

西昆仑地区元古宙岩浆侵入作用及 构造-岩浆演化过程

康磊¹, 校培喜¹, 高晓峰¹, 奚仁刚¹, 杨再朝^{1,2}, 过磊¹, 董增产¹

(1. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:通过对西昆仑地区元古代侵入岩的岩石类型、形成时代和岩石地球化学资料的综合分析,探讨各个构造单元侵入岩形成期次、岩石成因及构造-岩浆演化过程。铁克里克断隆带元古宙中酸性侵入岩以 A 型花岗岩为主,是塔里木板块古老基底在高温低压条件下发生部分熔融的产物。西昆仑造山带古元古代和中元古代早期中酸性侵入岩为钙碱性 I 型花岗岩,是变玄武岩在低温条件下部分熔融条件下形成的,而古元古代晚期和新元古代中酸性侵入岩则是高温条件下老基底岩系部分熔融而形成的 A 型花岗岩。甜水海地块仅发育新元古代侵入岩,为 S 型花岗岩,是高温高压环境下甜水海地块古老基底部分熔融而形成。根据侵入岩岩浆演化规律,将西昆仑地区元古宙划为 4 个演化阶段:①2 426~1 567 Ma;以铁克里克断隆带 A 型花岗岩为代表的塔里木板块陆内演化,以西昆仑造山带钙碱性-拉斑质 I 型花岗岩为代表的陆缘弧。②1 301~1 000 Ma;铁克里克断隆带和西昆仑造山带均以陆内演化性质的 A 型花岗岩为主。③1 000~851 Ma;甜水海地块 S 型花岗岩可能是陆-陆碰撞导致地壳加厚的产物,指示甜水海地块可能作为 Rodinia 超大陆的一员发生聚合拼接作用。④815~644 Ma;铁克里克断隆带和西昆仑造山带均存在碱性基性岩浆岩和 A 型花岗岩的双峰式侵入岩组合,指示塔里木地块和西昆仑地块可能作为 Rodinia 超大陆组成部分,在该阶段发生了裂解作用。通过对元古宙侵入岩的系统分析,西昆仑地区不同构造单元地壳演化有一定差异,经历了不同演化过程。

关键词:西昆仑地区;元古宙;岩浆侵入作用;构造-岩浆演化

中图分类号:P588.12

文献标识码:A

文章编号:1009-6248(2014)04-0001-12

Proterozoic Intrusive Magmatism in West Kunlun Area and Its Inspiration to Tectonic-Magmatic Evolution

KANG Lei¹, XIAO Pei-xi¹, GAO Xiao-feng¹, XI Ren-gang¹,
YANG Zai-chao^{1,2}, GUO Lei¹, DONG Zeng-chan¹

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, China; 2. Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to rock types, ages and geochemical data of Proterozoic intrusive rocks, we studied the magmatic stages, petrogenesis and tectonic magmatic evolution of different structural units in West Kunlun area. Proterozoic intermediate-acid intrusive rocks in Tiekeliike unit are characterized by A-type granitoids associated with partial melting of Tarim basement under low pressure and high temperature condition. While Paleoproterozoic and Early Mesoproterozoic

收稿日期:2014-05-14;**修回日期:**2014-09-16

基金项目:中国地质调查局国土资源大调查研究项目(1212011085034,12120113044500)、国家自然科学基金项目(41202044、41002063)和陕西省自然科学基金项目(2012JM5004)联合资助

作者简介:康磊(1984-),男,助理研究员,主要从事花岗岩和大地构造研究。E-mail:kang844@163.com

intrusive rocks are I-type granites derived from partial melting of metabasalt in low temperature, late Mesoproterozoic and Neoproterozoic intermediate-acid rocks are dominated by A-type granitoid intrusions related to partial melting of Kunlun basement under high temperature condition. Meanwhile, Tianshuihai unit only developed Neoproterozoic S-type granites and originated from partial melting of Tianshuihai basement in low temperature and high pressure. According to magmatic evolution, Proterozoic West Kunlun area could be divided into four stages: ① 2426-1567 Ma: A-type granitoids in Tiekeliike fault belt which formed Tarim intracontinental evolution, and calc-alkaline tholeiite I-type granitoids in Kunlun orogenic belt represent continental marginal arc; ② 1 301-1 000 Ma: A-type granitoids in Tiekeliike belt and Kunlun belt indicating intracontinental evolution; ③ 1 000-851 Ma: S-type granitoids in Tianshuihai belt indicating the collision and polymerization of Tianshuihai massif which may be a part of Rodinia supercontinent; ④ 815-644 Ma: bimodal magmatic rocks of alkali basic magmatite and A-type granitoids in Tiekeliike belt and Kunlun belt, indicating the possibility of Tarim and West Kunlun block as components of the Rodinia and their breakup in this period. Consequently, according to the systematic analysis of Proterozoic intrusive rocks, it can be summarized that in West Kunlun area different structural units have undergone uneven crustal evolution processes.

Key words: West Kunlun area; Proterozoic; intrusive magmatism; tectonic-magmatic evolution

西昆仑造山带位于青藏高原西北缘,是古亚洲构造域和特提斯构造域结合部位(任纪舜等,1999;姜春发等,2000),由于自然环境恶劣及交通条件极差,是目前中国造山带中研究程度最低的地区之一(崔建堂等,2006;Ji et al.,2011)。而且,西昆仑地区是印度洋向北扩张挤压应力集聚地带,显生宙以来经历了强烈挤压,地层缺失严重、构造复杂,致使构造单元划分、归属及其构造演化的分歧较大(李荣社等,2008;Zhang et al.,2007;刘敏等,2009),该造山带发育着与构造演化关系密切的大量侵入体,为揭示西昆仑造山带复杂的大地构造演化过程提供重要的地质信息。

西昆仑造山带发育着从古元古代到新近纪不同时代的侵入体,在单个造山带中如此长时期的岩浆演化历史较为少见(Wang et al.,2013)。近十年,随着国土资源大调查计划的开展,特别是1:25万和1:5万区域地质调查项目以及综合研究项目的实施,极大地提高了侵入岩岩石类型、时空分布的调查程度,同时积累了大量同位素测年和岩石地球化学数据,为系统研究西昆仑造山带侵入岩的岩浆演化特征提供了重要条件。特别是以往对西昆仑造山带元古宙岩浆岩的研究较少,随着区域地质调查研究程度的提高,厘定出大量该时期侵入岩,笔者拟依据最新的区域地质调查、基础地质综合研究和公开

发表的文献资料,对古元古代侵入岩的时空分布、岩石类型、同位素年龄和岩石地球化学进行综合分析,探讨西昆仑地区各构造单元岩浆活动期次、岩石成因和形成机制等演化规律,进一步探讨西昆仑造山带元古宙构造-岩浆演化过程。

1 地质背景及元古宙侵入岩体和岩石学特征

西昆仑造山带位于中央造山带的最西段(图1a),由铁克里克断隆带、西昆仑造山带、巴颜喀拉褶断带、甜水海地体和南羌塘地块组成(图1c)(李荣社等,2008)。各构造单元发育着规模不同的岩浆岩。其中,西昆仑造山带最为发育,甜水海地块和南羌塘地块次之,铁克里克隆起带和巴颜喀拉地块发育规模最少(康磊等,2010;西安地质调查中心,2013),这些岩浆岩为揭示西昆仑造山带构造演化历史提供了重要的地质信息。西昆仑地区经历了多个构造旋回的复杂地质演化过程,伴随着频繁的岩浆活动,时间由老到新,具有从北向南迁移的演化特征。根据构造-岩浆演化过程,西昆仑地区岩浆活动可分为元古宙、寒武纪—泥盆纪、石炭纪—三叠纪和侏罗纪—新近纪等4个演化阶段。

