

# 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

菅坤坤<sup>1)</sup>, 朱云海<sup>2)</sup>, 王利伟<sup>3)</sup>, 高峰<sup>1)</sup>, 刘向东<sup>1)</sup>, 何元方<sup>1)</sup>, 袁璋<sup>1)</sup>, 陈继平<sup>1)</sup>, 高维强<sup>1)</sup>

1) 陕西省地质调查中心, 西安, 710068; 2) 中国地质大学(武汉), 武汉, 430074;

3) 中国冶金地质总局西北地质勘查院, 西安, 710016

**内容提要:** 东昆仑中灶火地区的石英闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩具有连续的成分变化。岩石具有中等到高的 SiO<sub>2</sub> 含量(58.15% ~ 71.12%), 适度的高铝和全碱含量, 为中—高钾钙碱性的准铝质 I 型花岗岩。岩石相对富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 并亏损高场强元素, 显示出弧岩浆岩的一般地球化学特征。锆石地质年代学分析获得石英闪长岩和花岗闪长岩的锆石结晶年龄约为 243Ma, 表明本文研究的花岗岩类为中三叠世岩浆岩。结合地质、地球化学研究, 这套花岗岩形成于陆缘弧环境, 是古特提斯洋俯冲晚期的岩浆记录。其成因为俯冲动力学背景下, 幔源岩浆的底侵作用导致下地壳部分熔融, 随后壳源熔体与幔源熔体发生不同程度的混合形成母岩浆, 又经历了较高级别的结晶分异形成石英闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩序列。

**关键词:** 东昆仑; I 型花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 大陆边缘弧

东昆仑造山带位于青藏高原北部和中央造山系西段, 是中央造山系的重要组成部分。东昆仑造山带出露巨量的花岗质岩浆岩, 记录着东昆仑地区原特提斯洋和古特提斯洋的洋壳俯冲、陆陆(弧)碰撞和后碰撞等构造事件。东昆仑晚古生代—早中生代的构造演化受控于古特提斯洋的演化, 越来越多的证据表明古特提斯洋的俯冲作用持续到中三叠世, 并于晚三叠世洋盆闭合。晚古生代—早中生代花岗质岩石, 是东昆仑造山带岩浆岩主体, 其代表性岩石组合为辉长岩—角闪辉长岩—石英闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩(袁万明等, 2000; 肖庆辉等, 2009; 王秉璋等, 2014; 南卡俄吾等, 2014), 该期花岗岩中含有丰富的暗色镁铁质微粒包体。目前已报道与古特提斯洋相关的岩浆岩, 以俯冲和后碰撞阶段的花岗质岩石为主, 且古特提斯洋闭合的时限, 以沉积地层和后碰撞岩浆岩的约束为主, 相对缺乏俯冲晚期至同碰撞阶段的花岗岩资料。本文以东昆北地块北部的中灶火地区中三叠世花岗岩为研究对象, 对岩体的岩相学、岩石地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究, 探讨其地球化学特征、形成时代、岩石成因和形成的构造背景, 为东昆仑地区晚古生代—早中生代岩浆活动及古特提斯洋闭合时限的约束提供

科学依据。

## 1 东昆仑区域地质背景

东昆仑造山带是经历了多期次的俯冲、碰撞形成的复杂造山带, 是中央造山带的一部分(殷鸿福等, 1997)。造山带内由北向南发育东昆中构造混杂岩带和东昆南(阿尼玛卿)蛇绿混杂岩带, 根据前人及本次区域地质调查工作取得的成果, 以两条构造混杂岩带为界将研究区由北向南依次划分为东昆北地块, 东昆南俯冲增生楔和巴颜喀拉地块, 本文研究的中灶火地区中三叠世花岗岩位于东昆北地块北部(图 1)。

东昆北地块出露的地层以古元古界白沙河岩组和中元古界小庙岩组结晶基底岩系为主。中元古界小庙岩组包括石英岩、云母石英片岩、黑云母斜长片麻岩与大理岩等, 其原岩为海相泥质—砂—碳酸盐岩和板内火山岩—细粒陆源碎屑岩—碳酸盐岩建造, 并经历高达角闪岩相的中深变质作用改造。区内岩浆活动极为强烈, 时代跨越加里东期、华力西期和印支期, 以华力西期和印支期为主。加里东和华力西期岩体多呈岩株、岩枝状产出, 空间上呈不规则状, 透镜状产出。印支期发育中酸性侵入体, 呈岩

注: 本文为中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212010918021)的成果。

收稿日期: 2016-01-21; 改回日期: 2017-04-18; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.03.009

作者简介: 菅坤坤, 男, 1987年生。工程师, 硕士学位。岩石学专业, 主要从事区域地质、矿产调查研究工作。Email: jiankunryan@163.com。

株、岩脉、岩枝及不规则状产出,其中,中三叠世花岗岩呈较大的岩株及不规则状产出,空间上岩体呈近北西向展布,与区域构造走向近一致。岩性主要为石英闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩,以发育暗色微粒包体为特征。研究区断裂构造发育,主要发育近东西向(F6、F7、F8)和北西向(F4、F5)两组断裂,其中北西向断裂发育程度较东西向弱,且规模小,为右行走滑断层。在研究区中部,脆性北西向断层(F5)叠加在具有左行性质的韧性剪切带之上,韧性剪切带发育糜棱岩、糜棱岩化片麻岩,剪切透镜体,常见 $\sigma$ 型旋转碎斑系,S—C组构,为早期韧性剪切带,具有左行走滑性质。

## 2 花岗岩地质及岩相学特征

根据青海东昆仑中灶火地区1:5万四幅区域地质调查报告(中国地质大学(武汉)地质调查研究院<sup>①</sup>),对中灶火地区中三叠世花岗岩体进行编号,本文研究的岩体编号为3号和5号岩体(图1)。其中3号岩体,位于研究区东北部,呈岩株状产出,形态不规则,整体呈北西向展布,出露面积7km<sup>2</sup>。岩体西部出露较宽,与古元古界小庙岩组呈侵入接触关系,侵入界面截然,岩体中发育古元古界小庙岩组片岩捕虏体(图2a),东部变窄,被第四系覆盖。主要由石英闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩组成,不同岩性之间呈涌动接触关系,岩石中发育闪长质暗色微粒包体(图2b),包体形态呈椭圆状、水滴状

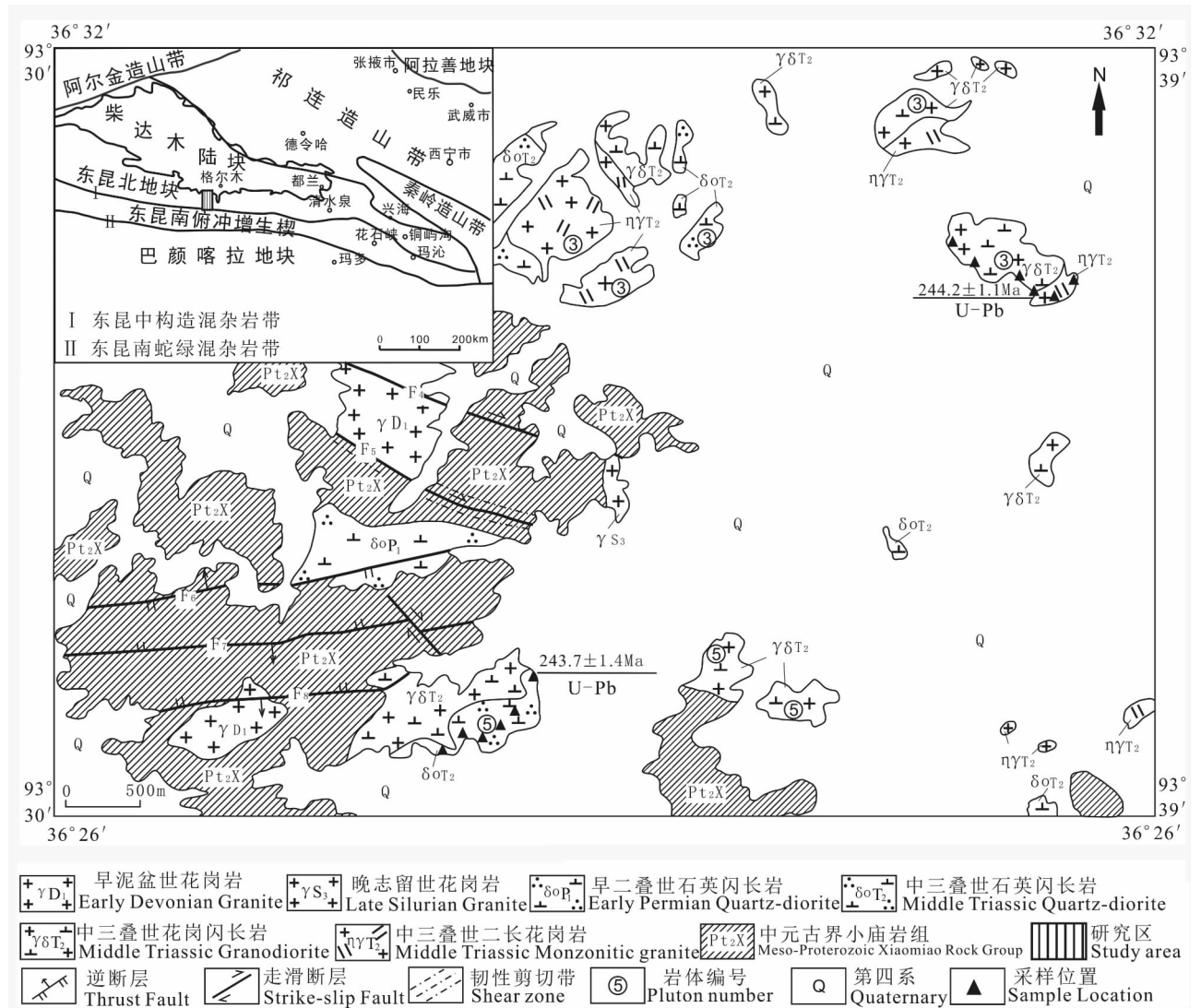


图1 东昆仑大地构造简图及中灶火地区区域地质简图

Fig. 1 Geotectonic framework of East Kunlun and geological maps of the Zhongzaohuo area

等不规则状产出,单个包体直径约为5~20cm。5号岩体,位于研究区南部,呈岩株状产出,形态不规则,整体呈近东西向展布,出露面积3km<sup>2</sup>,与古元古界小庙岩组呈侵入接触关系,侵入界面截然。由石英闪长岩和花岗闪长岩组成,二者之间呈涌动接触关系,岩石中发育闪长质暗色微粒包体(图2c),包体形态呈椭圆状、长条状等不规则状产出,单个包体直径约为3~40cm。

**石英闪长岩:**中细粒花岗结构(粒径0.2~4mm),块状构造。岩石主要矿物成分为斜长石(65%)、石英(10%)、黑云母(8%)、角闪石(15%),副矿物主要为磷灰石、锆石和少量金属矿物(2%)。其中,斜长石呈半自形板、柱状,发育聚片双晶(图2d)、环带构造和卡钠复合双晶,局部绢云母化;石英为他形粒状;黑云母,片状,绿泥石化;角闪石呈长柱状,局部发育简单双晶。

**花岗闪长岩:**中细粒花岗结构(粒径0.8~4mm),块状构造。主要矿物成分为斜长石(40%)、钾长石(15%)、石英(25%)、黑云母(5%)、角闪石(13%),副矿物主要为磷灰石和锆石(2%)。其中,斜长石多呈半自形板、柱状,发育聚片双晶、卡钠复

合双晶,环带结构(图2e),局部绢云母化;钾长石呈柱状,发育简单双晶和格子双晶;石英为他形粒状;黑云母为片状,绿泥石化;角闪石呈柱状或长柱状,偶见简单双晶。

**二长花岗岩:**中细粒花岗结构(0.6~3.5mm),块状构造。主要矿物成分为斜长石(30%)、碱性长石(34%)、石英(25%)、角闪石(10%),副矿物主要为磷灰石、锆石和金属矿物(1%)。斜长石发生绢云母化,发育聚片双晶,偶见环带构造;碱性长石主要为正长石,发育简单双晶,次为微斜长石,格子双晶发育(图2f);石英呈他形粒状;黑云母为片状,蚀变严重,绿泥石化;角闪石呈半自形柱状,横切面可见菱形解理,发育简单双晶。

### 3 测试分析方法

#### 3.1 锆石 U-Pb 定年

用于锆石年代学测试所需的样品,均采自野外新鲜的露头,经人工去除风化面后由河北廊坊地质诚信公司完成锆石的挑选。锆石的制靶:在双目镜下挑选不同晶型,不同颜色的锆石颗粒,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

