

·专题研究·

西昆仑早中志留世埃达克岩的发现及地质意义

杨 绍¹, 吕宏伟¹, 屈小相¹, 吝 岩¹, 曾忠诚², 高 成³

(1. 中陕核工业集团地质调查院有限公司, 陕西 西安 710100; 2. 陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710068;
3. 中陕核工业集团公司, 陕西 西安 710100)

摘 要: 1:5万地质调查在西昆仑北部库尔良地区库尔良群中首次发现了一套早中志留世花岗闪长岩体, 通过锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年法获得其成岩年龄为 429.6 ± 1.4 Ma (MSWD=0.69)。岩石具有典型的埃达克岩地球化学特征: 高 SiO_2 (68.85%~72.49%)、 Al_2O_3 (14.08%~15.36%)、Sr (480×10^{-6} ~ 812×10^{-6})、Sr/Y (53.2~111.0), 低 Y (7.31×10^{-6} ~ 10.30×10^{-6})、Yb (0.34×10^{-6} ~ 0.48×10^{-6}), 重稀土元素强烈亏损, 轻重稀土元素分异明显, $38.4 < (\text{La}/\text{Yb})_N < 61.2$, 无显著 Eu 异常 ($0.86 < \delta\text{Eu} < 1.03$, 均值 0.98)。同时, 岩石具有较高的 K_2O (2.92%~3.48%) 和较低的 MgO (0.69%~0.84%)、 $\text{Mg}^\#$ (26.4~32.6)、Cr (15.1~28.2)、Ni (3.54~5.39) 等特征, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 1.03~1.46 (均值 1.21)。地球化学特征显示其为加厚下地壳部分熔融的产物, 暗示早中志留世西昆仑发生了一次地壳增厚事件, 彼时地壳厚度 > 50 km。结合区域地质资料, 认为以库地-其曼于特蛇绿构造混杂岩带为标志的原特提斯洋在早中志留世之前已经闭合, 并已进入板块碰撞、挤压造山阶段。研究成果为原特提斯洋闭合后碰撞作用导致的地壳增厚事件提供了可靠的岩石学证据和精确的年代学依据。

关键词: 西昆仑; 库地-其曼于特; 库尔良; 原特提斯; 埃达克岩; 地壳增厚; 碰撞造山

中图分类号: P588.12; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)04-0563-16

The discovery of Early-Middle Silurian adakite in West Kunlun Mountains and its geological implications

YANG Shao¹, LÜ Hong-wei¹, QU Xiao-xiang¹, LIN Yan¹, ZENG Zhong-cheng² and GAO Cheng³

(1. Sino Shaanxi Nuclear Industry Group Geological Survey Co. Ltd., Xi'an 710100, China; 2. Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710068, China; 3. China Shaanxi Nuclear Industry Group, Xi'an 710100, China)

Abstract: An Early-Middle Silurian granodiorite rock was found for the first time in Kuerliang Group during the process of the 1:50 000 geological survey in Kuerliang area, northern West Kunlun Mountains. Through the LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronological study, a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 429.6 ± 1.4 Ma (MSWD = 0.69) for the zircons in granodiorite was obtained. Geochemical characteristics show that the granodiorite is typical adakite with high SiO_2 (68.85%~72.49%), Al_2O_3 (14.08%~15.36%), Sr (480×10^{-6} ~ 812×10^{-6}), Sr/Y (53.2~111.0), and low Y (7.31×10^{-6} ~ 10.30×10^{-6}), Yb (0.34×10^{-6} ~ 0.48×10^{-6}). In addition, it exhibits significant fractionation between LREE and HREE [$38.4 < (\text{La}/\text{Yb})_N < 61.2$] and is depleted in HREE with slight Eu anomaly ($0.86 < \delta\text{Eu} < 1.03$, 0.98 on average). The rock has a relatively high proportion of K_2O (2.92%~3.48%) and low proportions of MgO (0.69%~0.84%), $\text{Mg}^\#$ (26.4~32.6), Cr (15.1~28.2), and Ni (3.54~5.39), with $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ratios being 1.03~1.46 (1.21 on average). These

收稿日期: 2015-05-24; 接受日期: 2016-04-25

基金项目: 新疆国土资源厅区域地质调查项目(K14-1-XJ12)

作者简介: 杨 绍(1986-), 男, 侗族, 硕士, 助理工程师, 从事构造地质及区域地质、矿产调查, E-mail: 331887950@qq.com。

characteristics suggest that the granodiorite was a product of partial melting of a thickened lower crust, and a crustal thickening occurred in the West Kunlun Mountains in Early-Middle Silurian when the crustal thickness was greater than 50 km. Together with regional geological data, the authors hold that the Proto-Tethys Ocean basin, taking Kuda-Qimanyute ophiolite mélangé as a symbol, had been closed before Early-Middle Silurian, and then entered the collisional orogenic period. This research provides a reliable petrological evidence and precise chronological data for the collisional orogenic event after the closing of Proto-Tethys Ocean.

Key words: West Kunlun Mountains; Kuda-Qimanyute; Kuerliang; Proto-Tethys; adakite; crustal thickening; collisional orogeny

Fund support: Project from Department of Land Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region (K14-1-XJ12)

西昆仑造山带位于青藏高原西北缘和秦祁昆造山带的最西段,是青藏高原北部原特提斯的重要组成部分(潘裕生,1999;李德威,2008;潘桂棠等,2009),其地质演化受到以库地-其曼于特蛇绿构造混杂岩带为标志的原特提斯洋的显著影响(李德威,2008)。10多年来,许多学者从不同角度对库地-其曼于特缝合带做了较系统的研究,取得了一系列成果(周辉等,2000;王志洪等,2000;袁超等,2002;韩芳林等,2002;肖序常等,2003;方爱民等,2003;张传林等,2004;崔建堂等,2006;李荣社等,2007;李天福等,2014),但仍存在不少问题。一方面,目前对库地-其曼于特洋盆的开启、俯冲、碰撞造山历史的认识还存在较大分歧;另一方面,西昆仑的地壳增厚事件一直是人们关注的焦点,但目前研究主要集中在新生代,对原特提斯洋闭合后的地壳增厚事件研究较少。

埃达克岩具有重要的地球动力学意义(王焰等,2000;张旗等,2001a,2001b;王强等,2001b;罗照华等,2002;朱弟成等,2003;Bourdon *et al.*,2003;张旗,2011;许继峰等,2014)。O型埃达克岩常被作为鉴别消减带的一项重要岩浆岩标志,C型埃达克岩的出现则暗示地壳在此之前就已经增厚,是追踪地质历史时期地壳增厚事件最直接、最可靠的方法之一。前人关于秦祁昆造山带埃达克岩的报道,在时间上,大多数为寒武纪—奥陶纪和三叠纪,志留纪较少;在空间上,主要集中在中东段,对西段的西昆仑鲜有报道,仅报道了西昆仑128 km岩体中具有部分埃达克岩特征的早奥陶世花岗闪长岩(袁超等,2003);在类型上,主要是O型埃达克岩,为板块消减作用的记录,C型埃达克岩较少。

本文首次报道了典型的西昆仑志留纪C型埃达克岩,并对其进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学

和岩石地球化学研究,以期对西昆仑造山带的构造演化和原特提斯洋闭合后的碰撞造山时限提供有益参考。

1 地质背景

西昆仑造山带位于青藏高原西北缘,北以柯岗断裂为界与塔里木陆块相接,南以麻扎-康西瓦缝合带为界,与巴颜喀拉晚古生代—中生代边缘裂陷带相接,造山带内部以库地-其曼于特蛇绿构造混杂岩带为界,将西昆仑分为西昆仑北微陆块和西昆仑南微陆块(图1a)。研究区位于西昆仑中段北部库尔良地区,南北跨越塔里木陆块、西昆仑北微陆块和西昆仑南微陆块(图1b)。

研究区构造演化复杂,先后经历了前震旦纪基底演化、震旦纪—中三叠世板块演化以及晚三叠世以来板内演化3个演化阶段(崔建堂等,2006)。基底演化阶段主要发育深部构造层次的构造变形,发育透入性片麻理和片理,岩石中褶皱作用、顺层剪切作用及片理置换作用强烈,构造线走向主体为NWW向;板块演化阶段主要保留了加里东期构造形迹,以陆块聚合阶段形成的叠瓦状逆冲断层和原特提斯海相沉积岩系挤压褶皱为主要构造形式,构造线走向NWW向。晚三叠世以来的板内演化阶段主要形成一系列近东西向的逆断层和正断层,局部发育北东向或东西向左行走滑断层及南北向正断层。

研究区及周边地区分布着大量不同时代、不同成因类型的岩体(图1b),这些岩体形成于西昆仑不同构造演化阶段。在岩石类型上,超基性岩、基性岩、中性岩、酸性岩均有出露,其中侵入岩以中酸性为主,火山岩以基性、碱性为主;在岩浆活动时代上,晚元古代、古生代、中生代至新生代均有岩浆活动。