西昆仑地区元古宙侵入岩主要分布于西昆仑造

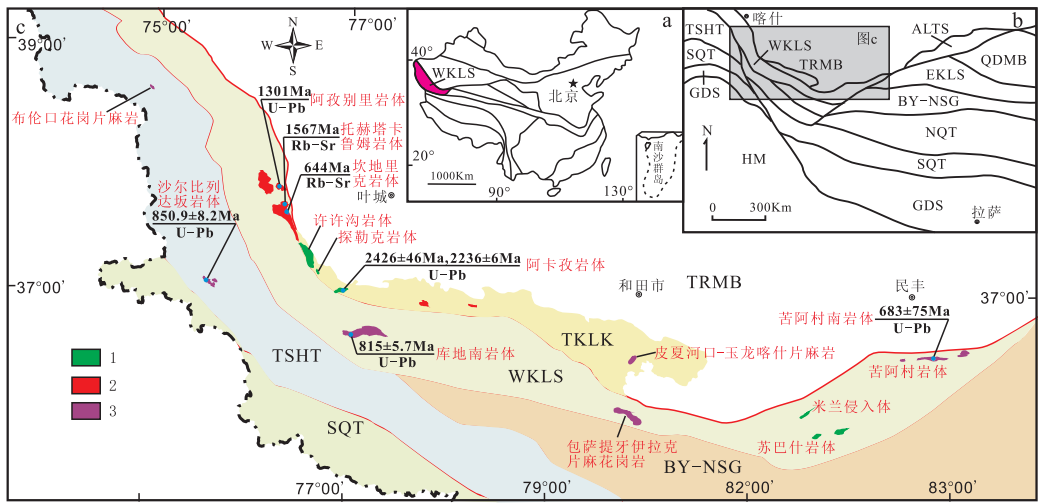


图 1 西昆仑地区元古宙侵入岩分布图(据李荣社等,2008 修编)

Fig. 1 Sketch geological map of Proterozoic intrusive rocks in West Kunlun area (modified after Li et al, 2008)

1. 古元古代侵入岩;2. 中元古代侵入岩;3. 新元古代侵入岩;TRMB. 塔里木板块;WKLS. 西昆仑地块;TSHT. 甜水海地块;TKLK. 铁克里克隆起带;SQT. 南羌塘地块;BY-NSG. 巴颜喀拉褶断带;NQT. 北羌塘地块;QDMB. 柴达木板块;ALTS. 阿尔金造山带;GDS. 冈底斯地块;EKLs. 东昆仑造山带

山带,其次为铁克里克断隆带,甜水海地块最少,而在巴颜喀拉褶断带和南羌塘地块均不发育。其中铁克里克断隆带古元古代侵入体以片麻状黑云二长花岗岩和细粒正长花岗岩为主,发育少量片麻状细粒英云闪长岩、片麻状细中粒石英二长闪长岩,岩体呈椭圆-透镜状;中元古代由少量正长斑岩、钾长花岗岩和花岗斑岩组成,呈岩株或岩脉状产出;新元古代以片麻状花岗岩和辉绿岩为主,以岩脉或小岩株状产出。西昆仑造山带古元古代主要为片麻状黑云母石英二长岩和黑云母花岗闪长岩,局部发育基性包体,岩体呈小透镜状或楔状;中元古代以二长花岗岩、花岗闪长岩为主,发育少量英云闪长岩和石英二长闪长岩。岩体呈规模较大的椭圆和不规则面状分布,或较小的透镜状和楔状;新元古代侵入岩为黑云母二长花岗岩、二云母花岗岩、石英闪长岩和少量辉绿岩,普遍发育片麻状结构,岩体发育规模相对较大,呈长条状或椭圆状。此外,甜水海地块仅发育少量新元古代侵入岩透镜体,主要岩石类型为含石榴子石片麻状花岗岩和含石榴子石黑云斜长片麻岩。

2 岩石地球化学特征

综合目前区域地质调查、综合研究报告和

公开发表文献,西昆仑地区元古宙侵入岩岩石地球化学数据见表 1。

2.1 铁克里克断隆带

根据岩石地球化学,古元古代侵入岩具高 SiO_2 含量(61.4%~79.14%,平均值为 70.6%)和碱度率($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 6.6\% \sim 9.27\%$,平均值为 8.19%),相对富 K($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.89 \sim 2.94$,平均值为 1.89), FeO^T/MgO 值较高(1.72~13.59,平均值为 4.22)。在 $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图解中,岩石位于正长岩-二长花岗岩范围(图 2),均属于钾玄质系列(图 3a),此外岩石 A/CNK 值变化较大(0.76~1.43,平均值为 1.01),为准铝质-过铝质系列(图 3b)。岩石的稀土元素分异程度较高($(\text{La}/\text{Yb})_N = 10.87 \sim 80.94$,平均值为 30.26),具强烈的负 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.16 \sim 0.77$,平均值为 0.52)(图 4a),微量元素富集 Rb、Th、K 和 LREE 等大离子亲石元素和 Zr-Hf 元素,亏损 Nb、Ta、Sr、P、Ti 和 HREE 等高场强元素(图 5a)。

新元古代花岗岩具较高的 SiO_2 含量(74.47%),辉绿岩具低 SiO_2 含量(45.31%~49.19%,平均值为 47.58%),具有明显的双峰式岩浆岩特征。花岗岩碱度率较低($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 5.75\%$),在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解中,岩石投于亚碱性二长花岗岩范围(图 2),

表 1 西昆仑造山带元古宙侵入岩主量元素(%)、稀土元素和微量元素(10^{-6})含量数据表
Tab. 1 Major and trace element compositions of Proterozoic intrusive magmatism in West Kunlun area

