

东昆仑西段阿确墩地区白沙河岩组锆石 U-Pb 年龄 ——对前寒武纪基底演化的约束

李 猛^{1,2}, 查显锋^{1,2}, 胡朝斌^{1,2}, 高晓峰^{1,2}, 李 婷^{1,2}, 姚志亮³

LI Meng^{1,2}, ZHA Xianfeng^{1,2}, HU Chaobin^{1,2}, GAO Xiaofeng^{1,2}, LI Ting^{1,2}, YAO Zhiliang³

1. 中国地质调查局西安地质调查中心/中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710054;

2. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 西安西北有色物化探总队有限公司, 陕西 西安 710000

1. Xi'an Center of Geological Survey, CGS/Orogen Research Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. Xi'an Northwest Nonferrous Chemical Exploration Team, Co., Ltd., Xi'an 710000, Shaanxi, China

摘要: 对东昆仑西段阿确墩地区金水口岩群白沙河岩组片麻岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究。结果显示, 片麻岩中锆石的年龄范围为 2400~410 Ma, 峰值范围为 1650~1400 Ma, 其中存在少量新元古代 (1.0~0.9 Ga) 和早古生代 (410 Ma) 的变质锆石, 从而限定了原岩的最早沉积时代, 为中元古代末期, 指示片麻岩先后经历了新元古代和早古生代变质作用。片麻岩锆石含有大量早古生代变质的信息, 考虑到片麻岩中的榴辉岩形成于早古生代 (450~410 Ma), 推测该地区片麻岩也经历了早古生代榴辉岩相变质作用, 片麻岩与榴辉岩为原地关系。结合区域研究资料, 表明东昆仑早古生代可能存在 1 条上千千米的高压变质岩带, 可能为俯冲折返后的产物。

关键词: 金水口群; 白沙河岩组; 锆石 U-Pb 年龄; 东昆仑

中图分类号: P534.3; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)01-0041-17

Li M, Zha X F, Hu C B, Gao X F, Li T, Yao Z L. Zircon U-Pb geochronology of the Baishahe Formation in the western part of East Kunlun Orogenic Belt: Constraints on Precambrian basement evolution. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(1): 41-57

Abstract: The geochronology of the detrital zircons of the gneiss in the Aquedun region, western part of the East Kunlun Mountains was studied by LA-ICP-MS method. The ages of the detrital zircons of the gneiss vary between 2400 Ma and 410 Ma with a peak ranging from 1650 Ma to 1400 Ma. Minor metamorphic zircons was dated as 1.0~0.9 Ga (Neoproterozoic) and 410 Ma (Early Paleozoic). The dating results imply that the protolith of the gneiss was deposited in Late Mesoproterozoic, and had undergone Neoproterozoic and Early Paleozoic metamorphism. Based on eclogite in gneisses formed in Early Paleozoic (450~410 Ma). Combined with a lot of Early Paleozoic metamorphic information from zircons in gneiss, it is speculated that the gneiss in this region also underwent Early Paleozoic eclogite-facies metamorphism, and gneiss and eclogite is in situ relationship. Combined with regional studies, it is suggested that there may exists a high pressure metamorphic belt of nearly 1000 km long in Early Paleozoic in East Kunlun, which may be the product of subduction and reentry.

Key words: Jinshuikou Group; Baishahe Formation; zircon U-Pb ages; East Kunlun

收稿日期: 2020-07-02; 修订日期: 2020-10-27

资助项目: 国家自然科学基金项目《华北克拉通西南缘豫西地区汝阳群微体化石研究》(批准号: 41602005) 和中国地质调查局项目《东昆仑成矿带木孜塔格铅锌铜金多金属矿调查评价区地质矿产调查》(编号: DD2016002)、《东天山昌吉—双沟山地区区域地质调查》(编号: DD20190065)

作者简介: 李猛 (1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事前寒武纪地质研究。E-mail: lm27010501@sina.com

东昆仑造山带位于青藏高原东北缘。近年来在该造山带内铜镍矿找矿工作获得较大进展,相继发现了夏日哈木超大型铜镍硫化物矿床、石头坑德大型铜镍硫化物矿床和冰沟南小型铜镍矿床。前人对这些矿床的形成时代、成矿机制等研究已取得较多进展^[1-11],但还存在许多基础地质问题未得到解决,尤其是关于东昆仑变质基底的物质组成、结构、演化及其与成矿作用关系的研究。随着铜镍矿找矿工作的深入开展,针对这些基础地质问题的研究愈显重要。

东昆仑造山带自元古宙以来经历了加里东期和印支期造山带构造演化。东昆仑前寒武纪变质结晶基底主要为金水口岩群,包括白沙河岩组和小庙岩组,其中白沙河岩组主要由各类片麻岩组成^[12],记录了造山带早期的构造演化信息。前人对东昆仑东段白沙河岩组中的片麻岩的形成时代做了较多研究^[13-19],但是对片麻岩的形成演化过程还存在较大争议^[12, 15, 18, 20-22]。

其中对副片麻岩的形成演化过程,存在以下几种不同观点:①古元古代沉积变质^[12];②中元古代末期沉积,早古生代发生变质^[14-15];③古元古代沉积,经历了新元古代和早古生代多期变质事件^[22];④中—新元古代沉积,经历了新元古代早期变质作用,也遭受了早古生代的高压变质作用,与东昆仑东段发现的榴辉岩具有相同的构造演化历史^[18]。

东昆仑西段阿确墩地区白沙河岩组中榴辉岩的发现^①,表明东昆仑自东向西延伸近千千米的构造带经历了早古生代(450~430 Ma)榴辉(闪)岩相变质作用^[23-25]。但是,对于含榴辉(闪)岩的片麻岩是否经历了早古生代的变质作用仍不清楚,且关于东昆仑西段白沙河岩组形成时代研究极少。

本文对东昆仑西段阿确墩地区白沙河岩组的片麻岩进行锆石年代学研究,揭示东昆仑西段片麻岩的形成演化历史,对深入探讨东昆仑造山带前寒武纪变质结晶基底及其构造演化具有重要的意义。

1 地质概况

东昆仑造山带位于青藏高原东北部(图1-a),西起阿尔金断裂,东至温泉断裂,南邻巴颜喀拉造山带,北邻柴达木地块(图1-b)。其前寒武纪变质结晶基底主要为金水口岩群,分为白沙河岩组和小庙岩组^[26],白沙河岩组主要由各类片麻岩组成,局部夹大理岩、斜长角闪岩、麻粒岩和榴辉(闪)岩^[12, 23-25, 27-29]。

研究区位于青海省茫崖行委西南阿确墩地区,区域大地构造位置为东昆仑造山带西段(图1-b)。区内主要出露元古宙金水口岩群白沙河岩组黑云斜长片麻岩和二云斜长片麻岩,其中含少量榴辉岩

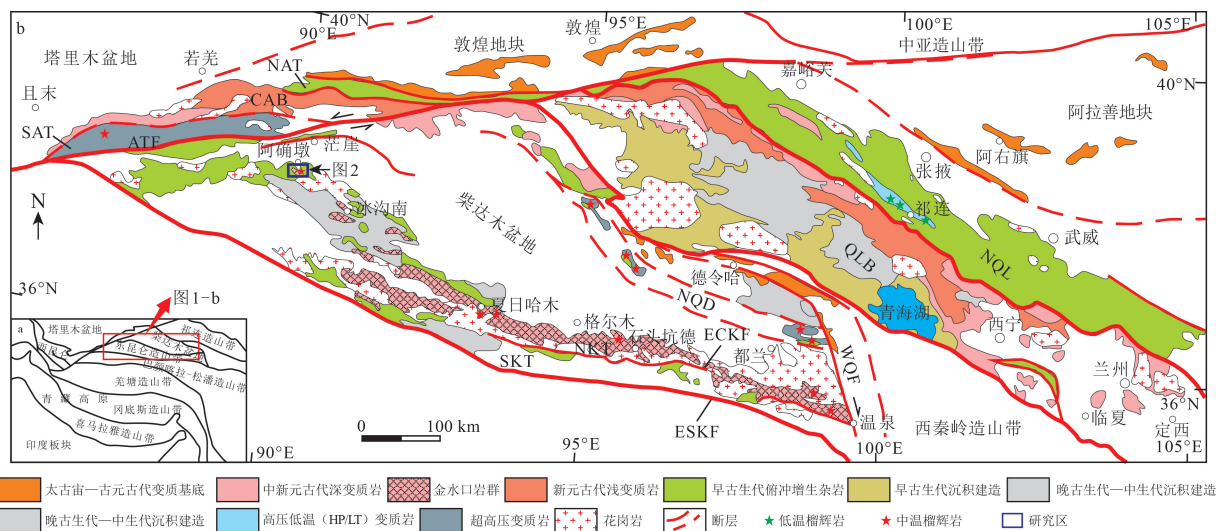


图1 东昆仑造山带大地构造位置图(a)和区域地质简图(b)^[18]

Fig. 1 Tectonic (a) and geological map (b) of East Kunlun

MAT—北阿尔金俯冲增生杂岩带;NQL—北祁连山俯冲增生杂岩带;CAB—中阿尔金地块;QLB—祁连山地块;SAT—南阿尔金俯冲碰撞杂岩带;NQT—柴北缘俯冲碰撞杂岩带;NKT—昆北地体;SKT—昆南地体;ECKF—东昆中断裂;ESKE—东昆南断裂;WQF—温泉断裂;ATF—阿尔金断裂