有一定的规律性,即总体主要受 NWW 向边界断裂(蛇绿构造混杂岩带)及区域性大断裂控制,反映了其与板块消减和之后的陆块碰撞及陆内伸展作用关系密切。

研究区地层发育不全,但从古元古界—新生界均有不同程度的出露(图 1b)。前寒武纪地层主要分布于柯岗断裂(F_1)以北、库地—其曼于特蛇绿构造混杂岩带南界断裂(F_3)以南,主要为基底中深变质岩。早古生代地层分布于柯岗断裂和库地—其曼于特蛇绿构造混杂岩带南界断裂之间,为浅变质和未变质的沉积岩,局部夹中酸性—基性火山岩。前人通过化

石研究将出露于库尔良一带的库尔良群划分为石炭系,由于本研究在库尔良群中厘定出与其呈侵入接触关系的早中志留世 C 型埃达克岩(图 2a),故将其时代归属划分到早古生代(见后文)。库尔良群呈 NW 向分布于研究区中部(F_1 断裂以南、 F_2 断裂以北),下部以碎屑岩和片岩为主,局部夹玄武岩、安山岩、灰岩、炭质板岩、灰质砾岩、复成分砾岩及硅质岩,夹层与碎屑岩之间多以断层接触,地层中滑塌沉积较为发育;上部为一套岩性单一的复理石建造。总体上,该群构造变形复杂,岩石强烈片理化、透镜体化、糜棱岩化,同时发育大量脆韧性小断层。

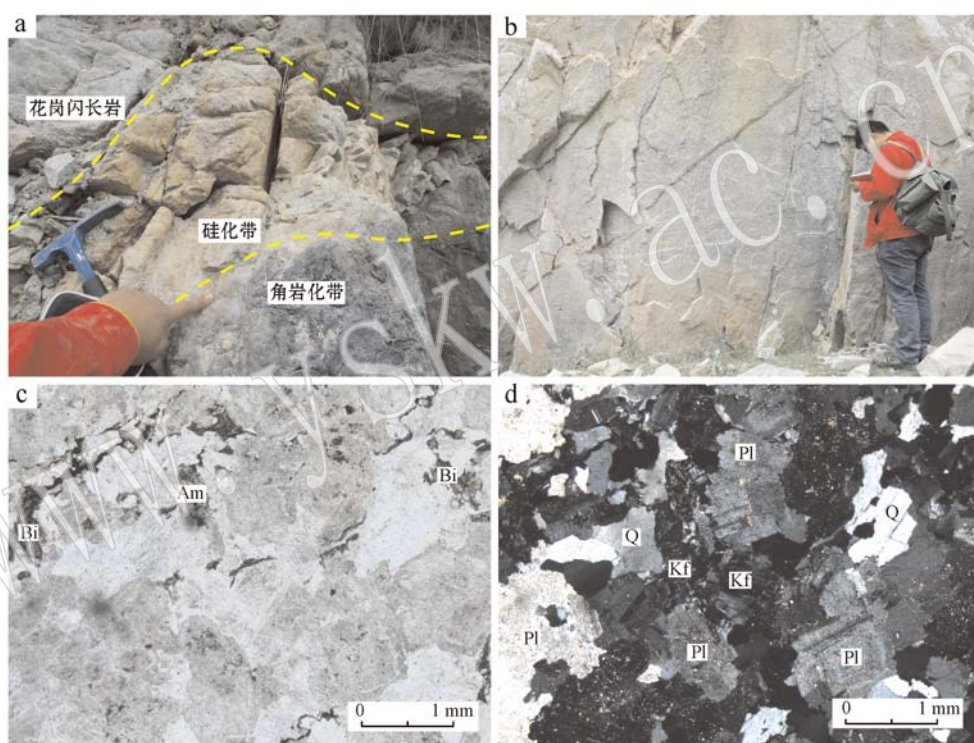


图 2 库尔良花岗闪长岩野外(a、b)和镜下(c、d)照片

Fig. 2 Field photographs (a, b) and photomicrographs (c, d) of Kuerliang granodiorite

a—花岗闪长岩与库尔良群侵入接触界线及围岩蚀变特征; b—花岗闪长岩野外宏观特征; c—花岗闪长岩镜下特征(单偏光);

d—花岗闪长岩镜下特征(正交偏光); Pl—斜长石; Kf—钾长石; Q—石英; Am—角闪石; Bi—黑云母

a—intrusive contact boundary between the granodiorite and Kuertliang Group and the wall rock alteration characteristics; b—field macro-characteristics; c—microscopic characteristics of granodiorite (plainlight); d—microscopic characteristics of granodiorite (crossed nicols); Pl—plagioclase;

Kf—K-feldspar; Q—quartz; Am—amphibole; Bi—biotite

2 岩体地质

本次研究对象花岗闪长岩位于库地—其曼于特缝合带北侧库尔良 NEE 约 20 km 处,岩体侵入于库尔良群中,岩体规模小,单个岩体长 600~2 000 m,

呈串珠状近东西向排列,岩体外接触带发生了硅化、角岩化、大理岩化、铁矿化和铜矿化(图 2a)。

花岗闪长岩呈浅灰色,具不等粒花岗结构,块状构造(图 2)。主要造岩矿物为斜长石(50%~55%)、钾长石(20%~25%)、石英(20%~23%)。暗色矿物含量较少(3%~7%),基本蚀变成了绿泥石,并伴

有绿帘石化,可见少量白云母(2%~3%)。副矿物主要为榍石和锆石,其含量约为5%。斜长石均为半自形粒状,局部波状消光或膝折变形,以中长石为主,更长石次之,粒径从0.1~7 mm 均可见,但以0.5~2 mm 为主,表面污浊,发生了绢云母和绿帘石化,局部可见环带结构。钾长石多为2~5 mm 中粒,见少量0.5~2 mm 细粒及5~10 mm 粗粒,它形粒状,以微条纹长石和条纹长石为主,发育波状消光,局部发育二长结构。石英为2~5 mm,它形粒状,普遍发育裂纹,见塑性拉长及重结晶现象。

3 样品采集与分析方法

采集了7件库尔良花岗闪长岩样品进行分析,除PM001-1用于锆石U-Pb测年外,其余6件样品全部用于地球化学分析。采样位置经纬度为N36°52′26.05″,E78°27′5.38″(图1b)。主量元素、微量元素及稀土元素分析均在核工业203研究所测试中心完成。主量元素采用荷兰帕纳科制造的Axios X射线光谱仪分析,实验温度20℃。微量和稀土元素采用Thermo Fisher Scientific制造的XSERIES2型ICP-MS分析。锆石单矿物分选在河北省区域地质调查研究所完成,锆石结构图像应用透射光、反射光和阴极发光(CL)采集,透射光、反射光在长安大学矿石学实验室完成,阴极发光(CL)在长安大学成矿作用及其动力学实验室完成。锆石U-Pb定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,锆石定年仪器为带有Shield Torch的Agilent 7500a型ICP-MS,激光剥蚀系统为德国MicroLas公司生产的GeoLas200M,激光器为ComPex102 Excimer(工作物质ArF,波长193 nm)。采用He作为剥蚀物质的载气,分析采用斑束直径为30 μm,频率为10 Hz,能量为32~36 mJ,每个分析点的气体背景采集时间为20 s,信号采集时间为40 s。详细实验过程参见Yuan等(2004, 2008)。激光剥蚀方式为单点剥蚀,分析仪器校正采用标准参考物质NIST610进行仪器最佳化。ICP-MS数据采集选用质量峰采点的跳峰方式,年龄计算以国际标准锆石91500作为外标校正,²⁹Si作为内标,每测定6个分析点插入1次标样测定。采用ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008, 2010)软件计算测试结果,采用Isoplot 3.0程序(Ludwig, 2003)绘制谐和图。所获同位素比值和年龄误差均在1σ水平。

4 分析结果

主量、微量及稀土元素测试结果见表1,年龄分析结果见表2,各锆石微区稀土元素数据见表3。

4.1 主量元素特征

6件地球化学样品SiO₂的含量为68.85%~72.49%。在花岗岩类实际矿物含量QAP分类图解(图3a)中,6件样品全部落在花岗闪长岩区域,与薄片鉴定结果一致。样品K₂O含量为2.92%~3.48%,在K₂O-SiO₂图中主要落在高钾钙碱性岩石系列中(图3b),Na₂O/K₂O值为1.03~1.46,均值为1.21。Al₂O₃含量为14.08%~15.36%,铝饱和指数(A/CNK)为1.11~1.17,CIPW标准矿物计算结果含有刚玉(C),含量为1.64~2.37,为强过铝质岩石。样品具有较低的MgO含量(0.69%~0.81%),Mg[#]值介于26.4~32.6之间。

4.2 稀土元素和微量元素特征

在岩体的球粒陨石标准化稀土元素分配曲线(图4a)中,所有样品曲线近乎一致,呈右倾分布,表现为轻稀土元素富集,重稀土元素强烈亏损,轻、重稀土元素分异明显,38.4<(La/Yb)_N<61.2,均值50.9, Eu无显著异常(0.86<δEu<1.03,均值0.98)。在原始地幔微量元素蛛网图上(图4b),花岗闪长岩总体上具有富集不相容元素Rb、Th、U、K、Pb,而亏损Nb、Ta、Zr、Ti、P等高场强元素的特点。

