1000-0569/2008/024(12)-2731-40 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

西天山温泉地区早古生代斜长角闪岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义*

胡霭琴[1] 韦刚健[1] 张积斌[2] 邓文峰[1] 陈林丽[1]

HU AiQin[1], WEI GangJian[1], ZHANG JiBin[2], DENG WenFeng[1] and CHEN LinLi[1]

1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室,广州 510640
2. 新疆有色地质勘察局,乌鲁木齐 830000
1. *Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry*, *Guangzhou Institute of Geochemistry*, *Chinese Academy of Sciences*, *Guangzhou* 510640, *China*
2. *Xinjiang Non-ferrous Geo-exploration Bureau*, *Urumqi* 830000, *China*

2008-05-26 收稿, 2008-10-30 改回.

Hu AQ, Wei GJ, Zhang JB, Deng WF and Chen LL. 2008. SHRIMP U-Pb ages for zircons of the amphibolites and tectonic evolution significance from the Wenquan domain in the West Tianshan Mountains, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2731 – 2740

Abstract The metamorphic rocks of Wenquan Group as Precambrian basement rocks of the West Tianshan orogen occur in the south area of the Wenquan County. Grey amphibolites with middle or coarse texture have been regarded as components of Wenquan Group, those are different entirely from Precambrian fine dark amphibolites in apparent features. Father geological study and high-precision SHRIMP zircon U-Pb dating, the $^{206}Pb/^{238}U$ ages of 455.1 ± 2.7 (2σ) Ma and 451.4 ± 5.4 (2σ) Ma have been gained for these amphibolites from the eastern and western section of Wenquan domain, respectively. So, the results make certain these grey middle-coarse amphibolites in the Wenquan domain are Late Ordovician igneous rocks during the Early Paleozoic, other than Precambrian. One old age of ca. 900Ma was obtained in core of a xenocryst zircon of the amphibolite in the west section of Wenquan, which is approximately consistent with age of basement granitic gneisses of the Wenquan Group. Other evidences of trace elements and Nd-Sr isotopic compositions indicate that the Wenquan Early Paleozoic amphibolites were formed in the island-arc tectonic setting. The results of this study offer new evidence for subduction-related geological events in the West Tianshan and evolution of the Paleoasian Ocean during the Early Paleozoic.

Key words Wenquan domain of West Tianshan; Early Paleozoic amphibolites; Zircon SHRIMP U-Pb age

摘 要 西天山温泉县城以南地区出露了以温泉群为基底的前寒武纪变质岩系。其中,被当作温泉群变质岩系一部分的灰色中-粗粒斜长角闪岩,在岩石外观特征上与前寒武纪的深灰色细粒斜长角闪岩截然不同。进一步的地质研究,并应用高精度锆石 SHRIMP U-Pb 定年,得到东部粗粒斜长角闪岩的年龄为 455.1 ± 2.7 (2σ) Ma,西部中粒斜长角闪岩的年龄为 451.4 ± 5.4 (2σ) Ma。因而,确定了它们应该是早古生代晚奥陶世的火成岩,而不是前寒武纪地质体。在西部地段的斜长角闪岩中有一粒捕获锆石的核部得到大约 900Ma 的老年龄,正好与该区基底温泉群花岗质片麻岩的年龄大体一致。其微量元素和 Nd-Sr 同位素组成特征说明它们形成于岛弧环境。这一研究结果,为研究早古生代时期西天山与俯冲有关的地质事件,以及古亚洲洋的演化提供了新的佐证。

关键词 西天山温泉地区;早古生代斜长角闪岩;锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

中图法分类号 P588.34; P597.3

---

* 国家重点基础研究发展规划项目"中亚造山与成矿研究"(2001CB409805)和国家自然科学基金项目(40803009)资助.

第一作者简介:胡霭琴,女,1940 年生,研究员,同位素年代学和地球化学,E-mail: huaq@gig.ac.cn

1 引言

西天山北支温泉县城以南地区是以温泉群为基底的前寒武纪古老地块。新疆第一区调大队根据区域地层特征和西延部分岩性的对比,以及基底变质岩亏损地幔的 Nd 模式年龄结果等(胡霭琴等,1997),将温泉群划为古元古界(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993)。在温泉群出露地段有一种中粗粒的斜长角闪岩,与温泉群细粒斜长角闪岩、花岗片麻岩呈侵入接触关系,这种岩石的颜色为灰色,粒度粗大,与温泉群中黑灰色细粒斜长角闪岩截然不同,也不同于该区后期未变质的基性岩脉。我们根据 Sm-Nd 同位素研究结果,也曾误将其当作时代上比温泉群年轻的元古宙侵入体(胡霭琴等,1997)。在过去工作的基础上,近年来我们又作了进一步的野外地质研究,分别在温泉县城以南地区的东部和西部沿冲沟采取年龄样品,应用高精度的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年方法确定了温泉群花岗片麻岩(另文发表)和这种灰色中粗粒斜长角闪岩的时代。研究结果确定了后者均是早古生代晚奥陶世火成岩。本文还将结合岩石地球化学特征讨论其形成的构造环境,从而对天山早古生代时期的构造演化特征提供了新的依据。

2 地质概况

研究区在西天山温泉县城以南别珍套山西段,出露地层有古元古界温泉群,中元古界长城系哈尔达坂群,蓟县系松木切克群,古生界中泥盆统汗吉尕组,上泥盆统托斯库尔他乌组,下石炭统大哈拉军山组、阿恰勒河组,下二叠统乌郎群和新生界。温泉群为本区出露的最古老地层,为一套绿片岩—角闪岩相变质岩石,主要岩石有混合岩、条带状混合岩、二长变粒岩、黑云母斜长片麻岩等,未变质的中基性脉岩群广泛分布①。

地质考察区内自东至西有多条冲沟,可以观察到这套变质岩系的岩石组成特征。温泉群的主要岩石组份为细粒黑灰色斜长角闪岩或角闪石英片岩和粗粒混合岩化花岗片麻岩。细粒斜长角闪岩的全岩 Sm-Nd 等时线年龄和花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄均可以确认它们是前寒武纪大约 18 亿年至 9 亿年间形成的古老岩石(胡霭琴等,1997, 2006;Hu *et al.*, 2000)。灰色中-粗粒斜长角闪岩出露广泛,在温泉县城南偏东部冲沟中为粗粒斜长角闪岩,侵入温泉群的细粒黑灰色斜长角闪岩或花岗片麻岩中。在西部开阔的苏鲁别真沟中广泛分布有灰色中粒结构的斜长角闪岩。在 1∶200000 温泉幅(L-44-28 和 L-44-22,1992 年),巴斯坎山隘—霍城幅(L-44-XXVI、XXVII 和 XXXVIII,1988 年)地质图和说明书中将其归属于温泉群,称之为黑云母斜长片麻岩①。据我们的观察,它侵入于温泉群上亚群的变质砂岩,产状十分平缓。这两种斜长角闪岩在外观上与温泉群的黑灰色细粒斜长角闪岩明显不同,也与后期未变质的基性岩脉有本质区别。为了研究其形成时代,分别在东、西部地区采集年龄样品。东部冲沟中的粗粒斜长角闪岩(02XW-04b)采样位置为 44°55′39.7″N,81°02′1.2″E,西部苏鲁别真沟的中粒斜长角闪岩(02XW-20a)采样位置为 44°54′45.4″N,80°29′52.9″E。

