

· 专题研究 ·

东昆仑早古生代造山后花岗岩的特征

——以大干沟花岗岩为例

田广阔¹, 孟繁聪¹, 范亚洲¹, 刘 强², 段雪鹏¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学地球科学与资源学院,
地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 大干沟花岗岩体位于东昆仑金水口地区, 其岩石类型主要为中粗粒正长花岗岩。该花岗岩的 SiO_2 含量为 68.68%~71.12%, 平均含量为 69.84%; Al_2O_3 含量为 14.01%~15.40%, 平均含量为 14.82%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值高, 为 1.19~1.64, 平均为 1.40; 铝饱和指数 A/CNK 值为 0.98~1.02, 平均为 1.00, 具有准铝质-弱过铝质花岗岩的特点。岩石稀土元素总量较高, LREE 元素富集, 具有明显的 Eu 负异常, 相对原始地幔明显富集 U、Th, 亏损 Ti、P、Nb、Ta 等高场强元素和 Ba、Sr 等大离子亲石元素, 具有 A 型花岗岩的特征。花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) < 0$, 为 $-5.6 \sim -7.3$, $t_{\text{DM}} = 1.54 \sim 2.27$ Ga, 表明其物源可能主要为中元古代物质(金水口群), LA-ICP-MS 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -2.2 \sim 2.6$, 显著不同于地壳岩浆的 Hf 同位素组成, 显示有地幔物质添加。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 392 ± 2 Ma (MSWD = 1.14)。结合区域构造演化和上述地球化学特征, 认为大干沟岩体为早古生代造山后伸展阶段的产物, 是东昆南地体与东昆北地体碰撞后地幔岩浆上涌及地壳熔融的结果。

关键词: 东昆仑; 花岗岩; 造山后; 原特提斯

中图分类号: P588.12^{±1}

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)03-0371-20

The characteristics of Early Paleozoic post-orogenic granite in the East Kunlun orogen: A case study of Dagangou granite

TIAN Guang-kuo¹, MENG Fan-cong¹, FAN Ya-zhou¹, LIU Qiang² and DUAN Xue-peng¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Dagangou granites in the Jinshuikou area of the East Kunlun orogen are mainly composed of medium-coarse grained syenogranites. Their SiO_2 and Al_2O_3 values vary from 68.68% to 71.12% and 14.01% to 15.40%, with a mean value of 69.84% and 14.82%, respectively. The $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios are high (1.19~1.64, with a mean value of 1.40). The A/CNK values [molar ratio of $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$] are 0.98~1.02, with a mean value of 1.00, indicating the quasi aluminum-weakly peraluminous geochemical characteristics. All the Dagangou granites have high total REE abundances. Moreover, their chondrite-normalized REE patterns all show enrichment of LREE and obviously negative Eu anomalies. On the primitive mantle-normalized trace element diagrams, the samples have similar distribution patterns with enrichment of U, Th, and depletion of HFSEs (Ti, P, Nb, Ta) and Ba, Sr, indicating the geochemical characteristics of A-type granite. The $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$

收稿日期: 2015-11-04; 接受日期: 2016-04-18

基金项目: 中国地质调查局资助项目(1212011120158, 12120114080101, 12120115027001)

作者简介: 田广阔(1989-), 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: tianguangkuo@126.com; 通讯作者: 孟繁聪, 研究员, 主要从事火成岩研究, E-mail: mengfancong@yeah.net。

values of $-5.6 \sim -7.3$ and t_{DM} values from 1.54 Ga to 2.27 Ga suggest that the source might have mainly been derived Proterozoic materials (Jinshuikou Group). Zircon $\epsilon Hf(t) = 2.2 \sim 2.6$, significantly different from the earth's crust magmatic Hf isotopic compositions, showing that rocks were contaminated by the mantle. The LA-ICP-MS zircon U-Pb indicates that the granites were emplaced at 392 ± 2 Ma (MSWD = 1.14). The geochemical characteristics combined with the tectonic evolution of East Kunlun show a pronounced affinity of post-orogenic granites, belonging to the response to the mantle magma upwelling and melting of the crust.

Key words: East Kunlun; granite; post-orogenic; proto-Tethys

Fund support: China Geological Survey Project (1212011120158, 12120114080101, 12120115027001)

花岗岩是造山带的重要组成部分,其成因研究对探讨造山带的形成演化具有重要意义(DePaolo *et al.*, 1991; Rudnick and Gao, 2003; 肖庆辉等, 2005; 莫宣学等, 2007)。花岗岩的属性一方面与深部变质基底的性质和组成有关,另一方面又不同程度地受到来自地幔的物质与能量传输的影响(王德滋等, 2003)。但花岗岩的形成机制及如何与造山过程响应,一直是地质学家们不断探索的问题(Pearce *et al.*, 1984; Batchelor and Bowden, 1985; Harris *et al.*, 1986; Barbarin, 1999; 任纪舜等, 1999; 肖庆辉等, 2003, 2009; 莫宣学等, 2007; 吴福元等, 2007a; 张成立等, 2013; Wang *et al.*, 2013, 2015; 吴才来等, 2014)。

东昆仑造山带是青藏高原上发育的一条巨型岩浆岩带,广泛出露早古生代和晚二叠世-三叠纪花岗岩,其形成分别与原特提斯洋和古特提斯洋的演化有关(Harris *et al.*, 1988; 莫宣学等, 2007; 陆露等, 2010, 2013; 王晓霞等, 2012; Chen *et al.*, 2012; 刘彬等, 2012, 2013a, 2013b; 李希等, 2014; Xiong *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014; 马昌前等, 2015; 罗明非等, 2015)。蛇绿岩的研究表明,东昆仑在早寒武世为洋盆形成及扩张阶段,中寒武世-晚奥陶世进入俯冲阶段(高延林等, 1988; 姜春发等, 1992; 邓晋福等, 1996; Yang *et al.*, 1996; 朱云海等, 1999; 崔美慧等, 2011; Meng *et al.*, 2015)。陆壳型榴辉岩的形成表明志留纪洋盆已经关闭并发生了陆-陆碰撞造山作用(Meng *et al.*, 2013; 祁生胜等, 2014; 孟繁聪等, 2015),之后进入碰撞后伸展阶段。但是,早古生代花岗岩如何与上述造山过程响应仍存在争议(谌宏伟等, 2006; 莫宣学等, 2007; 刘战庆等, 2011; 王晓霞等, 2012; 刘彬等, 2012, 2013a, 2013b; 李玉春等, 2013; 李希等, 2014)。

本文对金水口大干沟出露的一套中粗粒正长花

岗岩进行岩相学、地球化学、Sm-Nd 同位素以及锆石 U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素进行研究,结合东昆仑早古生代构造演化讨论该花岗岩体的特征和形成机制。

1 区域地质概况及岩体特征

1.1 区域地质

东昆仑造山带位于青藏高原北部,东西延伸超过1 000 km,南北宽 50~200 km(图1),西起阿尔金断裂,东至西秦岭的昆秦岔口,北以柴达木盆地南缘为界,南以东昆仑南断裂与可可西里-巴颜喀拉地槽褶皱系分开(姜春发等, 1992; 殷鸿福等, 1998; 任纪舜等, 1999; Xu *et al.*, 2001)(图1a)。构造上大致以昆中断裂划分为:昆北地体和昆南地体。昆北地体位于昆中断裂以北,与柴达木盆地为邻;昆南地体位于昆中断裂和昆南断裂之间(潘裕生等, 1996; 许志琴等, 2007)。

昆北地体变质基底以前寒武纪金水口岩群为主(姜春发等, 1992; Chen *et al.*, 2002; Yuan *et al.*, 2003)(图1b);该岩群包括白沙河组和小庙组(陈能松等, 2006; 王国灿等, 2007; 陈有炘等, 2011),是一套强烈变质变形的基性火山岩-陆源碎屑岩-镁质碳酸盐建造,经历了麻粒岩-榴辉岩相的变质作用(王云山等, 1987; 张建新等, 2003; Meng *et al.*, 2013)。晚泥盆世牦牛山组红色磨拉石地层不整合覆盖于前寒武纪变质岩基底和下古生界地层之上,它主要为陆源碎屑岩和碳酸盐岩(姜春发等, 1992)。同时该区出露加里东期、印支期的花岗岩、闪长岩和辉长岩以及较多基性岩墙(陈能松等, 2006; 许志琴等, 2007; 莫宣学等, 2007; 李希等, 2014)。昆南地体与昆北地体明显不同,主要基底为古元古代苦海群,中元古代万宝沟群和奥陶纪-志留纪纳赤台群。纳赤台群包含经历了低级变质作用的

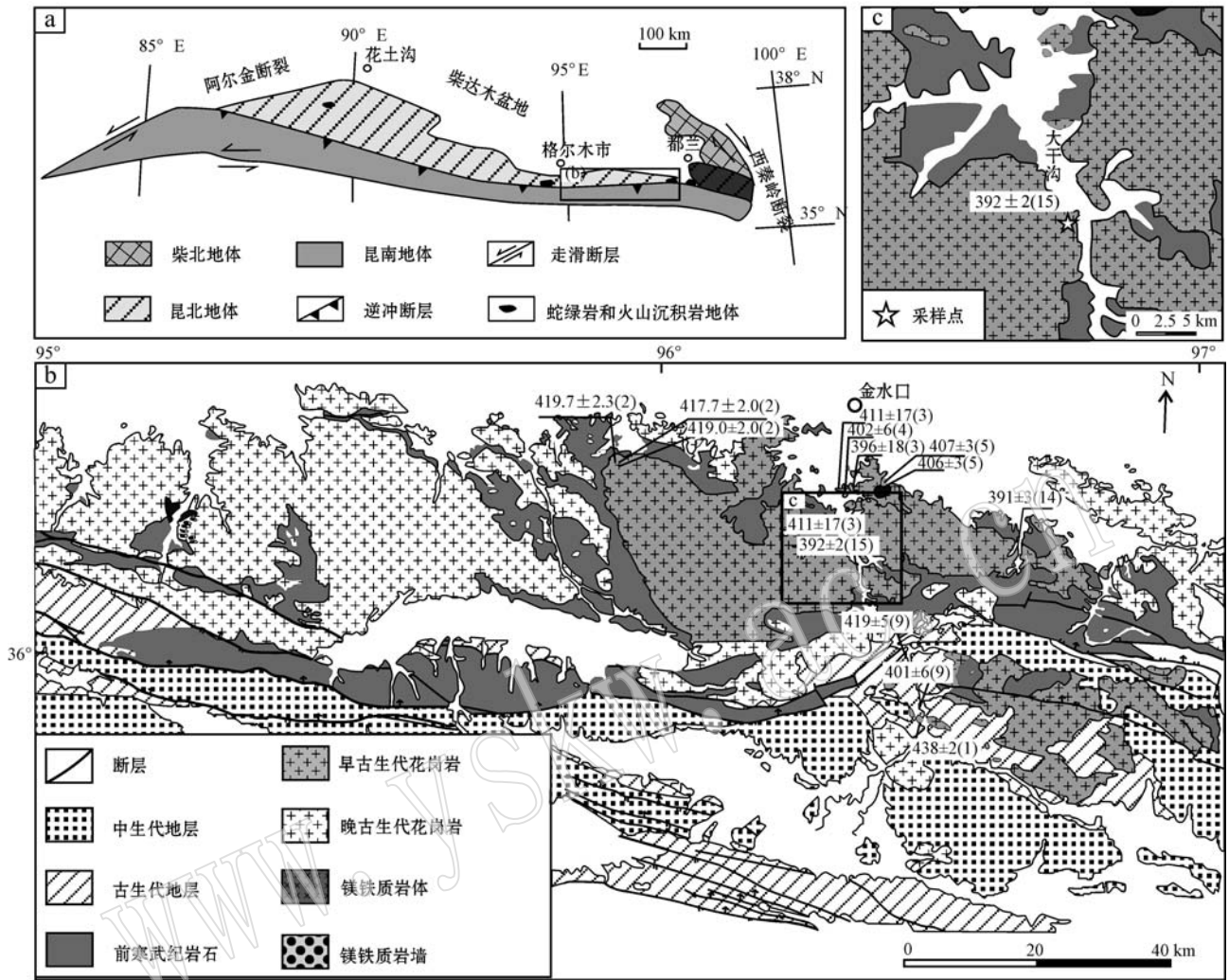


图 1 东昆仑大地构造框架图(a)、东昆仑造山带东部花岗岩类分布简图(b)和大干沟岩体地质简图及取样位置(c)(图 a 据 Meng *et al.*, 2013, 图 b 和图 c 据 Zhang *et al.*, 2014, 年龄数据引自表 5)