4.3 年代学分析结果

花岗闪长岩共测定18颗锆石,锆石多呈不完整的长柱状,也有少部分呈短柱状,或为不规则的碎粒,具有明显的岩浆振荡环带,粒径70~200 μm,长宽比值约1~2(图5b)。锆石Th含量均值653×10⁻⁶,U含量均值1977×10⁻⁶,Th/U值介于0.26~0.57之间,平均值0.33。在锆石稀土元素组成模式图(图6)上,锆石的稀土元素分配模式总体相似,除少量谐和度不高或年龄与整体年龄偏差较大的锆石外,均显示重稀土元素富集、轻稀土元素亏损,具负Eu异常和强烈的正Ce异常(图6,图中虚线代表未参与锆石加权年龄计算的数据点)。总体上,锆石形态和地球化学特征均显示其为岩浆成因(Rubatto, 2002; 吴元保等, 2004)。

部分锆石由于铅丢失等原因,导致谐和度不高,为了提高数据质量,将谐和度小于95%的删除。谐和度高于95%的15颗锆石中,3个点(2、11、17)与

表 1 库尔良花岗闪长岩的主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)化学组成
Table 1 Major ($w_B/\%$) and element ($w_B/10^{-6}$) compositions of the granodiorite from Kuerliang, West Kunlun Mountains

样品	PM001-5-1	PM001-6-1	PM001-6-2	PM001-6-3	PM001-7-1	PM001-8-1	样品	PM001-5-1	PM001-6-1	PM001-6-2	PM001-6-3	PM001-7-1	PM001-8-1
SiO ₂	70.70	72.49	68.85	70.71	70.88	71.05	K	24 419	28 874	27 601	29 053	28 701	28 648
TiO ₂	0.35	0.32	0.27	0.24	0.24	0.26	Ti	1 529	1 570	1 588	1 478	1 720	1 792
Al ₂ O ₃	14.68	14.08	14.57	15.36	14.88	14.67	P	488	471	434	347	361	381
Fe ₂ O ₃	2.69	2.47	2.28	2.01	2.09	1.99	La	37.8	32.9	32.7	27.4	25.4	30.3
FeO	1.60	1.18	1.22	0.91	0.96	0.78	Ce	59.4	57.5	59.0	50.6	48.4	52.1
MnO	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	Pr	6.29	6.18	5.64	5.23	5.21	5.28
MgO	0.81	0.84	0.81	0.69	0.71	0.70	Nd	23.2	23.4	21.3	20.0	19.3	20.5
CaO	1.30	1.66	1.46	1.31	1.25	1.41	Sm	4.34	4.15	3.61	3.18	3.02	3.25
Na ₂ O	4.28	3.59	3.96	4.31	4.11	4.05	Eu	1.06	1.16	1.07	0.94	0.94	0.93
K ₂ O	2.94	3.48	3.32	3.50	3.46	3.45	Gd	2.88	2.83	2.71	2.27	2.41	2.34
P ₂ O ₅	0.11	0.11	0.10	0.08	0.08	0.09	Tb	0.33	0.31	0.28	0.27	0.25	0.26
H ₂ O ⁺	0.62	0.30	0.52	0.50	1.08	1.66	Dy	1.58	1.64	1.33	1.31	1.12	1.07
Lost	1.72	0.16	3.34	1.21	1.58	1.42	Ho	0.24	0.25	0.23	0.21	0.18	0.17
Sc	1.44	3.54	2.73	1.91	2.58	1.71	Er	0.53	0.59	0.48	0.49	0.47	0.43
Co	6.96	7.93	12.00	9.53	8.76	9.79	Tm	0.07	0.08	0.05	0.06	0.06	0.05
Cu	35.8	32.0	33.3	27.0	33.7	31.4	Yb	0.44	0.48	0.36	0.48	0.34	0.40
Zn	35.5	40.9	37.6	38.1	43.8	46.2	Lu	0.07	0.09	0.06	0.08	0.06	0.07
Rb	94.7	129.0	113.0	131.0	114.0	129.0	Y	9.04	10.30	7.37	7.72	7.31	7.93
Zr	152	138	146	132	126	144	ΣREE	147	142	136	120	114	125
Nb	17.6	11.3	14.6	13.4	14.8	22.2	Mg [#]	26.4	30.6	30.5	31.3	30.9	32.6
Hf	4.93	4.79	4.67	3.94	3.81	5.22	FeO _t	4.02	3.40	3.27	2.72	2.84	2.57
Ta	0.99	0.79	1.05	1.03	1.20	1.29	Fe ₂ O _{3t}	4.47	3.78	3.64	3.02	3.16	2.85
Pb	17.9	27.6	25.7	24.1	31.0	30.7	Na ₂ O/K ₂ O	1.46	1.03	1.19	1.23	1.19	1.17
Th	9.65	12.40	12.40	10.60	9.97	16.60	(La/Yb) _N	58.0	46.2	61.2	38.4	50.4	51.1
U	1.63	1.48	2.67	1.83	1.48	2.79	Sr/Y	53.2	57.5	97.0	80.2	111.0	84.8
Ba	715	981	1051	1021	932	1051	δEu	0.86	0.98	1.00	1.02	1.03	0.98
Cr	15.1	28.2	24.5	26.2	20.6	19.2	LREE	132	125	123	107	102	112
Ni	3.54	5.39	5.32	5.06	4.98	4.78	HREE	6.14	6.27	5.50	5.17	4.89	4.79
Sr	480	592	714	619	812	672	LREE/HREE	21.5	20.0	22.4	20.8	20.9	23.4
V	24.9	29.3	32.0	27.4	27.8	29.8	t/°C	790	779	784	777	774	783

总体年龄不和谐,且较为分散,不参与加权平均计算,剩余 12 颗锆石测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值介于 423.1~432.9 Ma 之间,在一致曲线图中,数据点成群分布(图 5a),其加权平均年龄为 429.6±1.4 Ma (MSWD=0.69),代表了花岗闪长岩的结晶年龄,说明其为加里东晚期构造-岩浆活动的产物。

5 讨论

5.1 岩石类型

埃达克岩最初是由 Defant 和 Drummond (1990) 在研究阿留申群岛火山岩时提出来的一种形成于俯冲消减环境、由板片熔融形成的一套中酸性火山岩,具有特殊的地球化学特征,如富集轻稀土元素、亏损重稀土元素,具有较低的 Y (< 18 × 10⁻⁶) 和

Yb (< 1.9 × 10⁻⁶) 含量,具有高 Sr (> 400 × 10⁻⁶, 很少小于 400 × 10⁻⁶)、高 Al₂O₃ (≥ 15%) 含量、高 La/Yb 值 (> 7.6~15) 及高 Sr/Y 值 (> 20~40) 特征,具有正铈异常(少数具有弱负铈异常)。随后的研究发现,一些具有埃达克岩地球化学特征的中酸性火成岩既不产生于岛弧环境,也不是板片熔融的产物,而形成于大陆地区。张旗等(2001a, 2001b)根据埃达克岩化学成分的差异及其产出的大地构造环境的不同,将埃达克岩划分为 O 型和 C 型,前者富 Na,是以 MORB 为源岩的挤压消减板片发生部分熔融的产物(Defant and Drummond, 1990),K₂O 含量低,平均不超过 1.72%;后者 K₂O 含量显著偏高,一般在 2.9%~3.9% 以上,Na₂O/K₂O 值 < 2,主要形成于大陆地区,如活动陆缘地壳加厚地区、板块碰撞导致的地壳加厚地区和高原底部等环境。

表 2 库尔良地区花岗岩长岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果
Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of the granodiorite from Kuerliang, Western Kunlun

