石内部暴露。锆石的阴极发光照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室扫描电镜加载阴极发光仪上完成。锆石微区原位 U—Th—Pb 同位素年龄分析在中国地质调查局西安地质调查中心微区分析实验室进行, 分析仪器为 Agilent7500a 型四极杆质谱仪和 Geolas200M 型激光剥蚀系统, 激光器

为 193nm ArF 准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为 24 μm , 激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。锆石年龄计算采用标准锆石 GJ 作为外标, 元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标元素进行校正。详细的实验原理和流程及仪器参数参考文献 (李艳广等, 2015)。样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER 程序, 并采用 Andersen 软件对测试数据进行普通铅校正, 年龄计算及谐和图绘制采用 ISOPLLOT (2.06 版) 软件完成。

3.2 锆石特征

从测年样品 (PM04-3) 中选取的锆石颜色为浅玫瑰色, 金刚光泽, 透明, 棱角状—次棱角状。约 20% 锆石晶体较完整, 其余呈残缺柱状及碎块状, 晶体晶面粗糙, 见不同程度的裂纹, 有麻点状、小丘状熔 (溶) 蚀坑, 可见小锆石包裹体、不明性质黑色包裹体。锆石阴极发光照片 (图 4) 显示锆石以长柱状晶体为主, 粒径多在 130~250 μm 之间, 长宽比多为 2 : 1~3 : 1, 少量晶体为 4 : 1~6 : 1。锆石内部结

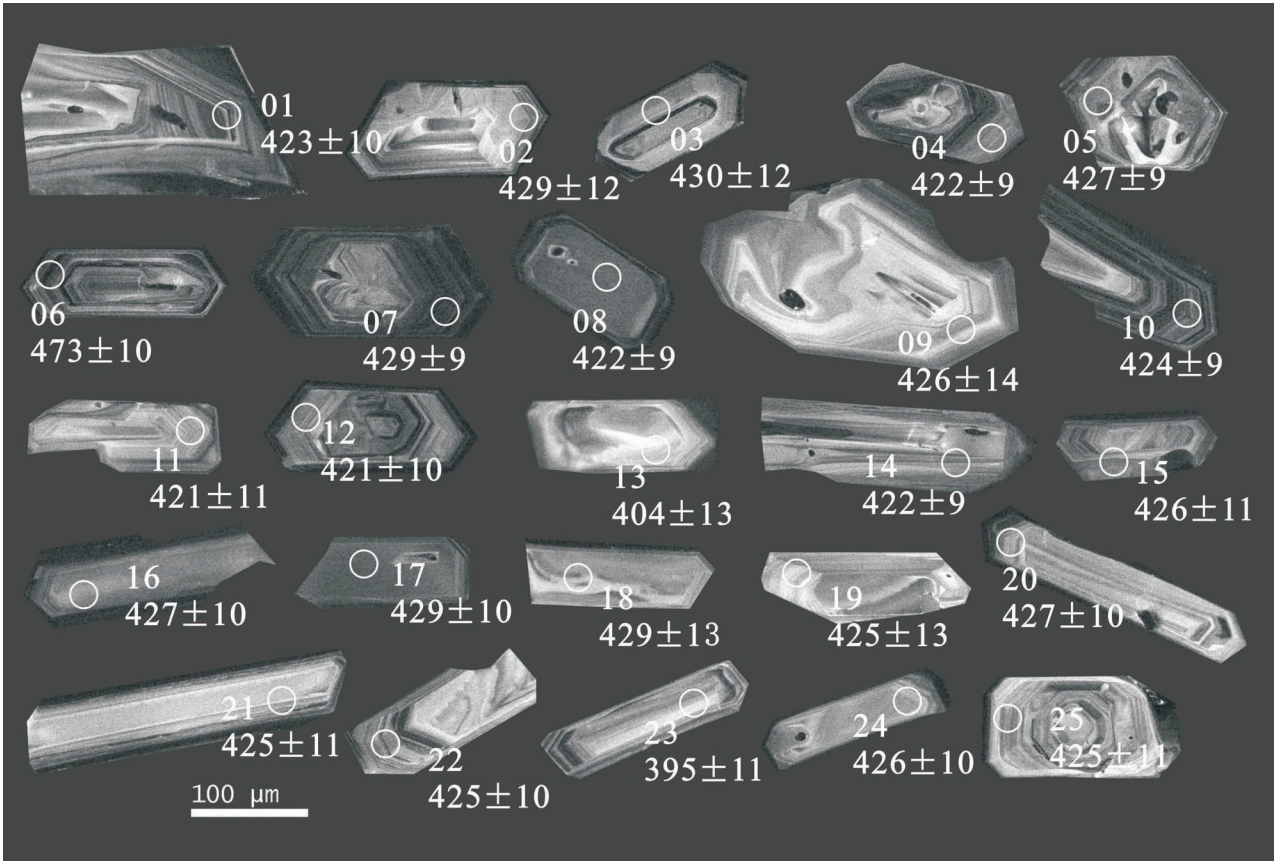


图 4 新疆阿尔泰山西段乞格拉塔乌岩体锆石阴极发光 (CL) 图像及 U-Pb 同位素年龄 (Ma)

Fig. 4 Representative Cathodoluminescence (CL) images and U-Pb isotopic ages (Ma) of the zircons from the Qigelatapu intrusion in western Altay Mountains

表 1 新疆阿尔泰西段乞格拉塔乌岩体中粒黑云母花岗岩长岩 (样品 PM04-3) 中锆石 LA-ICP-MS U—Th—Pb 同位素分析结果
Table 1 The U—Th—Pb isotopic LA-ICP-MS analysis results of the zircons from the Qigelatawu intrusion in western Altay Mountains

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						不谐和度(%)
	Pb*	^{232}Th	^{238}U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$				
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ					
PM04-3-01	26.30	56.06	348.15	0.06089	0.00176	0.5689	0.01631	0.06779	0.00163	635.3	61.0	457.3	10.6	422.8	9.9	7.54	
PM04-3-02	14.12	106.01	142.03	0.06094	0.00251	0.5777	0.02246	0.06877	0.00195	637.1	86.3	463.0	14.5	428.8	11.8	7.39	
PM04-3-03	16.77	81.89	177.71	0.07205	0.00275	0.6846	0.02463	0.06893	0.00191	987.5	75.7	529.5	14.9	429.7	11.6	18.85	
PM04-3-04	33.86	83.62	436.82	0.05755	0.00152	0.5368	0.01432	0.06767	0.00157	512.3	57.3	436.3	9.5	422.1	9.5	3.25	
PM04-3-05	41.10	407.94	401.63	0.06151	0.00152	0.5808	0.01467	0.06851	0.00156	657.0	52.1	465.0	9.4	427.2	9.4	8.13	
PM04-3-06	55.11	294.17	560.51	0.05906	0.00143	0.6196	0.01541	0.07610	0.00172	569.4	51.7	489.6	9.7	472.8	10.3	3.43	
PM04-3-07	76.45	332.20	882.49	0.05666	0.00135	0.5374	0.01318	0.06880	0.00154	477.7	52.0	436.7	8.7	428.9	9.3	1.79	
PM04-3-08	31.17	229.61	354.36	0.05580	0.00142	0.5200	0.01347	0.06760	0.00154	444.2	55.5	425.1	9.0	421.7	9.3	0.80	
PM04-3-09	11.41	44.84	137.36	0.06242	0.00345	0.5885	0.02988	0.06838	0.00233	688.6	113.7	469.9	19.1	426.4	14.1	9.26	
PM04-3-10	63.24	296.80	769.81	0.05580	0.00137	0.5226	0.01315	0.06794	0.00153	444.1	53.6	426.9	8.8	423.7	9.2	0.75	
PM04-3-11	15.59	119.84	181.64	0.05826	0.00241	0.5420	0.02118	0.06748	0.00189	538.9	88.8	439.7	14.0	420.9	11.4	4.28	
PM04-3-12	25.84	179.62	284.91	0.05984	0.00168	0.5570	0.01553	0.06752	0.00159	597.7	59.7	449.6	10.1	421.2	9.6	6.32	
PM04-3-13	10.34	48.77	98.28	0.06485	0.00660	0.5784	0.05589	0.06469	0.00207	1628	72.0	671.1	17.8	422.9	12.1	36.98	
PM04-3-14	21.60	26.01	282.94	0.05538	0.00225	0.5160	0.01717	0.06758	0.00157	501.0	62.8	435.0	10.1	422.5	9.6	2.87	
PM04-3-15	17.21	143.19	185.13	0.06194	0.00235	0.5836	0.02097	0.06834	0.00184	671.9	79.2	466.7	13.4	426.1	11.1	8.70	
PM04-3-16	21.62	109.15	247.76	0.06090	0.00187	0.5747	0.01717	0.06845	0.00166	635.7	64.7	461.1	11.1	426.8	10.0	7.44	
PM04-3-17	13.61	104.60	148.03	0.06272	0.00210	0.5954	0.01916	0.06885	0.00173	698.6	69.7	474.3	12.2	429.2	10.4	9.51	
PM04-3-18	38.78	53.09	595.15	0.05871	0.00313	0.5568	0.02753	0.06879	0.00223	556.2	112.4	449.5	18.0	428.9	13.4	4.58	
PM04-3-19	13.39	113.96	142.26	0.05895	0.00292	0.5539	0.02551	0.06814	0.00210	565.2	104.5	447.5	16.7	425.0	12.7	5.03	
PM04-3-20	17.29	90.68	202.55	0.05806	0.00194	0.5479	0.01770	0.06844	0.00170	531.7	72.1	443.6	11.6	426.8	10.2	3.79	
PM04-3-21	13.48	132.33	141.35	0.05676	0.00238	0.5337	0.02110	0.06819	0.00188	481.5	90.7	434.2	14.0	425.3	11.4	2.05	
PM04-3-22	30.00	216.49	341.31	0.05720	0.00182	0.5377	0.01657	0.06817	0.00166	498.8	69.1	436.9	10.9	425.1	10.0	2.70	
PM04-3-23	7.74	46.40	89.79	0.06213	0.00523	0.5407	0.04276	0.06312	0.00183	999.0	78.6	501.8	14.7	399.7	10.7	20.35	
PM04-3-24	20.50	131.37	226.93	0.05692	0.00172	0.5363	0.01582	0.06834	0.00162	487.6	66.0	436.0	10.5	426.1	9.8	2.27	
PM04-3-25	17.10	103.80	195.14	0.05542	0.00211	0.5204	0.01881	0.06810	0.00178	428.9	82.5	425.4	12.6	424.7	10.8	0.16	