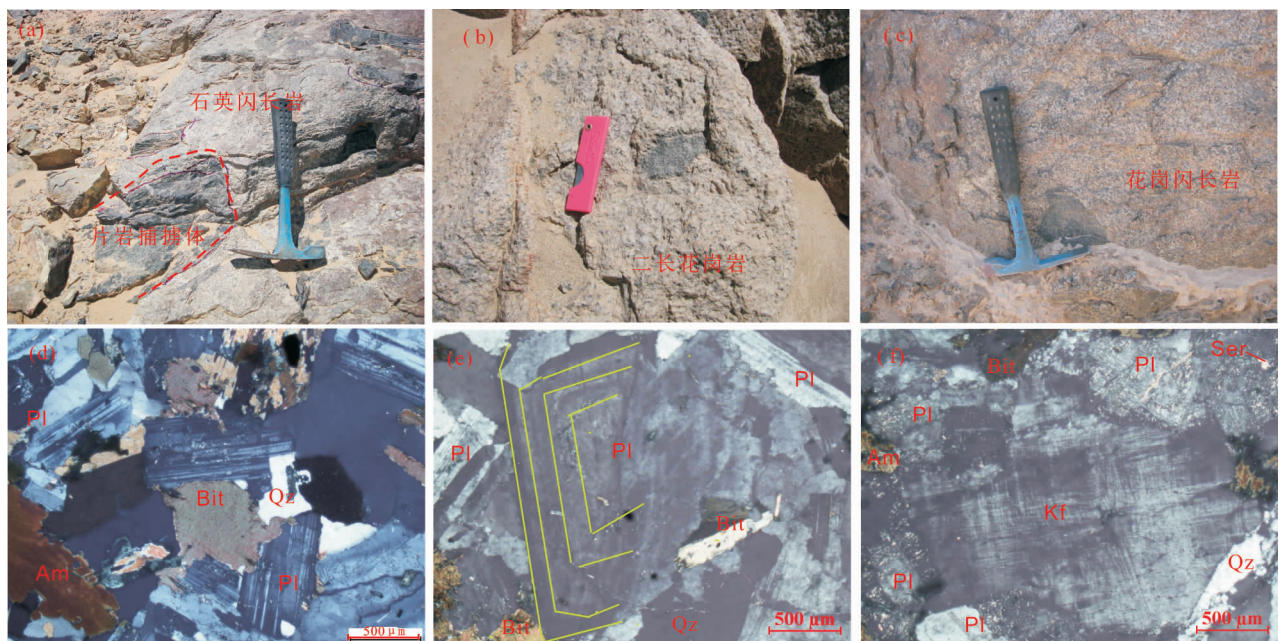


图2 东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩野外及典型结构显微照片:(a)石英闪长岩中的片岩捕掳体;(b)花岗闪长岩中的镁铁质暗色微粒包体;(c)二长花岗岩中的镁铁质暗色微粒包体;(d)石英闪长岩;(e)花岗闪长岩;(f)二长花岗岩  
Fig. 2 Outcrop photos and micrographs showing the typical textures of the Middle Triassic granite in Zhongzaohuo area, eastern Kunlun Mountains (a) Schist xenoliths in quartz-diorite; (b) mafic microgranular enclave in granodiorite; (c) mafic microgranular enclave in monzonitic granite; (d) quartz-diorite; (e) granodiorite; (f) monzonitic granite

Qz—石英;Pl—斜长石;Kf—钾长石;Bit—黑云母;Am—角闪石;Ser—绢云母

Qz—quartz; Pl—Plagioclase; Kf—K-feldspar; Bit—biotite; Am—amphibole; Ser—sericite

表 1 东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果  
 Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the Middle Triassic Granite in Zhongzaohuo Area, East Kunlun

测点号	元素含量 ( $\times 10^{-6}$ )			Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)						谐和度 (%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{Pb})$		
					测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$	
PM030-11-1-1	8.90	90	175	0.51	0.0527	0.0023	0.2980	0.0125	0.0413	0.0005	317	100	265	10	261	3	98
PM030-11-1-2	9.14	99	189	0.52	0.0574	0.0033	0.3054	0.0168	0.0387	0.0004	509	128	271	13	244	3	89
PM030-11-1-3	11.30	116	240	0.48	0.0519	0.0019	0.2738	0.0096	0.0383	0.0003	280	81	246	8	242	2	98
PM030-11-1-4	11.63	121	256	0.47	0.0514	0.0018	0.2719	0.0096	0.0384	0.0005	257	84	244	8	243	3	99
PM030-11-1-5	10.55	127	218	0.58	0.0559	0.0021	0.2951	0.0111	0.0383	0.0004	450	83	263	9	242	3	92
PM030-11-1-6	11.09	113	231	0.49	0.0580	0.0026	0.3064	0.0125	0.0387	0.0005	532	100	271	10	245	3	89
PM030-11-1-7	9.27	111	194	0.57	0.0553	0.0022	0.2951	0.0118	0.0386	0.0004	433	82	263	9	244	3	92
PM030-11-1-8	8.10	95	170	0.56	0.0550	0.0025	0.2922	0.0131	0.0386	0.0004	413	108	260	10	244	3	93
PM030-11-1-9	12.89	150	277	0.54	0.0519	0.0019	0.2746	0.0098	0.0385	0.0004	283	85	246	8	243	2	98
PM030-11-1-10	10.32	102	223	0.46	0.0538	0.0027	0.2840	0.0127	0.0387	0.0004	361	111	254	10	245	3	96
PM030-11-1-11	9.57	100	195	0.51	0.0612	0.0027	0.3302	0.0139	0.0393	0.0004	656	94	290	11	249	3	84
PM030-11-1-12	9.88	112	208	0.54	0.0552	0.0023	0.2931	0.0123	0.0385	0.0004	420	99	261	10	243	2	93
PM030-11-1-13	9.37	86.7	193	0.45	0.0709	0.0032	0.3768	0.0170	0.0387	0.0005	954	93	325	13	245	3	71
PM030-11-1-14	8.79	115	178	0.65	0.0596	0.0024	0.3154	0.0119	0.0386	0.0005	591	87	278	9	244	3	86
PM030-11-1-15	22.10	177	492	0.36	0.0539	0.0015	0.2871	0.0083	0.0384	0.0004	365	63	256	7	243	2	94
PM030-11-1-16	8.92	105	190	0.55	0.0527	0.0022	0.2771	0.0111	0.0384	0.0005	317	94	248	9	243	3	97
PM030-11-1-17	11.67	121	242	0.50	0.0573	0.0022	0.3099	0.0108	0.0396	0.0005	506	81	274	8	250	3	90
PM030-11-1-18	10.61	114	224	0.51	0.0578	0.0021	0.3081	0.0116	0.0388	0.0004	520	80	273	9	245	3	89
PM011-4-1-1	9.28	104	195	0.53	0.0492	0.0018	0.2600	0.0093	0.0386	0.0004	167	82	235	8	244	3	96
PM011-4-1-2	15.67	196	318	0.62	0.0502	0.0016	0.2654	0.0085	0.0384	0.0003	211	76	239	7	243	2	98
PM011-4-1-3	7.06	91	146	0.62	0.0563	0.0024	0.2898	0.0116	0.0376	0.0004	461	94	258	9	238	3	91
PM011-4-1-4	11.85	143	242	0.59	0.0516	0.0022	0.2725	0.0113	0.0384	0.0004	333	96	245	9	243	2	99
PM011-4-1-5	12.87	129	268	0.48	0.0521	0.0015	0.2778	0.0076	0.0388	0.0004	300	60	249	6	245	2	98
PM011-4-1-6	12.65	180	254	0.71	0.0544	0.0018	0.2852	0.0093	0.0381	0.0003	387	76	255	7	241	2	94
PM011-4-1-7	25.90	236	557	0.42	0.0507	0.0013	0.2701	0.0066	0.0387	0.0003	233	59	243	5	245	2	99
PM011-4-1-8	13.31	147	279	0.53	0.0504	0.0017	0.2682	0.0089	0.0386	0.0003	213	44	241	7	244	2	98
PM011-4-1-9	18.72	296	376	0.79	0.0499	0.0017	0.2664	0.0090	0.0388	0.0004	191	112	240	7	245	2	97
PM011-4-1-10	9.79	106	207	0.51	0.0514	0.0019	0.2733	0.0096	0.0387	0.0004	257	83	245	8	245	2	99
PM011-4-1-11	16.59	168	354	0.48	0.0499	0.0016	0.2644	0.0081	0.0384	0.0003	191	69	238	7	243	2	98
PM011-4-1-12	13.23	167	273	0.61	0.0515	0.0017	0.2763	0.0090	0.0388	0.0004	265	79	248	7	245	2	99
PM011-4-1-13	16.61	169	352	0.48	0.0514	0.0017	0.2727	0.0086	0.0387	0.0004	261	74	245	7	244	3	99
PM011-4-1-14	11.49	137	237	0.58	0.0562	0.0022	0.2945	0.0115	0.0382	0.0004	461	87	262	9	241	3	91

测点号	元素含量( $\times 10^{-6}$ )			Th/U	同位素比值						同位素年龄( Ma)						谐和度 (%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{Pb})$		
					测值	$1\sigma$	测值	$1\sigma$	测值	$1\sigma$	测值	$1\sigma$	测值	$1\sigma$	测值	$1\sigma$	
PM011-4-1-15	15.49	187	322	0.58	0.0529	0.0017	0.2806	0.0085	0.0386	0.0003	324	72	251	7	244	2	97
PM011-4-1-16	19.02	199	401	0.49	0.0526	0.0015	0.2818	0.0082	0.0387	0.0003	322	58	252	6	245	2	97
PM011-4-1-17	12.19	167	237	0.70	0.0579	0.0026	0.3098	0.0116	0.0395	0.0005	528	94	274	9	250	3	90
PM011-4-1-18	7.43	98	151	0.65	0.0516	0.0024	0.2700	0.0120	0.0385	0.0004	265	101	243	10	243	3	99

测点号	元素含量 ( $\times 10^{-6}$ )			Th/U	同位素比值				同位素年龄 (Ma)				谐和度 (%)				
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{Pb})$						
					测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$					
PM011-4-1-15	15.49	187	322	0.58	0.0529	0.0017	0.2806	0.0085	0.0386	0.0003	324	72	251	7	244	2	97
PM011-4-1-16	19.02	199	401	0.49	0.0526	0.0015	0.2818	0.0082	0.0387	0.0003	322	58	252	6	245	2	97
PM011-4-1-17	12.19	167	237	0.70	0.0579	0.0026	0.3098	0.0116	0.0395	0.0005	528	94	274	9	250	3	90
PM011-4-1-18	7.43	98	151	0.65	0.0516	0.0024	0.2700	0.0120	0.0385	0.0004	265	101	243	10	243	3	99

分固化后对锆石表面进行抛光,至锆石内部暴露。通过反射光、透射光、阴极发光显微图像对锆石的内部结构进行分析,然后进行锆石 LA-ICP-MS 分析。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室进行,采用 Agilent 7500a 的 ICP-MS 仪器与装配有 193nm 气体激光的 GeoLas 2005 激光剥蚀系统联机进行,使用 He 作为剥蚀物质的载气,激光束斑 32 $\mu\text{m}$ 。利用锆石标样 GJ-1 作为外标对同位素分馏进行校正,采用国际标准锆石 91500 外部校正法进行锆石分析。微量元素含量采用国际标样 NIST 610 作为外标,<sup>29</sup>Si 作为内标元素进行校正。数据处理利用 ICPMSDataCal (Liu Yongsheng et al., 2008) 完成,年龄采用 3.71 版本的 Isoplot 程序计算。

### 3.2 元素地球化学

用于全岩主、微量元素分析的样品均为 200 目以下的新鲜粉末样,全岩主量元素的测试采用武汉综合岩矿测试中心的 RIX2100 型 X 射线荧光光谱仪进行分析,样品分析精度优于 5%。全岩微量元素含量在武汉综合岩矿测试中心利用 Agilent7500a

ICP-MS 分析完成。用于 ICP-MS 分析的样品处理步骤如下:① 将研磨至 200 目以下的岩石粉末 50mg 置于 Teflon 坩锅中;② 采用 Teflon 溶样弹将样品用 HF + HNO<sub>3</sub> 在 195 $^{\circ}\text{C}$  条件下消解大于 48h;③ 将在 120 $^{\circ}\text{C}$  条件下蒸干除 Si 后的样品用 2% HNO<sub>3</sub> 稀释 2000 倍,定容于干净的聚酯瓶。样品分析精度优于 5% ~ 10%。

## 4 测试结果

### 4.1 锆石 U-Pb 年代学

东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩类的岩性为石英闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩,本次对石英闪长岩和花岗闪长岩分别进行了锆石 U-Pb 年代学测试。石英闪长岩,样品编号为 PM030-11-1,采样点的坐标为(北纬 36 $^{\circ}27'06''$ ;东经 93 $^{\circ}34'18''$ );花岗闪长岩,样品编号为 PM011-4-1,采样点的坐标为(北纬 36 $^{\circ}30'54''$ ;东经 93 $^{\circ}38'06''$ ),分析结果见表 1。