3 地球化学特征

3.1 岩石化学组成特征

表 1 中列出了 16 个斜长角闪岩主量和微量元素的分析结果,包括 1986 年(86-1034)、1988 年(881053-和 881091-)和 2002 年(02XW-)采集的样品。在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成元素分析,应用 XRF 方法(Rigaku ZSX100e)做主量元素分析,误差 <1%,其中 Fe_2O_3 为全铁百分含量。表 1 中 * 样品为使用重量法分析的数据(胡霭琴等,2006);微量元素应用 ICP-MS 分析(PE ELAN 6000),误差 5% ~10%。

采自温泉县城南东部冲沟中 8 个粗粒斜长角闪岩的 SiO_2 含量在 45.88% ~49.71% 和 55.87% ~58.56% 两个范围内,TiO_2 为 0.79% ~1.30%;西部苏鲁别真沟中的中粒灰色斜长角闪岩的 SiO_2 含量在 51.84% ~62.59% 围内,TiO_2 为 0.73% ~1.11%。所有岩石的 TiO_2 与 SiO_2 呈反相关关系,均落在正变质岩区域。除了一个样品(02XW22a)显示碱性岩石特征外,其它样品均具有亚碱性岩石特征(见表 1)。在 SiO_2-Na_2O+K_2O(图 1a)和 Nb/Y-Zr/TiO_2(图 1b)岩石分类图解中,东部的粗粒斜长角闪岩具有从玄武质至安山—粗面安山质岩石的化学组成,而西部地区的斜长角闪岩中有一个样品(881091-2)属玄武质岩石,其它均属于安山—粗面安山质岩石。两个定年样品均属安山—粗面安山质变质岩。

3.2 稀土和微量元素地球化学特征

16 个中粗粒斜长角闪岩样品中 6 个作了 REE 和微量元素的分析(表 1),总 REE 含量在 76×10^{-6} ~204×10^{-6},东沟的粗粒斜长角闪岩的 REE 总含量稍低于西部的中粒斜长角闪岩。在球粒陨石标准化的 REE 分布图中(图 1c),为一组大体相似略向右倾斜的曲线,东部样品 $(La/Yb)_N$ 为 4.6 ~11.8,西部为 18.3 和 18.7。所有样品均具有微弱的 Eu 负异常或极不明显的 Eu 正异常(δ_{Eu} 在 0.82 ~1.03)。东部粗粒斜长角闪岩的 $(La/Sm)_N$ 为 1.8 ~3.7,而西部 2 个中粒斜长角闪岩的 $(La/Sm)_N$ 较高(5.4 ~5.1),显示出弱的 LREE 富集,相比之下西部样品更富集 LREE。所有样品的 HREE 部分曲线平坦。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中(图 1d)所有样品都显示出富集大离子亲石元素,以及明显的 Nb、

① 新疆维吾尔自治区地质矿产局第一区域地质调查大队. 1∶200000 温泉幅(1992)和巴斯坎山隘幅-霍城幅(1988)地质图地质报告

表 1 西天山温泉地区早古生代斜长角闪岩的主量元素(wt%)、微量元素($\times 10^{-6}$)和 Nd-Sr 同位素分析结果

Table 1 Analyses of major elements (wt%), trace elements ($\times 10^{-6}$) and Nd-Sr isotopic compositions for the Early Paleozoic amphibolites from the Wenquan domain in the West Tianshan

样品号	02XW04b	881053-1	881053-5	*881053-6	*881053-7	881053-8	881053-10	*86-1034	02XW-20a	02XW-20c	02XW-20d	02XW-21a	02XW-22a	02XW-23a	*881091-2	*881091-8
地区**	东部	东部	东部	东部	东部	东部	东部	东部	西部	西部	西部	西部	西部	西部	西部	西部
SiO_2	56.23	49.71	48.97	55.87	47.80	58.56	48.69	45.88	61.16	62.59	61.42	61.11	51.84	61.57	52.00	59.43
TiO_2	0.84	1.28	1.30	0.87	0.93	0.79	1.10	1.22	0.77	0.73	0.80	0.75	0.84	0.75	1.11	0.91
Al_2O_3	17.65	18.16	18.00	18.80	17.66	17.38	17.96	19.03	17.03	17.40	17.08	16.06	18.96	17.09	11.69	16.97
Fe_2O_3	7.17	9.37	8.80	2.12	2.43	5.92	8.98	3.05	5.92	5.22	5.58	5.20	5.96	5.69	3.19	1.09
FeO				4.53	6.27			6.34							6.31	4.13
MnO	0.13	0.17	0.15	0.15	0.18	0.13	0.18	0.16	0.11	0.10	0.11	0.11	0.16	0.09	0.19	0.13
MgO	4.48	5.93	7.42	4.60	9.20	3.66	7.39	8.00	2.28	2.19	2.24	2.14	2.68	2.31	11.40	2.90
CaO	5.72	9.34	10.32	6.03	9.48	5.27	10.19	12.0	5.43	5.23	5.20	4.76	4.68	2.78	8.62	5.30
Na_2O	3.65	3.49	3.03	3.75	2.73	3.86	3.42	2.35	4.30	3.88	3.94	4.17	2.16	3.98	1.60	4.11
K_2O	2.18	0.61	0.92	1.56	1.00	2.37	0.74	0.79	2.25	2.11	2.08	2.72	7.98	2.51	2.13	2.51
H_2Op				0.90	1.23			0.50							0.70	0.79
H_2Om				0.03	0.04			0.05							0.05	0.04
P_2O_5	0.21	0.27	0.23	0.19	0.10	0.20	0.26	0.11	0.23	0.22	0.23	0.20	0.24	0.21	0.30	0.24
LOI	1.18	1.42	0.95	0.20	0.19	1.26	0.86	0.19	0.92	0.69	0.86	2.00	4.59	2.57	0.59	1.02
Total	99.43	99.76	100.09	99.60	99.24	99.41	99.77	99.48	100.42	100.36	99.53	99.21	100.08	99.54	99.29	99.57
Sc	20.3	29.74		18.43	36.0				11.82				11.47			
V	140.6	210		179.2	254				80.6				93.5			
Cr	78.9	86.2		78.5	456				23.6				23.8			
Co	19.55	29.0		24.53	39.8				12.59				8.47			
Ni	28.1	35.5		37.16	158.8				7.04				4.92			
Cu	5.41	28.6		31.62	48.8				5.15				3.28			
Zn	132.4	156		65.71	154				121.9				149			
Ga	19.7	23.1		23.86	17.4				21.1				24.37			
Rb	77.9	13.33		38.98	36.9				68.9				291			
Sr	616	881		715	509				747				708			
Y	11.94	26.4		16.99	18.7				17.85				15.77			
Zr	100.0	47.3		96.4	54.5				216				215			
Hf	2.39	1.79		2.474	1.795				5.05				5.13			
Nb	8.48	10.56		9.14	7.00				18.01				20.5			
Ta	0.566	0.595		0.553	0.431				1.471				1.526			
Ba	598.7	376.4		538.7	223.4				894				1551			
Pb	11.84	10.03		9.09	6.71				21.90				17.98			
Th	2.304	2.32		3.710	1.472				15.58				16.87			
U	0.700	0.824		1.232	0.401				3.67				2.97			
La	21.2	24.4		20.73	11.52				48.4				48.5			
Ce	40.5	54.8		42.3	26.4				83.6				92.5			
Pr	4.88	7.88		5.11	3.71				9.82				9.98			
Nd	18.62	32.2		20.98	17.19				33.7				33.9			
Sm	3.55	6.77		4.136	3.83				5.78				5.46			
Eu	1.088	1.67		1.263	1.22				1.391				1.31			
Gd	3.03	5.64		3.83	3.76				4.77				4.45			
Tb	0.409	0.838		0.561	0.612				0.576				0.514			
Dy	2.38	5.05		3.073	3.42				3.21				3.01			
Ho	0.457	0.996		0.617	0.715				0.622				0.574			
Er	1.245	2.76		1.711	1.85				1.709				1.651			
Tm	0.176	0.407		0.238	0.262				0.260				0.245			
Yb	1.182	2.66		1.552	1.66				1.707				1.751			
Lu	0.186	0.391		0.227	0.258				0.2680				0.2790			
$^{87}Rb/^{86}Sr$	0.366				0.210				0.267							
$^{87}Sr/^{86}Sr$	0.709519				0.707800				0.707755							
2σ	11				11				11							
Isr	0.7071				0.7064				0.7060							
$^{147}Sm/^{144}Nd$	0.1154	0.1270		0.1192	0.1425				0.1038							
$^{143}Nd/^{144}Nd$	0.512416	0.512485		0.512322	0.512506				0.512337							
2σ	8	8		38	28				7							
$\varepsilon_{Nd}(t)$	0.39	1.1		−1.7	0.57				−0.52							
t_{DM} (Ga)	1.1	1.2		1.3	1.4				1.1							

