

doi: 10.12029/gc20160522

董亮琼, 董国臣, 黄慧, 等. 东昆仑土鲁音花岗岩的地球化学、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1737-1749.
Dong Liangqiong, Dong Guochen, Huang Hui, et al. Geochemical and zircon U-Pb dating characteristics and significance of the Tuluyin granites in the east of East Kunlun orogenic belt[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1737-1749(in Chinese with English abstract).

东昆仑土鲁音花岗岩的地球化学、锆石 U-Pb 年龄及地质意义

董亮琼 董国臣 黄 慧 白 洋

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院 北京 100083)

摘要: 岩浆活动在板块构造机制中可以看作是大洋板块俯冲或者大陆板块碰撞等过程所伴随的深部作用响应,也是探索深部作用过程的“岩石探针”。土鲁音岩体位于东昆仑东部,紧邻昆中断裂南部区域。在详细野外调研基础上,主要对土鲁音花岗岩体进行岩石学、地球化学以及年代学的研究。结果显示,土鲁音岩体主要岩性为花岗闪长岩,其 SiO₂ 为 68.49%~70.87%,全碱含量为 5.94%~7.16%,K₂O/Na₂O 比值为 0.34~0.57, Mg[#] 值中等(35.92~41.86), A/CNK 值(1~1.07)均小于 1.1, 属弱过铝质钙碱性 I 型花岗岩。岩体稀土总量较低(118.91×10⁻⁶~143.97×10⁻⁶), (La/Yb)_N 为 4.17~9.14, 具有轻稀土元素富集、重稀土元素平坦分布的特征, 弱负 Eu 异常, 且显著亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 富集 Rb、Ba、Th 等大离子亲石元素。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果显示土鲁音花岗岩体侵位时代(245.1±3.3) Ma, 和区域内下得波利-埃坑德勒斯特花岗岩体具有一致的成岩年龄, 同属印支早期产物。地球化学特征反映壳源部分熔融成因, 并有幔源物质及热流参与, 结合区域已有的年代学、地球化学以及地质资料, 笔者认为土鲁音岩体形成于阿尼玛卿—古特提斯洋北向俯冲的地球动力学背景。

关键词: 土鲁音岩体; 东昆仑造山带; 印支早期; 地球化学; 锆石 U-Pb 定年

中图分类号: P585; P581; P597^{+.3} 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)05-1737-13

Geochemical and zircon U-Pb dating characteristics and significance of the Tuluyin granites in the east of East Kunlun orogenic belt

DONG Liang-qiong, DONG Guo-chen, HUANG Hui, BAI Yang

(School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Magmatism is regarded as the deep response to the subduction and collision and also a petroprobe to explore the deep process. The Tuluyin area lies in the east of East Kunlun orogenic belt (EKOB), close to the south of the middle fault of EKOB. Based on detailed field investigation, the authors studied the petrology, geochemistry and geochronology of Tuluyin granitoids. Geochemical composition shows that Tuluyin granitoids are lithologically dominated by granodiorite. The SiO₂ varies from 68.49%

收稿日期: 2015-05-28; 改回日期: 2016-05-09

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212011121260, 1212011220928)资助。

作者简介: 董亮琼, 男, 1992年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: 843341765@qq.com。

通讯作者: 董国臣, 男, 1962年生, 博士, 教授, 从事岩石学及矿床学研究; E-mail: donggc@cugb.edu.cn。

to 70.87%. The total alkali content is in the range of 5.94%~7.16%, and the K_2O/Na_2O ratios vary from 0.34 to 0.57. $Mg^\#$ values are medium in granitoids (35.92–41.86). The A/CNK values (1–1.07) are lower than 1.1, showing that they belong to slightly-peraluminous calc-alkaline I-type granites. The rocks are enriched in light RRE (LRRE) with a flat heavy RRE (HRRE) pattern. There are no or weak negative Eu anomalies. The ratios of $(La/Yb)_N$ are in the range of 4.17–9.14, with the total REE content varying from 118.91×10^{-6} to 143.97×10^{-6} . The rocks are enriched in large ion lithophile elements (Rb, Th, Ba) and depleted in high field strength elements (Nb, Ta, P, Ti). LA-ICP-MS zircon U–Pb dating shows a crystallization age of 245 Ma, identical with the age of Xiadeboli and Aikengdelesite granitoids, suggesting that they all belong to the Early Indosinian period. Geochemical characteristics indicate that these rocks were derived from partial melting of the crust, with the addition of mass and heat flow from the mantle. Based on the existing geochronologic, geochemical and geological data, the authors hold that Tuluyin granitoids were formed under a background of the Anyemaqen–Paleo–Tethys Oceanic crust subducted into EKOB.

Key words: Tuluyin granitoids; East Kunlun orogenic belt; Early Indosinian; geochemistry; zircon U–Pb dating

About the first author: DONG Liang-qiong, male, born in 1992, master, majors in mineralogy, petrology and mineral deposits; E-mail: 843341765@qq.com.

About the corresponding author: DONG Guo-chen, born in 1962, doctor, professor, mainly engages in the study of petrology and ore deposits; E-mail: donggc@cugb.edu.cn.

Fund support: Supported by China Geological Survey Programs (No. 1212011121260, No. 1212011220928).

1 引 言

岩浆活动在板块构造机制中可以看作是大洋板块俯冲或者大陆板块碰撞等过程所伴随的深部作用响应,也是探索深部作用过程的“岩石探针”^[1]。位于青藏高原北部的东昆仑造山带,是一条由不同期次、不同类型造山作用叠加复合的具有漫长演化历史的大陆复合造山带^[2-5]。由于东昆仑造山带的关键沉积记录残缺不全,传统的构造研究方法很难有效地揭示造山带的演化历史,因而广泛分布于东昆仑造山带东部的岩浆岩一直是了解东昆仑造山带构造-岩浆作用的理想窗口之一。关于东昆仑造山带古特提斯洋的闭合时间与晚华力西—印支期岩浆活动的动力学背景,一直存在许多争论。从现有研究成果分析,主要有以下几个观点:①古特提斯洋闭合于晚二叠世,构造体制自此转换为碰撞造山作用,三叠纪花岗岩多为碰撞—碰撞后构造背景^[6-10];②古特提斯洋于晚二叠世开始俯冲,闭合于中三叠世,晚二叠世—早三叠世花岗岩多为俯冲背景,中三叠世开始为碰撞造山背景^[11-15];③古特提斯洋的俯冲作用持续至晚三叠世,二叠纪—三叠纪岩浆活动均为俯冲背景^[16-18]。

本文所研究的土鲁音岩体位于东昆仑东部昆中断裂的南缘,主要岩性为花岗闪长岩,拟通过详细的野外调研和岩石学研究,结合地球化学、锆石

U–Pb年代学数据,对土鲁音岩体岩浆源区及成因进行研究,以期能对其地球动力学背景进行限定。

2 构造背景及地质特征

东昆仑造山带位于青藏高原北部,北接柴达木盆地,南邻巴颜喀拉地块,向东与西秦岭相隔,向西以阿尔金断裂为界与西昆仑分开,大致以乌图美仁一带为界,又可分为东、西两段^[6]。从北到南,可分为昆北、昆中以及昆南3个构造单元^[1-15]。研究区位于东昆仑造山带东段,处于昆北断裂南缘,属昆南构造带(图1-A)。区域基底主要为古中元古代苦海杂岩,与上覆早古生代纳赤台群、早石炭世哈拉郭勒组等沉积地层呈断层接触^[20]。多呈分散片状,被侵人体包围。主要岩石特征为一套灰绿色眼球状黑云二长(钾长)正片麻岩。由于其岩石类型复杂、多成因,其年代跨度也较大,为2.3~0.7 Ga^[19]。其原岩主要为碎屑岩,后期经历了强烈的混合岩化作用^[19-20]。显生宙地层主要为早古生代纳赤台群,其岩性组合为枕状玄武岩、块状玄武岩、玻基玄武岩、粗玄岩等;早石炭世哈拉郭勒组,其岩石组合为下部的碎屑岩,中部的灰岩,上部的碎屑岩夹灰岩及少量火山岩,与下伏纳赤台群和上覆洪水川组均为断层接触;早—中三叠世洪水川组,岩石组合为浅海相浊积岩相砂板岩;晚三叠世八宝山组,岩石组合为陆相紫红色粗碎屑岩沉积,区域上与下伏不同