#### 4.1.1 石英闪长岩

用于测试分析的锆石颗粒均为淡黄色或无色透明,大部分呈自形长柱状,少量呈短柱状,长 110 ~ 250 $\mu\text{m}$ ,长宽比约为 1:1 ~ 1:3,锆石 CL 图像上具有明显的岩浆震荡环带(图 3a),所有测点均具有较高的 Th、U 含量(Th:  $87 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$ ; U:  $170 \times 10^{-6} \sim 492 \times 10^{-6}$ ),Th/U 的比值介于 0.46 至 0.65 之间,仅一个测点为 0.36(测点 15),与典型的岩浆锆石特征类似(Belousova et al., 2002; 吴元保等, 2004; 钟玉芳, 2006)。此次共完成了 14 颗锆石的 18 个测点分析,其中 1 号测点和 17 号测点给出的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄数据明显偏大,分别为 261  $\pm$  3Ma 和 250  $\pm$  3Ma,可能代表该岩浆系统的早期岩浆活动。测点 11 和测点 13 谐和度偏低,考虑剔除,不参与谐和年龄作图和加权平均年龄计算。在锆石谐和图(图 4a)上,其余 14 个测点均投影在谐和线上或附近区域,其 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄值介于 242  $\pm$  2Ma 与 245  $\pm$  3Ma 之间,加权平均年龄为 243.7  $\pm$  1.4Ma, (MSWD = 0.15) (图 4b),代表石英闪长岩的结晶年龄。

#### 4.1.2 花岗闪长岩

用于测试分析的锆石颗粒颜色为浅黄色或无色透明,大部分呈自形长柱状,少量为短柱状及粒状,长 100 ~ 220 $\mu\text{m}$ ,长宽比为 1:1 ~ 1:3,锆石 CL 图像上见明显的岩浆韵律环带(图 3b),且具有较高的 Th、U 含量(Th:  $91 \times 10^{-6} \sim 296 \times 10^{-6}$ ; U:  $151 \times$



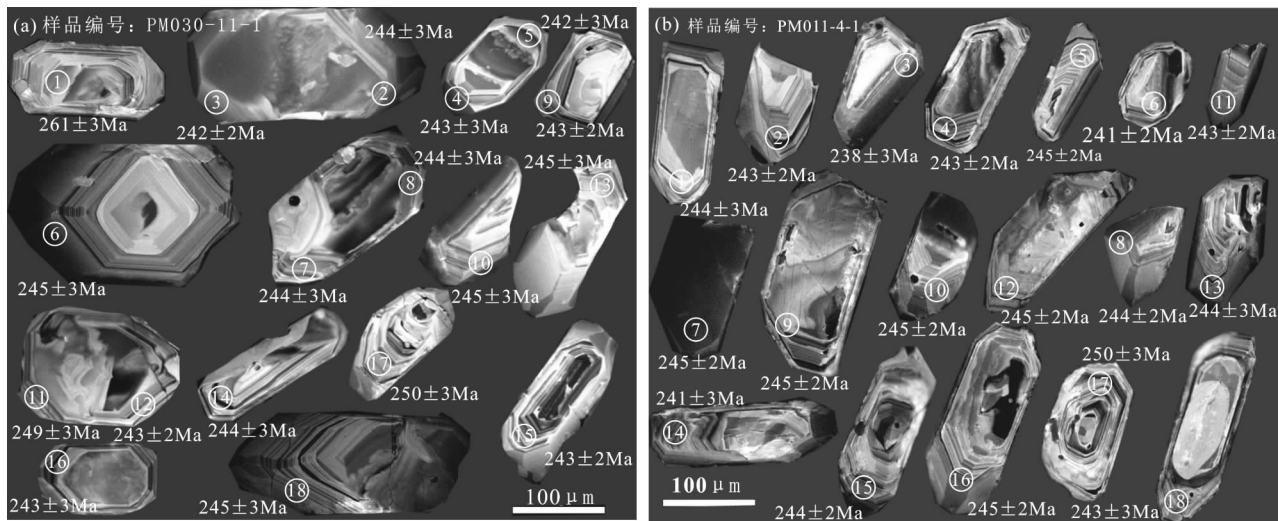


图3 东昆仑中灶火地区石英闪长岩(a)和花岗闪长岩(b)锆石 CL 图像及 U-Pb 年龄分析点  
 Fig. 3 CL images of zircons and the points for U-Pb analysis from Quartz-diorite (a) and Granodiorite (b) in Zhongzaohuo Area, East Kunlun

$10^{-6} \sim 557 \times 10^{-6}$ ), Th/U 的比值介于 0.42 至 0.79 之间, 均大于 0.4, 具有典型的岩浆锆石的特点 (Vavra et al., 1999; Hoskin et al., 2003; 吴元保等, 2004)。此次共完成了 18 颗锆石的 18 个测点分析, 其中, 测点 3、6、14 偏离谐和曲线较大, 考虑剔除; 17 号测点年龄数据偏大, 可能代表岩浆系统的早期岩浆活动, 因此, 上述测点不参与谐和年龄作图和加权平均年龄的计算。其余 14 个测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值比较集中, 介于  $243 \pm 3\text{Ma}$  与  $245 \pm 2\text{Ma}$  之间, 加权平均年龄为  $244.2 \pm 1.1\text{Ma}$  (MSWD = 0.16) (图

5a, b), 代表花岗闪长岩的结晶年龄。

## 5 岩石地球化学特征

### 5.1 主量元素

东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩主量元素测试结果见表 2。

岩石  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  含量分别为 58.15% ~ 71.12% (平均 64.3%)、1.32% ~ 3.74% (平均 2.52%),  $\text{Mg}^\#$  为 42.1 ~ 47.5,  $\text{TiO}_2$  为 0.41% ~ 1.09% (平均 0.72%),  $\text{CaO}$  为 2.56% ~ 6.53% (平均 4.53%),

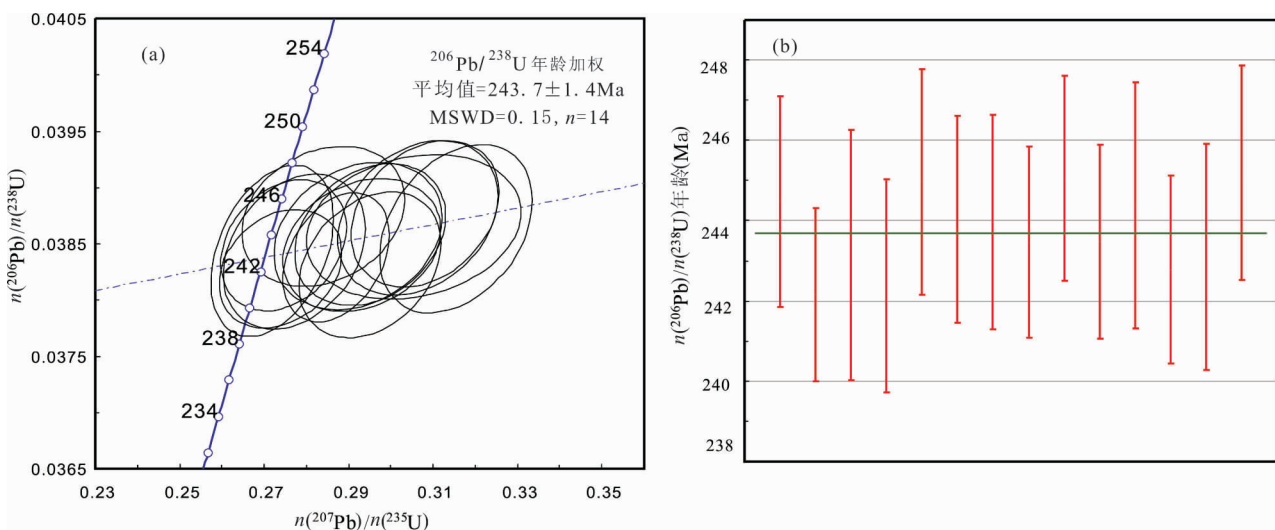


图4 东昆仑中灶火地区石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)及加权平均年龄图(b)  
 Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and weighted average age (b) for Quartz-diorite in Zhongzaohuo Area, East Kunlun

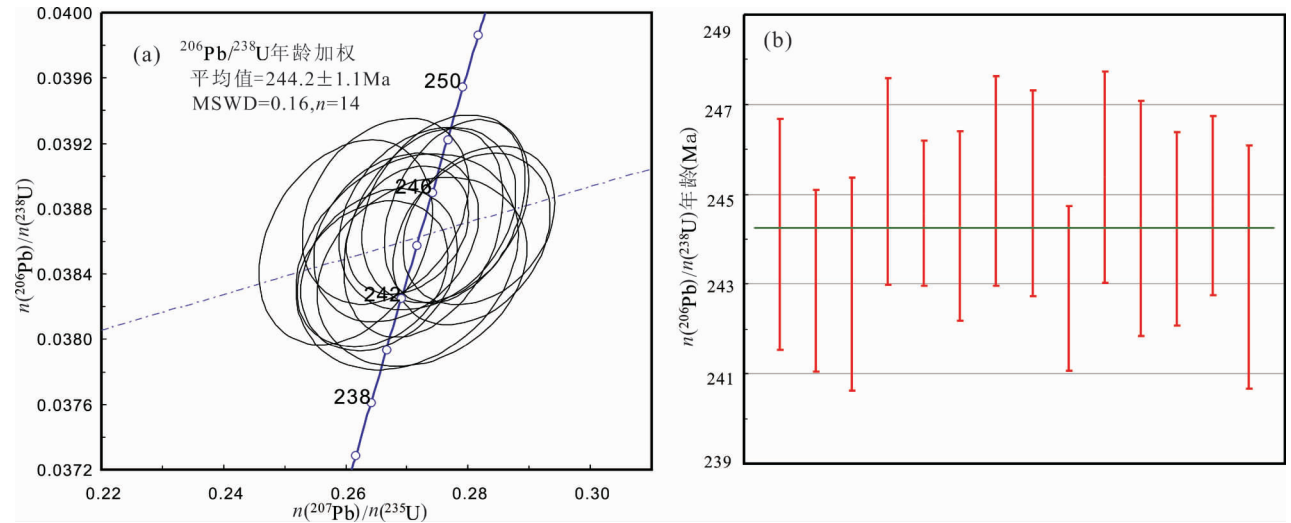


图 5 东昆仑中灶火地区花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)及加权平均年龄图(b)

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and weighted average age (b) for Granodiorite in Zhongzaohuo Area, East Kunlun

Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O 含量为 4.68% ~ 6.8% (平均 5.92%), K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值 0.6 ~ 1.5。在侵入岩 TAS 分类图解中(图 6a)岩石落在闪长岩—花岗闪长岩—花岗岩区域,属于亚碱性系列。岩石里特曼指数 δ 值为

1.39 ~ 1.76,均小于 3.3,属钙碱性系列。在 SiO<sub>2</sub>—K<sub>2</sub>O 图解(图 6b)中除两个样品均落入中钾钙碱性区域外,其余均落在高钾钙碱性区域。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 12.93% ~ 16.53% (平均 14.74%),铝饱和指数 A/

表 2 东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩主量元素地球化学组成(%)

Table 2 Major element compositions (%) of the Middle Triassic Granite in Zhongzaohuo Area, East Kunlun

样品号	PM011 -1-1	PM011 -2-1	PM011 -3-1	PM011 -4-1	PM011 -5-1	PM011 -6-1	PM030 -1-1	PM030 -3-1	PM030 -4-1	PM030 -6-1	PM030 -8-1	PM030 -11-1
岩性	二长花岗岩			花岗闪长岩			石英闪长岩					
SiO <sub>2</sub>	70.72	71.04	71.12	64.74	66.44	64.18	61.98	62.43	58.54	58.15	59.42	62.88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.44	12.93	13.20	13.94	14.05	14.27	15.84	15.46	16.53	15.68	15.99	15.58
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.69	0.77	0.81	1.30	1.22	1.29	1.27	1.44	1.62	1.86	1.64	1.02
FeO	2.52	2.67	2.63	4.45	3.55	4.57	4.50	4.35	5.35	5.70	5.35	4.70
CaO	2.60	2.56	2.61	4.15	3.36	4.49	5.16	5.54	6.40	6.53	6.03	4.95
MgO	1.32	1.43	1.37	2.57	2.24	2.78	2.65	2.70	3.46	3.74	3.31	2.70
K <sub>2</sub> O	4.09	3.96	3.96	3.27	3.82	3.16	3.09	2.73	1.75	1.77	2.51	2.86
Na <sub>2</sub> O	2.71	2.68	2.62	2.74	2.62	2.68	3.18	2.90	3.12	2.91	2.92	2.99
TiO <sub>2</sub>	0.41	0.44	0.42	0.72	0.64	0.75	0.82	0.77	0.90	1.09	0.97	0.76
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.09	0.09	0.16	0.14	0.18	0.16	0.16	0.21	0.23	0.22	0.16
MnO	0.06	0.07	0.07	0.11	0.09	0.11	0.10	0.12	0.14	0.14	0.13	0.10
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.80	0.95	0.85	1.31	1.48	1.20	0.95	1.08	1.67	0.80	1.21	1.01
CO <sub>2</sub>	0.38	0.24	0.06	0.33	0.14	0.13	0.10	0.10	0.11	0.15	0.08	0.10
烧失	0.84	0.90	0.59	1.25	1.40	0.80	0.55	0.81	1.21	1.37	0.68	0.63
总量	100.66	100.73	100.40	101.04	101.19	100.59	100.35	100.59	101.01	100.12	100.46	100.44
δ	1.67	1.57	1.54	1.66	1.77	1.61	2.07	1.63	1.53	1.45	1.80	1.72
A/CNK	0.99	0.97	0.99	0.89	0.97	0.89	0.88	0.87	0.89	0.84	0.87	0.92
A/NK	1.51	1.49	1.54	1.73	1.66	1.82	1.85	2.00	2.35	2.34	2.13	1.94
Mg <sup>#</sup>	42.83	43.12	42.10	44.91	46.22	46.38	45.57	46.02	47.54	47.49	46.37	46.15

