地学前缘
EARTH SCIENCE FRONTIERS

阿尔金江尕勒萨依榴辉岩和围岩锆石 LA-ICP-MS 微区原位定年及其地质意义

刘 良[1]， 张安达[1]， 陈丹玲[1]， 杨家喜[1,2]， 罗金海[1]， 王 超[1]

1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室，西北大学 地质学系，陕西 西安 710069
2. 长安大学 地球科学与国土资源学院，陕西 西安 710054

Liu Liang[1]， Zhang Anda[1]， Chen Danling[1]， Yang Jiaxi[1,2]， Luo Jinhai[1]， Wang Chao[1]

1. *State Key Laboratory of Continental Dynamics*, *Department of Geology*, *Northwest University*, *Xi'an* 710069, *China*
2. *College of Earth science and land Resources*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710054, *China*

Liu Liang, Zhang Anda, Chen Danling, et al. Implications based on LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of eclogite and its country rock from Jianggalesayi area, Altyn Tagh. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 098-107

Abstract: Based on Cathodo-luminescence (CL) and LA-ICP-MS in situ trace element analyses and dating, this paper presents new zircon U-Pb data for the eclogite and its country rock (garnet- biotite gneiss) from the Jianggalesayi Area, Altyn Tagh, reveal interesting geodynamic implications. The zircon grains in the eclogite mainly display homogeneous internal texture, with residual cores being found in a few grains. These residual cores show that they are typical magmatic products, characterized by the enrichment in HREE and high ratio of Th/U (mostly is larger than 0.4). On the other hand the rims of these zircons and the homogeneous zircon grains show flat REE or slightly depleted HREE patterns, which are typical for metamorphic zircons coexisting with garnet. The zircon grains of the garnet-biotite gneiss display a core-mantle-rim internal structure. The cores show the features of detrital zircons, whereas the mantles show metamorphic features of coexisting with garnet. LA-ICP-MS in situ dating yields the metamorphic ages of (493±4.3) Ma and (499±27) Ma respectively for the eclogite and garnet-biotite gneiss, and yields a protolith age of (754±9) Ma for the eclogite. The metamorphic age of eclogite is almost the same as that of the country rock paragneiss and is about 250 Ma later than its protolith age, which indicates that the UHP eclogite is the product of continental crust deep subduction.

Key words: eclogite; paragneiss; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; Jianggalesayi; Altyn Tagh

摘 要：阿尔金江尕勒萨依榴辉岩及其直接围岩——石榴子石黑云母片麻岩锆石的阴极发光图像、微区原位 LA-ICP-MS 微量元素分析研究表明，榴辉岩锆石内部结构比较均匀，少数颗粒保留斑杂状残核；位于锆石斑杂状残核测点的重稀土相对富集，Th/U 比值多大于 0.4，为岩浆锆石的特征；位于锆石边部与内部结构均匀颗粒上的测点显示 HREE 近平坦型或弱亏损型的稀土配分模式，显示了与石榴石平衡共生的变质锆石特征；而石榴子石黑云母片麻岩的锆石具有核-幔-边结构，核部为碎屑锆石，幔部则为与石榴石平衡共生的变质锆石。LA-ICP-MS 微区定年获得榴辉岩的变质年龄为(493±4.3) Ma，其原岩形成年龄为(754±9) Ma；石榴子石黑云母片麻岩的变质年龄为(499±27) Ma。榴辉岩的变质年龄滞后于其原岩的形成年龄约 250 Ma，并且榴辉岩与其直接围岩副片麻岩的变质年龄几乎完全一致，充分表明该超高压榴辉岩的形成是陆壳深俯冲作用的产物。

关键词：榴辉岩；榴辉岩围岩——石榴子石黑云母片麻岩；LA-ICP-MS 锆石定年；江尕勒萨依；阿尔金

收稿日期：2006-12-11
基金项目：国家自然科学基金项目(40372088, 40572111, 40472043)；教育部科学技术研究重大项目(306021)；国家重点基础研究发展计划"973"项目(G1999075508)
作者简介：刘良(1956—)，男，博士，教授，从事矿物学、岩石学研究。E-mail: liuliang@nwu.edu.cn

中图分类号：P597，P588.34　文献标识码：A　文章编号：1005－2321(2007)01－0098－10

近年来，阿尔金造山带南缘江尕勒萨依地区相继发现榴辉岩[1]及其经历超高压变质的证据[1-4]，阿尔金英格利萨依地区也已确定有超高压石榴石二辉橄榄岩、花岗质片麻岩及片麻状(含)钾长石榴辉石岩[5-9]，从而表明沿阿尔金南缘分布着一条超高压变质岩带(图 1)。这些研究受到国内外研究者的高度重视与关注。最近，张安达等 (2004)[10] 和 Zhang 等(2005)[11]分别对英格利萨依地区的几种超高压岩石中的锆石利用高精度的 SHRIMP 或 LA-ICP-MS 原位微区方法获得了几乎一致的变质时代(约 500 Ma)，而对区内榴辉岩最为发育的江尕勒萨依地区，唯一的已有年代学数据是前人利用全岩-石榴石-绿辉石的 Sm-Nd 等时线法和单颗粒锆石 U-Pb 方法(TIMS)测得的，年龄值分别为(500±10) Ma 和(503.9±5.3) Ma[12]。那么，使用矿物对 Sm-Nd 等时线方法和锆石 TIMS 方法测得的该榴辉岩的变质年龄值是否可信？阿尔金江尕勒萨依与英格利萨依两地超高压岩石的变质时代是否具有一致性？其次，阿尔金超高压榴辉岩与其围岩之间的关系以往缺乏研究，尤其是迄今阿尔金超高压榴辉岩的直接围岩还缺少年代学资料(围岩的变质时代是多少？围岩与榴辉岩的变质时代是否具有一致性？)。另外，已有地球化学研究显示，阿尔金榴辉岩的原岩具有 E-MORB 的性质，人们非常关注其形成究竟是洋壳还是陆壳深俯冲的产物。针对这些问题，本文选择阿尔金江尕勒萨依榴辉岩及其直接围岩为研究对象，在锆石阴极发光图像分析的基础上，利用高精度的 LA-ICP-MS 微区原位分析技术，对锆石不同成因微区同时进行系统的微量元素和同位素年代学研究，用来准确确定区内超高压榴辉岩及其围岩的变质时代，为深入探讨区内超高压岩石与围岩片麻岩之关系、深俯冲发生的地球动力学机制及其与柴北缘超高压岩带的关系提供进一步的约束资料。