分析点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma				谐和度					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ			
PM001-1-01	171.2	838	2 131	0.39	0.39	0.061 34	0.000 59	0.574 13	0.025 67	0.067 58	0.000 53	650.0	20.4	460.7	16.6	421.6	3.2	91%
PM001-1-02	151.3	532	1 621	0.33	0.33	0.057 61	0.000 71	0.638 61	0.026 35	0.080 06	0.000 38	516.7	27.8	501.4	16.3	496.5	2.3	99%
PM001-1-03	171.4	913	2 089	0.44	0.44	0.055 77	0.000 67	0.532 77	0.021 12	0.068 97	0.000 27	442.6	30.6	433.6	14.0	430.0	1.6	99%
PM001-1-04	231.5	816	2 871	0.28	0.28	0.063 99	0.000 72	0.609 24	0.024 28	0.068 70	0.000 30	742.6	24.1	483.1	15.3	428.3	1.8	87%
PM001-1-05	181.2	684	2 287	0.30	0.30	0.055 67	0.000 63	0.530 93	0.022 73	0.068 87	0.000 28	438.9	25.9	432.4	15.1	429.3	1.7	99%
PM001-1-06	110.5	448	1 394	0.32	0.32	0.055 37	0.000 81	0.527 54	0.025 53	0.068 81	0.000 44	427.8	33.3	430.2	17.0	429.0	2.6	99%
PM001-1-07	168.2	559	2 125	0.26	0.26	0.055 77	0.000 64	0.536 48	0.025 33	0.069 45	0.000 40	442.6	30.6	436.1	16.7	432.9	2.4	99%
PM001-1-08	148.6	628	1 871	0.34	0.34	0.056 82	0.000 64	0.539 04	0.023 17	0.068 42	0.000 40	483.4	24.1	437.8	15.3	426.6	2.4	97%
PM001-1-09	137.7	528	1 758	0.30	0.30	0.057 52	0.000 71	0.544 88	0.022 71	0.068 29	0.000 74	522.3	27.8	441.6	14.9	425.9	4.5	96%
PM001-1-10	197.7	668	2 516	0.27	0.27	0.057 00	0.000 80	0.546 22	0.021 93	0.069 15	0.000 34	500.0	29.6	442.5	14.4	431.0	2.0	97%
PM001-1-11	159.5	589	1 030	0.57	0.57	0.068 72	0.000 78	1.182 58	0.049 56	0.124 06	0.000 98	900.0	22.2	792.5	23.1	753.9	5.6	95%
PM001-1-12	133.7	519	1 730	0.30	0.30	0.055 74	0.000 71	0.525 18	0.024 62	0.067 84	0.000 73	442.6	32.4	428.6	16.4	423.1	4.4	98%
PM001-1-13	135.3	491	1 727	0.28	0.28	0.056 15	0.000 85	0.541 14	0.026 57	0.069 30	0.000 79	457.5	33.3	439.2	17.5	431.9	4.7	98%
PM001-1-14	117.7	456	1 504	0.30	0.30	0.055 36	0.000 71	0.527 03	0.023 28	0.068 58	0.000 74	427.8	27.8	429.8	15.5	427.6	4.4	99%
PM001-1-15	103.1	346	1 321	0.26	0.26	0.058 89	0.000 84	0.563 01	0.022 30	0.069 28	0.000 66	561.1	31.5	453.5	14.5	431.8	4.0	95%
PM001-1-16	260.4	1 210	3 362	0.36	0.36	0.062 87	0.000 66	0.574 03	0.022 44	0.065 89	0.000 22	705.6	24.1	460.6	14.5	411.3	1.3	88%
PM001-1-17	173.3	784	2 091	0.37	0.37	0.056 94	0.000 72	0.563 89	0.023 11	0.071 48	0.000 27	500.0	27.8	454.1	15.0	445.1	1.6	98%
PM001-1-18	173.1	739	2 166	0.34	0.34	0.058 71	0.000 68	0.559 95	0.024 30	0.068 94	0.000 47	566.7	24.8	451.5	15.8	429.8	2.8	95%

表 3 库尔良花岗岩长岩中的锆石稀土元素化学组成

Table 3 REE compositions of zircon from the granodiorite in Kuerliang, Western Kunlun

分析点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ HREE	Σ HREE/ Σ LREE	Eu/Eu*	Ce/Ce*	$w_B/10^{-6}$
PM001-1-01	0.27	25.60	0.15	1.37	2.25	1.64	12.76	4.51	56.44	23.35	120.06	29.38	314.70	70.99	632.20	20.21	0.73	30.08	
PM001-1-02	0.19	33.61	0.23	1.28	2.34	1.40	19.40	6.54	91.54	38.47	198.61	47.32	505.01	112.17	1019.07	26.09	0.44	33.13	
PM001-1-03	0.01	30.74	0.04	0.61	2.15	1.20	14.38	5.00	60.21	24.98	125.90	29.96	317.67	70.63	648.72	18.67	0.49	223.89	
PM001-1-04	1.74	36.04	1.44	9.54	7.14	2.73	25.07	8.64	107.61	44.41	216.19	49.59	506.85	105.99	1064.34	18.15	0.56	5.11	
PM001-1-05	0.11	24.61	0.13	3.04	3.43	2.67	15.44	5.36	71.38	30.20	153.37	35.84	382.64	84.34	778.56	22.91	0.94	44.16	
PM001-1-06	0.05	36.15	0.09	1.47	5.74	3.14	34.15	11.79	134.98	52.06	241.53	53.08	538.64	113.31	1179.54	25.29	0.53	97.47	
PM001-1-07	0.06	23.02	0.08	1.02	2.74	1.46	16.47	5.91	76.02	30.31	150.09	34.07	357.91	77.23	748.02	26.36	0.51	65.86	
PM001-1-08	0.09	28.14	0.05	1.07	2.47	1.43	17.41	6.14	80.50	31.70	156.29	35.64	373.76	77.39	778.83	23.43	0.49	105.46	
PM001-1-09	1.71	32.33	1.13	7.33	3.49	1.51	16.13	5.83	73.24	33.14	174.26	42.90	467.29	102.09	914.88	19.26	0.51	5.42	
PM001-1-10	0.43	24.97	0.22	2.28	2.39	1.34	14.47	5.61	70.87	30.62	160.58	38.65	418.06	93.37	832.22	26.30	0.53	19.31	
PM001-1-11	16.46	82.61	7.11	39.41	15.37	2.09	54.43	17.81	210.72	80.89	351.56	70.10	640.08	116.55	1542.14	9.46	0.20	1.84	
PM001-1-12	2.25	32.96	0.80	3.60	2.97	1.55	19.61	6.44	80.25	32.04	157.59	35.96	372.88	78.40	783.17	17.74	0.46	5.89	
PM001-1-13	0.07	26.77	0.07	0.65	2.57	1.50	19.36	7.43	93.48	39.85	197.57	45.56	476.55	100.83	980.63	31.01	0.47	87.28	
PM001-1-14	0.17	25.18	0.11	1.40	0.66	1.12	13.70	5.09	67.66	28.83	152.35	37.28	409.47	91.25	805.63	28.12	0.54	43.10	
PM001-1-15	0.22	17.23	0.13	1.26	1.92	0.90	9.00	3.30	41.04	18.34	94.38	23.23	260.66	58.67	508.61	23.48	0.55	23.72	
PM001-1-16	5.32	51.00	3.01	17.05	6.17	2.77	24.20	7.61	92.71	39.30	196.22	45.36	467.79	97.82	971.02	11.38	0.60	3.02	
PM001-1-17	2.91	34.44	0.85	4.57	2.48	1.32	13.22	4.75	58.82	24.54	123.37	29.88	318.09	72.95	645.63	13.87	0.56	5.23	
PM001-1-18	0.21	33.50	0.21	1.41	2.64	1.44	17.54	6.61	86.68	36.91	185.43	44.03	465.94	99.35	942.49	23.91	0.48	34.92	

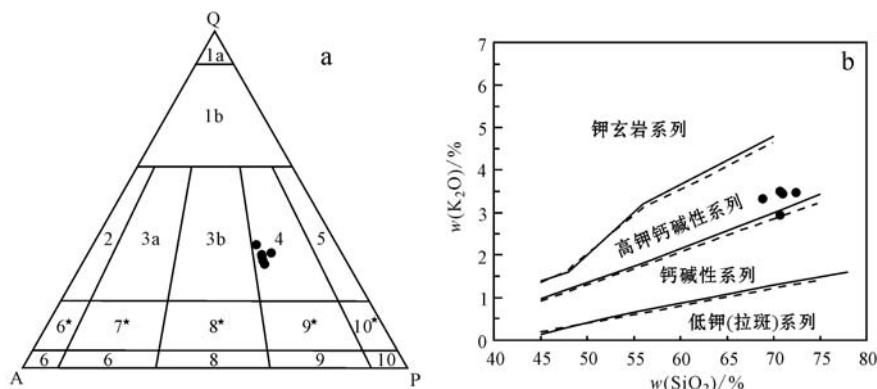


图3 花岗闪长岩 QAP 分类图解(a, 据 Bowden 等, 1984)和 K_2O-SiO_2 图解(b, 据 Irvine 和 Baragar, 1971; Peccerillo 和 Taylor, 1976)

Fig. 3 QAP classification diagram (a, after Bowden *et al.*, 1984) and K_2O-SiO_2 diagram (b, after Irvine and Baragar, 1971; Peccerillo and Taylor, 1976) for the Kuerliang granodiorite