注: Mg<sup>#</sup> = 100 × n(Mg<sup>2+</sup>) / [n(Mg<sup>2+</sup>) + n(Fe<sup>2+</sup>)]



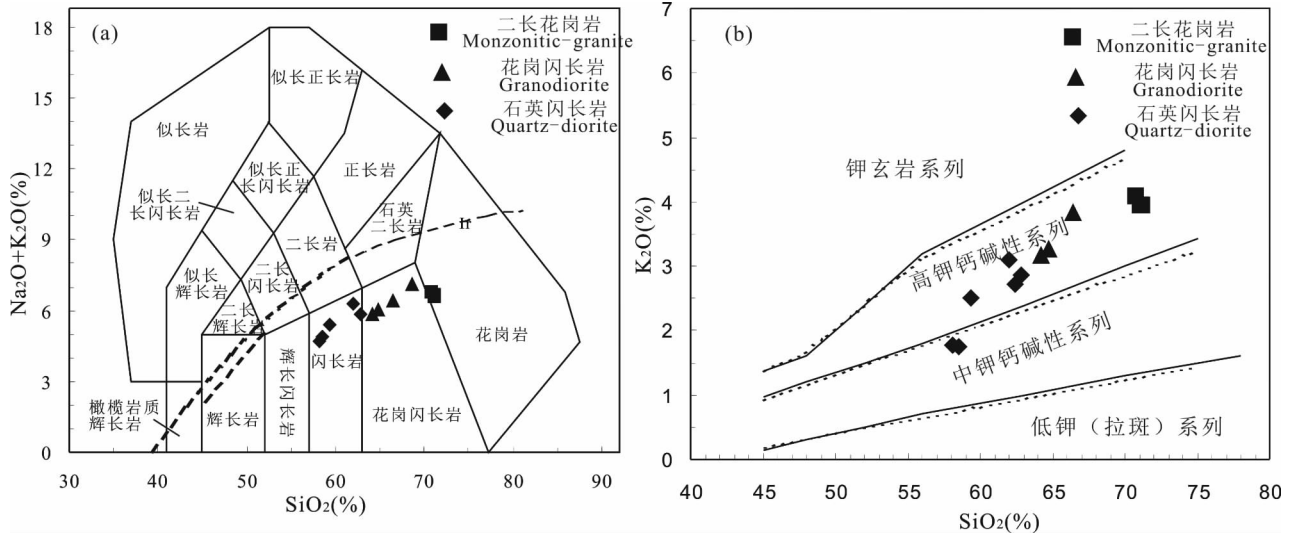


图6 东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩 TAS 图解 (a) 和  $SiO_2-K_2O$  图解 (b)

(a, 据 Middlemost, 1994; b, 据 Peccerillo et al., 1976)

Fig. 6 TAS diagram (a) and  $SiO_2-K_2O$  diagram (b) of the Middle Triassic Granite in Zhongzaohuo Area, East Kunlun (a, after Middlemost, 1994; b, after Peccerillo et al., 1976)

CNK 介于 0.84 ~ 0.99 之间,  $A/NK-A/CNK$  图解 (图 7a) 中, 落入准铝质系列区域。在以  $SiO_2$  为横坐标的哈克图解上 (图 8),  $Fe_2O_3$ 、 $FeO$ 、 $MgO$ 、 $TiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $CaO$ 、 $Na_2O$ 、 $P_2O_5$ 、 $MnO$  与  $SiO_2$  呈明显的负相关,  $K_2O$  与  $SiO_2$  呈明显的正相关, 三个岩性单元显示连续的成分变化趋势, 具有同源岩浆演化的特点。

### 5.2 稀土和微量元素

东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩微量及稀土元素测试结果见表 3。

岩石稀土元素总含量 ( $\sum REE = 171 \times 10^{-6} \sim 236 \times 10^{-6}$ ) 较低, 平均为  $187.3 \times 10^{-6}$ 。 ( $La/Yb$ )<sub>N</sub> 值为 3.43 ~ 17.03, ( $La/Sm$ )<sub>N</sub> 值为 1.65 ~ 6.14, ( $Gd/Yb$ )<sub>N</sub> 值为 1.52 ~ 1.85, 表明岩石轻、重稀土元

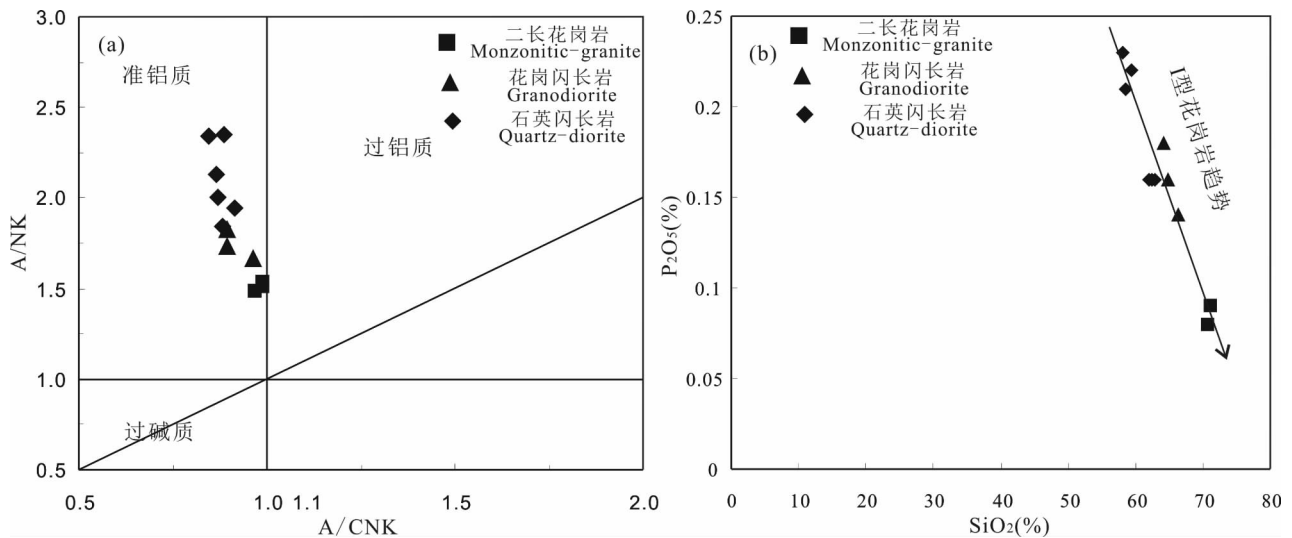


图7 东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩  $A/NK-A/CNK$  图解 (a) 和  $SiO_2-P_2O_5$  图解 (b)

[(a) 底图据 Maniar et al., 1998]

Fig. 7  $A/NK-A/CNK$  diagram (a) and  $SiO_2-P_2O_5$  diagram (b) of the Middle Triassic granite in Zhongzaohuo Area, East Kunlun [fig. (a) after Maniar et al., 1998]

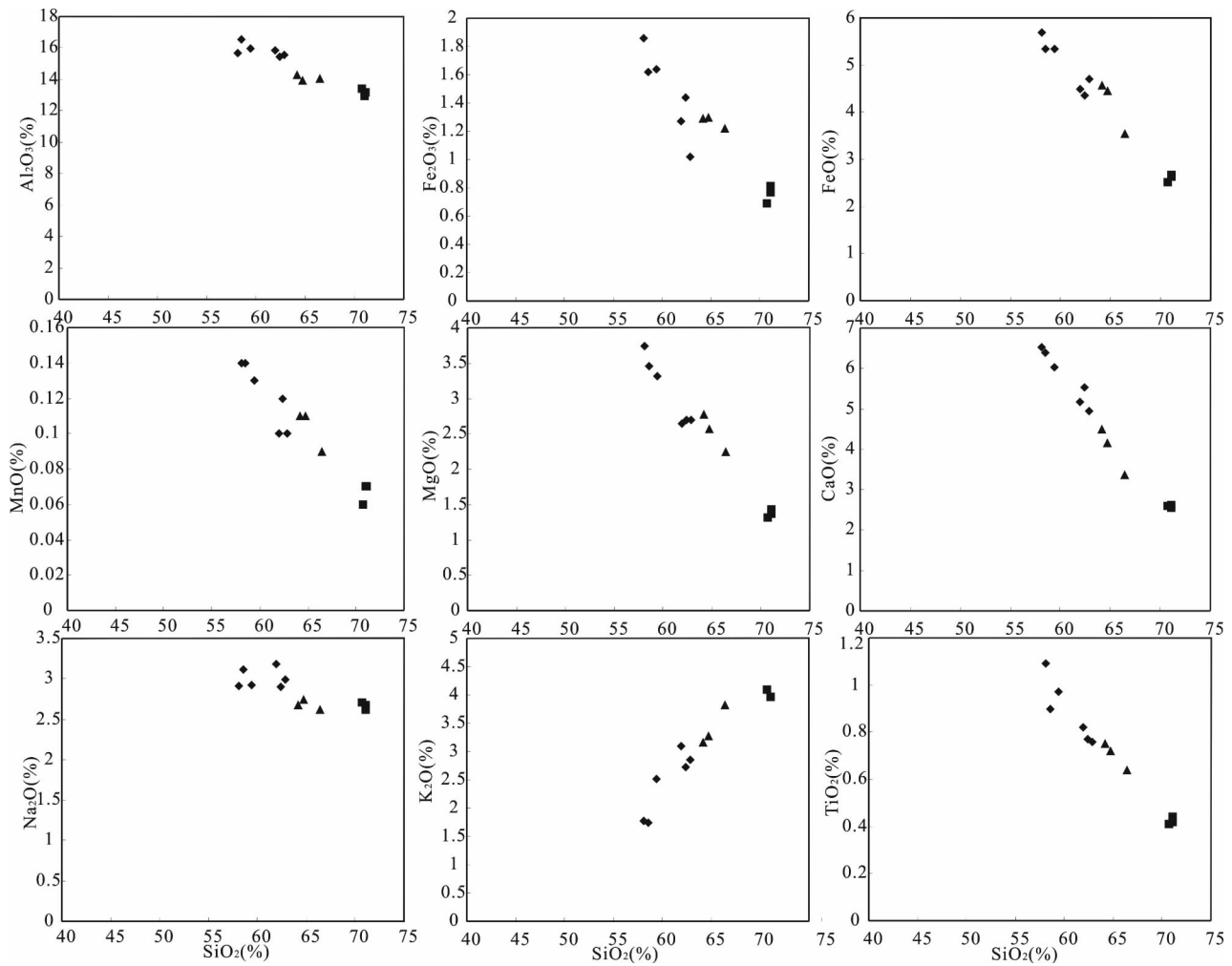


图 8 东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩不同岩石单元哈克图解

Fig. 8 Harker diagrams of major elements for the Middle Triassic Granite in Zhongzaohuo Area, East Kunlun