构造单元		铁 克 里 克 隆 起 带										新 元 古 代																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
时代	岩体名称	阿 卡 孜 岩 体					古 元 古 代					根 德 河 基 性 岩 脉		皮 夏 河 口、玉 龙 喀什 什																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
岩石类型	正 长 花 岗 岩	二 长 花 岗 岩					花 岗 闪 长 岩	英 云 闪 长 岩	许 许 沟 岩 体					辉 绿 岩	片 麻 状 花 岗 岩																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
SiO ₂	74.8	73.8	72.8	68.7	64.8	68.3	63.7	66.8	69.3	72.5	68.02	69.98	68.45	61.4	69.9	78.7	73.1	74.5	74.2	79.1	46.7	49.2	48.9	48.0	45.3	47.4	74.47																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
TiO ₂	0.23	0.18	0.1	0.27	0.69	0.5	0.69	0.55	0.46	0.42	0.57	0.42	0.49	0.55	0.67	0.11	0.17	0.21	0.11	0.09	2	1.85	1.57	1.75	1.65	1.75	0.38																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Al ₂ O ₃	11.95	12.25	13.03	14.7	14.5	13.1	15.4	13.7	13.2	13.45	14.69	13.45	13.53	16.11	14.52	10.91	15.33	13.7	14.87	10.51	16.62	17.08	16.04	16.33	15.16	18.08	12.06																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Fe ₂ O ₃	1.22	1.4	0.62	1.55	2.83	1.71	1.29	1.55	1.17	1.36	1.52	1.27	1.15	1.73	0.45	0.56	0.43	0.47	0.82	0.5	2.74	2.62	2.61	1.57	2.11	2.46	0.26																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
FeO	1.37	1.05	1.28	1.85	2.47	2.48	2.20	1.87	1.17	1.91	1.63	1.72	1.73	3.77	2.2	0.2	0.9	0.85	0.25	0.3	8.23	8.01	7.85	8.6	7.9	7.8	2.18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
MnO	0.02	0.03	0.06	0.09	0.12	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.11	0.06	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.19	0.16	0.18	0.16	0.18	0.18	0.055																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
MgO	0.24	0.17	0.6	0.7	1.11	1.12	2.12	1.71	0.97	0.51	0.96	0.96	0.84	2.34	0.51	0.24	0.44	0.46	0.29	0.21	6.01	5.06	5.72	6.9	5.14	5.13	1.51																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
CaO	0.8	0.7	1	1.4	2.2	3.45	3.89	3.31	2.96	1.76	2.1	2.3	3.15	3.44	2.74	0.25	0.43	0.5	0.49	0.21	6.65	7.34	6.47	6.85	7.56	6.78	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Na ₂ O	2.32	2.56	2.21	2.92	3.11	3	3.65	2.91	2.95	3.2	2.95	2.27	3.75	3.49	3.08	2.58	3.11	2.79	2.56	2.6	2.55	2.54	2.6	2.55	2.35	2.5	3.6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
K ₂ O	5.93	6.15	6.5	6.1	5.3	5.57	4.98	5.42	5.36	4.35	5.7	5.63	5.52	3.11	4.56	5.22	4.42	4.97	5.94	5.11	1.72	1.7	1.56	1.59	1.43	1.8	2.15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
P ₂ O ₅	0.03	0.05	0.12	0.17										0.23	0.15	0.07	0.1	0.17	0.1	0.07	0.47	0.43	0.4	0.24	0.4	0.23	0.11																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
La	200.1	33.6	119	66.6	170	83.2	194	139	113.2	164.3	112	132.41		14.09	8.31	22.68	42.21	32.34	7.3	17.85	18.11	17.28	6.61	18.58	17.58	46.5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Ce	408.6	65.1	194	130	289	169	342	251	186.4	295.8	202.3	236.3		23.1	15.01	44.43	83.74	59.39	13.95	38.65	38.88	36.93	16.62	39.44	37.69	69.8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Pr	48.64	7.29	25.7	15.5	30.4	21.4	38	27.8	18.74	33	22.54	25.6		3.02	1.76	5.17	9.48	6.67	1.66	5.08	5.04	4.82	1.88	5.14	4.88	7.87																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Nd	166	27.3	98.7	64.6	108	89.8	145	104.8	64.59	124.51	86.75	92.82		9.77	6.66	18.66	35.37	22.68	6.56	21.49	21.31	20.78	8.05	22.11	20.92	33																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Sm	30.98	6.04	16	12	16.1	16.8	21.1	16.2	8.01	18.47	14.29	13.95		1.71	1.39	3.43	6.06	3.72	1.48	5.03	5	4.9	1.81	5.05	4.53	6.25																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Eu	1.52	0.52	2.79	2.88	3.31	2.85	3.01	2.71	2.42	2.98	2.55	3.04		1.84	0.29	0.43	0.57	0.45	0.25	1.77	1.78	1.7	0.6	1.72	1.56	0.8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Gd	27.13	5.65	13.6	10.4	12.2	12.9	15.8	11.8	6.13	13.42	10.46	10.46		1.47	1.18	2.71	4.86	2.87	1.11	5.79	5.82	5.52	1.76	5.76	5.31	5.11																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Tb	3.85	0.91	2.07	1.66	1.67	1.81	2.17	1.71	0.79	1.89	1.46	1.4		0.23	0.15	0.31	0.49	0.27	0.14	0.79	0.84	0.81	0.25	0.85	0.81	0.85																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Dy	20.38	3.44	8.19	7.4	8.97	10.1	11.9	9.27	4.19	10.04	8.16	8.11		1.2	0.73	1.38	2.19	1.11	0.78	5.21	4.71	4.89	1.64	5.01	4.66	5.49																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Ho	3.56	0.69	1.76	1.64	1.79	1.96	2.3	1.94	6.86	2.13	1.64	1.64		0.25	0.14	0.23	0.36	0.18	0.14	0.94	1.04	1	0.3	0.99	0.91	1.07																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Er	7.56	1.43	4.2	4.25	5.07	5.27	6.61	5.09	2.34	5.67	4.35	4.39		0.71	0.32	0.67	0.94	0.41	0.34	2.86	2.67	2.83	0.86	2.63	2.58	3.26																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Tm	0.88	0.2	0.67	0.7	0.62	0.66	0.74	0.64	0.29	0.71	0.53	0.54		0.11	0.04	0.08	0.089	0.05	0.049	0.4	0.4	0.37	0.12	0.4	0.4	0.48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Yb	4.43	0.96	3.42	4.14	3.59	3.56	4.36	3.33	1.69	4.01	3.07	3.21		0.72	0.24	0.39	0.58	0.27	0.3	2.57	2.44	2.35	0.75	2.47	2.4	3.22																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Lu	0.58	0.11	0.45	0.57	0.52	0.48	0.68	0.5	0.28	0.6	0.43	0.45		0.12	0.046	0.05	0.087	0.04	0.04	0.37	0.38	0.33	0.11	0.34	0.34	0.41																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Y	67.92	12.9	35.8	38.6	44.6	48.2	58.4	45.8	21.66	49.92	39.87	40.92		5.96	2.98	6.27	9.37	4.48	3.09	25.37	25.9	24.42	6.98	24.85	23.89																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Rb	177	251	197	213	166	156	190	150	131.4	154.41	174.4	156.62		111	242.4	195.1	206.7	227.7	199.8	239.7	292.8	260.7	176.8	181.9	211.9	94	40.9	68.7	58.7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Sr	91	65.6	253	295	307	246	280	254	263	262.02	231	308.52		313	95.12	123.8	127.6	120.8	73.47	82.52	73.94	67.43	21.14	63.26	103.3	412	219	220	123																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Ba	595	501	1431	1357	2557	2466	2330	2370	1963	2328	2303	2404		3364	422.9	496.4	613	561.6	330.1	1105	1418	1355	996.4	1271	961.9	428	158	842	302																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
U																2.41	1.9	1.55	1.54	2.24	0.7	0.75	0.73	0.7	0.67	0.71	0.46	0.23	0.28	0.36																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ga	20	22	21.8	22.8		20.5	25.3	25.7	20.6	20.3	24.68	19.99	22.21	15	11.28	12.97	13.97	10.79	9.63																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Nb	11	13.8	19.6	29.5		0.86	1.07	1.1	0.91	0.98	1.06	0.96	1.06	17	1.72	5.7	6.06	3.73	1.79	1.08	1.01	0.99	0.5	1.05	1	20.2	11.6	9.82	7.88																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Ta	0.5			8.7												0.06	0.23	0.2	0.12	0.05	17.11	16.09	15.71	11.05	16.34	15.93																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Cr	25													17						107.5	100.9	90.1	78.8	98.1	110	32.7	24.9	21.8	27.1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Zr	308	82.6	23.3	20.2	462	662	557	450	405.2	566.7	369.9	459.1		298	73.25	117.1	129.4	118.6	70.8	147.7	142.4	136.6	146.9	142.6	136.9	550	356	515	483																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Hf	8.8	0.84			11.4	16.4	14.4	11.1	10.34	13.86	9.48	11.71		8	4.91	4.32	4.2	4.34	3.56	3.87	3.8	3.54	3.61	3.72	3.38	6.57	4.73	6.9	6.85																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Th	44	78	20.6	4.82	28.9	3.77	31.9	24.2	18.21	21.62	15	18.07		1.5	17.69	15.48	29.77	24.79	12.49	2.03	1.96	1.9	0.72	1.87	1.81	8.57	6.97	7.82	7.26																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
T _{Zr}	847.0	731.5	637.5	617.0	832.5	870.9	859.3	845.0	870.4	892.5	848.9	831.4		829.3	730.0	787.4	787.3	781.3	725.9							904.9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
文献	叶城 1:25 万	《昆仑—阿尔金岩体活动及成矿作用》报告												《西昆仑成矿带成矿规律及找矿方向综合研究》报告												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·2004												张传林等·200											

