阿尔金山北缘蛇绿混杂岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义*

张志诚[1,2] 郭召杰[2] 宋彪[3]

ZHANG ZhiCheng[1,2], GUO ZhaoJie[2] and SONG Biao[3]

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京 100871
2. 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871
3. 北京离子探针中心,北京 100037
1. *Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, Beijing* 100871, *China*
2. *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing* 100871, *China*
3. *Beijing SHRIMP Center, Beijing* 100037, *China*

2008-12-09 收稿,2009-02-03 改回.

Zhang ZC, Guo ZJ and Song B. 2009. SHRIMP zircon dating of gabbro from the ophiolite mélange in the northern Altyn Tagh and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3):568 – 576

Abstract The Qingyazi ophiolitic mélange in the Akesai area, located in the northern margin of the Altyn Tagh, is composed of massive faulted-block rocks of serpentinite and gabbro. Analysis shows that the serpentinites are mostly characterized by high MgO contents, low Al_2O_3, CaO, TiO_2 and ∑REE contents, which are similar to the metamorphic peridotite of the world's typical ophiolite. The gabbrao has 49.06% ~ 50.70% SiO_2, high Fe_2O_3 (6.36% ~ 12.85%) and MgO (7.16% ~ 10.01%), and low to moderate TiO_2 (0.31% ~ 1.02%) contents, with equal of Na_2O and K_2O (the average is 0.73% and 0.75%, respectively). It is similar to the E-type MORB and /(or) OIB that the gabbro has lower contents of ∑REE with low fractionation of LREE/HREE ($(La/Yb)_N$ = 1.07 ~ 5.19) and no or slightly Eu anomaly. The major and trace elements characteristics of the gabrro indicate that it may not only retained the MORB origin signatures, but also records the results of the transformation of SSZ environment. All mentioned above show that some of the ophiolitic units in the mélange may have originated in different tectonic settings, indicating that the Qingyazi ophiolitic mélange represents a complex plate suture. The SHRIMP U-Pb age of zircons from gabbro of the Qingyazi ophiolitic mélange is 521 ± 12Ma (MSWD = 2.1), which stands for the formation time of the ocean basin. The result of the zircons SHRIMP U-Pb age shows that the gabbro has a metamorphic age of 472 ± 10.0Ma (MSWD = 0.20), possibly representing the minimum age of the closure of Paleozoic ocean basin.

Key words Ophiolite mélange; Geochemistry; SHRIMP U-Pb data of zircon; Northern Altyn Tagh mountain

摘 要 阿尔金北缘阿克赛青崖子附近蛇绿混杂岩组成岩石包括蛇纹岩和辉长岩等,呈透镜状构造岩片产出。蛇纹岩以富 Mg,贫 Al_2O_3、CaO、TiO 和∑REE 为特征,与世界上典型蛇绿岩中变质橄榄岩的特征值一致。辉长岩 SiO_2 含量为 49.06% ~ 50.70%,具有高的 MgO(7.16% ~ 10.01%)和 Fe_2O_3(6.36% ~ 12.85%)含量,TiO_2 含量低到中等,为 0.31% ~ 1.02%,Na_2O 和 K_2O 含量中等,平均分别为 0.73%和 0.75%,辉长岩在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上属平坦型或轻微富集型,无负 Eu 异常,与 E-type 洋中脊和 OIB 玄武岩类似。辉长岩的主量元素、微量元素特征表明其可能既保留了形成于 MORB 的背景信息,也记录了 SSZ 环境改造的结果,推测青崖子蛇绿混杂岩组合可能来自不同构造背景。蛇绿混杂岩中辉长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定,确定出青崖子附近蛇绿混杂岩所代表的洋壳形成于 521 ± 12Ma,为古生代早期。该年龄测定的结果还显示本区在 472 ± 10Ma 有一次地质事件,可能代表了古生代的洋盆闭合的下限年龄。

* 本文得到国家自然科学基金(40032010,40672130)、国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411305)和北京大学大型仪器开放测试基金的联合资助.

第一作者简介:张志诚,男,1963 年生,博士,副教授,构造地质学专业,E-mail: zczhang@pku.edu.cn

关键词 蛇绿混杂岩；岩石地球化学；SHRIMP 测年；阿尔金山北缘
中图法分类号 P597.3；P588.124

阿尔金地区以巨大的阿尔金走滑断裂而著称于世。近年来，有关该地区古大地构造格局及其演化引起越来越多的重视，已证实阿尔金北缘存在一条蛇绿混杂岩带（何国琦等，1994；郭召杰等，1998，2000；刘良，1999；吴峻等，2001，2002；杨经绥等，2002；张旗等，2003），但在生成环境和时间上还存在争议（郭召杰等，1998，2000；刘良，1999；郝杰等，2006；修业群等，2007；杨经绥等，2008）。本文给出一些新的野外资料和地球化学分析数据以及辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果，为进一步探讨阿尔金地区大地构造格架及其演化提供依据。

1 阿尔金北缘蛇绿混杂岩带的地质特征

阿尔金山北缘蛇绿混杂岩带呈近东西向分布，西起新疆的米兰红柳沟-拉配泉一线，向东经阿克塞至肃北一带变为北东东向沿阿尔金主断裂展布（新疆维吾尔自治区地质矿产局，1993）（图 1）。因构造肢解破坏，蛇绿混杂岩层序不全，各岩石单元出露的完整蛇绿岩剖面罕见，但组成蛇绿岩的岩石各单元均有所出露。蛇绿混杂岩带出露有几十个镁铁质-超镁铁质岩体，保存有较好的堆晶岩块和辉绿岩块，以及浅变质玄武岩、细碧岩、硅质岩和共生的粉砂泥质板岩等，最近又在米兰红柳沟的红柳泉一带发现变质时代为 490～512Ma 的典型石榴蓝闪片岩和低温榴辉岩（Zhang *et al.*，2005；张建新等，2007）。蛇绿混杂岩带内的玄武岩及其沉积岩层，新疆地质志（新疆维吾尔自治区地质矿产局，1993）将其划为中元古界蓟县系和震旦系，但缺乏可靠时代依据。由于本区自然条件恶劣，本蛇绿混杂岩总体研究程度较低。

在阿尔金山阿克塞西青崖子-红柳沟一带，蛇绿混杂岩呈构造岩片侵位在上元古界千枚岩、板岩和硅质灰岩、大理岩中（图 2，图 3）。主要由蛇纹岩和辉长岩组成。蛇纹岩呈墨绿—黑褐色块状构造，少数样品中蛇纹石化呈网格状，见橄榄石残留颗粒。辉长岩一般呈灰绿色，具堆晶层状构造，主要由单斜辉石和斜长石组成，辉石含量为 50% 左右，局部有角闪石化，斜长石占 40%～50%，镜下显示比较典型的辉长结构，常见绿泥石化，可见碳酸盐化、绿帘石化等。

2 地球化学特征

全岩样品的元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。主量元素由美国 Thermo 公司的 ARL ADVANT XP + 扫描波长色散 X 射线荧光光谱仪测定。为了能准确的测量样品中难溶高场强元素的含量，样品进行高压罐酸溶处理，用 Axiom 型高分辨等离子质谱仪（ICP-MS）测量稀土元素和部分微量元素。在分析过程中，使用标样和平行样对测量进行严格的质量监控和检验，以保证数据的准确性。主量元素精度可达到 1% 以内，多数微量元素精度可达到误差在 5% 以内，稀土元素可达 5% 以内，Nd、Ta 等的分析误差在 9% 以内，测试结果见表 1。