1　地质产状与岩石学特征

阿尔金榴辉岩(含石榴单斜辉石岩和榴闪岩)呈透镜体状，主要分布在阿尔金南缘阿帕—茫崖构造混杂岩带北部边缘的江尕勒萨依剖面及其附近，断续向东可追索到茫崖石棉矿西北的米兰河上游，全长约 200 km(图 1)，位于原认为是元古宇的阿尔金群的片麻岩系之中，透镜体的长轴与区域片麻理的走向基本一致。沿江尕勒萨依剖面观察，榴辉岩的直接围岩有长英质片麻岩、(含)石榴子石云母片麻岩和大理岩三种(图 2)。另外，在一些露头上常常可以观察到以榴辉岩为中心，向四周渐变为石榴辉石岩或榴闪岩或角闪片岩的现象，呈渐变过渡关系。榴辉岩按组成矿物的粒度可进一步区分为粗粒榴辉岩(组成矿物粒度一般>0.1 mm)和细粒榴辉岩(矿物粒度一般<0.1 mm)两种。新鲜榴辉岩的主要

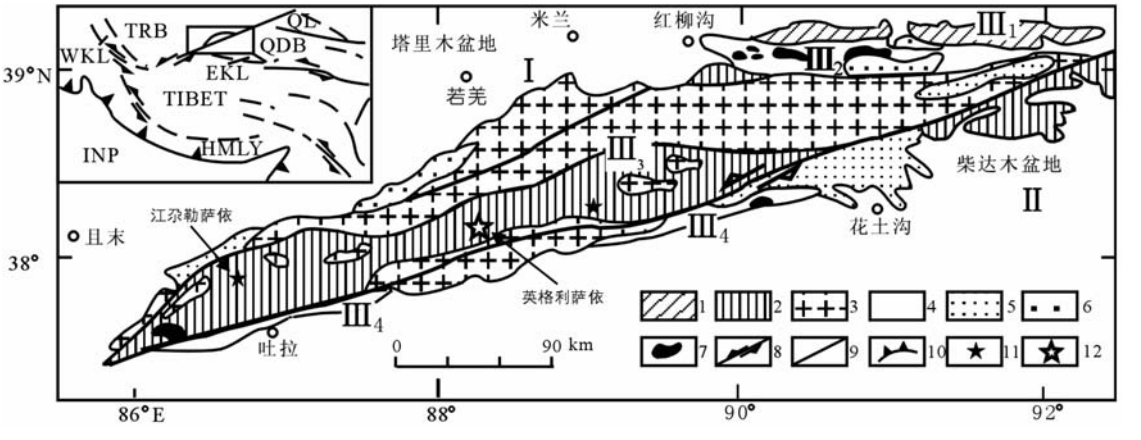


图 1　阿尔金造山带构造地质图

(据文献[3]修改)

Fig. 1　Geological and structural map of the Altyn Tagh orogen

1—太古宇；2—下元古界(阿尔金群)；3—中—上元古界；4—古生界；5—中—新生界；6—花岗岩；7—超基性岩；8—走滑断裂；9—断裂；10—逆冲断裂；11—榴辉岩产地；12—石榴石橄榄岩和含石榴子石花岗质片麻岩产地：TRB—塔里木盆地；QL—祁连山；QDB—柴达木盆地。Ⅰ—塔里木地块；Ⅱ—柴达木地块；Ⅲ—阿尔金造山带；$Ⅲ_1$—阿北变质地块；$Ⅲ_2$—红柳沟—拉配泉混杂岩带；$Ⅲ_3$—米兰河—金雁山地块；$Ⅲ_4$—阿帕—茫崖构造混杂岩带

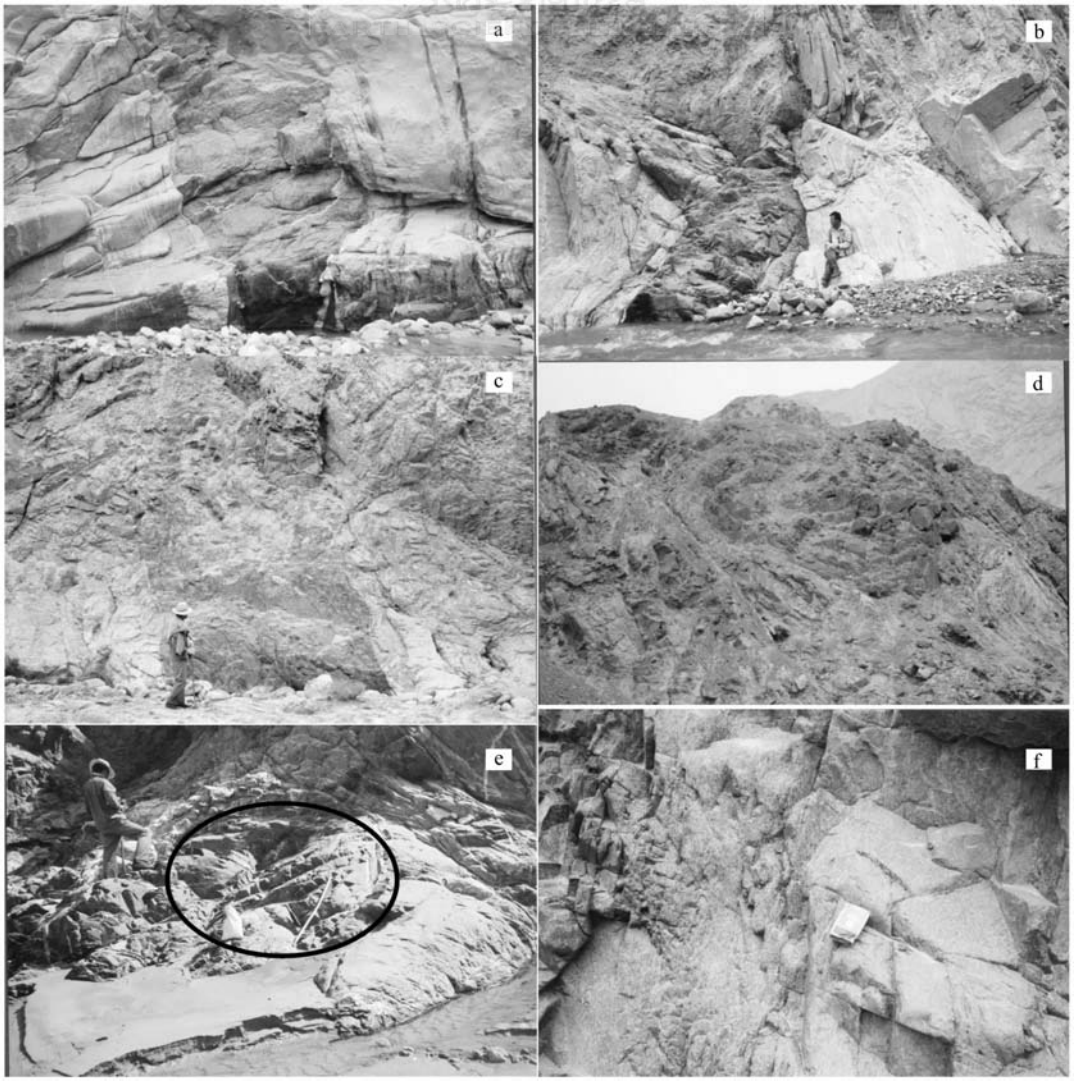


图 2 阿尔金江尕勒萨依榴辉岩与围岩的野外关系照片

Fig. 2 Field relationship between eclogite and associated rocks in the Jianggalesayi, Altun Tagh