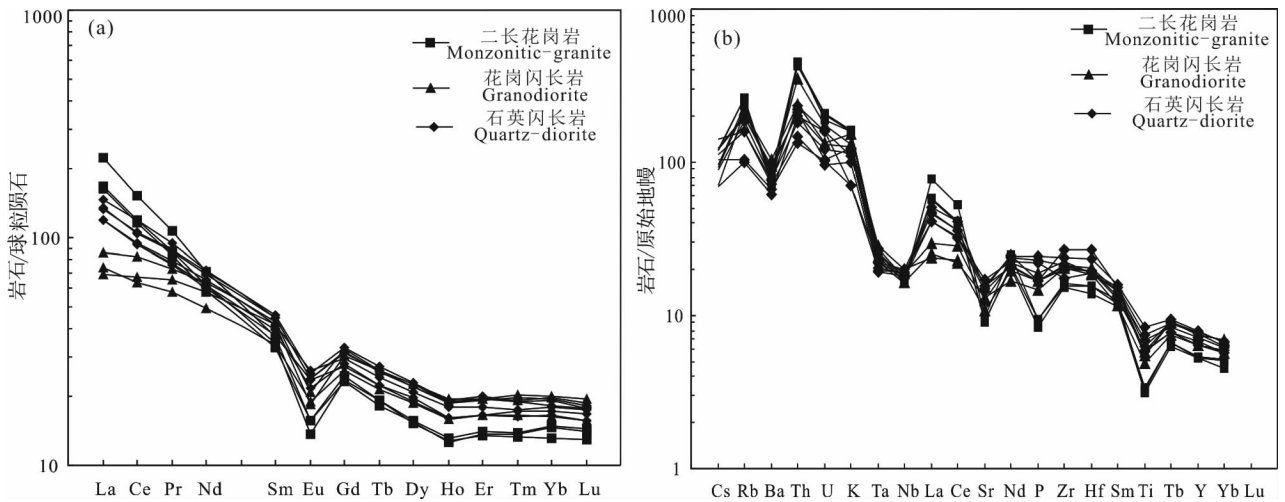


图 9 东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩球粒陨石标准化稀土配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

(球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun et al. , 1989)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE abundances (a) and primitive mantle normalized trace element abundances (b) of the Middle Triassic Granite in Zhongzaohuo Area, East Kunlun (Chondrite and primitive mantle normalizing values after Sun et al. , 1989)

表3 中灶火地区中三叠世花岗岩微量元素地球化学组成( $\times 10^{-6}$ )Table 3 Trace element compositions( $\times 10^{-6}$ ) of the Middle Triassic Granite in Zhongzaohuo Area, East Kunlun

样品号	PM011 -1-1	PM011 -2-1	PM011 -3-1	PM011 -4-1	PM011 -5-1	PM011 -6-1	PM030 -1-1	PM030 -3-1	PM030 -4-1	PM030 -6-1	PM030 -8-1	PM030 -11-1
岩性	二长花岗岩			花岗闪长岩			石英闪长岩					
La	38.99	39.92	53.44	16.30	17.44	20.25	34.94	28.13	28.33	31.43	32.03	28.44
Ce	71.56	72.85	93.50	40.98	39.03	50.18	73.34	57.22	57.88	64.26	63.66	57.42
Pr	7.94	8.25	10.21	6.21	5.49	6.89	8.94	7.20	7.54	8.35	8.23	7.32
Nd	27.48	28.85	33.31	26.87	23.03	29.70	33.65	28.04	30.43	33.19	32.09	29.00
Sm	5.04	5.28	5.62	6.38	5.19	6.55	6.85	5.67	6.39	7.01	6.84	5.99
Eu	0.91	0.79	0.91	1.08	1.11	1.22	1.39	1.37	1.52	1.47	1.40	1.26
Gd	4.80	4.90	5.04	6.28	5.36	6.66	6.45	5.58	6.05	6.80	6.50	5.73
Tb	0.68	0.73	0.72	0.98	0.81	0.97	0.98	0.84	0.92	1.02	0.97	0.84
Dy	3.95	4.02	3.89	5.79	4.80	5.81	5.61	4.83	5.36	5.90	5.64	5.04
Ho	0.71	0.75	0.72	1.08	0.90	1.10	1.06	0.91	1.03	1.10	1.08	0.92
Er	2.27	2.34	2.25	3.26	2.75	3.22	3.20	2.74	2.99	3.35	3.24	2.75
Tm	0.35	0.35	0.34	0.52	0.42	0.50	0.51	0.44	0.45	0.49	0.49	0.42
Yb	2.49	2.54	2.25	3.41	2.80	3.39	3.33	2.95	3.04	3.29	3.11	2.80
Lu	0.36	0.37	0.33	0.49	0.40	0.48	0.47	0.43	0.44	0.45	0.45	0.40
Y	23.90	24.56	23.92	34.15	29.13	34.20	35.06	29.20	32.57	36.07	34.63	30.66
$\Sigma$ REE	191.41	196.49	236.45	153.77	138.66	171.13	215.77	175.55	184.93	204.18	200.34	178.97
Cs	8.58	8.46	6.80	6.61	4.98	8.58	8.73	10.14	7.42	4.96	8.02	6.29
Rb	167.20	165.90	149.00	141.00	135.80	125.70	128.00	101.80	65.70	63.30	100.70	117.60
Ba	523.30	498.50	594.70	571.20	728.70	654.80	620.30	532.50	462.40	430.20	507.10	547.30
Th	37.80	36.24	38.81	29.77	20.20	17.61	18.20	19.78	11.27	17.22	12.50	15.42
U	4.34	4.31	3.96	3.67	2.79	2.76	2.16	3.36	2.15	3.36	2.00	2.57
Ta	1.06	1.07	0.93	1.17	1.00	1.00	0.91	1.12	0.81	0.91	0.79	0.85
Nb	11.80	12.50	11.60	14.20	11.90	13.60	13.10	12.50	13.80	14.40	13.00	13.50
Sr	196.10	190.80	207.50	226.30	274.00	264.00	314.10	332.30	366.00	330.40	331.60	302.20
Zr	171.70	176.30	181.30	240.10	229.40	252.30	298.20	233.10	195.30	266.50	237.50	222.70
Hf	4.30	4.80	4.80	6.30	5.70	5.90	8.30	6.00	5.80	7.20	6.00	6.10

素之间分馏程度较强,且轻稀土元素分馏程度高于重稀土元素。岩石  $\delta$ Eu 值介于 0.47~0.74 之间,具明显负 Eu 异常,暗示岩浆在形成过程中可能存在斜长石的分离结晶作用或源区存在斜长石残留。岩石球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(图 9a)显示轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损的右倾型。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 9b)中,富集大离子亲石元素(Rb、Th、K)和轻稀土元素(La、Ce),亏损高场强元素(Ta、Nb、Ti、P)。

## 6 讨论

### 6.1 岩石成因类型

目前,将花岗岩从物源角度划分为 I、S、A 和 M 型花岗岩的分类方案,已被大多数人所接受(Bonin, 2007; 吴福元, 2007)。本文花岗岩类中未见碱性暗色矿物,可以排除碱性 A 型花岗岩的可能,

10000Ga/Al 和 Zr + Nb + Ce + Y 的值均低于 A 型花岗岩的相应值(2.6, 350)(Whalen et al., 1987),故本文中三叠世花岗岩类不是 A 型花岗岩。

Sylvester(1998)对强过铝质 S 型花岗岩做了系统阐述,指出典型 S 型花岗岩是指含白云母、堇青石和石榴子石等矿物的强过铝质花岗岩类岩石,其 A/CNK > 1.1,刚玉标准分子大于 1%。研究表明,S 型花岗岩的特征矿物是白云母、堇青石和石榴石,I 型花岗岩的典型矿物是角闪石和辉石(Chappell, 1992; 邓晋福等, 2015a)。东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩类岩石组合为石英闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩,属准铝质系列,铝饱和指数 A/CIPW 介于 0.84~0.99 之间,全部小于 1,标准矿物中无刚玉成分或小于 1%,其暗色矿物为角闪石和黑云母,具有明显不同于 S 型花岗岩的特征。实验研究表明,在准铝质到弱过铝质岩浆中,磷灰石

的溶解度很低,并在岩浆分异过程中随  $\text{SiO}_2$  的增加而降低;而在强过铝质岩浆中,磷灰石溶解度变化趋势与此相反 (Wolf et al., 1994)。磷灰石在 I 型和 S 型花岗岩浆中这种不同行为已被成功地用于区分 I 型和 S 型花岗岩类 (Wu Fuyuan et al., 2003)。S 型花岗岩具有较高的  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量,且随着分异作用的进行  $\text{P}_2\text{O}_5$  具有递增的演化趋势 (Chappell, 1999),在  $\text{SiO}_2$ — $\text{P}_2\text{O}_5$  相关图上,东昆仑中灶火中三叠世花岗岩  $\text{P}_2\text{O}_5$  与  $\text{SiO}_2$  之间表现出良好的负相关性 (图 7b),这明显不同于 S 型花岗岩。综合以上特征,东昆仑中灶火中三叠世花岗岩为 I 型花岗岩。

## 6.2 岩石成因

研究表明,中酸性岩浆岩可以是幔源铁镁质母岩浆结晶分异或与同化混染的耦合作用的产物,但更巨量酸性岩类的形成大多与地壳岩石的部分熔融相关 (Ma Changqian et al., 1998)。实验岩石学对大陆下地壳不同源岩进行了大量的熔融实验研究表明,与变沉积岩起源的熔体相比,由变质基性岩熔融形成的岩浆具有低

$$\frac{n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})}{n(\text{MgO}) + n(\text{FeO}^*) + n(\text{TiO}_2)}$$
 和高  $w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{MgO}) + w(\text{FeO}^*) + w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{CaO}) + w(\text{FeO}^*) + w(\text{MgO}) + w(\text{TiO}_2)$  的特征 (Altherr et al., 2002; Kaygusuz et al., 2008)。在源区类型判别图 (图 10) 中,所有样品均投在角闪岩区域,进

一步证明中灶火中三叠世花岗岩来源于下地壳基性岩。

东昆仑晚二叠世—中三叠世岩浆作用过程中的壳幔岩浆混合现象已有大量文献报道 (莫宣学等, 2007; 刘成东, 2003, 2004; 谌宏伟等, 2005; 张爱奎等, 2012; Zhang Jinyang et al., 2012; 马昌前等, 2013; 马圣超等, 2014)。研究表明,东昆仑幔源玄武质岩浆活动从 251Ma 开始持续达 30Ma 之久 (罗照华等, 2002; 熊富浩等, 2011; 罗明非等, 2014)。东昆仑地区晚二叠世—中三叠世花岗岩具有较高的 Nb/Ta 比值,以及接近于地壳和地幔岩石的 Zr/Hf 比值等地球化学特征,这种地球化学特征被认为与底侵玄武质岩浆的混合作用有关 (刘成东等, 2004; 孙雨等, 2009; Xiong Fuhao et al., 2012)。本文石英闪长岩样品中,除 PM030-3-1 外,其余 5 个样品 Nb/Ta 比值为 14.4 ~ 17.1,平均值为 16,大于大陆地壳平均值 (11, Taylor et al., 1985),接近原始地幔相应值 (17.5, Taylor et al., 1985); 所有样品 Zr/Hf 值为 34 ~ 43,平均值为 38,接近或高于幔源岩石 (约 36.3, Hofmann, 1988; Green, 1995),高于地壳岩石的 Zr/Hf 值 (约 33, Taylor et al., 1985; Green, 1995),结合岩石中普遍发育闪长质暗色微粒包体,暗示岩浆有幔源物质的混入。

在以  $\text{SiO}_2$  为横坐标的哈克图解中 (图 8),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{MnO}$  与  $\text{SiO}_2$  呈明显的负相关,  $\text{K}_2\text{O}$  与  $\text{SiO}_2$  呈明显的正相关,暗示在岩浆演化过程中存在结晶分异作用。 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和

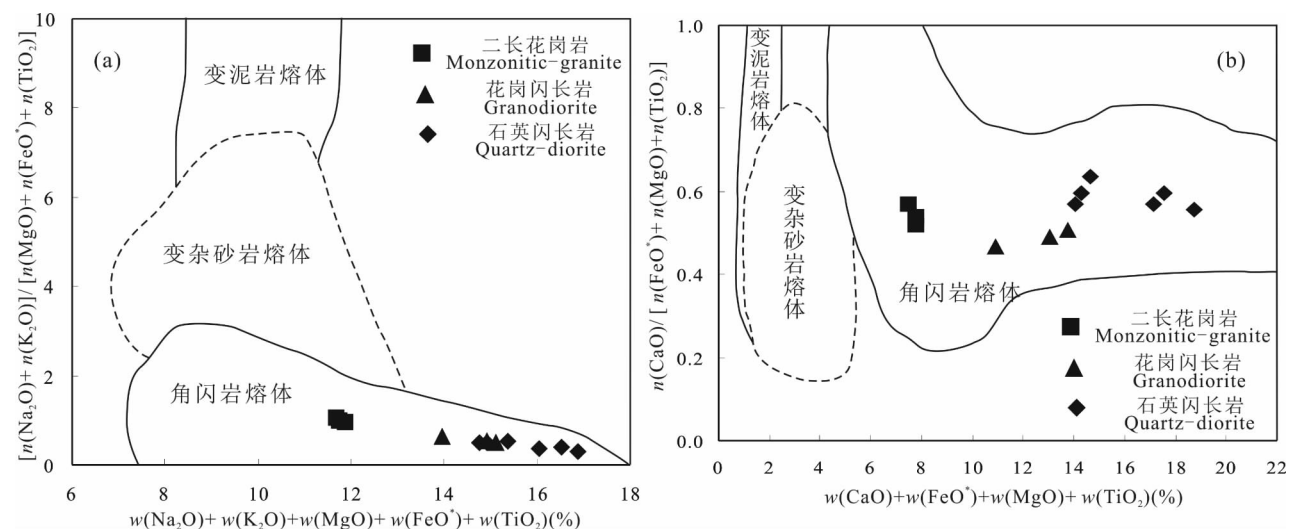


图 10 东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩源区判别图解 (a, 据 Altherr et al., 2002; b, 据 Kaygusuz et al., 2008)