蛇纹岩的矿物种类比较单一，其化学成分在很大程度上反映了其中造岩矿物的单一性特点（表 1）。本区蛇纹岩的 SiO_2 含量在 37.74%～39.69%，$MgO/(MgO + FeO^T)$ 变化在 0.82～0.90 之间，具高 Mg，低 Al、Ca 的特征，在 CAM 图中落

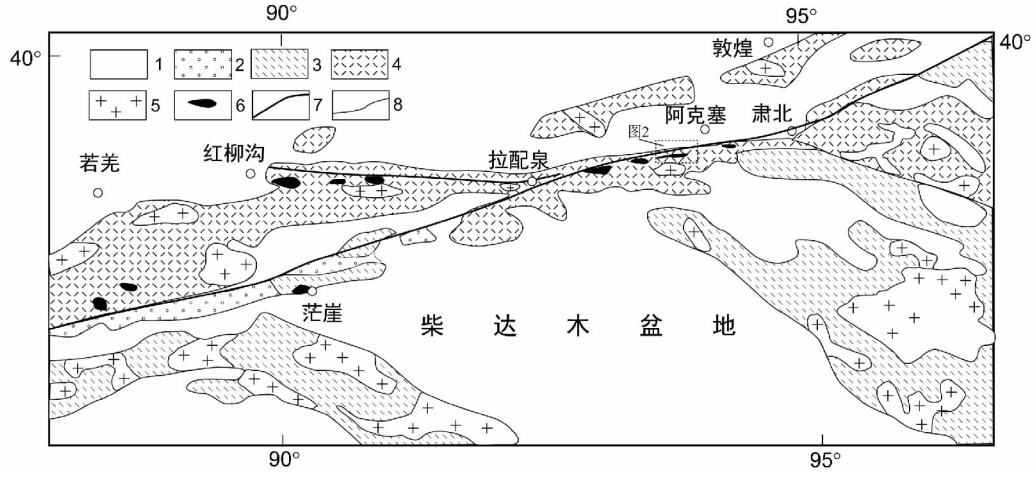


图 1 阿尔金地区蛇绿岩分布简图（据郭召杰等，1998 改编）

1-新生界；2-中生界；3-古生界；4-前寒武系；5-花岗岩；6-蛇绿混杂岩或超基性岩；7-断层；8-地质界线

Fig. 1 Sketch geological map of the distribution of ophiolite in northern part of Altyn Tagh (after Guo *et al.*, 1999)

1-Cenozoic; 2-Mesozoic; 3-Paleozoic; 4-Precambrian; 5-granite; 6-ophiolite mélange or/and ultramafic rocks; 7-fault; 8-line of geological limitation

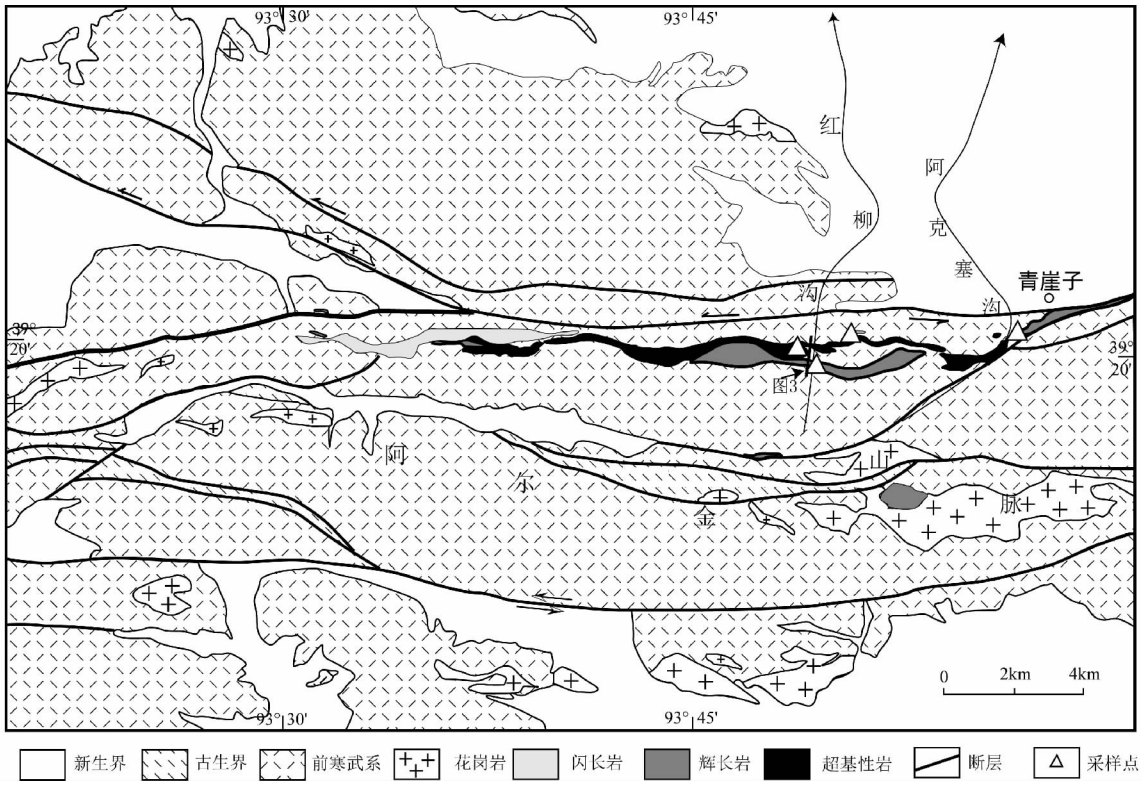


图 2 阿尔金山阿克塞红柳沟一带地质简图(据甘肃省地质局,1973①, 1978② 简化)

Fig. 2 Sketch geological map of the Akesaigou and Hongliugou in Altyn Tagh

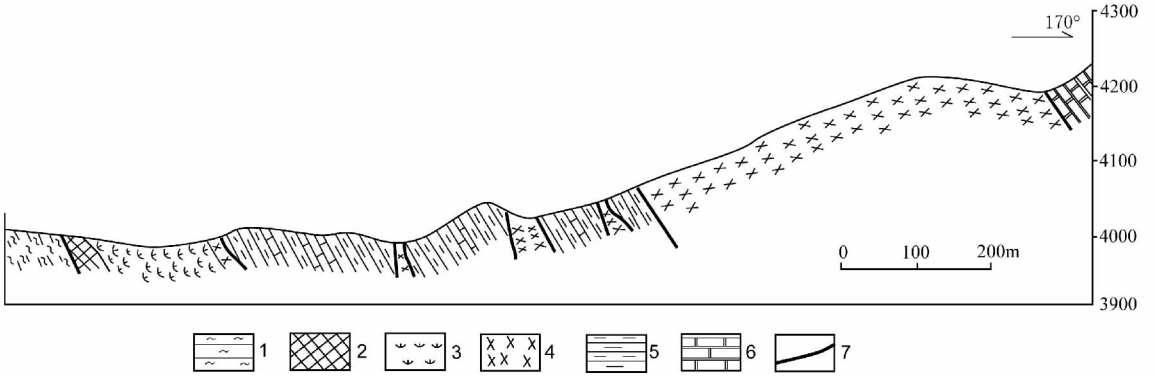


图 3 阿克塞红柳沟东特号山基性-超基性岩体信手剖面图(参考 1∶20 万冷湖幅)