图中 a—围岩花岗质片麻岩;b—围岩大理岩;c, d—围岩石榴石黑云母片麻岩;e, f—退变的榴辉岩露头

组成矿物为石榴石+绿辉石+石英+金红石,退变榴辉岩中的石榴子石与绿辉石的含量明显减少,而角闪石和斜长石含量明显增加,一些岩石中甚至不能找到绿辉石或辉石。

用于本次测年的榴辉岩样品为呈块状构造的粗粒榴辉岩,主要组成矿物有石榴子石(40%~50%)、绿辉石(30%~35%)、石英(5%±),少量退变角闪石(5%±)和斜长石(2%±),以及副矿物金红石、钛铁矿、磷灰石和锆石等。其中,石榴石和绿辉石均见伴有胀裂纹的多晶石英包体,绿辉石见丰富的石英棒状出溶物,金红石出溶钛铁矿,这些特征一致表明该岩石经历了超高压变质[1-4]。而用于测年的另一样品是榴辉岩的直接围岩——石榴石黑云母片麻岩,该岩石主要由不等量的微斜长石(20%~35%)、斜长石(15%~35%)、石英(20%~30%)、黑云母(5%~10%)和石榴石(15%)组成,含少量蓝晶石或夕线石,副矿物见锆石、磁铁矿和金红石等。该片麻岩目前尚未发现超高压变质的证据,但依据其矿物组合特征分析,该岩石至少经历了高角闪岩相或麻粒岩相的变质变形。

地球化学研究表明①,江尕勒萨依榴辉岩的原岩属拉斑玄武岩系列,均具轻稀土近平坦或略为富集型,富集 Nb、Ta,其 Zr/Nb 值介于 10.04~11.29,ε_{Nd}均为正值,其原岩具有 E-MORB 的特征;

① 张安达. 阿尔金超高压榴辉岩及其围岩的地球化学、年代学研究基地质意义类的地球化学及其动力学意义[D]. 西安:西北大学,2006.

而石榴子石黑云母片麻岩稀土配分为轻稀土富集的右倾型,其原岩为典型的陆壳沉积物。

2 锆石样品与分析方法

本文研究的锆石样品分别从约 30 kg 榴辉岩和约 10 kg 石榴石黑云母片麻岩大样中分选出来的。从岩石样品的粉碎、淘洗,到利用电磁仪和重液进行分选的整个过程中,均严格避免了锆石样品之间的相互污染。对分选出来的锆石在双目镜下挑出无色透明、无裂痕、无包体的颗粒,用环氧树脂固定、抛光至锆石颗粒一半出露,然后进行阴极发光(CL)内部结构及 LA-ICP-MS 原位微量元素和同位素分析测试。本文锆石的 CL 照相是在中国地质科学院矿床地质研究所电子探针室完成的,其余分析测试均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。LA-ICP-MS 分析采用 Hewlett packard 公司最新一代带有 Shield Torch 的 Agilient 7500a ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 Excimer 激光器(工作物质 ArF, 波长 193 nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统的联机上进行,其中榴辉岩锆石的微量元素和 U-Th-Pb 同位素测定是在一个测点上同时完成的。激光束斑直径为 30 μm,激光剥蚀样品的深度为 20～40 μm。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标,^{29}Si 作为内标。同位素测定时,普通铅根据 Andersen Tom[13] 的 3D 坐标法进行校正,详细分析步骤和数据处理方法参见文献[14]。

3 锆石内部结构和微量元素特征

(1)锆石内部结构:榴辉岩中的锆石具有短柱状和浑圆状外形,浑圆状颗粒居多。由阴极发光图像来看,锆石的内部结构比较均匀,仅少数颗粒隐约能看出有斑杂状残核存在。无论短柱状锆石还是浑圆状锆石,它们都发育很好的多晶面(图 3a),表现出变质成因锆石的特征[15]。

石榴子石黑云母片麻岩中的锆石呈浑圆形或短柱状(图 3b),内部结构相当复杂,总体具有多层内部显微结构。部分锆石颗粒内部结构较为完整,核部明显含有残核,其幔部为呈面状或扇状结构特征,符合变质锆石的结构特征;边部可能为后期形成的白色退变亮边,最宽处达 30 μm 左右。少数锆石颗粒核部具有明显或隐约可见的岩浆振荡生长环带,幔部与边部不甚明显。

(2)锆石微量元素:参考锆石的 CL 图像,利用 LA-ICP-MS 对榴辉岩与石榴子石黑云母片麻岩锆石进行原位微量元素分析结果分别见表 1,图 4 是其对应的球粒陨石标准化稀土配分图。

由表 1 和图 4(a)可以看出,榴辉岩锆石的稀土特征明显分为两类,第一类是位于锆石具斑杂状残核的测点,其稀土总量(24.6～991 μg/g)、重稀土含

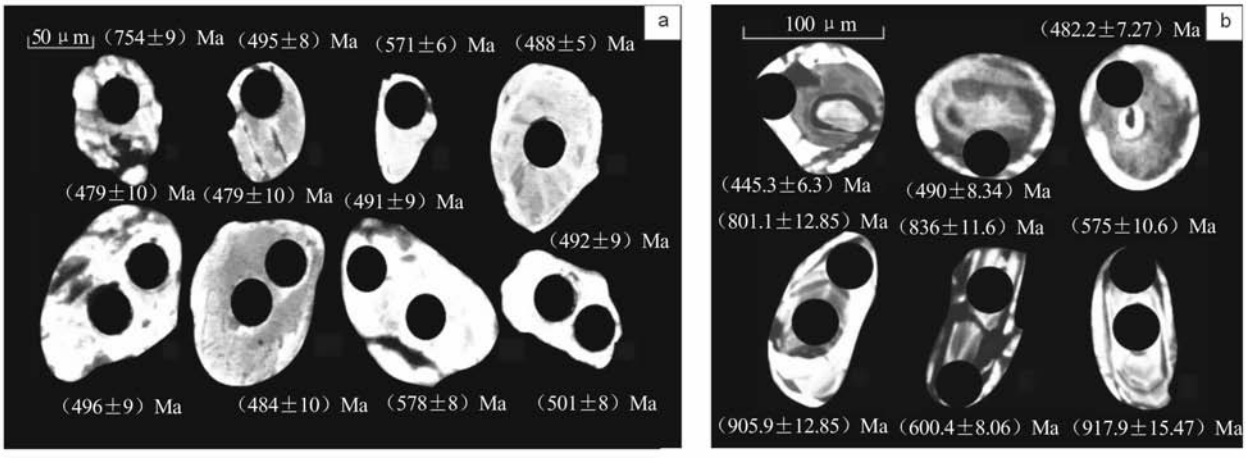


图 3 榴辉岩(a)和石榴子石黑云母片麻岩(b)典型锆石的阴极发光(CL)图像及$^{206}Pb/^{238}U$年龄

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons and their $^{206}Pb/^{238}U$ ages of eclogite (a) and garnet-biotite gneiss(b)