Fig. 1 Geotectonic framework of East Kunlun (a), simplified geological map showing the distribution of granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt (EKOB) (b) and simplified geological map of the Dagangou granite and sampling locations (c) (a modified after Meng *et al.*, 2013; b and c modified after Zhang *et al.*, 2014, age of the granites after Table 5)

碎屑沉积、大理岩和火山岩的低级变质体和一些早古生代的蛇绿岩碎片如清水泉蛇绿岩, 泥盆纪牦牛山磨拉石地层和中生代火山碎屑岩不整合于早泥盆世地层之上, 还有少量的早古生代和二叠纪-三叠纪花岗岩岩体和早三叠世火山岩侵入其中, 晚泥盆世磨拉石地层标志着早古生代造山运动的结束(高延林等, 1988; Yang *et al.*, 1996; 朱云海等, 1999; Bian *et al.*, 2004; 冯建赞等, 2010)。

1.2 岩体特征

大干沟花岗岩体位于昆中断裂以北、诺木洪以南约 25 km 的金水口地区(图 1c), 岩体与元古宙金

水口群灰黑色石榴黑云斜长片麻岩呈侵入接触关系(图 1c)。岩体呈岩株状产出, 出露面积约 20 km², 风化面呈土黄色, 新鲜面为灰白色, 为中粗粒结构, 块状构造, 局部发生片理化, 岩性较为均一(图 2a)。较大的长石可达 2~3 cm, 含有暗色微粒包体, 包体与围岩接触关系截然(图 2b)。

镜下观察, 样品具有明显的花岗结构(图 2c), 主要矿物组成有石英(24%~28%)、钾长石(40%~45%)、斜长石(15%~20%)、黑云母(10%)、角闪石(2%~5%), 副矿物有锆石、磷灰石等。其中钾长石以微斜长石为主, 颗粒较大, 多为它形, 2~6 mm, 镜下

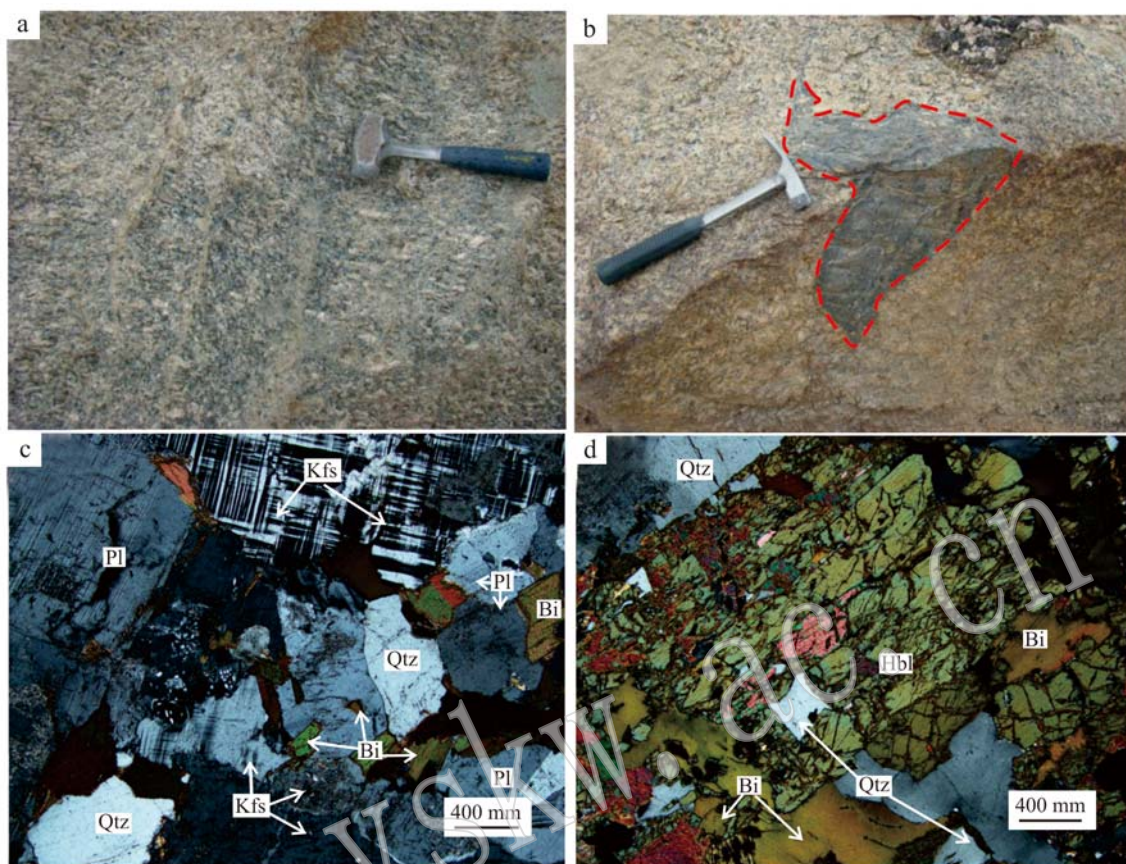


图 2 大干沟花岗岩野外及典型结构特征

Fig. 2 Outcrop photography and typical micrographs of the Dagangou granites

a—新鲜的花岗岩,局部显示弱的片麻理;b—花岗岩中的暗色微粒包体,与围岩界线截然,铁锤长度 30 cm;c—花岗结构(正交偏光);d—岩石中含有角闪石,可见角闪石双晶发育(正交偏光);Pl—斜长石;Hbl—角闪石;Bi—黑云母;Qtz—石英;Kfs—钾长石
a—fresh granites and local weak gneissic structure; b—Obvious boundary between MME and wall-rock, the hammer being 30 cm; c—granitic texture of the rock (crossed nicols); d—rocks containing hornblende and hornblende with twin lamellae (crossed nicols); Pl—plagioclase; Hbl—hornblende; Bi—biotite; Qtz—quartz; Kfs—K-feldspar

见部分包围石英,反应其结晶作用较晚;斜长石多为半自形板状,具有聚片双晶和卡钠复合双晶,2~3 mm;石英主要为他形或港湾状;黑云母为深褐色,解理明显,2~5 mm;角闪石深褐色,自形程度良好,长2~5 mm,长宽比为最大到4:1,长柱状(图2d)。根据镜下观察,将该岩石定名为中粗粒正长花岗岩。

2 测试方法

岩石化学成分分析由国家地质实验测试中心完成,主量元素采用X射线荧光光谱法(XRF),测试仪器为3080E型X射线荧光光谱仪,其中FeO采用容量滴定法;稀土元素和微量元素采用等离子质谱法(ICP-MS)。Sm-Nd同位素测定在中国科学院地质

与地球物理研究所固体同位素实验室完成,测试方法及分析流程见杨岳衡等(2007),其中同位素测定在MAT262多接受质谱上完成,用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行Nd同位素质量歧视校正,实验室全流程本底大约为 10^{-11}g 。

锆石在廊坊区域地质调查研究院分选,将样品破碎、淘洗并用重液分选出锆石,在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象,将待测锆石粘在双面胶上,用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,对其表面进行抛光至锆石内部结构暴露,再进行锆石反射光和透射光照相、阴极发光(CL)显微图像研究以及LA-ICP-MS分析,目的是了解锆石的内部结构。测试点的选取首先根据锆石反射光和透射光显微照片进行初选,再与CL图

像进行对比, 尽量避开内部裂隙、包裹体以及不同成因的区域, 以获得相对精确的年龄信息, 本次主要选取磨圆较好、有核边结构的锆石, 测点选在锆石的核部和边部。锆石 U-Pb 测年在天津地质矿产研究所完成, 所用仪器为 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 193 nm 激光取样系统 (LA-MC-ICP-MS)。选择锆石的合适区域, 利用 193 nm FX 激光器对锆石进行剥蚀, 所用激光剥蚀的束斑为 35 μm , 能量密度为 13~14 J/cm², 频率为 8~10 Hz, 激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune, 利用动态变焦扩大色散使质量数相差很大的 U-Pb 同位素可以同时接收从而进行 U-Pb 同位素测定。所用锆石标样为 TEMORA 标准锆石, 数据处理采用中国地质大学刘勇胜老师编写的 ICP-MS DataCal 程序和 ISOPLOT 程序 (Ludwig, 1999) 进行分析和作图, 采用 ²⁰⁸Pb 对普通铅进行校正, 利用 NIST612 作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。

锆石 Hf 同位素测试是在中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室的 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统 (LA-MC-ICP-MS) 上进行, 实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 剥蚀直径采用 55 μm , 测定时使用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质, 分析点位于与 U-Pb 定年分析点的附近。相关仪器运行条件及详细分析流程参见侯可军等

(2007)。分析过程中锆石标准 GJ1 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 测试加权平均值为 0.282 015 $\pm$ 31 (2SD, $n = 10$), 与文献报道值 (Elhlou *et al.*, 2006; 侯可军等, 2007) 在误差范围内完全一致。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

对大干沟花岗岩样品 (36°07'25"N, 96°24'45"E) 进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年。从样品 K11-13-2.1 中分选出的锆石晶形较好, 呈长柱状, 长度约 200~250 μm , 长宽比为 2~2.5。阴极发光图像显示大部分锆石具有核-边结构, 核部锆石韵律环带不发育, 部分显示扇形环带或均匀结构, 边部锆石韵律环带发育 (图 3)。Th/U 值为 0.10~0.66 之间, 平均为 0.344 9, 结合 CL 图像表明所测的锆石为典型的岩浆成因锆石 (Corfu *et al.*, 2003; Hoskin and Schaltegger, 2003)。对 18 粒锆石进行了测试 (表 1), 多数锆石数据落在谐和线上, 其中 4 个年龄点向右偏离谐和线较大 (图 4a), 在做加权平均年龄时予以剔除, 获得的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 392 $\pm$ 2 Ma (图 4b), 代表花岗岩的结晶年龄, 相当于中泥盆世早期。

3.2 锆石 Lu-Hf 同位素

对大干沟锆石样品 (K11-13-2.1) 的 18 颗锆石

数据: 锆石 (²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄)/ $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值

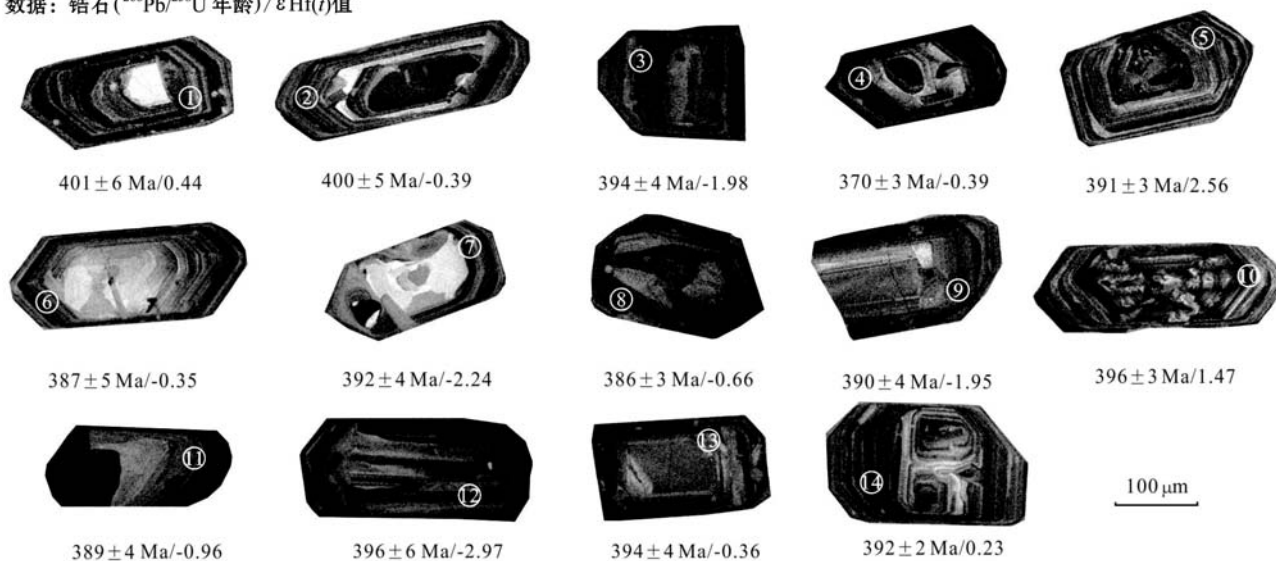


图 3 金水口大干沟花岗岩(K11-13-2.1)代表性锆石 CL 图像

Fig. 3 CL images of zircons from the Dagangou granite (K11-13-2.1)