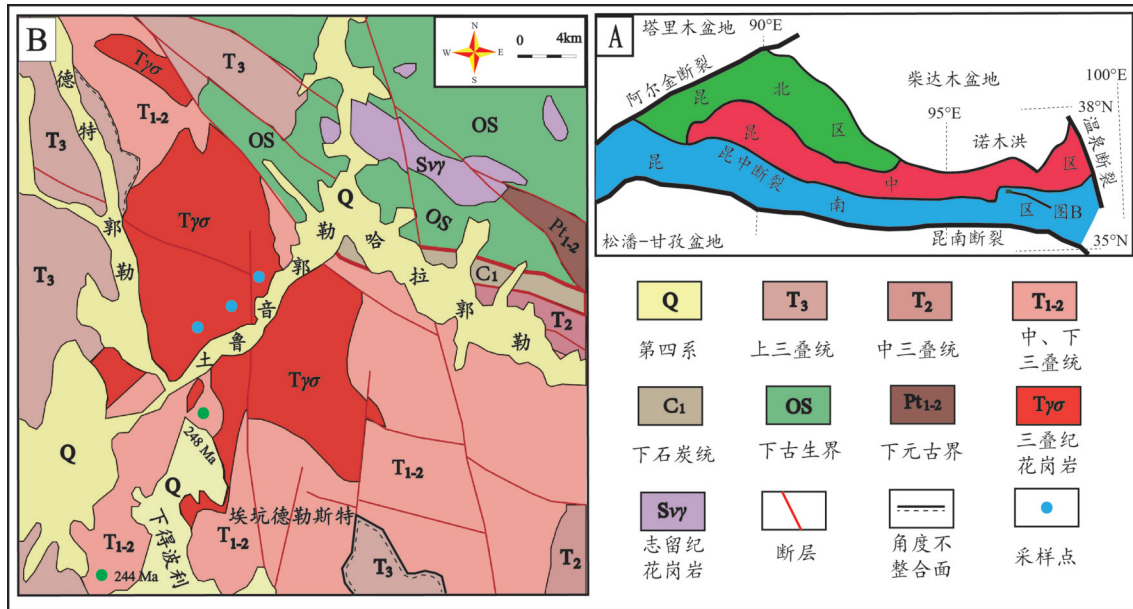


图1 土鲁音花岗岩体地质简图^[19]
Fig.1 Geological sketch map of Tuluyin granitoids^[19]

时代地层不整合接触^[20]。

东昆仑花岗岩带是青藏高原内两条巨型岩浆岩带之一^[6]。侵入岩和火山岩分布广泛,尤以侵入岩最为发育(出露面积约 $4.84 \times 10^4 \text{ km}^2$),从元古宙到晚中生代均有分布,以花岗岩类为主(占侵入岩出露面积的98.3%)^[9]。研究区内晚古生代—早中生代花岗岩类较少出露,也少见这类花岗岩体的报道,主要可见花岗闪长岩、二长花岗岩、石英闪长岩及英云闪长岩等,侵位于奥陶—石炭纪沉积岩及早古生代侵入岩中。土鲁音花岗岩体属于该区花岗岩类中一个较大的晚古生代—早中生代侵入体,出露于诺木洪西南方的土鲁音郭勒、哈拉郭勒一带,岩体沿NNW向延伸,不规则状侵入早古生代纳赤台群和早石炭世哈拉郭勒组及早—中三叠世洪水川组以及早期侵入体之中,出露面积约 60 km^2 (图1-B),并可见大小、形状各异的暗色包体(图2-A),主要岩性为花岗闪长岩(图2-B),岩石呈灰白—灰绿色。

花岗闪长岩:中细粒花岗结构(图2-C,D),主要矿物成分较为简单,有斜长石(45%~50%),钾长石(15%~17%),石英(20%~25%),黑云母(5%~7%),角闪石(4%~6%);副矿物有锆石、磷灰石、榍石、磁铁矿等。斜长石粒径为0.4~4.8 mm,石英粒径为0.2~2.5 mm,钾长石一般大小为0.1~1.5 mm,个

别具显微文象结构,黑云母粒径为0.2~2 mm,半自形至自形片状,角闪石粒径大小0.1~0.6 mm,多为他形粒状,解理发育,且有蚀变现象。

3 分析方法

选取9件花岗闪长岩(14NM047进行锆石测年)样品进行分析测试,所分析样品均为去除风化面和笔痕的新鲜样。样品处理在河北省地质测绘院进行,首先将样品用清洗过的钢锤将样品碎成小块,取其中约1 cm以上粒径小块,放入纯净水中利用超声波清洗干净,再将其放入干净清洁的环境中烘干,最后利用球磨机磨成粉末(直径约 $50 \mu\text{m}$)。

微量元素测试是由中国地质大学(北京)科学研究院地球化学实验室完成。采用X射线荧光光谱仪进行分析,主要测试方法及流程参见李怀参等^[21]。微量元素测试是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用ICP-MS方法测定,精度优于5%,消息测试方法和分析流程见Gao et al. ^[22],全岩主、微量分析数据列于表1。

样品挑选150粒锆石黏在环氧树脂上,然后进行研磨、抛光便于成像和分析。所有锆石在抛光之后均进行透射光和反射光照相,也在阴极发光图像上对其进行分析。锆石激光灼蚀测年是由中国科

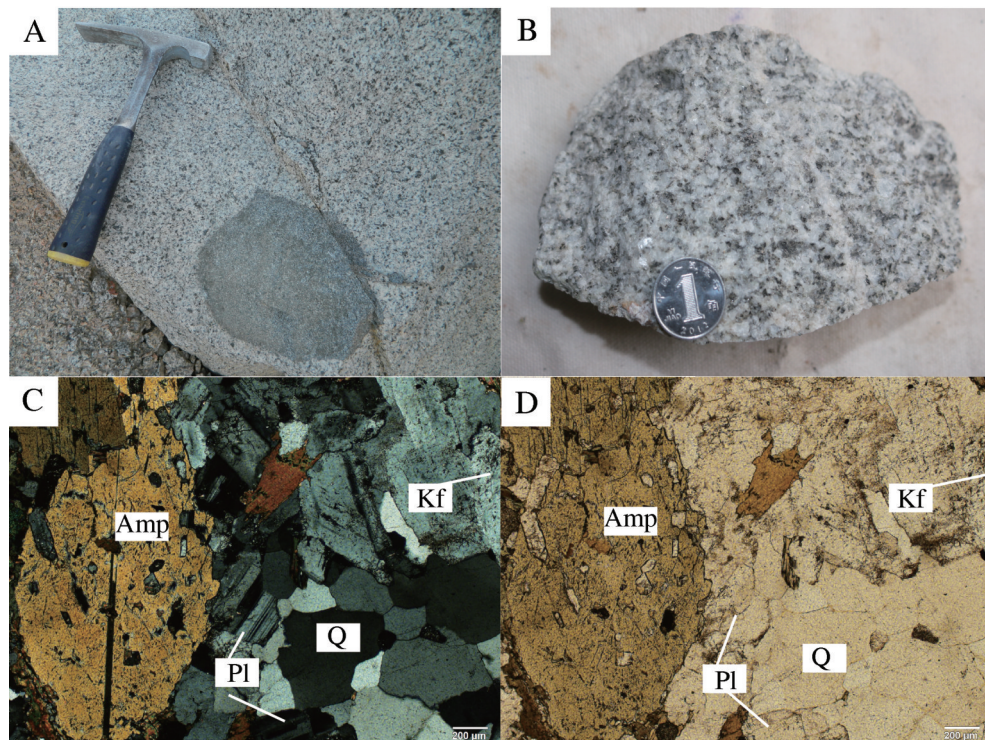


图2 土鲁音标本(A,B)及镜下照片(C,D)