续表 1

西 昆 仑 造 山 带																								
构造单元	古 元 古 代				中 元 古 代				新 元 古 代															
塔达塔克	米兰变质侵入体				苏巴什岩体				阿孜别里迪岩体				托赫塔卡鲁姆岩体				库地南岩体							
二长花岗岩	黑云角闪斜长片麻岩				黑云母花岗岩闪长岩				二长花岗岩				石英闪长岩				黑云母二长花岗岩							
SiO ₂	75.5	67.76	59.45	66.53	65.01	68.54	73.76	73.78	61.24	58.72	58.77	52.46	56.47	60	57.87	66.97	70.86	76.67	75.84	75.71	74.4			
TiO ₂	0.5	0.31	0.534	0.596	0.573	0.568	0.31	0.33	0.6	0.44	0.65	0.77	0.69	0.59	0.71	0.45	0.25	0.27	0.27	0.22	0.25			
Al ₂ O ₃	12.0	15.77	19.82	13.44	13.78	14.25	12.41	12.01	16.14	15.49	17.01	18.85	17.25	16.2	16.87	15.17	14.03	12.83	12.66	12.37	14			
Fe ₂ O ₃	2.63	0.66	1.57	1.77	1.36	2.81	0.55	0.38	1.31	2.44	1.81	1.58	1.81	1.51	1.26	4.39	3.4	1.07	0.76	0.76	0.7			
FeO	2.98	1.46	2.77	4.01	4.66	1.22	2.17	2.15	4.58	3.95	4.89	6.28	5.12	4.77	5.72	3.75	2.81	0.5	0.9	0.85	0.7			
MnO	0.03	0.077	0.151	0.078	0.122	0.038	0.04	0.04	0.11	0.18	0.1	0.09	0.09	0.09	0.08	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01			
MgO	1.43	0.22	1.2	3.57	2.83	0.545	0.27	0.7	2.12	2.26	2.89	3.02	2.99	2.71	2.96	3.85	2.2	0.18	0.11	0.15	0.12			
CaO	3.88	3.2	5.23	3.26	3.9	2.23	1.2	0.86	5.21	5.8	5.22	7.19	6.24	4.07	5.89	0.76	1.1	0.4	0.42	0.46	0.37			
Na ₂ O	3.83	3.5	2.91	2.76	2.04	2.94	2	2.82	2.42	2.51	2.38	2.6	3.69	2.51	2.64	1.48	2.32	3.81	3.75	3.98	3.9			
K ₂ O	2.1	0.9	4.97	1.28	2.27	4.36	5.6	5.35	3.61	3.19	2.97	3.13	2.15	3.84	2.56	5.28	3.97	3.92	4.02	3.93	4.14			
P ₂ O ₅	0.071		0.24	0.179	0.236	0.239		0.04	0.15		0.26	0.19	0.14	0.14		0.05	0.04	0.1	0.1	0.13	0.01			
La	35.22	75.6	88.91	34.7	20		88.91		55.91	72.9	44.5	91.2	38.1			36.88	42	42.41	43.7	50.5	70.57	86.93	69.53	88.48
Ce	72.48	143	174.8	67.8	35		174.8		102.1	132.7	85.1	175.1	70.65			78.1	90	105	93.4	111.7	122.5	146.4	120	158.9
Pr	8.7	15.4	20.79	7.04	6.82		20.79		11.28	13.9	9.7	18.4	8.15			10.42	11.1	12.1	11.5	13.7	13.2	15.39	12.87	15.25
Nd	34.77	60	72.71	45.7	25.8		72.71		40.51	46.9	33.6	59	27.9			39.9	42.3	46.6	44.3	52.8	42.07	45.77	41.41	45.78
Sm	6.88	9.97	12.64	5.24	2.81		12.64		6.6	8.1	6.8	9.8	5.9			7.85	8.49	8.95	8.85	10.9	8.15	7.77	7.86	7.42
Eu	2.43	3.45	1.13	1.15	1.17		1.13		1.31	1.88	1.44	1.41	1.35			1.14	1.3	1.29	1.34	1.34	0.43	0.36	0.38	0.39
Gd	7.25	9.64	11.54	4.9	2.93		11.54		4.92	6.05	5.84	6.66	5.17			6.92	7.21	7.62	7.4	9.08	8.58	7.71	8.5	7.33
Tb	1.1	1.31	1.98	0.74	0.47		1.98		0.73	0.8	0.79	0.95	0.74			1.18	1.22	1.27	1.17	1.41	1.47	1.13	1.33	1.07
Dy	8.91	5.97	11.49	4.26	3.2		11.49		4.06	4.45	4.58	4.85	4.32			6.86	6.76	6.97	6.38	7.44	9.27	7.26	8.97	7.14
Ho	2.45	1.1	2.4	0.8	0.68		2.4		0.85	0.9	0.91	0.98	0.9			1.46	1.4	1.43	1.29	1.41	2.17	1.56	1.88	1.5
Er	6.1	3.29	6.75	2.55	2.21		6.75		2.24	2.43	2.61	2.72	2.45			4	3.69	3.87	3.36	3.59	6.78	5.23	6.18	4.8
Tm	1.18	0.44	1.09	0.36	0.34		1.09		0.35	0.32	0.39	0.4	0.33			0.63	0.6	0.6	0.54	0.56	1.1	0.86	0.99	0.78
Yb	8.48	2.98	7.18	2.47	2.52		7.18		2.22	2.06	2.44	2.53	2.12			4.3	4	4.13	3.67	3.78	6.93	5.63	6.36	5.24
Lu	1.27	0.44	1.06	0.36	0.39		1.06		0.33	0.31	0.37	0.38	0.32			0.69	0.64	0.66	0.6	0.61	0.96	0.81	0.89	0.68
Y			61.94				20.75									45.5	42.9	43.6	39.2	45	68.7	59.34	63.77	52.91
Rb	98.42	25.41	205.2	117.9	79.28	139.2	122.3	226.5	143							318.5	211.9	180.3	170.5	230	316.4	353.1	327.7	345.9
Sr	180.2	499	2170	209.7	174.1	174.1	142.4	49	354							40.5	83	89.6	94.4	104.5	27.91	24.83	28.54	24.69
Ba	498.6	318.8	2349	802.9	813.5	435.5	212.4	1847	1192							582	583	467.4	600	729	153.2	157.9	157.2	149.1
Ga	14.11	21.6	25.19	8.68	25.82	10.24	29.25	15.71	21.5	20						23.3	19.6	16.7	18.1	21.6	24.71	24.32	24.34	24.01
Nb	24.38	31.88	36.46	14.4	37.94	21.89	44.13	23.1	28.1	17						48.4	34.1	14.5	17.4	21.5	179.6	174.2	174.8	171.2
Ta	1.466	0.699	1.393	1.06	0.247	0.296	0.528	0.161	0.9	0.9						3.63	2.42	2.01	2.33	6.82	9.33	11.48	10.42	11.76
Cr	152.8	39.78	32.68	31.3	39.93	545.8	40.49	43.86	21	21						35	35	21	34	33				
Zr	65.43	101.2	83.77	33.9	128.8	101.9	151.4	50.7	167	167						228	238	226	272	333	281.1	281.9	292.8	251.4
Hf	0.583	1.591	0.754	0.44	1.237	1.317	1.401	0.538	8.6	4.9						6.89	7.13	7.04	8.08	10.16	10.36	10.54	11.01	9.37
Th	16.7	8.522	75.16	26.9	7.765	7.436	20.23	1.448	9.054	12.62	7.542	3.284	19.37	33.9	15	16.84	15.14	17.93	15.87	17.85	51.23	52.71	50.36	52.39
T _{Zr}	708.8		653.8		641.2	625.7	671.6	857.1	756.0							850.2	847.5							
塔什库尔干幅1:25万	于田幅1:25万资料				伯力克幅1:25万				克克吐鲁克-塔什库尔干幅1:25万				神仙湾幅和麻扎幅1:25万				西昆仑成矿带成矿规律及找矿方向综合研究(综合研究项目)							
文獻																								

续表 1

构造单元		西 昆 仑 造 山 带			新 元 古 代			甜 水 海 地 块		
时 代		新 元 古 代			新 元 古 代			新 元 古 代		
岩体名称	岩石类型	库地基性岩脉			包萨提牙伊拉克片麻岩			布依口含石榴石片麻状花岗岩		
		辉 长 岩			片麻状黑云二长花岗岩			含石榴石片麻状花岗岩		
岩石类型	正长花岗岩	辉 长 岩			片麻状黑云二长花岗岩			含石榴石片麻状花岗岩		
		辉 长 岩			片麻状黑云二长花岗岩			含石榴石片麻状花岗岩		
SiO ₂	70.41	47.72	48.56	47.54	47.88	47.92	73.6	60.92	61.41	71.72
TiO ₂	0.3	1.71	1.72	2.01	1.88	1.75	0.17	1.04	0.57	0.26
Al ₂ O ₃	14.38	14.78	15.15	15.42	14.35	16.12	13.54	16.57	18.34	13.53
Fe ₂ O ₃	1.5	1.16	1.02	0.86	1.65	1.2	0.45	1.37	2.13	0.72
FeO	2.08	7.57	6.47	7.98	7.75	4.34	0.98	4.06	1.91	1.87
MnO	0.05	0.18	0.18	0.19	0.19	0.18	0.052	0.11	0.095	0.04
MgO	1.68	8.16	6.93	7.9	7.09	8.62	0.14	2.88	1.15	0.57
CaO	1.58	14.23	13.5	12.61	12.56	14.23	1.8	5.2	4.2	1.45
Na ₂ O	2.12	2.15	2.18	2.24	1.99	2.42	2.94	3.95	3.82	3.08
K ₂ O	5.5	1.15	1.91	1.46	1.5	1.06	5.35	1.92	4.99	5.21
P ₂ O ₅		0.18	0.03	0.03	0.03	0.04	0.048	0.17	0.14	0.07
La	65.11	21.35	23.17	23.51	19.44	22.09	41.2	34.5	54.9	23.75
Ce	117.4	47.17	50.59	51.53	45.11	47.76	76.9	53.4	86	44.11
Pr	13.41	5.9	6.11	6.6	5.81	6.34	9.39	6.34	9.96	5.86
Nd	46.37	27.34	28.12	29.24	25.78	27.8	36.4	26.4	45.6	20.14
Sm	8.39	6.03	5.87	6.23	5.85	5.93	6.77	4.94	8.42	3.93
Eu	1.33	2.1	2.37	2.32	2.26	2.19	0.49	1.17	1.23	1.13
Gd	6.33	6.2	6.08	6.52	6.09	6.59	6.97	4.15	6.85	3.05
Tb	1.03	0.94	0.97	1.15	1.08	1.01	1.31	0.68	1.11	0.43
Dy	5.63	5.65	6.31	6.66	6.17	6.05	9.31	4.25	7.31	2.17
Ho	1.17	1.24	1.26	1.45	1.33	1.35	1.94	0.71	1.4	0.41
Er	3.27	3.6	3.93	3.74	4.03	3.98	5.78	2.32	4.02	1.12
Tm	0.54	0.44	0.56	0.55	0.53	0.49	0.8	0.32	0.62	0.17
Yb	3.46	2.96	3.43	3.3	3.16	3.12	4.97	1.86	3.8	1.04
Lu	0.52	0.5	0.54	0.49	0.52	0.48	0.61	0.25	0.52	0.15
Y	30.17	30.34	35.04	35.91	33.9	33.36				10.79
Rb	270	122.8	211.8	194.2	250.9	102.4	114.8	115.9	113	34
Sr	137	378.4	440.7	415.1	373.4	366.2	354	199	116	898
Ba	844	215.3	371.9	445.8	266	318.7	793	870	1031	792
U							1.73	1.11	1.46	
Ga	19									
Nb	40	14.04	15.68	16.22	14.67	14.65	15.5	11.7	17	11
Ta	3.6	1.04	1.18	1.19	1.01	1.04				0.5
Cr	13	309.6	227.2	267.2	234.5	230.6	18.7	20.5	14.3	32.5
Zr	208	181.5	218	198.5	181	176.3	5.18	4.54	4	124
Hf	6.6	4.54	5.24	4.96	4.5	4.36	10.2	9.02	10.8	2.9
Th	40	1.82	1.89	1.96	1.45	1.67	7.87			11.1
T _{Zr}	809.0									
文献	塔什库尔干幅 1:25 万	叶海敏等, 2003			哈哈幅 1:25 万			叶亦克幅 1:25 万		
		英吉沙县幅 1:25 万			边小卫等, 2013					