表 1 大干沟花岗岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb analytical data of the zircons for the Dagangou granites

测点号	$\epsilon_{\text{Pb}}/10^{-6}$				同位素比值 $\pm 1\sigma$				年龄/Ma $\pm 1\sigma$		
	Pb	U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
1	87	1 278	0.303 1 $\pm$ 0.000 3	0.064 2 $\pm$ 0.000 9	0.521 2 $\pm$ 0.007 7	0.058 9 $\pm$ 0.000 9	426 $\pm$ 6	564 $\pm$ 34	426 $\pm$ 6	564 $\pm$ 34	401 $\pm$ 6
2	57	911	0.280 8 $\pm$ 0.001 8	0.054 8 $\pm$ 0.000 7	0.608 3 $\pm$ 0.009 4	0.080 6 $\pm$ 0.001 5	483 $\pm$ 7	1 211 $\pm$ 38	483 $\pm$ 7	1 211 $\pm$ 38	344 $\pm$ 4
3	145	3 397	0.310 4 $\pm$ 0.000 7	0.039 9 $\pm$ 0.000 5	0.348 8 $\pm$ 0.006 2	0.063 4 $\pm$ 0.000 7	304 $\pm$ 5	723 $\pm$ 24	304 $\pm$ 5	723 $\pm$ 24	252 $\pm$ 3
4	88	1 276	0.319 8 $\pm$ 0.000 4	0.064 0 $\pm$ 0.000 7	0.520 0 $\pm$ 0.007 1	0.058 9 $\pm$ 0.000 8	425 $\pm$ 6	564 $\pm$ 30	425 $\pm$ 6	564 $\pm$ 30	400 $\pm$ 5
5	68	1 022	0.307 9 $\pm$ 0.004 6	0.063 0 $\pm$ 0.000 6	0.517 5 $\pm$ 0.016 8	0.059 6 $\pm$ 0.001 9	423 $\pm$ 14	588 $\pm$ 69	423 $\pm$ 14	588 $\pm$ 69	394 $\pm$ 4
6	101	1 607	0.302 7 $\pm$ 0.001 1	0.059 1 $\pm$ 0.000 5	0.497 8 $\pm$ 0.006 1	0.061 1 $\pm$ 0.000 7	410 $\pm$ 5	642 $\pm$ 26	410 $\pm$ 5	642 $\pm$ 26	370 $\pm$ 3
7	78	1 209	0.348 3 $\pm$ 0.000 2	0.062 5 $\pm$ 0.000 6	0.469 3 $\pm$ 0.005 6	0.054 5 $\pm$ 0.000 6	391 $\pm$ 5	392 $\pm$ 27	391 $\pm$ 5	392 $\pm$ 27	391 $\pm$ 3
8	109	1 663	0.409 8 $\pm$ 0.000 5	0.062 4 $\pm$ 0.000 7	0.469 1 $\pm$ 0.006 0	0.054 6 $\pm$ 0.000 6	391 $\pm$ 5	394 $\pm$ 27	391 $\pm$ 5	394 $\pm$ 27	390 $\pm$ 4
9	101	1 559	0.376 7 $\pm$ 0.000 9	0.061 9 $\pm$ 0.000 8	0.480 5 $\pm$ 0.006 7	0.056 3 $\pm$ 0.000 7	398 $\pm$ 6	465 $\pm$ 28	398 $\pm$ 6	465 $\pm$ 28	387 $\pm$ 5
10	94	1 400	0.364 0 $\pm$ 0.002 9	0.062 6 $\pm$ 0.000 6	0.498 3 $\pm$ 0.011 5	0.057 7 $\pm$ 0.001 3	411 $\pm$ 9	518 $\pm$ 50	411 $\pm$ 9	518 $\pm$ 50	392 $\pm$ 4
11	85	1 272	0.440 8 $\pm$ 0.000 3	0.061 7 $\pm$ 0.000 6	0.505 7 $\pm$ 0.006 8	0.059 5 $\pm$ 0.000 8	416 $\pm$ 6	585 $\pm$ 29	416 $\pm$ 6	585 $\pm$ 29	386 $\pm$ 3
12	59	942	0.289 8 $\pm$ 0.001 7	0.062 4 $\pm$ 0.000 6	0.465 5 $\pm$ 0.007 4	0.054 1 $\pm$ 0.000 8	388 $\pm$ 6	376 $\pm$ 33	388 $\pm$ 6	376 $\pm$ 33	390 $\pm$ 4
13	49	642	0.655 7 $\pm$ 0.016 1	0.063 3 $\pm$ 0.000 5	0.493 0 $\pm$ 0.014 0	0.056 5 $\pm$ 0.001 5	407 $\pm$ 12	472 $\pm$ 60	407 $\pm$ 12	472 $\pm$ 60	396 $\pm$ 3
14	26	381	0.365 5 $\pm$ 0.001 1	0.062 1 $\pm$ 0.000 7	0.500 6 $\pm$ 0.012 5	0.058 4 $\pm$ 0.001 5	412 $\pm$ 10	545 $\pm$ 57	412 $\pm$ 10	545 $\pm$ 57	389 $\pm$ 4
15	27	398	0.443 3 $\pm$ 0.000 6	0.063 4 $\pm$ 0.001 0	0.498 6 $\pm$ 0.041 7	0.057 1 $\pm$ 0.004 3	411 $\pm$ 34	494 $\pm$ 167	411 $\pm$ 34	494 $\pm$ 167	396 $\pm$ 6
16	68	1 117	0.323 2 $\pm$ 0.000 6	0.057 5 $\pm$ 0.000 6	0.489 5 $\pm$ 0.007 4	0.061 7 $\pm$ 0.000 9	405 $\pm$ 6	664 $\pm$ 31	405 $\pm$ 6	664 $\pm$ 31	361 $\pm$ 4
17	28	466	0.098 8 $\pm$ 0.000 4	0.063 6 $\pm$ 0.000 6	0.479 6 $\pm$ 0.014 8	0.054 7 $\pm$ 0.001 6	398 $\pm$ 12	400 $\pm$ 65	398 $\pm$ 12	400 $\pm$ 65	397 $\pm$ 4
18	76	1 172	0.267 6 $\pm$ 0.000 3	0.063 0 $\pm$ 0.000 7	0.494 0 $\pm$ 0.007 5	0.056 9 $\pm$ 0.000 9	408 $\pm$ 6	486 $\pm$ 33	408 $\pm$ 6	486 $\pm$ 33	394 $\pm$ 4

注：测试单位为天津地质矿产研究所同位素实验室。

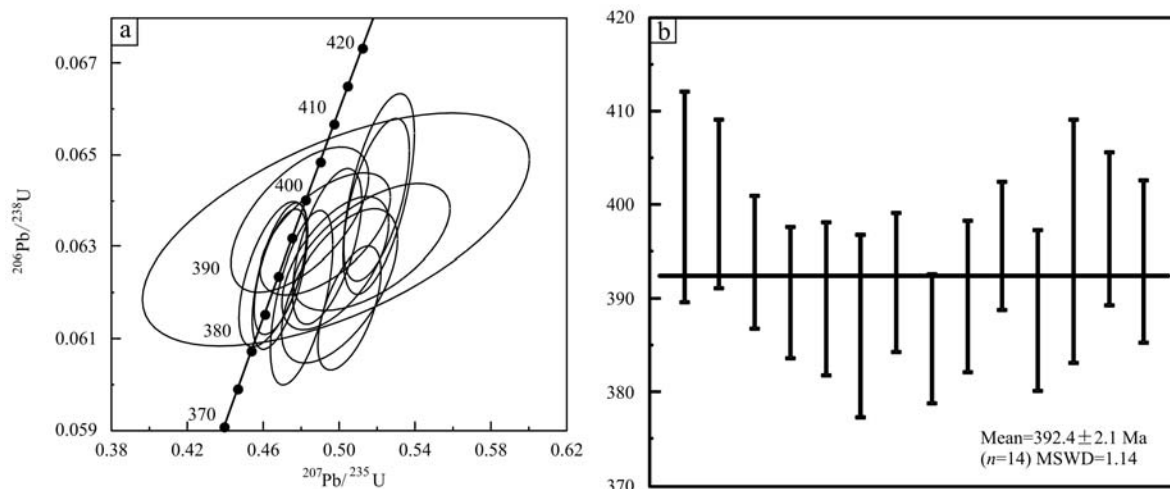


图4 大干沟花岗岩锆石 U-Pb 谐和图(a)和加权平均年龄图(b)

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams (a) and weighted average age (b) for the Dagangou granite

进行了 Lu-Hf 同位素分析(表 2)。锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值在 0.282 456 ~ 0.282 615 之间, 平均为 0.282 530, 变化幅度较小, $\epsilon\text{Hf}(0)$ 为 -11.18 ~ -5.55, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 -3.0 ~ +2.6。样品的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.027 195 ~ 0.167 765 之间, 平均为 0.097 681; $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.000 468 ~ 0.003 683 之间, 平均为 0.001 477, 小于 0.002, 表明锆石形成后没有较多放射成因 Hf 的积累(吴福元等, 2007b), 所以初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值可以代表锆石形成时 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值。样品的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ 值介于 -0.99 ~ -0.89 之间, 平均为 -0.96, 远小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ (-0.34) 和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ (-0.72), 因此二阶段模式年龄 (t_{DM}^{C}) 反映的更可能是源区物质从亏损地幔抽离出来的时间或者源区物质在地壳的平均存留年龄(Vervoort *et al.*, 1996; Amelin *et al.*, 2000)。

3.3 元素地球化学

大干沟花岗岩的主量元素和微量元素测定结果见表 3, 大干沟花岗岩的 $\text{SiO}_2 = 68.68\% \sim 71.12\%$, 平均含量为 69.84%; Al_2O_3 含量较高, 14.01% ~ 15.40%; $\text{MgO} = 0.48\% \sim 0.64\%$, $\text{CaO} = 1.68\% \sim 2.14\%$, $\text{K}_2\text{O} = 4.36\% \sim 5.85\%$ 。铝饱和指数 A/CNK 值为 0.98 ~ 1.02, 平均为 1.00, 均小于 1.1, 为准铝质-弱过铝质花岗岩特点(图 5a); 岩体具有富钾 (K_2O 为 4.36% ~ 5.85%, 平均为 5.00%)、高碱 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为 8.01% ~ 9.04%, 平均为 8.59%) 的特征。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值高, 均大于 1, 为 1.19 ~ 1.64, 平均为 1.40, 表现为高钾钙碱性-钾玄岩系列特征(图

5b)。标准矿物计算中, 均出现标准矿物刚玉分子 (0.23 ~ 0.97)。

大干沟花岗岩稀土元素总量为 $281.01 \times 10^{-6} \sim 378.57 \times 10^{-6}$ 。岩石稀土元素配分曲线显示 LREE 富集、HREE 亏损, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 4.23 \sim 9.55$, 平均为 7.03, 轻重稀土元素分异比较明显, 呈典型的右倾型(图 6a)。岩石强烈亏损 Eu, 具有明显的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.22 \sim 0.36$)。稀土元素分配图上 HREE 的亏损与岩石中相容重稀土元素的石榴石的残留有关; 而岩体中强烈的负 Eu 异常, 说明残留相中很可能存在斜长石, 斜长石残留区的压力较低 (< 30 km)。微量元素蛛网图显示大离子亲石元素 Rb、U、Th 富集, 而 Ba、Sr 含量很低, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素(图 6b)。

3.4 Sm-Nd 同位素

对大干沟花岗岩的 4 个样品进行了 Sm-Nd 同位素分析, 结果见表 4。 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 和 Nd 同位素初始值 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_i$) 的计算以 $t = 392 \text{ Ma}$ 为准。由表 4 可知, 全岩样品同位素组成基本一致, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值变化范围较小 [$\epsilon\text{Nd}(t) = -7.3 \sim -5.6$]。

4 讨论

4.1 锆石饱和温度

目前多数学者认为花岗岩质岩浆的上升过程是绝热上升过程的, 因此岩浆早期结晶的温度也就近似代表了岩浆形成时的温度(王涛等, 2013; 秦江锋等, 2005; 吴福元等, 2007a)。锆石是花岗质岩浆

表 2 大干沟岩体锆石 Lu-Hf 同位素分析结果
Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Dagangou granites