* 主量元素用重量法分析. 其中 881053-6 和 1053-7 样品的 Sm-Nd 同位素含量和比值见:胡霭琴等,1997,2006;Hu *et al.*, 2000. ** 地区中的东部指温泉县南向东地区,而西部是指温泉县南向西地区的苏鲁别真沟(正文中已有说明)

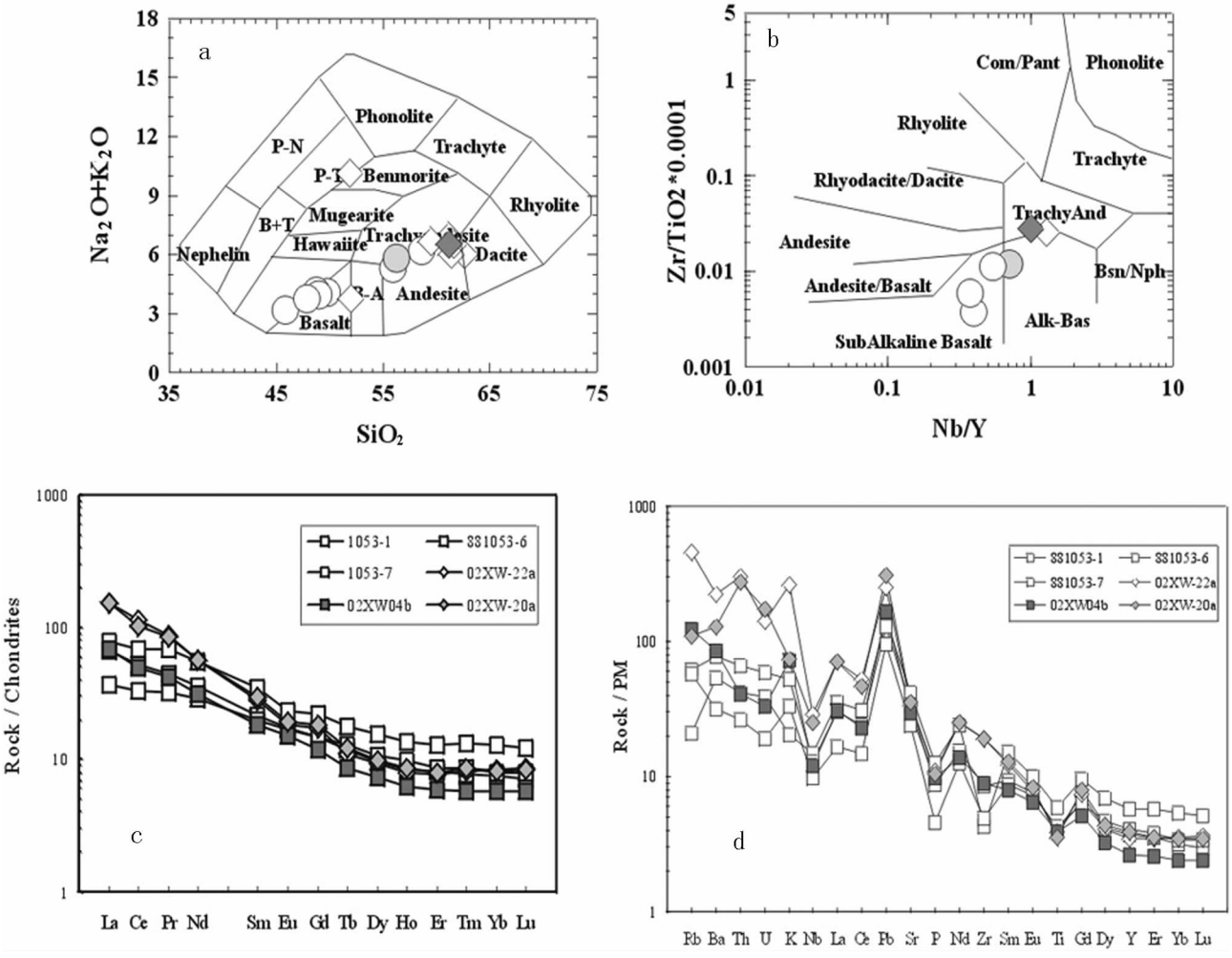

图 1 温泉地区早古生代斜长角闪岩的岩石地球化学图解

岩石分类图(a, b)、REE 分布图(c)、微量元素蛛网图(d)。图 1a,b 中:●-东部粗粒斜长角闪岩;◆-西部中粒斜长角闪岩。稀土元素球粒陨石标准化值见 Hu *et al.*, 2000(即 Masuda *et al.* (1973)值除以 1.2);微量元素原始地幔标准化值据 Sun and McDonough (1989)

