

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.01.003

西昆仑大红柳滩黑云母二长花岗岩岩石成因： 来自锆石 U-Pb 年龄及 Li-Hf 同位素的证据

丁坤¹, 梁婷^{1,2}, 周义¹, 凤永刚^{1,2}, 张泽¹, 丁亮¹, 李侃³

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学成矿作用及其动力学实验室, 陕西 西安 710054;
3. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054)

摘要:大红柳滩岩体位于西昆仑造山带东段, 主要由黑云母二长花岗岩、二长花岗岩及二云母花岗岩组成。笔者对大红柳滩岩体东南部的黑云母二长花岗岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 测得黑云母二长花岗岩的侵位年龄分别为 $(214 \pm 1.8) \text{ Ma}$, 说明大红柳滩岩体为印支晚期岩浆活动的产物。大红柳滩岩体具有高 $\delta^7\text{Li}$ ($0.76\text{‰} \sim 3.25\text{‰}$) 和低 Li ($5.04 \times 10^{-6} \sim 52.22 \times 10^{-6}$) 同位素地球化学特征; 黑云母二长花岗岩样品的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-1.86 \sim 2.16$, 二阶段模式年龄为 $1113 \sim 1368 \text{ Ma}$; 在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -锆石 U-Pb 年龄图解中, 所有数据点均落在球粒陨石演化线附近。综合研究表明, 大红柳滩岩体的原始岩浆是由地幔与中元古代地壳 2 个单元形成的混合岩浆。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; Li-Hf 同位素; 岩石成因; 大红柳滩岩体; 西昆仑

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2020)01-0024-11

Petrogenesis of Dahongliutan Biotite Monzogranite in Western Kunlun Orogen: Evidence from Zircon U-Pb Age and Li-Hf Isotope

DING Kun¹, LIANG Ting^{1,2}, Zhou Yi¹, FENG Yonggang^{1,2}, ZHANG Ze¹, DING Liang¹, LI Kan³

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. The Laboratory of Mineralization and Dynamics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Xi'an Center of China Geological Survey/Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The Dahongliutan pluton is located in the eastern part of the West Kunlun Orogenic Belt and is mainly consisted of biotite monzonitic granite, monzonitic granite and two mica granite. The Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of biotite monzonitic granite in the southeastern part of Dahongliutan intrusion shows that the emplacement age of biotite monzonitic granite is $214 \pm 1.8 \text{ Ma}$, indicating that the Dahongliutan pluton was formed in the Late Indosinian. The Dahongliutan pluton has higher value of $\delta^7\text{Li}$ ($0.76\text{‰} \sim 3.25\text{‰}$) and lower content of lithium ($5.04 \sim 52.22 \times 10^{-6}$). The biotite monzonitic granite has zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of -1.86 to 2.16 , and the two-stage mode age ranged between 1113 and 1368 Ma . In the $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. age diagram, all

收稿日期: 2019-08-14; 修回日期: 2019-11-18

基金项目: 中国地质调查局“中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务”之“中国锡矿产地质总结研究”(DD20160346), 中国地质调查局项目“西昆仑铁铅锌资源基地调查与勘查示范”(DD20160004), 国家重点研发计划项目“深地资源勘查开采”(2017YFC0602701), 创新团队培育项目“热液成矿作用及其动力学背景”(300102279401)联合资助

作者简介: 丁坤(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事矿床学方向的研究工作。E-mail: 1003492885@qq.com

the data points lie near the chondrite evolution line. The comprehensive research shows that the Dahongliutan pluton has derived from a mixed magma of mesoproterozoic crust and mantle.

Keywords: zircon U-Pb age; Li-Hf isotope composition; rock genesis; Dahongliutan pluton; West Kunlun orogen

西昆仑造山带位于青藏高原的西北部,处于古亚洲构造域和特提斯构造域的结合部位,区内岩浆活动频繁,花岗岩类岩石分布广泛。西昆仑造山带在印支期伴随着古特提斯洋的演化,由碰撞挤压向后碰撞伸展转换作用下,沿着麻扎-康西瓦缝合带发生了强烈的中酸性岩浆活动(张传林等,2007)。研究这些花岗质岩体的特征、成因及演化对于理解造山带大陆演化具有重要的指示意义。

大红柳滩岩体分布于甜水海-喀喇昆仑地体北部,麻扎-康西瓦缝合带南侧,北与大红柳滩断裂毗邻,是三十里营房-奇台达坂花岗岩带的主要岩体之一(张泽等,2019)。前人对大红柳滩岩体进行了研究,新疆地矿局第二地质大队(1985)首次报道了大红柳滩岩体年代学资料,认为其形成于晚白垩世;乔耿彪等(2015)对大红柳滩二长花岗岩进行了岩相学、岩石地球化学及年代学研究,认为大红柳滩二长花岗岩形成于晚三叠世,属于高分异的 S 型花岗岩,在同碰撞环境下,经历了一定程度的壳源混染;魏小鹏等(2017)认为大红柳滩岩体为复式岩体,是同一期构造岩浆事件的产物,在古特提斯洋闭合之后的同碰撞环境下由壳源物质部分熔融形成;ZHANG et al. (2018)测得大红柳滩岩体成岩年龄为 ~ 217.5 Ma,并认为是后碰撞环境下壳源物质部分熔融的产物。大红柳滩稀有金属伟晶岩矿床位于西昆仑造山带东段麻扎-康西瓦断裂以南,是一个大型的锂-铍-铌-钽矿床(闫庆贺等,2017),已探获 Li_2O 资源量 40 万 t 以上,还有大量伟晶岩脉未曾评价,显示出巨大的找矿潜力(李侃,2017)。综上所述,前人对大红柳滩岩体开展了部分研究工作,但有 2 个问题仍需探讨:①大红柳滩岩体各岩相成岩时代是否一致?是否存在多期次岩浆活动?②前人认为大红柳滩岩体岩浆来源为壳源,但是本次研究发现样品中发育闪长质包体,且位于该区域北部的慕士塔格岩体及上其木干岩体与大红柳滩岩体形成于相似的区域地质背景,成岩时代接近,岩石中也有暗色包体产出。前人认为均为壳幔岩浆混合成因,那么大红柳滩岩体在源区或演化过程中是否存在与幔源物质的交换?因此,笔者在详细的室内外地质研究工作

的基础上,首次采用全岩 Li 同位素分析方法,并结合 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及锆石 Hf 同位素数据,系统地为该区花岗岩形成时代及源区研究提供新的资料。