透镜体^①, 规模不等的超基性岩体^[30], 以及大面积分布的二叠纪侵入岩体(图 2)。

2 样品采集与测试方法

2.1 样品采集

本次对采自东昆仑西段阿确墩地区金水口岩群白沙河岩组中的黑云斜长片麻岩和二云斜长片麻岩样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年研究。其中黑云母斜长片麻岩(图 3-a、b, D2004-1, 北纬 37°51'03"、东经 90°13'25")具片麻状构造, 细粒变晶结构, 主要由斜长石(45%)、石英(35%)和黑云母(20%)组成。其中石英呈粒状, 黑云母呈片状, 定向分布, 推测该类岩石的原岩为泥砂质岩石。二云斜长片麻岩(图 3-c、d, D2564-1, 北纬 37°43'51"、东经 90°17'34")呈片麻状构造, 细粒变晶结构, 主要由斜长石(30%)、石英(35%)、黑云母(15%)和白云母(20%)组成。其中, 石英呈粒状, 定向分布, 黑云母和白云母均呈片状, 推测该类岩石原岩为泥砂质岩石。此外, 野外露头可见榴闪岩透镜体(图 3-c), 产出该类片麻岩中。

2.2 测试方法

锆石分选由河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。锆石制靶、反射光、

透射光照相和锆石阴极发光(CL)图像分析均在中国地质调查局西安地质调查中心实验室完成。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质调查局西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。激光剥蚀系统为 GeoLas Pro, ICP-MS 为 Agilent 7700x。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度, 两者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。每个分析数据包括约 10 s 的空白信号和 40 s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 Glitter 4.4^[31] 完成, 详细仪器参数和测试过程见李艳广等^[32]。

U-Pb 同位素定年采用标准锆石 91500 作外标进行同位素分馏校正。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移, 利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行校正。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver 3^[33] 完成。锆石微量元素含量利用参考标样 NIST610 玻璃作为多外标、Si 作内标的方法进行定量计算。

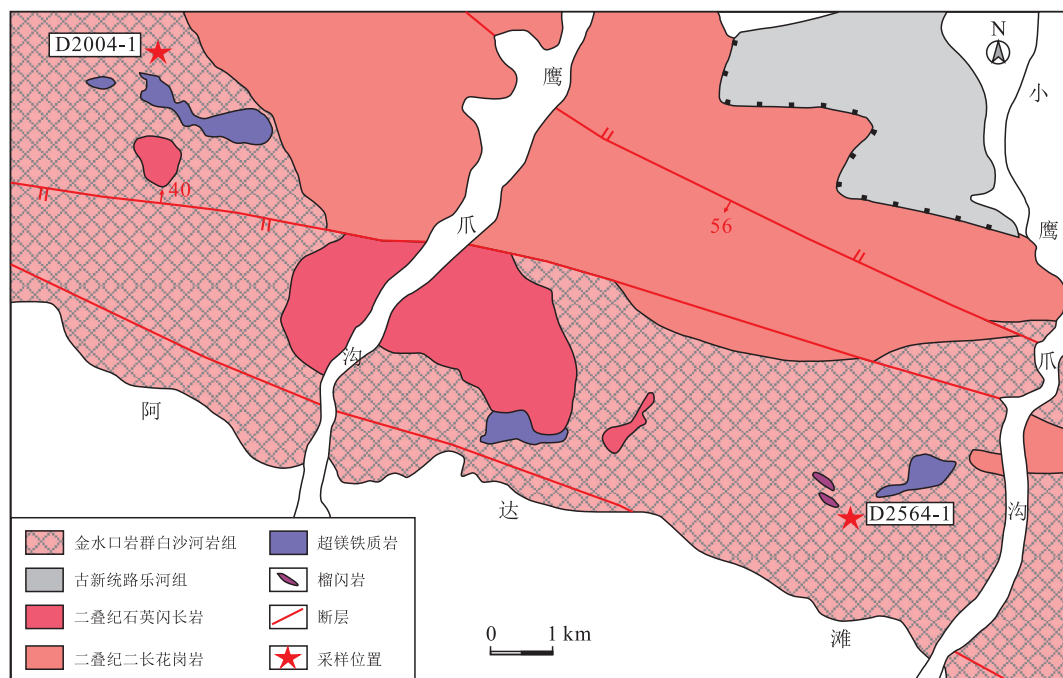


图 2 阿确墩地区地质简图^[30]

Fig. 2 Simplified geologic map of the Aqedun area

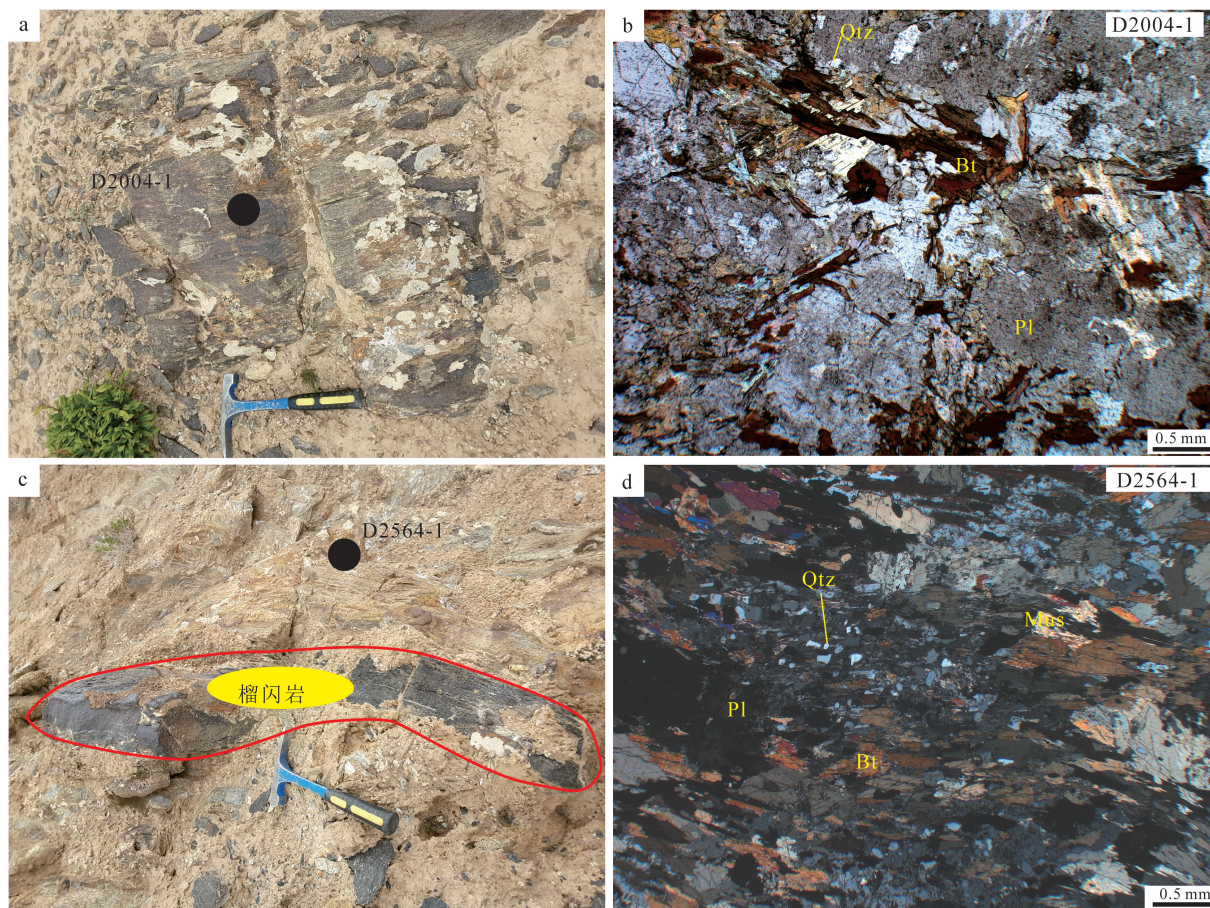


图3 阿确墩地区白沙河岩组片麻岩野外露头及岩石显微结构特征

Fig. 3 Outcrops and petrology of gneiss in Baishahe Formation from the Aquedun area

a—黑云斜长片麻岩露头,样品编号为 D2004-1;b—黑云斜长片麻岩显微照片(单偏光);c—二云斜长片麻岩露头,样品编号为 D2564-1;
d—二云斜长片麻岩显微照片(正交光);Pl—斜长石;Qtz—石英;Bt—黑云母;Mus—白云母

3 分析结果

3.1 黑云斜长片麻岩(D2004-1)

锆石多为无色透明,呈长柱状-椭圆状,少量为圆粒状,粒径为 80~120 μm 。结合阴极发光(CL)图像和锆石形态特征可将其分为两类(图 4-a):一类具有明显的岩浆振荡环带,CL 图像为灰色-灰白色,以长柱状晶形为主;另一类锆石为浑圆状,表面发育凹痕,内部较均一,环带不明显,CL 图像为灰黑色或灰白色,形态为浑圆状,部分锆石具有核-边结构。

对其中 88 粒锆石进行了 U-Pb 测年(表 1),80 个点选择锆石核部,所获数据均在谐和线上或其附近(图 5),表明锆石没有发生铅丢失事件。其中,最老的 1 粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为 1961 ± 36 Ma,

最年轻的 1 粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为 1047 ± 20 Ma,峰值年龄集中在 1450~1550 Ma 之间,其 Th/U 值为 1.09~0.16(表 1)。这些锆石可能来自古-中元古代火成岩或变质岩的蚀源区,最大沉积时代可能为中元古代末期。边部锆石中 4 个测点获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 900 Ma、934 Ma、948 Ma、963 Ma,其 Th/U 值分别为 0.13、1.98、0.12、0.21(表 1);另有 3 个测点获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 603 Ma、612 Ma、623 Ma,其 Th/U 值分别为 0.21、0.16、0.08(表 1);还有 1 个测点获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 431 ± 13 Ma,其 Th/U 值为 0.01(表 1)。