Fig. 1 Diagrams of geochemistry for the Early Paleozoic amphibolites from the Wenquan domain. Classificassion diagrams (a, b), REE patterns (c), trace spidergrams (d)

Fig. 1a: after Cox KG *et al.*, 1979; Fig. 1b: after Winchester JA and Floyd PA, 1977. The chondrite values used for REE normalization are from Masuda *et al.* (1973) divided by 1.2 (Hu *et al.*, 2000); The primitive mantle (PM) values used for spidergram construction are from Sun and McDonough (1989)

P、Ti 的负异常。两个西部的斜长角闪岩更为明显富含 Rb、Ba、Th、U、K 等元素。元素地球化学研究说明温泉早古生代的斜长角闪岩具有岛弧钙碱性岩石的特征。

3.3 构造环境的判别

应用元素地球化学图解(图 2a,b)进一步讨论温泉早古生代斜长角闪岩形成的构造环境。在主量元素 FeOt-MgO-Al_2O_3 的判别图中(图 2a),除 2 个样品外,14 个样品都落在了岛弧和活动大陆边缘区。在图 2b 的 Th-Hf-Ta 微量元素判别图中,4 个东部和 2 个西部的斜长角闪岩样品,它们都落在火山弧玄武岩区。需要指出的是,图 2a 中一个落入 MORB 区域中的斜长角闪岩(881053-7),在图 2b 中也落在了火山弧玄武岩区,而另一个样品(881091-2)暂缺微量元素分析数据,有待进一步研究。基于上述列举的斜长角闪岩主量元素、REE 分布曲线和微量元素蛛网图等地球化学特征,以及构造环境的判别图解,我们可以推断其原岩形成于岛弧和活动大陆边缘区。

3.4 Nd-Sr 同位素组成

表 1 中列出了 5 个温泉早古生代斜长角闪岩的 Sm-Nd 同位素分析数据,以及其中 3 个样品的 Rb-Sr 同位素分析结果。3 斜长角闪岩的 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 比值为 0.210 ~ 0.366,Sr 同位

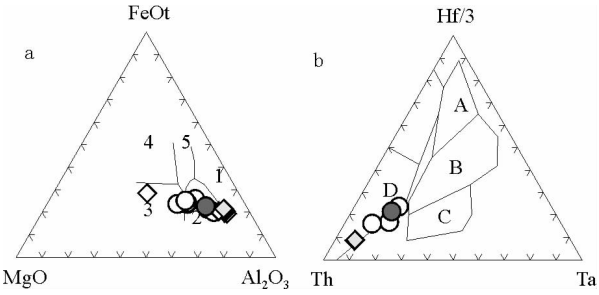

图 2 FeOt-MgO-Al_2O_3(a)(Pearce and Gale, 1977)和 Th-Hf-Ta(b)(Wood, 1980)构造环境判别图

●-东部的粗粒斜长角闪岩;◆-西部的中粒斜长角闪岩. 图 2a 中 1-扩张中心岛;2-岛弧和活动大陆边缘;3-MORB;4-洋岛. 图 2b 中 A)-N-MORB;B)-E-MORB 和板内拉斑玄武岩;C)-碱性板内玄武岩;D)-火山弧玄武岩

Fig. 2 FeOt-MgO-Al_2O_3(a)(Pearce and Gale, 1977) and Th-Hf-Ta(b)(Wood, 1980) tectonic discrimination diagrams

Fig. 2a: 1-Spreading center island; 2-Island-arc and active continental margin; 3-MORB; 4-Ocean island. Fig. 2b: A)-N-MORB; B)-E-MORB and within-plate tholeiites; C)-alkaline within-plate basalts; D)-volcanic-arc basalts

素初始值 I_{Sr} 在 0.7060 ~ 0.7084。5 个斜长角闪岩的 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 在 0.1038 ~ 0.1425,$\varepsilon_{Nd}(t)$ 在 +1.1 ~ −1.7,t_{DM} 在 1.4 ~ 1.1 Ga 之间。温泉早古生代斜长角闪岩具有高的 Sr 同位素初始值,$\varepsilon_{Nd}(t)$ 为小的正值或不大的负值,以及偏老的 Nd 模式年龄等,均说明它们在不同程度上受到大陆基底古老岩石的污染,显示了形成于活动大陆边缘的构造环境特征。

4 锆石特征和 SHRIMP U-Pb 年龄测定结果

定年样品分别采自温泉县城以南地区的东、西地段。东部冲沟的粗粒斜长角闪岩(02XW-04b)具粗粒结构,片麻状构造。主要由斜长石和角闪石组成,少量辉石、石英和黑云母细片,副矿物主要有锆石和磷灰石,蚀变矿物为绿泥石和绢云母等;西部的中粒斜长角闪岩(02XW-20a)为中粒结构,其片麻理较粗粒斜长角闪岩更为发育。主要矿物有斜长石、黑云母、角闪石、石英,含有少量残留的辉石,副矿物主要是锆石和磷灰石,蚀变矿物有绿泥石、高岭土和绢云母等。

使用手标本大小的岩石样品分选锆石,经过单独的破碎、陶砂等程序,使锆石在分选过程中不受污染。分离出非电磁性的锆石,在双目镜下对锆石晶体逐一挑选,用于 SHRIMP U-Pb 年龄测定的锆石晶体均为不带包裹物、无裂隙、透明度好的锆石颗粒。锆石阴极发光图像在中国科学院广州地球化学研究同位素年代学和地球化学重点实验室 JXA-8100 仪器上完成。

锆石 U, Th-Pb 年龄测定工作在北京离子探针中心 SHRIMP II 仪器上完成,分析原理和流程参考见 Compston *et al.* (1992), Williams and Claesson (1987) 等。研究中分别测定了两个斜长角闪岩样品中 13 和 16 个不同大小、不同形态的锆石颗粒,单次测量结果列于表 1,误差均为 1σ。使用 ISOPLOT3.0 (Ludwig, 2003) 程序处理数据和计算年龄,采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄,其加权平均值具有 95% 的置信度(表 2)。

4.1 东部粗粒斜长角闪岩(02XW-04b)

温泉县城东南冲沟中用于锆石定年的粗粒斜长角闪岩具有亚碱性岩石特征,岩石主要化学成分为:SiO_2 − 56.23%, Al_2O_3 − 17.65%, TiO_2 − 0.84%, MgO − 4.48%, $Fe_2O_3^T$ − 7.17%, CaO − 5.72%, $Na_2O + K_2O$ − 5.83%, 且 $Na_2O > K_2O$(表 1)。

锆石为淡粉红色、透明、具双椎的柱状晶体,晶棱有浑圆,晶面见有熔蚀坑。多为{100} + {111}聚形,晶体长约 0.1mm,长短轴之比为 2 ∶ 1。图 3a 为其锆石的阴极发光图像。