表 1 阿尔金江尕勒萨依榴辉岩和石榴子石黑云母片麻岩锆石的微量元素含量(μg/g)

Table 1 Trace element compositions(μg/g) of the zircons from eclogite and garnet-biotite gneiss in Jianggalesayi, Altyn Tagh

测点	$w_B/10^{-6}$																		
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	U	Th/U	∑REE	∑HREE	$(Gd/Yb)_N$
榴辉岩岩																				
02A35.1	0.023	5.62	0.026 4	0.58	1	0.617	2072	0.56	4.08	0.922	2.9	0.444	3.33	0.499	15.62	58.56	0.27	23.32	15.455	10.01
02A35.3	0.024	7.72	0.031	0.65	1.2	0.924	4037	0.938	6.19	1.419	4.3	0.728	5.22	0.829	12.77	63.9	0.20	34.54	23.994	15.56
02A35.4	0.028	6.87	0.06	1.02	1.52	0.062	3.5	0.68	4.67	1.032	2.91	0.476	4.18	0.603	8.39	64.69	0.13	28.31	18.05	13.36
02A35.5	0.028	4.34	0.03	0.42	0.69	0.46	2.45	0.55	4.06	0.94	2.79	0.47	3.98	0.59	6.32	50.6	0.12	21.8	15.8	11.5
02A35.6	0.032	7	0.03	0.69	1.11	0.77	4.39	0.91	6.6	1.51	4.66	0.68	5.19	0.84	16.7	77.9	0.22	34.4	24.7	13.7
02A35.8	0.084	9.53	0.07	0.52	1.1	0.63	2.9	0.65	4.4	1.17	3.28	0.50	4.14	0.64	9.89	55.3	0.18	29.6	17.6	15.3
02A35.10	0.047	6.52	0.044	0.598	0.788	0.627	3.06	0.7	5.06	1.227	3.86	0.654	4.95	0.776	16.85	55.73	0.30	28.91	20.287	14.68
02A35.11	0.09	11.9	0.11	2.14	4.18	1.28	21.6	7.54	88.8	32.8	137	26.6	233	40.1	98.1	244	0.40	609	589	56.7
2A35.12	0.02	6.58	0.02	0.54	0.89	0.49	2.93	0.53	4.12	0.93	2.86	0.47	3.68	0.57	11.7	43.4	0.27	24.6	16.1	15.6
02A35.13	0.02	6.76	0.04	0.23	0.60	0.42	1.03	0.38	2.97	0.79	2.25	0.37	3.17	0.51	10.1	44.1	0.23	20.5	12.4	12.7
02A35.14	0.02	6.56	0.02	0.24	1.21	0.78	3.88	0.80	6.08	1.39	4.48	0.66	4.94	0.82	13.6	56.6	0.24	31.9	23.0	20.3
02A35.15	0.02	7.93	0.10	1.41	1.21	0.71	3.99	0.76	6.31	1.46	4.35	0.70	5.74	0.84	18.0	62.8	0.29	35.5	24.1	19.2
02A35.17	0.03	6.1	0.05	0.72	1.04	0.67	2.75	0.53	4.07	0.90	2.79	0.44	3.68	0.62	18.7	59.5	0.31	24.4	15.7	13.0
02A35.19	0.07	7023	0.04	0.28	1.34	0.68	3.98	0.89	6.65	1.53	4.43	0.70	5.27	0.86	19.6	49.5	0.40	33.9	24.3	25.7
02A35.20	0.04	5.55	0.01	0.25	0.83	0.47	2.77	0.63	4.57	1.04	3.02	0.46	4.16	0.6	14.9	45.2	0.33	24.4	17.2	18.2
02A35.21	0.03	5.87	0.02	0.40	0.94	0.49	3.51	0.91	8.75	2.73	11.3	2.14	20.3	3.5	33.7	85.0	0.40	60.9	53.2	13.6
02A35.22	0.02	6.51	0.03	0.29	0.97	0.64	5.07	1.4	14.1	4.7	20.5	4.3	39.4	7.08	37.7	98.2	0.38	105	96.7	26.6
02A35.23	0.046	8.54	0.068	0.87	1.94	0.651	8.08	2.612	28.19	10.65	49.96	11.69	120.52	23.87	58.98	129.429	0.46	267.688	255.6	66.42
02A35.25	0.17	30.1	0.81	13.8	25.8	3.28	70.7	18.2	161	47.5	182	36.9	341	57.8	139	356	0.39	991	917	84.1
02A35.26	0.06	14.8	0.17	1.24	2.43	2.04	8.26	2.13	20.7	7.69	36.1	8.3	86.7	16.1	58.6	244	0.24	206	186	30.6
石榴子石黑云母片麻岩																				
02A17.1	0.18	3.88	0.115	4.89	6.15	0.198	33.56	11.27	170.48	63.65	296.69	62.41	582.05	93	119.67	552.83	0.22	1 328.5	1 313.1	21.40
02A17.1	2.7	23.39	1.22	8.05	6.63	0.53	34.07	13.8	174.48	72.3	331.71	70.4	658.95	116.01	743.73	1 147.7	0.65	1 514.3	1 471.7	23.86
02A17.1	0.093	6.42	0.411	6.78	11.35	0.33	45.05	13.43	143.75	50.94	196.26	36.63	344.75	59.76	71.18	162.11	0.44	915.95	890.57	9.44
02A17.1	0.106	2.06	0.023	0.62	2.34	0.158	12.07	3.51	28.21	7.52	25.53	5.02	45.87	9.99	46.04	575.23	0.08	143.03	137.72	4.69
02A17.1	0.116	1.31	0.128	1.35	3.15	0.158	15.7	4.64	27.6	7.95	23.79	3.73	34.38	4.63	29.6	194.56	0.15	128.63	122.42	2.70