1-千枚状板岩;2-温石棉矿体;3-蛇纹岩;4-辉长岩;5-泥质碳质板岩、千枚岩夹灰岩;6-大理岩;7-断层

Fig. 3 Geological cross section of the mafic-ultramafic rocks of the Tehaoshan near the Hongliugou at Akesai, Altyn Tagh

1-phyllitic slate; 2-chrysotile asbestos ore body; 3-serpentinite; 4-gabbro; 5-shaly carbonaceous slate, phyllite with limestone; 6-marble; 7-fault

入变质橄榄岩区(Coleman,1977)(图略)。辉长岩 SiO_2 含量为 49.06% ~ 50.70%,属于典型的基性岩类,高的 MgO(7.16% ~ 10.01%)和 $Fe_2O_3^T$(6.36% ~ 12.85%)含量,TiO_2 含量低到中等,为 0.31% ~ 1.02%,Na_2O 和 K_2O 含量中等,平均分别为 0.73% 和 0.75%,二者几乎相等。在 CAM 图解上属于蛇绿岩中的镁铁质堆晶岩(图略)(Coleman, 1977),成分接近 MORB 分布范围。在全碱-SiO_2(TAS)图解上(图略),样品落在亚碱性系列区域。在 AFM($Na_2O + K_2O - FeO^T - MgO$)图解上(图 4)的投点表明,蛇纹岩和辉长岩岩石化学成分在结晶过程中具有向拉斑玄武岩系列方向演化的特征。

蛇纹岩的稀土含量低,∑REE 平均为 1.28×10^{-6},低于球

① 甘肃省地质局. 1973. 1∶20 万多坝沟幅地质图

② 甘肃省地质局. 1978. 1∶20 万冷湖幅地质图

表 1 阿克塞红柳沟蛇绿混杂岩中基性-超基性岩石主量元素(wt%)、微量元素($\times10^{-6}$)分析结果

Table 1 Major elements (wt%) and trace elements ($\times10^{-6}$) compositions of mafic-ultramafic rocks in Altyn Tagh

样品号	DA11-4	DA11-5	99-34	99-40	HLG1-1	HLG1-2	HLG1-3	99-52
岩性	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	蛇纹岩	蛇纹岩	蛇纹岩	蛇纹岩
SiO_2	50.01	49.89	50.70	49.06	38.09	39.69	37.74	39.28
TiO_2	0.94	0.21	0.53	1.02	0.02	0.01	0.01	0.08
Al_2O_3	15.30	17.30	18.36	15.58	0.57	0.33	0.87	1.07
$Fe_2O_3^T$	10.14	6.36	6.81	12.85	8.63	5.58	8.25	8.50
MnO	0.19	0.11	0.13	0.23	0.08	0.15	0.09	0.15
MgO	8.00	10.01	7.16	8.35	35.72	43.75	38.48	36.86
CaO	10.92	11.61	11.42	9.61	2.26	0.10	0.48	0.45
Na_2O	0.78	0.54	0.59	1.02	0.34	0.22	0.26	0.33
K_2O	1.04	0.24	0.59	1.14	0.02	0.01	0.02	0.05
P_2O_5	0.19	0.13	0.14	0.24	0.08	0.05	0.06	0.08
LOI	2.66	3.67	3.59	0.96	14.22	10.11	13.74	13.18
Total	100.17	100.07	100.02	100.06	100.02	100.00	100.01	100.00
$Mg^{\#}$	58.33	73.63	65.10	53.55	88.01	93.29	89.22	88.50
Rb	5.685	7.904	9.673	73.048	3.778	1.031	1.263	1.298
Sr	547	89.0	217	469	1.557	11.65	17.53	22.24
Sc	67.49	53.09	48.63	54.65	2.315	2.415	2.952	5.72
Ba	553	46.6	164	389	188	<.001	8.74	37.70
Cr	157.0	573.2	278.9	252.2	2122	2548	3008	2307
Ni	85.48	139.4	91.39	131.5	1797	1980	1578	1383
Co	48.21	37.92	29.39	42.34	77.02	100.20	107.60	65.20
V	257.2	145.0	155.6	224.7	82.27	76.79	96.29	97.23
Y	19.811	4.318	9.224	19.025	0.351	0.099	0.161	0.958
Zr	41.487	18.364	43.259	79.107	5.415	2.28	1.856	7.159
Nb	4.138	1.483	2.605	8.781	0.026	0.062	0.022	0.082
Hf	1.337	0.853	1.51	2.685	0.069	0.058	0.05	0.148
Ta	0.173	0.546	0.067	1.166	0.022	0.039	0.017	0.019
W	1.071	3.386	0.354	2.303	0.71	1.06	1.497	1.97
Th	0.258	0.954	0.34	6.896	0.652	0.642	0.761	0.87
U	0.427	0.71	0.832	4.491	0.185	0.515	0.549	0.151
La	4.068	0.977	4.113	18.376	0.398	0.079	0.14	0.214
Ce	9.615	2.347	9.523	38.89	0.567	0.108	0.18	0.499
Pr	1.805	0.301	1.407	5.3	0.087	0.019	0.028	0.079
Nd	9.042	1.648	5.129	21.53	0.361	0.074	0.111	0.386
Sm	2.649	0.468	1.267	4.215	0.081	0.026	0.041	0.113
Eu	1.032	0.267	0.624	1.189	0.066	0.012	0.02	0.034
Gd	2.702	0.558	1.348	3.75	0.093	0.023	0.039	0.143
Tb	0.569	0.137	0.294	0.647	0.012	0.003	0.006	0.028
Dy	3.5	0.95	2.051	3.785	0.078	0.024	0.034	0.202
Ho	0.804	0.201	0.412	0.743	0.012	0.005	0.007	0.043
Er	2.332	0.597	1.2	2.249	0.046	0.02	0.025	0.15
Tm	0.345	0.086	0.172	0.319	0.008	0.004	0.006	0.024
Yb	2.253	0.543	1.116	2.102	0.061	0.032	0.039	0.173
Lu	0.359	0.086	0.185	0.354	0.009	0.006	0.007	0.028
∑REE	41.075	9.166	28.841	103.457	1.879	0.435	0.683	2.116
$(La/Yb)_N$	1.07	1.07	2.19	5.19	3.87	1.47	2.13	0.73
$(La/Sm)_N$	0.96	1.30	2.03	2.72	3.07	1.90	2.13	1.18
Eu^*	1.29	1.77	1.60	0.98	2.56	1.61	1.66	0.91
Ce/Ce^*	0.74	0.90	0.82	0.81	0.61	0.57	0.57	0.80

测试方法：主量元素为 ICP-AES，微量元素为 ICP-MS，测试单位：北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室

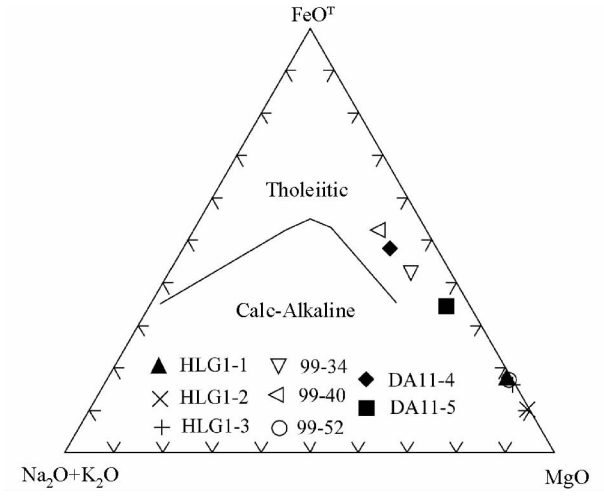


图 4 AFM 三角图确定辉长岩岩石系列(图中分区据 Irvine and Baragar,1971)