1 地质背景及岩相学特征

西昆仑造山带地处青藏高原西北缘和塔里木地块结合部,是多次弧-陆碰撞形成的复合造山带(图 1)。研究表明,西昆仑造山带演变复杂,包含西昆仑北地体、西昆仑南地体、甜水海-喀喇昆仑地体等 3 个构造单元(刘函等,2010;许志琴等,2007)。大红柳滩岩体位于新疆维吾尔自治区和田县城西南约为 150 km 处,交通方便,新藏公路通过矿区北侧喀拉喀什河北岸。大地构造位置隶属西昆仑造山带内的甜水海-喀喇昆仑北部,麻扎-康西瓦缝合带南侧,北与大红柳滩断裂毗邻。大红柳滩花岗岩围岩为三叠纪巴颜喀拉山岩群和古元古代康西瓦岩群。岩体呈岩基状侵入于围岩中(图 2),岩体多呈长条形或椭圆形,长轴位于北西-南东向,与该区的大红柳滩断裂带平行,并沿大红柳滩断裂带侵位(乔耿彪等,2015)。岩体具有明显的岩相分带,岩性主要有黑云母二长花岗岩、二长花岗岩及二云母花岗岩(图 3)。其中,二云母花岗岩位于大红柳滩岩体西南部,黑云母二长花岗岩和二长花岗岩位于其西北部。花岗伟晶岩与这些岩体具有成因联系,常沿这些岩体的外接触带呈带状分布,含锂辉石花岗伟晶岩矿脉顺层贯入于其中(图 3c)。

黑云母二长花岗岩呈灰白色,二长结构、不等粒半自形粒状结构,主要矿物有钠长石(40%)、石英(35%)、黑云母(10%)、微斜长石(13%);副矿物有磷灰石、锆石、绿泥石。斜长石多呈板状分布,粒径可达 $2.3\text{ mm} \times 0.9\text{ mm}$,见环带,其中核部蚀变严重,钠长石发生高岭土化、钠黝帘石化。斜长石呈他形粒状分布,包嵌微斜长石构成二长结构,微斜长石也见包嵌黑云母、石英。墨绿色黑云母呈鳞片状分布,黑云母包嵌他形锆石(图 3b),黑云母发生绿泥石化(图 3a)。

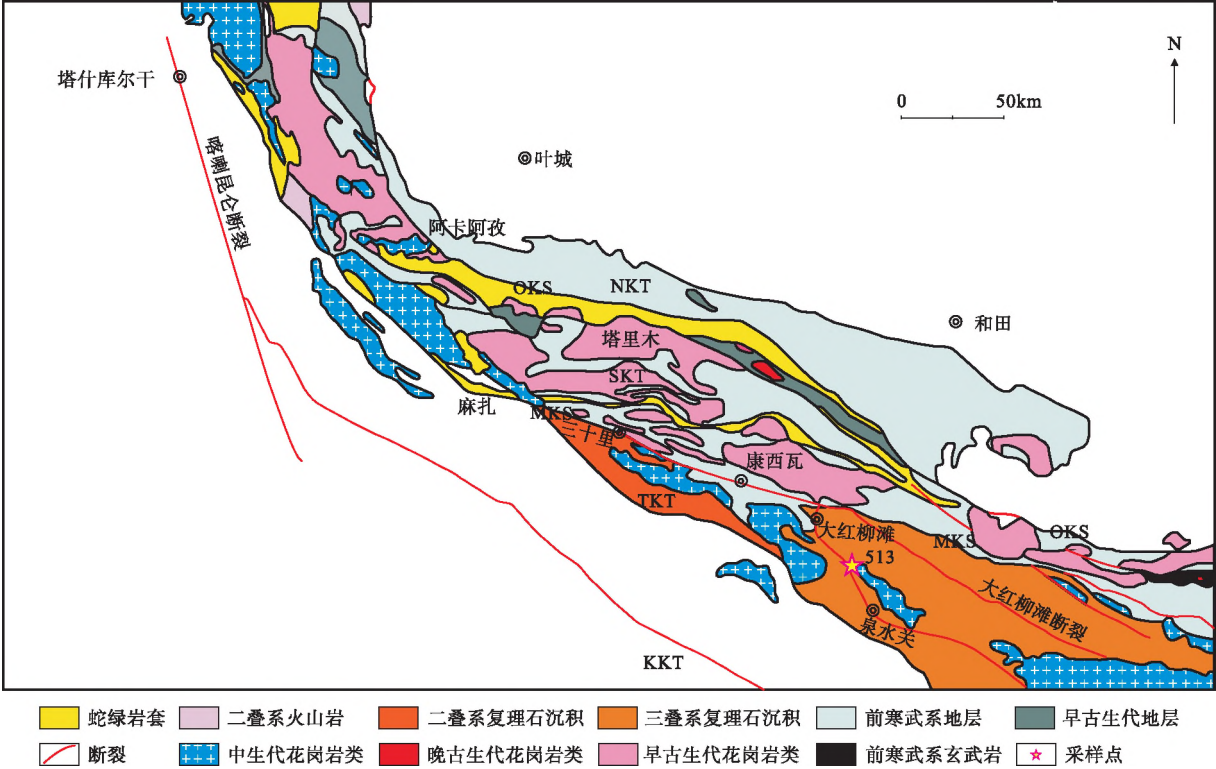


图 1 西昆仑花岗岩分布简图(底图据文献 WANG et al. ,2016)
Fig. 1 Schematic diagram of the distribution of the West Kunlun granite