点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}/Ga	t_{DMZ}/Ga
1	406	0.092 638	0.001 352	0.001 312	0.000 014	0.282 543	0.000 014	-0.96	-8.11	0.4	1.01	1.18
2	400	0.097 947	0.000 515	0.001 367	0.000 005	0.282 523	0.000 018	-0.96	-8.80	-0.4	1.04	1.21
3	400	0.167 765	0.006 638	0.003 683	0.000 167	0.282 489	0.000 027	-0.89	-10.01	-2.2	1.16	1.31
4	394	0.068 912	0.003 688	0.000 966	0.000 042	0.282 479	0.000 014	-0.97	-10.36	-2.0	1.09	1.29
5	370	0.110 335	0.000 928	0.001 562	0.000 006	0.282 542	0.000 022	-0.95	-8.12	-0.4	1.02	1.19
6	391	0.129 695	0.001 353	0.001 792	0.000 015	0.282 615	0.000 019	-0.95	-5.55	2.6	0.92	1.06
7	390	0.131 148	0.006 931	0.002 252	0.000 174	0.282 569	0.000 021	-0.93	-7.19	0.8	1.00	1.15
8	387	0.080 350	0.000 787	0.001 162	0.000 004	0.282 531	0.000 017	-0.96	-8.53	-0.3	1.02	1.20
9	392	0.111 270	0.003 142	0.001 473	0.000 030	0.282 476	0.000 022	-0.96	-10.45	-2.2	1.11	1.30
10	386	0.050 404	0.001 303	0.000 737	0.000 015	0.282 519	0.000 017	-0.98	-8.94	-0.7	1.03	1.22
11	390	0.056 459	0.000 520	0.000 825	0.000 002	0.282 481	0.000 018	-0.98	-10.29	-1.9	1.08	1.29
12	396	0.150 971	0.000 972	0.002 023	0.000 019	0.282 583	0.000 023	-0.94	-6.69	1.5	0.97	1.12
13	389	0.043 823	0.000 559	0.000 646	0.000 004	0.282 508	0.000 018	-0.98	-9.33	-1.0	1.04	1.24
14	396	0.132 654	0.002 116	0.001 793	0.000 026	0.282 456	0.000 020	-0.95	-11.18	-3.0	1.15	1.34
15	361	0.096 666	0.000 451	0.001 417	0.000 013	0.282 524	0.000 020	-0.96	-8.76	-1.2	1.04	1.22
16	397	0.027 195	0.000 119	0.000 468	0.000 004	0.282 533	0.000 011	-0.99	-8.44	0.1	1.00	1.19
17	394	0.079 556	0.001 481	0.001 262	0.000 018	0.282 527	0.000 018	-0.96	-8.67	-0.4	1.03	1.21
18	392	0.099 987	0.000 839	0.001 529	0.000 011	0.282 547	0.000 017	-0.95	-7.97	0.2	1.01	1.18

注： $\epsilon\text{Hf}(0) = [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1] \times 10\,000$ ， $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1$ ； $\epsilon\text{Hf}(t) = \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \} \times 10\,000$ ； $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}] \}$ ； $t_{\text{DM}} = t_{\text{DM}}(\text{Hf}) - t$ ； $[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - f_{\text{CC}} - f_{\text{DM}}]$ ， $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 为样品测试值； $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.033\,2$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\,772$ (Blichert-Toft and Albarède, 1997)； $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25$ (Griffin *et al.*, 2000)； $f_{\text{CC}} = -0.548$ ， $f_{\text{DM}} = 0.16$ ， $\lambda = 1.865 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Söderlund *et al.*, 2004)。

表 3 大干沟正长花岗岩主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)组成

Table 3 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) elements compositions of the Dagangou granite

样品号	K11-13-2.1	K11-13-2.2	K11-13-2.3	K11-13-2.4	样品号	K11-13-2.1	K11-13-2.2	K11-13-2.3	K11-13-2.4
SiO ₂	71.12	69.96	69.61	68.68	Ho	2.08	2.17	3.27	1.65
TiO ₂	0.35	0.47	0.36	0.41	Er	6.31	6.23	9.54	4.81
Al ₂ O ₃	14.01	14.85	15.40	15.03	Tm	0.79	0.76	1.26	0.63
Fe ₂ O ₃	0.61	0.62	0.58	2.26	Yb	5.07	4.88	7.97	3.89
FeO	1.99	2.78	2.03	0.88	Lu	0.72	0.64	1.05	0.55
MnO	0.04	0.05	0.05	0.05	ΣREE	281.01	367.22	378.57	301.27
MgO	0.48	0.64	0.48	0.55	(La/Sm) _N	2.63	3.58	2.25	3.82
CaO	1.68	2.06	1.84	2.14	(La/Yb) _N	5.56	8.80	4.23	9.55
Na ₂ O	3.44	3.65	3.57	3.69	δEu	0.25	0.22	0.22	0.36
K ₂ O	4.88	4.36	5.85	4.91	Y	58.10	60.00	90.10	44.30
P ₂ O ₅	0.07	0.11	0.08	0.09	Rb	280.00	303.00	316.00	213.00
H ₂ O ⁺	0.68	0.54	0.42	0.50	Sr	111.00	123.00	132.00	141.00
CO ₂	0.12	0.14	0.14	0.11	Ba	459.00	596.00	748.00	669.00
LOI	0.64	0.52	0.41	0.57	Nb	15.70	20.00	18.80	14.70
A/CNK	1.00	1.02	0.99	0.98	Ta	1.11	1.19	1.32	0.82
A/NK	1.28	1.38	1.26	1.32	Zr	253.00	367.00	261.00	273.00
里特曼指数	2.46	2.38	3.33	2.88	Hf	8.21	11.20	8.11	8.34
La	41.80	63.70	50.00	55.10	Th	29.90	22.10	15.00	21.00
Ce	83.50	124.00	100.00	107.00	U	6.53	3.74	2.93	2.97
Pr	10.60	14.90	13.80	12.10	V	11.10	16.40	13.00	12.90
Nd	39.70	53.90	54.40	43.70	Cr	1.74	3.06	2.31	2.02
Sm	9.98	11.20	14.00	9.07	Co	3.20	4.76	3.35	3.89
Eu	0.82	0.84	1.01	1.04	Ni	1.22	1.50	1.63	1.70
Gd	9.97	11.50	14.50	8.37	Sc	6.94	9.09	10.40	6.30
Tb	1.69	1.84	2.52	1.38	Nb/Ta	14.14	16.80	14.24	17.92
Dy	10.60	11.30	16.20	8.23	Zr/Hf	30.81	32.76	32.18	32.73

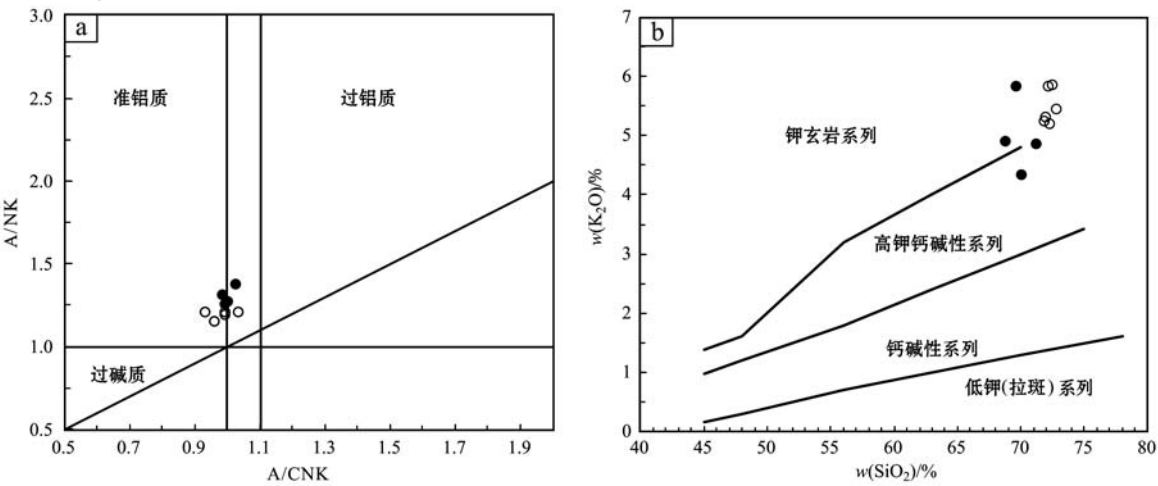


图 5 A/CNK - A/NK 图解(a, 据 Maniar and Piccoli, 1989)和 K₂O - SiO₂ 图解(b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)
Fig. 5 A/CNK-A/NK (a, after Maniar and Piccoli, 1989) and K₂O - SiO₂ (b, after Peccerillo and Taylor, 1976)

实心数据为本文数据, 空心圆数据为冰沟正长花岗岩体数据(刘彬等, 2013a), 下同

The solid data for the experimental data, the hollow data for the Bingou granites (after Liu Bin *et al.*, 2013a)

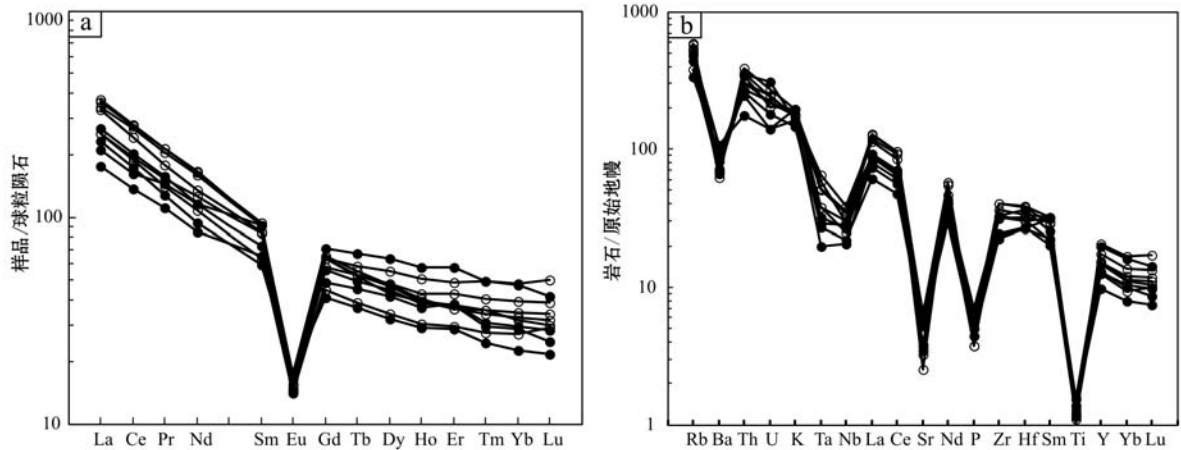


图 6 东昆仑大干沟和冰沟花岗岩球类陨石标准化的稀土元素(a)和微量元素(b)组成模式(球类陨石标准化值和原始地幔数值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace elements spider diagram (b) of the Dagangou and Bingou granite in the East Kunlun (chondrite-normalized values and primitive mantle normalized values after Sun and McDonough, 1989)

表 4 大干沟花岗岩 Sm-Nd 同位素组成
Table 4 Sm-Nd isotopic compositions of the Dagangou granites

样品号	Sm/ 10^{-6}	Nd/ 10^{-6}	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon\text{Nd}(0)$	$\epsilon\text{Nd}(t)$	t_{DM}/Ga	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$
K11-13-2.1	10.8	47.8	0.136 4	0.512 198	12	0.511 848	-8.6	-5.6	1.87	-0.31
K11-13-2.2	11.8	60.5	0.117 9	0.512 064	8	0.511 761	-11.2	-7.3	1.72	-0.40
K11-13-2.3	13.3	54.0	0.148 9	0.512 178	8	0.511 795	-9.0	-6.6	2.27	-0.24
K11-13-2.4	9.9	53.4	0.111 6	0.512 114	7	0.511 827	-10.2	-6.0	1.54	-0.43

注: $\epsilon\text{Nd}(t=392\text{ Ma})$ 的计算采用 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.196\ 7$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512\ 638$, t_{DM} 的计算采用 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.213\ 7$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.513\ 151$ 。