注: Pb* = 0.241×u(²⁰⁶Pb) + 0.221×u(²⁰⁷Pb) + 0.524×u(²⁰⁸Pb); 不谐和度 = 100% × $\left[1 - \frac{Pb^{206}/U^{238} \text{ 年龄}}{Pb^{207}/U^{235} \text{ 年龄}} \right]$ 。

构清楚,生长振荡环带结构、核幔结构较发育,且所测锆石的 Th 含量介于 $26\times10^{-6}\sim408\times10^{-6}$ 之间,U 含量介于 $90\times10^{-6}\sim882\times10^{-6}$ 之间,Th/U 值多数大于 0.4,表现出典型的岩浆锆石的特征。

3.3 锆石 U-Pb 年龄

对样品(PM04-3)进行了 25 个分析点测试,测试值见表 1。其中 03、13 和 23 号三个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值偏低,在谐和年龄图中明显偏离谐和线,对照锆石阴极发光照片,发现 03 号测点位于锆石核幔结合部位,年龄代表混合年龄,无意义;13 和 23 号测点处锆石发光性特征明显不同,存在明显的白色条带,暗示锆石不同部位 U、Th 含量差异大,可能因此引起年龄值偏小,故将上述三颗锆石的年龄剔除,未参加年龄加权平均值计算。其余 22 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 投点均落在谐和线上或其附近,谐和性较好, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 421~473 Ma 之间,明显可分为两组:第一组有 21 个测点,测点基本位于清晰的岩浆振荡环带上,构成非常集中的主锆石群, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和年龄为 $423.4\pm7.7\text{ Ma}$ (MSWD=0.06)(图 5), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $425.1\pm4.4\text{ Ma}$ (MSWD=0.07),时代为中志留世,代表了岩浆结晶年龄;第二组有一个测点(06 号测点),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $473\pm10\text{ Ma}$,可能代表捕获锆石年龄,暗示区域上有早奥陶世地质体的存在,这一结论得到了近年来阿尔泰山地区新发现的奥陶纪变质侵入体的支持(田红彪等,2017a,2017b;杨富全等,2017)。

综上所述,乞格拉塔乌岩体的岩浆结晶年龄在

$425.1\pm4.4\text{ Ma}$,时代归属为中志留纪,属早古生代岩浆活动的产物。

4 地球化学特征

地球化学分析在咸阳核工业二〇三研究所分析测试中心完成。FeO 采用容量法分析,依据标准 GB/T14506.14-2010;其余主量元素、 TFe_2O_3 和微量元素中 P、Ba、V、Cr、Rb、Sr、Zr、Sc 均采用 XRF 法分析,使用仪器为荷兰帕纳科公司制造的 Axios X 射线光谱仪,依据标准 GB/T14506.28-2010;所有稀土元素及微量元素中 Co、Ni、Nb、Hf、Ta、Th、U 采用 ICP-MS 法分析,使用仪器为 Thermo Fisher Scientific 公司制造的 XSERIES2 型 ICP-MS,依据标准 GB/T14506.30-2010; Fe_2O_3 值通过计算得出,计算公式为 $\text{TFe}_2\text{O}_3=\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}\times1.1113$ 。主量元素分析数据中,烧失量值介于 0.81%~1.21%之间,总量在 99.87%~100.76%之间,满足精度标准要求;主量元素分析相对误差小于 1%,微量元素和稀土元素分析相对误差小于 5%。乞格拉塔乌岩体样品的岩石地球化学分析结果见表 2。

4.1 主量元素特征

岩石 SiO_2 含量在 64.07%~73.77%之间,平均值为 69.79%, TiO_2 含量为 0.32%~0.82%,平均值为 0.51%,MgO 含量为 0.62%~2.33%,平均值为 0.74%, $\text{Mg}^\#$ 值为 31.59~42.87,平均值为 35.26,显示富硅、贫钛、镁的中酸性花岗岩特征。 Al_2O_3 含量为 12.4%~15.71%,平均值为 13.85%,A/CNK 值

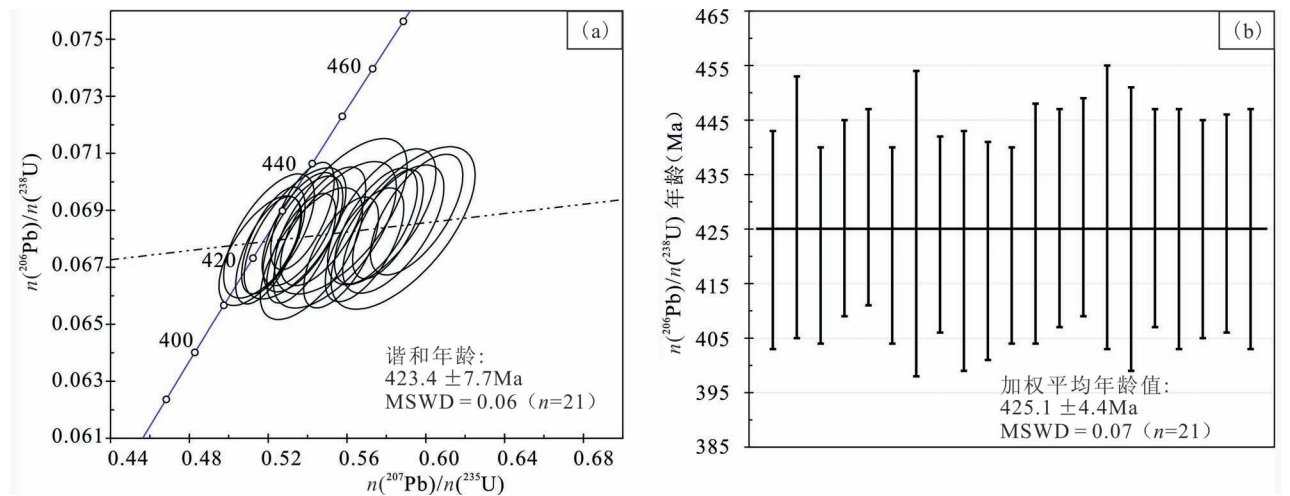


图 5 新疆阿尔泰山西段乞格拉塔乌岩体(样品 PM04-3)中锆石 U-Pb 年龄谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权图
Fig. 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram (a) and weighted average (b)
of the Qigelatatau intrusion in western Altay Mountains

表 2 新疆阿尔泰西段乞格拉塔乌岩体的主量元素(%)、稀土元素($\times 10^{-6}$)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 2 Major elements(%) , REE ($\times 10^{-6}$) and trace elements ($\times 10^{-6}$) analysis results of the Qigelatawu intrusion in western Altay Mountains

样品编号	PM04/2	PM04/3	PM04/4	PM04/5	PM04/8	样品编号	PM04/2	PM04/3	PM04/4	PM04/5	PM04/8
岩性	英云 闪长岩	花岗闪长岩				岩性	英云 闪长岩	花岗闪长岩			
SiO ₂	64.07	70.10	71.09	69.92	73.77	Tm	0.4	0.5	0.6	0.5	0.6
TiO ₂	0.82	0.50	0.43	0.48	0.31	Yb	2.1	3.6	3.7	3.0	3.9
Al ₂ O ₃	15.71	13.82	13.28	14.06	12.40	Lu	0.3	0.5	0.5	0.4	0.6
Fe ₂ O ₃	1.98	1.22	1.03	1.12	0.86	δEu	0.63	0.52	0.51	0.57	0.47
FeO	3.75	2.25	2.50	2.31	1.62	ΣREE	171.9	188.4	190.6	166.3	197.2
MnO	0.10	0.09	0.06	0.08	0.06	(La/Yb) _N	9.89	6.22	6.23	6.79	5.91
MgO	2.33	0.88	0.92	1.12	0.62	(La/Sm) _N	2.45	2.47	2.60	2.65	2.40
CaO	3.46	2.18	1.15	1.86	1.44	(Gd/Yb) _N	2.33	1.53	1.48	1.51	1.45
Na ₂ O	3.03	3.16	3.81	2.88	2.95	Y	30.5	42.2	43.3	36.7	43.3
K ₂ O	2.82	4.07	4.12	4.42	4.12	P	1681	679	425	799	318
P ₂ O ₅	0.32	0.14	0.12	0.18	0.07	Sc	12.8	7.9	6.4	9.7	3.4
烧失量	0.81	0.99	1.19	1.21	1.14	Co	14.7	5.8	5.2	7.0	4.0
总计	99.87	100.26	100.67	100.72	100.33	Cr	44.6	10.2	10.2	24.0	9.6
σ	1.62	1.93	2.24	1.98	1.62	Ni	29.1	9.1	8.4	16.5	7.5
AR	1.88	2.65	3.44	2.69	3.09	Cu	41.1	12.6	9.1	19.9	11.2
A/CNK	1.10	1.02	1.03	1.09	1.04	Zn	76.1	48.2	29.9	49.3	28.7
Mg [#]	0.43	0.32	0.32	0.38	0.32	Sr	211.0	133.0	148.0	129.0	93.7
SI	16.75	7.60	7.43	9.45	6.10	Zr	231	178	188	149	134
DI	67.09	81.48	86.08	81.61	87.02	K	23400	33772	34187	36677	34187
La	30.8	33.2	34.2	30.2	34.2	Ba	527	473	396	502	459
Ce	66.4	71.7	73.4	64.4	76.3	Pb	19.9	19.9	13.4	25.8	18.5
Pr	8.8	9.3	9.4	8.4	9.9	Rb	91	138	145	149	151
Nd	34.6	36.7	36.3	32.1	38.3	Th	32.3	25.4	33.4	19.3	26.1
Sm	7.9	8.4	8.3	7.2	9.0	U	2.1	2.7	3.6	2.9	2.8
Eu	1.6	1.5	1.4	1.3	1.4	Ga	20.3	15.7	15.8	17.0	15.7
Gd	7.5	8.5	8.5	7.0	8.7	Nb	22.6	18.0	18.6	24.0	20.5
Tb	1.0	1.2	1.2	0.9	1.2	Ta	2.8	3.7	3.3	3.6	2.8
Dy	6.4	7.7	7.7	6.3	7.7	W	1.0	1.3	1.2	1.3	4.9
Ho	1.0	1.3	1.3	1.1	1.3	Ti	4920	3000	2580	2880	1860
Er	2.9	4.3	4.2	3.4	4.2						