Amp—角闪石;Kf—钾长石;Pl—斜长石;Q—石英

Fig.1 Field photos of the Tuluyin area (A,B) and photomicrographs of the representative granitoid (C,D) (plainlight)

Amp—Amphibole;Kf—Potassium feldspar;Pl—Plagioclase;Q—Quartz

学院青藏高原研究所进行,通过 Neptune 质谱仪利用 LA-ICP-MS 方法完成测定,利用 193 nm FX 激光仪对锆石进行剥蚀,激光斑束设为 30 μm ,每十个样品点对应一个 91500 点,使用标准硅酸盐玻璃 NIST610 优化仪器,采用 Andersen^[23]方法对普通铅进行校正,详细分析方法及仪器参数见李怀坤等^[24],年龄计算和年龄图是通过 isoplot 软件完成。测试结果见表 2。

4 数据分析

4.1 主微量元素分析

土鲁音岩体花岗闪长岩主、微量元素分析结果见表 1。岩石地球化学数据显示土鲁音岩体均有较高的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Na_2O 含量,较低的 K_2O 、 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 以及 TiO_2 含量的特征。 SiO_2 含量为 68.49%~70.87%,全碱含量为 5.94%~7.15%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.34~0.57,比值均小于 1; Al_2O_3 含量为 13.99%~15.26%; CaO 含量为 2.11%~3%; MgO 含量为 0.74%~0.99%, $\text{Mg}^\#$ 为 36.37~38.66。在 TAS 图解

(图 3-A)中,样品落入花岗闪长岩及其与花岗岩边界区域,基本属于花岗闪长岩范围,与镜下鉴定结果较为一致。在 SiO_2 - K_2O 图解(图 3-B)中,样品集中于钙碱性区域。铝饱和指数 A/CNK 为 1~1.07,均小于 1.1,为准铝质-弱过铝质。

土鲁音花岗岩体稀土元素总量较低, $\Sigma\text{REE} = 118.91 \times 10^{-6} \sim 143.97 \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 5.84 \sim 8.57$,其中 $(\text{La}/\text{Yb})_N = 4.17 \sim 9.14$,轻重稀土分异度较高。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 2.37~4.85, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 为 1.01~1.28,表明轻重稀土内部分馏程度较弱, δEu 值为 0.66~0.95,具有弱负 Eu 异常。球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线(图 4-A)表现为右倾曲线,呈轻稀土富集,重稀土呈平坦分布的特征。在原始地幔标准化微量元素图解中(图 4-B),样品较一致的表现出富集 Rb、Ba、Th 等大离子亲石元素,相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素特征。 Nb/Ta 比值为 11.32~13.41,处于地壳 Nb/Ta 比值(10~14)^[28]范围内。

4.2 锆石 U-Pb 定年

对样品(14NM047)中挑选出来的锆石进行 U-

表1 土鲁音花岗岩体主量(%)及微量稀土(10^{-6})分析数据
Table 1 Chemical compositions (%), REE and trace elements (10^{-6}) of Tuluyin granitoids

分析项目	花岗岩长岩							
	14NM048	14NM068	14NM069	14NM077	14NM078	14NM090	14NM092	14NM094
SiO ₂	68.49	70.52	68.83	69.98	70.79	69.78	70.87	70.23
TiO ₂	0.5	0.45	0.54	0.46	0.4	0.39	0.39	0.39
Al ₂ O ₃	15.26	14.33	15.19	14.82	13.99	15.03	14.52	14.66
Fe ₂ O ₃ ^T	3.2	2.86	3.21	2.88	2.6	2.69	2.59	2.51
MnO	0.05	0.07	0.08	0.07	0.08	0.06	0.07	0.06
MgO	0.99	0.9	0.9	0.88	0.76	0.83	0.74	0.79
CaO	2.98	2.9	3	2.24	2.13	2.33	2.5	2.11
Na ₂ O	4.67	4.42	4.29	4.74	4.53	4.33	4.39	4.81
K ₂ O	1.95	1.52	2.21	2.41	2.32	2.48	2.42	2.35
P ₂ O ₅	0.14	0.15	0.16	0.16	0.12	0.1	0.12	0.1
LOI	1.04	1.25	0.96	1.32	1.36	1.42	1.36	1.2
Total	99.27	99.37	99.37	99.96	99.08	99.44	99.97	99.21
Na ₂ O+K ₂ O	6.62	5.94	6.5	7.15	6.85	6.81	6.81	7.16
A/CNK	1	1.01	1.02	1.02	1.01	1.07	1.01	1.02
FeO ^T	2.88	2.57	2.89	2.59	2.34	2.42	2.33	2.26
Mg [#]	38.22	38.66	35.92	37.95	36.89	38.17	36.37	38.62
Li	8.36	7.35	6.24	6.58	6.45	10.1	9.19	8.72
Be	1.36	1.38	1.13	1.51	1.57	1.54	1.55	1.48
Sc	8.01	7.04	7.3	7.53	7.03	6.72	6.08	6.52
V	51.6	39	44.5	39.7	34.1	33.2	31.4	34.5
Cr	2.87	2.6	1.91	2.11	1.55	1.65	1.92	1.45
Co	3.97	3.93	4.36	3.9	3.18	2.85	3.09	9.1
Ni	2.41	2.79	2.5	2.27	2.36	2.12	2.22	1.95
Cu	0.83	2.06	1.56	1.28	1.3	4.78	1.82	6.87
Zn	21.6	38.7	35.3	30.5	27.6	28.6	24.6	21.4
Ga	16	15	16.1	15.3	14.7	15.1	14.9	14.7
Rb	48.9	33.9	53.7	68.7	67.5	82.3	65.5	56
Sr	319	261	320	206	172	236	209	195
Zr	229	184	173	180	178	156	181	182
Nb	6.49	6.55	6.13	7.15	6.75	6.84	7.24	7.13
Sn	2.76	1.33	1.21	1.32	1.38	1.95	1.14	6.42
Cs	0.84	0.61	0.82	0.54	0.63	0.68	0.58	0.38
Ba	602	528	584	578	567	595	636	608
Hf	5.49	4.71	4.46	4.74	4.51	4.06	4.79	4.76
Ta	0.38	0.45	0.44	0.5	0.45	0.46	0.55	0.51
Tl	0.27	0.25	0.34	0.37	0.35	0.48	0.34	0.35
Pb	7.15	11.1	9.28	8.67	9.58	9.43	9.89	8.98
Th	5.58	6.97	6.99	8.36	8.51	7.37	9	8.26
U	1.02	1	0.82	1.48	1.21	1.53	1.89	1.59
La	26.1	24.8	25.6	25.5	25.3	20.8	25.3	15.8
Ce	50	46.5	46.3	49.2	47.3	40.6	46.3	42.2
Pr	5.22	5.07	4.88	5.26	5.03	4.24	4.92	5.28
Nd	19.9	19.3	18.6	20.3	19.1	16.1	17.9	20.8
Sm	3.71	3.71	3.41	4.11	3.72	3.36	3.75	4.3
Eu	1.09	1	1.03	0.97	0.91	0.85	0.77	0.92
Gd	3.6	3.36	3.07	3.62	3.45	2.87	3.29	3.76
Tb	0.57	0.56	0.47	0.62	0.58	0.51	0.55	0.63
Dy	3.57	3.55	3.03	3.87	3.52	3.28	3.49	4.02
Ho	0.76	0.7	0.61	0.82	0.76	0.68	0.76	0.81
Er	2.08	2.1	1.83	2.42	2.26	2.05	2.31	2.52
Tm	0.36	0.34	0.31	0.38	0.37	0.32	0.38	0.4
Yb	2.32	2.38	2.01	2.68	2.49	2.3	2.7	2.72
Lu	0.38	0.37	0.32	0.42	0.41	0.35	0.42	0.42
Y	22.1	20.8	17.8	23.8	22.5	20.6	22.7	23.6
Yb+Ta	2.7	2.83	2.45	3.18	2.94	2.76	3.25	3.23
∑REE	141.76	134.54	129.27	143.97	137.7	118.91	135.54	128.18
LREE/HREE	7.77	7.51	8.57	7.1	7.32	6.95	7.12	5.84
La _N /Yb _N	8.07	7.47	9.14	6.83	7.29	6.49	6.72	4.17
δ _{Eu}	0.9	0.85	0.95	0.75	0.76	0.82	0.66	0.68
δ _{Ce}	0.99	0.96	0.95	0.99	0.97	1	0.95	1.13