注: T_{Zr} 为据 Watson and Harrison 方法计算的锆石饱和温度。

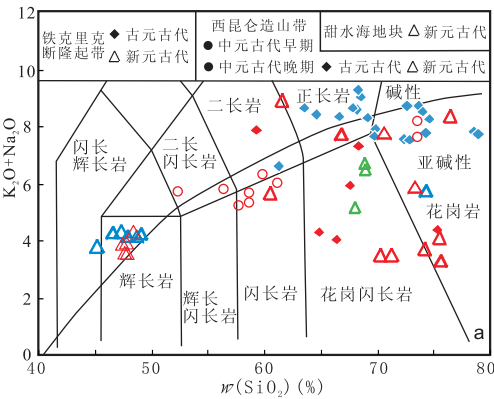


图 2 西昆仑地区古元古代侵入岩 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解

Fig. 2 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagram for Proterozoic intrusive rocks in West Kunlun area

为钙碱性系列, $A/\text{CNK}=10.1$, 属于弱过铝质系列 (图 3b)。

辉绿岩具高 TiO_2 含量 (1.65%~2.0%, 平均值为 1.76%), 较高的 FeO^T (9.8~10.7), 高 ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) 含量 (3.78%~4.30%) 指示其属于碱性系列 (图 2), 在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解中, 岩石位于钾玄质范围 (图 3a)。

岩石的稀土元素分馏程度一般 ($(\text{La}/\text{Yb})_N=9.76$) (图 4b), 负 Eu 异常明显 ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.42$), 微量元素富集 Rb、Th、K、LREE 等大离子亲石元素和 Zr-Hf 元素, 亏损 Nb、Sr、P、Ti 和 HREE 等高场强元素 (图 5b)。

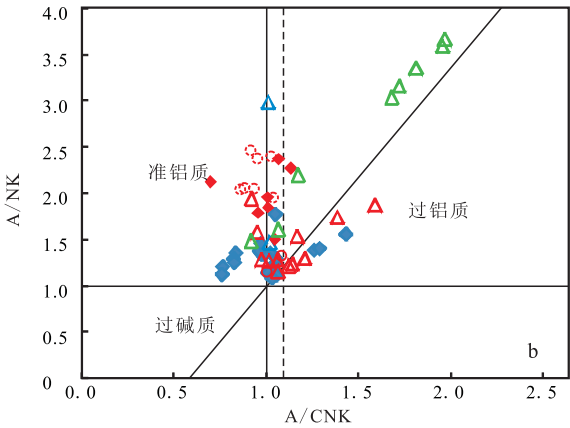
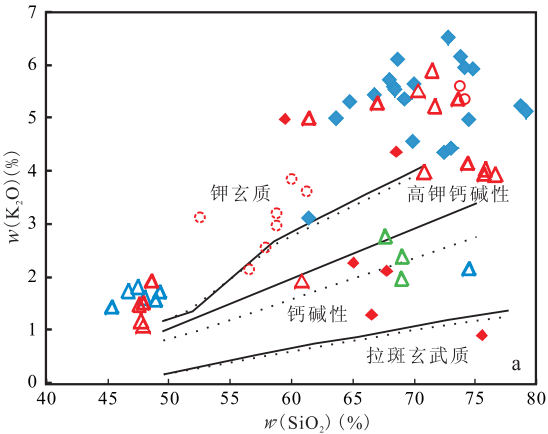


图 3 西昆仑地区侵入岩 $\text{K}_2\text{O-SiO}_2$ (a) 和 $A/\text{NCK-A}/\text{NK}$ (b) 图解

Fig. 3 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagram and $A/\text{NCK-A}/\text{NK}$ diagram of Proterozoic intrusive rocks in West Kunlun area (图例同图 2)

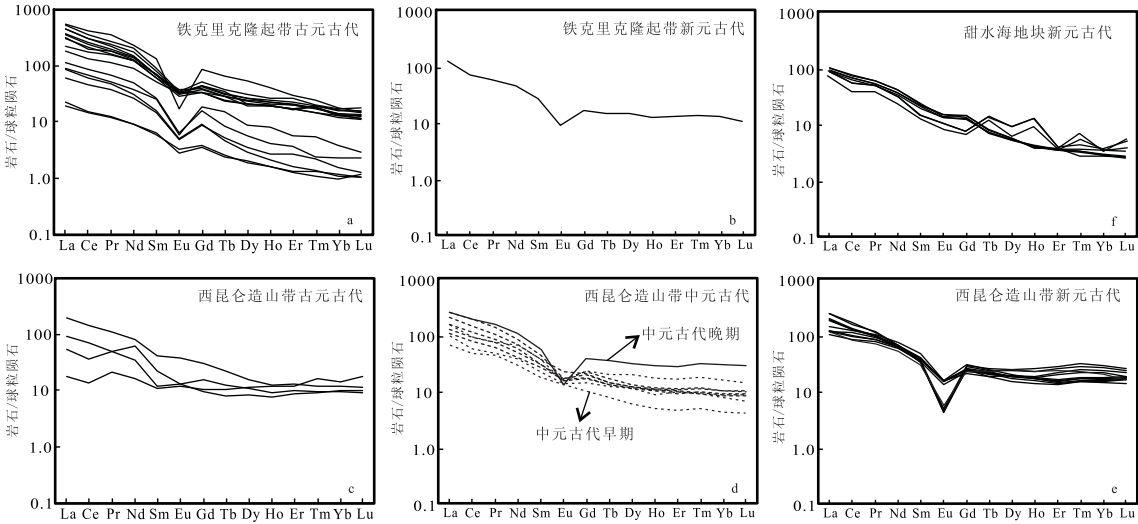


图 4 西昆仑地区中酸性侵入岩稀土元素球粒陨石标准化模式图

Fig. 4 Chondrite-normalized REE-pattern for Proterozoic granitic rocks in West Kunlun area