$$\text{Mg}^{\#} = \frac{n(\text{Mg})}{n(\text{Mg}) + n(\text{TFE})}; \text{A/CNK} = \frac{n(\text{Al}_2\text{O}_3)}{n(\text{CaO}) + n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})}; \sigma = \frac{[100w(\text{Na}_2\text{O}) + 100w(\text{K}_2\text{O})]^2}{100w(\text{SiO}_2) - 43}; \delta\text{Eu} = \frac{\text{Eu}_N}{\sqrt{(\text{Sm}_N \cdot \text{Gd}_N)}}$$

为 1.02~1.10, A/NK—A/CNK 图解(图 6a)中,样品均落入弱的过铝质岩石系列区域。Na₂O 含量为 2.88%~3.31%, 平均值为 3.17%, K₂O 含量为 2.82%~4.42%, 平均值为 3.91%, 全碱(ALK)含量为 5.85%~7.93%, 平均值为 7.08%, K₂O/Na₂O 为 0.93~1.53, 平均值为 1.25, 里特曼指数(σ)为 1.62~2.24, 均小于 4, 属亚碱性岩石系列, 在 K₂O—SiO₂ 图解(图 6b)中, 样品基本落入高钾钙碱性区域。总体显示弱过铝质、高钾钙碱性特征。

4.2 稀土元素特征

乞格拉塔乌岩体的岩石稀土元素总量介于

166.28×10⁻⁶~197.22×10⁻⁶之间, 平均值为 182.90×10⁻⁶。(La/Yb)_N 值为 5.22~9.91, (La/Sm)_N 值为 2.40~2.65, (Ga/Yb)_N 值为 1.63~2.91, 表明岩石轻稀土元素分馏程度高于重稀土元素, 轻、重稀土元素之间分馏程度较好。岩石 δEu 值介于 0.47~0.63 之间, 具明显负 Eu 异常, 暗示岩浆在形成过程中存在斜长石的分离结晶作用或者源区有斜长石的残留。在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(图 7a)中, 其显示轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损, 负铕异常明显的右倾型配分模式。这与典型岛弧、火山弧环境下钙碱性中酸性火成岩的特征相似,

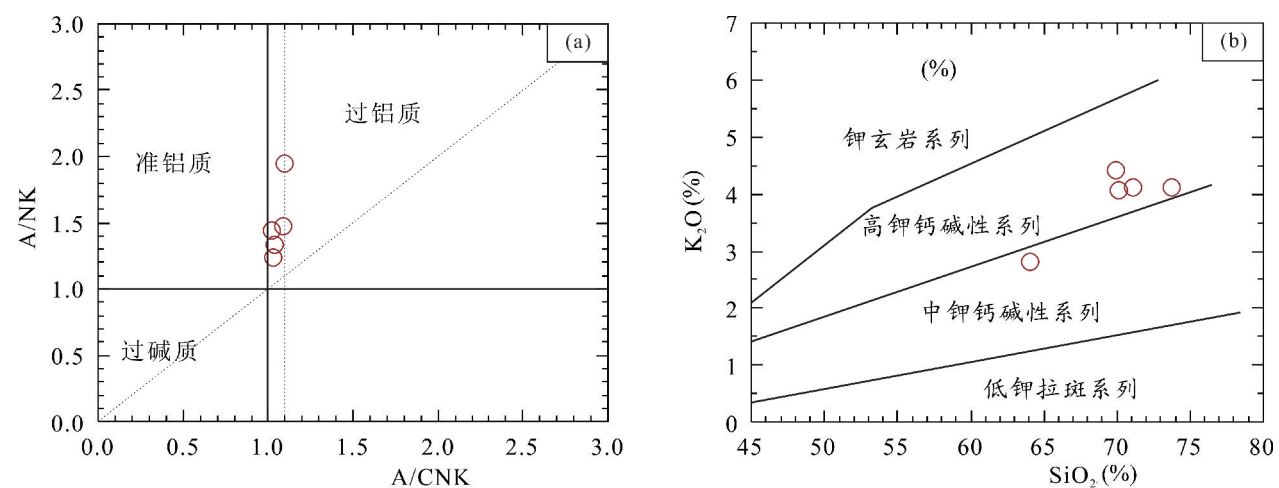


图 6 新疆阿尔泰山西段乞格拉塔乌岩体 A/CNK—ANK 图(a) (据 Shand, 1947) 和 SiO₂—K₂O 图(b) (据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 6 A/CNK — ANK diagram (a) (after Shand, 1947) and SiO₂— K₂O diagram (b) (after Peccerillo and Taylor, 1976) of the Qigelatawu intrusion in western Altay Mountains

但其稀土总量却高于岛弧、火山弧环境下的钙碱性中酸性火成岩,说明该岩体成因复杂(李会军等, 2010)。

4.3 微量元素特征

微量元素富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素及 La、Ce、Sm 等, 亏损 Nb、Zr 等高场强元素及 Sr、P、Ti 等, 显示后碰撞高钾钙碱性 I 型花岗岩微量元素特征 (Searle et al., 1997; Ferre et al., 1998), 低 Sr 高 Yb 的特征 (Sr 含量在 $93.7\times10^{-6}\sim211\times10^{-6}$, Yb 含量在

$2.1\times10^{-6}\sim3.9\times10^{-6}$), 可能与地壳减薄有关。原始地幔标准化蛛网图显示乞格拉塔乌岩体样品具有相似的分配曲线模式(图 7b)。总体而言, 富集 Rb、Th、U、La、Ce、Sm 等元素, 亏损 Nb、Zr、Ba、Sr、P、Ti 等元素, 暗示岩浆主要不是由软流圈部分熔融直接产生, 而可能与地壳有关, 或源区有富含 Nb、Ti 的残留矿物, 或有板块俯冲作用引起的岩石圈富集地幔的参与。

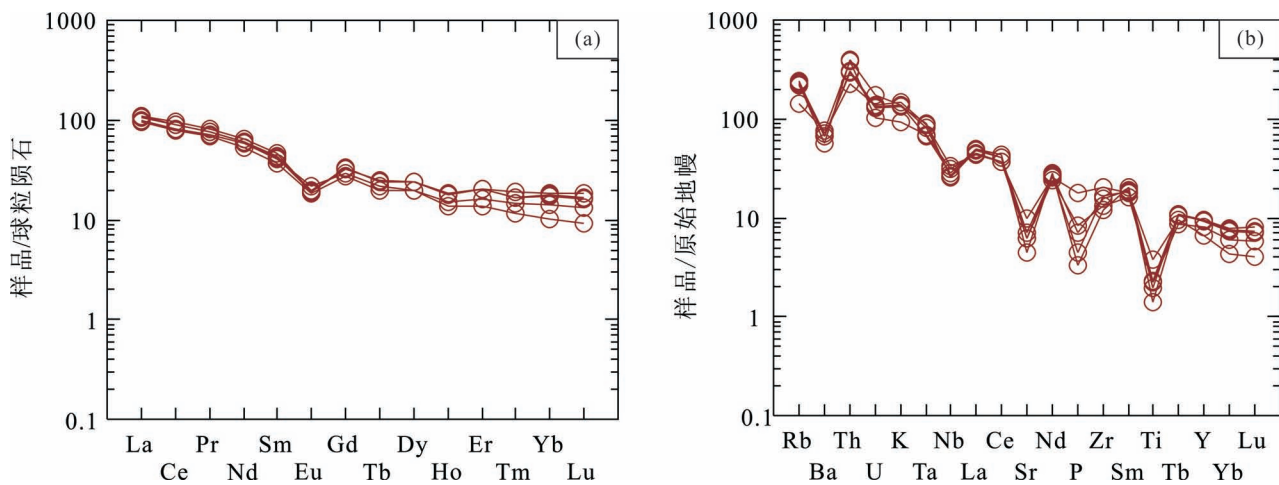


图 7 新疆阿尔泰山西段乞格拉塔乌岩体球粒陨石标准稀土配分图(a) (标准化值据 Taylor et al., 1985) 和原始地幔标准化蛛网图(b) (标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns(a) (normalization values after Taylor et al., 1985) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams(b) (normalization values after Sun et al., 1989) of the Qigelatawu intrusion in western Altay Mountains