注: LOI为烧失量, A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)摩尔比, FeO^T=0.8998×Fe₂O₃^T, Mg[#]=100×Mg²⁺/(Mg²⁺+Fe²⁺)。

表2 土鲁花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析数据
Table 2 Data of zircon LA-ICP-MS U-Pb ages of Tuluyin granitoids

测点	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	^{206}Pb	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1δ	$^{205}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1δ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1δ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1δ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1δ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1δ
14NM047 共 23 个测点数据, 加权平均年龄为 (245.1 \pm 3.3)Ma, MSWD=0.029															
1	9.31	49.14	0.93	0.03873	0.00172	0.27172	0.07602	0.05083	0.01438	233	548	244.1	60.7	245	10.7
2	11.02	66.3	0.66	0.03875	0.00179	0.37748	0.0739	0.07057	0.01414	944.9	363.94	325.2	54.47	245.1	11.11
3	14.04	85.19	0.83	0.03879	0.00116	0.31327	0.0446	0.05852	0.00851	549.2	289.55	276.7	34.48	245.3	7.2
4	14.22	87.87	0.73	0.03867	0.00092	0.27531	0.0351	0.05121	0.0067	250.4	275.91	245.3	27.99	244.6	5.71
5	15.91	92.39	0.72	0.03873	0.00255	0.33703	0.09986	0.06305	0.01905	709.8	538.13	294.9	75.84	245	15.86
6	14.62	83.34	0.7	0.03879	0.00118	0.29248	0.04099	0.05464	0.00783	397.4	292.87	260.5	32.2	245.3	7.34
7	10.46	57.72	0.7	0.03868	0.00127	0.33512	0.0548	0.06277	0.01046	700.6	319.94	293.5	41.68	244.7	7.88
8	15.5	91.66	0.79	0.0388	0.00137	0.24139	0.04869	0.04508	0.00922	0.1	383.3	219.6	39.83	245.4	8.48
9	15	79.09	0.77	0.03885	0.00123	0.31008	0.04803	0.05786	0.00914	524.1	313.63	274.2	37.22	245.7	7.65
10	15.37	92.59	0.7	0.03862	0.00134	0.32792	0.05007	0.06155	0.00962	658.7	303.83	288	38.29	244.3	8.3
11	12.93	76.73	0.98	0.03881	0.00169	0.31488	0.06736	0.05882	0.01281	560.6	414.99	278	52.02	245.4	10.5
12	19.11	117.37	0.97	0.03862	0.00104	0.32598	0.03674	0.0612	0.0071	646.1	231.37	286.5	28.13	244.3	6.46
13	15.74	95.25	0.8	0.03895	0.00163	0.3872	0.06838	0.07207	0.01304	987.9	330.18	332.3	50.05	246.3	10.14
14	12.83	78.47	0.9	0.03872	0.00121	0.23197	0.04501	0.04343	0.00853	0.1	283.84	211.8	37.1	244.9	7.49
15	15	91.5	0.93	0.03885	0.00198	0.31097	0.07566	0.05805	0.01438	531.1	466.94	274.9	58.6	245.7	12.27
16	8.96	57.91	0.79	0.03881	0.00162	0.346	0.0715	0.06465	0.0136	763	390.23	301.7	53.94	245.5	10.07
17	9.58	55	0.83	0.03857	0.00217	0.32216	0.08693	0.06058	0.01664	624.3	502.55	283.6	66.76	244	13.47
18	9.02	56.98	0.85	0.03888	0.00223	0.3971	0.10269	0.07411	0.01955	286.6	366.29	339.5	74.63	245.9	13.84
19	16.23	101.21	0.83	0.03865	0.00094	0.26608	0.02807	0.04996	0.00542	1044.3	456.85	239.6	22.51	244.5	5.86
20	16.62	100.92	0.78	0.03864	0.0015	0.26667	0.05194	0.05008	0.00993	193	234.17	240	41.64	244.4	9.34
21	11.41	66.78	1.06	0.03874	0.00135	0.27494	0.05435	0.05151	0.01033	263.8	404.74	246.6	43.28	245	8.36
22	12.21	66.67	1.06	0.03879	0.00101	0.2723	0.04201	0.05095	0.00798	238.6	325.84	244.5	33.53	245.4	6.3
23	19.96	99.6	0.94	0.03873	0.00125	0.38193	0.04978	0.07159	0.00959	974.2	251.59	328.5	36.57	245	7.73

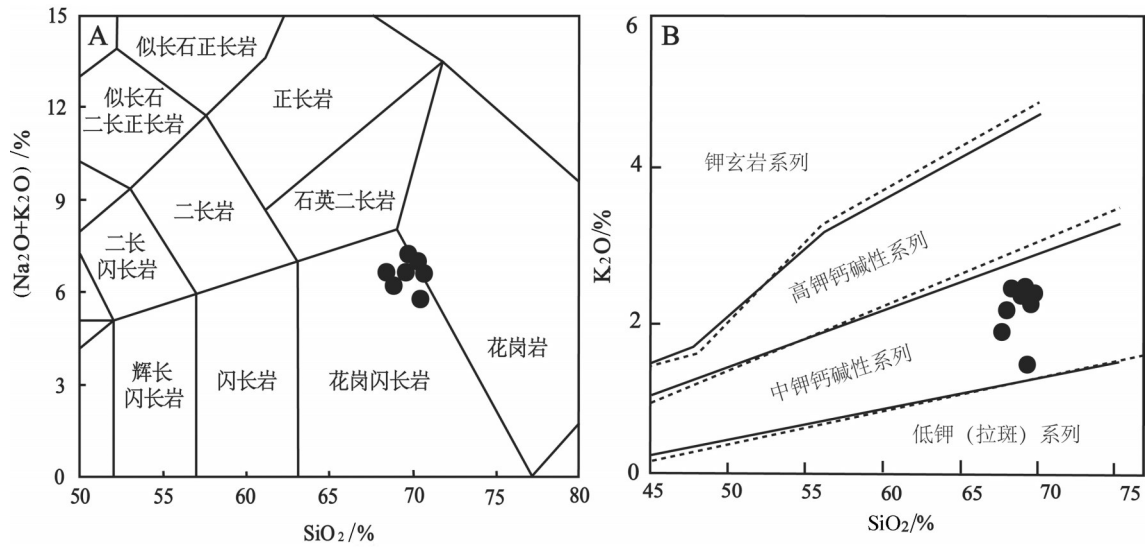


图3 土鲁音岩体TAS分类图解(A)(底图据[25]),土鲁音花岗岩体SiO₂-K₂O图解(B)(底图据[26-27])
 Fig.3 The TAS classification scheme of Tuluyin granitoids (A)(after reference [25]), the SiO₂-K₂O scheme of Tuluyin granitoids (B) (after references [26-27])