Fig. 10 Source region discrimination diagrams of the Middle Triassic Granite in Zhongzaohuo Area, East Kunlun

(a, after Altherr et al., 2002; b, after Kaygusuz et al., 2008)

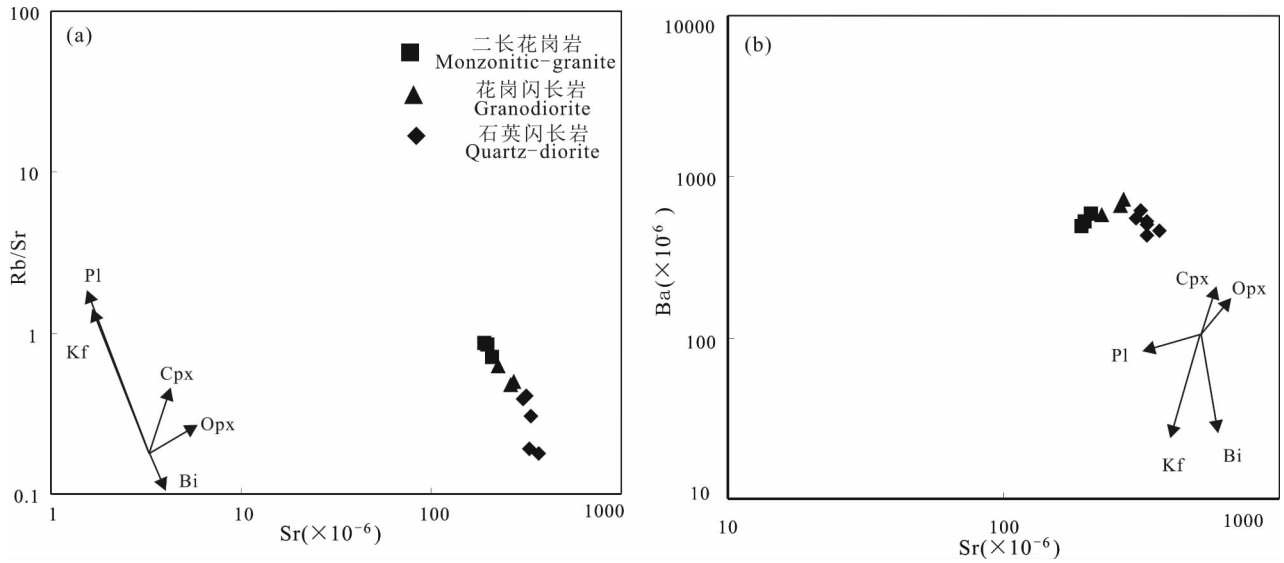


图 11 东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩 Sr—Rb/Sr(a) 和 Sr—Ba(b) 图解(底图据 Guo Chunli et al., 2012)

Fig. 11 Sr vs. Rb/Sr(a) and Sr vs. Ba(b) diagrams for the Middle Triassic Granite in Zhongzaohuo Area, East Kunlun (after Guo Chunli et al., 2012)

MgO 随 SiO<sub>2</sub> 的增加而明显降低可能与角闪石和黑云母的分离结晶有关; P 负异常与磷灰石的分离结晶有关; Nb、Ta 和 Ti 负异常与钛铁矿和金红石等含钛矿物的分离结晶有关; Sr、Ba 和 Eu 的亏损与斜长石和钾长石的分离结晶有关, 其中斜长石的结晶分异导致 Sr、Eu 负异常, 钾长石的结晶分异导致 Ba、Eu 的负异常(Wu Fuyaun et al., 2003), 在岩石在分离结晶模拟所构筑的矢量图中(图 11), 岩石 Sr、Ba 含量的变异明显地受到斜长石、钾长石和黑云母分离结晶的制约。综上所述, 中灶火中三叠世花岗岩类的形成应经历了两个阶段的成岩过程, 首先是壳源熔体与幔源熔体在源区发生不同程度的混合作用形成母岩浆, 随后又经历了较高分异演化最终固结成岩。

### 6.3 构造环境

大量研究表明, 加里东运动之后, 青藏高原东北部总体转化为相对稳定的板内环境。从早石炭世开始东昆仑进入古特提斯洋演化阶段, 石炭纪一二叠纪是古特提斯洋发展的主要时期, 这阶段代表性洋盆为研究区以南的东昆南(阿尼玛卿)蛇绿构造混杂岩带, 其北部东昆中构造混杂岩带和东昆北地块基本为滨浅海环境或相对稳定的板内环境, 代表性地层如东昆北地区石炭系大干沟组和缩放苏组的碎屑岩—碳酸盐岩—火山岩沉积。古特提斯洋于晚二叠世开始向北俯冲于东昆仑地体之下, 并产生大量

与俯冲—碰撞造山相关的岩浆活动, 时代集中在 260 ~ 240 Ma (Yang J S et al., 1996; 郭正府等, 1998; 杨经绥等, 2005; 南卡俄吾等, 2015)。俯冲作用一直持续到早、中三叠世, 至晚三叠世才全面转入板内演化阶段, 其主要依据如下: ① 东昆仑地区广泛分布了晚三叠统八宝山组与下伏地层的角度不整合, 标志着该区碰撞造山作用的结束及后碰撞阶段的开始(李瑞保等, 2012); ② 东昆仑地区下三叠统洪水川组的大地构造属性为弧前盆地沉积相特征, 其陆缘碎屑岩的物源主要来自昆北—昆中地区的弧岩岩浆, 砂岩源区为陆缘弧背景区, 进一步证明了早—中三叠世东昆仑构造带仍处于俯冲背景下的陆缘弧—盆体系(闫臻等, 2008; 杨忠智, 2012; 陈奋宁等, 2015); ③ 前人在研究区及邻近区域发现大量晚二叠世—中三叠世与俯冲作用有关的中基性岩浆岩(熊富浩等, 2011; 罗文行等, 2013; 南卡俄吾等, 2014; 菅坤坤等, 2015), 而到晚三叠世区内广泛出现高钾钙碱性系列花岗岩—钾玄岩组合(肖庆辉等, 2009; 罗照华等, 1999), 以及研究区北部发育晚三叠世鄂拉山组陆相中酸性火山岩, (225 ± 2Ma, 朱云海未发数据表), 表明东昆仑地区晚三叠世进入板内演化阶段。

研究表明, 活动大陆边缘地区火成岩 La/Nb 比值通常大于 2 (Salters et al., 1991), 东昆仑中灶火中三叠世花岗岩类 La/Nb 平均值为 2.4, 具有活动



大陆边缘地区火成岩的特征。在  $(Yb + Nb) - Rb$  图解中(图 12a),所有样品落在火山弧花岗岩区域;在  $R1 - R2$  图解(图 12b)中,所有样品落在碰撞前花岗岩区域;在  $Rb/30 - Hf - 3 * Ta$  图解(图 12c)中,所有样品落在火山弧花岗岩区域。

火成岩系列及地球化学特征可提供其形成的构造环境信息,通过对大量样品的统计、对比及计算,能反映火成岩形成的构造环境。前人通过对东昆仑中二叠世至中三叠世中酸性火成岩样品的分析结果进行统计与计算,发现东昆仑在该时期与安第斯活动大陆边缘构造环境较类似(郭正府等, 1998; 罗

照华等, 1999)。在岛弧与大陆边缘弧火山岩  $SiO_2 - K_2O$  图解中(图 12d),本文中三叠世花岗岩类与典型大陆弧(中安第斯弧)相近,故认为东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩类是俯冲形成的大陆弧的岩浆岩代表。综合以上特征,东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩类形成于大陆边缘弧环境。

综合前人研究成果,东昆仑晚古生代—早中生代岩浆活动分为三个阶段:

(1) 309 ~ 260Ma,为洋脊形成和扩张阶段的产物,该阶段形成了东昆仑南缘蛇绿岩,如布青山蛇绿岩和德尔尼蛇绿岩(陈亮等, 2000; 边千韬等,

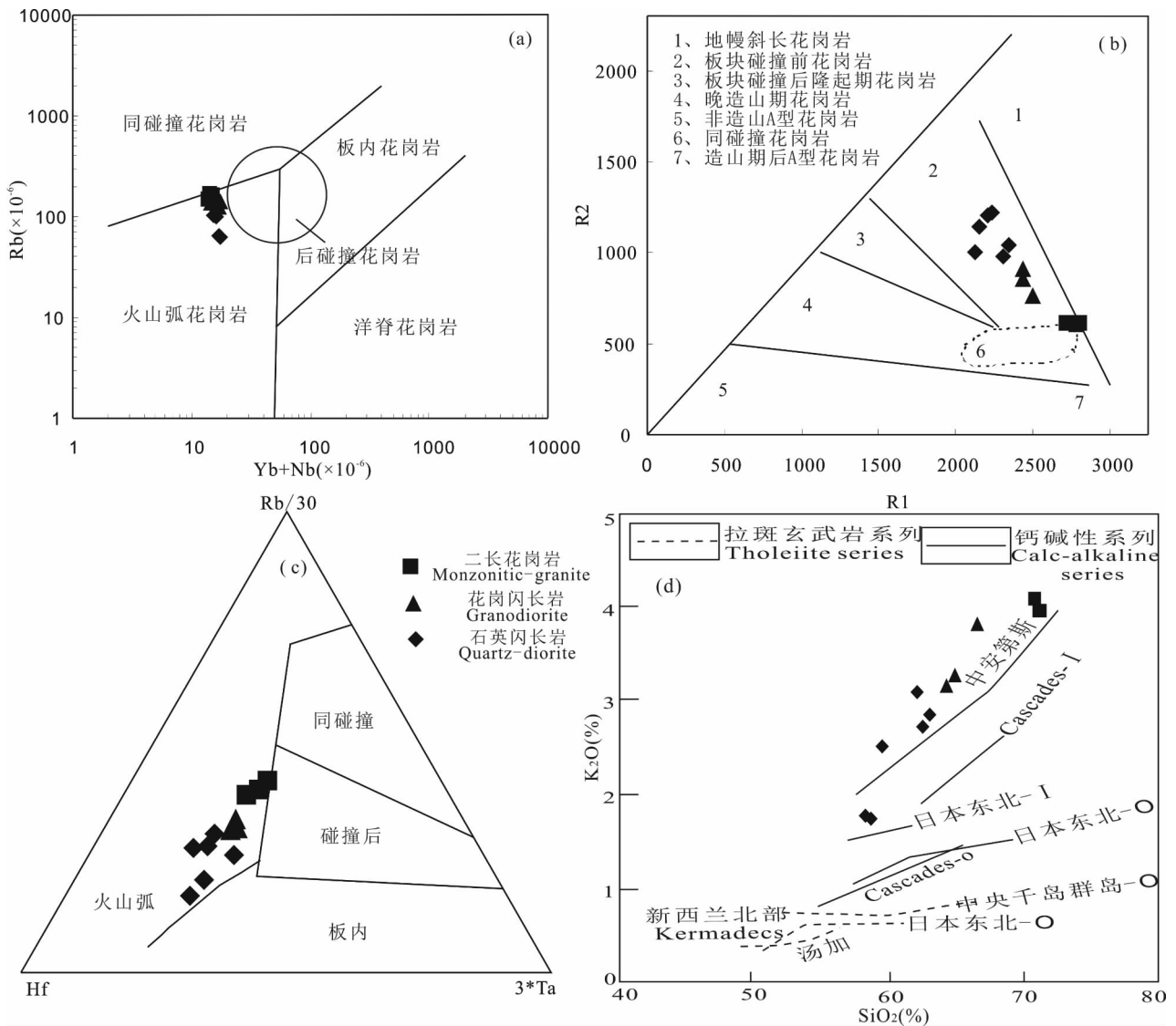


图 12 东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩构造环境判别图解

(a, 据 Pearce et al., 1984; b, 据 Batchelor et al., 1985; c, 据 Harris et al., 1986; d, 据 Miyashiro, 1974)

Fig. 12 Tectonic discriminative diagrams of the Middle Triassic Granite in Zhongzao Huo Area, East Kunlun

(a, after Pearce et al., 1984; b, after Batchelor et al., 1985; c, after Harris et al., 1986; d, after Miyashiro, 1974)