5 讨论

5.1 形成时代

近年来,随着高精度的锆石 SHRIMP 或 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年技术的广泛应用,阿尔泰造山带已经获得了大量的岩浆成因锆石结晶年龄数据,据此可以将阿尔泰造山带南缘古生代岩浆活动划分出四个峰值:460 Ma、410 Ma、380 Ma 及 265 Ma 左右。前人认为阿尔泰地区早古生代岩浆活动的规模、强度均不及晚古生代,最近的研究成果(袁超等,2007;王涛等,2005,2010;曾乔松等,2007)发现了较多的早古生代花岗岩的存在,且早古生代时期岩浆活动的规模和强度可能超出前人的估计。但这些年龄数据主要集中在中国阿尔泰造山带东段及西段的中南部,阿尔泰山西段的北部地区一直没有精确的岩体年龄资料和系统的地球化学分析测试结果,从而限制了对该地区构造演化的认识。本次在乞格拉塔乌岩体中获得了中志留世的锆石 U-Pb 同位素年龄资料,为这一地区早古生代时期的构造属性和构造环境研究提供了重要资料。

本次工作,首次在与哈萨克斯坦交界处获得了乞格拉塔乌岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄为 425.1 ± 4.4 Ma,据此将其形成时代为中志留世,从而证实了阿尔泰造山带西段也存在早古生代的岩浆活动。此外,利用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年方法证实,与俄罗斯、蒙古相邻的友谊峰岩体,也形成于早古生代(另文讨论),其大面积出露的二长花岗岩体表明,早古生代晚期的这次岩浆活动规模较大。

5.2 构造演化模式

阿尔泰造山带是中亚造山带的重要组成部分,造山带南缘发育的大量花岗岩类侵入体,一直是国内学者研究造山带构造演化的重要载体。近年来,高精度的锆石 SHRIMP 或 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果证实,425~390 Ma 是阿尔泰造山带南缘岩浆活动的鼎盛时期(童英,2006),但关于阿尔泰造山带在该时期的构造环境却存在较大争议:陈毓川等(1996)、王京彬等(1998)认为当时属大陆边缘裂谷环境;Windley 等(2002)、Xiao Wenjiao 等(2004)、陈汉林等(2006)、单强等(2011,2012)则倾向于与俯冲有关的岛弧或弧后盆地环境;张海祥等(2004)、Wang Tao 等(2006)、童英等(2007)、王涛等(2010)认识到当时已处于活动大陆边缘的陆弧环境;Yuan Chao 等(2007)则认为是活动大陆边缘的伸展环境。

邓晋福等(2007)总结了九种构造环境下的火成岩组合特征,但难以用以上任何一种构造环境合理解释阿尔泰造山带内复杂的火成岩组合。因此,有学者(Windley et al.,2007 Xiao Wenjiao et al.,2008,2009)提出包含阿尔泰造山带的中亚造山带古生代的构造演化模式为多洋岛俯冲增生拼贴模式。这一观点认为古亚洲洋古生代的构造格局是由一系列被洋内弧分割的洋盆组成。秦克章等(2017)指出中亚型造山带以古生代多陆块拼合造山的构造格局,具有多块体、多缝合带镶嵌、山盆耦合的大地构造格局,地壳经历了古生代地块拼合增生过程,具有多海岛俯冲增生拼贴模式。最近,孙敏等(2009)通过锆石的 Hf 同位素组成数据在 420 Ma 左右出现的剧烈突变,认识到早古生代中晚期阿尔泰造山带岩石圈成分发生了急剧变化,并尝试用洋中脊俯冲来解释这一变化,此构造模式可以合理的解释这一时期阿尔泰造山带形成的复杂的火成岩组合。曾乔松等(2007,2009)在研究冲乎尔盆地花岗岩类及酸性火山岩时证实,志留纪时期阿尔泰南缘已经从被动大陆边缘转变为活动大陆边缘,古亚洲洋在志留纪或更早逐渐俯冲、消减,形成早古生代弧盆体系;王涛等(2010)认为阿尔泰造山带经历了奥陶纪—志留纪陆缘俯冲,泥盆纪陆缘及陆缘边缘裂解、弧后盆地形成的转变。

乞格拉塔乌岩体的主要岩性为中粒黑云母花岗岩闪长岩及中细粒黑云母英云闪长岩,主体岩石组成矿物中未见角闪石,而以钾长石、更长石、黑云母等矿物为主,具有“TTG”组合特征。乞格拉塔乌岩体中发育的暗色闪长质包体,受应力作用影响,拉伸变形,呈透镜状或条带状。通过对富蕴县苏普特和阿克布拉克两地的早泥盆纪花岗质岩体中的暗色闪长质包体研究,证实该期岩体中的暗色包体与寄主岩石形成时代基本一致,说明其不是围岩的捕虏体,也不是同源岩浆早期结晶的产物,而很可能是壳幔岩浆发生混合作用的表现。主量元素具有高钾钙碱性岩系特征,与后碰撞阶段形成的高钾钙碱性花岗岩岩石组合相一致。微量元素显示轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损,负锶异常明显的右倾型配分模式,这与典型岛弧、火山弧环境下钙碱性中酸性火成岩的特征相似,但其稀土总量却高于岛弧、火山弧环境下的钙碱性中酸性火成岩。微量元素富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,显示岛弧构造环境的特征。微量元素 Rb/10—Th—Ta $\times$ 3 构造环境判别图解(图 8)中,样品分

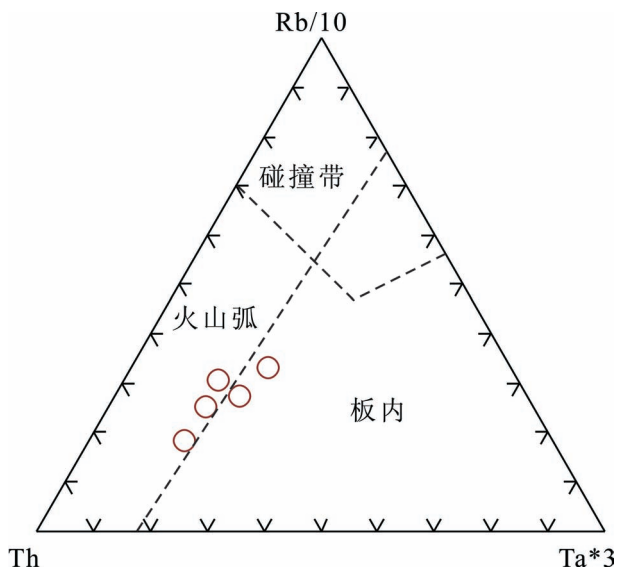
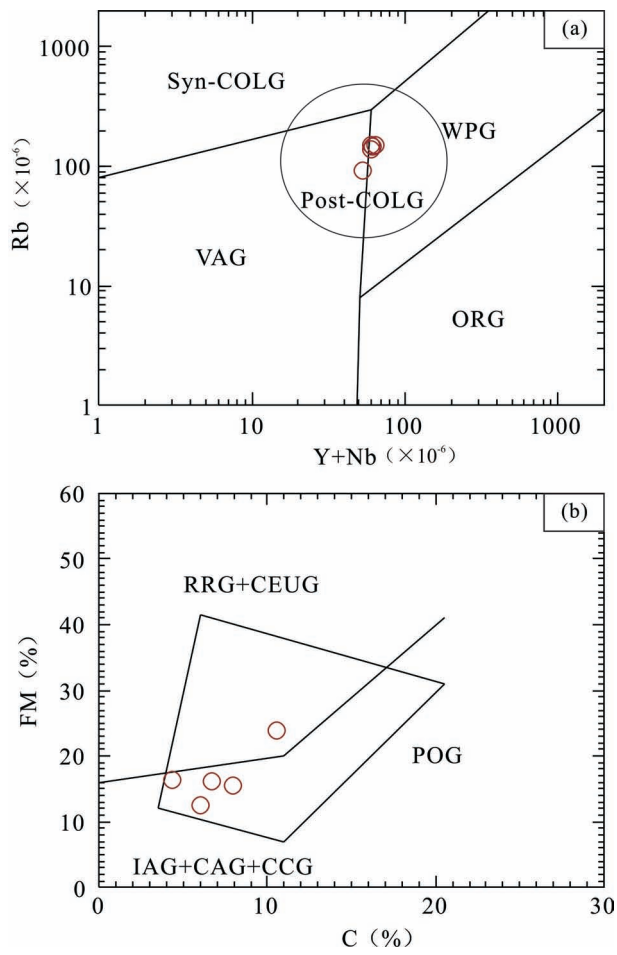


图 8 新疆阿尔泰山西段乞格拉塔乌岩体

Rb/10—Th—Ta×3 图解(据 Harris et al., 1986)

Fig. 8 Diagram of Rb/10—Th—Ta×3 of the Qigelatawu intrusion in western Altay Mountains (after Harris et al., 1986)



布在火山弧与板内花岗岩的分界线附近,也说明其物质来源包括幔源和壳源两部分,属壳幔混合岩浆作用的产物。在花岗岩类形成环境的 Rb—(Y+Nb) 图解(图 9a)中,样品落入在火山弧与板内花岗岩的界线附近 Pearce (1996) 补充圈定的后碰撞花岗岩叠加区域内,而在 FM—C 图解(图 9b)中,样品落入后造山(POG)框内,又在造山花岗岩类和非造山花岗岩类分界线两侧具有分布,属于后造山花岗岩类(邓晋福等,2015b)。花岗岩低 Sr 高 Yb 的特征(Sr 含量在 $93.7\times10^{-6}\sim211\times10^{-6}$, Yb 含量在 $2.1\times10^{-6}\sim3.9\times10^{-6}$),可能与地壳减薄有关,这类花岗岩常出现在碰撞后(造山后)或板内构造环境(张旗等,2012)。这与传统的俯冲作用存在一定出入,但洋脊俯冲模式可以很好的解释这种现象。

洋脊俯冲是扩张的大洋中脊俯冲进入海沟,并与消减带发生作用的一种俯冲模式。当扩张的洋中脊俯冲到消减带之下,来自软流圈地幔的岩浆处在温度较高的弧下区域,得不到有效的冷却,导致大洋板片停止生长,并沿着离散的洋中脊板块边缘形成板片窗,软流圈物质通过板片上涌,在板片窗上部造成拉张的构造环境,形成具有碰撞特点的花岗岩类。对新疆北部大规模的后碰撞岩浆活动的触发机制,不排除洋脊俯冲影响的可能,因为“后碰撞”在时间上确实与新疆北部俯冲的构造环境不符,这种“后