从图 3a 中可以看到粗粒斜长角闪岩中的锆石均具有核幔结构,基本没有暗色生长边,为原生锆石。图 3a 中示意性标出测点的位置,多数测定点取在锆石的核部,有些在核幔混合部位(C7.1, C9.1, C12.1),个别测点在锆石的幔部(C11.1)。

13 个锆石年龄单次测定结果见表 2 和图 3b。锆石的 U 含量在 $114 \times 10^{-6} \sim 401 \times 10^{-6}$, Th/U 比值在 0.635 ~ 1.118,所有测点由 $^{206}Pb/^{238}U$ 比值计算的年龄在 465 ~ 423Ma 之间。其中测点 C11.1 和 C9.1 位于锆石的幔部或核幔混合部位,其普通铅含量相对偏高,年龄值明显偏低。11 个锆石的数据点在图 3b 中大致可分为三个年龄区。其中有 8 个锆石的数据点(C3.1, C4.1, C5.1, C6.1, C7.1, C8.1, C12.1 和 C13.1)分布在谐和曲线的 460Ma 附近,其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值为 460.4 ± 3.2(2σ)Ma(MSWD = 0.171);第二组三个测点(C1.1, C1.2 和 C10.1)分布在 440Ma 附近,计算得到年龄为 442.9 ± 4.9(2σ)Ma(MSWD = 0.112)。虽然两组年龄相差大约 17Ma,但是从锆石阴极发光图像特征,以及其 U 含量或 Th/U 比值等均难以解释低的年龄代表变质作用时间。11 个锆石测点的年龄集中在 460 ~ 443Ma 之间,正好相当于晚奥陶世时限(460.9 ± 1.6Ma ~ 443.7 ± 1.5Ma),因此取 11 个测点的加权平均年龄为 455.1 ± 2.7(2σ)Ma(MSWD = 1.04),作为该粗粒斜长角闪岩中锆石的形成年龄,同时也限定了它是早古生代晚奥陶世的岩浆活动产物,而不是前寒武纪地质体。另外二个测量点(C9.1 和 C11.1)的年龄分别为 429.7 ± 8.6(1σ)Ma 和 422.6 ± 9.7(1σ)Ma(表 2),反映了后期地质作用时间。

4.2 西部中粒斜长角闪岩(02XW-20a)

温泉县城以南地区西部苏鲁别真沟中广泛分布着中粒

表 2 温泉地区早古生代斜长角闪岩中锆石 SHRIMP U-Th-Pb 年龄分析结果

Table 2 SHRIMP U-Th-Pb dating for zircons of the Early Paleozoic amphibolites from the Wenquan domain in the West Tianshan

点号	$^{206}Pb_c$ (%)	U ($\times10^{-6}$)	Th ($\times10^{-6}$)	Th/U	$^{206}Pb^*$ ($\times10^{-6}$)	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄 (Ma)	±1σ	$^{207}Pb/^{235}U$ 年龄 (Ma)	±1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄 (Ma)	±1σ	$^{208}Pb/^{232}Th$ 年龄 (Ma)	±1σ	% Discordant	$^{208}Pb^*/^{232}Th$	±%	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	±%	$^{207}Pb^*/^{235}U$	±%	$^{206}Pb^*/^{238}U$	±%
东部地段粗粒斜长角闪岩(02XW-04b)																						
C1.1	2.14	207	132	0.635	12.9	443.1	8.6	439.81	77.31	423	171	446	27	−5	0.0223	6.0	0.0553	7.7	0.54	7.9	0.0711	2.0
C2.1	1.20	401	448	1.118	25.0	445.5	8.2	430.88	46.06	353	96	437	12	−26	0.0219	2.7	0.0536	4.2	0.53	4.6	0.0716	1.9
C3.1	2.66	183	120	0.656	11.9	456.8	9.0	421.80	92.23	235	214	449	30	−95	0.0225	6.7	0.0509	9.3	0.51	9.5	0.0734	2.0
C4.1	1.11	316	186	0.590	20.2	457.5	8.4	443.85	48.64	374	102	448	18	−23	0.0224	4.0	0.0541	4.5	0.55	4.9	0.0736	1.9
C5.1	1.25	299	227	0.761	19.2	459.5	8.7	441.34	48.12	348	100	444	16	−32	0.0222	3.6	0.0534	4.4	0.54	4.9	0.0739	2.0
C6.1	1.50	195	120	0.617	12.7	464.3	9.2	485.70	87.78	588	191	467	34	21	0.0234	7.3	0.0596	8.8	0.61	9.0	0.0747	2.1
C7.1	1.03	245	161	0.656	15.5	453.8	10.6	452.30	49.56	445	97	454	18	−2	0.0227	4.0	0.0558	4.4	0.56	5.0	0.0729	2.4
C8.1	0.67	312	233	0.748	20.1	462.7	8.5	459.84	42.16	445	84	461	14	−4	0.0231	3.1	0.0558	3.8	0.57	4.2	0.0744	1.9
C9.1	2.82	180	140	0.776	11.0	429.7	8.6	398.16	98.94	219	232	400	24	−96	0.0200	6.1	0.0505	10.0	0.48	10.2	0.0689	2.1
C10.1	1.44	241	163	0.678	14.8	440.0	8.4	430.60	61.12	381	132	428	18	−16	0.0214	4.2	0.0542	5.9	0.53	6.2	0.0706	2.0
C11.1	3.81	114	81	0.707	6.9	422.6	9.7	335.77	196.0	−230	533	364	45	284	0.0182	12.3	0.0419	21.2	0.39	21.3	0.0678	2.4
C12.1	1.45	204	167	0.818	13.2	462.5	10.2	458.68	69.64	440	150	464	20	−5	0.0232	4.2	0.0557	6.7	0.57	7.1	0.0744	2.3
C13.1	0.82	353	298	0.843	22.9	464.6	8.8	461.59	39.60	446	77	449	13	−4	0.0224	3.0	0.0559	3.5	0.58	4.0	0.0747	2.0
西部地段中粒斜长角闪岩(02XW-20a)																						
F1.1	1.21	429	313	0.730	26.4	440.6	12.7	444.89	65.72	467	133	454	23	6	0.0227	5.1	0.0564	6.0	0.55	6.7	0.0707	3.0
F2.1	1.28	610	587	0.962	38.9	456.2	13.0	440.35	66.47	358	137	457	20	−27	0.0228	4.3	0.0537	6.1	0.54	6.8	0.0733	2.9
F3.1	0.47	415	76	0.183	53.7	900.8	25.0	921.91	38.24	973	49	996	76	7	0.0505	7.7	0.0715	2.4	1.48	3.8	0.1500	3.0
F4.1	6.07	626	560	0.895	42.1	457.7	13.2	501.52	83.81	707	172	484	31	35	0.0242	6.4	0.0630	8.1	0.64	8.6	0.0736	3.0
F5.1	0.67	501	503	1.003	31.7	455.7	13.0	446.14	59.39	397	118	461	18	−15	0.0231	3.8	0.0546	5.3	0.55	6.0	0.0732	2.9
F6.1	3.46	609	637	1.046	36.9	424.6	12.3	442.07	88.77	534	189	379	20	21	0.0189	5.2	0.0581	8.6	0.55	9.1	0.0681	3.0
F7.1	0.75	529	474	0.896	34.4	467.2	13.3	467.34	46.64	468	81	478	17	0	0.0240	3.5	0.0564	3.7	0.58	4.7	0.0752	2.9
F8.1	0.97	509	366	0.720	32.1	452.8	13.4	432.18	63.96	324	130	461	23	−40	0.0231	4.9	0.0529	5.7	0.53	6.5	0.0728	3.1
F9.1	2.02	387	303	0.782	23.9	439.2	12.9	496.63	74.89	771	148	472	26	43	0.0236	5.6	0.0649	7.0	0.63	7.7	0.0705	3.0
F10.1	0.84	500	359	0.716	30.3	435.0	12.4	448.40	65.91	518	132	450	17	16	0.0225	3.8	0.0577	6.0	0.56	6.7	0.0698	2.9
F11.1	0.87	492	371	0.753	31.4	457.6	13.1	453.80	70.27	435	145	459	23	−5	0.0230	5.0	0.0556	6.5	0.56	7.2	0.0736	3.0
F12.1	0.87	553	481	0.870	35.4	459.3	13.0	451.76	64.76	414	132	459	25	−11	0.0230	5.5	0.0550	5.9	0.56	6.6	0.0738	2.9
F13.1	2.82	335	247	0.737	21.1	443.2	12.9	416.24	122.1	269	285	434	29	−64	0.0217	6.7	0.0516	12.4	0.51	12.8	0.0712	3.0
F14.1	0.74	434	281	0.648	26.9	446.1	12.7	450.47	54.43	473	103	461	23	6	0.0231	5.1	0.0565	4.7	0.56	5.5	0.0716	2.9
F15.1	0.99	484	392	0.809	30.6	454.0	13.1	447.76	82.41	416	177	458	24	−9	0.0229	5.2	0.0551	7.9	0.55	8.5	0.0730	3.0
F16.1	0.76	512	452	0.883	32.7	458.7	13.2	483.69	65.90	604	130	479	23	24	0.0240	4.8	0.0600	6.0	0.61	6.7	0.0738	3.0