体系中较早结晶的副矿物,而且它能够在岩浆熔体中稳定存在(Watson and Harrison, 1983),因此可以通过计算锆石饱和温度来近似获得花岗岩岩浆的初始温度(King *et al.*, 1997)。Watson 等(1983)给出了一个锆石饱和温度计,该温度计提供了一个锆石溶解度模型: $\ln D_{\text{Zr}}^{\text{zircon/melt}} = [-3.80 - 0.85(M - 1)] + 12\ 900/T$, 公式中, $\ln D_{\text{Zr}}^{\text{zircon/melt}}$ 是化学计量的 Zr 与熔体中 Zr 的浓度比, T 为绝对温度(K),全岩岩石化学参数 $M = (\text{Na} + \text{K} + 2\ \text{Ca})/(\text{Al} \times \text{Si})$ (阳离子比率),这个关系适用于大多数花岗质岩浆(Watson and Harrison, 1983)。由上面模型转换可得锆石饱和温度计算的关系式为: $t_{\text{Zr}}(^{\circ}\text{C}) = [129\ 000 (\ln D_{\text{Zr}}^{\text{zircon/melt}} + 0.85M + 2.95)] - 273.15$ 。

其中不做 Zr、Hf 的锆石中的校正,纯锆石中 Zr 的含量为 $496\ 000 \times 10^{-6}$,且由于锆石在花岗质岩石中是副矿物,因此可以用全岩 Zr 含量近似代表熔体中的 Zr 含量。根据本文分析的大干沟花岗岩样品的主量元素和 Zr 的含量,计算了锆石饱和温度为

873~913℃。

大干沟花岗岩锆石饱和温度为 873~913℃,很显然属于高温花岗岩,Chappell 等(1998)认为可能与源区物质成分有关,高温花岗岩来源于镁铁质原岩。但目前没有证据或岩石学实验表明花岗岩的岩石类型与温度之间存在明显的相关性(吴福元等, 2007a),因此认为这种理解是不准确的。对于大干沟花岗岩如此高的岩浆温度,很可能是有外部热的加入(镁铁质岩浆的底侵)。

4.2 岩石成因

大干沟花岗岩主体岩性为中粗粒正长花岗岩,其中暗色矿物为黑云母和少量角闪石,副矿物为磷灰石、锆石和铁钛氧化物等。富硅,弱过铝质,富含 K_2O 和总碱,贫钙,具有较低的 MgO 含量,稀土元素总量较高,强烈亏损 Sr、Ba、P、Ti 元素,具有类似于造山后 A 型花岗岩的一般特征(Collins *et al.*, 1982)。全铁 FeO_t (质量分数)为 2.60%~3.40%,高于高分异 I 型花岗岩($<1\%$)(王强等,2000);另

外较低的 P_2O_5 (0.07% ~ 0.11%) 和较高的 Na_2O (3.44% ~ 3.69%) 与 S 型花岗岩相区别。尽管在无较富镁铁质岩石伴生的情况下, 区别分异的 I 或者 S 型花岗岩和 A 型花岗岩非常困难, 但 Whalen 等 (1987) 的指标仍是判定 A 型花岗岩最有效的方法 (吴福元等, 2007a)。在 Whalen 等 (1987) 的 A 型花

岗岩微量元素判别图中, 大干沟花岗岩全部落在 A 型花岗岩区域 (图 7)。因为花岗岩主要为陆壳物质的熔融, 样品富集 Rb、U、Th 等大离子亲石元素, 而 Ba、Sr 含量很低; 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素。Sr、Ba 的亏损可能与钾长石、斜长石和黑云母的分离结晶作用或源区的残留有关。

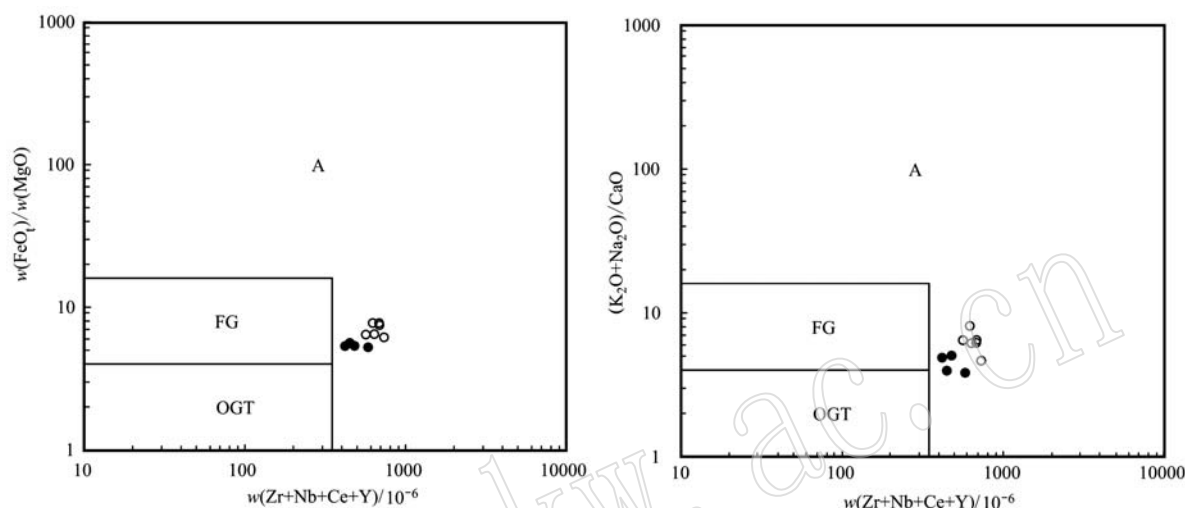


图 7 FeO/MgO 、 $(K_2O+Na_2O)/CaO$ 和 $Zr+Nb+Ce+Y$ 图解 (据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 7 FeO/MgO , $(K_2O+Na_2O)/CaO$ and $Zr+Nb+Ce+Y$ diagrams for the Binggou syeno-granite (after Whalen *et al.*, 1987)

A—A 型花岗岩; FG—分异长英质花岗岩; OGT—未分异的 M-I-S 型花岗岩

A—A-type granites; FG—Fractionated felsic granites; OGT—Non-fractional M+I+S-type granites

A 型花岗岩又被分为 A1 (碱性、非造山) 和 A2 型 (铝质、后造山) 两类, 两类 A 型花岗岩具有不同的物质来源及大地构造背景, A1 类一般认识岩浆物质来源类似大洋岛弧玄武岩, 但侵入于大陆裂谷或在板内岩浆作用期间侵入; A2 类岩浆直接起源于经历了陆-陆碰撞或岛弧岩浆作用的陆壳或板下地壳 (Eby, 1990)。在这里选取 Eby (1990) 判别图, 可以来进一步划分大干沟花岗岩 A1、A2 两个亚类。通过对大干沟正长花岗岩的投图 (图 8) 发现, 在两种判别图上均落于 A2 型内部, 因此将大干沟花岗岩体定为铝质 A2 型花岗岩。

近年的熔融实验研究表明玄武质岩石无水熔融通常是富钠的 (Rutter and Wyllie, 1988; Rapp and Watson, 1995), 熔不出具高钾钙碱性特征的花岗质岩石, Panino (1999) 根据陆壳岩石熔融结果进一步提出高钾钙碱性花岗岩通常是壳幔混合的结果。样品的 $SiO_2 - K_2O$ 图解 (图 5b), 投点基本上都在高钾钙碱性系列岩石区域, 表明大干沟岩体的成因可能与幔源岩浆加入有关。另外, 样品的 Nb/Ta 比值

(14.14 ~ 17.93) 大于壳源岩石的 Nb/Ta 比值 11 (Green, 1995); 而 Zr/Hf 比值 (30.82 ~ 32.77) 与壳源和幔源岩石之间的 Zr/Hf 比值 (33.0 ~ 36.3) 接近 (Taylor and McLennan, 1985), 进一步表明幔源物质对大干沟花岗岩成因有贡献。

对于大干沟花岗岩的源区物质分析的同位素方面证据: ① 锆石 Hf 同位素对于识别一些重要的地球化学储库具有重要作用 (吴福元等, 2007b)。 $\epsilon_{Hf}(t) < 0$ 的岩石识别为古老地壳部分熔融而形成的; $\epsilon_{Hf}(t) > 0$ 的岩石识别为新生地壳形成的 (Verwoort *et al.*, 2000; Griffin *et al.*, 2002)。大干沟岩石样品整体分布在球粒陨石演化线附近 (图 9), 其 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 -2.2 ~ 2.6 之间, 平均为 -0.57, 峰值在 -1 ~ 0 之间 (图 10a)。② 二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 在 1.06 ~ 1.34 Ga 之间, 平均为 1.21 Ga, 峰值在 1.2 ~ 1.3 之间 (图 10b), 远大于其结晶年龄 392 ± 2 Ma。③ 岩石 $\epsilon_{Nd}(t) < 0$, 为 -5.6 ~ -7.3, $t_{DM} = 1.54 \sim 2.27$ Ga (表 4)。由上述条件推测源岩至少有两种组分: 一种为中元古代的陆壳, 另一种为元古宙

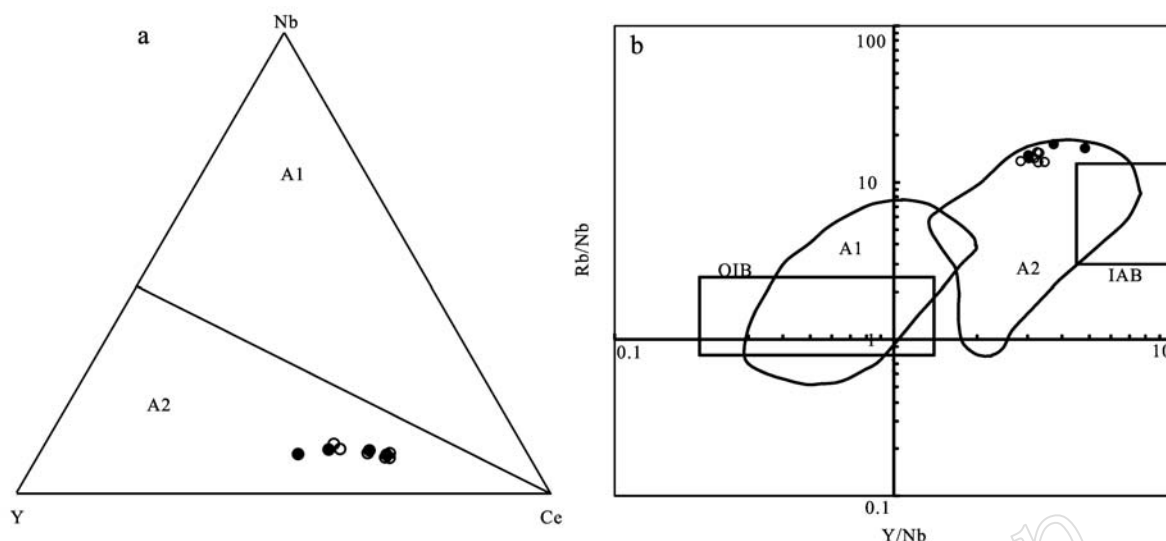


图8 大干沟花岗岩 Nb-Y-Ce 三角图解和 Rb/Nb-Y/Nb 图解(据 Eby, 1990)

Fig. 8 Nb-Y-Ce and Rb/Nb versus Y/Nb diagrams for the Dagangou granite(after Eby, 1990)

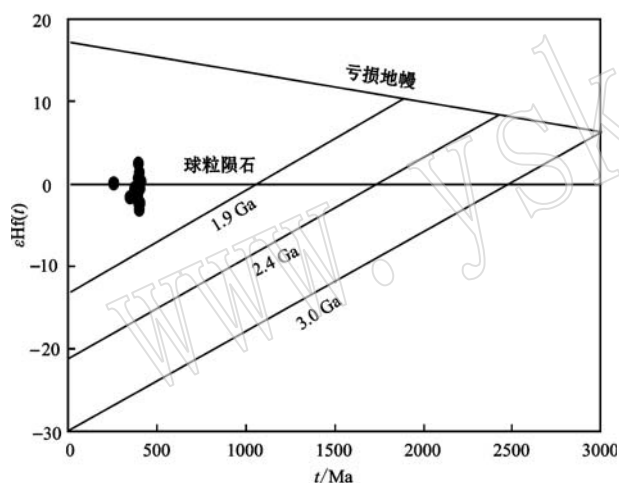


图9 大干沟花岗岩体 $\epsilon\text{Hf}(t)$ - t 图解

Fig. 9 $\epsilon\text{Hf}(t)$ - t plot for K11-13-2-1 of the Dagangou granites

新生地壳或亏损地幔,但由 $\epsilon\text{Nd}(t) < 0$ 表明大干沟大部分是先存地壳组分的改造和再循环,仅可能有少量的幔源岩浆加入到地壳中;金水口群为东昆仑北带主要变质基底,其片麻岩碎屑锆石年龄主要为 1550~2550 Ma(张建新等, 2003; 王国灿等, 2004; 陈能松等, 2006; 陆松年等, 2009),大干沟花岗岩 $t_{\text{DM}} = 1.54 \sim 2.27$ Ga,因此古老的地壳物质很可能为金水口群。而同样由金水口群熔出的金水口 S 型花岗岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 $-9.0 \sim -12.8$ (余能等, 2005; 巴金等, 2012),低于大干沟花岗岩,也证明了有少量幔源岩浆加入。