图 9 Y+Nb—Rb 图解(a)(据 Pearce et al., 1996) 与 FM—C 图解(b)(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 9 Diagram of Y+Nb—Rb(a)(after Pearce et al., 1996) and FM—C (b)(after Maniar and Piccoli, 1989)

ORG—洋中脊花岗岩; post-collision—后碰撞花岗岩; syn-COIG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; CAG—大陆弧花岗岩; CCG—大陆碰撞花岗岩; CEUG—与造陆抬升有关的花岗岩; IAG—岛弧花岗岩; POG—后造山花岗岩; RRG—与裂谷有关的花岗岩; C (%)—在 $(\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O})-(\text{CaO})-(\text{FeOT}+\text{MgO})$ 三角图中 CaO 的含量; FM (%)—在 $(\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O})-(\text{CaO})-(\text{FeOT}+\text{MgO})$ 三角图中 (FeOT+MgO) 的含量
ORG—oceanic ridge granite; post-collision—post collisional granite; syn-COIG—syn-collisional granite; VAG—volcanic are granite; WPG—within plate granite; CAG—continental are granitoid; CCG—continental collision granitoid; CEUG—continental epiorogeny uplift granitoid; IAG— island are granitoid; POG—post-orogenic granitoid; RRG—rift- related granitoid; C (%)—the CaO percentage in $(\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O})-(\text{CaO})-(\text{FeOT}+\text{MgO})$ triangle; FM (%)—the (FeOT+MgO) percentage in $(\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O})-(\text{CaO})-(\text{FeOT}+\text{MgO})$ triangle

碰撞”很可能为洋脊俯冲带碰撞。Windley 等 (2007) 也认为中亚造山带的后碰撞花岗岩与洋脊俯冲有关。

沈晓明等 (2010) 认为洋脊俯冲模式可以合理地解释新疆阿尔泰地区在古生代时期,同时存在高锆低钇中酸性岩 (adakite, 埃达克岩) 和富铋玄武岩、玻安岩、苦橄岩、A 型花岗岩、双峰式火山岩、酸性岩墙群等多种特殊的岩石类型;孙敏等 (2009) 等认为洋脊俯冲的构造环境有利于形成诸如阿尔泰西北部阿勒格代伊中基性岩石,研究表明该岩体属早古生代晚期的蛇绿混杂岩,具有岛弧拉板玄武岩、弧后盆地玄武岩以及富集型和过渡型洋中脊玄武岩的多种地球化学特征,而库尔提附近被认为产于弧后盆地的蛇绿岩,具有消减带和 MORB 的双重属性 (Xu Jifeng et al., 2003), 这些岩石均为具有复杂源区地球化学特征的岩浆岩组合。在 Wyllie (1984) 设计的 4 种可能的俯冲洋壳与上覆楔形地幔区的热结构配置中,俯冲洋壳、俯冲带上覆的楔形地幔区和幔楔上面的陆壳或洋壳,被认为是岩浆弧下面产生岩浆的 3 个源区。邓晋福等 (2015a) 对不同壳幔结构形成的岩浆和岩石构造组合做了详细的阐述,并认为在热幔—热壳结构下,3 个源区均有岩浆产生,因此,岩浆种类最为丰富,岩石组合最多,岩浆作用最为强烈,这样的结构对成矿最用也最为有利。洋中脊俯冲形成板片窗后,软流圈的地幔物质通过板片窗上涌导致俯冲带上覆板片以及地幔楔的地温梯度急剧升高,有利于形成热幔—热壳结构。Farrar and Dixon (1993) 认为扩张洋脊俯冲引起的地幔物质上涌可以持续几十个百万年。阿尔泰造山带地幔物质的岩浆产物最早形成于奥陶世时期 (田红彪等, 2017a, 2017b; 杨富全等, 2017), 至泥盆纪时期达到鼎盛,形成大量的基性火成岩或成为酸性侵入岩中的暗色闪长质包体,直到二叠纪时期 (刘希军等, 2009; 赵玉梅等, 2016), 依然存在地幔物质活动的迹象。

综上所述,阿尔泰造山带中复杂的火成岩组合、有利的热幔—热壳结构特征以及地幔物质的持续作用,都为古亚洲洋存在洋脊俯冲提供了有力的佐证。

6 结论

(1) 根据新疆北部阿尔泰造山带西段乞格拉塔乌岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄 (425.1 ± 4.4 Ma), 将其形成时代划归为中志留世。

(2) 研究表明,古亚洲洋从奥陶纪开始向北俯

冲,一直持续到晚古生代中晚期。早古生代末期形成的乞格拉塔乌岩体,既有俯冲环境特征,又显示了后碰撞花岗岩类的特点,其复杂的成因可能与古亚洲洋存在洋中脊俯冲作用有关。

致谢: LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试和数据分析处理得到了中国地质调查局西安地质调查中心微区分析实验室李艳广工程师的大力支持和热心帮助,审稿专家和责任编辑对文稿提出了宝贵的修改意见及建议,在此表示衷心的感谢!

注 释 / Note

① 蔺新望,张亚峰,赵端昌,王星,赵江林,申维娜,张妮华. 2016. 新疆阿尔泰 1 : 5 万 M45E018012、M45E018013、M45E018014、M45E018015、M45E018016 五幅区域地质调查报告. 西安: 陕西省地质调查院.

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)

- 柴凤梅,董连慧,杨富全,刘峰,耿新霞,黄承科. 2010. 阿尔泰南缘克朗盆地铁木尔特花岗岩体年龄、地球化学特征及成因. 岩石学报, 26(2): 2946~2958.
- 柴凤梅,毛景文,董连慧,杨富全,刘峰,耿新霞,张志欣,黄承科. 2009. 阿尔泰南缘克朗盆地康布铁堡组变质火山岩年龄及岩石成因. 岩石学报, 25(6): 1403~1415.
- 陈汉林,杨树锋,厉子龙,肖文交,李继尧,董传万,余星. 2006. 阿尔泰晚古生代早期长英质火山岩的地球化学特征及构造背景. 地质学报, 80(1): 38~42.
- 陈毓川,叶庆同,冯京. 1996. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测. 北京: 地质出版社: 1~85.
- 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. 2015a. 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.
- 邓晋福,冯艳芳,狄永军,刘翠,肖庆辉,苏尚国,赵国春,孟斐,马帅,姚图. 2015b. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换. 地质论评, 61(3): 473~484.
- 邓晋福,冯艳芳,狄永军,刘翠,肖庆辉,苏尚国,赵国春,孟斐,车如凤. 2015c. 古亚洲洋构造域侵入岩时—空演化框架. 地质评论, 61(6): 1211~1224.
- 邓晋福,肖庆辉,苏尚国,刘翠,赵国春,吴宗絮,刘勇. 2007. 火成岩组合与构造环境: 讨论. 高校地质学报, 13(3): 392~402.
- 董连慧,屈迅,赵同阳,徐仕琪,周汝洪,王克卓,朱志新. 2012. 新疆北阿尔泰造山带早古生代花岗岩类侵入序列及其构造意义. 岩石学报, 28(8): 2307~2316.
- 付超,李俊建,唐文龙,党智财,Orolmaa D. 2016. 蒙古戈壁阿尔泰巴音陶勒盖地区二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 35(4): 565~571.
- 何国琦,韩宝福,岳永君,王加彬. 1990. 中国阿尔泰造山带的构造分区和地壳演化. 见: 新疆地质科学 (第 2 辑), 北京: 地质出版社: 14~25.
- 黄博涛,董增产,潘峰,王凯. 2017. 阿尔泰造山带青河地区早泥盆世和寒武纪末花岗岩的年代学、岩石成因及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 36(4): 458~472.

李会军,何国琦,吴泰然,吴波.2006.阿尔泰—蒙古微大陆的确定及其意义.岩石学报,22(5):1369~1379.

李会军,何国琦,吴泰然,吴波.2010.中国阿尔泰早古生代后碰撞花岗岩的发现及其地质意义.岩石学报,26(8):2445~2451.

李晓光,弓小平,裴国栋,韩琼,赵同阳,郑加行.2018.阿尔泰造山带喀纳斯群变质碎屑岩地球化学特征及年代学研究.中国地质,45(2):319~333.

李艳广,汪双双,刘民武,孟恩,魏小燕,赵慧博,靳梦琪.2015.斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用.地质学报,89(12):2400~2418.

刘国仁,董连慧,高福平,陈剑祥,赵华,王定胜,宋志勇,何立新,秦纪华.2010.新疆阿尔泰克兰河中游泥盆纪花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地球化学特征.地球学报,31(4):519~531.

刘希军,许继峰,侯青叶,白正华,雷敏.2007.新疆东准噶尔克拉麦里蛇绿岩地球化学:洋脊俯冲的产物.岩石学报,23(7):1591~1602.

刘希军,许继峰,王树庆,侯青叶,白正华,雷敏.2009.新疆西准噶尔达拉布特蛇绿岩 E-MORB 型镁铁质岩的地球化学、年代学及其地质意义.岩石学报,25(6):1373~1389.

秦纪华,耿新霞,温超权,郭建新,任宇晨.2016.阿尔泰小土尔根铜矿岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义.矿床地质,35(1):18~32.

秦克章,翟明国,李光明,赵俊兴,曾庆栋,高俊,肖文交,李继亮,孙枢.2017.中国陆壳演化、多块体拼合造山与特色成矿的关系.岩石学报,33(2):305~325.

单强,曾乔松,李宁波,杨武斌,罗勇,姜玉航,于学元.2012.新疆阿尔泰南缘康布铁堡组铀—钠质流纹岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学.岩石学报,28(7):2132~2144.