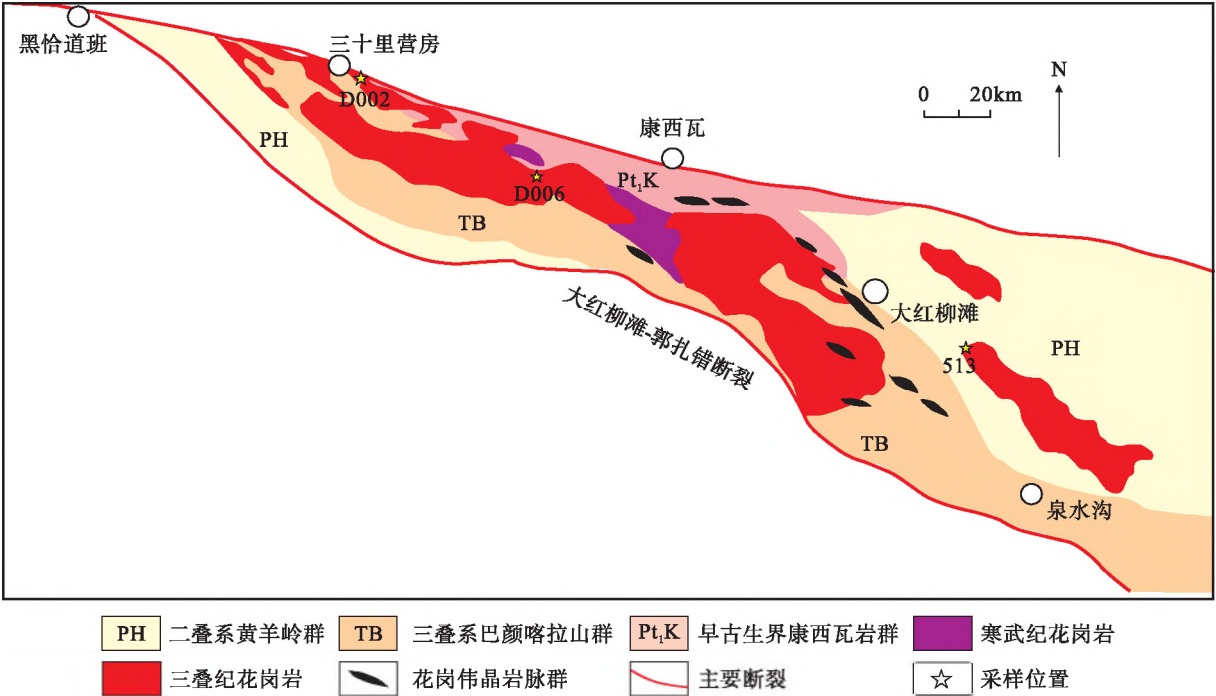
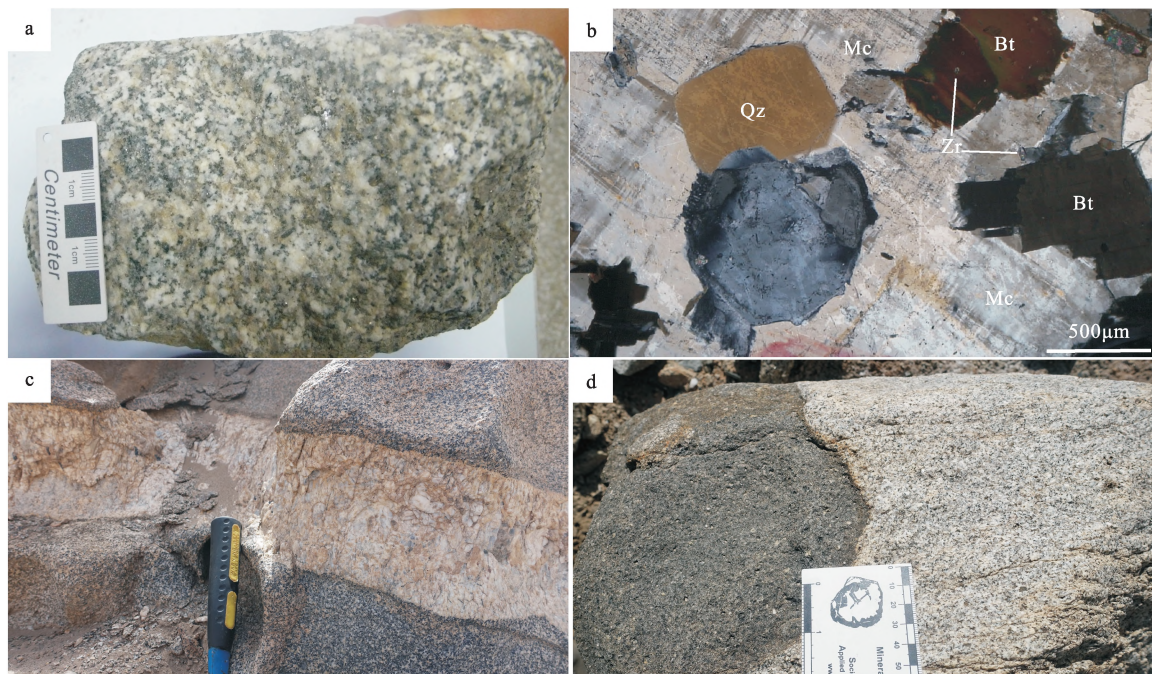


图 2 大红柳滩矿区大地构造位置图
Fig. 2 Geotectonic location map of the Dahongliutan area



(a), (b). 黑云母二长花岗岩; (c). 黑云母二长花岗岩被钠长石伟晶岩脉穿插; (d). 黑云母二长花岗岩中的暗色包体;

Mc. 微斜长石; Qz. 石英; Ab. 钠长石; Bt. 黑云母; Zr. 锆石

图3 大红柳滩岩体手标本及岩石镜下照片

Fig. 3 The specimens and microscopic photographs in Dahongliutan granodiorite

2 样品采集及分析测试

本次用于定年的样品采自大红柳滩黑云母二长花岗岩, 样号为 513。所有样品均为新鲜的或蚀变较弱的岩石。将所采集样品进行逐级破碎、过筛, 然后在双目镜下反复挑选粒径为 40~60 目、纯度大于 99% 的单矿物锆石, 单矿物的挑选在河北省廊坊区域地质调查研究院完成。挑选出具有代表性的锆石, 在西北大学用环氧树脂制靶、打磨和抛光。锆石阴极发光(CL)照相在长安大学成矿作用及其动力学实验室完成。

锆石 U-Pb 同位素定年在长安大学成矿作用及其动力学实验室利用 LA-ICP-MS 分析仪完成。通过 Analyte Excite 193 nm 气态准分子激光剥蚀系统与安捷伦 7700E 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析仪联机进行。所测元素激光束斑直径为 35 μm , 频率为 5 Hz, 剥蚀物气溶胶由氦气送入 ICP-MS 完成测试。测试过程中以标准锆石 91500 作为外标, 校正仪器质量歧视与元素分馏。详细的仪器操作条件和数据处理方法同文献(LIU

et al., 2010)。数据处理采用 ICPMSDataCal 软件(LIU et al., 2010), 年龄计算采用 Isoplot(3.7 版)软件(LUDWIG, 2010)。

锆石 Lu-Hf 同位素测试是在西北大学大陆动力学国家重点实验室 Nu Plasma II MC-ICPMS 多接收等离子体质谱和 RESOLUTION M-50, ASI 激光剥蚀系统上进行的。实验过程中采用高纯氦气作为剥蚀物质载气, 束斑为 43 μm 。

在分析过程中, 采用国际标准锆石样品 91500 和 Mudtank 作为参考物质, 每 8 个样品插入一组国际标样, 分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置, 详细的分析方法和仪器参数见文献(YUAN et al., 2008)。

锂同位素的化学分离和测试是利用 Neptune Plus 多接收器电感耦合等离子体质谱测定 Li 同位素比值, 使用标准-样品交叉法(SSB)校正仪器的质量分馏。在测试样品之前, 使用 L-SVEC 100 ng/mL 标准溶液对仪器进行参数优化, 以达到最大灵敏度。将化学分离后的样品引入质谱, 使得 ^7Li 的信号强度为 3 V 左右, 使用自由雾化器进样方式(BRANT et al., 2012)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