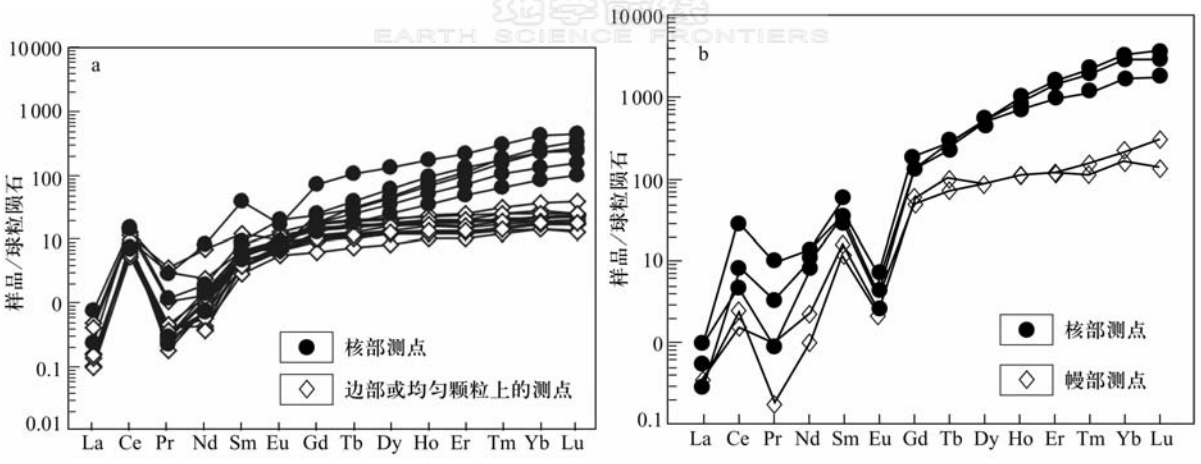


图 4 江尕勒萨依榴辉岩(a)与石榴石黑云母片麻岩(b)锆石的球粒陨石标准化稀土配分图

Fig. 4 Chondrite-normalized REE-patterns of zircons from eclogite(a) and garnet-biotite gneiss(b)

量(16.1～917 μg/g)总体偏高,$(Gd/Yb)_N$为 13.6～84.1,表现为重稀土比较富集型,其 Th/U 比值多大于 0.4,符合岩浆锆石的特征[16-20];而第二类是位于锆石边部与内部结构均匀颗粒上的测点,其稀土总量(20.5～609 μg/g)、重稀土含量(12.4～589 μg/g)较低,$(Gd/Yb)_N$为 10.01～56.7,表现为重稀土近平坦型或弱亏损型。前人研究表明,变质过程对锆石的 REE 分配影响不明显[21-22],但由于石榴石中大量富集重稀土导致与之同时形成的锆石重稀土含量降低,因此在高压-超高压变质岩中与石榴石平衡生长的变质锆石具有低的稀土总量和较小的甚至是右倾的重稀土配分模式,表现为不同程度的 HREE 及 Y 的亏损[20,22-25]。因此,该榴辉岩锆石的第二类稀土配分形式应为典型的与石榴子石共生的变质锆石的稀土特征。

由表 1 和图 4(b)可以看出,石榴子石黑云母片麻岩锆石的核部与幔部稀土配分特征明显不同。核部稀土含量、重稀土含量及 Th/U 值较高,分别为 918.95～1 514.24 μg/g、890.57～1 471.72 μg/g 和 0.20～0.65,其中 Th/U 值最高达 0.65,符合典型岩浆锆石的 Th/U 值(>0.4)的特征[16-20],结合阴极发光图像分析表明,核部可能多为岩浆成因锆石。幔部锆石的稀土含量、重稀土含量和 Th/U 值相对较低,分别为 128.63～143.03 μg/g、122.43～137.72 μg/g 和 0.08～0.15,其 Th/U 值远低于核部,与典型变质锆石的 Th/U 值(<0.1)接近,幔部稀土配分呈重稀土近平坦型,显示与石榴石平衡共生的特征。结合幔部锆石 CL 图像具面状结构特征,共同说明石榴石黑云母片麻岩锆石的幔部为变质成因锆石。后期退变形成的亮边太窄,没有对其进行微区微量元素的分析。

4 锆石 U-Pb 定龄

阿尔金榴辉岩和石榴子石黑云母片麻岩锆石的定年测试结果见表 2 和图 5。表 2 中的测试结果已去掉普通铅含量较高的测点,并采用 Andersen Tom[13]的方法进行普通铅校正,年龄计算及谐和图采用 Isoplot/Ex(ver2.94)程序[26]完成。

本次研究对榴辉岩锆石共进行了 20 个测点分析,其中有 15 个测点的年龄数据构成一个很好的集中区(图 5a),它们聚集在一致线上及其附近的一个很小的区域,其$^{206}Pb/^{238}U$年龄介于 479～508 Ma,对应测点的 TH/U 大多数<0.3,其$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄为(493±4.3)(2σ) Ma。而来自锆石核部的 6 个测点的年龄值偏老,而且比较分散,其中位于一致线上而且年龄值最大的一个测点的年龄值为(754±9) Ma,对应测点的 Th/U 值为 0.40。结合前述锆石 CL 图像和微量元素特征分析,(493±4.3)(2σ) Ma 的年龄值应代表榴辉岩的变质年龄,而(754±9) Ma 的年龄值可能代表榴辉岩原岩的形成年龄。

从图 5b 可以看出,石榴子石黑云母片麻岩锆石的 29 个测点的分析数据的投点呈串珠状断续分布在一致曲线上或其下方附近,其中位于锆石幔部的 4 个测点给出了一个较好的年龄集中区,测点$^{206}Pb/^{238}U$年龄值变化于 482～515 Ma,对应测点的 TH/U 值为 0.1 左右,其$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄为(499±27) Ma(2σ);而一致曲线最上端的一个年龄集中区是由位于锆石核部的4个测点所构成,

表 2 江尕勒萨依榴辉岩和石榴子石黑云母片麻岩锆石的 LA-ICP-MS 定年分析结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic data of zircons from eclogite and garnet- biotite gneiss in Jianggalesayi, Altyn Tagh