Fig. 4 AFM diagram to divide the tholeiitic and calcal-kaline series (division is after Irvine and Baragar,1971)

粒陨石的相应丰度。蛇纹岩的 REE 分配型式图表现为近似平坦的配分曲线(图 5a),$(La/Yb)_N$ 为 0.73 ~ 3.87,无负 Eu 异常。$(La/Sm)_N$ 介于 1.18 到 3.07 之间,接近于王希斌等(1996)定义蛇绿岩中 V 或 U 型变质橄榄岩配分型式。蛇纹岩富集 Cr、Ni 等耐火元素,Cr 含量达到 2122×10^{-6} ~ 3008×10^{-6},Ni 含量为 1383×10^{-6} ~ 1980×10^{-6},由于蛇纹石化作用,Rb、Ba、Th、K 等元素相对富集,而大大亏损了 Zr、Hf、Nb、Ta 等元素(图 5b)。

辉长岩的稀土元素 ∑REE 变化于 9.166×10^{-6} ~ 103.45×10^{-6},球粒陨石标准化的稀土元素分配型式图上属平坦型或轻微富集型(图 5a),$(La/Yb)_N = 1.07 \sim 5.19$,$(La/Sm)_N = 0.96 \sim 2.72$,Eu 相对于 Sm 和 Gd 有轻微的富集,其 Eu^* 在 0.98 ~ 1.77,显示出 E-type 大洋中脊到 OIB 的稀土元素特征(Sun and McDonough,1989)。与原始地幔岩相比,辉长岩除个别大离子亲石元素(Ba、K、Sr 等)外,其余不相容元素均不分异,且约是原始地幔标准值的 10 倍,显示其为 E-MORB 型特征。这些特征反映了大离子亲石元素在岩浆分离结晶晚期相中的富集,岩浆期后热液蚀变或风化作用可能也有一定影响(毛启贵等,2006)。

3 锆石 SHRIMP 定年

3.1 分析方法

为了精确研究阿尔金山北缘蛇绿岩带的形成年龄,选择了 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定方法。所用样品取自青崖子附近(图 2),岩性为辉长岩,主要由单斜辉石和斜长石组成,岩石保留较为新鲜的矿物和辉长结构,见碳酸盐化、绿帘石化等。

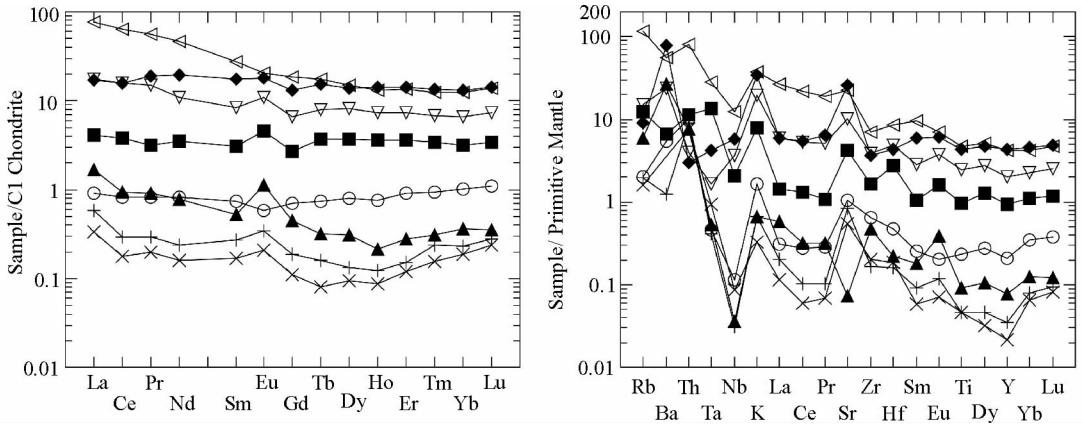


图 5 阿克赛红柳沟基性-超基性岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

球粒陨石标准化值和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989。图例同图 4

Fig. 5 C1 chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primary mantle-normalized trace element spider diagram (b) for the mafic-ultramafic rocks from Hongliugou, Akesai

Normalized values for Primitive-mantle and C1-Chondrite after Sun and McDonough, 1989. Symbols are the same as those in Fig. 4

在廊坊区域地质调查院用常规方法从样品中分离锆石。可能是由于样品粉碎的原因,分离出的锆石多为形态不完整的颗粒。按照宋彪等(2002)描述的制靶,SHRIMP 锆石 U-Pb 分析在中国地质科学院北京离子探针中心的 SHRIMP Ⅱ 上完成。分析流程和方法见相关文献(Compston *et al.*, 1992),使用的标准样品 SL13(572Ma)标定标样 TEMORA1(417Ma)和待测锆石的 U,Th,Pb 含量,而锆石 U-Th-Pb 同位素比值用 TEMROA1 标定(Black *et al.*, 2003; Williams, 1998)。数据处理、年龄计算和绘图使用的是 SQUID 和 ISOPLOT 程序(Ludwig,2001,2003)。表 2 列出的 SHRIMP 分析数据是每个锆石点连续 5 次分析的平均值,误差为 1σ,但 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄的误差为 95% 置信度的结果。

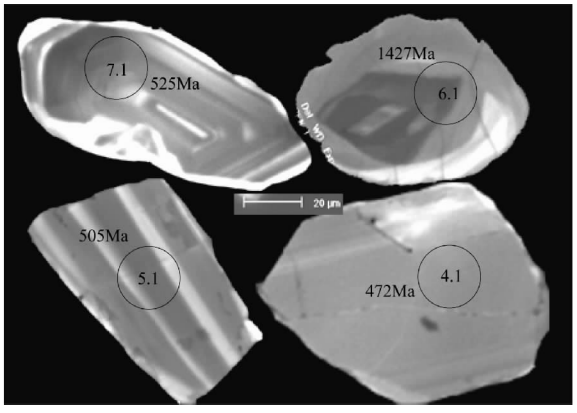


图 6 阿尔金山阿克塞沟辉长岩锆石 CL 图像

Fig. 6 Cathodoluminescence (CL) images of zircon for gabbro from the Akesaigou, Altyn Tagh

3.2 锆石特征及 SHRIMP 定年

从样品中分选出来的锆石大部分呈柱状,粒度在 0.1mm 左右,长宽比 2∶1,晶型为半自形,少量可见较完整的晶棱或晶锥,晶面整洁光滑。锆石阴极发光图像显示锆石内部有四种结构:略显条带的均一结构、条带状结构、中间具有暗色残留核、振荡环结构。所有锆石无新生环带,反映岩浆成因的生长纹清晰可见,其亮度变化不大,部分颗粒中心较暗,边部较亮(图 6),可能是各锆石颗粒中 U 的含量不一致及颗粒内部 U 分布不均匀所致。由于辉长岩样品锆石含量较少,本次共测定了 16 个锆石颗粒。锆石 U 含量变化范围在 49×10^{-6} ~ 3435×10^{-6},Th/U 比值分别变化于 0.30 ~ 5.10 之间,多数介于 0.50 ~ 0.80 间,展示出岩浆锆石 U、Th 成分特征(Hanchar and Miller, 1993; Sue *et al.*, 1999; Claesson *et al.*, 2000; Belousova *et al.*, 2002; Hoskin,2001)。除一个点外,其它所有数据点在 U-Pb 谐和图上集中落在谐和线上及其附近(图 7)。所获得的 16 个 $^{206}Pb/^{238}U$ 比值介于 0.7550 ~ 0.8810,$^{207}Pb/^{235}U$ 为 0.598 ~ 0.721,得到 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为上