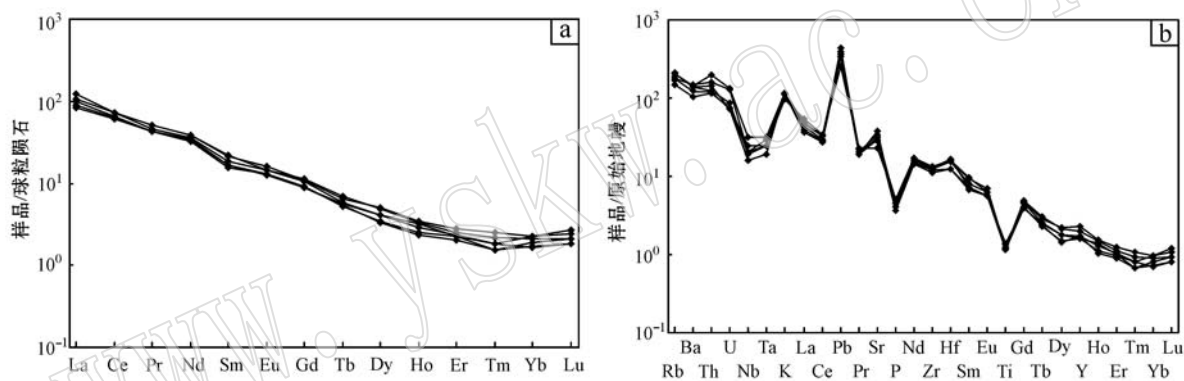


图4 花岗闪长岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a, 标准化值据 Boynton 和 Bowden, 1984)和原始地幔标准化微量元素蛛网(b, 标准化值据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalization after Boynton and Bowden, 1984) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for the Kuerliang granodiorite (b, normalization after Sun and McDonough, 1989)

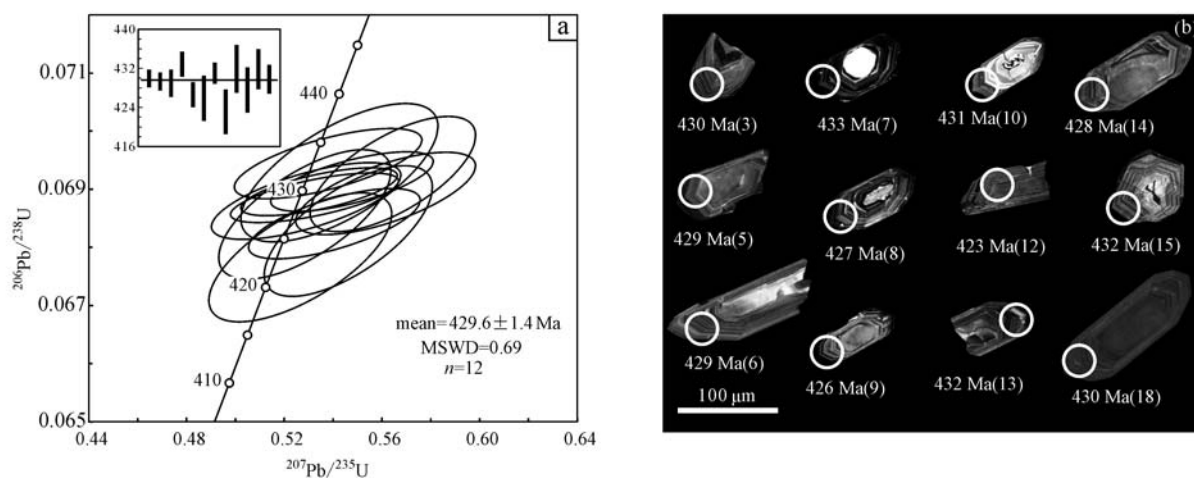


图5 花岗闪长岩 U-Pb 年龄谱和图(a)和锆石阴极发光(CL)图像(b)

Fig. 5 U-Pb concordia diagrams (a) and cathodoluminescence (CL) images (b) of zircons in the granodiorite

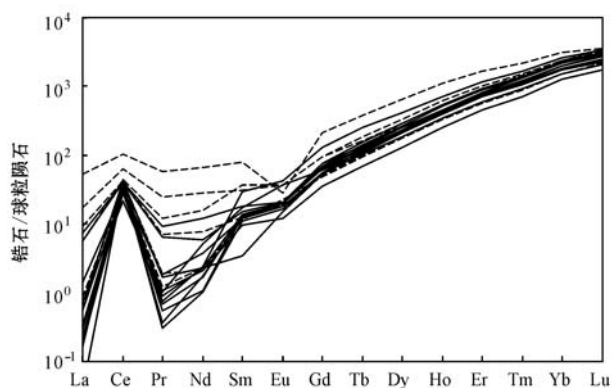


图6 花岗闪长岩中锆石稀土元素组成模式图
(标准化值据 Boynton 和 Bowden, 1984)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of zircons in the granodiorite (normalization after Boynton and Bowden, 1984)

岩石地球化学特征表明, 库尔良花岗闪长岩具有典型埃达克岩地球化学特征: 如高 SiO_2 (68.85% ~ 72.49%, 均值 70.78)、 Al_2O_3 (14.08% ~ 15.36%, 均值 14.71)、 Sr (480×10^{-6} ~ 812×10^{-6} , 均值 648)、 Sr/Y 值 (53.2 ~ 111, 均值 80.6), 低 HREE ($4.79 \sim 6.27$, 均值 5.46)、 Y (7.31×10^{-6} ~ 10.3×10^{-6} , 均值 8.28×10^{-6})、 Yb (0.34×10^{-6} ~ 0.48×10^{-6} , 均值 0.42×10^{-6}), 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, 轻重稀土元素分异明显, $38.4 < (\text{La}/\text{Yb})_N < 61.2$, 均值 50.9, 没有明显的 Eu 异常 ($0.86 < \delta\text{Eu} < 1.03$, 均值 0.98), 在埃达克岩判别图上, 样品都落入埃达克岩区域(图7)。样品 K_2O 含量为 2.92% ~ 3.48%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 1.03 ~ 1.46, 均值为 1.21, 在 K_2O - SiO_2 图中主要落在高钾钙碱性岩石系列中(图3b), 与中国东部埃达克岩相

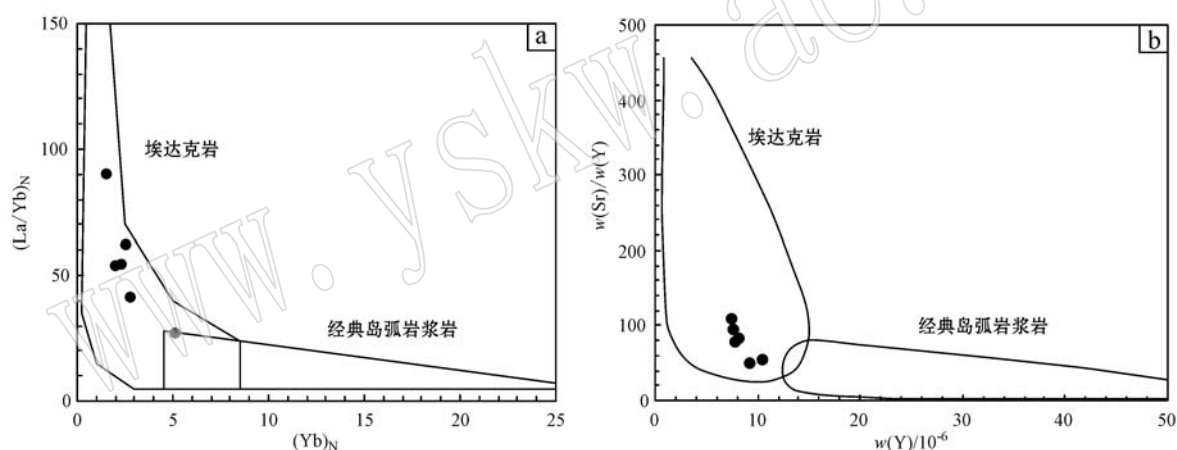


图7 库尔良花岗闪长岩 $(\text{La}/\text{Yb})_N - \text{Yb}_N$ (a) 和 $\text{Sr}/\text{Y} - \text{Y}$ 判别图(b) (据 Defant 和 Drummond, 1990)

Fig. 7 $(\text{La}/\text{Yb})_N - \text{Yb}_N$ (a) and $\text{Sr}/\text{Y} - \text{Y}$ (b) diagrams (after Defant and Drummond, 1990) for the Kuerliang granodiorite from the Western Kunlun

似(张旗等, 2001a, 2001b; 王强等, 2001a; Xu *et al.*, 2002; 葛小月等, 2002; Wang *et al.*, 2007), 属于 C 型埃达克岩(张旗等, 2001a, 2001b)。

5.2 岩石成因

关于 C 型埃达克岩, 目前普遍认为有 4 种成因模式: ① 加厚的下地壳部分熔融(包括新底侵至加厚下地壳底部的玄武质岩石部分熔融)(Atherton and Petford, 1993; Rudnick, 1995; Petford and Altherton, 1996; 张旗等, 2001a; Rapp *et al.*, 2002; Kay and Kay, 2002; Chung *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2005); ② 基性岩浆高压

分异(Müntener *et al.*, 2001; 钱青等, 2002; Castillo, 2006; Macpherson *et al.*, 2006); ③ 拆沉下地壳的部分熔融(Kay *et al.*, 1993; Kay and Kay, 1993, 2002; Gao *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2006); ④ 岩浆混合(Feeley and Hacker, 1995; Turner *et al.*, 1996; Ma *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2007)。