样品	元素含量/(μg·g⁻¹)		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ						
榴辉岩															
02A35-01	15.62	58.56	0.27	0.060 18	0.005 65	0.647 54	0.059 26	0.078 04	0.001 66	610	211	507	37	484	10
02A35-03	12.77	63.9	0.20	0.063 16	0.004 95	0.671 97	0.051 27	0.077 20	0.001 61	714	127	522	31	479	10
02A35-04	8.39	64.69	0.13	0.055 61	0.003 94	0.617 66	0.042 71	0.080 60	0.001 42	437	123	488	27	500	8
02A35-05	6.32	50.68	0.12	0.059 42	0.004 43	0.654 65	0.047 52	0.079 94	0.001 55	583	124	511	29	496	9
02A35-06	16.79	77.92	0.22	0.055 72	0.003 77	0.612 64	0.040 38	0.079 78	0.001 38	441	116	485	25	495	8
02A35-08	9.89	55.33	0.18	0.061 48	0.004 06	0.684 67	0.044 06	0.080 80	0.001 39	656	109	530	27	501	8
02A35-10	16.85	55.73	0.30	0.061 75	0.004 66	0.675 00	0.049 64	0.079 31	0.001 57	665	124	524	30	492	9
02A35-11	98.14	244.74	0.40	0.067 81	0.002 66	0.929 21	0.035 02	0.099 42	0.001 26	863	57	667	18	611	7
02A35-12	11.72	43.45	0.27	0.065 49	0.005 07	0.745 53	0.056 13	0.082 60	0.001 72	790	123	566	33	512	10
02A35-13	10.09	44.18	0.23	0.060 30	0.006 12	0.651 07	0.064 38	0.078 31	0.001 77	614	228	509	40	486	11
02A35-14	13.62	56.65	0.24	0.055 74	0.004 40	0.607 66	0.046 87	0.079 11	0.001 53	442	138	482	30	491	9
02A35-15	18.03	62.86	0.29	0.058 62	0.005 10	0.647 05	0.054 89	0.080 09	0.001 78	553	147	507	34	497	11
02A35-17	18.74	59.51	0.31	0.061 78	0.004 41	0.697 93	0.048 52	0.081 98	0.001 58	667	116	538	29	508	9
02A35-20	14.93	45.21	0.33	0.058 58	0.005 33	0.637 31	0.056 58	0.078 90	0.001 55	552	206	501	35	490	9
02A35-21	33.71	85.09	0.40	0.064 71	0.002 37	1.106 28	0.039 00	0.124 10	0.001 51	765	54	756	19	754	9
02A35-22	37.79	98.26	0.38	0.066 72	0.003 25	0.862 16	0.040 58	0.093 81	0.001 39	829	73	631	22	578	8
02A35-23	58.98	129.49	0.46	0.069 03	0.003 88	0.803 53	0.043 65	0.084 50	0.001 43	900	84	599	25	523	9
02A35-25	139.07	356.9	0.39	0.061 15	0.002 50	0.781 18	0.030 70	0.092 65	0.001 02	915	41	650	14	577	6
02A35-26	58.61	244.87	0.24	0.057 12	0.002 46	0.618 72	0.025 72	0.078 57	0.000 89	496	97	489	16	488	5
石榴石黑云母片麻岩															
02A17.1.1	30.46	441.49	0.07	0.056 84	0.002 51	0.652 23	0.028 45	0.083 24	0.001 35	484	95	510	18	515	8
02A17.1.2	99.94	173.08	0.58	0.065 57	0.003 45	1.067 69	0.054 98	0.118 11	0.002 17	793	106	720	13	738	27
02A17.1.3	45.58	175.68	0.26	0.062 93	0.004 06	0.973 61	0.061 34	0.112 23	0.002 31	706	131	690	32	686	13
02A17.2.1	135.94	216.27	0.63	0.067 66	0.003 04	1.234 19	0.054 52	0.132 32	0.002 26	858	90	816	25	801	13
02A17.2.2	132.52	183.2	0.72	0.068 98	0.002 91	1.434 8	0.059 58	0.150 88	0.002 51	898	85	904	25	906	14
02A17.3.1	143.38	271.02	0.53	0.065 84	0.002 7	1.053 98	0.042 66	0.116 12	0.001 88	801	84	731	21	708	11
02A17.3.2	78.1	196.16	0.40	0.070 18	0.004 3	0.961 79	0.057 49	0.099 42	0.002 04	934	121	684	30	611	12
02A17.4.1	117.14	453.81	0.26	0.068 73	0.002 7	1.329 98	0.051 47	0.140 38	0.002 25	890	79	859	22	847	13
02A17.4.2	145.04	387.25	0.37	0.070 34	0.002 5	1.478 82	0.051 99	0.152 52	0.002 36	938	71	922	21	915	13
02A17.4.3	147.81	396.29	0.37	0.056 31	0.003 11	0.643 23	0.034 83	0.082 89	0.001 49	464	118	504	22	513	9
02A17.5.1	83.85	249.54	0.34	0.073 05	0.003 64	1.185 82	0.057 75	0.117 75	0.002 15	1 016	98	794	27	718	12
02A17.6.1	82.67	465.74	0.18	0.074 29	0.004 04	0.955 48	0.050 68	0.093 3	0.001 8	1 049	106	681	26	575	11
02A17.6.2	79.54	506.73	0.16	0.070 44	0.003 45	1.485 93	0.071 35	0.153 03	0.002 77	941	97	925	29	918	15
02A17.7.1	112.17	276.82	0.41	0.068 17	0.008 62	1.046 26	0.128 43	0.111 35	0.004 00	874	242	727	64	681	23
02A17.8.1	34.44	366.56	0.09	0.069 67	0.002 41	1.329 69	0.045 5	0.138 46	0.002 11	919	69	859	20	836	12
02A17.8.2	44.86	1 060.19	0.04	0.066 45	0.001 85	0.894 00	0.024 94	0.097 6	0.001 37	821	57	649	13	600	8
02A17.9.1	288.07	469.56	0.61	0.067 28	0.001 94	1.352 39	0.039 02	0.145 82	0.002 08	847	59	869	17	878	12
02A17.9.2	86.25	335.39	0.26	0.064 71	0.002 10	1.119 65	0.036 17	0.125 53	0.001 85	765	67	763	17	762	11
02A17.10.12	37.64	383.33	0.10	0.063 40	0.002 48	0.678 70	0.026 23	0.077 66	0.001 21	722	81	526	16	482	7
02A17.11.1	125.01	809.83	0.15	0.065 24	0.001 65	1.052 82	0.026 78	0.117 07	0.001 60	782	52	730	13	714	9
02A17.12.1	41.49	445.97	0.09	0.070 66	0.002 46	0.934 41	0.032 1	0.095 94	0.001 46	948	70	670	17	591	9
02A17.13.1	17.9	1 222.11	0.01	0.056 81	0.001 96	0.560 03	0.019 16	0.071 52	0.001 05	483	75	452	12	445	6
02A17.14.1	121.56	366.35	0.33	0.081 77	0.003 59	1.458 88	0.062 63	0.129 45	0.002 27	1 240	84	914	25	785	13
02A17.14.2	29.01	245.07	0.12	0.086 07	0.004 99	1.715 35	0.096 57	0.144 60	0.003 06	1 340	108	1 014	36	871	17
02A17.15.1	101.5	500.52	0.20	0.069 99	0.004 26	1.375 23	0.081 69	0.142 57	0.002 92	928	120	878	35	859	16
02A17.16.1	33.68	299.32	0.11	0.059 97	0.003 12	0.652 8	0.033 34	0.078 98	0.001 40	602	109	510	20	490	8
02A17.17.1	110.25	237.53	0.46	0.068 53	0.002 28	1.480 11	0.048 90	0.156 71	0.002 35	885	67	922	20	938	13
02A17.18.1	82.32	326.99	0.25	0.066 18	0.003 15	1.223 19	0.057 13	0.134 11	0.002 34	812	97	811	26	811	13