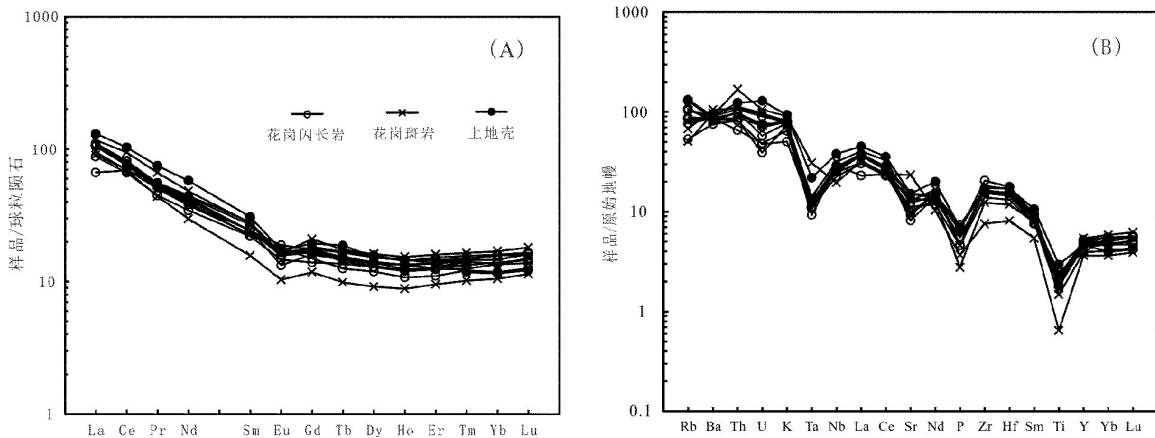


图4 土鲁音岩体球粒陨石标准化分布型式图(A)和原始地幔标准化蛛网图(B)(球粒陨石及原始地幔数据引自[29];上地壳数据引自[30];花岗斑岩数据引自[31])

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns(A) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams(B)(normalization values after reference [29]; upper crust data after reference [30]; granite porphyry data after reference [31])of Tuluyin granitoids

Pb的 LA-ICP-MS 定年。锆石颗粒大小为 80~200 μm 长,无色,自形程度较好,呈棱形,长宽比为 1:1~3:1。阴极发光图像显示为均一质或有明显环带状结构(图 5-B)。其中极个别锆石具有继承核和岩浆增生环带,锆石 Th/U 基本在 0.66~1.06,属于典型的岩浆成因锆石。花岗闪长岩样品的 27 个测点中,剔除 4 个不协和点,其余 23 个测点均投影于协和线上或其附近(图 5-A),²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化于 244.3~246.3 Ma,加权平均年龄为 (245.1 ± 3.3) Ma (MSWD =

0.029)。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果显示土鲁音岩体形成于早中三叠世,属印支早期。

5 讨论

5.1 岩体形成时代

土鲁音花岗闪长岩样品的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果显示,23 个可信测点 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄位于 244.3~246.3 Ma,数据较集中,显示岩体形成时间较短。加权年龄为 (245.5 ± 3.3) Ma,显示岩浆侵位

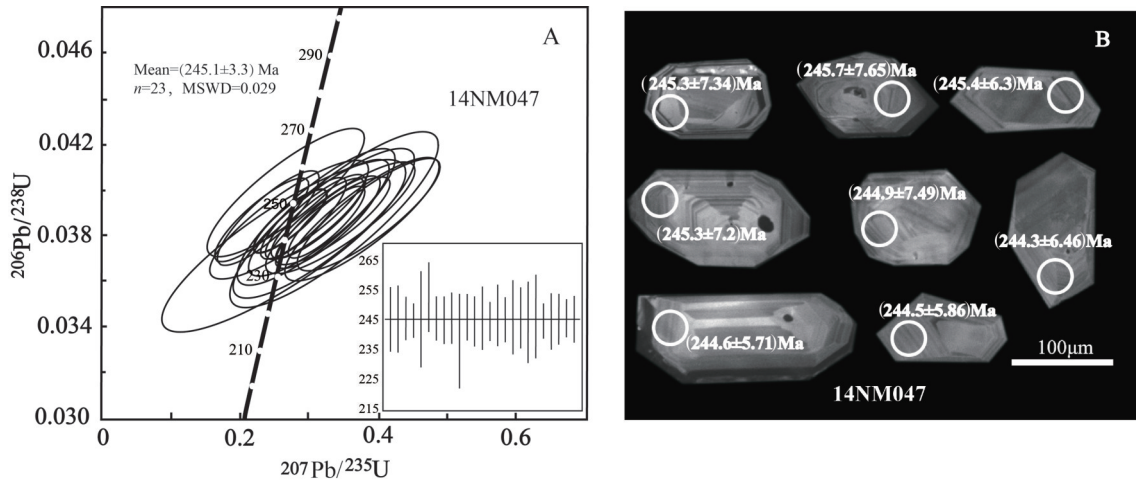


图5 土鲁音岩体花岗岩体LA-MPS-MS 锆石年龄谱和图(A)和锆石阴极发光(CL)图像及其表面年龄(Ma)(B)
Fig.5 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams of zircons(A) and zircon cathodoluminescence (CL) images and apparent ages(Ma)
(B)of Tuluyn granitoids

年龄为245 Ma左右,王国灿等^[20]对岩体西北部花岗岩闪长岩的锆石U-Pb测年结果为245 Ma左右,两个锆石年龄基本一致,属早中三叠世。

对区域上花岗岩形成年龄进行统计发现,香日德,巴隆,哈日扎,白日其利^[13-15,32-35]等东昆仑东部花岗岩体研究表明,其结晶年龄均在240~250 Ma (图6),属中三叠世早期。土鲁音岩体南侧埃坑德勒斯特花岗斑岩^[34]以及下得波利花岗斑岩^[31]测年结果分别为248 Ma和244 Ma,基本与土鲁音花岗岩年代一致,且其地球化学特征与土鲁音岩体也基本一致,表明与土鲁音岩体为同期岩浆作用产物。

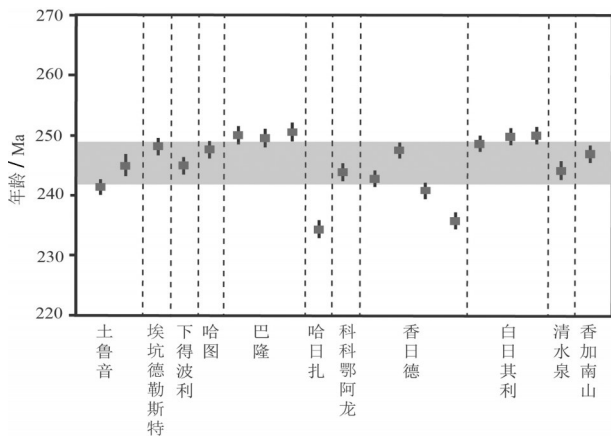


图6 东昆仑东段花岗岩体年龄统计图
Fig.6 Statistics of granite ages of the eastern East Kunlun Mountains

5.2 岩体成因与源区特征

花岗岩成因及源区问题历来是有关花岗岩研究的焦点。土鲁音花岗岩标本及镜下并未发现白云母及堇青石等S型花岗岩特征矿物,CIPW标准矿物计算中含有钛铁矿及磷灰石等矿物成分,样品富硅、铝,贫铁、镁、钙,K₂O/Na₂O比值远小于1,铝饱和指数A/CNK在1~1.1,为弱过铝质(图7-A),样品中P₂O₅随SiO₂的增高而降低,在图3-B中样品均显示钙碱性特征,SiO₂-Y图解中(图8-A),样品点均落入I型花岗岩区域。因此,土鲁音花岗岩属于弱过铝质钙碱性I型花岗岩。样品整体显示出的弱负Eu异常表明源区较少有斜长石的分离结晶或残留,在La-La/Sm图解(图7-B)中,样品显示出部分熔融成因特点,(La/Sm)_N比值变化范围较小表明后期岩浆分异作用不强烈。土鲁音岩体岩石较高的SiO₂和Al₂O₃值,高钠低钾,低铁镁,轻重稀土分异较强((La/Yb)_N=4.17~9.14),以及较低的Y值等特征显示近埃达克岩特征^[36],而在(La/Yb)_N-Yb_N图(图8-B)中样品均落入岛弧岩石区域,且样品Sr/Yb比值较低以及较高的Yb值等特征显示样品为正常岛弧岩浆岩。

Nb、Ta 由于性质相近,Nb/Ta 比值在岩浆分异中不会造成较大的分异,可以指示岩浆源区特征及演化过程。土鲁音岩体具有较高的Nb/Ta 比值11.32~13.41,平均值为12.15,与上地壳平均值(13.33)^[30]较为接近,远大于下地壳平均值(8.33)^[30],