黑云母二长花岗岩样品中锆石多为长柱状,长约 120~300 μm ,长宽比约为 1:1~3:1。锆石大多具有较低的 Th 和较高的 U 含量,分别为 $71.2 \times 10^{-6} \sim 646.0 \times 10^{-6}$ 和 $154.7 \times 10^{-6} \sim 1\,968.3 \times 10^{-6}$ 。Th/U 值变化范围为 0.176 03~0.613 546。在 CL 图像上,锆石可见岩浆振荡环带(图 4),属于典型的岩浆锆石。该样品锆石 U-Pb 年龄变化范围较小, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄测试结果变化范围为 77.9~442.6 Ma。加权平均年龄为 $(214 \pm 1.8) \text{ Ma}$ ($N=31$, $\text{MSWD}=0.56$)(图 5、表 1)

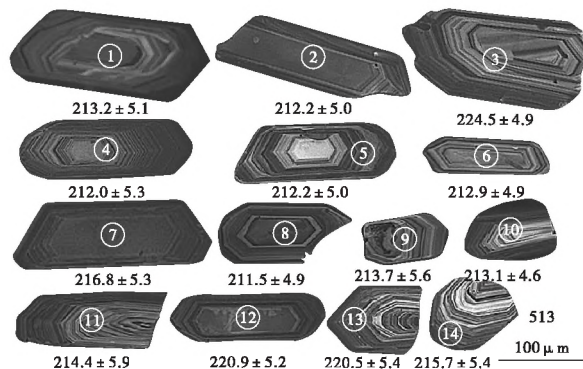


图 4 大红柳滩黑云母二长花岗岩锆石 CL 图像

Fig. 4 Zircon CL image of biotite monzogranite in the Dahongliutan pluton

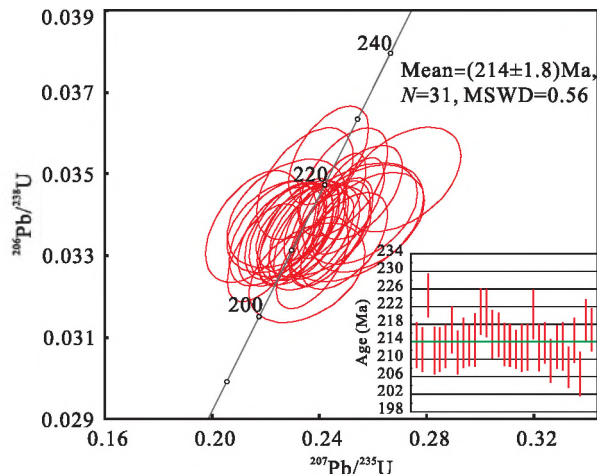


图 5 大红柳滩黑云母二长花岗岩 U-Pb 年龄图

Fig. 5 U-Pb age of biotite monzogranite in the Dahongliutan pluton

3.2 Lu-Hf 同位素组成

为进一步研究大红柳滩岩体的岩浆源区和演化过程,对已完成 U-Pb 测年的黑云母二长花岗岩(513)样品进行锆石 Hf 同位素测定。所有测试点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.000 62~0.001 660 小于 0.002,表明锆石在岩体形成后基本没有明显的放射性 Hf 产生,因而可以用锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值探索岩体形成时的成因信息(吴福元等,2007)。

在大红柳滩黑云母二长花岗岩的样品(513)中选取 17 个测试点,测点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值变化于 0.282 593~0.282 704(表 2),平均值为 0.282 650;对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化在 -1.86~2.16 之间,平均值为 0.2;单阶段 Hf 模式年龄(t_{MD1})为 776~946 Ma,平均值为 859 Ma;亏损地幔二阶段模式年龄 t_{DM2} 变化范围为 1 113~1 368 Ma,平均值为 1 237 Ma。

3.3 Li 同位素及 Li 含量组成

大红柳滩 7 件花岗岩样品的 $\delta^7\text{Li}$ 含量为 0.76‰~3.25‰,平均为 2.53‰;Li 含量变化范围介于 $5.76 \times 10^{-6} \sim 52.22 \times 10^{-6}$,均值为 31.9(表 3)。

4 讨论

4.1 成岩时代

近年来,西昆仑造山带花岗岩类年代学研究表明,西昆仑造山带花岗岩是一个多阶段侵入的复式岩基(乔耿彪等,2015),虽然从早古生代到中生代,该地区不同地质时期的花岗岩均有出露,但华力西晚期-印支期-燕山早期是西昆仑造山带岩浆活动的高峰期(康磊等,2012)。中生代印支期花岗质岩带是区内规模最大的构造-岩浆岩带(韩芳林,2006)。根据西昆仑地区不同岩体成岩年龄可知(表 4),258~200 Ma 花岗质岩体组成了该区域规模巨大的岩浆岩带,反映出西昆仑地区不同区域由挤压-伸展阶段的岩浆活动时间的差异。印支期花岗岩体的年代学研究可为理解西昆仑造山带印支期花岗岩的时空分布及成岩成矿过程提供重要依据。

大红柳滩岩体位于西昆仑造山带东段,前人(乔耿彪等,2015;魏小鹏等,2017;ZHANG et al., 2018)曾对大红柳滩岩体开展过同位素定年工作,年龄结果主要为 $(209.6 \pm 1.5) \text{ Ma} \sim (220 \pm 2.2) \text{ Ma}$ 。笔者对大红柳滩黑云母二长花岗岩开展了锆石 LA-ICP-MSU-Pb 定年工作,所获得的同位素年龄为

表 1 大红柳滩黑云母二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果表

Tab. 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotope analysis results of biotite monzogranite in the Dahongliutan pluton