单强,曾乔松,罗勇,杨武斌,张红,裘瑜卓,于学元.2011.新疆阿尔泰康布铁堡组铀质和钠质流纹岩的成因及其同位素年代学研究.岩石学报,27(12):3653~3665.

沈晓明,张海洋,马林.2010.洋脊俯冲及其在新疆阿尔泰地区存在的可能证据.大地构造与成矿学,34(2):181~195.

宋鹏,童英,王涛,秦切,张建军,宁东旭.2017.阿尔泰东南缘泥盆纪花岗岩质岩石的锆石 U-Pb 年龄、成因演化及构造意义:钙碱性—高钾钙碱性—碱性岩浆演化新证据.地质学报,91(1):55~79.

宋述光,王梦玢,王潮,牛耀龄.2015.大陆造山带碰撞俯冲—折返—垮塌过程的岩浆作用及大陆地壳净生长.中国科学:地球科学,45:916~940.

孙敏,龙晓平,蔡克大,蒋映德,王步云,袁超,赵国春,肖文交,吴福元.2009.阿尔泰早古生代末期洋中脊俯冲:锆石 Hf 同位素组成突变的启示.中国科学:地球科学,39(7):935~948.

田红彪,陈有圻,杨永强,李伦.2017b.中国阿尔泰东北部哈拉次花岗岩的年龄、成因及构造意义.地球科学,42(10):1658~1672.

田红彪,郑波,何峻岭.2017a.新疆阿尔泰造山带乌希里克地区奥陶纪岩浆活动及其地质意义.岩石学报,33(8):2591~2603.

童英,王涛,洪大卫,代雅建,韩宝福,柳晓明.2007.中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义.岩石学报,23(8):1933~1944.

童英.2006.阿尔泰造山带晚古生代花岗岩年代学、成因及其地质意义.中国地质科学院,12~101.

王京彬,秦克章,吴志亮,胡建辉,邓吉牛,等.1998.阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床.北京:地质出版社,18~60.

王涛,洪大卫,童英,韩宝福,石玉若.2005.中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义.岩石学报,21(3):640~650.

王涛,童英,李舫,张建军,史兴俊,李锦轶,韩宝福,洪大卫.2010.阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例.岩石矿物学杂志,29(6):595~618.

王中刚,赵振华,邹天人.1998.阿尔泰花岗岩类地球化学.北京:科学出版社:1~152.

肖文交, Windley B F, 闫全人, 秦克章, 陈汉林, 袁超, 孙敏, 李继亮, 孙枢.2006.北疆地区阿尔曼太蛇绿岩锆石 SHRIMP 年龄及其大地构造意义.地质学报,80(1):32~37.

杨富全,柴凤梅,李强,谷高灵,杨成栋.2017.新疆阿尔泰克兰盆地基底发现晚寒武世—早奥陶世地层——来自 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄证据.地球学报,38(6):859~871.

杨富全,毛景文,闫升好,刘峰,柴凤梅,周刚,刘国仁,何立新,耿新霞,代军治.2008.新疆阿尔泰蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义.地质学报,82(4):485~499.

杨富全,王永强,杨成栋,李强,郭旭吉.2018.新疆阿尔泰克兰盆地金属矿床地质特征及成矿作用.矿床地质,37(3):441~462.

袁超,孙敏,龙晓平,夏小平,肖文交,李献华,林寿发,蔡克大.2007.阿尔泰哈巴河群的沉积时代及其构造背景.岩石学报,23(7):1635~1644.

曾乔松,陈广浩,蔡佑星,王核,王梦飞.2009.阿尔泰南缘冲乎尔盆地酸性火山岩地球化学及年代学研究.大地构造与成矿学,32(4):603~612.

曾乔松,陈广浩,王核,单强.2007.阿尔泰冲乎尔盆地花岗岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意.岩石学报,23(8):1921~1932.

张海洋,牛贺才,Hiroaki Sato,单强,于学元,Junichi Ito,张旗.2004.新疆北部晚古生代埃达克岩、富铝玄武岩组合:古亚洲洋板块南向俯冲的证据.高校地质学报,10(1)106~113.

张海洋,牛贺才,Kentaro Terada,于学元,Hiroaki Sato,Junichi Ito.2003b.新疆北部阿尔泰地区库尔提蛇绿岩中斜长花岗岩的 SHRIMP 年代学研究.科学通报,48(12):1350~1354.

张海洋,牛贺才,于学元,Hiroaki Sato,Junichi Ito,单强.2003a.新疆北部富蕴县沙尔布拉克坡安岩的地球化学特征及构造意义.地球化学,32(2):155~160.

张旗,冉皞,李承东.2012.A 型花岗岩的实质是什么? 岩石矿物学杂志,31(4):621~626.

赵玉梅,彭戈,赵得龙,尤悦程.2016.中国阿尔泰克孜勒花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其地质意义.地质与勘探,52(2):271~282.

Chai Fengmei, Dong Lianhui, Yang Fuquan, Liu Feng, Geng Xinxia, Huang Chengke. 2010&. Age, geochemistry and petrogenesis of Tiemierte granites in the Kelang basin at the southern margin of Altay, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 26(2):2946~2958.

Chai Fengmei, Mao Jingwen, Dong Lianhui, Yang Fuquan, Liu Feng, Geng Xinxia, Zhang Zhixin, Huang Chengke. 2009&. Geochronology and genesis of the meta-rhyolites in the Kangbutiebao Formation from the Kelang basin at the southern margin of the Altay, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 25(6):1403~1415.

Chen Hanlin, Yang Shufeng, Li Zilong, Xiao Wenjiao, Li Jiliang, Dong Chuanwan, Yu Xing. 2006&. Geochemistry and tectonic setting of early Late Paleozoic felsic volcanic rocks from the Altai Orogenic Belt, North Xinjiang. Acta Geologica Sinica, 80(1):38~42.

Chen Yuchuan, Ye Qingtong, Feng Jing. 1996&. Metallogenic Conditions and Prognosis of the Ashele Cu—Zn Metallogenic Belt. Beijing: Geological Publishing House:1~85.

Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. 1982. Nature and origin of A-type granite with particular reference to southeast Australia. CMP, 80:189~200.

Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Meng Fei, Ma Shuai, Yao Tu. 2015&. Magmatic arc and

- ocean—continent transition; Discussion. *Geological Review*, 61 (3): 473~484.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Zhao Guochun, Meng Fei, Che Rufeng. 2015c&. The intrusive spatial—temporal evolutionary framework in the Paleo-Asian tectonic domain. *Geological Review*, 61(6): 1211~1224.
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015a&. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: Discussion and suggestion. *Geological Review*, 61(4): 717~734.
- Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Liu Cui, Zhao Guochun, Wu Zongxu, Liu Yong. 2007&. Igneous petroectonic assemblages and tectonic settings: A discussion. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 392~402.
- Dong Lianhui, Qu Xun, Zhao Tongyang, Xun Shiqi, Zhou Ruhong, Wang Kezhao, Zhu Zhixin. 2012&. Magmatic sequence of Early Plaeozoic granitic intrusions and its tectonic implications in the Altay orogen, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2307~2316.
- Farrar E and Dixon J M. 1993. Ridge subduction: kinematics and implications for the nature of mantle upwelling. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 30(5): 893~907.
- Ferre E C, Caby R, Peucat J J, Capdevila R and Monié P. 1998. Pan-African post-collisional, ferro—potassic granite and quartz-monzonite plutons of Eastern Nigeria. *Lithos*, 45: 255~279.
- Fu Chao, Li Junjian, Tang Wenlong, Dang Zhicai, Orolmaa Demberel. 2016&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of monzogranite in Bayintolgoi, Gobi-Altay, Mongolia, and its geological implications. *Geological Bulletin of China*, 35(4): 565~571.
- Handy M R, Schmid S M, Bousquet R, Kissling E, Bernoulli D. 2010. Reconciling plate-tectonic reconstructions of Alpine Tethys with the geological—geophysical record of spreading and subduction in the Alps. *Earth-Science Reviews*, 102(3~4): 121~158.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision? zone magmatism. In: Coward M P, Ries A C. eds. *Collision Tectonics*. *Geol. Soc. Spec. Publication*, 19: 67~81.
- He Guoqi, Han Baofu, Yue Yongjun, Wang Jiaheng. 1990#. Tectonic division and crustal evolution of Altay orogenic belt in China. In: *Geoscience of Xinjiang (2)*. Beijing: Geological Publishing House; 14~25.
- Huang Botao, Dong Zengchan, Pan Feng, Wang Kai. 2017&. Geochronology, petrogenesis and geological significance of the Early Devonian and terminal Cambrian granites in Qinghe area of China's Altay orogenic belt. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(4): 458~472.
- Li Huijun, He Guoqi, Wu Tairan, Wu Bo. 2006&. Confirmation of Altai—Mongolia microcontinent and its impliations. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1369~1379.
- Li Huijun, He Guoqi, Wu Tairan, Wu Bo. 2010&. Discovery of the Early Paleozoic post-collisional granite in Altay, China and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2445~2451.
- Li Xiaoguang, Gong Xiaoping, Pei Guodong, Han Qiong, Zhao Tongyang, Zheng Jiaying. 2018&. Geochemistry and geochronology of metamorphic rocks in Kanas Group, Altay orogenic belt. *Geology in China*, 45(2): 319~333.
- Li Yanguang, Wang Shuangshuang, Liu Minwu, Meng En, Wei Xiaoyan, Zhao Huibo, Jin Mengqi. 2015&. U Pb Dating Study of Baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and Application. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2400~2418.
- Liu Guoren, Dong Lianhui, Gao Fuping, Chen Jianxiang, Zhao Hua, Wang Dingsheng, Song Zhiyong, He Lixin, Qin Jihua. 2010&. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating and geochemistry of the Devonian granites from the Middle Kelan River Valley of Altay in Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 31(4): 519~531.
- Liu Xijun, Xu Jifeng, Hou Qingye, Bai Zhenghua, Lei Min. 2007&. Geochemical characteristics of Karamaili ophiolite in east Junggar, Xinjiang: products of ridge subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1591~1602.
- Liu Xijun, Xu Jifeng, Wang Shuqing, Hou Qingye, Bai Zhenghua, Lei Min. 2009&. Geochemistry and dating of E-MORB type mafic rocks from Dalabute ophiolite in West Junggar, Xinjiang and geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1373~1389.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination in of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1: 635~643.
- Niu Hecai, Hiroaki Sato, Zhang Haixiang, Jun'ichi Ito Yu Xueyuan, Takashi Nagao, Kentaro Terada, Zhang Qi. 2006. Juxtaposition of adakite, boninite, high-tio 2, and low-tio 2, basalts in the devonian southern altay, xinjiang, nw china. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(4): 439~456.
- Pearce J A, Harris N B L and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of the granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Pearce J A. 1996. Source and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19: 120~125.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene Calc-alkaline rolcanic rocks from the kastamonu area, nortnern Turkey. *CMP*, 58: 63~81.
- Prüfer K, Racimo F, Patterson N, Jay F, Sankararaman S, & Sawyer S, et al. 2014. The complete genome sequence of a neandertal from the Altai Mountains. *Nature*, 505(7481): 43~49.
- Qin Jihua, Geng Xinxia, Wen Chaoquan, Guo Jianxin, Ren Yuchen. 2016&. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of intrusion from Xiaotuergen copper deposit in Altay, Xinjiang, and its geological significance. *Mineral Deposits*, 35(1): 18~32.
- Qin Kezhang, Zhai Mingguo, Li Guangming, Zhao Junxing, Zeng Qingdong, Gao Jun, Xiao Wenjiao, Li Jiliang, Sun Shu. 2017&. Links of collage orogenesis of multiblocks and crust evolution to characteristic metallogenesis in China. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2): 305~325.
- Searle M P, Parrish R R, Hodges K V, Hurford A, Ayres M W and Whitehouse M J. 1997. Shisha Pangma leucogranite, South Tibetan Himalaya: Field relations, geochemistry, age, origin and emplacement. *The Journal of Geology*, 105: 295~317.
- Sengör A M C, Natal' in B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(22): 299~307.
- Shan Qiang, Zeng Qiaosong, Li Ningbo, Yang Wubin, Luo Yong, Jiang Yuhang, Yu Xueyuan. 2012&. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the potassic and sodic rhyolites of the Kangbutiebao Formation in the southern margin of Altay, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2132~2144.
- Shan Qiang, Zeng Qiaosong, Luo Yong, Yang Wubin, Zhang Hong, Qiu Yuzhuo, Yu Xueyuan. 2011&. SHRIMP U-Pb ages and petrology studies on the potassic and podic rhyolites in Altai, Nouth Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3653~3665.
- Shand S J. 1947. *Eruptive Rocks (3rd Edition)*. New York: John Whley.