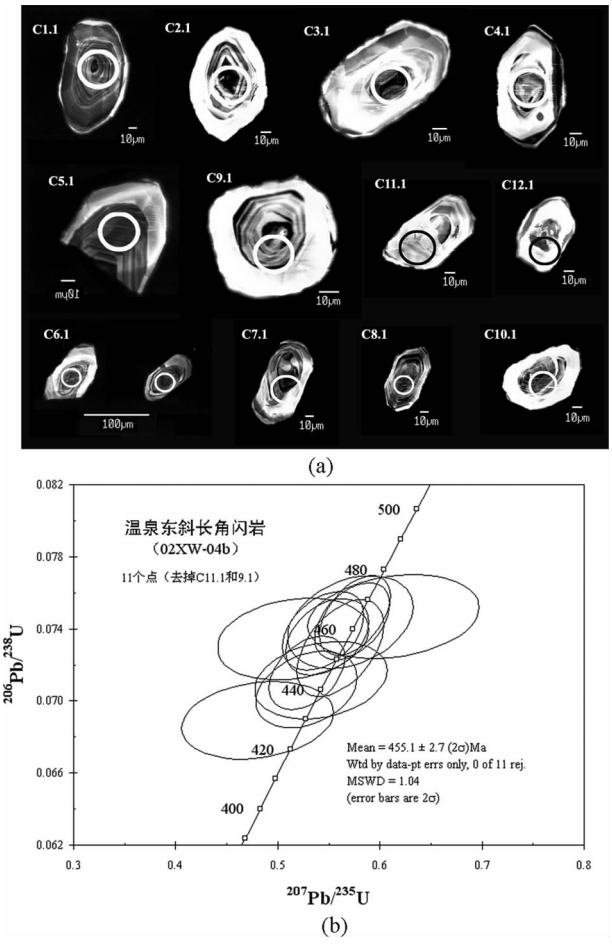

图 3 温泉东部粗粒斜长角闪岩锆石(02XW-4b)的阴极发光图像(a)和 U-Pb 年龄谐和图(b)

图像中划出的圆圈只是示意性的测定部位,并不代表测定时斑点大小的范围

Fig. 3 Cathodoluminescence images(a) and U-Pb concordia (b) for zircons of coarse amphibolite in the eastern section of the Wenquan

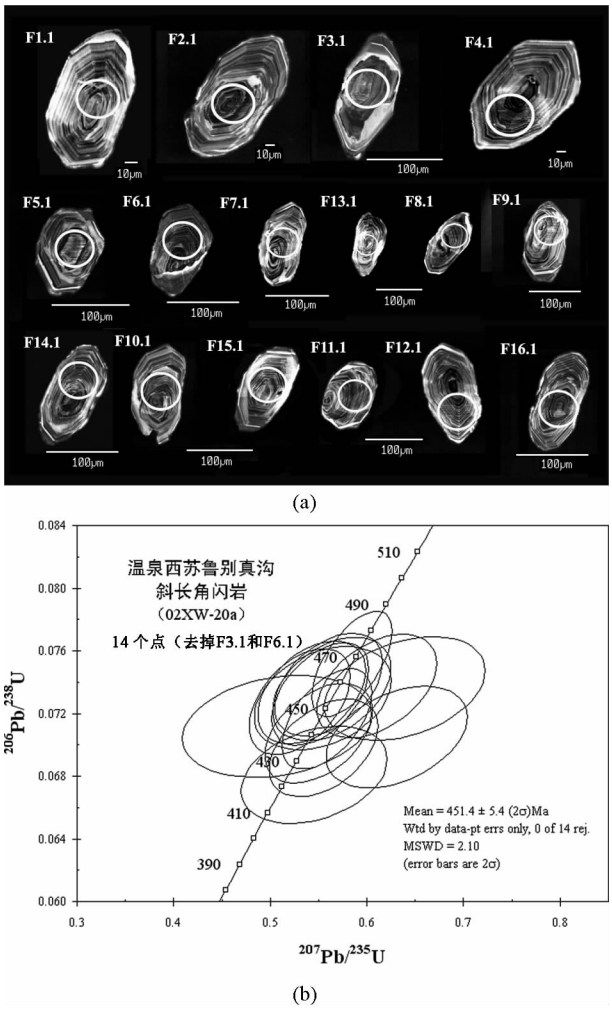

图 4 温泉西部粗粒斜长角闪岩锆石(02XW-20a)的阴极发光图像(a)和 U-Pb 年龄谐和图(b)