样号	浓度(10^{-6})			同 位 素 比 值						年 龄(Ma)				谐和率			
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$				
					1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ					
513-1	20.26	158.13	571.98	0.28	0.050 3	0.002 1	0.232 8	0.009 8	0.033 6	0.000 8	205.6	98.1	212.5	8.1	213.2	5.1	98%
513-2	19.79	180.61	551.89	0.33	0.048 8	0.002 2	0.226 2	0.010 9	0.033 5	0.000 8	139.0	105.5	207.0	9.0	212.2	5.0	97%
513-3	26.23	137.80	741.41	0.19	0.049 6	0.001 9	0.243 6	0.009 8	0.035 4	0.000 8	176.0	88.9	221.4	8.0	224.5	4.9	98%
513-4	14.54	202.68	354.86	0.57	0.051 3	0.002 3	0.238 2	0.011 3	0.033 4	0.000 9	253.8	101.8	217.0	9.3	212.0	5.3	97%
513-5	27.51	169.76	813.81	0.21	0.050 0	0.001 9	0.231 3	0.009 2	0.033 5	0.000 8	194.5	88.9	211.3	7.6	212.2	5.0	99%
513-6	42.35	324.51	1 216.43	0.27	0.048 8	0.002 0	0.227 0	0.009 8	0.033 6	0.000 8	200.1	94.4	207.7	8.1	212.9	4.9	97%
513-7	34.24	210.55	1 015.58	0.21	0.051 7	0.001 7	0.244 7	0.008 4	0.034 2	0.000 8	333.4	77.8	222.3	6.9	216.8	5.3	97%
513-8	46.12	646.01	1 180.66	0.55	0.053 5	0.002 0	0.249 4	0.010 7	0.033 4	0.000 8	350.1	87.0	226.1	8.7	211.5	4.9	93%
513-9	10.52	124.15	286.11	0.43	0.047 4	0.003 0	0.215 5	0.011 8	0.033 7	0.000 9	77.9	135.2	198.1	9.9	213.7	5.6	92%
513-10	11.75	131.53	309.73	0.42	0.051 3	0.003 0	0.238 1	0.014 1	0.033 6	0.000 7	253.8	130.5	216.9	11.6	213.1	4.6	98%
513-11	5.84	71.22	154.70	0.46	0.055 3	0.004 0	0.252 9	0.017 2	0.033 8	0.001 0	433.4	167.6	229.0	13.9	214.4	5.9	93%
513-12	16.89	150.00	453.36	0.33	0.055 8	0.002 8	0.270 9	0.014 5	0.034 9	0.000 8	442.6	111.1	243.4	11.6	220.9	5.2	90%
513-13	35.34	297.60	1 008.82	0.29	0.051 9	0.002 3	0.249 0	0.011 1	0.034 8	0.000 9	279.7	100.0	225.8	9.0	220.5	5.4	97%
513-14	10.33	135.26	265.38	0.51	0.048 9	0.003 1	0.227 9	0.014 6	0.034 0	0.000 9	142.7	144.4	208.5	12.1	215.7	5.4	96%
513-15	16.29	179.46	448.77	0.40	0.054 5	0.002 9	0.255 4	0.014 0	0.034 0	0.000 8	390.8	122.2	231.0	11.3	215.5	5.0	93%
513-16	25.55	232.61	745.24	0.31	0.050 9	0.002 0	0.236 3	0.009 8	0.033 6	0.000 8	235.3	90.7	215.4	8.1	213.3	4.8	99%
513-17	37.85	209.07	1 187.67	0.18	0.049 1	0.001 9	0.228 6	0.009 5	0.033 6	0.000 8	153.8	90.7	209.0	7.9	213.1	4.8	98%
513-18	66.88	574.70	1 968.30	0.29	0.052 1	0.001 6	0.240 9	0.008 1	0.033 5	0.000 7	300.1	70.4	219.2	6.6	212.2	4.3	96%
513-19	29.66	350.21	821.35	0.43	0.053 4	0.002 2	0.243 9	0.010 0	0.033 5	0.000 9	346.4	94.4	221.6	8.1	212.5	5.3	95%
513-20	17.16	209.28	454.53	0.46	0.051 0	0.002 3	0.233 4	0.010 9	0.033 5	0.000 8	242.7	105.5	213.0	9.0	212.7	5.3	99%
513-21	18.60	252.22	483.08	0.52	0.049 9	0.002 6	0.234 8	0.011 9	0.034 7	0.000 9	190.8	120.4	214.1	9.8	220.2	5.6	97%
513-22	16.50	142.24	490.03	0.29	0.048 4	0.002 2	0.222 8	0.010 8	0.033 5	0.000 8	116.8	113.9	204.3	8.9	212.6	5.3	95%
513-23	15.23	240.24	391.55	0.61	0.048 9	0.002 7	0.225 8	0.013 1	0.033 7	0.000 7	142.7	163.9	206.7	10.8	213.7	4.6	96%
513-24	18.48	223.81	516.91	0.43	0.048 9	0.002 1	0.219 7	0.009 1	0.033 1	0.000 8	142.7	98.1	201.7	7.5	209.7	4.9	96%
513-25	45.16	318.47	1 362.17	0.23	0.050 8	0.001 5	0.235 1	0.007 9	0.033 6	0.000 8	231.6	68.5	214.4	6.5	212.8	4.9	99%
513-26	19.70	162.55	571.04	0.28	0.053 0	0.002 0	0.244 9	0.010 1	0.033 6	0.000 9	327.8	88.9	222.4	8.2	212.9	5.4	95%
513-27	42.89	305.58	1 229.97	0.25	0.052 5	0.002 0	0.237 5	0.009 0	0.032 8	0.000 7	309.3	85.2	216.4	7.3	208.2	4.6	96%
513-28	16.48	166.98	435.84	0.38	0.055 4	0.002 9	0.258 4	0.013 8	0.033 8	0.000 8	427.8	116.7	233.4	11.2	214.3	5.0	91%
513-29	13.38	177.04	359.08	0.49	0.052 8	0.003 3	0.235 6	0.014 2	0.032 6	0.000 8	320.4	144.4	214.8	11.7	206.6	5.0	96%
513-30	33.79	276.73	897.11	0.31	0.053 5	0.002 2	0.255 3	0.010 5	0.034 5	0.000 8	350.1	94.4	230.9	8.5	218.8	4.7	94%
513-31	36.53	275.87	983.23	0.28	0.053 2	0.001 9	0.251 0	0.008 7	0.034 2	0.000 8	344.5	81.5	227.4	7.1	216.8	4.9	95%

表 2 大红柳滩黑云母二长花岗岩的锆石 Lu-Hf 同位素分析结果表

Tab. 2 Zircon Lu-Hf isotope analysis results of the biotite monzogranite in the Dahongliutan pluton

样号	年龄(Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	εHf(t)	t _{DM1}	t _{DM2}	f _{Lu/Hf}
513-03	214.3	0.040 575	0.001 197	0.282 615	0.000 023	-5.54	0.906	1.314	-0.964
513-07	216.8	0.056 173	0.001 660	0.282 642	0.000 022	-4.60	0.879	1.257	-0.950
513-09	213.2	0.042 353	0.001 248	0.282 598	0.000 022	-6.17	0.933	1.355	-0.962
513-10	212.2	0.049 406	0.001 442	0.282 622	0.000 025	-5.30	0.902	1.302	-0.957
513-13	212.0	0.052 107	0.001 523	0.282 635	0.000 021	-4.83	0.885	1.273	-0.954
513-14	212.2	0.045 468	0.001 353	0.282 651	0.000 021	-4.28	0.859	1.237	-0.959
513-15	212.9	0.048 262	0.001 404	0.282 701	0.000 021	-2.50	0.789	1.123	-0.958
513-19	213.1	0.053 555	0.001 559	0.282 593	0.000 022	-6.32	0.946	1.368	-0.953
513-20	214.4	0.031 600	0.000 959	0.282 704	0.000 023	-2.42	0.776	1.113	-0.971
513-24	215.7	0.040 988	0.001 223	0.282 665	0.000 023	-3.80	0.837	1.203	-0.963
513-25	215.5	0.041 155	0.001 218	0.282 646	0.000 024	-4.45	0.863	1.244	-0.963
513-26	213.3	0.034 807	0.001 034	0.282 651	0.000 022	-4.29	0.852	1.234	-0.969
513-27	213.1	0.057 903	0.001 728	0.282 665	0.000 019	-3.77	0.847	1.207	-0.948
513-28	212.2	0.044 690	0.001 313	0.282 692	0.000 025	-2.83	0.800	1.144	-0.960
513-29	212.5	0.034 232	0.001 026	0.282 644	0.000 024	-4.53	0.862	1.250	-0.969
513-30	212.7	0.055 961	0.001 634	0.282 655	0.000 027	-4.13	0.860	1.229	-0.951
513-32	212.6	0.036 025	0.001 085	0.282 678	0.000 022	-3.34	0.815	1.174	-0.967