3.2 二云斜长片麻岩(D2564-1)

锆石多为无色透明,呈长柱状-椭圆状,少量为圆粒状,粒径为 80~100 μm 。结合 CL 图像和锆石形态特征可将其分为两类(图 4-b):一类具有明显

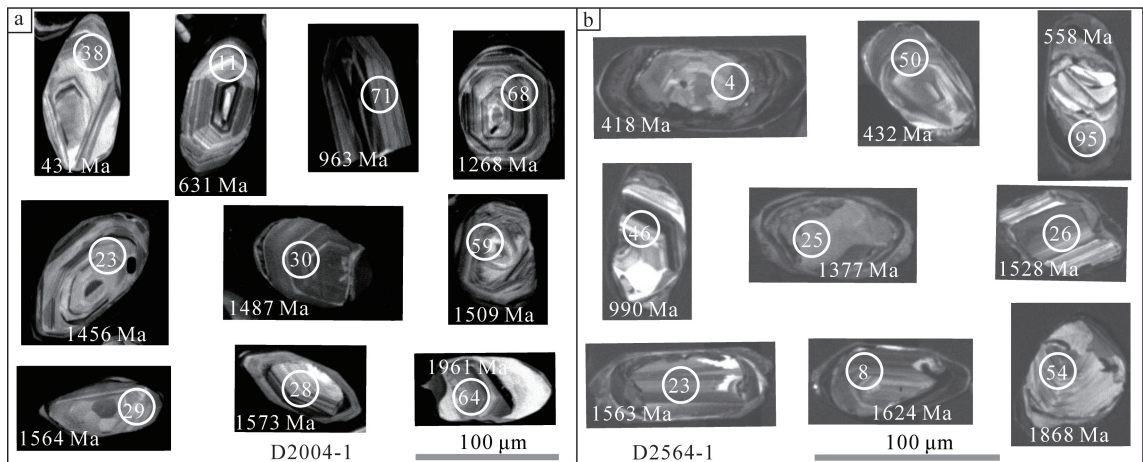


图 4 阿确墩地区片麻岩锆石阴极发光 (CL) 图像

Fig. 4 CL images of the zircons from gneiss in the Aquedun area

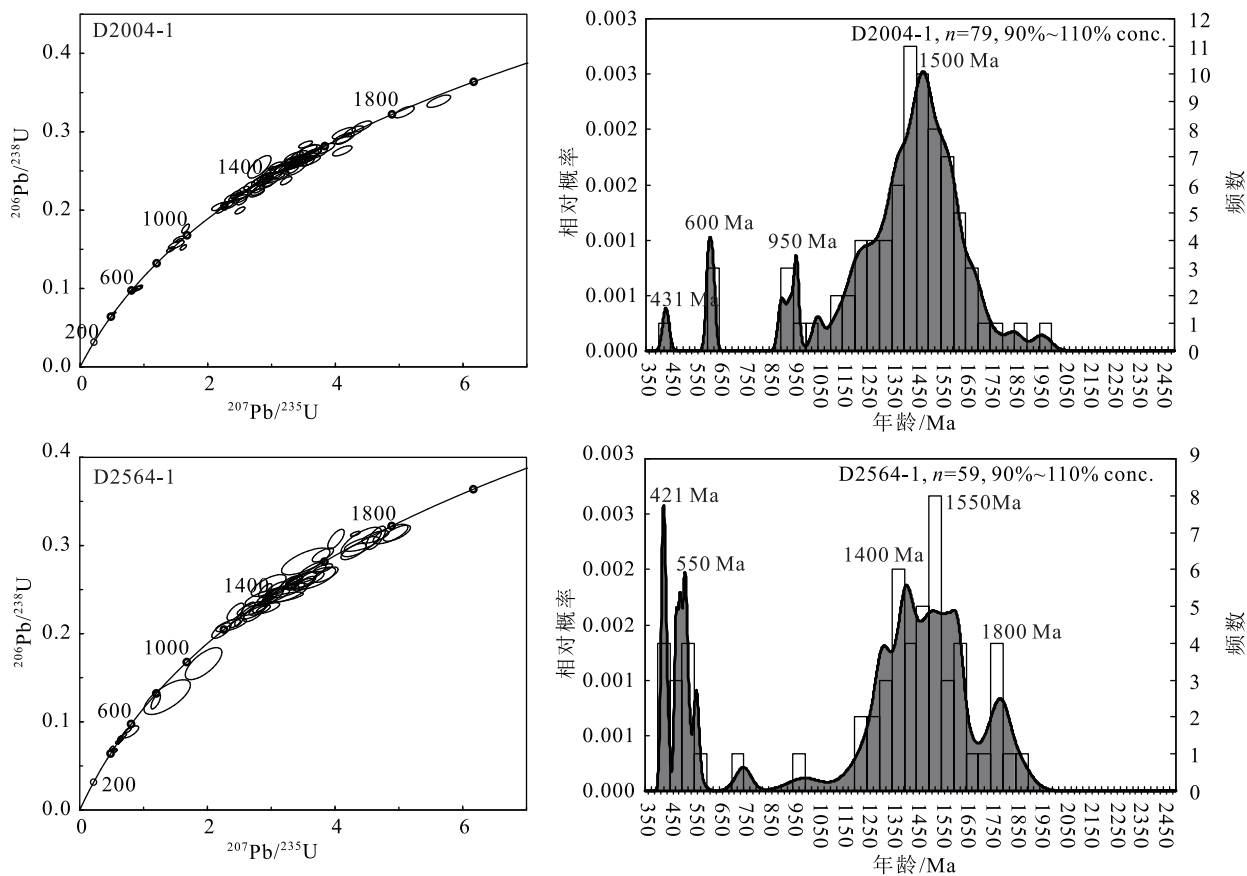


图 5 东昆仑西段阿确墩地区片麻岩锆石 U-Pb 年龄谐和图和频谱图

Fig. 5 U-Pb concordia diagrams and age spectra of zircons from gneiss in the Aquedun area, west part of East Kunlun

的岩浆振荡环带,CL 图像为灰色-灰白色,以长柱状晶形为主,此类锆石约占 70%;另一类锆石为浑圆状,表面发育凹痕,内部较均一,环带不明显,CL

图像为灰黑色或灰白色,形态为浑圆状,此类锆石占 20%~30%。

共测试了 115 粒锆石,105 个点选择锆石核部,所

表 1 东昆仑西段阿确墩地区片麻岩锆石 U-Th-Pb 同位素年龄数据
Table 1 U-Th-Pb data of zircons from gneiss in the Aquedun area, west part of East Kunlun

测点	Th U		Th/U	同位素比值						年龄/Ma				谐和年龄/Ma				
	10 ⁻⁶	U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	谐和度	年龄	1σ
D2004-1-黑云斜长片麻岩,金水口群																		
1	65	104	0.62	0.2503	0.0042	3.0503	0.1048	0.0884	0.0030	1440	22	1420	26	1391	64	99	1391	64
2	70	172	0.41	0.3068	0.0046	4.4126	0.1006	0.1043	0.0023	1725	23	1715	19	1702	39	99	1702	39
3	75	357	0.21	0.0980	0.0016	0.8417	0.0343	0.0623	0.0025	603	10	620	19	683	85	103	603	10
4	314	155	2.02	0.2785	0.0045	3.8274	0.1072	0.0997	0.0027	1584	23	1599	23	1618	50	101	1618	50
5	255	585	0.44	0.2375	0.0034	3.2286	0.0584	0.0986	0.0016	1374	18	1464	14	1598	30	107	1598	30
6	132	140	0.94	0.2588	0.0042	3.3765	0.0986	0.0946	0.0027	1484	21	1499	23	1520	53	101	1520	53
7	85	179	0.48	0.2756	0.0043	4.1085	0.1003	0.1081	0.0025	1569	22	1656	20	1768	42	106	1768	42
8	107	116	0.92	0.2144	0.0036	2.5037	0.0848	0.0847	0.0029	1252	19	1273	25	1309	64	102	1309	64
9	74	81	0.92	0.2421	0.0043	2.9782	0.1160	0.0892	0.0035	1398	22	1402	30	1409	73	100	1409	73
10	121	134	0.90	0.2624	0.0043	3.3014	0.1005	0.0913	0.0027	1502	22	1481	24	1452	56	99	1452	56
11	21	244	0.08	0.1015	0.0018	0.9178	0.0408	0.0656	0.0029	623	10	661	22	793	91	106	623	10
12	90	419	0.21	0.1079	0.0017	1.0514	0.0312	0.0707	0.0021	661	10	730	15	947	58	110	661	10
13	112	190	0.59	0.2773	0.0043	3.5755	0.0897	0.0935	0.0023	1578	22	1544	20	1499	45	98	1499	45
14	702	1013	0.69	0.1524	0.0022	1.6175	0.0323	0.0770	0.0014	915	12	977	13	1120	36	107	1120	36
15	209	200	1.05	0.3005	0.0046	4.2892	0.1006	0.1035	0.0023	1694	23	1691	19	1689	41	100	1689	41
16	697	856	0.81	0.1839	0.0027	2.3667	0.0454	0.0933	0.0016	1088	14	1233	14	1495	32	113	1495	32
17	248	159	1.56	0.2717	0.0043	3.6207	0.0982	0.0967	0.0026	1550	22	1554	22	1561	49	100	1561	49
18	227	170	1.33	0.2373	0.0038	2.8855	0.0842	0.0882	0.0025	1373	20	1378	22	1387	54	100	1387	54
19	53	85	0.62	0.2199	0.0038	2.5415	0.0973	0.0839	0.0032	1281	20	1284	28	1289	73	100	1289	73
20	98	163	0.60	0.2726	0.0042	3.7313	0.0935	0.0993	0.0024	1554	21	1578	20	1611	44	102	1611	44
21	284	462	0.62	0.1996	0.0029	2.5053	0.0508	0.0910	0.0017	1173	16	1274	15	1447	35	109	1447	35
22	138	259	0.53	0.2535	0.0038	3.2209	0.0724	0.0922	0.0020	1456	19	1462	17	1471	40	100	1471	40
23	165	152	1.09	0.2357	0.0037	2.9710	0.0805	0.0914	0.0024	1364	19	1400	21	1456	49	103	1456	49
24	127	129	0.98	0.2605	0.0044	3.4189	0.1127	0.0952	0.0031	1492	23	1509	26	1532	60	101	1532	60
25	195	326	0.60	0.2272	0.0034	2.7992	0.0607	0.0894	0.0018	1320	18	1355	16	1412	38	103	1412	38