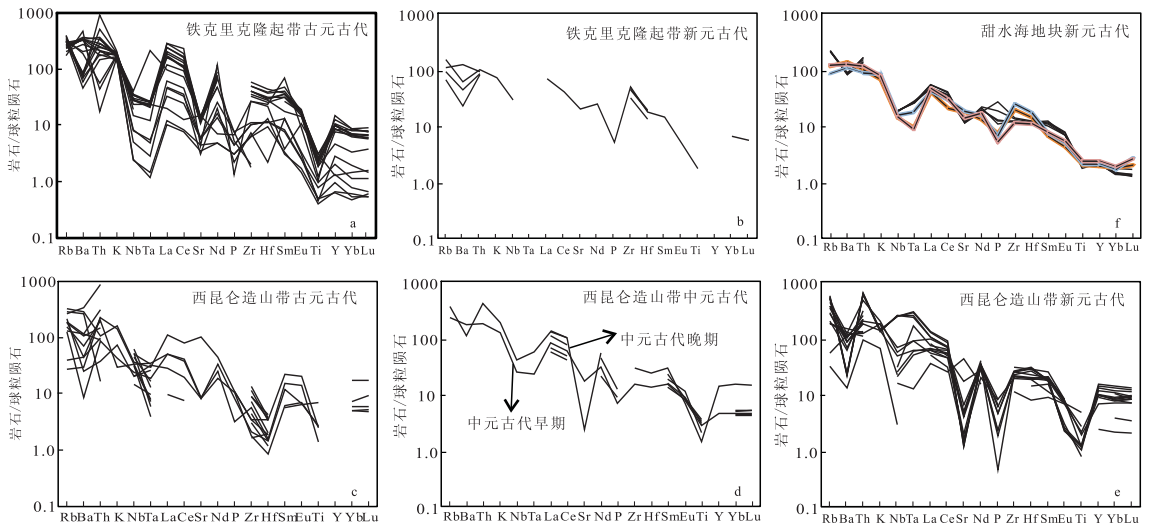


图5 西昆仑地区中酸性侵入岩的微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 5 Primitive-mantle normalized spider diagram of Proterozoic granitic rocks in West Kunlun area

2.2 西昆仑造山带

岩石地球化学显示,该地块古元古代侵入岩具较低的 SiO_2 含量(59.45%~75.52%,平均值为67.1%)和碱度率($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4.04\% \sim 7.88\%$,平均值为5.64%),总体相对富钠($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.26 \sim 1.48$,平均值为0.77);在 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)图解中,岩石基本位于亚碱性花岗岩范围(图2), SiO_2 - K_2O 图解显示总体为钙碱性-拉斑玄武质系列(图3a), A/CNK 为0.95~1.13,平均值为1.04),为准铝质-过铝质系列(图3b)。岩石的稀土元素分馏程度较低[(La/Yb) $_N = 1.28 \sim 17.14$,平均值为7.22](图4b),Eu异常不明显($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.68 \sim 1.24$,平均值为1.03),微量元素富集Rb、Ba、Th、K和LREE等大离子亲石元素,亏损Nb、Ta、Sr、P、Ti和HREE等高场强元素和Zr-Hf元素(图5b)。

中元古代侵入岩分为早期闪长岩(1567 Ma)和晚期二长花岗岩(1301 Ma)2种。前者 SiO_2 (52.46%~61.24%,平均值为57.9%)含量和碱度率($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 5.2\% \sim 6.35\%$,平均值为5.74%)较低,钾钠含量相当($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.58 \sim 1.49$,平均值为1.19), SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)图解指示岩石总体属于亚碱性闪长岩,稀土元素分馏强烈((La/Yb) $_N = 12.14 \sim 24.36$,平均值为17.95),弱的Eu异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.50 \sim 0.79$),微量元素富集Rb、Ba、Th、K和LREE等大离子亲石元素,亏损Nb、Ta和HREE等高场强元素。后者具较高的

SiO_2 含量(73.76%~73.78%)、碱度率为 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.6\% \sim 8.17\%$,相对富钾($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.9 \sim 2.8$)。 SiO_2 - K_2O 图解指示岩石属于钾玄质系列,稀土元素分馏程度一般[(La/Yb) $_N = 8.37$],强烈的Eu异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.28$),微量元素富集Rb、Th、K和LREE等大离子亲石元素,亏损Nb、Ta、Sr、P和Ti等高场强元素。

新元古代花岗岩 SiO_2 含量为60.92%~76.67%(平均值为70.83%);辉长岩 SiO_2 含量为47.54%~48.56%,具有明显的双峰式侵入岩特征。前者在 SiO_2 - K_2O 图解中,位于高钾钙碱性和钾玄质范围(图3a),碱度率较高($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 5.87\% \sim 8.81\%$,平均值为7.64%),相对富钾($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.49 \sim 3.57$,平均值为1.64), FeO^T/MgO 值较高(2.00~14.40,平均值为6.21),此外岩石 A/CNK 值变化较大(0.92~1.21,平均值为1.13),总体属于弱过铝质-过铝质系列(图3b),岩石的稀土元素分馏程度一般[(La/Yb) $_N = 5.80 \sim 12.72$,平均值为8.57],强烈的Eu异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.14 \sim 0.54$,平均值为0.35),微量元素富集Rb、Th、K和LREE等大离子亲石元素,强烈亏损Sr、P和Ti等元素。辉长岩具高 TiO_2 含量(1.71%~2.01%), SiO_2 - K_2O 图中位于钾玄质范围(图3a),并且($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量(3.30%~4.09%)较高,指示其属于碱性辉长岩(图2)。

2.3 甜水海地块

新元古代侵入岩主要为花岗岩,具中等 SiO_2 含

量(67.54%~70.07%),低 FeO^T (2.42%~3.15%, 平均值为 2.71%) 和 MgO 含量(0.77%~0.83%), 高 A/CNK (1.72~1.96) 和 Al_2O_3 含量(14.52%~18.66%, 平均值为 16.29%), 总体属于过铝质花岗岩(图 3b)。岩石的稀土元素分馏强烈[(La/Yb) $_N$ = 20.66~36.29, 平均值为 28.36], 负 Eu 异常较弱($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.72 \sim 0.93$, 平均值为 0.84), 微量元素富集 Rb 、 Th 和 LREE 等大离子亲石元素, 亏损 Nb 、 Ta 和 HREE 等高场强元素。

3 西昆仑地区元古宙侵入岩岩石成因和岩浆演化过程

3.1 铁克里克断隆带

通过以上岩石学和地球化学特征的分析, 铁克里克断隆带从古元古代到新元古代中酸性侵入岩具有明显的相似性: ①岩石均具有高 Si 特征。②稀土元素具强烈的 Eu 负异常, 指示存在着强烈的斜长石结晶分异作用。③微量元素配分曲线特征相似, 均富集 Rb 、 Th 、 K 和 LREE 等大离子亲石元素, 亏损 Nb 、 Ta 、 Sr 、 P 、 Ti 和 HREE 等高场强元素。④源区物质判别图指示岩石源区均以变质杂砂岩和变质泥岩为主(图 4)。⑤岩石的 FeO^T 均较高, 结合 A 型花岗岩判别图(图 5a), 铁克里克断隆带元古宙中酸性侵入岩均属于 A 型花岗岩。⑥岩石的锆石饱和温度整体大于 800°C , 属于热花岗岩(图 5b), 岩体明显富集生热元素 Th 、 K 和不相容元素 Zr 、 Hf , 也支持了其岩浆温度较高的特征。很明显, 铁克里克断隆带元古宙中酸性侵入岩的岩石成因和形成条件基本一致, 应形成于同一构造演化阶段, 是塔里木板块古老基地(中上地壳)在高温条件下发生部分熔融, 并发生强烈结晶分异而形成的 A 型花岗岩。

3.2 西昆仑造山带

根据岩石类型和岩石地球化学特征, 将西昆仑造山带元古宙侵入岩划分为 2 个演化阶段: 古元古代—中元古代早期和中元古代晚期—新元古代。

古元古代和中元古代早期侵入岩具有以下共同特征: ①均以石英二长岩、花岗闪长岩、英云闪长岩和闪长岩为主, 岩石 SiO_2 含量较低。②岩石碱度率均较低, K 、 Ma 含量相当或较为富 Na , 以钙碱性为主, 少量为拉斑质系列, 均为非 A 型花岗岩(图 5a)。③稀土元素负 Eu 异常均不明显, 微量元素均亏损

Nb 、 Ta 、 Sr 、 P 、 Ti 和 H REE 等高场强元素和 Zr 、 Hf 元素。④岩石源区均以玄武岩为主(图 4)。⑤2 期岩石的锆石饱和温度分别为 $625.7 \sim 708.8^\circ\text{C}$ 和 756.0°C , 都小于 800°C , 均为低温花岗岩(图 5b)。由此可见, 西昆仑造山带古元古代和中元古代早期侵入岩具有相似的地球化学特征和岩石成因, 应为同一构造演化阶段的产物, 是变质玄武岩在低温条件下部分熔融条件下形成的钙碱性 I 型花岗岩。