图像中划出的圆圈只是示意性测定部位,并不代表测定时斑点大小的范围

Fig. 4 Cathodoluminescence images(a) and U-Pb concordia (b) for zircons of the amphibolite in the western section from the Wenquan

斜长角闪岩,定年锆石的寄主岩石具有亚碱性岩石特征,其岩石化学成分为:SiO_2 - 61.16%;Al_2O_3 - 17.03%;TiO_2 - 0.77%,MgO - 2.28%,$Fe_2O_3^T$ - 5.92%,CaO - 5.43%,Na_2O+K_2O - 6.75%,且 $Na_2O > K_2O$(表 1)。

锆石为淡褐红色、透明、具双椎柱状晶体,{100}+{111}或{110}+{111}聚形,个别具{311}晶面。晶体大小不一,长短轴之比为 2:1。研究中测定了 16 个锆石晶体,在其阴极发光图像(图 4a)中环带结构都很清晰,没有明显的增生边,具有结晶锆石的特征,其锆石的阴极发光图像比东部粗粒斜长角闪岩中锆石较暗。图 4a 中示意性标出测定点的大致部位,6 个测点(F1.1, F2.1, F3.1, F5.1, F13.1, F16.1)在锆石晶体的中心部位,其余测点均在锆石中心外的结晶环带上。

表 2 和图 4b 为中粒斜长角闪岩(02XW-20a)16 个锆石晶体的单次测定结果。锆石的 U、Th 含量较东部粗粒斜长角闪岩中高,U 含量在 335×10^{-6} ~ 626×10^{-6},Th/U 比值在 0.648 ~ 1.046 与东部锆石大体相同。10 个测点的普通铅含量小于和近于 1%,有 4 个测点在 1% ~ 2%,只有测点 F4.1(6.1%)和 F6.1(3.5%)普通铅含量较高。16 个测点中,只在一个锆石的核部(F3.1)得到古老年龄,15 个锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄在 467 ~ 425Ma 之间,单个测点年龄与测点在锆石中的位置没有明显的关系,数据点均分布在谐和曲线附近(图 4b),其中 14 个测点的年龄集中在 467 ~ 435Ma 之间,只有 F6.1 测点的年龄明显偏低(424.6Ma)。去掉该点后,计算得到 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值为 451.4 ± 5.4 (2σ) Ma(MSWD = 2.10)为该岩体的形成年龄,与温泉地区东部

粗粒斜长角闪岩体年龄一致,也形成于早古生代晚奥陶世。

锆石(F3.1)的核、幔结构明显,并有比较薄的增生边。该晶体的核部(F3.1)测点给出$^{206}Pb/^{238}U$、$^{207}Pb/^{235}U$和$^{207}Pb/^{206}Pb$各组比值的表面年龄分别为900±25Ma,922±38Ma,973±49Ma。与之可以对比是,在西南天山早古生代库勒湖蛇绿岩的辉长岩(425±8Ma)中有7个锆石的$^{206}Pb/^{238}U$平均年龄为918±72Ma(龙灵利等,2006)。这个年龄正好与西天山基底岩浆岩形成年龄大体一致(胡霭琴等,2006),都反映了在早古生代的岩浆活动中带入了古老基底物质中的捕获晶。测点F6.1的年龄424.6Ma也代表后期地质热事件的时间。

5 讨论:对研究天山构造演化的意义

温泉古老地块中广泛发育的灰色中-粗粒斜长角闪岩。应用高精度锆石SHRIMP U-Pb定年,确定了出露在东、西地段的粗、中粒斜长角闪岩的形成年龄为455.1±2.7(2σ)Ma和451.4±5.4(2σ)Ma。根据国际地层年表中给出时间界限,它们应该属于早古生代晚奥陶世(460.9±1.6Ma~443.7±1.5Ma)时期形成的岩浆岩。

温泉早古生代斜长角闪岩的年龄与准噶尔和天山早古生代蛇绿岩的形成年龄相对应(Kwon *et al.*, 1989;肖序常等,1992;张弛和黄萱,1992;肖文交等,2006),也与天山造山带中一些早古生代花岗岩类岩体具有同期性。比如:西南天山侵入于巴音布鲁克群中的石英闪长岩体446.8±1.2Ma(徐学义等,2006),巴音布鲁克西南的艾尔宾山花岗闪长岩为442±7Ma(胡霭琴等,2006),库尔勒—野云沟以北的霍拉山一带的艾西买依根糜棱质花岗岩475.2±2.6Ma,库米什镇以北阿克塔西附近的灰白色片麻状花岗岩为457.5±1.8Ma,拉尔墩达坂钾长花岗岩为457±27Ma(韩宝福等,2004);中天山天格尔山脉乌库公路糜棱岩化花岗岩441.6±3.8Ma(朱永峰和宋彪,2006),巴伦台以南的公路旁灰色黑云母花岗岩456.2±0.6Ma~449.6±1.1Ma(韩宝福等,2004);东天山哈尔里克山南坡塔水河一带的钾长花岗岩为462±9Ma、花岗闪长岩为447±11Ma、石英闪长岩为448±7Ma(曹福根等,2006),东天山天湖东片麻状花岗岩为466.5±9.8Ma(胡霭琴等,2007),河西站附近红柳河地区闪长岩体为441±2Ma,二长花岗岩为441±3Ma(李伍平等,2001)等。

多数研究者基于花岗岩类岩石的元素地球化学和Nd-Sr同位素组成特征,认为这些早古生代晚奥陶世的花岗岩具有岛弧钙碱性岩石地球化学特征,与天山古生代洋盆俯冲事件相关,而韩宝福等(2004)持有不同的观点。

温泉早古生代斜长角闪岩在温泉古老地块中广泛出露,为一系列由玄武质—粗面安山质的变质岩。它们的REE分布曲线,微量元素蛛网图中具有富集大离子亲石元素,以及明显的Nb、P、Ti的负异常等,显示了岛弧钙碱性岩浆岩的特征。偏高的Sr同位素初始值(I_{Sr} = 0.7060~0.7084),小的正$\varepsilon_{Nd}(t)$值至不大的负$\varepsilon_{Nd}(t)$值(+1.1~-1.7),偏老的Nd模式年龄(t_{DM} = 1.4~1.1Ga),以及早古生代斜长角闪岩中含有元古宙基底物质的锆石捕获晶等,均说明它们在不同程度上受到大陆基底古老岩石的污染。岩石地球化学特征说明,温泉早古生代斜长角闪岩可能形成于与俯冲有关的岛弧或活动大陆边缘的构造环境。该研究结果为研究晚奥陶世时期古亚洲洋的消减机制提供了新的证据。