续表 1-1

测点	Th		U	Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和年龄/Ma					
	10 ⁻⁶	1σ			²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	谐和度	年龄	1σ
26	37	288	0.13	0.1499	0.0023	1.4190	0.0428	0.0687	0.0020	900	13	897	18	889	60	100	900	13
27	147	141	1.04	0.2625	0.0042	3.4622	0.0956	0.0957	0.0026	1503	21	1519	22	1541	50	101	1541	50
28	124	166	0.75	0.2720	0.0041	3.6496	0.0875	0.0973	0.0022	1551	21	1560	19	1573	42	101	1573	42
29	160	142	1.12	0.2663	0.0044	3.5539	0.1101	0.0968	0.0030	1522	23	1539	25	1564	56	101	1564	56
30	172	241	0.71	0.2651	0.0040	3.3968	0.0761	0.0930	0.0020	1516	20	1504	18	1487	40	99	1487	40
31	118	181	0.65	0.2365	0.0037	2.8865	0.0769	0.0886	0.0023	1368	19	1378	20	1394	49	101	1394	49
32	126	197	0.64	0.2548	0.0039	3.1626	0.0773	0.0901	0.0021	1463	20	1448	19	1427	44	99	1427	44
33	182	165	1.10	0.2180	0.0034	2.5243	0.0703	0.0840	0.0023	1271	18	1279	20	1293	52	101	1293	52
34	255	310	0.82	0.2585	0.0038	3.3143	0.0696	0.0930	0.0018	1482	20	1484	16	1488	36	100	1488	36
35	49	271	0.18	0.1976	0.0030	2.7292	0.0672	0.1002	0.0024	1162	16	1336	18	1628	43	115	1628	43
36	219	439	0.50	0.2006	0.0029	2.2034	0.0468	0.0797	0.0016	1179	16	1182	15	1189	38	100	1189	38
37	122	210	0.58	0.2072	0.0032	2.3196	0.0626	0.0812	0.0021	1214	17	1218	19	1227	50	100	1227	50
38	2	435	0.01	0.0684	0.0011	0.5288	0.0198	0.0561	0.0021	426	7	431	13	457	80	101	431	13
39	124	135	0.92	0.2601	0.0041	3.4129	0.0900	0.0952	0.0024	1490	21	1507	21	1532	47	101	1532	47
40	126	134	0.94	0.2526	0.0040	3.1167	0.0882	0.0895	0.0025	1452	21	1437	22	1415	52	99	1415	52
41	237	575	0.41	0.2524	0.0036	3.3366	0.0590	0.0959	0.0015	1451	19	1490	14	1546	29	103	1546	29
42	74	139	0.53	0.2918	0.0046	4.1318	0.1086	0.1027	0.0026	1651	23	1661	21	1674	46	101	1674	46
43	406	631	0.64	0.2630	0.0038	3.3862	0.0599	0.0934	0.0015	1505	19	1501	14	1496	29	100	1496	29
44	249	394	0.63	0.2619	0.0038	3.5745	0.0665	0.0990	0.0017	1500	19	1544	15	1606	31	103	1606	31
45	58	44	1.33	0.2416	0.0054	3.0006	0.1833	0.0901	0.0056	1395	28	1408	47	1428	114	101	1428	114
46	39	78	0.50	0.2762	0.0047	3.5816	0.1209	0.0941	0.0032	1572	24	1546	27	1510	62	98	1510	62
47	166	346	0.48	0.2312	0.0034	2.6512	0.0560	0.0832	0.0016	1341	18	1315	16	1274	38	98	1274	38
48	58	79	0.73	0.2541	0.0045	3.1549	0.1164	0.0901	0.0033	1459	23	1446	28	1427	69	99	1427	69
49	24	192	0.12	0.1627	0.0026	1.5446	0.0531	0.0689	0.0024	972	15	948	21	895	69	98	948	21
50	196	299	0.66	0.2253	0.0034	2.5499	0.0610	0.0821	0.0019	1310	18	1286	17	1249	44	98	1249	44
51	307	335	0.91	0.2200	0.0032	2.4390	0.0534	0.0804	0.0017	1282	17	1254	16	1207	40	98	1207	40
52	88	124	0.71	0.2679	0.0043	3.3489	0.0963	0.0907	0.0026	1530	22	1493	22	1440	53	98	1440	53

续表 1-2

测点	Th		U	Th/U		同位素比值						年龄/Ma						谐和年龄/Ma	
	Th	U		Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	谐和度	年龄	1σ
53	58	108	0.54	0.2048	0.0036	0.0036	2.1894	0.0848	0.0776	0.0030	1201	19	1178	27	1135	75	98	1135	75
54	116	133	0.87	0.2421	0.0038	0.0038	2.8963	0.0802	0.0868	0.0023	1398	20	1381	21	1356	51	99	1356	51
55	90	185	0.48	0.2499	0.0038	0.0038	2.9676	0.0755	0.0862	0.0021	1438	20	1399	19	1342	47	97	1342	47
56	116	94	1.24	0.2632	0.0044	0.0044	3.5931	0.1142	0.0991	0.0031	1506	23	1548	25	1606	58	103	1606	58
57	77	133	0.58	0.2696	0.0042	0.0042	3.4273	0.0894	0.0922	0.0023	1539	21	1511	21	1472	47	98	1472	47
58	134	222	0.61	0.2576	0.0039	0.0039	3.3348	0.0762	0.0939	0.0020	1477	20	1489	18	1507	40	101	1507	40
59	131	120	1.08	0.2624	0.0042	0.0042	3.4007	0.0959	0.0941	0.0026	1502	21	1505	22	1509	51	100	1509	51
60	614	253	2.43	0.2155	0.0033	0.0033	2.3532	0.0589	0.0793	0.0019	1258	17	1229	18	1178	47	98	1178	47
61	205	425	0.48	0.2280	0.0033	0.0033	2.7034	0.0528	0.0860	0.0015	1324	17	1329	14	1339	34	100	1339	34
62	184	241	0.76	0.2367	0.0036	0.0036	2.7841	0.0649	0.0853	0.0019	1370	19	1351	17	1323	42	99	1323	42
63	295	346	0.85	0.2158	0.0032	0.0032	2.4053	0.0505	0.0809	0.0016	1260	17	1244	15	1218	38	99	1218	38
64	47	145	0.33	0.3390	0.0052	0.0052	5.6208	0.1226	0.1203	0.0025	1882	25	1919	19	1961	36	102	1961	36
65	62	90	0.69	0.2982	0.0049	0.0049	4.1313	0.1189	0.1005	0.0028	1682	24	1661	24	1634	52	99	1634	52
66	90	211	0.42	0.3252	0.0048	0.0048	5.0786	0.1034	0.1133	0.0021	1815	24	1833	17	1852	33	101	1852	33
67	111	180	0.62	0.2221	0.0035	0.0035	2.7714	0.0767	0.0905	0.0024	1293	18	1348	21	1436	50	104	1436	50
68	91	260	0.35	0.2072	0.0031	0.0031	2.3701	0.0577	0.0830	0.0019	1214	17	1234	17	1268	44	102	1268	44
69	127	291	0.44	0.2905	0.0042	0.0042	4.1301	0.0809	0.1031	0.0018	1644	21	1660	16	1681	32	101	1681	32
70	201	480	0.42	0.2113	0.0031	0.0031	2.5314	0.0504	0.0869	0.0016	1236	16	1281	14	1358	34	104	1358	34
71	162	511	0.21	0.1612	0.0016	0.0016	1.5480	0.0320	0.0693	0.0014	963	9	949	13	901	42	99	963	9
72	650	1340	0.48	0.2560	0.0035	0.0035	3.0620	0.0700	0.0877	0.0011	1469	18	1423	18	1374	24	94	1374	24
73	90	160	0.57	0.2233	0.0029	0.0029	2.7810	0.0680	0.0898	0.0021	1299	15	1349	18	1412	45	109	1412	45
74	187	280	0.67	0.1916	0.0054	0.0054	2.2600	0.0800	0.0866	0.0029	1130	29	1199	24	1344	68	119	1344	68
75	163	178	0.91	0.2547	0.0067	0.0067	3.3900	0.1100	0.0974	0.0029	1463	34	1501	26	1570	56	107	1570	56
76	333	563	0.59	0.2287	0.0044	0.0044	2.8990	0.0720	0.0919	0.0017	1327	23	1381	19	1463	36	110	1463	36
77	606	607	0.99	0.2553	0.0095	0.0095	2.8100	0.1200	0.0829	0.0016	1465	49	1357	31	1265	38	86	1265	38
78	743	830	0.90	0.2838	0.0029	0.0029	3.5330	0.0710	0.0910	0.0020	1610	15	1534	16	1444	42	90	1444	42
79	114	731	0.16	0.2315	0.0024	0.0024	2.9130	0.0670	0.0916	0.0018	1342	12	1384	17	1457	37	109	1457	37