表 3 大红柳滩黑云母二长花岗岩/二云母花岗岩与伟晶岩 Li 同位素及 Li 含量分析结果(黑云母二长花岗岩与二云母花岗岩数据引自 DING et al., 2019)

Tab. 3 The Li isotopic compositions and Li element contents analysis results of the biotite monzonitic granite, two-mica granite and pegmatite in Dahongliutan pluton									
样号	D002-3	D002-4	D002-5	D006-1	D006-2	D006-3	D006-4	90-1	90-2
岩性	黑云二长 花岗岩	黑云二长 花岗岩	黑云二长 花岗岩	二云母 花岗岩	二云母 花岗岩	二云母 花岗岩	二云母 花岗岩	含锂辉石花 岗伟晶岩	含锂辉石花 岗伟晶岩
Li	50.45	52.22	45.68	20.92	23.96	24.37	5.76	3860.28	283.83
δ ⁷ Li‰	2.25	3.18	2.86	3.25	2.34	0.76	3.1	4.3	4.63
2σ	0.05	0.05	0.05	0.07	0.03	0.04	0.05	0.07	0.03

注:Li 含量为 10⁻⁶。

表 4 西昆仑地区印支期侵入岩同位素年龄表
Tab. 4 Isotopic age information of Indosinian intrusive rocks in West Kunlun area

采样地点	测年对象	测年方法	年龄(Ma)	文献出处
布伦口村	片麻状花岗岩	锆石 U-Pb 年龄(LA-ICP-MS)	245	张传林等,2005
维齐得歪岩体	石英闪长岩	锆石 U-Pb 等时线	(257.5±4.3)	任纪舜 1999
孔孜罗夫岩体 No. 9	片麻状石英闪长岩	锆石 U-Pb 年龄(LA-ICP-MS)	253	姜春发等,2000
玉其卡帕岩体 No. 10	片麻状二云花岗岩	锆石 U-Pb 年龄(SHRIMP)	(242.9±2.6)	JIANG Y H ,2008
喀英列克岩体 No. 11	含石榴子石黑云母二长花岗岩	锆石 U-Pb 年龄(SHRIMP)	(240.5±2.6)	(赵佳楠等,2014)
三十里营房	花岗岩	Rb-Sr 等时线年龄	215	(ZHANG, Y 2016)
慕士塔格-公格尔	花岗闪长岩	锆石 U-Pb 年龄(LA-ICP-MS)	213	康磊,2012
宿营地	闪长玢岩	锆石 U-Pb 年龄(LA-ICP-MS)	213~210	——
巴颜喀拉地体	埃达克岩	锆石 U-Pb 年龄(LA-ICP-MS)	221~212	ZHANG et al. (2014)
阿卡阿孜山	花岗岩	锆石 U-Pb 年龄(LA-ICP-MS)	208	WANG C et al. ,2016
南库地	花岗岩	锆石 U-Pb 年龄(SHRIMP)	215	LIU Zet al. ,2015
麻扎	花岗岩	锆石 U-Pb 年龄(SHRIMP)	209	LIU Zet al. ,2015
胜利桥	黑云母	Ar-Ar 法	(211.2±2.6)	张玉泉等,1998
黑卡兵站北岩体	黑云母	K-Ar 法	207.8	姜春发(1992)
塔尔岩体	花岗闪长岩	锆石 U-Pb 年龄(SHRIMP)	(234.2±2.8)	JIANG Y H,et al. 2013
班迪尔司热洪	花岗闪长岩	锆石 U-Pb 年龄(LA-ICP-MS)	(239.8±1.5)	卢佳义等,2015
科岗	含角闪石花岗岩	锆石 U-Pb 年龄(TIMs)	(228.2±1.5)	张传林等,2005
七一桥	二长花岗岩	全岩 Rb-Sr 等时线年龄	215	许荣华,2000
赛图拉西	花岗闪长岩	全岩 Rb-Sr 等时线年龄	215	张玉泉,1989
克里阳	煌斑岩	Ar-Ar 法	237	HE Huaiyu,2003
皮山	煌斑岩	Ar-Ar 法	(228.5±0.3)	HE Huaiyu,2003

(214±1.8)Ma,该结果与前人所测年龄基本是一致的,这与大红柳滩矿床内黑云母二长花岗岩和大红柳滩花岗岩体之间没有明显接触界限的地质事实一致,说明黑云母二长花岗岩是大红柳滩花岗岩体的一部分。由此可知,大红柳滩花岗岩体成岩年龄为(220±2.2)~209.6 Ma,属于晚三叠纪岩浆活动的产物。

4.2 岩浆源区

锆石 Lu-Hf 同位素体系具有较高的封闭温度,锆石的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值受年代不确定性的影响较小。因此,锆石原位 Hf 同位素分析能有效地揭示岩浆演化过程和源区性质(GRIFFIN et al. ,2000)。当岩浆锆石初始 ε_{Hf} 值为正值,通常代表源区为亏损地幔或从亏损地幔中新增生的年轻地壳,而初始值 ε_{Hf} 偏负值通常代表源区为古老地壳(吴福元等,

2007),不均一的锆石 Hf 同位素特征很可能指示其经历过比较显著的壳幔岩浆混合过程。

大红柳滩黑云母二长花岗岩的 ε_{Hf}(*t*) 值变化在-1.86~2.16 之间(图 6)。其中,10 颗锆石 ε_{Hf}(*t*) 值为正值(0.12~2.16),7 颗锆石的 ε_{Hf}(*t*) 值为负值(-1.86~-0.01)。造成这种锆石 Hf 同位素不均一的原因可能是岩浆经历了壳幔混染作用过程。本次工作发现,岩体中发育具岩浆结构的闪长质暗色微细粒包体(图 3d),也显示岩体在形成过程中存在岩浆混合作用。

此外,Li 同位素具有诸多独特的地球化学特性,在地球化学示踪研究中发挥着重要作用。在 δ⁷Li 值与 Li 含量变化图中(图 7),该区岩体主要分布在岛弧熔岩区域,与 MORIGUTI et al. (1998)研究的日本 Izu 岛弧火山熔岩 Li 同位素组成变化范围