2001; 杨经绥等, 2004; 刘战庆等, 2011; 杨杰等, 2014)。

(2) 260 ~ 240 Ma, 该阶段岩石以中—高钾钙碱性系列为主, 具有安第斯型活动大陆边缘构造属性。

(3) 237 ~ 190 Ma, 该阶段岩石主要为高钾钙碱性和钾玄岩系列, 具有后碰撞及板内花岗岩的特征(王松等, 2009; 陈国超等, 2013; 郭正府等, 1998)。

本文石英闪长岩和花岗闪长岩的形成时代分别为  $243.7 \pm 1.4$  Ma 和  $244.2 \pm 1.1$  Ma, 误差范围内处于俯冲晚期。洋壳俯冲过程中随着岩浆弧向陆内扩展, 岩浆源区成熟度越来越高, 形成的花岗质岩石从中钾钙碱性系列向高钾钙碱性系列偏移, 后碰撞岩浆岩可出现高钾钙碱性系列到碱性系列花岗岩(邓晋福等, 2015b)。东昆仑广泛发育的晚二叠世—早三叠世中钾钙碱性花岗岩, 如哈拉杂吐岩体(陈国超, 2014), 本文中三叠世中—高钾钙碱性花岗岩和东昆仑晚三叠世高钾钙碱性—钾玄岩系列花岗岩, 如祁漫塔格斑状二长花岗岩(丰成友等, 2012), 分别代表古特提斯洋俯冲早期, 俯冲晚期和后碰撞阶段的岩浆记录。

## 7 结论

(1) 利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年法获得石英闪长岩形成年龄为  $243.7 \pm 1.4$  Ma, (MSWD = 0.15), 花岗闪长岩的形成年龄为  $244.2 \pm 1.1$  Ma, (MSWD = 0.16), 形成于中三叠世。

(2) 东昆仑中灶火地区中三叠世花岗岩为中—高钾钙碱性的准铝质 I 型花岗岩, 形成于陆缘弧环境, 是古特提斯洋俯冲晚期的岩浆记录。

(2) 岩石的成因为, 古特提斯洋向北俯冲的动力学背景下, 幔源岩浆的底侵作用导致下地壳部分熔融, 随后壳源熔体与幔源熔体发生不同程度的混合作用形成母岩浆, 而后又经历了较高分异的结晶分异作用形成石英闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩序列。

**致谢:** 感谢林启祥教授和周汉文教授在研究工作中给予的帮助; 感谢金鑫鏢、刘力、喻星星、刘彬、于炎炎、代雄、陈小龙等同学在野外地质考察过程中给予的帮助; 感谢杨宗勇博士和施彬博士在成文过程中给予的宝贵意见。

## 注释 / Note

① 中国地质大学(武汉)地质调查研究院. 2013. 青海东昆仑中灶火

地区 1:5 万 J46E024015、J46E023015、J46E022015、J46E021015 四幅区域地质调查报告。

## 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)

- 边千韬, 罗小全, 李涤徽, 赵大升, 陈海泓, 徐贵忠, 常承法, 高延林. 2001. 青海省阿尼玛卿带布青山蛇绿混杂岩的地球化学性质及形成环境. 地质学报, 75(1): 45 ~ 55.
- 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 裴磊, 刘战庆, 陈有妍, 刘成军. 2013. 东昆仑造山带晚三叠世岩浆混合作用: 以和勒冈希里克特花岗闪长岩体为例. 中国地质, 40(4): 1044 ~ 1065.
- 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合作用花岗岩的岩浆底侵作用机制. 中国地质, 32(3): 386 ~ 395.
- 陈奋宁, 陈锐明, 陈守建. 2015. 东昆仑东段早三叠世洪水川组重矿物组合特征研究. 地质论评, 61(Z1): 610 ~ 611.
- 陈亮, 孙勇, 柳小明, 裴先治. 2000. 青海省德尔尼蛇绿岩的地球化学特征及其大地构造意义. 岩石学报, 16(1): 106 ~ 110.
- 陈国超. 2014. 东昆仑造山带(东段)晚古生代—早中生代花岗质岩石特征、成因及地质意义. 导师: 裴先治. 西安: 长安大学博士学位论文: 67 ~ 83.
- 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 ~ 485.
- 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.
- 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.
- 菅坤坤, 魏燕霞, 施彬, 刘力, 王星, 袁璋. 2015. 东昆仑造山带中灶火地区早中生代镁铁质岩墙群的成因及地质意义. 中国地质, 42(5): 1457 ~ 1470.
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 喻学惠, 谌宏伟, 李述为, 赵欣. 2003. 东昆仑造山带花岗岩类 Pb—Sr—Nd—O 同位素特征. 地球学报, 24(6): 584 ~ 588.
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 喻学惠, 谌宏伟, 李述为, 赵欣. 2004. 东昆仑壳—幔岩浆混合作用: 来自锆石 SHRIMP 年代学的证据. 科学通报, 49(6): 596 ~ 602.
- 罗明非, 莫宣学, 喻学惠, 李小伟, 黄雄飞, 于峻川. 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 ~ 3240.
- 罗照华, 邓晋福, 曹永清, 郭正府, 莫宣学. 1999. 青海省东昆仑地区晚古生代—早中生代火山活动与区域构造演化. 现代地质, 13(1): 51 ~ 56.
- 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. 地质通报, 21(6): 292 ~ 297.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 刘战庆, 陈国超, 陈有妍, 魏方辉, 高景民, 刘成军, 裴磊. 2012. 东昆仑东段晚古生代—中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应. 地学前缘, 19(5): 244 ~ 254.
- 罗文行, 钱莉莉, 李德威, 朱云海, 刘德民, 高成. 2013. 东昆仑中

- 灶火地区超镁铁质辉石岩的成因. 地球科学——中国地质大学学报, 38(6): 1214~1228.
- 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 张晓飞, 刘智刚, 陈国超, 陈有焯, 丁仁平, 郭俊峰. 2011. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义. 地质学报, 85(2): 186~194.
- 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.
- 马昌前, 熊富浩, 张金阳, 刘彬, 黄坚, 蒋红安. 2013. 从板块俯冲到造山后阶段俯冲板片对岩浆作用的影响: 东昆仑早二叠世—晚三叠世镁铁质岩墙群的证据. 地质学报, 87(Z1): 78~81.
- 马圣钊, 丰成友, 李大新, 赵一鸣, 刘建楠. 2014. 青海祁漫塔格虎头崖矿区花岗岩地球化学特征及构造意义. 地质学报, 88(1): 72~82.
- 南卡俄吾, 贾群子, 李文渊, 郭周平, 李金超, 孔会磊, 栗亚芝, 代岩. 2014. 青海东昆仑哈西亚图铁多金属矿区石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和岩石地球化学特征. 地质通报, 33(6): 841~849.
- 南卡俄吾, 贾群子, 唐玲, 栗亚芝, 李金超, 孔会磊, 代岩. 2015. 青海东昆仑哈西雅图矿区花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄与岩石地球化学特征. 中国地质, 42(3): 702~712.
- 孙雨, 裴先治, 丁三平, 李瑞保, 冯建赞, 张亚峰, 李佐臣, 陈有焯, 张晓飞, 陈国超. 2009. 东昆仑哈拉尔吐岩浆混合花岗岩: 来自锆石 U-Pb 年代学的证据. 地质学报, 83(7): 1000~1010.
- 王秉璋, 陈静, 罗照华, 陈发彬, 王涛, 郭贵恩. 2014. 东昆仑祁漫塔格东段晚二叠世—早侏罗世侵入岩岩石组合时空分布、构造环境的讨论. 岩石学报, 30(11): 3213~3228.
- 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.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 王松, 丰成友, 李世金, 江军华, 李东生, 苏生顺. 2009. 青海祁漫塔格卡尔却卡铜多金属矿区花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义. 中国地质, 36(1): 74~84.
- 肖庆辉, 邓晋福, 邱瑞照, 刘勇, 冯艳芳. 2009. 花岗岩类与大陆地壳生长初探——以中国典型造山带花岗岩类岩石的形成为例. 中国地质, 26(3): 594~622.
- 熊富浩, 马昌前, 张金阳, 刘彬. 2011. 东昆仑造山带早中生代镁铁质岩墙群 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、元素和 Sr—Nd—Hf 同位素地球化学. 岩石学报, 27(11): 3350~3364.
- 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 罗照华. 2000. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录. 地质评论, 46(2): 203~211.
- 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.
- 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 许志琴, 吴才来. 2004. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解了的古特提斯洋壳. 中国地质, 31(3): 225~239.
- 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 史仁灯. 2005. 东昆仑阿尼玛卿地区古特提斯火山作用和板块构造体系. 岩石矿物学杂志, 24(5): 369~380.
- 闫臻, 边千韬, Korchagin O A, Pospelov I I, 李继亮, 王宗起. 2008. 东昆仑南缘早三叠世洪水川组的源区特征: 来自碎屑组成、重矿物和岩石地球化学的证据. 岩石学报, 24(5): 1068~1078.
- 杨忠智. 2012. 东昆仑造山带东段下三叠统洪水川组地质特征及构造环境研究. 导师: 裴先治. 西安: 长安大学硕士学位论文: 34~47.
- 杨杰, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 刘战庆, 裴磊, 刘成军, 陈有焯, 陈国超, 高景民. 2014. 东昆仑南缘布青山地区哈尔郭勒玄武岩地球化学特征及其地质意义. 中国地质, 41(2): 335~350.
- 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.
- 钟玉芳, 马昌前, 余振兵. 2006. 锆石地球化学特征及地质应用研究综述. 地质科技情报, 25(1): 27~34.
- Altherr R, Siebel W. 2002. I-type plutonism in a continental back-arc setting: Miocene granitoids and monzonites from the central Aegean Sea, Greece. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143(4): 397~415.
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. Chem. Geol., 48(1~4): 43~55.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y and Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143(5): 602~622.
- Bonin B. 2007. A-Type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. Lithos, 97(1~2): 1~29.
- Bian Qiantao, Luo Xiaoquan, Li Dihui, Zhao Dasheng, Chen Haihong, Xu Guizhong, Chang Chengfa, Gao Yanlin. 2001. Geochemistry and formation environment of the Buqingshan ophiolite complex Qinghai Province, China. Acta Geologica Sinica, 75(1): 45~55.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 83(83): 1~26.
- Chappell B W. 1999. Aluminum saturation in I and S-type granite and the characterization of fractionated haplogranite. Lithos, 46(3): 535~551.
- Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuochen, Pei Lei, Liu Zhanqing, Chen Youxin, Liu Chengjun. 2013. Late Triassic magma mixing in the East Kunlun orogenic belt: A case study of Helegang Xilikete granodiorites. Geology in China, 40(4): 1044~1065.
- Chen Hongwei, Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Liu Chengdong, Ke Shan. 2005. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the east Kunlun orogenic belt. Geology in China, 32(3): 386~395.
- Chen Fenning, Chen Ruiming, Chen Shoujian. 2015. Study on the characteristics of heavy mineral assemblages of the Lower Triassic Hongshuichuan formation in Eastern Kunlun. Geological Review, 61(Z1): 610~611.
- Chen Liang, Sun Yong, Liu Xiaoming, Pei Xianzhi. 2000. Geochemistry of Demi ophiolite and its tectonic significance. Acta Petrologica Sinica, 16(1): 106~110.
- Chen Guochao. 2014. Petrology, Genesis and Geological Significance of Late Paleozoic—Early Mesozoic Granitoids in East Kunlun Orogen. Supervisor: Pei Xianzhi. Xi'an: A Dissertation Submitted for the Degree of Doctor of Chang'an University: 67~83.
- 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, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Zhao Guochun, Meng Fei, Ma Shuai, Yao Tu. 2015b. Magmatic arc and ocean—Continent transition: Discussion. Geological Review, 61(3): 473~485.