续表 1-3

测点	Th U		Th/U	同位素比值						年龄/Ma				谐和年龄/Ma				
	10 ⁻⁶			²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	谐和度	年龄	1σ
80	147	409	0.36	0.2433	0.0022	3.1260	0.0540	0.0928	0.0014	1404	12	1438	13	1480	29	105	1480	29
81	303	413	0.74	0.2653	0.0030	3.5720	0.0730	0.0973	0.0018	1517	15	1542	16	1569	35	103	1569	35
82	96	244	0.39	0.2767	0.0049	4.1200	0.1000	0.1088	0.0034	1575	24	1657	21	1773	56	113	1773	56
83	203	113	1.77	0.5103	0.0078	15.3600	0.2300	0.2170	0.0036	2657	34	2837	14	2955	27	111	2955	27
84	274	1023	0.27	0.1765	0.0037	1.6530	0.0390	0.0706	0.0017	1047	20	990	15	942	49	95	1047	20
85	98	553	0.16	0.0996	0.0021	0.8920	0.0550	0.0644	0.0031	612	12	645	29	730	100	105	612	12
86	441	582	0.74	0.2689	0.0052	3.6050	0.0850	0.0974	0.0020	1535	26	1550	19	1571	38	102	1571	38
87	196	224	0.87	0.2638	0.0036	3.3600	0.1000	0.0913	0.0024	1509	18	1493	24	1444	50	96	1444	50
88	176	89	1.98	0.1559	0.0035	1.5070	0.0810	0.0699	0.0037	934	19	927	33	880	120	99	934	19
D2564-1-二云斜长片麻岩,金水口群																		
1	162	426	0.38	0.1690	0.0160	2.0300	0.3100	0.0843	0.0041	1004	87	1100	100	1286	95	128	1286	95
2	406	620	0.65	0.3098	0.0046	4.6300	0.1400	0.1087	0.0023	1740	22	1753	26	1775	39	102	1775	39
3	1772	2020	0.88	0.2345	0.0050	3.4700	0.1200	0.1026	0.0022	1358	26	1519	28	1669	40	123	1669	40
4	157	2830	0.05	0.0670	0.0012	0.5570	0.0200	0.0604	0.0015	418	7	449	13	615	54	107	418	7
5	539	1490	0.36	0.2227	0.0055	2.8800	0.1100	0.0933	0.0025	1296	29	1376	28	1489	51	115	1489	51
6	516	1030	0.50	0.1450	0.0170	1.7100	0.2000	0.0865	0.0033	867	92	1002	72	1342	71	116	867	92
7	429	762	0.55	0.1738	0.0040	2.1420	0.0900	0.0896	0.0022	1033	22	1161	29	1413	46	137	1413	46
8	484	627	0.76	0.2739	0.0035	3.8100	0.1000	0.1001	0.0022	1561	18	1593	22	1624	39	104	1624	39
9	232	466	0.49	0.3017	0.0055	4.4200	0.1800	0.1067	0.0025	1699	27	1715	32	1740	44	102	1740	44
10	380	522	0.72	0.2290	0.0040	2.9500	0.1200	0.0920	0.0033	1329	21	1394	30	1461	68	110	1461	68
11	122	606	0.20	0.1280	0.0130	1.3700	0.2400	0.0748	0.0045	775	75	856	97	1040	120	110	775	75
12	428	417	0.99	0.2669	0.0057	3.8500	0.1300	0.1021	0.0033	1525	29	1602	26	1657	61	109	1657	61
13	991	1180	0.83	0.0425	0.0009	0.3670	0.0190	0.0622	0.0025	268	6	317	14	669	85	118	268	6
14	13400	7320	1.81	0.0404	0.0003	0.4120	0.0150	0.0741	0.0019	256	2	350	11	1040	51	137	256	2
15	464	1130	0.39	0.1487	0.0035	1.6880	0.0690	0.0804	0.0034	894	20	1003	27	1196	85	112	894	20
16	16	929	0.01	0.0886	0.0045	0.7950	0.0840	0.0654	0.0039	547	26	589	46	770	120	108	547	26
17	200	477	0.42	0.2555	0.0047	3.5040	0.0990	0.0944	0.0023	1467	24	1527	23	1512	46	103	1512	46

续表 1-4

测点	Th		U	同位素比值						年龄/Ma						谐和年龄/Ma	
	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	谐和度	年龄
18	88	192	0.45	0.2097	0.0049	2.3700	0.1600	0.0807	0.0044	1227	26	1230	47	1200	110	98	1200
19	165	202	0.79	0.2255	0.0058	2.7200	0.1300	0.0869	0.0038	1311	30	1330	35	1348	86	103	1348
20	219	233	0.93	0.2192	0.0058	2.8300	0.1100	0.0934	0.0032	1277	31	1363	30	1489	62	117	1489
21	111	149	0.75	0.2628	0.0083	3.6900	0.2100	0.0975	0.0051	1504	42	1564	45	1560	100	104	1560
22	322	323	1.01	0.2487	0.0055	3.4190	0.0880	0.0995	0.0040	1432	28	1508	20	1606	74	112	1606
23	294	247	1.16	0.2696	0.0075	3.6300	0.1500	0.0972	0.0036	1539	38	1553	33	1563	71	102	1563
24	1029	514	2.04	0.2603	0.0044	4.3200	0.1200	0.1163	0.0028	1491	22	1696	23	1897	43	127	1897
25	205	333	0.64	0.2268	0.0038	2.8200	0.1100	0.0880	0.0022	1318	20	1360	30	1377	49	104	1377
26	254	298	0.88	0.2415	0.0037	3.2300	0.1800	0.0954	0.0037	1394	19	1461	43	1528	73	110	1528
27	209	150	1.23	0.2360	0.0220	3.1000	0.3300	0.0962	0.0071	1360	110	1417	92	1520	140	112	1520
28	503	812	0.64	0.2434	0.0061	3.0300	0.1100	0.0899	0.0024	1404	32	1413	28	1418	51	101	1418
29	594	1059	0.59	0.2226	0.0068	2.9400	0.1600	0.0971	0.0026	1295	36	1388	41	1564	50	121	1564
30	307	268	1.20	0.2710	0.0110	3.9400	0.1200	0.1053	0.0028	1545	54	1621	24	1715	49	111	1715
31	289	177	1.72	0.2953	0.0077	4.7600	0.2600	0.1165	0.0055	1668	38	1774	45	1891	84	113	1891
32	278	842	0.35	0.1302	0.0039	1.3970	0.0460	0.0769	0.0026	789	22	887	20	1111	68	112	789
33	194	214	0.96	0.2122	0.0091	2.7200	0.1600	0.0931	0.0063	1240	48	1329	42	1470	130	119	1470
34	106	146	0.77	0.2465	0.0072	3.2700	0.2000	0.0924	0.0055	1420	37	1470	46	1460	110	103	1460
35	149	224	0.72	0.2494	0.0056	3.2500	0.1800	0.0960	0.0040	1435	29	1465	42	1538	77	107	1538
36	151	192	0.85	0.2479	0.0071	3.5300	0.1500	0.1030	0.0040	1427	36	1532	34	1670	71	117	1670
37	112	192	0.62	0.2285	0.0054	2.7100	0.1600	0.0863	0.0037	1326	28	1327	45	1370	60	103	1370
38	303	455	0.72	0.2408	0.0071	3.2200	0.1200	0.0967	0.0028	1390	37	1460	28	1556	54	112	1556
39	213	286	0.80	0.3130	0.0073	4.8700	0.1800	0.1124	0.0034	1755	36	1795	31	1833	54	104	1833
40	146	226	0.69	0.2082	0.0058	2.5400	0.1700	0.0876	0.0061	1219	31	1279	46	1350	130	111	1350
41	243	270	0.96	0.2508	0.0081	3.4500	0.1600	0.1008	0.0047	1442	42	1514	37	1627	85	113	1627
42	338	796	0.46	0.2714	0.0047	4.0000	0.1700	0.1074	0.0026	1548	24	1631	34	1752	43	113	1752
43	218	385	0.61	0.2668	0.0053	3.9300	0.1800	0.1074	0.0027	1524	27	1617	35	1752	46	115	1752
44	4	991	0.00	0.0696	0.0018	0.4990	0.0220	0.0529	0.0024	434	11	410	15	310	100	94	434