一致(+1.1‰~+7.6‰)。多数研究已经发现弧熔岩具有与 MORB 接近的 $\delta^7\text{Li}$ 值,认为弧熔岩与 MORB 中的 $\delta^7\text{Li}$ 成分来源于不受俯冲作用影响的地幔成分 (CHAN et al., 2002; RYAN et al., 2004)。这进一步表明大红柳滩地区存在幔源岩浆的活动。

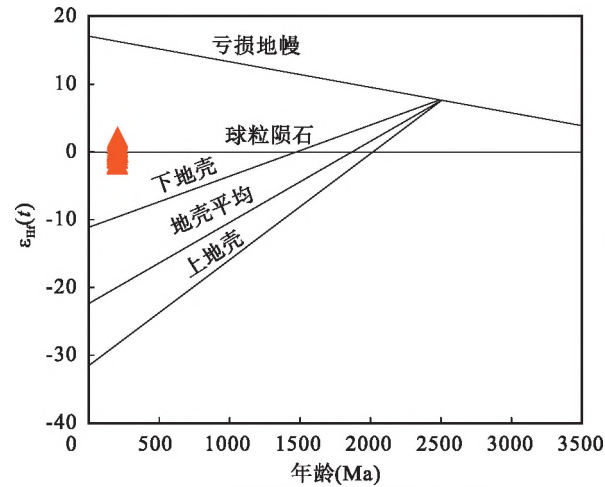


图 6 锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解
Fig. 6 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ diagram of zircon

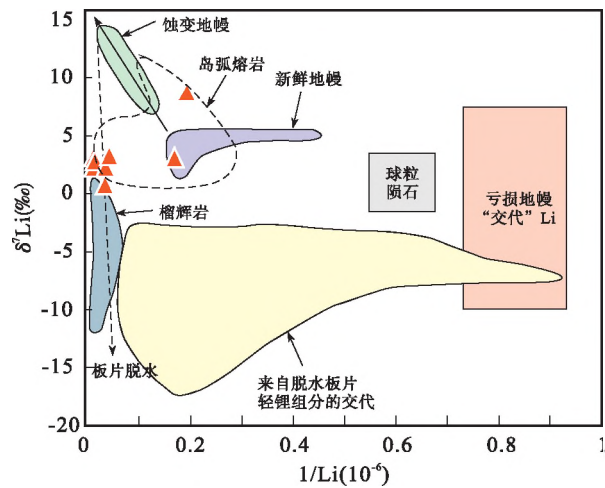


图 7 $\delta^7\text{Li}$ 值与 Li 含量相关性图解
Fig. 7 Diagram of correlation between $\delta^7\text{Li}$ value and Li content

郑永飞等(2007)认为幔源组分参与花岗岩成岩作用过程,幔源岩浆侵入地壳底部形成了初生地壳,

后期与古老下地壳共同发生部分熔融,形成具有壳幔混合特征的岩浆,此类花岗岩中的锆石 t_{DM1} 与结晶年龄具有一定距离。本区花岗岩锆石单阶段 Hf 模式年龄为 776~946 Ma,与晚三叠纪的形成年龄 (214 ± 1.8)Ma 差距很大。亏损地幔二阶段模式年龄 t_{DM2} 变化范围为 1 113~1 368 Ma,主要集中于中元古代,代表地壳物质从幔源岩石中分异出来的时间。可以认为大红柳滩岩体在源区或演化的过程中与幔源物质有过物质交换,这得到了该区域北部慕士塔格岩体和上其木干岩体的佐证(康磊等,2015; 陈海云等,2014)。慕士塔格岩体年龄为 213~222 Ma,为壳幔岩浆混合成因。上其木干岩体形成年龄为 225.4 Ma,岩石地球化学特征显示其为壳幔岩浆混合成因。

综上所述,笔者认为大红柳滩花岗岩应源于地幔与中元古代地壳的混合岩浆。

5 结论

(1)大红柳滩地区花岗质岩体主要由黑云母二长花岗岩、二长花岗岩和二云母花岗岩组成,岩体中发育暗色闪长质包体。大红柳滩岩体的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值变化于 0.282 593~0.282 704,平均为 0.282 650; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -1.86~2.16; $\delta^7\text{Li}$ 值为 0.76‰~3.25‰,平均为 2.53‰;Li 含量变化范围介于 $5.76\times10^{-6}\sim52.22\times10^{-6}$,均值为 31.9,具有高 $\delta^7\text{Li}$ 和低 Li 特征。

(2)大红柳滩黑云母二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 (214 ± 1.8)Ma,属于晚三叠世岩浆活动的产物。

(3)岩石 Li 同位素和锆石 Hf 同位素表明,大红柳滩岩体是由中元古代古老地壳物质与幔源物质混合而成。

致谢:野外工作过程中得到西安地质调查中心的支持与帮助;LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试得到了长安大学成矿作用及其动力学实验室栾燕老师的指导与帮助;在论文修改过程中,杨秀清副教授提出了宝贵的意见;在此一并致谢。

参考文献(References):