高压下基性岩浆通过角闪石和石榴石分离结晶可形成埃达克岩(Macpherson *et al.*, 2006), 石榴石或角闪石的分离结晶会导致残留熔体中 Y/Yb 值升高, 而库尔良埃达克岩 Y/Yb 值除样品 PM001-6-3

外,其余样品变化很小(19.8~21.5)。并且,基性岩浆分异形成的埃达克岩通常和与其有成因联系的基性岩密切共生,而研究区目前还没有同时期(志留纪)基性岩报道。综上,可以认为研究区C型埃达克岩不可能是基性岩浆高压分异的产物。由La/Yb-La图(图8)可知,库尔良埃达克岩的岩浆主要是同一源区的地壳物质发生不同程度的熔融形成。

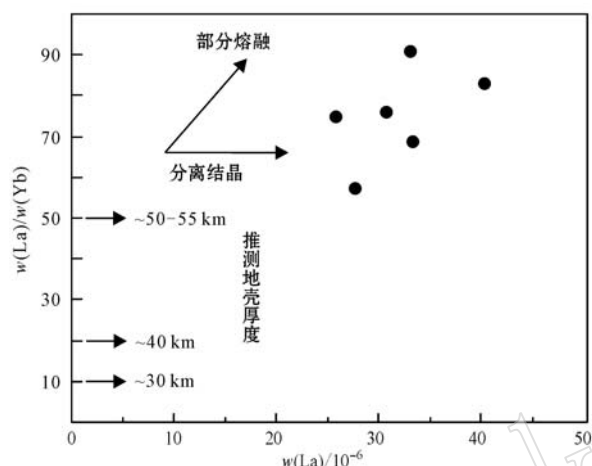


图8 库尔良花岗闪长岩La/Yb-La图(据Chung *et al.*, 2009)

Fig. 8 La/Yb-La diagram for the Kuerliang granodiorite from the West Kunlun Mountains

实验研究结果显示,加厚下地壳发生部分熔融的熔体一般 $Mg^\# < 45$ (Sen and Dunn, 1994; Rapp and Watson, 1995; Rapp *et al.*, 1999),而拆沉下地壳部分熔融的熔体,在上升过程中必然会与上地幔相互作用,导致岩石具有较高的MgO、Cr、Ni及 $Mg^\#$ (Gao *et al.*, 2004)。研究区埃达克岩 $Mg^\#$ 介于26.4~32.6之间,亏损相容元素Mg、Cr、Ni等,暗示岩浆演化过程中未与地幔发生大规模相互作用,表明其不可能是拆沉下地壳部分熔融的产物。岩浆混合形成的埃达克岩是由基性岩浆与酸性岩浆在地壳深处通过两单元混合形成岩浆后结晶形成,此类埃达克质岩石通常保留有岩浆发生混合作用的证据(许继峰等,2014),库尔良埃达克岩中未见暗色微粒包体,矿物中不发育不平行结构(如斜长石的反环带结构、暗色矿物包裹浅色矿物等),表明库尔良埃达克岩也不可能是岩浆混合的产物。综上可知,研究区埃达克岩为加厚的基性下地壳部分熔融的产物。

石榴石强烈富集重稀土元素,而角闪石相对更

富集中稀土元素,当主要残留相为石榴石时,熔体重稀土元素强烈亏损(Green, 1994),表现为 $Y/Yb > 10$, $(Ho/Yb)_N > 1.2$;但残留相主要为角闪石时,熔体重稀土元素相对平坦,表现为 $Y/Yb \approx 10$, $(Ho/Yb)_N \approx 1.2$ (葛小月等, 2002)。库尔良花岗闪长岩 Y/Yb 值介于16.1~21.5之间,均值为20.0, $(Ho/Yb)_N$ 介于1.2~1.9之间,均值为1.5,表明花岗闪长岩的残留相可能主要为石榴石。高的Sr/Y值和极弱的Eu异常反映岩浆源区不存在或仅存在极少量斜长石(Defant and Drummond, 1990)。微量元素地球化学特征表明,库尔良花岗闪长岩是加厚的基性下地壳脱水熔融到达榴辉岩相或角闪榴辉岩相的产物(Defant and Drummond, 1990, 1993; Martin, 1999)。

5.3 地球动力学意义

C型埃达克岩对追踪地质历史时期的地壳增厚事件具有重要意义。高温高压实验研究表明(Xiong *et al.*, 2005; Xiong, 2006; 熊小林等, 2007),金红石是导致埃达克质熔体Ti、Nb、Ta亏损的必要残留物,由金红石稳定压力(1.5 GPa)限制了埃达克质岩浆形成深度大于50 km,由金红石(TiO_2)在长英质熔体中溶解度限定埃达克质岩浆的形成温度为750~950℃。库尔良埃达克岩各样品的锆石饱和温度计算结果为774~790℃(表1),均值为781℃,达到了实验要求的埃达克质岩浆形成温度。可以认为,库尔良C型埃达克岩的出现标志着西昆仑地壳厚度在早中志留世已经超过50 km。

上述分析表明,库尔良C型埃达克岩为加厚下地壳部分熔融的产物,源区残留相为榴辉岩相或角闪榴辉岩相。该类型埃达克岩主要形成于如下3种构造环境:①活动陆缘地壳增厚区,如安第斯山脉(Atherton and Petford, 1993; Feeley and Hacker, 1995);②板块碰撞导致的地壳增厚区,如印支期秦岭造山带(秦江锋等, 2007; 张旗等, 2009);③高原底部,如青藏高原(Hou *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2005)。前人研究显示,库地-其曼于特洋在晚奥陶世一早志留世已经闭合(潘裕生, 1999; 崔建堂等, 2006; 廖世勇等, 2009; 郑玉壮等, 2013; 贾儒雅, 2013),随后进入板块碰撞阶段(廖世勇等, 2009; 于晓飞, 2010; 贾儒雅, 2013),晚志留世碰撞后松弛调整(董顺利等, 2013; 郑玉壮等, 2013),发育有代表去山根作用的煌斑岩脉(404 Ma)(周辉等, 2000)。研究区及周边地区在早古生代晚期存

在一期碰撞造山的变质峰期年龄(426~451 Ma)(周辉等, 2000; 计文化等, 2007; 罗金海, 2009)。在 $R_2 - R_1$ 构造环境判别图上, 数据点基本落在同碰撞花岗岩区域(图 9), 与其所处的构造环境相符。

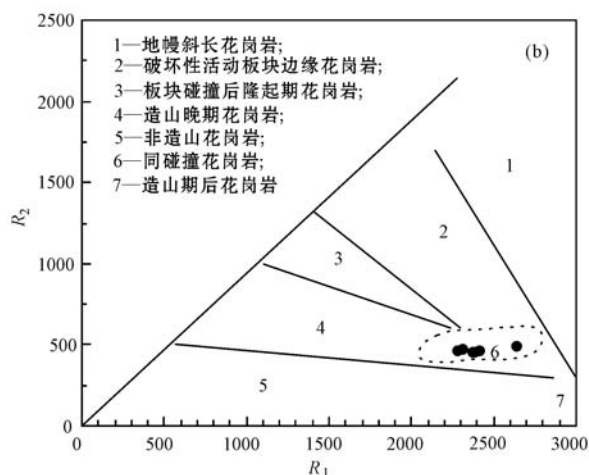


图 9 库尔良花岗闪长岩的 $R_2 - R_1$ 图解

Fig. 9 $R_2 - R_1$ diagram for the Kuerliang granodiorite from the West Kunlun Mountains

综合上述分析, 认为库尔良 429.6 Ma 埃达克岩形成于原特提斯洋消亡后板块碰撞导致地壳增厚的构造背景, 彼时原特提斯洋盆在库地-其曼于特一带已经消亡, 并已进入了板块碰撞、挤压造山阶段。库尔良埃达克岩为原特提斯洋闭合所引起的早古生代晚期碰撞造山作用的岩浆活动记录。

6 结论

(1) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析结果表明, 西昆文库尔良地区埃达克岩成岩年龄为 429.6 ± 1.4 Ma (MSWD=0.69), 为早中志留世岩浆活动产物。

(2) 库尔良埃达克岩高 SiO_2 、 Al_2O_3 、Sr、Sr/Y 值, 低 Y、Yb、MgO、Mg[#]、Cr、Ni, 轻稀土元素富集、重稀土元素亏损、轻重稀土元素分异明显, 无显著 Eu 异常, 具有较高的 K_2O 含量, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} \approx 1.2$, 是板块碰撞导致地壳加厚的构造背景下加厚下地壳部分熔融的产物, 源区残留相为榴辉岩相或角闪榴辉岩相。