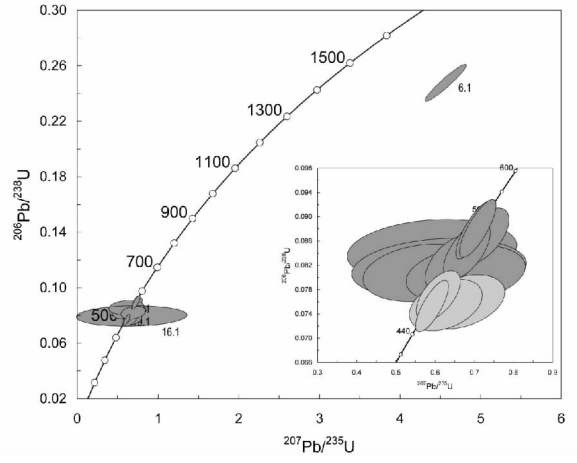


图 7 阿克塞红柳沟辉长岩锆石(DA11-4) SHRIMP U-Pb 谐和图

Fig. 7 SHRIMP U-Pb concordia diagram of zircons of gabbro (DA11-4) from the Akesaigou, Altyn Tagh

表 2 阿克塞红柳沟蛇绿混杂岩辉长岩样品中锆石 U-Pb 的 SHRIMP 年龄分析结果

Table 2 Zircon SHRIMP U-Pb analytical results of the gabbro(DA11-4) from Hongliugou, Akesai

测点	$^{206}Pb_c$ (%)[a]	U ($\times10^{-6}$)	Th ($\times10^{-6}$)	$^{232}Th/^{238}U$	$^{206}Pb^*$ ($\times10^{-6}$)[a]	年龄/Ma($\pm1\sigma$) $^{206}Pb/^{238}U$[b]		$^{206}Pb/^{238}U$[c]		$^{207}Pb/^{235}U$		比值 $^{207}Pb^*/^{235}U$[b]	±%	$^{206}Pb^*/^{238}U$[b]	±%	误差相关系数
DA11-4-4.1	1.78	218	83	0.40	14.5	472	11	468	11	520	34	0.669	6.6	0.0760	2.4	0.361
DA11-4-5.1	3.97	180	107	0.61	13.1	505	12	507	12	483	72	0.609	15	0.0815	2.5	0.170
DA11-4-6.1	0.29	823	239	0.30	176	1,427	28	1,358	30	1,740	40	4.55	2.3	0.2477	2.2	0.950
DA11-4-7.1	0.44	694	471	0.70	50.8	525	11	525	11	522	16	0.672	3.0	0.0848	2.2	0.746
DA11-4-8.1	2.47	248	184	0.77	17.6	501	11	505	12	456	50	0.567	11	0.0808	2.4	0.223
DA11-4-9.1	0.63	535	336	0.65	40.2	536	12	535	12	551	21	0.721	3.8	0.0868	2.2	0.588
DA11-4-10.1	0.91	661	464	0.72	47.3	511	11	512	11	500	20	0.636	4.0	0.0824	2.2	0.553
DA11-4-11.1	0.62	402	302	0.78	29.3	522	11	522	12	527	19	0.680	3.6	0.0844	2.3	0.628
DA11-4-12.1	1.72	376	264	0.73	24.8	469	10	467	10	494	30	0.626	6.1	0.0755	2.3	0.374
DA11-4-13.1	0.69	550	335	0.63	36.6	478	10	478	10	482	18	0.607	3.8	0.0770	2.2	0.586
DA11-4-14.1	3.79	153	44	0.30	11.5	522	12	526	13	472	71	0.591	15	0.0844	2.5	0.171
DA11-4-15.1	2.29	196	107	0.56	13.9	500	12	497	12	525	48	0.677	9.2	0.0806	2.4	0.262
DA11-4-16.1	9.47	49	17	0.36	3.67	486	18	483	17	508	219	0.65	43	0.0782	3.9	0.090
DA11-4-17.1	0.38	918	4527	5.10	69.5	542	11	543	12	538	15	0.698	2.7	0.0878	2.2	0.811
DA11-4-18.1	0.64	3435	9425	2.84	262	544	11	545	12	544	15	0.708	2.7	0.0881	2.2	0.799
DA11-4-19.1	0.17	366	202	0.57	23.7	468	10	467	10	472	14	0.591	2.9	0.0753	2.3	0.772

a) Pb_c 和 Pb^* 分别指普通铅和放射成因铅。标准标定的误差为 0.50%，但不包括在上述误差中，只在比较不同靶的数据时使用；b) 以实测 ^{204}Pb 校正的普通铅；c) 假设 $^{206}Pb/^{238}U$-$^{207}Pb/^{235}U$ 年龄一致的普通铅

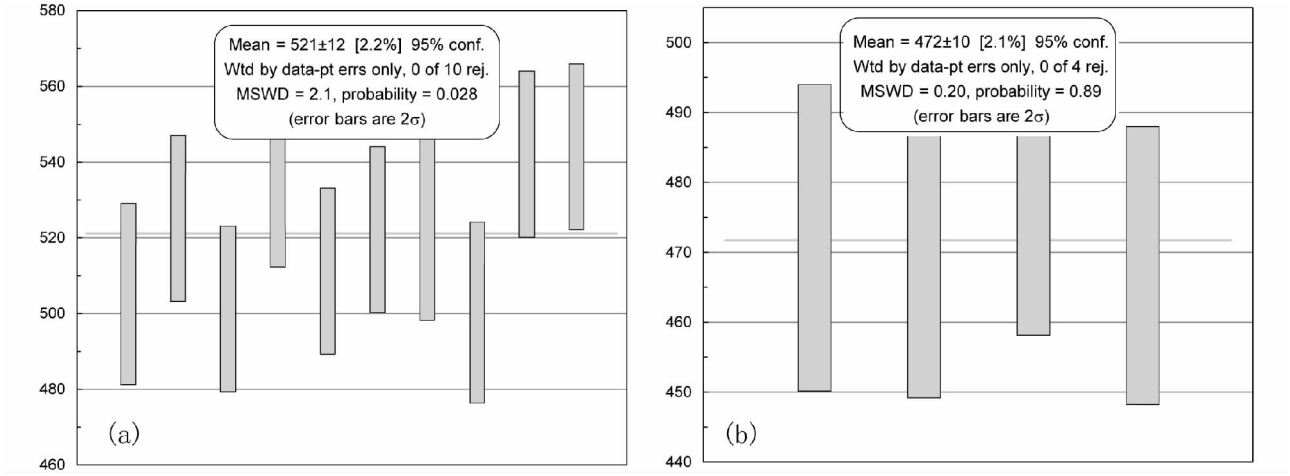


图 8 辉长岩(DA11-4)中锆石 SHRIMP U-Pb 平均年龄图

Fig. 8 SHRIMP U-Pb average ages of zircons from gabbro (DA11-4)

述两个年龄使用实测的 ^{204}Pb 做普通铅校正的结果。需要指出的是，即使采用其他的普通铅校正方法，仍然能够得到在较好的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄。