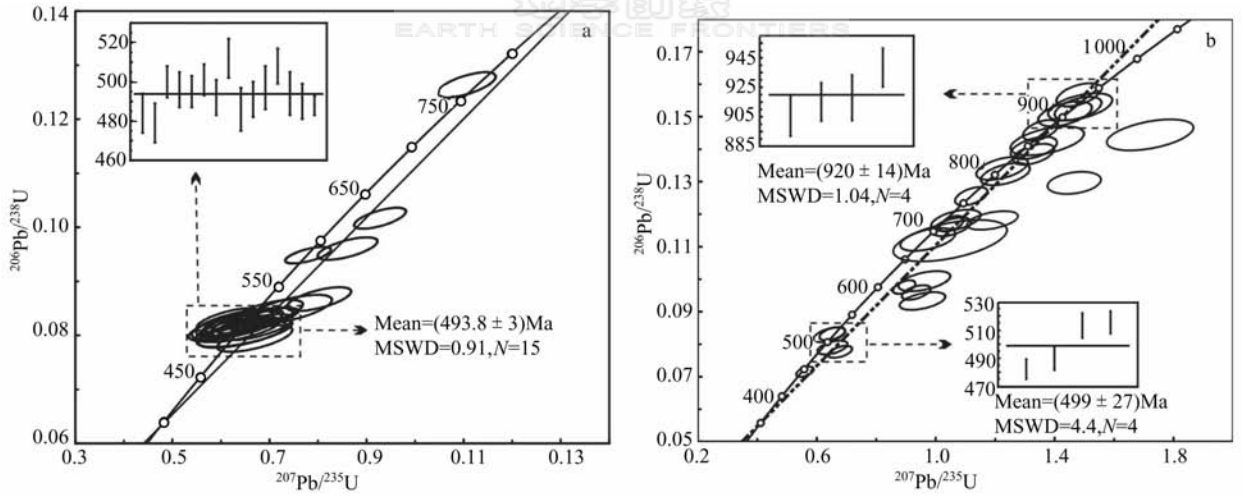


图 5 榴辉岩(a)和石榴子石黑云母片麻岩(b)锆石的 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 U-Pb concordia diagrams of zircons from eclogite(a) and garnet-biotite gneiss(b)

测点$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值介于 905.9～938.4 Ma,对应测点 Th/U 介于 0.37～0.72,$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为(920±14) Ma(2σ)。结合锆石内部结构和不同测点微区微量元素特征分析,幔部测点获得的(499±27) Ma(2σ)的年龄值应代表该副片麻岩的变质时代,核部测点(920±14) Ma(2σ)的年龄值可能代表了该岩石最古老的原岩碎屑锆石的形成时代。考虑到该岩石锆石内部结构的复杂性(图 3),介于上述两个年龄集中区之间的年龄值,可能是测点束斑(～30 μm)包含了不同比例锆石残核与幔部所产生的混合年龄,可能不具有明确的地质意义。另外,该岩石还获得一个位于锆石最边部、最年轻并落在谐和曲线上的年龄值为(445.3±6.3) Ma(表 2 和图 5b),结合阴极发光图像特征(图 3)分析,该年龄值可能反映了后期热事件或退变质事件的时代。

5 讨论和结论

深俯冲板片属性的研究和确定,是超高压变质作用动力学研究的核心问题之一。阿尔金中段英格利萨依地区已发现和确定了石榴子石二辉橄榄岩、含石榴子石的花岗质片麻岩和片麻状含钾长石石榴子石辉石岩三种类型的超高压岩石[5-9],高精度 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 微区原位锆石 U-Pb 同位素定年揭示其变质时代为(487±10)～(509±12) Ma[10-11],结合详细的野外地质特征和岩石地球化学研究已确定其形成是早古生代陆壳深俯冲作用的产物[6-7,9-10]。然而,地球化学及同位素特征研究又表明,阿尔金西段江尕勒萨依地区超高压榴辉岩的原岩具有 E-MORB 的性质,而其直接围岩却是一套具有亲陆源性质的岩石组合。那么,江尕勒萨依地区的榴辉岩究竟是陆壳还是洋壳深俯冲作用的产物?

本次研究利用高精度的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 微区原位定年方法,不仅新获得阿尔金江尕勒萨依地区榴辉岩的变质时代为(493±4.3)Ma(2σ),而且获得榴辉岩原岩的形成时代为 754±9 Ma,同时获得榴辉岩的直接围岩——石榴子石黑云母片麻岩的变质时代为(499± 27) Ma(2σ)。榴辉岩的变质年龄值与前人利用矿物对 Sm-Nd 等时线法和单颗粒锆石 U-Pb 方法测得的年龄值((500±10) Ma 和(503.9±5.3) Ma[12])在误差范围内一致,也与已获得的英格利萨依地区超高压岩石的变质年龄值((487±10)～(509±12) Ma)完全一致,进一步证实阿尔金西段江尕勒萨依与中段英格利萨依两地超高压岩石构成同一条超高压岩带或岩片。榴辉岩原岩的形成时代((754±9) Ma)较其变质时代((493±4.3) Ma)要老很多,约 250 Ma,表明其原岩就位或侵位再到发生深俯冲的时间间隔远大于一个威尔逊造山旋回或洋壳从形成到消亡所需的最大时间跨度(约 200 Ma),因此,既便其原岩具洋壳性质,也一定不能代表早古生代发生俯冲的大洋地壳,因此该榴辉岩的形成可能不是洋壳深俯冲的产物。另外,该榴辉岩的变质时代(493±4.3) Ma 与其具陆壳性质的直接围岩——副片麻岩变质时代(499±27) Ma 具一致性,进一步指示江尕勒萨依超高压榴辉岩的形成是先期(新元古代)就位或侵位于陆壳之中

的基性火山岩在早古生代发生陆壳深俯冲作用的产物。

新近,越来越多的高精度的 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 微区原位锆石 U-Pb 同位素定年揭示柴北缘一些具典型陆壳深俯冲性质的超高压榴辉岩及其围岩的变质时代为约 430～440 Ma[27-28],该年龄值明显滞后于前述阿尔金不同类型陆壳深俯冲成因超高压岩石的变质时代约 60～70 Ma。由此可见,阿尔金与柴北缘的超高压岩石可能不能简单地构成同一条统一的超高压变质岩带。

References:

[1] Liu L, Che Z C, Luo J H, et al. Recognition and implication of eclogite in the western Altun Mountains, Xinjiang[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42: 931-9342.

[2] Zhang J X, Yang J S, Xu Z Q, et al. Evidence for UHP metamorphism of eclogite from the Altun Mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(10): 751-755.

[3] Chen D L, Liu L, Sun Y, et al. Silica-exsolution in eclogite from Altyn Tagh, NW China[C]// Alice Wain Memorial Western Norway eclogite field symp, Selje, Western Norway, Abstr Vol, 81. Budapest: Eötvös University Press, 2003.

[4] Liu L, Sun Y, Wang Y, et al. Ultrahigh-*p* evidence for the country rocks of garnet-bearing lherzolite in Altyn Tagh—exsolution of clinopyroxene in the garnet of retrograde eclogite [C]// Alice Wain Memorial Western Norway eclogite field symp, Selje, Western Norway, Abstr Vol, 81. Budapest: Eötvös University Press, 2003.