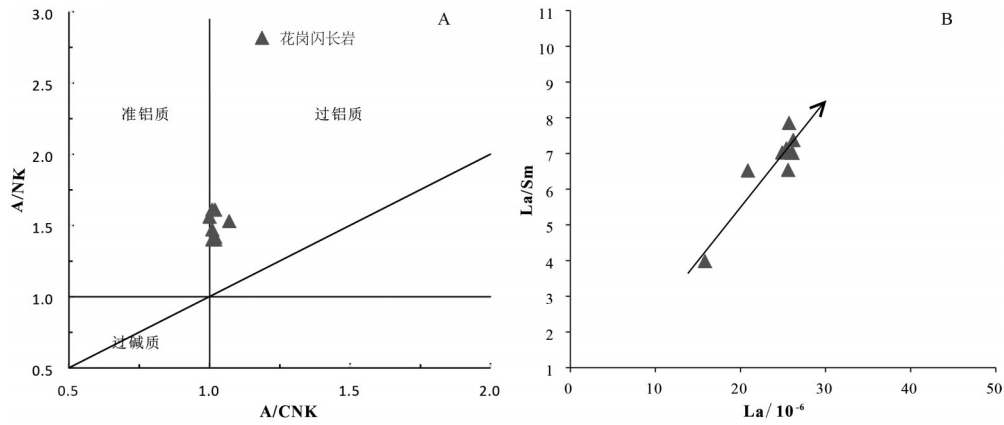


图7 A/NK-A/CNK图解(A)(底图据^[27])和La-La/Sm图解(B)
Fig.7 A/NK-A/CNK scheme(after reference ^[27]); La-La/Sm scheme

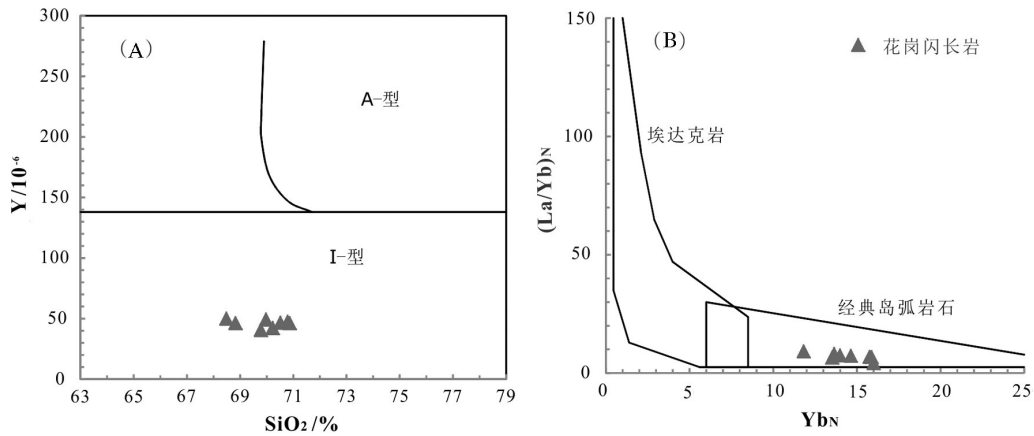


图8 土鲁音花岗岩体SiO₂-Y成因判别图解(A)(底图据^[39]); Yb_N-(La/Yb)_N判别图(B)(底图据^[40])
Fig.8 SiO₂-Y discrimination diagrams of Tuluyin granitoids(A)(after reference ^[39]); Yb_N-(La/Yb)_N discrimination diagrams of Tuluyin granitoids(B)(after reference ^[40])

暗示其可能源区与上地壳有关。在球粒陨石标准化稀土元素图解和原始地幔标准化微量元素蜘蛛图解上,本区样品与其南部的下得波利花岗斑岩显示出相似分布形式,表明两者属于同一热事件的产物,且均与上地壳微量元素特征类似^[30],暗示土鲁音地区岩浆岩的源区很可能与上地壳有关。这一结果与刘建楠根据下得波利花岗斑岩Sr、Yb含量波动较大来推断岩浆源区为下地壳部分熔融的结果相左。Nb、Ta及Ti的亏损,暗示岩浆不可能由软流圈部分熔融直接产生^[32],而可能来源于地壳、或与地壳混染有关、或在源区有富集Nb、Ta和Ti的残留矿物、或者是因板块俯冲作用影响的富集岩石圈地幔参与了岩浆的演化过程^[37-38]。结合岩体中广泛发育暗色微粒包体现象,笔者推测造成Sr、Yb含量波动

的原因为幔源物质参与成岩作用引起的。杨延乾对区内挨坑德勒斯特二长花岗岩的研究表明其成因与幔源酸性岩浆的混合作用有关。研究表明,具有平坦的重稀土分布型式的花岗岩,其源岩部分熔融一定发生在角闪岩相^[10]。杨延乾^[35]对区内挨坑德勒斯特二长花岗岩的Nd同位素研究表明 $\epsilon_{Nd}(t)$ 均为负值(-5.44~-4.72),进一步表明成岩物质来源于古老地壳。

5.3 岩体形成的地球动力学背景

花岗岩构造环境的研究是当代花岗岩研究的前沿问题之一。而目前对阿尼玛卿—古特提斯洋的闭合时间及东昆仑东部早印支期所处的构造环境仍没有明确界定。郭正府、刘成东、谌宏伟、莫宣学等人研究表明,晚华力西—印支旋回为东昆仑地

区最完善的造山旋回,在230~260 Ma,东昆仑地区处于大洋板块大规模俯冲碰撞阶段^[6-7,11,41-42],具安第斯活动大陆边缘属性。王秉璋等认为早印支期随着阿尼玛卿-古特提斯洋闭合,整个东昆仑岩石圈加厚、抬升成陆,东昆仑地区进入陆内活动阶段^[43]。因此,本文提供土鲁音岩体新的精确的同位素定年结果及详细的岩石学与地球化学研究,为解决该岩体的起源与成因,探讨东昆仑早印支期构造演化历史提供了新的约束。

在花岗岩构造环境的多种判别图解中(图9),土鲁音花岗岩样品主要落到火山弧或大陆弧花岗岩区,一致显示土鲁音花岗岩的成因可能与阿尼玛卿洋的俯冲有关。考虑到地球化学数据的多解性,进一步从区域地质资料中寻求对上述认识的支持。区域上,李瑞保对上三叠统八宝山组与下伏不同时代地层之间的角度不整合的研究表明,区域构造背景发生了根本性的转变^[44],在土鲁音地区表现为下三叠统洪水川组浅海相地层与上三叠统八宝山组陆相地层之间的角度不整合(图1-B),说明有

地壳抬升。胡楠等对东昆仑地区浩特洛洼组(C_2ht)断块、闹仓坚沟组(T_2n)、洪水川组(T_1h)与八宝山组(T_3b)和羊曲组(J_1y)之间褶皱类型的差异研究表明二叠世东昆仑地区古特提斯洋俯冲消减作用与中三叠世末强烈的陆陆碰撞作用是与马儿争组沉积地层两次褶皱变形相对应^[45],论证了阿尼玛卿-古特提斯洋俯冲至少持续至中三叠世。

区内埃坑得勒斯特和下得波利花岗岩研究结果表明,研究区属活动陆源弧,为阿尼玛卿-古特提斯洋北向俯冲作用产物。可以推测早中三叠世阿尼玛卿-古特提斯洋俯冲已至末期。因此,土鲁音岩体可能是由阿尼玛卿-古特提斯洋大规模俯冲碰撞末期,由地壳部分熔融形成,且有地幔物质参与。

6 结 论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学研究表明花岗闪长岩岩体形成时代为(245.1±3.3)Ma,属印支早期产物,与区内埃坑得勒斯特及下得波利花岗岩类岩浆活动基本一致。