古元古代晚期(1301 Ma)和新元古代中酸性侵入岩又具有相似的岩石类型、岩石地球化学特征和岩石成因: ①岩石以 SiO_2 含量较高的二长花岗岩和二云母花岗岩为主。②岩石的碱度率较高, 并均相对富 K , 属于钾玄质-高钾钙碱性系列, 并结合 A 型花岗岩判别图(图 5a), 该 2 期中酸性侵入岩均属于 A 型花岗岩(图 5a)。③2 期岩石的稀土元素配分曲线特征和微量元素蛛网图较为一致(图 3d、图 3e、图 4d、图 4e)。④岩石的源区物质非常相似, 均以变质泥岩为主, 少量变质杂砂岩(图 4)。⑤2 期花岗岩的锆石饱和温度均较高, 分别为 857.1°C 和 $809.0 \sim 852.7^\circ\text{C}$, 并且岩石富集生热元素 Th 、 K 和不相容元素 Zr 、 Hf , 说明岩石均属于热花岗岩(图 5b)。以上特征充分说明西昆仑造山带中元古代晚期和新元古代中酸性侵入岩形成于同一岩浆演化阶段, 是高温条件下老基底部分熔融而形成的 A 型花岗岩。

3.3 甜水海地块

甜水海地块元古宙侵入岩发育较少, 仅存在新元古代(1000~851 Ma)一期岩浆活动事件。该期花岗岩具高 A/CNK , 并且岩石中普遍发育石榴子石等富铝矿物, 结合在 AFM-CFM 和 Rb/Sr-Rb/Ba 源岩成因判定图解(图 5a), 均落入变杂砂岩部分熔融区域。因此, 该时段中酸性侵入岩应属 S 型花岗岩。同时, 该期岩体具较低 Y ($8.65 \times 10^{-6} \sim 10.6 \times 10^{-6}$)、 HREE 含量 ($17.2 \times 10^{-6} \sim 21.4 \times 10^{-6}$) 和高的 Sr/Y 值 ($25.4 \sim 40.6$) 的地球化学特征, 并且岩石的 Al_2O_3 含量往往在一定程度上与成岩过程中施加在岩浆中的压力值成正相关(Barker et al., 1976), 该期岩石 Al_2O_3 含量较高, 指示该时期中酸性侵入岩形成压力较高。此外, 锆石饱和温度指示岩浆原始温度较高, 最低温度为 $806.2 \sim 842.4^\circ\text{C}$ 。因此, 甜水海地块新元古代侵入岩应是在高温高压环境下甜水海地块古老变质基底部分熔融形成的 S 型花岗岩。

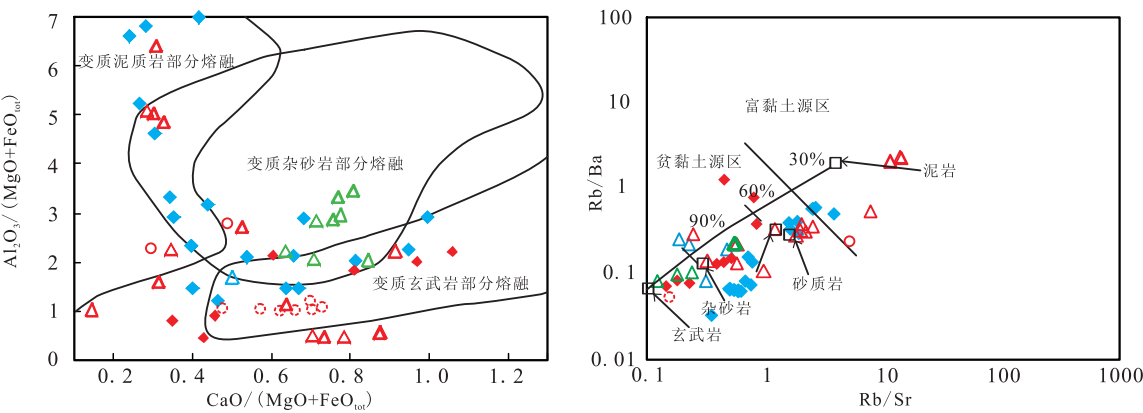


图 6 西昆仑地区中酸性侵入岩的 AFM-CFM 和 Rb/Sr-Rb/Ba 源岩成因判别图解

Fig. 6 AFM-CFM and Rb/Sr-Rb/Ba diagrams for Proterozoic granitic rocks in West Kunlun area

(图例同图 2)

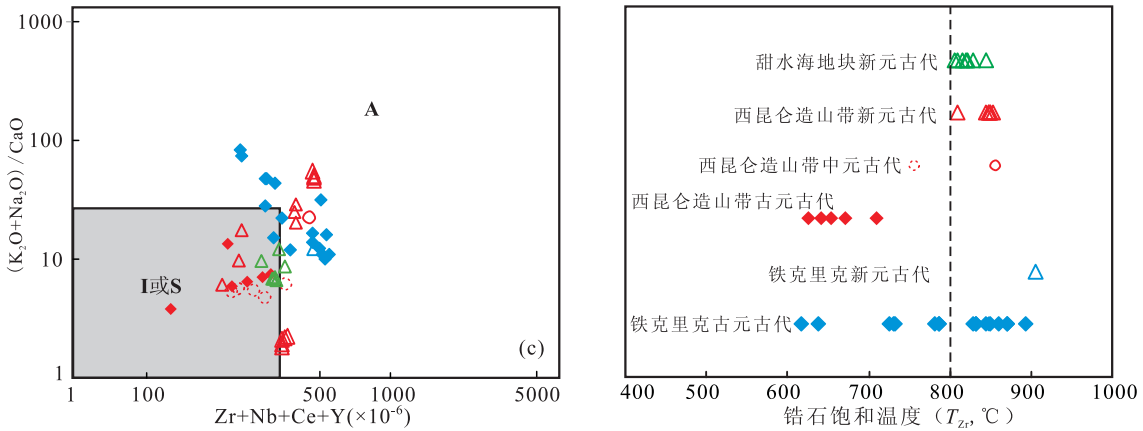


图 7 西昆仑地区中酸性侵入岩 $(Zr+Nb+Ce+Y)-(K_2O+Na_2O)/CaO$ 成因类型判别图和锆石饱和温度演化图解

Fig. 7 $(Zr+Nb+Ce+Y)-(K_2O+Na_2O)/CaO$ and zircon saturation temperatures diagrams for Proterozoic granitic rocks in West Kunlun area

(图例同图 2)

4 侵入岩对西昆仑地区元古宙大地构造演化的启示作用

根据西昆仑地区元古宙侵入岩形成年龄、岩石类型、岩石成因和构造岩浆演化过程,将西昆仑地区元古宙大地构造演化划分为 2 426~1 567 Ma、1 301~1 000 Ma、1 000~851 Ma 和 815~644 Ma 4 个阶段。

第一阶段 2 426~1 567 Ma。该时段侵入岩发育于铁克里克断隆带和西昆仑造山带,但岩石类型、地球化学和岩石成因明显不同,指示其构造环境可

能存在差异。塔里木地块南缘铁克里克断隆带从以阿卡孜岩体(2 426 Ma)为代表的有高碱度富钾型花岗质岩浆活动开始,进入碰撞后拉张构造环境(张传林等,2003),之后该地区侵入岩为以塔里木板块古老基地为源区在高温低压条件下发生部分熔融的 A 型花岗岩,指示该时段塔里木南缘已进入陆内演化阶段。与此同时,西昆仑造山带侵入岩以钙碱性-拉斑质 I 型花岗岩为主,岩浆活动以富水低温条件下基性物质部分熔融为主,具有明显的陆缘岩浆弧特征。因此,推测西昆仑造山带在该阶段是周围存在洋壳俯冲消减的微陆块存在于古大洋。

第二阶段 1 301~1 000 Ma。该时期侵入岩主

要出露于铁克里克断隆带和西昆仑造山带,前者以正长斑岩和钾长花岗斑为主,后者主要为二长花岗岩和花岗闪长岩,岩体均呈规模较大的椭圆和不规则面状分布,岩石地球化学和岩石成因相似,以钾玄质-高钾钙碱性 A 型花岗岩为主,岩浆活动具高温低压环境下古老基底部分熔融的特征,明显具有陆内演化特征。因此,该时期铁克里克断隆带的构造环境继承了第一阶段陆内演化的特点,但西昆仑造山带已从前期的陆缘岩浆弧环境转变为陆内演化环境,说明 1 567~1 301 Ma 西昆仑造山带与塔里木地块可能发生了最初的碰撞拼合作用。