陈海云,孙妍,包平,等. 西昆仑上其木干岩体岩石成因及地

- 质意义—地球化学及 U-Pb 年代学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(04): 657-670.
- CHEN Haiyun, SUN Yan, BAO ping, et al. Petrogenesis and geological significance of the Mugan intrusion in the western Kunlun Mountains - Evidence from geochemistry and U-Pb chronology [J]. Journal of Petrology and Mineralogy, 2014, 33 (04): 657-670.
- 韩芳林. 西昆仑增生造山带演化及成矿背景(博士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学; 2006.
- HAN Fanglin. Evolution and metallogenic background of the West Kunlun orogenic belt (PhD thesis) [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑慕士塔格岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年: 对古特提斯碰撞时限的制约[J]. 地质论评, 2012, 58(4), 763-774.
- KANG Lei, XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of Muztagata intrusion in Western Kunlun orogenic belt and their tectonic significance [J]. Geological Review, 2012, 58 (4), 763-774.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑西段晚古生代—中生代花岗质岩浆作用及构造演化过程[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 533-552.
- KANG Lei, XUE Peixi, GAO Xiaofeng, et al. Late Paleozoic-Mesozoic granitic magmatism and tectonic evolution in the western segment of West Kunlun [J]. Geology of China, 2015, 42 (3): 533-552.
- 李侃, 滕家欣, 高永宝, 等. 新疆大红柳滩地区花岗伟晶岩型稀有金属矿成矿特征[A]. 第八届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会: 2017: 1.
- LI Kan, TENG Jiaxin, GAO Yongbao, et al. Metallogenic characteristics of granitic pegmatite-type rare metal deposits in Dahongliutan area, Xinjiang [A]. The Eighth National Symposium on metallogenic theory and prospecting methods, 2017: 1.
- 刘函, 王国灿, 曹凯, 等. 西昆仑及邻区区域构造演化的碎屑锆石裂变径迹年龄记录[J]. 地学前缘, 2010, 17 (3): 64-78.
- LIU Han, WANG Guocan, CAO Kai, et al. Clastic zircon fission track age records of regional tectonic evolution in West Kunlun and its adjacent areas [J]. Geoscience Frontiers, 2010, 17(3): 64-78.
- 乔耿彪, 张汉德, 伍跃中, 等. 西昆仑大红柳滩岩体地质和地球化学特征及对岩石成因的制约[J]. 地质学报, 2015, 89(7): 1180-1194.
- QIAO Gengbiao, ZHANG Hande, WU Yuezong, et al. Geological and geochemical characteristics of the Dahongliutan rock mass in the West Kunlun Mountains and its constraints on the genesis of rocks [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(7): 1180-1194.
- 魏小鹏, 王核, 胡军, 等. 西昆仑大红柳滩二云母花岗岩地球化学和地质年代学研究及其地质意义[J]. 地球化学, 2017, 46(1), 66-80.
- WEI Xiaopeng, WANG Ke, HU Jun, et al. Geochemistry and geochronology of the Dahongliutan mica granite in West Kunlun and its geological significance [J]. Geochemistry, 2017, 46(1), 66-80.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23 (2): 185-220.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic system and Its Petrological application [J]. Journal of Petrology, 2007, 23 (2): 185-220.
- 许志琴, 戚学祥, 杨经绥, 等. 西昆仑康西瓦韧性走滑剪切带的两类剪切指向、形成时限及其构造意义[J]. 地质通报, 2007, 26(10): 1252-1261.
- XU Zhiqin, QI Xuexiang, YANG Jingsui, et al. Two types of shear direction, formation time and tectonic significance of Kangxiwa ductile strike-slip shear zone in West Kunlun [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26 (10): 1252-1261.
- 闫庆贺, 王核, 邱增旺, 等. 西昆仑大红柳滩稀有金属伟晶岩矿床锡石及铌钽铁矿年代学及其地质意义[A]. 中国矿物岩石地球化学学会第九次全国会员代表大会暨第 16 届学术年会文集[C]. 中国矿物岩石地球化学学会: 2017: 802-803.
- YAN Qinghe, WANG He, QIU Zengwang, et al. Geochronology and geological significance of cassiterite and niobium-tantalum iron deposits in Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, Western Kunlun [A]. Works of the Ninth National Congress and 16th Annual Academic Conference of China Mineral and Petrological Geochemistry Society [C]. China Mineral and Petrological Geochemistry Society: 2017: 802-803.
- 张泽, 梁婷, 凤永刚, 等. 新疆西昆仑造山带康西瓦含绿柱石白云母伟晶岩的地质特征与年代学研究[J]. 西北地质, 2019, 52(01): 75-88.
- ZHANG Ze, LIANG Ting, FENG Yonggang, et al. Geological feature and chronology study of Kangxiwa beryl-bearing Muscovite pegmatite in West Kunlun orogenic belt, Xinjiang [J]. Northwestern Geology, 2019, 52 (01): 75-88.
- 张传林, 陆松年, 于海峰, 等. 青藏高原北缘西昆仑造山带构

- 造演化: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(2): 145-154.
- ZHANG Chuanlin, LU Songnian, YU Haifeng, et al. Tectonic evolution of the West Kunlun orogenic belt on the northern margin of the Qinghai-Xizang Plateau: evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS dating [J]. Chinese Science (Series D), 2007, 37 (2): 145-154.
- 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 等. 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 Lu-Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 317-330.
- ZHENG Yongfei, CHEN Renxu, ZHANG Shaobing, et al. Zircon Lu-Hf isotope studies in ultrahigh pressure eclogites and granitic gneisses from the Dabie Mountains [J]. Journal of Petrology, 2007, 23 (2): 317-330.
- BRANT C, COOGAN L A, GILLIS K M, et al. Lithium and Li-isotopes in young altered upper oceanic crust from the East Pacific Rise [J]. Geochimica Cosmochimica Acta, 2012, 96(11): 272-293.
- CHAN L H, LEEMAN W P, YOU C F. Lithium isotopic composition of Central American volcanic arc lavas: Implications for modification of subarc mantle by slab-derived fluids: Correction[J]. Chemical Geology, 2002, 182(2): 293-300.
- CHAN L H, EDMOND J M, THOMPSON G, et al. Lithium isotopic composition of submarine basalts: implications for the lithium cycle in the oceans[J]. Earth Planet. sci. lett, 1992, 108(1-3): 151-160.
- DING Kun, LIANG Ting, YANG Xiuqing, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic significance of the Dahongliutan pluton in the Western Kunlun orogenic belt, NW China [J]. Journal of Central South University, 2020(Waiting for publication)
- GRIFFIN W L, PEARSON N J, BELOUSOVA E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA - MC-ICPMS analysis of zircons megacrysts in kimberlites- Kimberlites and related rocks [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(1): 133-147.
- LIU Y H, HU Z C, ZONG K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1535-1546.
- LUDWIG K R. User's Manual for Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronological Center, Special Publication 4, 2003: 1-71.
- MORIGUTI T, NAKAMURA E. Across-arc variation of Li isotopes in lavas and implications for crust/mantle recycling at subduction zones[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 163(1-4): 167-174.
- RYAN J G, KYLE P R. Lithium abundance and lithium isotope variations in mantle sources: insights from intraplate volcanic rocks from Ross Island and Marie Byrd Land (Antarctica) and other oceanic islands[J]. Chemical Geology, 2004, 212(1): 125-142.
- TANG Y J, ZHANG H F, YING J F. Review of the Lithium Isotope System as a Geochemical Tracer[J]. International Geology Review, 2007, 49(4): 374-388.
- TOMASCAK P B. Developments in the Understanding and Application of Lithium Isotopes in the Earth and Planetary Sciences[J]. Geochemistry of Non-Traditional Stable Isotopes, 2004, 55(1): 153-195.
- YUAN H L, GAO S, DAI M N, et al. 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, 2008, 247(1-2): 0-118.
- WANG C, LIU L, KORHONEN F, et al. Origins of Early Mesozoic granitoids and their enclaves from West Kunlun, NW China: Implications for evolving magmatism related to closure of the Paleo-Tethys ocean[J]. International Journal of Earth Sciences, 2015, 105 (3): 1-24.
- ZACK T, TOMASCAK P B, RUDNICK R L, et al. Extremely light Li in orogenic eclogites: The role of isotope fractionation during dehydration in subducted oceanic crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 208(3): 279-290.
- ZHANG Q, LIU Y, WU Z, et al. Late Triassic granites from the northwestern margin of the Tibetan Plateau, the Dahongliutan example: petrogenesis and tectonic implications for the evolution of the Kangxiwa Palaeo-Tethys[J]. International Geology Review, 2019, 61 (2): 175-194.