续表 1-5

测点	Th		U	Th/U		同位素比值						年龄/Ma				谐和年龄/Ma			
	10^{-6}			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	谐和度	年龄	1σ	
45	198	171	1.23	0.2689	0.0069	3.8600	0.1500	0.1049	0.0040	1535	35	1602	32	1704	71	111	1704	71	
46	213	442	0.52	0.1660	0.0120	1.9400	0.1900	0.0850	0.0028	990	65	1088	61	1310	65	110	990	65	
47	177	311	0.59	0.2096	0.0051	2.5800	0.1800	0.0887	0.0042	1227	27	1290	50	1385	87	113	1385	87	
48	128	226	0.61	0.2235	0.0065	2.7300	0.1100	0.0883	0.0033	1300	34	1334	30	1380	73	106	1380	73	
49	151	233	0.71	0.2415	0.0068	2.9400	0.2300	0.0871	0.0038	1413	50	1385	57	1352	81	96	1352	81	
50	6	1260	0.00	0.0693	0.0018	0.4880	0.0220	0.0515	0.0021	432	11	403	15	254	91	93	432	11	
51	185	277	0.72	0.2599	0.0069	3.4700	0.1600	0.0964	0.0036	1489	35	1517	37	1548	71	104	1548	71	
52	521	640	0.87	0.2601	0.0070	3.8600	0.1500	0.1067	0.0051	1490	36	1604	30	1733	83	116	1733	83	
53	450	785	0.62	0.2121	0.0042	2.7180	0.0890	0.0909	0.0026	1240	22	1332	25	1440	55	116	1440	55	
54	171	292	0.63	0.3139	0.0060	4.9700	0.1400	0.1145	0.0032	1760	29	1812	24	1868	51	106	1868	51	
55	194	241	0.86	0.2560	0.0062	3.5800	0.2400	0.1011	0.0057	1469	32	1540	54	1630	110	111	1630	110	
56	143	1910	0.08	0.2157	0.0048	2.5010	0.0470	0.0848	0.0012	1259	25	1272	14	1309	29	104	1309	29	
57	220	846	0.21	0.1153	0.0065	1.3500	0.1300	0.0784	0.0055	703	37	860	59	1130	150	122	703	37	
58	6	1280	0.00	0.0683	0.0011	0.5210	0.0300	0.0550	0.0024	426	6	425	20	399	98	100	426	6	
59	503	564	0.95	0.2609	0.0064	3.5400	0.1900	0.0989	0.0023	1494	33	1533	43	1600	44	107	1600	44	
60	277	422	0.68	0.2312	0.0048	3.1800	0.1000	0.0968	0.0038	1341	25	1451	25	1555	75	116	1555	75	
61	208	378	0.52	0.1418	0.0055	1.4990	0.0670	0.0769	0.0021	854	31	926	27	1106	53	130	1106	53	
62	5	1243	0.00	0.0812	0.0014	0.6160	0.0140	0.0551	0.0012	503	8	487	9	407	47	97	503	8	
63	298	807	0.38	0.2383	0.0026	2.9100	0.0340	0.0892	0.0011	1378	13	1384	9	1406	23	102	1406	23	
64	151	199	0.79	0.2292	0.0043	2.6420	0.0690	0.0843	0.0022	1330	23	1310	19	1288	50	97	1288	50	
65	168	674	0.21	0.1390	0.0100	1.6300	0.1500	0.0854	0.0031	836	58	971	56	1330	66	159	1330	66	
66	56	792	0.06	0.0796	0.0017	0.9700	0.0890	0.0884	0.0079	494	10	684	46	1350	170	273	1350	170	
67	10	1336	0.01	0.0794	0.0012	0.6370	0.0270	0.0588	0.0020	492	7	499	17	548	76	101	492	7	
68	12	1280	0.01	0.0715	0.0010	0.6270	0.0250	0.0646	0.0027	445	6	493	15	742	81	111	445	6	
69	30	1562	0.02	0.0763	0.0011	0.6100	0.0140	0.0583	0.0014	474	7	483	9	534	51	102	474	7	
70	490	1160	0.31	0.1304	0.0069	1.4210	0.0830	0.0791	0.0016	789	40	892	36	1169	40	148	1169	40	
71	605	1159	0.54	0.3073	0.0073	4.0150	0.0850	0.0976	0.0013	1727	36	1637	17	1577	25	91	1577	25	

续表 1-6

测点	Th		U		同位素比值										年龄/Ma				谐和年龄/Ma			
	Th	U	Th	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	谐和度	年龄	1σ	谐和度	年龄	1σ
72	221	367	0.60	0.2024	0.0076	0.1400	2.4700	0.0036	0.0910	0.0036	1187	41	1260	42	1439	77	121	1439	77	121	1439	77
73	692	1021	0.71	0.2812	0.0077	0.1400	4.1900	0.0018	0.1095	0.0018	1597	38	1671	28	1789	29	112	1789	29	112	1789	29
74	141	162	0.90	0.3040	0.0110	0.2100	4.4100	0.0046	0.1084	0.0046	1710	54	1712	41	1761	81	103	1761	81	103	1761	81
75	287	610	0.47	0.2588	0.0041	0.0900	3.5590	0.0016	0.0996	0.0016	1483	21	1538	20	1613	29	109	1613	29	109	1613	29
76	297	284	1.02	0.1926	0.0039	0.0750	2.2250	0.0020	0.0836	0.0020	1135	21	1186	24	1274	46	112	1274	46	112	1274	46
77	577	488	1.22	0.2397	0.0037	0.0790	2.8970	0.0020	0.0888	0.0020	1385	19	1380	21	1396	45	101	1396	45	101	1396	45
78	328	858	0.39	0.1682	0.0023	0.0470	1.7580	0.0017	0.0767	0.0017	1002	13	1029	17	1108	45	111	1108	45	111	1108	45
79	432	667	0.67	0.2488	0.0052	0.0690	2.9080	0.0012	0.0847	0.0012	1432	27	1382	18	1311	26	92	1311	26	92	1311	26
80	1032	891	1.20	0.3133	0.0018	0.0510	4.3180	0.0010	0.0998	0.0010	1757	9	1696	10	1618	19	92	1618	19	92	1618	19
81	18	569	0.03	0.0944	0.0020	0.0650	1.0720	0.0037	0.0817	0.0037	582	12	734	32	1206	90	207	1206	90	207	1206	90
82	59	614	0.10	0.3581	0.0057	0.1800	7.3300	0.0025	0.1479	0.0025	1973	27	2152	22	2320	29	118	2320	29	118	2320	29
83	199	228	0.90	0.2519	0.0048	0.1100	3.1000	0.0029	0.0888	0.0029	1448	25	1432	29	1393	64	96	1393	64	96	1393	64
84	4	738	0.00	0.0894	0.0014	0.0340	1.1200	0.0025	0.0909	0.0025	552	8	761	16	1433	52	260	1433	52	260	1433	52
85	153	160	0.98	0.2892	0.0052	0.1100	3.8100	0.0026	0.0963	0.0026	1637	26	1598	24	1543	49	94	1543	49	94	1543	49
86	50	447	0.08	0.1090	0.0065	0.0980	1.0920	0.0030	0.0711	0.0030	666	37	741	48	941	92	111	666	37	111	666	37
87	92	840	0.08	0.0831	0.0052	0.0350	0.8840	0.0045	0.0770	0.0045	514	31	643	19	1110	120	216	1110	120	216	1110	120
88	316	642	0.51	0.2035	0.0058	0.1000	2.2200	0.0022	0.0808	0.0022	1194	31	1186	32	1214	54	102	1214	54	102	1214	54
89	96	140	0.70	0.2310	0.0048	0.0870	2.8430	0.0026	0.0895	0.0026	1339	25	1371	20	1404	56	105	1404	56	105	1404	56
90	235	414	0.57	0.1469	0.0059	0.0840	1.5510	0.0027	0.0770	0.0027	883	33	948	33	1112	70	126	1112	70	126	1112	70
91	116	665	0.17	0.1231	0.0056	0.0490	1.1910	0.0010	0.0708	0.0010	748	32	795	23	949	29	106	748	29	106	748	29
92	10	1277	0.01	0.0828	0.0011	0.0160	0.6420	0.0015	0.0566	0.0015	513	7	503	10	466	58	98	513	7	98	513	7

续表 1-7

测点	Th		U	Th/U	同位素比值						年龄/Ma						谐和年龄/Ma	
	10 ⁻⁶				²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	谐和度	年龄
93	111	240	0.46	0.1618	0.0033	1.7500	0.0440	0.0786	0.0019	967	18	1026	16	1155	47	119	1155	47
94	46	1178	0.03	0.2380	0.0140	3.1000	0.2100	0.0960	0.0022	1373	71	1425	52	1544	44	112	1544	44
95	57	776	0.06	0.0904	0.0018	0.7560	0.0320	0.0612	0.0026	558	10	571	19	634	92	102	558	10
96	611	620	1.00	0.2290	0.0055	2.9720	0.0900	0.0948	0.0023	1329	29	1399	23	1521	46	114	1521	46
97	355	601	0.60	0.2578	0.0050	3.2950	0.0980	0.0937	0.0026	1478	25	1479	23	1498	54	101	1498	54
98	18	717	0.02	0.0844	0.0016	0.6920	0.0270	0.0596	0.0025	523	9	533	16	570	90	102	523	9
99	123	141	0.88	0.2820	0.0100	3.5400	0.2500	0.0947	0.0057	1602	51	1532	55	1510	120	94	1510	120
100	10	1323	0.01	0.0777	0.0015	0.6110	0.0330	0.0576	0.0027	482	9	483	21	500	100	100	482	9
101	8	413	0.02	0.1163	0.0034	1.4150	0.0610	0.0878	0.0028	709	19	891	26	1364	61	192	1364	61
102	183	289	0.64	0.2113	0.0030	2.4310	0.0570	0.0836	0.0019	1235	16	1251	17	1277	44	103	1277	44
103	179	404	0.45	0.2932	0.0061	4.2900	0.1300	0.1099	0.0027	1657	30	1690	25	1795	44	108	1795	44
104	142	168	0.86	0.2600	0.0035	3.3540	0.0840	0.0933	0.0024	1489	18	1491	19	1485	48	100	1485	48
105	494	406	1.19	0.2105	0.0032	2.5790	0.0500	0.0885	0.0014	1231	17	1297	13	1388	30	113	1388	30
106	179	372	0.49	0.2550	0.0032	3.3530	0.0600	0.0951	0.0018	1464	17	1492	14	1524	35	104	1524	35
107	407	545	0.76	0.2468	0.0023	3.0490	0.0940	0.0920	0.0025	1422	12	1419	24	1463	53	103	1463	53
108	7	596	0.01	0.0791	0.0020	0.7220	0.0690	0.0692	0.0086	490	12	544	37	730	200	111	490	12
109	118	625	0.19	0.1310	0.0047	1.3270	0.0560	0.0740	0.0017	793	27	856	25	1038	46	131	1038	46
110	269	146	1.86	0.2546	0.0082	2.9600	0.1800	0.0853	0.0042	1462	42	1394	47	1309	91	90	1309	91
111	552	586	0.95	0.3087	0.0087	4.6400	0.1000	0.1100	0.0019	1733	43	1756	18	1797	32	104	1797	32
112	371	242	1.56	0.2248	0.0064	2.4410	0.0880	0.0794	0.0024	1307	34	1253	26	1175	61	90	1175	61
113	526	434	1.23	0.2414	0.0032	2.9940	0.0640	0.0895	0.0016	1394	16	1404	16	1410	33	101	1410	33
114	709	377	1.90	0.2588	0.0050	3.3630	0.0880	0.0958	0.0024	1483	26	1495	21	1540	49	104	1540	49
115	122	346	0.35	0.2168	0.0079	3.0000	0.1800	0.1019	0.0045	1265	42	1407	45	1654	82	131	1654	82