(3) 库尔良埃达克岩为原特提斯洋闭合所引起的早古生代晚期碰撞造山作用的岩浆活动记录, 其出现暗示早中志留世西昆仑发生了一次地壳增厚事

件, 彼时地壳厚度大于 50 km。

References

- Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 362 (6 416): 144~146.
- Bourdon E, Eissen J P, Gutscher M A, *et al.* 2003. Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 205(3~4): 123~138.
- Bowden P, Batchelor R A, Chappell, *et al.* 1984. Petrological, geochemical and source critical for the classification of granitic rocks: adiscussion[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 35 (1): 1~11.
- Boynton W V and Bowden P. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite study[A]. *Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry*[C]. Elsevier, 63~114.
- Castillo P R. 2006. An overview of adakite petrogenesis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 257~268.
- Chen B, Jahn B M and Suzuki K. 2013. Petrological and Nd-Sr-Os isotopic constraints on the origin of high-Mg adakitic rocks from the North China Craton: Tectonic implications[J]. *Geology*, 41(1): 91~94.
- Chung S L, Chu M F, Ji J Q, *et al.* 2009. The nature and timing of crustal thickening in Southern Tibet: geochemical and zircon Hf isotopic constraints from post-collisional adakites[J]. *Tectonophysics*, 477(1~2): 36~48.
- Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, *et al.* 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet[J]. *Geology*, 31(11): 1 021~1 024.
- Cui Jiantang, Bian Xiaowei and Wang Genbao. 2006. Geological composition and evolution of the Western Kunlun[J]. *Geology of Shaanxi*, 24(1): 1~11(in Chinese with English abstract).
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347 (6 294): 662~665.
- Defant M J and Drummond M S. 1993. Mount St. Helens: potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc[J]. *Geology*, 21(6): 547~550.
- Dong Shunli, Li Zhong, Gao Jian, *et al.* 2013. Progress of studies on Early Paleozoic tectonic framework and crystalline rock geochronology in Altun-Qilian-Kunlun orogeny[J]. *Geological Review*, 59(4): 1~11.

- 731~746(in Chinese with English abstract).
- Fang Aimin, Li Jiliang, Liu Xiaohan, *et al.* 2003. Tectonic settings of the basic igneous rocks in the Kudi ophiolite zone of West Kunlun Mountains, Xinjiang Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 409~417 (in Chinese with English abstract).
- Feeley T C and Hacker M D. 1995. Intracrustal derivation of Na-rich andesitic and dacitic magmas: an example from volcan Ollagüe, Andean central volcanic zone[J]. *The Journal of Geology*, 103(2): 213~225.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. *Nature*, 432(7019): 892~897.
- Ge Xiaoyue, Li Xianhua, Chen Zhigang, *et al.* 2002. Geochemistry and petrogenesis of Jurassic high Sr and low Y granitoids in eastern China: Constrains on crustal thickness[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 474~480(in Chinese).
- Green T H. 1994. Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis—Sedona 16 years later[J]. *Chemical Geology*, 117(1~4): 1~36.
- Guo F, Nakamura E, Fan W, *et al.* 2007. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing, Yanji Area, NE China[J]. *Journal of Petrology*, 48(4): 661~692.
- Han Fanglin, Cui Jiantang, Ji Wenhua, *et al.* 2002. Discovery of the Qimanyute ophiolite in the West Kunlun and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(8): 573~578(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, *et al.* 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1~2): 139~155.
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Scienc*, 8(5): 523~548.
- Ji Wenhua, Zhou Hui, Li Rongshe, *et al.* 2007. The deformation age of Palaeozoic-Mesozoic tectonic along north Xin-Zang road in West Kunlun[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 671~680(in Chinese with English abstract).
- Jia Ruya. 2013. Petrogenesis and Tectonic Implications of Early Silurian Qiukesu Granites and Their Potassic Microgranular Enclaves, Western Kunlun Orogen, NW Tibetan Plateau[D]. Nanjing University (in Chinese with English abstract).
- Kay R W and Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism[J]. *Tectonophysics*, 219(1~3): 177~189.
- Kay R W and Kay S M. 2002. Andean adakites: Three ways to make them[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 303~311.
- Kay S M, Ramos V A and Marques M. 1993. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South American[J]. *The Journal of Geology*, 101(6): 703~714.
- Li Dewei. 2008. Three-stage tectonic evolution and metallogenic evolution in the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent area[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 723~742(in Chinese with English abstract).
- Li Rongshe, Ji Wenhua, Zhao Zhenming, *et al.* 2007. Progress in the study of the Early Paleozoic Kunlun orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(4): 373~382(in Chinese with English abstract).
- Li Tianfu and Zhang Jianxin. 2014. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages of websterite and basalt in Kudi ophiolite and the implication, West Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2393~2401(in Chinese with English abstract).
- Liao Shiyong, Jiang Yaohui and Yang Wanzhi. 2009. Mineralogical study on magmatic epidote from Datong pluton, and its implication for tectonic setting of Western Kunlun region[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(1): 49~55(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537~571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 257(1): 34~43.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronological Center, Special Publication, 4: 1~71.
- Luo Jinhai, Che Zicheng, Liu Liang, *et al.* 2009. Early Silurian tectonism and its regional geological significance in the northern West Kunlun orogeny, NW China[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(3): 517~521(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Ke Shan and Chen Hongwei. 2002. Characteristics, petrogenesis and tectonic implications of adakite[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(7): 436~440(in Chinese with English abstract).
- Ma C, Li Z, Ehlers C, *et al.* 1998. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China[J]. *Lithos*, 45(1~4): 431~456.
- Macpherson C G, Dreher S T and Thirlwall M F. 2006. Adakites with-

- out slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3~4): 581~593.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids[J]. *Lithos*, 46(3): 411~429.
- Müntener O, Kelemen P B and Grove T L. 2001. The role of H₂O during crystallization of primitive arc magmas under uppermost mantle conditions and genesis of igneous pyroxenites: An experimental study[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(6): 643~658.
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, *et al.* 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 36(1): 1~28(in Chinese with English abstract).
- Pan Yusheng. 1999. Formation and uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 153~163(in Chinese with English abstract).
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63~81.
- Petford N and Altherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith[J]. *Journal of Petrology*, 37(6): 1491~1521.
- Qian Qing, Zhong Sunlin, Li Tongyi, *et al.* 2002. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Badaling high Ba-Sr granitoids: a comparison of igneous rocks from North China and the Dabie-Sulu Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 275~292(in Chinese with English abstract).
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong and Li Yongfei. 2007. Genesis of the Indosinian Guangtoushan adakitic biotite plagiogranite in the Mianxian-Lueyang(Mianlue) suture, South Qinling, China, and its tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(4): 466~471(in Chinese with English abstract).
- Rapp P R, Shimizu N, Norman M D, *et al.* 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa [J]. *Chemical Geology*, 160(4): 335~356.
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Rapp R P, Xiao L and Shimizu N. 2002. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 293~302.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 184(1~2): 123~138.
- Rudnick R L. 1995. Making continental crust [J]. *Nature*, 378(6557): 571~577.
- Sen C and Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117(4): 394~409.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematic of oceanic basalts: Implication for the mantle composition and process[A]. Saunderson A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*[C]. Geological Society of London Special Publication, 42(1): 313~345.
- Turner S, Arnaud N, Liu J, *et al.* 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts[J]. *Journal of Petrology*, 37(1): 45~71.
- Wang Chao, Liu Liang, He Shiping, *et al.* 2013. Early Paleozoic magmatism in west Kunlun: Constraints from geochemical and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of the Bulong granite[J]. *Chinese Journal of Geology*, 48(4): 997~1014(in Chinese with English abstract).
- Wang Q, McDermott F, Xu J F, *et al.* 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: lower-crustal melting in an intracontinental setting [J]. *Geology*, 33(6): 465~468.
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, *et al.* 2007. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle eastern China: Implication for Cu-Au mineralization[J]. *The Journal of Geology*, 115(2): 149~161.
- Wang Qiang, Xu Jifeng and Zhao Zhenhua. 2001b. The summary and comment on research on a new kind of igneous rock-adakite[J]. *Advance in Earth Sciences*, 16(2): 201~208(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, *et al.* 2001a. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrites, Anhui Province, China [J]. *Geochimica*, 30(4): 353~362(in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Zhang Qi and Qian Qing. 2000. Adakite: Geochemical characteristics and tectonic significances[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 251~256(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhihong, Li Jiliang, Hou Quanlin, *et al.* 2000. Geology, geochemistry and genesis of the Kuda ophiolite, Western Kunlun, China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 151~160(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genetic mineralogy of zircon and its constraints on the interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589~1604(in Chinese)