综合岩相学、锆石饱和温度较高、地球化学特征及成因判别图和 Nd、Hf 同位素特征认为大干沟花岗质岩浆的起源与幔源岩浆的底侵作用有关,中泥盆世幔源岩浆上侵至地壳,加热并诱发古老的金水口片麻岩部分熔融,同时有少量地幔物质添加,最终形成了大干沟花岗岩。

4.3 构造环境

东昆仑原特提斯洋在早寒武世之前打开和扩张(Yang *et al.*, 1996, 陆松年, 2002)。在早古生代早期原特提斯洋开始进入俯冲,如东昆仑祁漫塔格山鸭子泉岛弧闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 480 ± 3 Ma(崔美慧等, 2011);大干沟南部约 30 km 处出露胡晓钦镁铁质岩石具有类似岛弧玄武岩的特征,代表了洋壳俯冲的记录,其锆石 U-Pb 年龄为 438 ± 2 Ma(刘彬等, 2013b)。在东昆仑北带温泉地区发现陆壳型榴辉岩锆石 U-Pb 年龄为 428 ± 2 Ma(Meng *et al.*, 2013; 孟繁聪等, 2015),表明原特提斯洋局部地区在奥陶纪-志留纪已经关闭并发生陆陆碰撞,这之后向造山后伸展阶段转换。在大干沟北部金水口水电站附近发育碰撞后 S 型花岗岩,金水口水电站附近花岗质岩石锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 402 ± 6 Ma(张建新等, 2003);黑云母花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 396 ± 18 Ma,石榴堇青花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 411 ± 17 Ma(龙晓平等, 2006),值得注意的是跃进山岩体花岗闪长岩伴生发育辉长岩,其锆石 U-Pb 年龄分别为 407 ± 3 Ma、 406 ± 3 Ma(刘彬等, 2012),辉长岩是幔源岩浆作用的产物。如图 11 所示整个

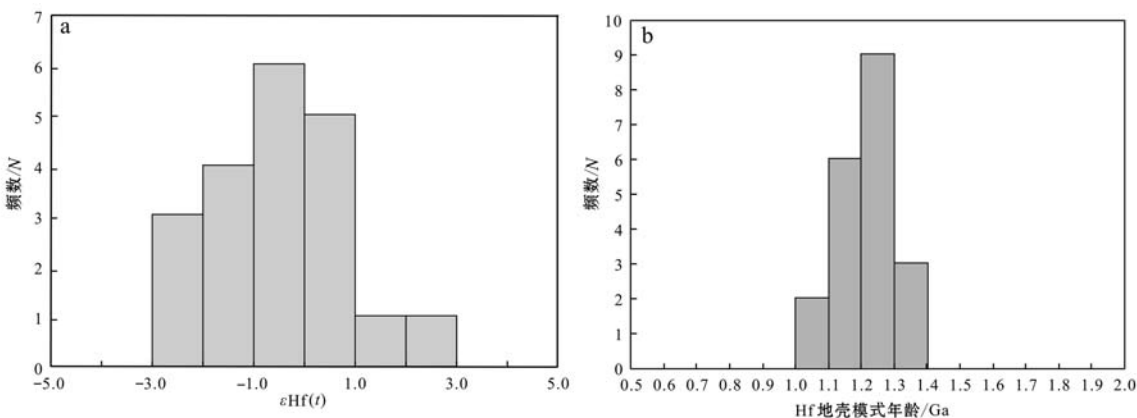


图 10 大干沟花岗岩体 $\epsilon Hf(t)$ 值(a)和 Hf 同位素地壳模式年龄柱状图(b)
Fig. 10 Histograms of $\epsilon Hf(t)$ value and Hf-isotope crust model ages (b) of the Dagangou granites

表 5 东昆仑早古生代末岩浆岩锆石 U-Pb 年龄统计
Table 5 Statistics of formation ages of the Early Paleozoic plutons of the East Kunlun Orogenic Belt

序号	地区	岩性	年代/Ma	方法	资料来源
1	胡晓钦岩体	镁铁质岩石	438±2	LA-ICP-MS	刘彬等, 2013b
2	黄龙沟中部	二长花岗岩	417.7±2.0	LA-ICP-MS	陆露等, 2013
	黄龙沟上部	二长花岗岩	419.7±2.3		
	深水潭	二长花岗岩	419.9±2.0		
	红旗沟中部	二长花岗岩	419.0±2.0		
3	金水口水电站	黑云母花岗岩闪长岩	396±18	LA-ICP-MS	龙晓平等, 2006
		石榴堇青花岗岩	411±17		
4	金水口水电站	花岗质岩石	402±6	SHRIMP	张建新等, 2003
5	跃进山岩体	花岗闪长岩	407±3	LA-ICP-MS	刘彬等, 2012
		辉长岩	406±3		
6	三道湾	流纹英安斑岩	425.9±2.6	LA-ICP-MS	周春景等, 2010
7	格尔木南锯齿山一带	英安岩	406.1±2.9	SHRIMP	张耀玲等, 2010
8	水泥厂地区	流纹岩	423.2±1.8	LA-ICP-MS	陆露等, 2010
			408.2±2.4		
			404.9±4.8		
			399.6±2.8		
9	诺木洪南	玄武岩岩片	419±5	SHRIMP	朱云海等, 2005
		变火山岩岩片	401±6		
10	布青山地区	埃达克岩	402±24	TIMS	边千韬等, 2007
11	夏日哈木	正长花岗岩	391.1±1.4	LA-ICP-MS	王冠等, 2013
12	喀雅克登塔格杂岩体	辉长岩	403.3±7.2	LA-ICP-MS	谌宏伟等, 2006
		二长花岗岩	394±13		
13	乌兰乌珠尔	正长花岗岩	388.9±3.7	LA-ICP-MS	郭通珍等, 2011
14	冰沟岩体	正长花岗岩	391±3	LA-ICP-MS	刘彬等, 2013a
15	大干沟	正长花岗岩	392±2	LA-ICP-MS	本文数据

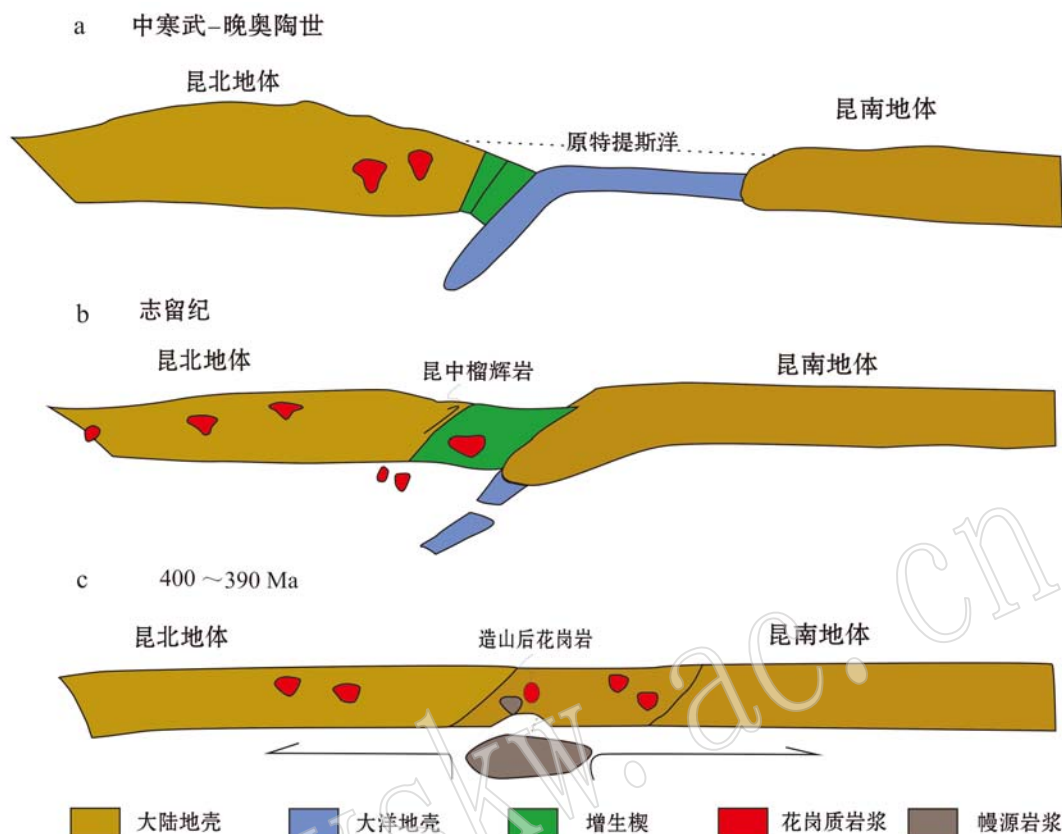


图 11 东昆仑东段原特提斯洋演化过程示意图

Fig. 11 Sketch map of proto-Tethys evolution process in the eastern part of the East Kunlun

南北剖面显示在早古生代末期原特提斯洋由南向北俯冲,并在约 400 Ma 进入了造山后阶段。

造山后岩浆活动在区域上也有强烈表现(图 1,表 5),如在大干沟东部约 30 km 的冰沟出露造山后 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 391 ± 3 Ma(刘彬等, 2013b);在金水口西部约 40 km 处出露四处碰撞造山型花岗岩,其中黄龙沟二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 417.7 ± 2.0 Ma、 419.7 ± 2.3 Ma,深水潭二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 419.9 ± 2.0 Ma 和红旗沟二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 419.0 ± 2.0 Ma(陆露等, 2013);再向西同样发育后造山阶段早中泥盆世岩浆岩活动记录,夏日哈木正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 391.1 ± 1.4 Ma(王冠等, 2013)。

由上可见,东昆仑段地区在早寒武世为洋盆形成及扩张阶段,中寒武世一晚奥陶世进入俯冲碰撞阶段(图 11a),志留纪至少从 428 Ma 进入碰撞峰期并产生榴辉岩(图 11b),早中泥盆世(400~390 Ma)正式步入造山后阶段(图 11c)。造山后俯冲板片的断离产生局部的拉张构造环境,使幔源物质上涌并

底侵下地壳,导致了部分熔融产生了大量与造山后有关的岩浆活动,形成了大干沟花岗岩及冰沟的 A 型正长花岗岩和金水口的 S 型花岗岩(张建新等, 2003; 刘彬等, 2013b)。

5 结论

(1) LA-ICP-MS 年代学测年结果表明东昆仑大干沟花岗岩年龄为 392 ± 2 Ma,代表岩体的结晶年龄。

(2) 大干沟正长花岗岩岩相学、岩浆温度、地球化学特征及成因判别图和 Nd、Hf 同位素等表明其为 A 型花岗岩,原岩为金水口群,有地幔物质添加,其形成与碰撞后板片断离,地幔岩浆上涌引起地壳熔融有关。

(3) 推测早中泥盆世(400~390 Ma)东昆仑东段原特提斯构造体制发生转变,这一时期原特提斯洋消亡,进入造山后伸展阶段,大干沟花岗岩为这一构造事件的响应。

致谢 感谢河北廊坊区调院对锆石进行分选; 国家地质实验测试中心对岩石化学成分分析; 中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室对 Lu-Hf 同位素的分析; 天津地质矿产研究所同位素实验室在锆石 U-Pb 年代学测试以及数据处理等方面给予了大力的帮助。两名匿名审稿人和编辑对稿件提出了建设性修改意见, 也在此表示衷心感谢。