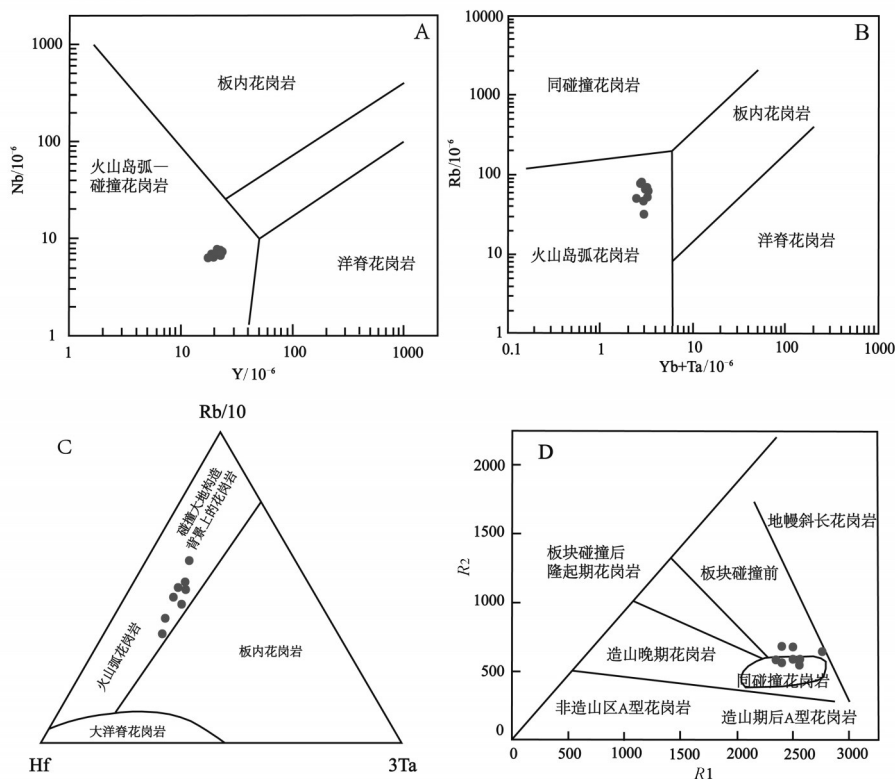


图9 土鲁音岩体构造环境判别图(A, B底图据[46]; C, D底图据[47])

Fig. 9 Tectonic setting diagrams for Tuluyin granitoids(A, B after reference [46]; C, D after reference [47])

(2)土鲁音花岗岩具有高硅、钠,低钾、镁、铁、磷,弱过铝质($A/CNK=1\sim 1.07$)的特点,属弱过铝质钙碱性I型花岗岩;具有轻稀土元素富集(LREE),重稀土元素(HREE)平坦分布,显示弱负铈异常;大部分样品显示富集大离子亲石元素(Rb、Th、Ba),亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti)的特征。

(3)土鲁音岩体由壳源物质部分熔融形成,有幔源物质参与,其成因与阿尼玛卿—古特提斯洋北向俯冲有关。

致谢:河北地质测绘院帮助对样品进行初步处理,主量元素测试在中国地质大学(北京)科学研究院地球化学实验室进行,微量元素测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行,LA-ICP-MS 锆石U-Pb定年在中国科学院青藏高原研究所完成;黄慧博士,白洋、曾洋在样品采集与处理方面提供帮助,权瑞、杨洋和李雪峰、潘彦宁、隋真龙和孙转荣在实验及数据处理方面提供帮助,张亮亮博士在数据分析方面提供了建议和启发,评审老师提出良好的修改意见,谨在此向以上单位和个人致以诚挚的谢意。

参考文献(References):

- [1] 莫宣学,赵志丹,邓晋福,等. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘,2003,10(3): 135-148.
Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, et al. Response of volcanism to the India-Asian collision[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3): 135-148(in Chinese with English abstract).
- [2] 殷鸿福,张克信. 东昆仑造山带的一些特点[J]. 地球科学——中国地质大学学报. 1997, 22(4): 339-342.
Yin Hongfu, Zhang Kexin. Characteristics of the Eastern Kunlun Orogenic Belt[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1997, 22(4): 339-342(in Chinese with English abstract).
- [3] 姜春发,王宗起,李锦轶,等. 中央造山带开合构造. 北京:地质出版社,2000: 1-154.
Jiang Chunfa, Wang Zongqi, Li Jinyi. Opening-closing Tectonics of the Central Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1-154(in Chinese with English abstract).
- [4] 潘桂棠,王立全,朱弟成,等. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考[J]. 地质通报,2004, 23(1): 12-19.
Pan Guitang, Wang Liquan, Zhu Dicheng, et al. Thoughts on some important scientific problems in regional geological survey of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(1): 12-19 (in Chinese with English abstract).
- [5] 许志琴,杨经绥,李文昌,等. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用[J]. 岩石学报,2013, 29(6): 1847-1860.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Wenchang, et al. Paleo-Tethys system and accretionary orogeny in the Tibet Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(6): 1847-1860(in Chinese with English abstract).
- [6] 莫宣学,罗照华,邓晋福,等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报,2007, 13(3): 403-414.
Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, et al. Granitoids and crustal growth in the East Kunlun Orogenic Belt[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 403-414(in Chinese with English abstract).
- [7] 罗照华,邓晋福,曹永清,等. 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[J]. 现代地质,1999, 13(1): 51-56.
Luo Zhaohua, Deng Jinfu, Cao Yongqing, et al. On Late Paleozoic-Early Mesozoic volcanism and regional tectonic evolution of Eastern Kunlun, Qinghai Province[J]. Geoscience, 1999, 13(1): 51-56 (in Chinese with English abstract).
- [8] 罗照华,柯珊,曹永清,等. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动[J]. 地质通报,2002, 21(6): 292-297.
Luo Zhaohua, Ke Shan, Cao Yongqing, et al. Late Indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(6): 292-297(in Chinese with English abstract).
- [9] 袁万明,莫宣学,喻学惠,等. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录[J]. 地质评论,2000, 46(2): 203-211.
Yuan Wanming, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, et al. The Record of Indosinian Tectonic Setting from the Granitoid of East Kunlun Mountains[J]. Geological Review, 2000, 46(2): 203-221(in Chinese with English abstract).
- [10] Huang H, Niu Y L, Geoff Nowell. Geochemical constraints on the petrogenesis of granitoids in the East Kunlun Orogenic belt, northern Tibetan Plateau: Implications for continental crust growth through syn-collisional felsic magmatism[J]. Chemical Geology, 2014, 370: 1-18.
- [11] 郭正府,邓晋福,许志琴,等. 青藏东昆仑晚古生代—中生代中酸性火成岩与陆内造山过程[J]. 现代地质,1998, 12(3): 344-352.
Guo Zhengfu, Deng Jinfu, Xu Zhiqin, et al. Late Paleozoic-Mesozoic intracontinental orogenic process and intermediate acidic igneous rocks from the Eastern Kunlun Mountains of North western China[J]. Geoscience, 1998, 12(3): 344-352(in Chinese with English abstract).
- [12] 陈国超,裴先治,李瑞保,等. 东昆仑洪水川地区科科鄂阿龙岩体锆石U-Pb年代学、地球化学及其地质意义[J]. 地质学报. 2013, 87(2): 178-196.
Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Geochronology and Genesis of the Helegang Xilikete Granitic Plutons from the Southern Margin of the Eastern East Kunlun Orogenic Belt and