获数据均在谐和线上或其附近(图5),表明锆石没有发生铅丢失事件。其中最老的1粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为 1868 ± 51 Ma,最年轻的1粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为 1214 ± 54 Ma,峰值年龄集中在1400~1650 Ma之间,其Th/U值为0.36~1.90(表1)。这些锆石可能来自古—中元古代火成岩或变质岩的蚀源区,最大沉积时代可能为中元古代末期。边部锆石中1个测点获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为990 Ma,其Th/U值为0.52(表1);另有5个测点获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为474 Ma、482 Ma、492 Ma、503 Ma、513 Ma,其Th/U值为0.00~0.02(表1);还有4个测点获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为418 Ma、426 Ma、432 Ma、434 Ma,其Th/U值为0.00~0.05(表1)。

4 讨论

4.1 片麻岩原岩的沉积时代

本文2个片麻岩样品均采自金水口岩群白沙河组,其中的锆石大部分为碎屑锆石。从年龄分布特征看,最老年龄为1961 Ma,最年轻锆石年龄为1047 Ma,多数锆石的年龄为1400~1650 Ma(图5)。根据碎屑锆石年龄峰值,沉积岩的物源区主要形成时代可能为古元古代—中元古代晚期。关于金水口岩群原岩时代,前人做过部分研究工作。王云山等^[12]采用全岩Rb-Sr法对拉陵灶火和金水口地区金水口岩群中的条带状混合岩和混合花岗岩进行测年,获得了1990~1549 Ma的年龄,认为该岩群的沉积时代为古元古代。陆松年等^[21]依据碎屑锆石代表物源区物质,认为沉积时代只能限定在古元古代—中元古代。He等^[22]依据片麻岩中碎屑锆石给出的上交点年龄2.2 Ga,将其解释为金水口岩群原岩的最大沉积时代。孟繁聪等^[18]通过对温泉地区金水口岩群含榴辉岩的副片麻岩和花岗片麻岩进行锆石U-Pb测年,将其原岩最早沉积时代限定在中元古代末期—新元古代早期。另外,还有部分学者通过对金水口、巴隆和清水泉地区的金水口岩群片麻岩碎屑锆石进行测年,认为其沉积时代为中元古代或中元古代晚期^[14, 19, 21]。因此,笔者认为,东昆仑西段金水口岩群白沙河组片麻岩的原岩最早形成时代为中元古代晚期。

4.2 片麻岩的变质时代

前人研究认为,金水口岩群在新元古代(0.9~1.0 Ga)

发生一期变质事件,但研究结果较少^[12, 15, 18, 22, 34]。本次研究的2个片麻岩锆石边部分别获得4个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为900 Ma、934 Ma、948 Ma、963 Ma和1个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为990 Ma,均为变质成因^[35],它们代表了源区的变质事件。因此,笔者认为,这些年龄可能代表了片麻岩原岩遭受了1次变质作用,其变质时限为1.0~0.9 Ga。这次变质事件与新元古代花岗岩一样,与中国西部克拉通的形成有关^[12, 17~18],响应于全球Rodinia超大陆聚合事件^[36~37]。

目前研究资料显示,金水口群在早古生代(510~400 Ma)也遭受了一次变质作用^[18, 21~24, 29, 38~42]。本次研究的2个片麻岩锆石边部分别获得1个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 431 ± 13 Ma和4个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(418 Ma、426 Ma、432 Ma、434 Ma)。其中最年轻的年龄与该区榴辉(闪)岩的峰期变质年龄(450~410 Ma)基本一致^①,代表了榴辉岩相变质作用的时代。

值得注意的是,东昆仑东段都兰地区的副片麻岩变质锆石年龄为459~422 Ma,反映了副片麻岩原岩发生榴辉岩相变质的年龄^[43~45]。东昆仑东段温泉地区榴辉岩相变质时代为450~430 Ma^[23~25],其正、副片麻岩变质锆石也给出了少量早古生代的年龄信息,表明这些片麻岩原岩也经历了榴辉岩相变质作用^[18, 46]。另外,东昆仑中段夏日哈木地区榴辉岩相变质发生在450~410 Ma^[24, 47]之间。

据此推测,东昆仑自西向东金水口岩群片麻岩与榴辉(闪)岩为原地关系,共同经历了早古生代高压变质作用,表明东昆仑早古生代可能存在一条近千千米的高压变质岩带,可能为俯冲折返后的产物。

4.3 构造意义

东昆仑造山带位于柴达木地块的南缘,其最古老的变质岩系金水口群被认为是柴达木地块南缘的基底^[18~22, 36],然而,对于东昆仑造山带与柴达木地块的构造亲缘性仍不清楚。东昆仑造山带金水口岩群的原岩主要在中—新元古代沉积^[18~22],先后经历了新元古代变质作用^[18, 22, 34]和早古生代榴辉岩相变质作用^[12, 15, 23~24, 29, 36]。柴达木地块北缘构造带的基底变质岩系也经历了类似的演化过程,该基底岩系由沙柳河群和中—新元古代片麻状花岗岩^[48~49]组成,其原岩在中元古代或新元古代沉积^[45, 50],然

后于新元古代发生变质^[48-50],之后也经历了早古生代榴辉岩相变质作用^[43-46, 50-51]。通过对比可知,柴达木地块南北缘2个地区的基底不论在岩石建造上,还是其所经历的构造-热事件都非常相似。

此外,东昆仑造山带和柴达木北缘基底岩系均被新元古代花岗岩侵入。近年来,在东昆仑造山带基底岩系中,新厘定出多个中-新元古代花岗岩体,显示过铝质S型花岗岩的特征,其年龄主要集中于1.0~0.9 Ga,该期岩浆活动响应了Rodinia超大陆聚合事件^[13, 15-17, 19, 42]。同样,在柴达木地块北缘基底岩系中也发现大量新元古代花岗岩侵入体^[45, 50, 52-55],如鱼卡地区同碰撞S型花岗岩,其结晶年龄为 952 ± 19 Ma^[54];沙柳河地区出露的正片麻岩结晶年龄为 923 ± 12 Ma^[53];锡铁山一带的S型花岗岩体,其形成时代为 930 ± 6 Ma、 918 ± 6 Ma^[55]。对比分析发现,2个地区基底岩系中侵入的花岗岩体,其形成时代均为0.9~1.0 Ga,且地球化学特征类似,均以过铝质S型花岗岩类为主,锆石Lu-Hf同位素组成特征也相似。据此认为,东昆仑造山带和柴达木北缘基底岩系均于中元古代开始卷入Rodinia超大陆的聚合事件中,并在中元古代末期-新元古代早期发生大规模的碰撞事件,碰撞期(1.0~0.9 Ga)形成大量的S型花岗岩。

综上所述,通过前寒武纪基底变质岩系和中-新元古代花岗岩侵入体的对比分析,显示东昆仑造山带与柴达木地块北缘构造带基底岩系构造演化具有高度一致性。由此推测,东昆仑造山带可能是柴达木地块的一部分。

5 结 论

(1) 东昆仑西段金水口群白沙河组片麻岩原岩的最大沉积时代最可能为中元古代晚期。

(2) 东昆仑西段白沙河组片麻岩先经历了新元古代变质作用(1.0~0.9 Ga),可能响应于全球Rodinia超大陆聚合事件,后与原地的榴辉(闪)岩原岩共同经历了早古生代的高压变质作用(450~410 Ma)。