References

- Amelin Y, Lee D C and Halliday A N. 2000. Early-Middle Archaean Crustal Evolution Deduced From Lu-Hf And U-Pb Isotopic Studies Of Single Zircon Grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(24): 4 205~4 225.
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46(3): 605~626.
- Ba Jin, Chen Nengsong, Wang Qinyan, *et al.* 2012. Nd-Sr-Pb isotopic compositions of cordierite granite on southern margin of the Qaidam block, NW China, and constraints on its petrogenesis, tectonic affinity of source region and tectonic implications[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 37(S): 80~92(in Chinese with English abstract).
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(85): 43~55.
- Bian Q T, Li D H, Pospelov I I, *et al.* 2004. Age, geochemistry and tectonic setting of Buqingshan ophiolites, north Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(4): 577~596.
- Bian Qiantao, Pospelov II, Li Huimin, *et al.* 2007. Discover of the end-Early Paleozoic adakite in the Buqingshan area, Qinghai province, and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 925~934(in Chinese with English abstract).
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1): 243~258.
- Chappell B W, Bryant C J, Wyborn D, *et al.* 1998. High- and Low-Temperature I-type Granites[J]. *Resource Geology*, 48(4): 225~235.
- Chen Nengsong, Li Xiaoyan, Wang Xinyu, *et al.* 2006. Zircon SHRIMP U-Pb age of Neoproterozoic metagranite in the North Kunlun unit on the southern margin of the Qaidam block in China [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(11): 1 311~1 314(in Chinese with English abstract).
- Chen N S, Sun M, He L, *et al.* 2002. Precise timing of the Early Paleozoic metamorphism and thrust deformation in the Eastern Kunlun Orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(13): 1 113~1 130.
- Chen X H, Gehrels G, Yin A, *et al.* 2012. Paleozoic and Mesozoic Basement Magmatisms of Eastern Qaidam Basin, Northern Qinghai Tibet Plateau: LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology and its Geological Significance[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 86(2): 350~369.
- Chen Youxin, Pei Xinzhi, Li Ruibao, *et al.* 2011. Zircon U-Pb age of Xiaomiao Formation of Proterozoic in the eastern section of the East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geoscience*, 25(3): 510~521(in Chinese with English abstract).
- Collins W J, Beams S D, White A R, *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 80(2): 189~200.
- Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P, *et al.* 2003. Atlas of zircon textures [J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 53(1): 469~495.
- Cui Meihui, Meng Fancong and Wu Xiangke. 2011. Early Ordovician island arc of Qimantag Mountain, eastern Kunlun: Evidences from geochemistry, Sm-Nd isotope and geochronology of intermediate-basic igneous rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3 365~3 379(in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Yang Jinjun, Zhao Hailing, *et al.* 1996. Igneous petroec-tonic assemblages and geotectonic evolution along Golmud-Ejinaqi [J]. *Geosciences Section*, 10(3): 330~343(in Chinese with English abstract).
- DePaolo D J, Linn A M and Schubert G. 1991. The continental crustal age distribution: Methods of determining mantle separation ages from Sm-Nd isotopic data and application to the southwestern United States[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*(1 978~2 012), 96(B2): 2 071~2 088.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26(1): 115~134.
- Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, *et al.* 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158.
- Feng Jianyun, Pei Xianzhi, Yu Shulun, *et al.* 2010. The discovery of the mafic-ultramafic melange in Kekesha area of Dulan County, East Kunlun region, and its LA-ICP-MS zircon U-Pb age [J]. *Geology in China*, 37(1): 28~38(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope

- composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Gao Yanlin, Wu Xiangnong and Zuo Guochao. 1988. The characters tectonic significance of ophiolite first discover in the East Kunlun area[J]. *Northwest Geoscience*, 1(21): 17~28(in Chinese with English abstract).
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. *Chemical Geology*, 120(3): 347~359.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3): 237~269.
- Guo Tongzhen, Liu Rong, Chen Fabin, *et al.* 2011. LA-MC-ICPMS Zircon U-Pb dating of Wulanwuzhuer porphyritic syenite granite in the Qimantag Mountain of Qinghai and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 30(8): 1 203~1 211(in Chinese with English abstract).
- Harris N W, Marzouki F H and Ali S. 1986. The Jabel Sayid complex, Arabian shield: geochemical constraints on the origin of peralkaline and related granites[J]. *Journal of the Geological Society*, 143(2): 287~295.
- Harris N W, Xu R H, Lewis C L, *et al.* 1988. Plutonic rocks of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 327(1 594): 145~168.
- Hoskin P O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *REV Mineral Geochem*, 53(1): 27~62.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595~2 604(in Chinese with English abstract).
- Jiang Chunfa, Yang Jingsui, Feng Binggui, *et al.* 1992. Opening-Closing Tectonics of Kunlun Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~192(in Chinese with English abstract).
- King P L, White A R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Li Xi, Yuan Wanming, Hao Nana, *et al.* 2014. Characteristics and tectonic setting of granite in Wulonggou area, East Kunlun Mountains [J]. *World Geology*, 33(2): 275~288(in Chinese with English abstract).
- Li Yuchun, Li Bin, Chen Jing, *et al.* 2013. Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of ore-bearing granodiorites from lalingzaohuo deposit and its geological significance[J]. *Mineral Petrol.*, 33(3): 110~115 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bin, Ma Changqian, Guo Pan, *et al.* 2013a. Discovery of the Middle Devonian A-type granite from the Eastern Kunlun orogen and its tectonic implications[J]. *Earth Science*, 38(5): 9 947~9 962 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bin, Ma Changqian, Jiang Hongan, *et al.* 2013b. Early Paleozoic tectonic transition from ocean subduction to collisional orogeny in the Eastern Kunlun region: Evidence from Huxiaoqin mafic rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2 093~2 106(in Chinese with English abstract).
- Liu Bin, Ma Changqian, Zhang Jinyang, *et al.* 2012. Petrogenesis of Early Devonian intrusive rocks in the east part of Eastern Kunlun Orogen and implication for Early Paleozoic orogenic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1 785~1 807(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhanqing, Pei Xianzhi, Li Ruibao, *et al.* 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the two suites of ophiolites at the Buqing-shan area of the Anyemaqen Orogenic Belt in the Southern Margin of East Kunlun and its tectonic implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 185~194 (in Chinese with English abstract).
- Long Xiaoping, Jin Wei, Ge Wenchun, *et al.* 2006. Zircon U-Pb geochronology and geological implications of the granitoids in Jin-shuikou, East Kunlun, NW China[J]. *Geochimica*, 35(4): 367~376(in Chinese with English abstract).
- Lu Lu, Wu Zhenhan, Hu Daogong, *et al.* 2010. Zircon U-Pb age for rhyolite of the Maoniushan Formation and its tectonic significance in the East Kunlun Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1 150~1 158(in Chinese with English abstract).
- Lu Lu, Zhang Yanlin, Wu Zhenhan, *et al.* 2013. Zircon U-Pb dating of Early Paleozoic granites from the East Kunlun Mountains and its geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(4): 447~454(in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian. 2002. Precambrian Geology in Northern Tibetan Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~125(in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Li Huaikun, Wang Huichu, *et al.* 2009. Detrital zircon population of Proterozoic meta-sedimentary strata in the Qinling-Qilian-Kunlun Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2 195~2 208 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 1999. Using Isoplot/EX, version2, a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronological Center Special Publication, (47): 151~181.

- Luo Mingfei, Mo Xuanxue, Yu xuehui, *et al.* 2015. Zircon U-Pb geochronology, petrogenesis and implication of the Later Permian granodiorite from the Wulonggou Area in East Kunlun, Qinghai Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(5): 182~195(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Ma Changqian, Xiong Fuhao, Yin Shuo, *et al.* 2015. Intensity and cyclicity of orogenic magmatism: An example from a Paleo-Tethyan granitoid batholith, Eastern Kunlun, northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3 555~3 568(in Chinese with English abstract).
- Meng Fancong, Cui Meihui, Jia Lihui, *et al.* 2015. Paleozoic continental collision of the East Kunlun orogen: Evidence from protoliths of the eclogites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3 581~3 594 (in Chinese with English abstract).
- Meng F C, Cui M H, Wu X K, *et al.* 2015. Heishan mafic-ultramafic rocks in the Qimantag area of Eastern Kunlun, NW China: remnants of an early Paleozoic incipient island arc[J]. *Gondwana Research*, 27(2): 745~759.
- Meng F C, Zhang J X and Cui M H. 2013. Discovery of Early Paleozoic eclogite from the East Kunlun, Western China and its tectonic significance[J]. *Gondwana Research*, 23(2): 825~836.
- Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, *et al.* 2007. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun orogenic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403~414(in Chinese with English abstract).
- Panino D A E. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 168(1): 55~75.
- Pan Yusheng and Zhang Yuquan. 1996. Geological characteristics and evolution of the Kunlun Mountains region during the Early Paleozoic [J]. *Science in China: Series D*, 39(4): 337~347 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63~81.
- Qi Shengsheng, Song Shuguang, Shi Lianchang, *et al.* 2014. Discovery and its geological significance of Early Paleozoic eclogite in Xiarihamu-Suhaitu area, western part of the East Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3 345~3 356(in Chinese with English abstract).
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Li Yongfei, *et al.* 2005. Zircon saturation temperatures of Yangba granodiorite and mafic microgranular enclaves in northern margin of Yangtze Block and its significance [J]. *Northwestern Geology*, 38(3): 1~5(in Chinese with English abstract).
- 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.
- Ren Jishun, Niu Baogui and Liu Zhigang. 1999. Soft collision, superposition orogeny and polycyclic suturing[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 85~93(in Chinese with English abstract).
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 3(12): 1~64.
- Rutter M J and Wyllie P J. 1988. Melting of vapour-absent tonalite at 10 kbar to simulate dehydration-melting in the deep crust[J]. *Nature*, 331(6 152): 159~160.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, *et al.* 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3): 311~324.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution[J]. *Journal of Geology*, 94(4): 57~72.
- Vervoort J D, Patchett P J, Gehrels G E, *et al.* 1996. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes [J]. *Nature*, 379(6 566): 624~627.
- Vervoort J D, Patchett P J, Albarède F, *et al.* 2000. Hf-Nd isotopic evolution of the lower crust[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 181(1): 115~129.
- Wang Dezi and Shen Weizhou. 2003 Genesis of granitoids and crustal evolution in southeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 209~220(in Chinese with English abstract).
- Wang Guan, Sun Fengyue, Li Biye, *et al.* 2013. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the early Devonian syenogranite in the Xiarihamu ore district from East Kunlun, with implications for the geodynamic setting[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 685~697(in Chinese with English abstract).
- Wang Guocan, Wang Qinghai, Jian Ping, *et al.* 2004. Zircon SHRIMP ages of Precambrian metamorphic basement rocks and their tectonic

- significance in the eastern Kunlun Mountains, Qinghai Province, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 481~490(in Chinese with English abstract).
- Wang Guocan, Wei Qirong, Jia Chunxing, *et al.* 2007. Some ideas of Precambrian geology in the East Kunlun, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(8): 929~937(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua and Xiong Xiaolin. 2000. The ascertainment of Late-Yanshanian A-type granite in Tongbai-Dabie orogenic belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 297~306, 315(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao and Liu Sheng. 2013. Zircon saturation temperatures of granites in the jiaonan area and their geological significations[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(5): 619~624(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Hu Nenggao, Wang Tao, *et al.* 2012. Late Ordovician Wanbaogou granitoid pluton from the southern margin of the Qaidam basin: Zircon SHRIMP U-Pb age, Hf isotope and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2 950~2 962(in Chinese with English abstract).
- Wang X X, Wang T, Ke C H, *et al.* 2015. Nd-Hf isotopic mapping of Late Mesozoic granitoids in the East Qinling orogen, central China: Constraint on the basements of terranes and distribution of Mo mineralization[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 169~183.
- Wang X X, Wang T and Zhang C L. 2013. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: constraints on orogenic process[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 129~151.
- Wang Yunshan and Chen Jiniang. 1987. *Metamorphic Zone and Metamorphism in Qinghai Province and Its Adjacent Areas*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~248(in Chinese with English abstract).
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295~304.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Lei Min, *et al.* 2014. Zircon SHRIMP U-Pb dating, Lu-Hf isotopic characteristics and petrogenesis of the Palaeozoic granites in Mangya area, southern Altun, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2 297~2 323(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007a. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 217~1 238(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007b. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Qiu Ruizhao *et al.* 2009. A preliminary study of the relationship between granitoids and the growth of continental crust: a case study of the formation of key orogen granitoids in China[J]. *Geology in China*, 36(3): 594~622(in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, *et al.* 2005. Granitoids and continental crustal growth modes in China[J]. *Chinese Geology*, 32(3): 343~352(in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Xing Zuoyun, Zhang Yi, *et al.* 2003. The major frontiers of the recent studies of granite[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 221~229(in Chinese with English abstract).
- Xiong F H, Ma C Q, Jiang H A, *et al.* 2014. Geochronology and geochemistry of Middle Devonian mafic dykes in the East Kunlun orogenic belt, Northern Tibet Plateau: Implications for the transition from Prototethys to Paleotethys orogeny[J]. *Chemie Der Erde-Geochemistry*, 74(2): 225~235.
- Xu Z Q, Yang J S, Jiang M, *et al.* 2001. Deep structure and lithospheric shear faults in the East Kunlun-Qiangtang region, northern Tibetan Plateau[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 44(1): 1~9.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, *et al.* 2007. *Orogenic Plateau: Terrane Amalgamation, Collision and Uplift in the Qinghai-Tibet Plateau*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~458(in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Robinson P T, Jiang C F, *et al.* 1996. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 258(1): 215~231.
- Yang Yueheng, Zhang Hongfu, Xie Liwen, *et al.* 2007. Accurate measurement of neodymium isotopic composition using neptune multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 35(1): 71~74(in Chinese with English abstract).
- Yin Hongfu and Zhang Kexin. 1998. Evolution and characteristics of the central orogenic belt[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(5): 437~442(in Chinese with English abstract).
- Yu Neng, Jin Wei, Ge Wenchun, *et al.* 2005. Geochemical study on peraluminous granite from Jinshuikou in East Kunlun[J]. *World Geology*, 24(2): 123~128(in Chinese with English abstract).
- Yuan W M, Zhang X T, Dong J Q, *et al.* 2003. A new vision of the