- Their Tectonic Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(10): 178–196(in Chinese with English abstract).
- [13] 熊富浩, 马昌前, 张金阳, 等. 东昆仑造山带早古生代镁铁质岩墙群LA-ICP-MS锆石U-Pb定年、元素和Sr-Nd-Hf同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3350–3364.
- Xiong Fuhao, Ma Changqian, Zhang Jinyang, et al. 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[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3350–3364(in Chinese with English abstract).
- [14] 熊富浩. 东昆仑造山带东段古提斯域花岗岩类时空分布—岩石成因及其地质意义[D]. 博士学位论文, 2014: 22–74.
- Xiong Fuhao. Spatial-temporal Pattern, Petrogenesis and Geological Implications of Paleo-Tethyan Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt(Eastern Segment) [D]. Wuhan: China University of Geoscience, 2014, 22–74 (in Chinese with English abstract).
- [15] 罗明飞, 莫宣学, 喻学惠, 等. 东昆仑香日德地区晚三叠世花岗岩LA-ICP-MS锆石定年、岩石成因和构造意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3229–3241.
- Luo Mingfei, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age dating, petrogenesis and tectonic implications of the Late Triassic granites from the Xiangride area, East Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(11): 3229–3241(in Chinese with English abstract).
- [16] Liu H. Petrology, geochemistry and geochronology of late Triassic volcanics, Kunlun orogenic belt, western China: Implications for tectonic setting and petrogenesis[J]. *Geochemical Journal*, 2005, 39(1): 1–20.
- [17] Yuan C, Sun M, Xiao W J, et al. Garnet-bearing tonalitic porphyry from East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau: implications for adakite and magmas from the MASH zone. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6): 1489–1510.
- [18] Wang Q, Li Z X, Chung S L, et al. Late Triassic high-Mg andesite/dacite suites from northern Hohxil, North Tibet: Geochronology, geochemical characteristics, petrogenetic processes and tectonic implications[J]. *Lithos*, 2011, 126(1/2): 54–67.
- [19] 王国灿, 贾春兴, 朱云海, 等. 中华人民共和国区域地质调查报告: 阿拉克湖幅(147C001001), 1:250000 [R]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2004: 1–419.
- Wang Guocan, Jia Chunxing, Zhu Yunhai, et al. The People's Republic of China Regional Geological Report: Alake Hu Map (147C001001), Scale: 1: 250000[R]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2004: 1–419 (in Chinese).
- [20] 王国灿, 王青海, 简平, 等. 东昆仑前寒武基底变质岩系的锆石SHRIMP年龄及其构造意义[J]. *地学前缘*, 2004, 11(4): 481–490.
- Wang Guocan, Wang Qinghai, Jian Ping, et al. Zircon SHRIMP ages of Precambrian metamorphic basement rocks and their tectonic significance in the eastern Kunlun Mountains, Qinghai Province, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(4): 481–490 (in Chinese with English abstract).
- [21] 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)测定锆石U-Pb同位素年龄的研究[J]. *矿物学报*, 2009, 29(增刊): 600–601.
- Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, et al. Study on zircon U-Pb dating by LA-ICP-MS[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, 29(supp.): 600–601(in Chinese with English abstract).
- [22] Gao S, Liu X M, Yuan H L, et al. Determination of forty-two major and trace element in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-Mass Spectrometry[J]. *Geostandards Newsletter—Journal of Geostandards and Geoanalysis*, 2002, 26(2): 191–196.
- [23] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb[J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59–79.
- [24] 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 等. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石U-Pb定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束[J]. *岩石学报*, 2010, 26(7): 2131–2140.
- Li Huaikun, Zhu Shixing, Xiang Zhenqun, et al. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(7): 2131–2140 (in Chinese with English abstract).
- [25] Eric A K M. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 1994, 37: 215–224.
- [26] Peccerillor R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contribution of Mineral Petrology*, 1976, 58: 63–81.
- [27] Middlemost, et al. *Magmas and Magmatic Rocks* [M]. London: Longman, 1985: 1–266.
- [28] 赵振华, 熊小林, 王强, 等. 铌与钽的某些地球化学问题[J]. *地球化学*, 2008, 37(4): 304–320.
- Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Wang Qiang, et al. Some aspects on geochemistry of Nb and Ta[J]. *Geochimica*, 2008, 37(4): 304–320 (in Chinese with English abstract).
- [29] Sun S S, McDonough W. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42: 313–345.
- [30] RL Rudnick, S Gao. *Composition of the Continental*[J]. *Crust-Treatise on Geochemistry*, 2003, 60(1): 1–64.
- [31] 刘建楠, 丰成友, 元锋, 等. 青海都兰县下得波利铜钼矿区锆石U-Pb测年及流体包裹体研究[J]. *岩石学报*, 2012, 28(2): 679–690.
- Liu Jiannan, Feng Chengyou, Qi Feng, et al. SIMS zircon U-Pb

- dating and fluid inclusion studies of Xiadeboli Cu-Mo are district in Dulan County, Qinghai Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(2): 679-690 (in Chinese with English abstract).
- [32] 熊富浩, 马昌前, 张金阳, 等. 东昆仑造山带白日其利辉长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2011, 30(8): 1196-1202 (in Chinese with English abstract).
Xiong Fuhao, Ma Changqian, Zhang Jinyang, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of Bairiqili gabbro pluton in the East Kunlun Orogenic Belt and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(8): 1196-1202 (in Chinese with English abstract).
- [33] 宋忠宝, 张雨莲, 陈向阳, 等. 东昆仑扎日哈含矿花岗闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. *矿床地质*, 2013, 32(1): 157-168.
Song Zhongbao, Zhang Yulian, Chen Xiangyang, et al. Geochemical characteristic of Harizha granite diorite-porphry in East Kunlun and their geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 2013, 32(1): 157-168 (in Chinese with English abstract).
- [34] 许庆林. 青海东昆仑造山带斑岩型矿床成矿作用研究[M]. 长春: 吉林大学, 2014, 117-145.
Xu Qinglin. Study on Metallogenesis of Porphyry Deposits in Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province[M]. Changchun: Jilin University, 2014, 117-145 (in Chinese with English abstract).
- [35] 杨延乾. 青海东昆仑埃坑得勒斯特铜(铜)矿床地质特征及成因探讨[1]. 长春: 吉林大学, 2013, 26-53.
Yang Yanqian. Study on Geological Characteristics and Genesis of Aikengdelesite Molybdenum (Copper) Deposit, Eastern Kunlun, Qinghai Province[1]. Changchun: Jilin University, 2013, 26-53 (in Chinese with English abstract).
- [36] 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2249-2269.
Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, et al. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(9): 2249-2269 (in Chinese with English abstract).
- [37] Foley S F, Peccerillo A. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin[J]. *Lithos*, 1992, 28: 181-185.
- [38] Dungan M A, Lindstrom M M, McMillan N J, et al. Open system magmatic evolution of Taos Plateau volcanic field, northern New Mexico: 1. The Petrology and geochemistry of the servilleta Basalt[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 1986, 91(B6): 5999-6028.
- [39] Whalen J B, et al. A type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1987, 95.
- [40] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 662-665.
- [41] 湛宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制[J]. *中国地质*, 2005, 32(3): 386-394 (in Chinese with English abstract).
Chen Hongwei, Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, et al. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geology in China*, 2005, 32(3): 386-394.
- [42] 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 等. 东昆仑壳-幔岩浆混合作用: 来自锆石 SHRIMP 年代学的证据[J]. *科学通报*, 2004, 49(6): 596-602 (in Chinese with English abstract).
Liu Chengdong, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, et al. Mixing events between the crust and mantle-derived magmas in the Eastern Kunlun: Evidence from zircon SHRIMP chronology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(6): 596-602 (in Chinese with English abstract).
- [43] 王秉璋, 罗照华, 李怀毅, 等. 东昆仑祁漫塔格走廊晚古生代一早中生代侵入岩岩石组合及时空格架[J]. *中国地质*, 2009, 36(4): 769-782.
Wang Bingzhang, Luo Zhaohua, Li Huaiyi, et al. Petrotectonic assemblages and temporal-spatial framework of the Late Paleozoic-Early Mesozoic intrusions in the Qimantage Corridor of the East Kunlun Belt[J]. *Geology in China*, 2009, 36(4): 769-782 (in Chinese with English abstract).
- [44] 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 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[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5): 244-254 (in Chinese with English abstract).
Li Ruibao, Pei Xianzhi, Li Zuochen, et al. Geological characteristics of Late Paleozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 244-254 (in Chinese with English abstract).
- [45] 胡楠, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑南缘布青山得力斯坦地区马儿组无缘分析及其构造背景研究[J]. *地质学报*, 2013, 87(11): 1731-1747.
Hu Nan, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Provenance and Tectonic Setting Study of the Maerzheng Formation at the Delishan of Buqingshan Area in the Southern Margin of East Kunlun[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(11): 1731-1747 (in Chinese with English abstract).
- [46] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [47] Batchelor R A and Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. *Chemical Gology*, 1985, 48(1/4): 43-45.