本次工作测定的 16 个锆石颗粒，其中 10 个颗粒锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 平均年龄为 521 ± 12Ma，MSWD = 2.1(图 8a)，在 $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和图上，集中落在谐和线上(图 7)，Th/U 比值多数介于 0.50 ~ 0.80 间，表明所测定的锆石都是从岩浆中结晶形成的，因而锆石年龄可以代表辉长岩的结晶年龄；另外有 4 个点组成了另一组，其平均年龄为 472 ± 10.0Ma，MSWD = 0.20(图 8b)，在 $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和图上，略微偏离谐和线(图 7)，落在谐和线右侧附近，表明有少量铅丢失，代表有后期热事件的干扰；测点 DA11-4-16.1 的 $^{207}Pb^*/^{235}U$ 误差过大，可能为测试过程中仪器状态不稳所造成的，虽然获得的年龄尚在误差范围内，计算年龄时将其舍弃。测点 DA11-4-6.1 年龄为 1427 ± 28Ma，CL 图像表明其有暗色残留核，可能为继承性锆石年龄，且在 $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和图上，远离谐和线，应该属于混合年龄，没有实际意义，计算时也将其舍弃。

3.3 讨论

前已述及，阿尔金北缘蛇绿混杂岩总体研究程度较低，对于其形成时代有晚元古代和早古生代两种不同的认识(刘

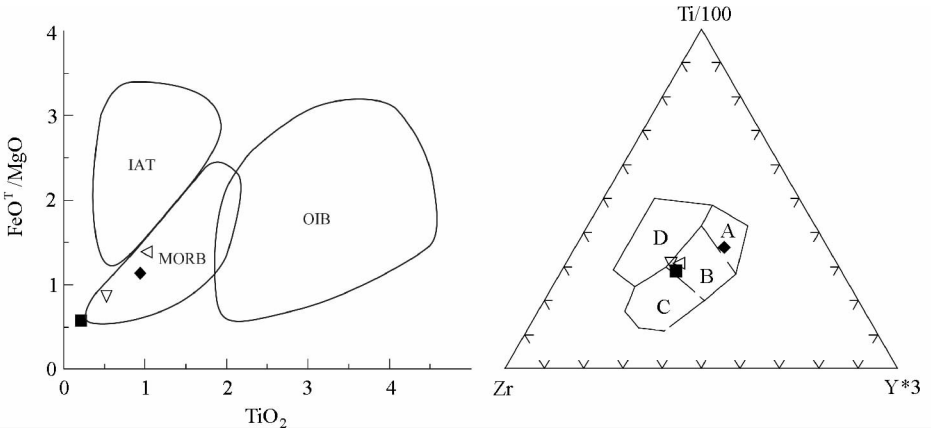


图 9 辉长岩 $FeO_T/MgO-TiO_2$ 图解(左)和 Ti-Zr-Y 判别图(右)(据 Pearce and Cann,1973)

左图:IAT-岛弧拉斑玄武岩;MORB-大洋中脊玄武岩;OIB-洋岛玄武岩。右图:A-岛弧拉斑玄武岩(island-arc tholeiitic basalts);B-MORB、岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩(MORB, island-arc tholeiitic basalts and calc-alkali basalts);C-钙碱性玄武岩(calc-alkali basalts);D-板内玄武岩(intraplate basalts)。图例同图 4

Fig. 9 $FeO^T/MgO-TiO_2$ (the left) and Ti-Zr-Y (the right) (after Pearce and Cann, 1973) diagrams of gabbroic rocks

良,1999;郝杰等,2006;修业群等,2007)。郭召杰等(1998)在阿尔金北缘半鄂博,利用玄武岩、辉长岩样品获得的 Sm-Nd 等时线年龄为 829 ± 60Ma,并认为洋壳形成在新元古代早期,闭合在晋宁造山期;刘良(1999)根据红柳沟蛇绿岩的玄武岩样品获得的 Sm-Nd 等时线年龄 508.3 ± 41.4Ma,提出洋壳形成在早古生代早期,闭合于加里东末期。郝杰等(2006)在包裹蛇绿岩残片的基质变质岩系中获得的绢云母变质年龄 455 ± 2Ma 和弧花岗闪长岩中获得的锆石结晶年龄 467.1 ± 6Ma 支持蛇绿岩形成在寒武纪的认识。修业群等(2007)在阿尔金山北缘恰什坎萨依出露的玄武岩中获得颗粒锆石 U-Pb 年龄为 448.6 ± 3.3Ma。张建新等(2007)获得北阿尔金榴辉岩中多硅白云母的坪年龄为 512 ± 3Ma,等时线年龄为 513 ± 5Ma;蓝片岩中钠云母的坪年龄为 491 ± 3Ma,等时线年龄为 497 ± 10Ma,认为存在早古生代洋壳俯冲。杨经绥等(2008)获得北阿尔金米兰红柳沟蛇绿岩中辉长岩的锆石 SHRIMP 年代为 479 ± 8Ma,认为代表蛇绿岩的形成时代。

阿尔金山阿克塞西青崖子-红柳沟一带蛇绿混杂岩中辉长岩在 $FeO^T/MgO-TiO_2$ 图解上(图 9),落在洋中脊玄武岩范围内;在 Ti-Zr-Y 判别图上(图 9),本区的辉长岩投影在 MORB、岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩区;表明其可能既保留了形成于 MORB 的背景信息,也记录了 SSZ 环境改造的结果。辉长岩具有 Nb、Ta 亏损且有分异,说明其成因可能与岛弧环境有关(Sun and McDonough, 1989),同时也说明本区的蛇绿混杂岩可能具有比较复杂的成因。这一结果也与杨经绥等(2008)对北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩成因的认识一致。辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 521 ± 12Ma,应该代表辉长岩的结晶年龄,也就是洋壳的形成年龄。该年龄在误差范围内与玄武岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄 508 ± 41Ma(刘良,1999)一致,可能表明阿尔金山北缘蛇绿混杂岩所代表的洋壳形成于早古生代早期。辉长岩所代表的洋壳形成年龄略大于北阿尔金蓝片岩和榴辉岩的 Ar-Ar 年龄 491 ~ 513Ma,也表明该时期确有洋壳的形成,并发生了洋壳的俯冲作用。这一形成时代与北祁连早古生代蛇绿岩具有相似的年龄(Yang *et al.*, 2002;张旗等,1997b),可能说明两者曾经是相连的,只是由于后期阿尔金走滑断裂带的影响才被移至现今位置(许志琴等,1999;Gehrels *et al.*, 2003)。

阿尔金山阿克塞西青崖子-红柳沟一带蛇绿混杂岩中辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 铅丢失年龄为 472 ± 10Ma,这一年龄与北阿尔金米兰红柳沟蛇绿岩中辉长岩的锆石 SHRIMP 年龄非常接近,误差范围内几乎一致。同时这一年龄也与阿尔金北缘和祁连山等区域上广泛发育的变质事件在误差范围内相同(宋述光等, 2004;郝杰等, 2006;Zhang *et al.*, 2006;Zhang *et al.*, 2008)。同时阿尔金北缘地区发育大量花岗质岩石,时代有两组:481 ~ 467Ma 的花岗岩类与板块的俯冲和岛弧活动有关(吴才来等,2007);446 ~ 431Ma 的花岗岩类为后碰撞环境的产物(陈宣华等,2003;吴才来等,2005,2007)。因此,辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 472 ± 10Ma 年龄可能为洋盆闭合时变质作用所致,有可能代表了洋盆闭合的下限年龄。