- Feng Chenyou, Wang Song, Li Guochen, Ma Shengchao, 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.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust—mantle system. *Chemical Geology*, 120(3):347 ~ 359.
- Guo Zhengfu, Deng Jinfu, Xu Zhiqin, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua. 1998&. Late Palaeozoic—Mesozoic intracontinental orogenic process and intermediate-acidic igneous rocks from the Eastern Kunlun Mountains of Northwestern China. *Geoscience*, 12(3):344 ~ 352.
- Guo Chunli, Chen Yuchun, Zeng Zailin, Lou Fasheng. 2012. Petrogenesis of the Xihuashan granites in southeastern China: Constraints from geochemistry and in-situ analyses of zircon U—Pb—Hf—O isotopes. *Lithos*, 148(2012): 209 ~ 227.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 53(1):27 ~ 62.
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3):297 ~ 314.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristic of collision-zone magmatism. *Geological Society of London, Special Publications*, 19:67 ~ 81.
- Jian Kunkun, Wei Yanxia, Shi Bin, Liu Li, Wang Xing, Yuan Zhang. 2015&. Petrogenesis and geological significance of the Early Mesozoic mafic dyke swarms in Zhongzaohuo area, East Kunlun orogenic belt. *Geology in China*, 42(5): 1457 ~ 1470.
- Kaygusuz A, Siebel W, Sen C, Satir M. 2008. Petrochemistry and petrology of I-type granitoids in an arc setting: the composite Toml pluton, Eastern Pontides, NE Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 297(4):739 ~ 764.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Detlef Gunther, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1):34 ~ 43.
- Liu Chengdong, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Yu Xuehui, Chen Hongwei, Li Shuwei, Zhao Xin. 2003&. Pb—Sr—Nd—O Isotope Characteristics of Granitoids in East Kunlun Orogenic Belt. *Acta Geosciencia Sinica*, 24(6): 584 ~ 588.
- Liu Chengdong, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Chen Hongwei, Li Shuwei, Zhao Xin. 2004&. Mixing events between the crust- and mantle-derived magmas in Eastern Kunlun: Evidence from zircon SHRIMP chronology. *Chinese Science Bulletin*, 49(6): 596 ~ 602.
- Luo Mingfei, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, Li Xiaowei, Huang Xiongfei and 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 ~ 3240.
- Luo Zhaohua, Deng Jinfu, Cao Yongqing, Guo Zhengfu, Mo Xuanxue. 1999&. On Late Paleozoic—Early Mesozoic volcanism and regional tectonic evolution of eastern Kunlun, Qinghai province. *Geoscience*, 13(1): 51 ~ 56.
- Luo Zhaohua, Ke Shan, Cao Yongqing, Deng Jinfu, Chen Hongwei. 2002&. Late Indosinian mantle-derived magmatism in the east Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 292 ~ 297.
- Li Ruibao, Pei Xianzhi, Li Zuochen, Liu Zhanqing, Chen Guochao, Chen Youxin, Wei Fanghui, Gao Jingmin, Liu Chengjun, Pei Lei. 2012&. Geological characteristics of Late Palaeozoic—Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 244 ~ 254.
- Luo Wenxing, Qian Lili, Li Dewei, Zhu Yunhai, Liu Demin, Gao Cheng. 2013&. Petrogenesis of the Zhongzaohuo ultramafic pyroxenite pluton, East Kunlun: constraints from petrology, geochemistry and genetic mineralogy. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(6): 1214 ~ 1228.
- Liu Zhanqing, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuochen, Zhang Xiaofei, Liu Zhigang, Chen Guochao, Chen Youxin, Ding Sanping, Guo Junfeng. 2011&. LA-ICP-MS Zircon U—Pb Geochronology of the Two Suites of Ophiolites at the Buqingshan Area of the A'nyemaqen Orogenic Belt in the Southern Margin of East Kunlun and Its Tectonic Implication. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 186 ~ 194.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonics discrimination of granitoids. *Bulletin of the Geological Society of America*, 101:635 ~ 643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma /igneous rock system. *Earth Sci. Rev.*, 37:215 ~ 224.
- Ma Changqian, Li Zhichang, Ehlers C, Yang Kunguang, Wang Renjing. 1998. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high pressure and ultra high pressure metamorphic zone, east central China. *Lithos*, 45(1):431 ~ 456.
- Ma Changqian, Xiong Fuhao, Zhang Jinyang, Liu Bin, Huang Jian, Jiang Hongan. 2013&. The influence of subduction plate on the magmatism from the plate subduction to the post orogenic stage: Evidence of mafic dyke swarms from Early Triassic to Late Permian in East Kunlun. *Acta Geologica Sinica*, 87(Z1):78 ~ 81.
- Ma Shengchao, Feng Chengyou, Li Daxin, Zhao Yiming, Liu Jiannan. 2014&. Geochemical characteristics of granite in Hutouya Mining Area of Qimantag, Qinghai and its constraints on tectonic setting. *Acta Geologica Sinica*, 88(1):72 ~ 82.
- 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.
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274: 321 ~ 355.
- Namhka Norbu, Jia Quanzi, Li Wenyuan, Guo Zhouping, Li Jinchao, Kong Huilei, Li Yazhi, Dai Yan. 2014&. LA-ICP-MS zircon U—Pb age and geochemical characteristics of quartz diorite from the Haxiyatu iron—polymetallic ore district in Eastern Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 33(6):841 ~ 849.
- Namhka Norbu, Jia Quanzi, Tang Ling, Li Yazhi, Li Jinchao, Kong Huilei, Dai Yan. 2015&. Zircon U—Pb age and geochemical characteristics of granodiorite from the Haxiyantu iron—polymetallic ore district in Eastern Kunlun. *Geology in China*, 42(3):702 ~ 712.
- Peccerillo R, Talar S R. 1976. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from Kastamonu area in northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58:63 ~ 81.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4):956 ~ 983.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of

- oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. London: Geological Society Special Publications, 42: 313 ~ 345.
- Salters V J M and Hart S R. 1991. The mantle sources of ocean ridges, island arcs: the Hf-isotope connection. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104: 364 ~ 380.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1 ~ 4): 29 ~ 44.
- Sun Yu, Pei Xianzhi, Ding Sanping, Li Ruibao, Feng Jianyun, Zhang Yafeng, Li Zuochen, Chen Youxin, Zhang Xiaofei. 2009. Halagatu Magma Mixing Granite in the East Kunlun Mountains: Evidence from Zircon U-Pb Dating *Acta Geologica Sinica*, 83(7): 1000 ~ 1010.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell: Oxford Press, 1 ~ 324.
- Vavra G, Schmid R, Gebauer D. 1999. Internal morphology, habit and U—Th—Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(4): 380 ~ 404.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to mineralogy and petrology*, 95(4): 407 ~ 419.
- Wang Bingzhang, Chen Jing, Luo Zhaohua, Chen Fabin, Wang Tao, Guo Guien. 2014. Spatial and temporal distribution of Late Permian—Early Jurassic intrusion assemblages in eastern Qimantag, East Kunlun, and their tectonic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3213 ~ 3228.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589 ~ 1604.
- Wolf M B, London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: an experimental study of solubilities and mechanism. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 58(19): 4127 ~ 4145.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao, Shan. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185 ~ 220.
- Wu Fuyuan, Jahn B M, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Qiang, Ge Wenchun, Sun Deyou. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (1): geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66(3 ~ 4): 241 ~ 273.
- Wang Song, Feng Chengyou, Li Shijin, Jiang Junhua, Li Dongsheng, Su Shenshun. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite in the Kaerqueka polymetallic ore deposit, Qimantag Mountain, Qinghai Province, and its geological implications. *Geology in China*, 36(1): 74 ~ 84.
- 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(3 ~ 4): 211 ~ 224.
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Qiu Ruizhao, Liu Yong, Feng Yanfang. 2009. A preliminary study of the relationship between granitoids and the growth of continental crust: a case study of the formation of key orogen granitoids in China. *Geology in China*, 26(3): 594 ~ 622.
- Xiong Fuhao, Ma Changqian, Zhang Jinyang, Liu Bin. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, elements and Sr—Nd—Hf isotope geochemistry of the Early Mesozoic mafic dyke swarms in East Kunlun orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3350 ~ 3364.
- Yang J S, Robinson P T, Jiang C F, Xu Z Q. 1996. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications. *Tectonophysics*, 258(1): 215 ~ 231.
- Yuan Wanming, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, Luo Zhaohua. 2000. The record of Indosinian tectonic setting from the granitoid of Eastern Kunlun Mountains. *Geological Review*, 46(2): 203 ~ 211.
- Yin Hongfu, Zhang Kexin. 1997. Characteristics of the Eastern Kunlun orogenic belt. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(4): 339 ~ 342.
- Yang Jingsui, Wang Xibin, Shi Dengren, Xu Zhiqin, Wu Cailai. 2004. The Dur' ngoi ophiolite in East Kunlun, Northern Qinghai—Tibet plateau: a fragment of paleo-Tethyan oceanic crust. *Geology in China*, 31(3): 225 ~ 239.
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Li Haibing, Shi Rendeng. 2005. The Paleozoic Tethyan volcanism and plate tectonic regime in the A' nyemaqen region of East Kunlun, northern Tibet Plateau. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(5): 369 ~ 380.
- Yan Zhen, Bian Qiantao, Korchagin O A, Pospelov I I, Li Jiliang, Wang Zongqi. 2008. Provenance of Early Triassic Hongshuichuan Formation in the southern margin of the East Kunlun Mountains: Constraints from detrital framework, heavy mineral and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1068 ~ 1078.
- Yang Zhongzhi. 2012. A Study on geologic feature and structural setting of the Lower Triassic Hongshuichuan formation in Eastern section of the East Kunlun orogen. Supervisor: Pei Xianzhi. Xi'an: A Thesis Submitted for the Degree of Master of Chang'an University: 34 ~ 47.
- Yang Jie, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuochen, Liu Zhanqing, Pei Lei, Liu Chengjun, Chen Youxin, Chen Guochao, Gao Jingmin. 2014. Geochemical characteristics and geological implications of Haerguole basalt in Buqingshan area on the southern margin of East Kunlun Mountains. *Geology in China*, 41(2): 335 ~ 350.
- Zhang Jinyang, Ma Changqian, Xiong Fuhao and Liu Bin. 2012. Petrogenesis and tectonic significance of the later Permian—Middle Triassic calc-alkaline granites in the Balong region, eastern Kunlun Orogen, China. *Geological Magazine*, 149(5): 892 ~ 908.
- Zhang Aikui, Liu Guanglian, Mo Xuanxue, Liu Junpei, Zhang Wenquan, Chen Haifu, Li Yunping. 2012. Relationship between tectonic settings and metallogenesis of Late Paleozoic—Early Mesozoic intrusive rock in Qimantag, Qinghai Province. *Northwestern Geology*, 45(1): 9 ~ 19.
- Zhong Yufang, Ma Changqian, She Zhenbing. 2006. Geochemical Characteristics of Zircon and Its Applications in Geosciences. *Geological Science and Technology Information*, 25(1): 27 ~ 34.



## Zircon LA-ICP-MS Age Dating, Petrogenesis and Tectonic Implications of the Middle Triassic Granites from the Zhongzaohuo Area, East Kunlun

JIAN Kunkun<sup>1)</sup>, ZHU Yunhai<sup>2)</sup>, WANG Liwei<sup>3)</sup>, GAO Feng<sup>1)</sup>, LIU Xiangdong<sup>1)</sup>, HE Yuanfang<sup>1)</sup>,  
YUAN Zhang<sup>1)</sup>, CHEN Jiping<sup>1)</sup>, GAO Weiqiang<sup>1)</sup>

1) Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an, 710068;

2) School of Earth Science, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, 430074;

3) Northwest Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Xi'an, 710016

**Objectives:** Based on Petrology study and method of zircon LA-ICP-MS age dating and geochemistry, to explore the Middle Triassic Granites petrogenesis and tectonic implications in the Zhongzaohuo Area, East Kunlun.

**Methods:** Calculate the age of granites by zircon U-Pb dating and their petrology characteristics by whole rock analysis.

**Results:** Plutons in the Zhongzaohuo area consists of quartz-diorite, granodiorite and monzogranite were emplaced in Middle Triassic as demonstrated by the ca. 243 Ma zircon crystallization age for both the quartz-diorite and monzogranite units. These rocks have varying SiO<sub>2</sub> contents, moderate to high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and total Alkaline. They are middle—high potassium series, meta-aluminous granitoids. The geochemical and petrographic features indicate those rock suits are I-type granite. This rock assembly shows enrichment of LREE and highly incompatible elements but depleted in high field strength elements typical of continental arc. The consistent linear variation between silica and other major elements and the gradual transition rather than intrusive and sharp relationship of the suites indicate an important role of fractional crystallization for the composition variation of the granitoids. Parental magma was formed by partial melting of crustal materials that heated by underplating of basaltic magma represented by gabbro in the adjacent region.

**Conclusions:** During the subduction of the Paleo-Tethys, mantle derived melt intruded into lower or middle crustal resulted in partial melting of crustal components. Different degree of crystallization differentiation of parental magma that generated by processes of mixing or mingling of crust—mantle derived melt has contributed to the genesis of the quartz-diorite, granodiorite and monzogranite suites.

**Keywords:** Eastern Kunlun; Zircon dating; Geochemical; I-type granitoids; Continental arc

**Acknowledgements:** We thank anonymous reviewers and editor for their critical comments and constructive suggestions, which have greatly improved the quality of this paper. This research is financially supported by the project (No. 1212010918021) of China Geological Survey.

**First author:** JIAN Kunkun, male, born in 1987, master, engineer. majors in petrology, focus on regional geological survey; E-mail: jiankunryan@163.com

Manuscript received on: 2016-01-21; Accepted on: 2017-04-18; Edited by: ZHANG Yuxu.

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2017.03.009