第三阶段 1 000~851 Ma。目前,已知该时段侵入岩仅发育于甜水海地块,呈透镜体或岩脉产出,岩石中发育石榴子石等富铝矿物, A/CNK 总体上大于 1.1,具高 Sr/Y 值、(La/Yb)_N 和负 Eu 异常不明显,是高温高压环境下古老变质基底部分熔融而形成的 S 型花岗岩,指示其可能与陆-陆碰撞导致地壳加厚事件有关,是甜水海地块作为 Rodinia 超大陆的一员发生聚合拼接的产物。

第四阶段 815~644 Ma。该阶段侵入岩发育于铁克里克断隆带和西昆仑造山带,岩体发育规模相对较大,中酸性侵入岩体主要呈椭圆状、长条状或不规则面状,基性侵入岩主要呈脉状,具有明显的双峰式侵入岩组合特征。中酸性侵入岩主要为钾玄质-高钾钙碱性 A 型花岗岩,是高温低压条件下地壳物质部分熔融而形成。基性侵入岩均为碱性基性岩浆岩,是大陆裂解岩浆事件的产物(叶海敏等,2003;张传林等,2004)。结合以上 A 型花岗岩和碱性基性岩的双峰式侵入岩组合,说明塔里木地块和昆仑地块均作为 Rodinia 超大陆组成部分,在该阶段发生了裂解作用。

参考文献(References):

- 任纪舜. 从全球看中国大地构造(中国及邻区大地构造图)[M]. 北京:地质出版社,1999.
- Ren Jishun. Geotectonic map of china and Adjacent Regions [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1999.
- 姜春发,王宗起,李锦铁. 中央造山带开合构造[M]. 北京:地质出版社,2000.
- Jiang Chunfa, Wang Zongqi, Li Jintie. Opening-closing Tectonics of Central Orogen [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2000.
- 崔建堂,王炬川,边小卫,等. 西昆仑康西瓦北侧早古生代角闪闪长岩、英云闪长岩的地质特征及其锆石 SHRIMP U-Pb 测年[J]. 地质通报,2006,25:(1441-1449).
- Cui Jiantang, Wang Juchuan, Bian Xiaowei, et al. Geological characteristics of Early Paleozoic amphibolite and tonalite in northern Kangxiwar, West Kunlun, China and their zircon SHRIMP U-Pb dating [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(12): 1441-1449.
- 李荣社,计文化,杨永成,等. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京:地质出版社,2008.
- Li Rongshe, Ji Wenhua, Yang Yongcheng, et al. Geology of Kunlun Mountain and Adjacent Regions [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2008.
- 康磊,校培喜,高晓峰,等. 西昆仑地区侵入岩时空演化特征[J]. 西北地质,2010,43(增刊):209-211.
- Kang Lei, Xiao Peixi, Gao Xiaofeng, et al. The feature of the space-time evolution about the pluton in west Kunlun [J]. Northwestern Geology, 2010, 43(suppl.): 209-211(in Chinese).
- 河南省地质调查院. 叶城县幅 1:25 万区域地质调查报告[R]. 郑州:河南省国土资源厅,2004.
- Henan institute of Geological Survey. Report of 1:250,000 geologic surveys in Yecheng area [R]. Department of Land and Resources of Henan Province Zhengzhou, 2004.
- 张传林,王中刚,沈加林,等. 西昆仑山阿卡孜岩体锆石 SHRIMP 定年及其地球化学特征[J]. 岩石学报,2003,19(03):523-529.
- Zhang Chanlin, Wang Zhonggang, Shen Jialin, et al. Zircon SHRIMP dating and geochemistry and characteristics of Akazi rock mass of Western Kunlun [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(3): 523-529.
- 南京地质矿产研究所. 《西昆仑成矿带成矿规律及找矿方向综合研究》报告[R]. 2004.
- Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources. Report of metallogenic regulation and prospecting direction of West Kunlun belt [R]. 2014.
- 张传林,叶海敏,王爱国,等. 塔里木西南缘新元古代辉绿岩及玄武岩的地球化学特征新元古代超大陆(Rodinia)裂解的证据[J]. 岩石学报,2004,20(03):473-482.
- Zhang Chuanlin, Ye Haimin, Wang Aiguo, et al. Geochemistry of the Neoproterozoic diabase and basalt in South of Tarim plate: Evidence for the Neoproterozoic break-up of the Rodinia super-continent in south of Tarim [J].

- Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 473-482.
- 河南省地质调查院. 塔什库尔干塔吉克自治县幅和克克吐鲁克幅 1:25 万区域地质调查报告[R]. 郑州: 河南省国土资源厅, 2004.
- Henan institute of Geological Survey. Report of 1:250,000 geologic surveys in Taxkorgan and Kekatuluke area [R]. Department of Land and Resources of Henan Province Zhengzhou, 2004.
- 陕西省地质调查院. 于田县幅和伯力克幅 1:25 万区域地质调查报告[R]. 西安: 陕西省国土资源厅, 2002.
- Shaanxi institute of Geological Survey. Report of 1:250,000 geologic surveys in Yutian and Belick area[R]. Department of Land and Resources of Shaanxi Province Xi'an, 2002.
- 陕西省地质调查院. 麻扎幅和神仙湾幅 1:25 万区域地质调查报告[R]. 西安: 陕西省国土资源厅, 2004.
- Shaanxi institute of Geological Survey. Report of 1:250,000 geologic surveys in Mazha and Fairy bay area[R]. Department of Land and Resources of Shaanxi Province Xi'an, 2004.
- 叶海敏, 王爱国, 郭坤一, 等. 西昆仑库地基性脉岩地球化学及构造意义[J]. 资源调查与环境, 2003, 24(3): 185-207.
- Ye Haimin, Wang Aiguo, Guo Kunyi, et al. Geochemistry and tectonic significance of the diabases in Kudi, Western Kunlun [J]. Resources Survey & Environment, 2003, 24(3): 185-207.
- 陕西省地质调查院. 恰哈幅 1:25 万区域地质调查报告[R]. 西安: 陕西省国土资源厅, 2006.
- Shaanxi institute of Geological Survey. Report of 1:250,000 geologic surveys in Qakar area[R]. Department of Land and Resources of Shaanxi Province Xi'an, 2006.
- 山西省地质调查院. 叶亦克幅 1:25 万区域地质调查报告[R]. 太原: 山西省国土资源厅, 2003.
- Shanxi institute of Geological Survey. Report of 1:250,000 geologic surveys in Yeyik area[R]. Department of Land and Resources of Shanxi Province Taiyuan, 2003.
- 河南省地质调查院. 艾提开尔丁萨依幅和英吉沙县幅 1:25 万区域地质调查报告[R]. 郑州: 河南省国土资源厅, 2005.
- Henan institute of Geological Survey. Report of 1:250,000 geologic surveys in Aitikaier and Yingjisha area [R]. Department of Land and Resources of Henan Province Zhengzhou, 2005.
- 边小卫, 朱海平, 计文化, 等. 新疆塔什库尔干县南青白口纪侵入体的发现—来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年的证据[J]. 西北地质, 2013, 46(1): 22-31.
- Bian Xiaowei, Zhu Haiping, Ji Wenhua, et al. The Discovery of Qingbaikouan Plutonite in Taxorgan, Xinjiang, and Evidence from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of Intrusive Rock [J]. Northwestern Geology, 2013, 46(1): 22-31.
- Ji Wenhua, Li Rongshe, Chen Shoujian, et al. The discovery of Palaeoproterozoic volcanic rocks in the Bulunkuoler Group from the Tianshuihai Massif in Xinjiang of Northwest China and its geological significance [J]. Sci China Earth Sci, 2011, 54: 61-72.
- Zhang Chuanlin, Lu Songnian, Yu Haifeng. Geological evolution of orogenic belt in Northern Qinghai Tibet Plateau, west Kunlun, China, and evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS dating [J]. Science in China (Series D, earth sciences), 2007, 37(2): 145-154.
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Zhang Chengli. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on orogenic process [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 72: 129-151.
- Watson E D. Harrison T M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effect in a variety of crustal magmas types [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 64: 295-304.