- intracontinental evolution of the eastern Kunlun Mountains, Northern Qinghai-Tibet plateau, China[J]. Proceedings of the 21st International Conference O, 36(1-6): 357~362.
- Zhang C L, Liu L, Wang T, *et al.* 2013. Granitic magmatism related to early Paleozoic continental collision in North Qinling[J]. Chinese Science Bulletin, 58(35): 4 405~4 410.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Wan Yusheng, *et al.* 2003. Early Paleozoic tectono-thermal event of the Jinshuikou Group on the southern margin of Qaidam: Zircon U-Pb SHRIMP age evidence[J]. Geological Bulletin of China, 22(6): 397~404(in Chinese with English abstract).
- Zhang J Y, Ma C Q, Xiong F H, *et al.* 2014. Early Paleozoic high-Mg diorite-granodiorite in the eastern Kunlun Orogen, western China: Response to continental collision and slab break-off[J]. Lithos, 120: 129~146.
- Zhang Yaoling, Zhang Xujiao, Hu Daogong, *et al.* 2010. SHRIMP Zircon U-Pb ages of rhyolite from the Naig Tal group in the East Kunlun orogenic belt[J]. Journal of Geomechanics, 16(1): 21~27, 50(in Chinese with English abstract).
- Zhou Chunjing, Hu Daogong, Barosh P J, *et al.* 2010. Zircon U-Pb Dating of the rhyolite-dacite porphyry in the sandaowan of East Kunlun mountains and its geological significance[J]. Journal of Geomechanics, 16(1): 28~35(in Chinese with English abstract).
- Zhu Y H, Lin Q X, Jia C X, *et al.* 2006. SHRIMP zircon U-Pb age and significance of Early Paleozoic volcanic rocks in East Kunlun orogenic belt, Qinghai Province, China[J]. Science in China, 49(1): 88~96.
- Zhu Yunhai, Lin Qixiang, Jia Chunxing, *et al.* 2005. SHRIMP zircon U-Pb age and significance of Early Paleozoic volcanic rocks in East Kunlun orogenic belt, Qinghai Province, China[J]. Science in China, 35(12): 1 112~1 119(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yunhai, Zhang Kexin, Pan Y M, *et al.* 1999. Determination of different ophiolitic belts in eastern Kunlun orogenic zone and their tectonic significance[J]. Earth Science, 24(2): 134~138(in Chinese with English abstract).
- 巴金, 陈能松, 王勤燕, 等. 2012. 柴南缘堇青石花岗岩的 Nd-Sr-Pb 同位素组成及其对岩石成因、源区构造属性和构造演化的启示[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 37(S1): 80~92.
- 边千韬, Pospelov I I, 李惠民, 等. 2007. 青海省布青山早古生代末期埃达克岩的发现及其构造意义[J]. 岩石学报, 23(5): 925~934.
- 陈能松, 李晓彦, 王新宇, 等. 2006. 柴达木地块南缘昆北单元变质新元古代花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 25(11): 1 311~1 314.
- 陈有炘, 裴先治, 李瑞保, 等. 2011. 东昆仑造山带东段元古界小庙岩组的锆石 U-Pb 年龄[J]. 现代地质, 25(3): 510~521.
- 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等. 2006. 东昆仑喀雅克登塔格杂岩体的 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 25(1): 25~32.
- 崔美慧, 孟繁聪, 吴祥珂. 2011. 东昆仑祁漫塔格早奥陶世岛弧: 中基性火成岩地球化学、Sm-Nd 同位素及年代学证据[J]. 岩石学报, 27(11): 3 365~3 379.
- 邓晋福, 杨建军, 赵海玲, 等. 1996. 格尔木-额济纳旗断面走廊域火成岩-构造组合与大地构造演化[J]. 现代地质, 10(3): 330~343.
- 冯建赟, 裴先治, 于书伦, 等. 2010. 东昆仑都兰可可沙地区镁铁-超镁铁质杂岩的发现及其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 中国地质, 37(1): 28~38.
- 高延林, 吴向农, 左国朝. 1988. 东昆仑山清水泉蛇绿岩特征及其大地构造意义[J]. 西北地质科学, 1(21): 17~28.
- 郭通珍, 刘 荣, 陈发彬, 等. 2011. 青海祁漫塔格山乌兰乌珠尔斑状正长花岗岩 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 地质通报, 30(8): 1 203~1 211.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2 595~2 604.
- 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 等. 1992. 昆仑开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 1~192.
- 李 希, 袁万明, 郝娜娜, 等. 2014. 东昆仑五龙沟花岗岩特征及其构造背景[J]. 世界地质, 33(2): 275~288.
- 李玉春, 李 彬, 陈 静, 等. 2013. 东昆仑拉陵灶火矿区花岗闪长岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. 矿物岩石, 33(3): 110~115.
- 刘 彬, 马昌前, 郭 盼, 等. 2013a. 东昆仑中泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造意义[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 38(5): 9 947~9 962.
- 刘 彬, 马昌前, 蒋红安, 等. 2013b. 东昆仑早古生代洋壳俯冲与碰撞造山作用的转换: 来自胡晓钦镁铁质岩石的证据[J]. 岩石学报, 29(6): 2 093~2 210.
- 刘 彬, 马昌前, 张金阳, 等. 2012. 东昆仑造山带东段早泥盆世侵入岩的成因及其对早古生代造山作用的指示[J]. 岩石学报, 28(6): 1 785~1 807.
- 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等. 2011. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. 地质学报, 85(2): 185~194.
- 龙晓平, 金 巍, 葛文春, 等. 2006. 东昆仑金水口花岗岩体锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 地球化学, 35(4): 367~376.

附中文参考文献

- 陆 露, 吴珍汉, 胡道功, 等. 2010. 东昆仑牦牛山组流纹岩锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. 岩石学报, 26(4): 1 150~1 158.
- 陆 露, 张延林, 吴珍汉, 等. 2013. 东昆仑早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地球学报, 34(4): 447~454.
- 陆松年. 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探[J]. 北京: 地质出版社, 1~125.
- 陆松年, 李怀坤, 王惠初, 等. 2009. 秦-祁-昆造山带元古宙副变质岩层碎屑锆石年龄谱研究[J]. 岩石学报, 25(9): 2 195~2 208.
- 罗明非, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2015. 东昆仑五龙沟晚二叠世花岗岩闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石成因及意义[J]. 地学前缘, 22(5): 182~195.
- 马昌前, 熊富浩, 尹 烁, 等. 2015. 造山带岩浆作用的强度和旋回性: 以东昆仑古特提斯花岗岩类岩基为例[J]. 岩石学报, 31(12): 3 555~3 568.
- 孟繁聪, 崔美慧, 贾丽辉, 等. 2015. 东昆仑造山带早古生代的大陆碰撞: 来自榴辉岩原岩性质的证据[J]. 岩石学报, 31(12): 3 581~3 594.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 13(3): 403~414.
- 潘裕生, 张玉泉. 1996. 昆仑山早古生代地质特征与演化[J]. 中国科学: D 辑, 26(4): 302~307.
- 祁生胜, 宋述光, 史连昌, 等. 2014. 东昆仑西段夏日哈木-苏海图早古生代榴辉岩的发现及意义[J]. 岩石学报, 30(11): 3 345~3 356.
- 秦江锋, 赖绍聪, 李永飞, 等. 2005. 扬子板块北缘阳坝岩体锆石饱和温度的计算及其意义[J]. 西北地质, 38(3): 1~5.
- 任纪舜, 牛宝贵, 刘志刚. 1999. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用[J]. 地学前缘, 6(3): 85~93.
- 王德滋, 沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化[J]. 地学前缘, 10(3): 209~220.
- 王 冠, 孙丰月, 李碧乐, 等. 2013. 东昆仑夏日哈木矿区早泥盆世正长花岗岩锆石 U-Pb 年代学, 地球化学及其动力学意义[J]. 大地构造与成矿学, 37(4): 685~697.
- 王国灿, 王青海, 简 平, 等. 2004. 东昆仑前寒武纪基底变质岩系的锆石 SHRIMP 年龄及其构造意义[J]. 地学前缘, 11(4): 481~490.
- 王国灿, 魏启荣, 贾春兴, 等. 2007. 关于东昆仑地区前寒武纪地质认识的几点认识[J]. 地质通报, 26(8): 929~937.
- 王 强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏-大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定[J]. 岩石矿物学杂志, 19(4): 297~306.
- 王 涛, 刘 燊. 2013. 胶南花岗岩锆石饱和温度及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 32(5): 619~624.
- 王晓霞, 胡能高, 王 涛, 等. 2012. 柴达木盆地南缘晚奥陶世万宝沟花岗岩: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素和元素地球化学[J]. 岩石学报, 28(9): 2 950~2 962.
- 王云山, 陈基娘. 1987. 青海省及毗邻地区变质地带与变质作用[M]. 北京: 地质出版社, 1~248.
- 吴才来, 郇源红, 雷 敏, 等. 2014. 南阿尔金茫崖地区花岗岩类锆石 SHRIMP U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. 岩石学报, 30(8): 2 297~2 323.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007a. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1 217~1 238.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007b. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 肖庆辉, 邓晋福, 邱瑞照, 等. 2009. 花岗岩类与大陆地壳生长初探——以中国典型造山带花岗岩类岩石的形成为例[J]. 中国地质, 36(3): 594~622.
- 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福, 等. 2005. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究[J]. 中国地质, 32(3): 343~352.
- 肖庆辉, 邢作云, 张 昱, 等. 2003. 当代花岗岩研究的几个重要前沿[J]. 地学前缘, 10(3): 221~229.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 2007. 造山的高原: 青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制[M]. 北京: 地质出版社, 1~458.
- 杨岳衡, 张宏福, 谢烈文, 等. 2007. 多接收器电感耦合等离子质谱精确测定钨同位素组成[J]. 分析化学, 35(1): 71~74.
- 殷鸿福, 张克信. 1998. 中央造山带的演化及其特点[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 23(5): 437~442.
- 余 能, 金 巍, 葛文春, 等. 2005. 东昆仑金水口过铝花岗岩的地球化学研究[J]. 世界地质, 24(2): 123~128.
- 张成立, 刘 良, 王 涛, 等. 2013. 北秦岭早古生代大陆碰撞过程中的花岗岩浆作用[J]. 科学通报, 58(23): 2 323~2 329.
- 张建新, 孟繁聪, 万渝生, 等. 2003. 柴达木盆地南缘金水口群的早古生代构造热事件: 锆石 U-Pb SHRIMP 年龄证据[J]. 地质通报, 22(6): 397~404.
- 张耀玲, 张绪教, 胡道功, 等. 2010. 东昆仑造山带纳赤台群流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质力学学报, 16(1): 21~27.
- 周春景, 胡道功, Barosh P J, 等. 2010. 东昆仑三道湾流纹英安斑岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质力学学报, 16(1): 28~35.
- 朱云海, 林启祥, 贾春兴, 等. 2005. 东昆仑造山带早古生代火山岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 中国科学, 35(12): 1 112~1 119.
- 朱云海, 张克信, Pan Y M, 等. 1999. 东昆仑造山带不同蛇绿岩带的厘定及其构造意义[J]. 地球科学, 24(2): 134~138.