- Shen Xiaoming, Zhang Haixiang, Ma Lin. 2010. Ridge subduction and the possible evidences in Chinese Altay, Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(2): 181~195.
- Song Peng, Tong Ying, Wang Tao, Qin Qie, Zhang Jianjun, Ning Xdongxu. 2017. Zircon U-Pb age and genetic evolution of Devonian granitic rocks in the southeastern Chinese Altai and its tectonic implications: New evidence for magmatic evolution of Calc-alkaline—high-K Calc-alkaline—alkaline rocks. *Acta Geologica Sinica*, 91(1): 55~79.
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Su Li, Zhang Cong, Zhang Lifei. 2014. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/sunduction, to orogen collapse, and orogrnc recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China. *Earth-Science Reviews*, 129: 59~84.
- Song Shuguang, Wang Mengjue, Wang Cha, Niu Yaoling. 2015. Magmatism during continental collision, subduction, exhumation and mountain collapse in collisional orogenic belts and continental net growth: A perspective. *Science China: Earth Sciences*, 58: 1284~1304.
- Sun Min, Long Xiaoping, Cai Keda, Jiang Yinde, Wang Buyun, Yuan Chao, Zhao Guochun, Xiao Wenjiao, Wu Fuyuan. 2009. Early Paleozoic ridge subduction in the Chinese Altai: Insight from the abrupt change in zircon Hf isotopic compositions. *Science China: Earth Sciences*, 39(7): 935~948.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes London: Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Taylor S R and Mclennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell: Oxford Press; 1~312.
- Tian Hongbiao, Chen Youxin, Yang Yongqiang, Li Lun. 2017b. Ages, origin and tectonic significance of Halaerzi granites from northeastern part of Chinese Altay Mountains. *Earth Science*, 42(10): 1658~1672.
- Tian HongBiao, Zheng Bo, He JunLing. 2017a. The Ordovician magmatism and implication in Wuxilike, Altay orogenic belt, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 33(8): 2591~2603.
- Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, Dai Yajian, Han Baofu, Liu Xiaoming. 2007. Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1933~1944.
- Tong Ying. 2006. Origin of Late Paleozoic Granitoids from the Altai Orogen in China and Their Geological Significance. Chinese Academy of Geological Sciences, 12~101.
- Wang Jingbin, Qin Kezhong, Wu Zhiliang, Hu Jianhui, De Jiniu et al. 1998. Pb—Zn Deposit of Volcano Exhalative Sedimentation on Southern Margin of Altay, Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House; 18~60.
- Wang Tao, Hong Dawei, Tong Ying, Han Baofu, Shi Yurao. 2005. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: Its implications for vertical continental growth. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 640~650.
- Wang Tao, Tong Ying, Li Shan, Zhang Jianjun, Shi Xingjun, Li Jinyi, Han Baofu, Hong Dawei. 2010. Spatial and temporal variations of granitoids in the Altay orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: perspectives from Chinese Altay. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 595~618.
- Wang Tao, Hong Dawei, Jahn Borming, Tong Ying, Wang Yanbin, Han Baofu, Wang Xiaoxia. 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: implications for the tectonic evolution of an accretionary Orogen. *Journal of Geology*, 114: 735~751.
- Wang Zhonggang, Zhao Zhenhua, Zou Tianren. 1998. Geochemistry of Granitoids in Altay, Xinjiang. Beijing: Science Press; 1~152.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W J, Krner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asjjan Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society, London*, 164(1): 21~47.
- Windley B F, Krner A, Guo J H, Qu G S, Li Y Y, Zhang C. 2002. Neoproterozoic to paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: new zircon age data and tectonic evolution. *The Journal of Geology*, 110: 719~737.
- Wong K, Sun Mengru, Zhao Guochun, Yuan Chao, Xiao Wenjiao. 2008. Late paleozoic ridge subduction along the southern margin of Chinese Altai and its implications on orogenesis and crustal growth. *International Geological Congress Oslo Abstracts*.
- Xiao W J, Windley B F, Yuan C, Sun M, Han C M, Lin S F, Chen H L, Yan Q R, Liu D Y, Qin K Z, Li J L, Sun S. 2009. Paleozoic multiple subduction—accretion processes of the Southern Altaids. *American Journal of Science*, 309: 221~270.
- Xiao W J, Windley B F, Badarch G, Sun S, Li J, Qin K Z, Wang Z. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: implications for the growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 161: 339~342.
- Xiao Wenjiao, Han Chunming, Yuan Chao, Sun Min, Lin Shoufa, Chen Hanlin, Li Zilong, Li Jiliang and Sun Shu. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2~4): 102~117.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Yan Quanren, Qin Kezhong, Chen Hanlin, Yuan Chao, Sun Min, Li Jiliang, Sun Shu. 2006. SHRIMP zircon age of the Aermantai ophiolite in the North Xinjiang area, China and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 32~37.
- Xu Jifeng, Castillo P R, Chen Fanrong, Niu Hecai, Yu Xueyuan, Zhen, Zuoping. 2003. Geochemistry of late paleozoic mafic igneous rocks from the Kuerti area, Xinjiang, northwest China: implications for backarc mantle evolution. *Chemical Geology*, 193(1~2): 137~154.
- Yang Fuquan, Chai Fengmei, Li Qiang, Gu Gaoling, Yang Chengdong. 2017. The Discovery of the Late Cambrian - Early Ordovician strata in the basement of the Kelan Basin, Altay, Xinjiang: Constrains from zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(6): 859~871.
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Yan Shenhao, Liu Feng, Chai Fengmei, Zhou Gang, Liu Guoren, He Lixin, Geng Xinxia, Dai Junzhi. 2008. Geochronology, geochemistry and geological implications of the Mengku synorogenic plagiogranite pluton in Altay, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 82(4): 485~499.
- Yang Fuquan, Wang Yongqiang, Yang Chengdong, Li Qiang, Guo Xuji. 2018. Metallic ore deposits in the Kelan Basin, Altay, Xinjiang: Geological characteristics and metallogenesis. *Mineral Deposits*, 37(3): 441~462.
- Yuan Chao, Sun Min, Long Xiaoping, Xia Xiaoping, Xiao Wenjiao, Li Xianhua, Lin Shoufa, Cai Keda. 2007. Constraining the deposition time and tectonic background of the Habahe Group of the Altai. *Acta Geologica Sinica*, 23(7): 1635~1644.
- Yuan Chao, Sun Min, Xiao Wenjiao, Li Xianhua, Chen Hanlin, Lin