- Xiao Xuchang, Wang Jun, Su Li. *et al.* 2003. A further discussion of the Kuda ophiolite, West Kunlun, and its tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 22(10): 745~750(in Chinese with English abstract).
- Xiong X L. 2006. Trace element evidence for the growth of early continental crust by melting of rutile-bearing hydrous eclogite[J]. Geology, 34(11): 945~948.
- Xiong X L, Adam J and Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis[J]. Chemical Geology, 218(3~4): 339~359.
- Xiong Xiaolin, Han Jiangwei and Wu Jinhua. 2007. Phase equilibrium and trace element partitioning between minerals and melt in the metabasalt system: constraints on the formation conditions of TTG/adakite magmas and the growth of early continental crust[J]. Earth Science Frontiers, 14(2): 149~158(in Chinese with English abstract).
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J, *et al.* 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: partial melting of delaminated lower continental crust[J]. Geology, 30(12): 1111~1114.
- Xu Jifeng, Wu Jianbin, Wang Qiang, *et al.* 2014. Research Advances of Adakites and Adakitic Rocks in China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 33(1): 6~13(in Chinese with English abstract).
- Xu W L, Wang Q H, Wang D Y, *et al.* 2006. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 27(2): 230~240.
- Yu Xiaofei. 2010. Study on Regional Metallogenic Laws in Western Kunlun Orogenic belt[D]. Jilin University(in Chinese with English abstract).
- Yuan Chao, Sun Min, Li Jiliang, *et al.* 2002. Tectonic background of the Kuda ophiolite, western Kunlun: New constraints from boninite series rocks[J]. Geochimica, 31(1): 43~48(in Chinese with English abstract).
- Yuan Chao, Sun Min, Xiao Wenjiao, *et al.* 2003. Subduction polarity of the prototethys: insights from the Yirba pluton of the western Kunlun range, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 19(3): 399~408(in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, *et al.* 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS[J]. Chemical Geology, 247(1~2): 100~118.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, *et al.* 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 28(3): 353~370.
- Zhang Chuanlin, Yu Haifeng, Shen Jialin, *et al.* 2004. Zircon SHRIMP age determination of the giant-crystal gabbro and basalt in K(u)da, West Kunlun: Dismembering of the K(u)da ophiolite[J]. Geological Review, 50(6): 639~643(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2011. Reappraisal of the origin of C-type adakitic rocks from East China[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 30(4): 739~747(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erqi, *et al.* 2001a. An East China plateau in Mid-Late Yanshanian Period: Implication from adakites[J]. Chinese Journal of Geology, 36(2): 248~255(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, *et al.* 2001b. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 17(2): 236~244(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Yin Xianming, Yin Yong, *et al.* 2009. Issues on metallogenesis and prospecting of gold and copper deposits related to adakite and Himalayan type granite in west Qinling[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(12): 3103~3122(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yuzhuang, Yang Weiwen and Wang Teng. 2013. Geochemistry and geological significance of intrusive rocks of Early Paleozoic in Western Kunlun, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 46(4): 57~65(in Chinese with English abstract).
- Zhou Hui, Chu Zhuyin, Li Jiliang, *et al.* 2000. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of ductile shear zone in Kuda, western Kunlun, Xinjiang[J]. Scientia Geologica Sinica, 35(2): 233~239(in Chinese with English abstract).
- Zhou Hui and Li Jiliang. 2000. Age and geochemical features of lamprophyres in Kuda, western Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 16(3): 380~384(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Duan Liping, *et al.* 2003. Some problems in the research of adakite[J]. Northwestern Geology, 36(2): 13~19(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 崔建堂, 边小卫, 王根宝. 2006. 西昆仑地质组成与演化[J]. 陕西地质, 24(1): 1~11.
- 董顺利, 李忠, 高剑, 等. 2013. 阿尔金-祁连-昆仑造山带早古生代构造格架及结晶岩年代学研究进展[J]. 地质论评, 59(4): 731~746.
- 方爱民, 李继亮, 刘小汉, 等. 2003. 新疆西昆仑库地混杂带中基性火山岩构造环境分析[J]. 岩石学报, 19(3): 409~417.
- 葛小月, 李献华, 陈志刚, 等. 2002. 中国东部燕山期高Sr低Y型中

- 酸性火成岩的地球化学特征及成因:对中国东部地壳厚度的制约[J]. 科学通报, 47(6): 474~480.
- 韩芳林, 崔建堂, 计文化, 等. 2002. 西昆仑其曼于特蛇绿混杂岩的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 21(8): 573~578.
- 计文化, 周辉, 李荣社, 等. 2007. 西昆仑新藏公路北段古-中生代多期次构造-热事件年龄确定[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 32(5): 671~680.
- 贾儒雅. 2013. 西昆仑造山带丘克苏花岗岩与暗色微粒包体岩石成因及其构造意义(硕士论文)[D]. 南京大学.
- 廖世勇, 姜耀辉, 杨万志. 2009. 西昆仑大同岩体岩浆成因绿帘石矿物学研究及其对岩体形成构造环境的制约[J]. 矿物学报, 29(1): 49~55.
- 李德威. 2008. 青藏高原及邻区三阶段构造演化与成矿演化[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 33(6): 723~742.
- 李荣社, 计文化, 赵振明, 等. 2007. 昆仑早古生代造山带研究进展[J]. 地质通报, 26(4): 373~382.
- 李天福, 张建新. 2014. 西昆仑库地蛇绿岩的二辉辉石岩和玄武岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义[J]. 岩石学报, 30(8): 2393~2401.
- 罗金海, 车自成, 刘良, 等. 2009. 西昆仑北带早志留世构造作用及其区域地质意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 517~521.
- 罗照华, 柯珊, 谌宏伟. 2002. 埃达克岩的特征, 成因及构造意义[J]. 地质通报, 21(7): 436~440.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1~28.
- 潘裕生. 1999. 青藏高原的形成与隆升[J]. 地学前缘, 6(3): 153~163.
- 钱青, 钟孙霖, 李通艺, 等. 2002. 八达岭基性岩和高 Ba-Sr 花岗岩地球化学特征及成因探讨: 华北和大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩的对比[J]. 岩石学报, 18(3): 275~292.
- 秦江锋, 赖绍聪, 李永飞. 2007. 南秦岭勉县-略阳缝合带印支期光头山埃达克质花岗岩的成因及其地质意义[J]. 地质通报, 26(4): 466~471.
- 王超, 刘良, 何世平, 等. 2013. 西昆仑早古生代岩浆作用过程: 布隆花岗岩地球化学和锆石 U-Pb-Hf 同位素组成研究[J]. 地质科学, 48(4): 997~1014.
- 王强, 许继峰, 赵振华. 2001b. 一种新的火成岩——埃达克岩的研究综述[J]. 地球科学进展, 16(2): 201~208.
- 王强, 赵振华, 熊小林, 等. 2001a. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据[J]. 地球化学, 30(4): 353~362.
- 王焰, 张旗, 钱青. 2000. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质科学, 35(2): 251~256.
- 王志洪, 李继亮, 侯泉林, 等. 2000. 西昆仑库地蛇绿岩地质、地球化学及其成因研究[J]. 地质科学, 35(2): 151~160.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589~1604.
- 肖序常, 王军, 苏犁, 等. 2003. 再论西昆仑库地蛇绿岩及其构造意义[J]. 地质通报, 22(10): 745~750.
- 熊小林, 韩江伟, 吴金花. 2007. 变质玄武岩体系相平衡及矿物-熔体微量元素分配: 限定 TTG/埃达克岩形成条件和大陆壳生长模型[J]. 地学前缘, 14(2): 149~158.
- 许继峰, 郭建斌, 王强, 等. 2014. 埃达克岩与埃达克质岩在中国的研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 33(1): 6~13.
- 袁超, 孙敏, 李继亮, 等. 2002. 西昆仑库地蛇绿岩的构造背景: 来自玻安岩系岩石的新证据[J]. 地球化学, 31(1): 43~48.
- 袁超, 孙敏, 肖文交, 等. 2003. 原特提斯的消减极性: 西昆仑 128 公里岩体的启示[J]. 岩石学报, 19(3): 399~408.
- 于晓飞. 2010. 西昆仑造山带区域成矿规律研究(博士论文)[D]. 吉林大学.
- 张传林, 于海锋, 沈家林, 等. 2004. 西昆仑库地伟晶辉长岩和玄武岩锆石 SHRIMP 年龄: 库地蛇绿岩的解体[J]. 地质论评, 50(6): 639~643.
- 张旗. 2011. 关于 C 型埃达克岩成因的再探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 30(4): 739~747.
- 张旗, 钱青, 王二七, 等. 2001a. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示[J]. 地质科学, 36(2): 248~255.
- 张旗, 王焰, 钱青, 等. 2001b. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 17(2): 236~244.
- 张旗, 殷先明, 殷勇, 等. 2009. 西秦岭与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的金铜成矿及找矿问题[J]. 岩石学报, 25(12): 3103~3122.
- 郑玉壮, 杨维文, 王腾. 2013. 新疆西昆仑早古生代侵入岩地球化学特征及地质意义[J]. 西北地质, 46(4): 57~65.
- 周辉, 储著银, 李继亮, 等. 2000. 西昆仑库地韧性剪切带的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄[J]. 地质科学, 35(2): 233~239.
- 周辉, 李继亮. 2000. 西昆仑库地煌斑岩的年代学及地球化学特征[J]. 岩石学报, 16(3): 380~384.
- 朱弟成, 潘桂棠, 段丽萍, 等. 2003. 埃达克岩研究的几个问题[J]. 西北地质, 36(2): 13~19.