[5] Liu L, Wang Y H, Sun Y, et al. The ultrahigh-pressure (> 3.5 GPa) magnesite-bearing granite lherzolite in Altyn Tagh, Northwestern China[C]// Abstract of the UHPM workshop 2001, at Waseda University, fliud/slab/mantle interactions and ultrahigh-*p* minerals, 2001: 294-297.

[6] Liu L, Sun Y, Xiao P X, et al. Discovery of ultrahigh- pressure magnesite-bearing garnet lherzolite (>3.8 GPa) in the Altyn Tagh, Northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(11): 881-886.

[7] Liu L, Sun Y, Luo, J H, et al. Ultra-high pressure metamorphism of granitic gneiss in the Yinggelisayi area, Altun Mountains, NW China[J]. Science in China: Series D, 2004, 47(4): 338-346.

[8] Liu L, Zhang Junfen, Harry W G, et al. UHP ilmenite exsolution from iron-bearing rutile in eclogite from the Altyn Tagh, NW China[C]// AGU Fall Meeting, San Francisco, California, 2004(12): 13-17.

[9] Liu L, Chen D L, Zhang A D, et al. Ultrahigh pressure gneissic K-feldspar garnet clinopyroxenite in the Altyn Tagh, NW China: evidence from clinopyroxene exsolution in garnet [J]. Science in China: Series D, 2005, 48(7): 1000-1010.

[10] Zhang Anda, Liu Liang, Sun Yong, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons and its geological significance from UHP granitoid gneiss in Altyn Tagh[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(23): 2527-2532.

[11] Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. An Early Palaeozoic HP/HT granulite-garnet peridotite association in the south Altyn Tagh, NW China: *p-T* history and U-Pb geochronology[J]. J Metamorphic Geol, 2005, 23: 491-510.

[12] Zhang Jianxin, Zhang Zheming, Xu Zhiqin, et al. The ages of U-Pb and Sm-Nd for eclogite from the western segment of Altyn Tagh tectonic belt—the evidence for existence of Caledonian orogenic root[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44 (24): 2256-2259.

[13] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb[J]. Chem Geol, 2002, 192: 59-79.

[14] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 11: 357-370.

[15] Jian Ping, Cheng Yuqi, Liu Dunyi. Petrographic study of metamorphic zicon: basic roles ininterpetation of U-Pb age of high grade metamorphic rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(3): 183-191(in Chinese).

[16] Vavra G, Gebauer D, Schmid R, et al. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): an ion microprobe (SHRIMP) study [J]. Contrib Mineral Petrol, 1996, 122: 337-358.

[17] Xue F, Rowley D B, Tucker R D, et al. U-Pb ages of granitiod rocks in the North Dabie complex, Eastern Dabieshan, China[J]. J Geol, 1997, 105: 744-753.

[18] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U-Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 161: 215-230

[19] Nasdala L, Gotze J, Pidgeon R T, et al. Constraining a SHRIMP U-Pb age: micro-scale characterization of zircons from Saxonian Rotliegend rhyolites[J]. Contrib Mineral Petrol, 1998, 132: 300-306.

[20] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. Chemical Geology, 2002, 184: 123-138.

[21] Hoskin P W O, Ireland T R. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator[J]. Geology, 2000, 28(7): 627-630.

[22] Schaltegger U, Fanning C M, Gunther D, et al. Growth, annealing and recrystallization of zircon and preservation of monazite in high-grade metamorphism: conventional and in-situ U-Pb isotope, cathodoluminescence and microchemical evidence[J]. Contrib Mineral Petrol, 1999, 134: 186-201.

[23] Rowley D B, Xue F, Tucker R D, et al. Ages of ultra-high pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology[J]. Earth Planet Sci Lett, 1997, 151: 191-120.

[24] Herman J, Rubatto D, Korsakov A. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subduected continental crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan)[J]. Contrib Mineral Petrol, 2001, 141: 66-82.

[25] Chen D L, Liu L, Sun Y, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for high-pressure basic granulite from north Qinling [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(21): 2296-2302.

[26] Luddwig K R. Isoplot—a plotting and regression program for radiogenic-isotope data[J]. US Geological Survey Open-file Report, 1991,39: 91-445.

[27] Song S G, Zhang L F, Niu Y, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: a case study of the Northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data[J]. Journal of Petrology,2006,47:435-455.

[28] Chen Danling, Sun Yong, Liu Liang. The metamorphic ages of the country rock of the Yukahe eclogites in the North Qaidam Basin and its geological significance[J]. Earth Science Frontiers,2007,14(1):108-116(in Chinese).

参考文献:

[1] 刘良, 车自成, 罗金海, 等. 阿尔金西段榴辉岩的确定及其地质意义[J]. 科学通报, 1996, 41 (16): 1458-1488.

[2] 张建新, 杨经绥, 许志琴. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据[J]. 科学通报,2002, 47(3): 231-234.

[6] 刘良, 孙勇, 肖培喜, 等.阿尔金发现超高压(>3.8 GPa)石榴石二辉橄榄岩[J].科学通报, 2002, 47(9):657-662.

[7] 刘良, 孙勇,罗金海,等. 阿尔金英格利萨依花岗质片麻岩超高压变质[J]. 中国科学:D辑, 2003, 33(12):1184- 1192.

[9] 刘良, 陈丹玲, 张安达,等. 阿尔金超高压(>7 GPa)片麻状(含)钾长石榴辉石岩——石榴子石出溶单斜辉石的证据[J]. 中国科学:D辑, 2005, 35(2): 105-114.

[10] 张安达, 刘良, 孙勇, 等. 阿尔金超高压花岗质片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 科学通报, 2004, 49(22): 2335-2341.

[12] 张建新,张泽明,许志琴,等. 阿尔金构造带西段榴辉岩的 Sm-Nd 及 U-Pb 年龄——阿尔金构造带中加里东期山根存在的证据[J]. 科学通报, 1999, 44(10): 1109-1112.

[15] 简平,程裕淇,刘敦一. 变质锆石成因的岩相学研究——高级变质岩 U-Pb 年龄解释的基本依据[J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 183-191.

[25] 陈丹玲, 刘良, 孙勇, 等. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 科学通报, 2004, 49(18): 1901-1908.

[28] 陈丹玲,孙勇,刘良.柴北缘鱼卡河榴辉岩围岩的变质时代及其他地质意义[J].地学前缘,2007,14(1):108-116.

《地学前缘》2007 年征订启事

致《地学前缘》订户:

《地学前缘》自 2007 年起由天津全国非邮发报刊联合征订服务部负责征订工作(联订代号:5198),需要订购我刊的客户可直接与天津联合征订服务部联系。

联系地址:天津市大寺泉集北里别墅 17 号

邮政编码:300385

电　　话:022-23962479,022-23973378

传　　真:022-23973378

网　　址:www. LHZD. com

E-mail:LHZD@public. tpt. tj. cn