本研究区镁铁-超镁铁岩体主要呈岩片侵位在上元古界千枚岩、板岩和硅质灰岩中,与北祁连的超镁铁岩体相似(张旗等,1997a),两者形成的关系以及空间展布,都还不十分清楚。至于是否存在 829 ± 60Ma(郭召杰等,1998)的蛇绿岩,需要更进一步的深入工作。

总之,本次测试工作获得了较好的年龄,但也仅限于确定青崖子附近蛇绿混杂岩的形成时代,整个阿尔金山北缘蛇绿混杂岩经已获得的年龄值存在一个较大跨度,从 524 到

448Ma(杨经绥等,2008),如何来判定这些已取得年龄的地质意义,尚需要进一步精细的野外和室内研究工作。对于构造背景及地质意义的探究,只能算是刚刚起步。

4 结论

根据区域地质分析,结合新的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄结果,可以得到以下认识:

(1)阿尔金北缘青崖子附近蛇绿混杂岩组成岩石包括蛇纹岩和辉长岩等,呈透镜状产出,应为蛇绿混杂岩。

(2)变质橄榄岩稀土含量低,∑REE 平均为 1.28×10^{-6},低于球粒陨石的相应丰度。REE 分配型式图表现为近似平坦的配分曲线(图 4),接近于王希斌(1996)等定义的变质橄榄岩 V 或 U 型配分型式。辉长岩球粒陨石标准化的稀土元素分配型式图上属平坦型或轻微富集型,主量元素、微量元素特征表明其可能既保留了形成于 MORB 的背景信息,也记录了 SSZ 环境改造的结果。

(3)蛇绿混杂岩中辉长岩获得锆石 SHRIMP 年龄为 521 ±12Ma(10 点)和 472 ±10Ma (5 点)两组年龄值,前者可能代表了蛇绿混杂岩代表的洋壳的形成年龄,后者可能为洋盆闭合的下限年龄。

致谢 锆石定年工作得到北京离子探针中心刘敦一等的大力支持。成文过程中得到刘树文和韩宝福教授的指导。

References

Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY and Fisher NI. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. Contrib. Mineral. Petrol., 143: 602 - 622

Black LP, Kamo SL, Allen CM, Aleinikoff JN, Davis DW, Korsch RJ and Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. Chemical Geology, 200: 155 - 170

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Beijing: Geological publishing House, 163 - 165 (in Chinese with English abstract)

Chen XH, Gehrels G, Wang XF, Yang F and Chen ZL. 2003. Granite from North Altyn Tagh, NW China: U-Pb geochronology and tectonic setting. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 22 (4): 294 - 298 (in Chinese with English abstract)

Claesson S, Vetrin V, Bayanova T and Downes H. 2000. U-Pb zircon age from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: A record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic. Lithos, 51: 95 - 108

Coleman RG. 1977. Ophiolites: Ancient Oceanic Lithosphere. Berlin: Springer-Verlag, 1 - 140

Compston W, Williams IS, Kirschvink JL, Zichao Z and Ma GG. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. Journal of Geological Society of London, 149: 171 - 184

Gehrels GE, Yin A and Wang XF. 2003. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research, 108 (B9): 2423, doi:10.1029/2002JB001876

Guo ZJ, Zhang ZC, Jia CZ and Wei GQ. 2001. Tectonics of Precambrian basement of the Tarim craton. Science in China (Series D), 44 (3): 229 - 236

Guo ZJ, Zhang ZC and Wang JJ. 1999. Sm-Nd isochron age of ophiolite along northern margin of Altun Tagh Mountain and its tectonic significance. Chinese Science Bulletin, 44(5): 456 - 458

Hanchar JM and Miller CF. 1993. Zircon zonation patterns as revealed by cathoclolumine scene and backscattered electron images. Implical Geology, 110: 1 - 13

Hao J, Wang EQ, Liu XH and Sang HQ. 2006. Jinyanshan collisional oroginic belt of the Early Paleozoic in the Altun mountains: Evidence from single zircon U-Pb and $^{40}Ar/^{39}Ar$ isotopic dating for the arc magmatite and ophiolitic mélange. Acta Petrologica Sinica, 22(11): 2743 - 2752

He GQ, Li MS, Liu DQ, TangYL and Zhou RH. 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China. Urumchi: Xinjiang People's publishing House; Hongkong: Hongkong Culture and Education Publishing House, 43 - 47 (in Chinese with English abstract)

Hoskin PWO. 2001. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. Geology, 28(7): 627 - 630

Irvine TN and Baragar WRA. 1971. Guide to chemical classification of common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Science, 8: 523 - 548

Liu L. 1999. High-pressure metamorphic rocks and ophiolite in Altun Mountains and their geological significance. Ph. D. Dissertion. Beijing: Institute of Geology, Academia Sinica (in Chinese with English abstract)

Ludwig KR. 2001. Squid l. 02: A user manua1. Berkeley: Berkeley Geochrono1ogical Center Special Publication, 2: 19

Ludwig KR. 2003. Isoplot 3.0-A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, (4): 1 - 70

Mao QG, Xiao WJ, Han CM, Sun M, Yuan C, Yan Z, Li JL, Yong Y and Zhang JE. 2006. Zircon U-Pb age and the geochemistry of the Baishiquan mafic-ultramafic complex in the Eastern Tianshan, Xinjiang Province: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean. Acta Petrologica Sinica, 22 (1): 153 - 162 (in Chinese with English abstract)

Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. Earth and Planetary Science Letters, 19: 290 - 300

Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. Geological Review, 48(Suppl.): 26 - 30(in Chinese with English abstract)

Song SG, Zhang LF, Niu YL, Song B, Zhang GB and Wang QJ. 2004. Zircon U-Pb SHRIMP ages of eclogites from the North Qilian Mountains in NW China and their tectonic implication. Chinese Science Bulletin, 49(8): 848 - 852

Sue K, David S and William C. 1999. ldentifying granite sources by SHRIMP U-Pb zircon geochronology: An application to the Lachlan foldbelt. Contrib. Mineral. Petrol., 137 ;323 - 341

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. Spec. Publ, 42: 313 - 345

Wang XB, Bao PS and Rong H. 1996. Rare earth elements geochemistry of the mantle peridotite in the ophiolites suites of China. Acta Petrologica Sinica, 11(Suppl.): 24 - 41 (in Chinese with English abstract)

Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochrono1ogy by ionmicroprobe. In: McKibben MA, Shanks WC and Ridley WL (eds.). Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Rev. Econ. Geo1., 7: 1 - 35

Wu J, Li JL, Lan CL and Yu LJ. 2001. New knowledge on Hongliugou ophiolite along Altun fault, NW China. Chinese Journal of Geology, 36(3): 342 - 349 (in Chinese with English abstract)