(3) 东昆仑造山带与柴达木地块北缘构造带基底岩系构造演化具有高度一致性,推测,东昆仑造山带可能是柴达木地块的一部分。

致谢:中国地质大学(武汉)李瑶、郑泽敏、王跃飞、甄启斌、李崇英、王成有、杨挺宇和孟杰8位研究

生先后参加野外工作;中国地质调查局西安地质调查中心同位素实验室李艳广、汪双双高级工程师和新梦琪工程师协助完成锆石U-Pb年龄测试;西北大学王超研究员和中国地质大学(武汉)张克信教授认真审阅初稿并提出中肯的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Tseng C Y, Zuo G C, Yang H J, et al. Occurrence of Alaskan-type mafic-ultramafic intrusions in the North Qilian Mountains, Northwest China: Evidence of Cambrian arc magmatism on the Qilian block[J]. Island Arc, 2009, 18(3): 526-549.
- [2] 李文渊. 中国西北部成矿地质特征及找矿新发现[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 365-380.
- [3] Li C S, Zhang Z W, Li W Y, et al. Geochronology, petrology and Hf-S isotope geochemistry of the newly-Discovered Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Qinghai-Tibet Plateau, western China[J]. Lithos, 2015, 216/217: 224-240.
- [4] 张照伟, 李文渊, 钱兵, 等. 东昆仑夏日哈木岩浆铜镍硫化物矿床成矿时代的厘定及其找矿意义[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 438-451.
- [5] 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 青海省夏日哈木铜镍矿床岩石地球化学特征及其意义[J]. 西北地质, 2016, 49(2): 45-58.
- [6] 张照伟, 王亚磊, 钱兵, 等. 东昆仑冰沟南铜镍矿锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及构造意义[J]. 地质学报, 2017, 91(4): 724-735.
- [7] 张照伟, 王驰源, 钱兵, 等. 东昆仑志留纪辉长岩地球化学特征及与铜镍成矿关系探讨[J]. 岩石学报, 2018, 34(8): 2262-2274.
- [8] Song X Y, Yi J N, Chen L M, et al. The giant Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit in the East Kunlun orogenic belt, northern Tibet Plateau, China[J]. Economic Geology, 2016, 111(1): 29-55.
- [9] Peng B, Sun F Y, Li B L, et al. The geochemistry and geochronology of the Xiarihamu II mafic-ultramafic complex, Eastern Kunlun, Qinghai Province, China: Implications for the genesis of magmatic Ni-Cu sulfide deposits[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 73: 13-28.
- [10] Zhang Z W, Tang Q Y, Li C S, et al. Sr-Nd-Os-S isotope and PGE geochemistry of the Xiarihamu magmatic sulfide deposit in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Mineralium Deposita, 2017, 52(1): 51-68.
- [11] 王亚磊, 张照伟, 张江伟, 等. 东昆仑造山带早中生代幔源岩浆事件及其地质意义[J]. 地质与勘探, 2017, 53(5): 855-866.
- [12] 王云山, 陈基娘. 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, 1987: 1-248.
- [13] 谈生祥, 拜永山, 常革红, 等. 祁漫塔格地区晋宁期变质侵入岩

- (体)的发现及其地质意义[J].西北地质,2004,37(1): 69-73.
- [14] 陈能松,李晓彦,王新宇,等.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[J].地质通报,2006,25(11): 1311-1314.
- [15] 陆松年,于海峰,李怀坤,等.中国前寒武纪重大地质问题研究[M].北京:地质出版社,2006: 1-206.
- [16] 张金明,王钦元,许海全,等.喀雅克登塔格地区古元古代金水口变质侵入岩(体)的发现及其地质意义[J].西北地质,2012,45(3): 13-19.
- [17] 孟繁聪,崔美慧,吴祥珂,等.东昆仑祁漫塔格花岗岩片麻岩记录的岩浆和变质事件[J].岩石学报,2013,29(6): 2107-2121.
- [18] 孟繁聪,贾丽辉,任玉峰,等.东昆仑东段温泉地区片麻岩记录的岩浆和变质事件: 锆石 U-Pb 年代学证据[J].岩石学报,2017,33(12): 3691-3709.
- [19] 陈有妍,裴先治,李佐臣,等.东昆仑东段巴隆花岗岩质片麻岩年代学、地球化学特征及地质意义[J].岩石学报,2015,31(8): 2230-2244.
- [20] 陈能松,李晓彦,张克信,等.东昆仑山香山德南部白沙河岩组的岩石组合特征和形成年代的锆石 Pb-Pb 定年启示[J].地质科技情报,2006,25(6): 1-7.
- [21] 陆松年,李怀坤,王惠初,等.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,2009,25(9): 2195-2208.
- [22] He D F, Dong Y P, Liu X M, et al. Tectono-thermal events in East Kunlun, Northern Tibetan Plateau: Evidence from zircon U-Pb geochronology[J]. Gondwana Research, 2016, 30: 179-190.
- [23] Meng F C, Zhang J X, Cui M H. Discovery of Early Paleozoic eclogite from the East Kunlun, Western China and its tectonic significance[J]. Gondwana Research, 2013, 23(2): 825-836.
- [24] 祁生胜,宋述光,史连昌,等.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,2014,30(11): 3345-3356.
- [25] 贾丽辉,孟繁聪,冯惠彬.榴辉岩相峰期流体活动: 来自东昆仑榴辉岩石英脉的证据[J].岩石学报,2014,30(8): 2339-2350.
- [26] 青海省地质矿产局.青海省岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1997: 1-103.
- [27] 姜春发,杨经绥,冯秉贵,等.昆仑开合构造[M].北京:地质出版社,1992: 1-224.
- [28] 陈能松,朱杰,王国灿,等.东昆仑造山带东段清水泉高级变质岩片的变质岩石学研究[J].地球科学,1999,24(2): 116-120.
- [29] 李怀坤,陆松年,相振群,等.东昆仑中部缝合带清水泉麻粒岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究[J].地学前缘,2006,13(6): 311-321.
- [30] 胡朝斌,李猛,查显锋,等.东昆仑祁漫塔格晚古生代末期幔源岩浆活动成因及地质意义: 以鹰爪沟岩体为例[J].地球科学,2018,43(12): 4334-4349.
- [31] VanAchterbergh E., Ryan C G, Jackson S E, et al. Data reduction software for LA-ICP-MS [C] // Sylvester P J. Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences. Principles and Applications. Mineralogical Society of Canada Short Course Series 29, 2001: 239-243.
- [32] 李艳广,汪双双,刘民武,等.斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用[J].地质学报,2015,89(12): 2400-2418.
- [33] Ludwig K R. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, California, 2003.
- [34] 王国灿,王青海,简平,等.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,2004,11(4): 481-490.
- [35] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. Chemical Geology, 2002, 184(1/2): 123-138.
- [36] Hoffman P F. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? [J] Science, 1991, 252(5011): 1409-1412.
- [37] Rogers, J J W, Santosh M. Continents and Supercontinents [M]. New York: Oxford University Press, 2004: 1-289.
- [38] 张建新,孟繁聪,万渝生,等.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, 2003, 22(6): 397-404.
- [39] Liu Y J, Genser J, Neubauer F, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral ages from basement rocks in the Eastern Kunlun Mountains, NW China, and their tectonic implications[J]. Tectonophysics, 2005, 398(3/4): 199-224.
- [40] 龙晓平,金巍,葛文春,等.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,2006,35(4): 367-376.
- [41] Chen N S, Sun M, Wang Q Y, et al. EMP chemical ages of monazites from Central Zone of the eastern Kunlun Orogen: Records of multi-tectonometamorphic events [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(16): 2252-2263.
- [42] 陈能松,孙敏,王勤燕,等.东昆仑造山带中带的锆石 U-Pb 定年与构造演化启示[J].中国科学(D 辑),2008,38(6): 657-666.
- [43] Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study from the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data[J]. Journal of Petrology, 2006, 47(3): 435-455.
- [44] Yang J S, Liu F L, Wu C L, et al. Two ultrahigh-pressure metamorphic events recognized in the Central Orogenic Belt of China: Evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircons[J]. International Geology Review, 2005, 47(4): 327-343.
- [45] Mattinson C G, Wooden J L, Zhang J X, et al. Paragneiss zircon geochronology and trace element geochemistry, North Qaidam HP/UHP terrane, western China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35(3/4): 298-309.

- [46] Mattinson C G, Wooden J L, Liou J G, et al. Geochronology and tectonic significance of Middle Proterozoic granitic orthogneiss, North Qaidam HP/UHP terrane, western China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2006, 88(1/2): 227-241.
- [47] 王冠, 孙丰月, 李碧乐, 等. 东昆仑夏日哈木铜镍矿镁铁质-超镁铁质岩体岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义[J]. *地学前缘*, 2014, 21(6): 381-401.
- [48] 陆松年. 关于我国前寒武纪研究中几个重点问题的分析[J]. *前寒武纪研究进展*, 2002, 25(2): 65-72.
- [49] 辛后田, 周世军, 王惠初, 等. 柴达木盆地北缘“沙柳河岩群”的重新启用[J]. *西北地质*, 2004, 37(1): 26-33.
- [50] Zhang J X, Christopher G M, Meng F C. Polyphase tectonothermal history recorded in granulitized gneisses from the North Qaidam HP/UHP metamorphic terrane, Western China: evidence from zircon U-Pb geochronology[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, 120(5/6): 732-749.
- [51] 张建新, 于胜尧, 李云帅, 等. 原特提斯洋的俯冲, 增生及闭合: 阿尔金-祁连-柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用[J]. *岩石学报*, 2015, 31(12): 3531-3554.
- [52] Song S G, Su L, Li X, et al. Grenville-age orogenesis in the Qaidam-Qilian block: The link between South China and Tarim[J]. *Precambrian Research*, 2012, 220/221: 9-22.
- [53] Yu S Y, Zhang J X, Li H K, et al. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic composition of eclogites and their host gneisses in the Dulan area, North Qaidam UHP terrane: New evidence for deep continental subduction[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(3): 901-919.
- [54] 林慈鑫, 孙勇, 陈丹玲. 柴北缘鱼卡河花岗质片麻岩的地球化学特征和锆石 LA-ICPMS 定年[J]. *地球化学*, 2006, 35(5): 489-505.
- [55] Fu J G, Liang X, Zhou Y, et al. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of granitic rocks in the Xitieshan area, North Qaidam, Northwest China: Implications for Neoproterozoic geodynamic evolutions of North Qaidam[J]. *Precambrian Research*, 2015, 264: 11-29.
- ①中国地质调查局西安地质调查中心. 新疆且末县阿确墩地区四幅 1:5 万矿产地质专项调查报告. 2018.