- Shoufa, Xia Xiaoping, Long Xiaoping. 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from paleozoic granitoids. *Chemical Geology*, 242(1), 22~39.
- Zeng Qiaosong, Chen Guanghao, Cai Youxing, Wang He, Wang Mengfei. 2009&. Geochemical characteristics of acid volcanic rocks from Chonghuer Basin Altai, Xinjiang and their Geochronological implication. *Geotecnica et Metalligenia*, 32(4):603~612.
- Zeng Qiaosong, Chen Guanghao, Wang He, Shan Qiang. 2007&. Geochemical characteristic, SHRIMP zircon U-Pb dating and tectonic implication for granitoids in Chonghuer basin, Altai, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1921~1932.
- Zhang Haixiang, Niu Hecai, Hiroaki Sato, Shan Qiang, Yu Xueyuan, Junichi Ito, Zhang Qi. 2004&. Late Paleozoic adakite and Nb-enriched basalt from northern Xinjiang: Evidence for the southward subduction of the Paleo-Asian Ocean. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 106 ~ 113.
- Zhang Haixiang, Niu Hecai, Kentaro Teradak, Yu Xueyuan, Hiroaki Sato, Junichi Ito. 2003b&. Zircon SHRIMP U-Pb dating on plagiogranite from Kuerti ophiolite in Altai, north Xinjiang. *China Sci. Bull.*, 48(12): 1350 ~ 1354.
- Zhang Haixiang, Niu Hecai, Yu Xueyuan, Hiroaki Sato, Junichi Ito, Shan Qiang. 2003a&. Geochemical characteristics of the Shaerbulake boninites and their tectonic significance, Fuyun County, northern Xinjiang, China. *Geochimica*, 32(2):155~160.
- Zhang Qi, Ran Hao, LiChengdong. 2012. A-type granite: what is the essence? *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 621~626.
- Zhao Yumei, Peng Ge, Zhao Delong, You Yuecheng. 2016&. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemistry of the Kezile granitic pluton in Altai of China and their geological implications. *Geology and Exploration*, 52(2): 271~282.
- Zheng Yongfei. 2012. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chemical Geology*, 328: 5~48.

LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from Qigelatawu granite in western Altay, northern Xinjiang, and its geological implications

WANG Xing^{1,2)}, LIN Xinwang^{1,2)}, ZHANG Yafeng^{1,2)}, HE Yuanfang^{1,2)},
ZHAO Duanchang^{1,2)}, JIAN Kunkun^{1,2)}, CHEN Guangting³⁾

1) *Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an*, 710068;

2) *Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an*, 710054;

3) *Qinghai Geological Survey Institute, Xining*, 810012

Objectives: The magmatic activity were well active in western Altay Mountains, the Northern of Xinjiang, but the high precision LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronological data of the granitoids is absent. In this work, LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronological and geochemical samples of the Qigelatawu intrusive rocks were collected to study the magmatic activity and tectonic evolution information of the Altay orogenic belt.

Methods: Based on LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope dating, defining the formation age of the Qigelatawu intrusion, and using geochemical data of the intrusive rocks to distinguish the magmatic genesis and tectonic environment of the Altay orogenic belt.

Results: The LA-ICP-MS zircon U-Pb age ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age) of the Qigelatawu intrusive rocks is 425.1 ± 4.4 Ma, revealed that the intrusive rocks formed in the Middle Silurian. The SiO_2 content ranges from 64.07% to 73.77%, Al_2O_3 content range from 12.4% to 15.71% and A/CNK ranges between 0.88~1.16, ALK ranges between 5.85%~7.93% and σ from 1.62 to 2.24, with wearily per-aluminous, high-K calc-alkaline series rocks. The content of REE ranges between 166.28×10^{-6} ~ 197.22×10^{-6} , light—heavy REEs fractionation strong, Eu negative anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.47 \sim 0.63$). The geochemical characteristics of the pluton are that trace elements are enriched in Rb, Th, U (LILE) and La, Ce, Sm, etc., poored in Nb, Zr (HFSE) and Sr, P, Ti, etc., low in Sr and high in Yb (Sr ranges between 93.7×10^{-6} ~ 211×10^{-6} , Yb ranges between 2.1×10^{-6} ~ 3.9×10^{-6}). This study demonstrated that the Qigelatawu intrusion has the characteristics of subduction environment and shows the characteristics of post-collision granites.

Conclusions: Research shows that ancient Asian Ocean subducted north from the Ordovician and continued until the late Middle Paleozoic. The Qigelatawu intrusive rocks, which formed at the end of Early Paleozoic, its complex causes may be related to the ridge subduction in the ancient Asian Ocean.

Keywords: the Middle Silurian; ridge subduction; post-collisional granite; western Altay; Northern Xinjiang

Acknowledgements: LA-ICP-MS zircon U-Pb age test and data analysis and processing received the support

and enthusiastic support of LI Yanguang, engineer of the micro-area analysis laboratory of Xi'an Center of Geological Survey. The review experts and the editor put forward valuable suggestions to this paper. We are thankful to all the people mentioned above.

First author: WANG Xing, male, born in 1988; geological prospecting engineer; mainly engaged in regional geological survey; Email: star_cug@126.com

Manuscript received on:2018-05-21; Accepted on:2019-02-24; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.02.008

青岛灵山岛及邻区早白垩世大地构造演化

孟元库^{1,2)}, 李日辉²⁾

1) 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛, 266590; 2) 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛, 266071

关键词: 灵山岛; 法家茛组; 早白垩世; 断陷湖盆; 大地构造演化

灵山岛位于苏鲁造山带中段, 青岛市西南约 35 km 的南黄海之中, 总面积约 7.66 km², 最高峰海拔 513.6 m, 是中国北方第一高岛。据山东省区域地质资料, 岛上的岩石主要由早白垩世河湖相碎屑岩及其上覆的中酸性火山岩组成(宋明春和王沛成, 2003; 钟建华, 2012)。吕洪波等(2011)对青岛灵山岛碎屑岩进行了深入的考察和研究, 认为其属于典型的深海—半深海沉积而非传统的河湖相沉积, 进一步指出灵山岛及其邻区在晚侏罗世至早白垩世时仍属于残余海(洋)盆, 并强调扬子和华北板块的最终缝合拼贴应该在早白垩世晚期。这一研究成果引起了苏鲁造山带新的地学热, 随后众多的专家、学者对灵山岛的碎屑岩、火山岩进行了考察研究, 特别是 2012 年古地理及沉积学学术会议在青岛召开, 灵山岛作为该次会议的野外考察点, 更是引起了地质学家的再一次关注, 也将苏鲁造山带的地学研究推到了一个新的高潮。自 2011 年至今, 已有 50 余篇学术论文对其进行了报道。笔者通过整理发现, 前人的研究对象绝大多数以发育软沉积变形的下白垩统法家茛组(K₁f)为主(Yang Renchao and van Loon, 2016; 葛毓柱和钟建华, 2017), 而对上覆的含砾粗碎屑以及火山角砾熔岩研究(Wang Jun et al., 2014, 2015; Meng Yuanku et al., 2018)缺乏系统性。目前, 普遍的观点认为法家茛组上覆的火山角砾熔岩为青山期(K₁q)岩浆活动的产物, 形成时代应明显晚于下伏莱阳群法家茛组(宋明春和王沛成, 2003; 吕洪波等, 2012, 2013; 张海春等, 2013)。然而, 笔者等近期最新的研究成果却表明(Meng Yuanku et al., 2018; 孟元库等, 2018), 下伏的法家茛组和上覆的含砾粗碎

屑岩以及火山角砾熔岩形成时代在误差范围内基本一致, 这为进一步重新认识灵山岛的大地构造格局提供了新的思路。在此基础上, 并结合区域地质, 笔者等提出了一个新的大地构造演化模型, 该模型能较好地回答灵山岛上目前存在的诸多争议, 并为灵山岛的进一步地学研究提供了可行性参考。

灵山岛上的火山熔岩形成于早白垩世与邻区陆上的大面积花岗岩形成时代基本一致(郭敬辉等, 2005; 张娟, 2011; Wang Jun et al., 2016; Meng Yuanku et al., 2018)。Wang Jun 等(2016)根据铝在角闪石中的含量($P = 4.23 * \text{Total Al} - 3.46$)计算了花岗岩侵位时的压力, 然后根据其压力间接换算了青岛地区崂山花岗岩的侵位深度。计算结果显示青岛地区崂山花岗岩侵位、结晶于地下 9.28 ~ 11.21 km, 平均侵位深度为 ~10 km 左右。锆石 U-Pb 年龄显示, 青岛地区的花岗岩类成岩时代主要为 120 ~ 110 Ma(郭敬辉等, 2005; 张娟, 2011; Wang Jun et al., 2016), 而灵山岛地区的火山岩和沉积岩与花岗岩形成的时代几乎一致(赵广涛等, 1997; 王世进等, 2010; Wang Jun et al., 2014, 2015, 2016; Meng Yuanku et al., 2018; 孟元库等, 2018)。野外地质调查显示, 早白垩世时灵山岛上的岩石主要形成于地表或者近地表, 完全不同于花岗岩, 暗示了它们在时空上的不同。现今, 胶南地区的花岗岩多已出露地表(例如大珠山), 暗示了从早白垩世成岩以来遭受了较为强烈的抬升和剥蚀, 其上 ~10 km 的壳源物质被剥蚀殆尽。灵山岛上保存完好的火山角砾熔岩和河流相沉积(图 1a, b)暗示了从早白垩世至今灵山岛地区没有遭受强烈的构造抬升, 处于一个相对平稳的构造环境, 这才导致了今天深成侵入的花岗岩与表层喷发的火山岩以及河流相沉积处于近乎一致的海拔高度(灵山岛对面的大珠山海拔约 500m)。对于火山角砾熔岩和花岗岩在时空上的这种特殊

注: 本文为中国博士后基金(编号: M2017612220)、山东省自然科学基金博士基金(编号: ZR2017BD033)资助项目和中国地质调查局工作项目(编号: 1212011220113)的成果。

收稿日期: 2018-12-22; 改回日期: 2019-02-02; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.02.021

作者简介: 孟元库, 男, 1986 年生, 博士, 主要从事构造地质学及岩石大地构造的教学和研究工作, Email: ykmeng@foxmail.com; myk@sdust.edu.cn。