Wu J, Li JL, Lan CL and Yu LJ. 2002. Geochemical evidence of MORB and OIB combination in Hongliugou ophiolite mélange, Altun fault

belt. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(1): 24 – 30 (in Chinese with English abstract)
Wu CL, Yang JS, Yao SZ, Zeng LS, Chen SY, Li HB, Qi XX, Wooden JL and Mazdab FK. 2005. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin, North Altun, NW China. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 846 – 858 (in Chinese with English abstract)
Wu CL, Yao SZ, Zeng LS, Yang JS, Wooden JL, Chen SY and Mazdab FK. 2006. Bashikaogong-Shimierbulake granitic complex, north Altun, NW China: Geochemistry and zircon SHRIMP ages. Science in China (Series D), 49(12): 1233 – 1251
Xiu YQ, Yu HF, Liu YS, LuSN, Mao DB, Li HM and Li Q. 2007. Geology and zircon U-Pb age of pillow basalt at Qiashikansoy in northern Altun Tagh, NW China. Acta Geologica Sinaca, 81(6): 787 – 794
Xu ZQ, Yang JS, Zhang JX, Jiang M, Li HB and Cui JW. 1999. A comparison between the tectonic unites on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. Acta Geologica Sinica, 73(3): 193 – 205 (in Chinese with English abstract)
Yang JS, Wu CL and Shi RD. 2002. Sheeted dike swarm in Hongliugou, northwest of the Altun region: Evidence for seafloor spreading. Geological Bulletin of China, 21(2): 68 – 74 (in Chinese with English abstract)
Yang JS, Shi RD, Wu CL, Su DC, Chen SY, Wang XB and Wooden J. 2008. Petrology and SHRIMP age of the Hongliugou ophiolite at Milan, north Altun, at the northern margin of the Tibetan plateau. Acta Petrologica Sinica, 24(7): 1567 – 1584 (in Chinese with English abstract)
Yang JS, Xu ZQ, Zhang JX, Song SG, Wu CL, Shi RD, Li HB and Brunel M. 2002. Early Paleozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction model. Terra Nova, 14(5): 397 – 404
Zhang GB, Song SG, Zhang LF and Niu YL. 2008. The subducted oceanic crust within continental-type UHP metamorphic belt in the North Qaidam, NW China: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology. Lithos, 104(1 – 4): 99 – 118
Zhang JX, Meng FC and Yang JS. 2005. A new HP/LT metamorphic terrane in the northern Altyn Tagh, western China. International Geology Review, 47: 371 – 386
Zhang JX, Meng FC, Yu SY, Chen W and Chen SY. 2007. ^{39}Ar-^{40}Ar geochronology of high-pressure/low-temperature blueschist and eclogite in the North Altyn Tagh and their tectonic implications. Geology in China, 34(4): 558 – 564 (in Chinese with English abstract)
Zhang JX, Yang JS, Meng FC, Wan YS, Li HM and Wu CL. 2006. U-Pb isotopic studies of eclogites and their host gneisses in the Xitieshan area of the North Qaidam mountains, western China: New evidence for an Early Paleozoic HP-UHP metamorphic belt. Journal of Asian Earth Science, 28(2 – 3): 143 – 150
Zhang Q, Guo YS, Wang YM, Qian Q, Zhou DJ, Chen Y, Jia XQ and Han S. 1997a. The diversity of mafic-ultramafic rocks in Qilian mountains. Advance in Earth Science, 12(4): 324 – 330 (in Chinese with English abstract)
Zhang Q, Sun XM, Zhou DJ, Qian Q, Chen Y, Wang YM, Jia XQ and Han S. 1997b. The chatacteristics of North Qilian ophiolites, forming settings and their tectonic significance. Advance in Earth Science, 13(4): 366 – 385 (in Chinese with English abstract)
Zhang Q, Zhou GQ and Wang Y. 2003. The distribution of time and space of Chinese ophiolites, and their tetonic settings. Acta Petrologica Sinica, 19(1): 1 – 8 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈宣华, Gehrels G, 王小凤, 杨风, 陈正乐. 2003. 阿尔金山北缘花岗岩的形成时代及其构造环境探讨. 矿物岩石地球化学通报, 22(4): 294 – 298
郭召杰, 张志诚, 王建君. 1998. 阿尔金山北缘蛇绿岩带的 Sm-Nd 等时线年龄及其大地构造意义. 科学通报, 43(18): 1981 – 1984
郭召杰, 张志诚, 贾承造, 魏国齐. 2000. 塔里木克拉通基底格架与构造演化. 中国科学(D 辑), 30(6): 568 – 575
郝杰, 王二七, 刘小汉, 桑海清. 2006. 阿尔金山脉中金雁山早古生代碰撞造山带: 弧岩浆岩的确定与岩体锆石 U-Pb 和蛇绿混杂岩 ^{40}Ar/^{39}Ar 年代学研究的证据. 岩石学报, 22(11): 2743 – 2752
何国琦, 李茂松, 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社; 香港: 香港文化教育出版社, 43 – 47
刘良. 1999. 阿尔金高压变质岩与蛇绿岩及其大地构造意义. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质研究所, 1 – 71
毛启贵, 肖文交, 韩春明, 孙敏, 袁超, 闰臻, 李继亮, 雍拥, 张继恩. 2006. 新疆东天山白石泉铜镇矿床基性-超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约. 岩石学报, 22(1): 153 – 162
宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质评论, 48(增刊): 26 – 30
宋述光, 张立飞, Niu Y, 宋彪, 张贵宾, 王乾杰. 2004. 北祁连山榴辉岩锆石 SHRIMP 定年及其构造意义. 科学通报, 49(6): 592 – 595
王希斌, 鲍佩声, 戎合. 1996. 中国蛇绿岩中变质橄榄岩的稀土元素地球化学. 岩石学报, 11(增刊): 24 – 41
吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 曾令森, 陈松永, 李海兵, 戚学祥, Wooden JL, Mazdab FK. 2005. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗杂岩体特征及锆石 SHRIMP 定年. 岩石学报, 21(3): 846 – 858
吴才来, 姚尚志, 曾令森, 杨经绥, Wooden JL, 陈松永, Mazdab FK. 2007. 北阿尔金巴什考供-斯米尔布拉克花岗杂岩特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 中国科学(D 辑), 37(1): 10 – 26
吴峻, 李继亮, 兰朝利, 俞良军. 2001. 阿尔金红柳沟蛇绿岩研究进展. 地质科学, 36(3): 342 – 349
吴峻, 李继亮, 兰朝利, 俞良军. 2002. 阿尔金红柳沟蛇绿混杂岩中 MORB 与 OIB 组合的地球化学证据. 岩石矿物学杂志, 21(1): 24 – 30
新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 163 – 165
修业群, 于海峰, 刘永顺, 陆松年, 毛德宝, 李惠民, 李铨. 2007. 阿尔金北缘枕状玄武岩的地质特征及其锆石 U-Pb 年龄. 地质学报, 81(6): 787 – 794
许志琴, 杨经绥, 张建新, 姜枚, 李海兵, 崔军文. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪机制. 地质学报, 73(3): 193 – 205
杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 苏德辰, 陈松永, 王希斌, Wooden J. 2008. 北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP 定年. 岩石学报, 24(7): 1567 – 1584
杨经绥, 吴才来, 史仁灯. 2002. 阿尔金山米兰红柳沟的席状岩墙群: 海底扩张的重要证据. 地质通报, 21(2): 69 – 74
张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 陈文, 陈松永. 2007. 北阿尔金 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩的 Ar-Ar 年代学及其区域构造意义. 中国地质, 34(4): 558 – 564
张旗, 郭原生, 王岳明, 钱青, 周德进, 陈雨, 贾秀琴, 韩松. 1997a. 祁连山地区镁铁—超镁铁岩的多样性. 地球科学进展, 12(5): 324 – 330
张旗, 孙晓猛, 周德进, 钱青, 陈雨, 王岳明, 贾秀琴, 韩松. 1997b. 北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义. 地球科学进展, 12(4): 366 – 385
张旗, 周国庆, 王焰. 2003. 中国蛇绿岩的分布、时代及其形成环境. 岩石学报, 19(1): 1 – 8