目前仍存在着关于"中天山北缘早古生代大洋"在奥陶纪时消减方向以及中天山岛弧形成机制的争议。诸如,马瑞士等(1993)认为中天山早古生代岛弧构造带是在寒武纪后古准噶尔—天山大洋向塔里木板块北缘的俯冲、弧后扩张而形成的。舒良树等(2000)进一步指出,介于吐哈陆块和塔里木大陆之间的洋壳从晚寒武世或早奥陶世开始沿现在的中天山北缘带向南俯冲,在古塔里木大陆北缘变质基底上形成奥陶—志留纪岩浆—火山弧,到志留纪发生弧后微型扩张形成库米什-红柳河边缘海,构成早古生代活动陆缘。朱宝清等(2002)则提出托克逊县干沟一带出露的早古生代蛇绿混杂岩和志留纪前陆盆地沉积,其时空配置表明,中天山北缘早古生代大洋在奥陶纪曾发生大规模的向北消减等。本研究结果可能为中天山北缘早古生代大洋向南消减到中天山地块之下,并形成中天山岩浆弧(舒良树等,2000)提供了新的年代学和地球化学证据。

随着中亚造山带构造演化模式研究的进展,近年来一些学者认为新疆北部地区广泛地分布着中寒武—二叠纪与俯冲有关的地质事件的记录;安底斯型岩浆弧、岛弧、增生楔、蛇绿岩断片和微大陆的分布显示出一种多岛海的古地理特征,形成一个巨大的增生活动大陆边缘系列(李锦轶和肖序常,1999;Windley *et al.*, 2007;Xiao *et al.*, 2008)。西天山是一个巨大的增生活动大陆边缘系列中的一部分,温泉早古生代斜长角闪岩年代学和地球化学特征的研究结果也对研究中亚造山带的岛弧增生活动提供了新的证据。

致谢 本研究中锆石U,Th-Pb SHRIMP分析中得到北京离子探针分析中心刘敦一、宋彪等大力支持与帮助;元素和同位素分析得到中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室梁细荣、涂湘林、刘颖、胡光黔、曾文等同事热情帮助和合作,在此一并致以衷心的谢意。

References

BGMRX (Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region). 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Geological Memoirs, Series 1, No. 32. Beijing: Geological Publishing House, 6-206 (in Chinese)

Cao FG, Tu QJ, Zhang XM, Ren Y, Li SL and Dong FR. 2006. Preliminary determination of the Early Paleozoic magmatic arc in the Karlik Mountains, East Tianshan, Xinjiang, China: Evidence from zircon SHRIMP U-Pb dating of granite bodies in the

Tashuihe area. Geological Bulletin of China, 25(8):923 – 927 (in Chinese with English abstract)

Compston W, Williams IS, Kirschvink JL, Zhang ZC and Ma GG. 1992. Zircon U-Pb ages of Early Cambrian time scale. J. Geol. Soc., 149: 171 – 184

Cox KG, Bell JD and Pankhurst RJ. 1979. The interpretation of igneous rocks. George, Allan and Unwin, London

Han BF, He GQ, Wu TR and Li HM. 2004. Zircon U-Pb Dating and geochemical features of early Paleozoic granites from Tianshan, Xinjiang: Implications for tectonic evolution. Xinjiang Geology, 22 (1): 4 – 11 (in Chinese with English abstract)

Hu AQ, Jahn BM, Zhang GX, Zhang QF and Chen YB. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd-Sr isotopic evidence. Part I: isotopic characterisation of basement rocks. Tectonophysics, 328(1 – 2): 15 – 51

Hu AQ, Zhang GX and Chen YB *et al*. 2006. Isopope Geochronology and Geochemistry for major geological events of continental crustal evolution of Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)

Hu AQ, Wang ZG and Tu GC *et al*. 1997. Geological evolution and diagenic and metallogenetic regularrity in northern Xinjiang. Beijing: Science Press, 9 – 105 (in Chinese)

Hu AQ, Wei GJ, Zhang JB, Deng WF and Chen LL. 2007. SHRIMP U-Pb age for zircons of East Tianhu granitic gneiss and tectonic evolution significance from the eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, China. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 1796 – 1802 (in Chinese with English abstract)

Kwon ST, Tilton GR and Coleman RG. 1989. Isotopic studies bearing on the tectonics of the West Junggar region, Xinjiang, China. Tectonics, 8: 719 – 727

Li JY and Xiao XC. 1999. Brief reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW China. Scientia Geologica sinica, 34 (4): 405 – 419 (in Chinese with English abstract)

Li WP, Wang T, Li JB, Kang X, Wang FS, Han QJ and Ma ZP. 2001. The U-Pb age of zircon from Late Caledonian granitoids in Hongliuhe area, East Tianshan Mountains, Northwest China and its geological implications. Acta Geoscientia Sinica, 22 (3): 231 – 235 (in Chinese with English abstract)

Long LL, Gao J, Xiong XM and Qian Q. 2006. The geochemical characteristics and the age of the Kule Lake ophiolite in the southern Tianshan. Acta Petrologica Sinica. 22(1):65 – 73 (in Chinese with English abstract)

Ludwig KR. 2003. ISOPLOT3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 4, 70

Ma RS, Wang CY and Ye SF. 1993. Tectonic framework and crustal evolution of eastern Tianshan mountains. Nanjing: House of Nanjing University, 32 – 47 (in Chinese with English abstract)

Masuda A, Nakamura N and Tanaka T. 1973. Fine structures of mutually normalized rare-earth patterns of chondrites. Geochim. Cosmochim. Acta., 37: 239 – 248

Pearce JA and Gale GH. 1977. Identification of ore-deposition environment from trace element geochemistry of associated igneous host rocks. Geol. Soc. Spec. Publ., 7: 14 – 24

Shu LS, Lu HX, Charvet J, Lurent CS and Yin DH. 2000. A study of isotopic dating and geochemistry of granulites in the eastern Tianshan belt. Journal of Nanjing University (Nature Sciences), 36(6): 718 – 727 (in Chinese with English abstract)

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saundersm AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in Ocean Basins. Geol. Soc. London. Spec. Pub., 42, 313 – 345

Willians I S and Claesson S. 1987. Isotope evidence for the Precambrian province and Caledonian metamorphism of high grade paragneiss from the Save Nappes, Scandinavian Caledonides, I. Ion microprobe zircon U-Th-Pb. Contrib. Mineral. Petrol., 97: 205 – 217

Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20: 325 – 343

Windley BF, Alexeiev D, Xiao WJ, Kr ner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. Journal of the Geological Society, London, 164: 31 – 47

Wood DA. 1980. The application of a Th-Hf-Ti diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiry volcanic province. Earth Planet. Sci. Lett., 50: 11 – 30

Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Sun M, Lin S, Chen HL, Li ZL, Li JL and Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 32: 102 – 117

Xiao WJ, Windley BF, Yan QR, Qin KZ, Chen HL, Yan C, Sun M, Li JL and Sun S. 2006. SHRIMP zircon age of the Aermantai ophiolite in the North Xinjiang area, China and its tectonic implications. Geologica Sinica, 80 (1): 33 – 37 (in Chinese with English abstract)

Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BQ, Li JY and Zhou M. 1992. Tectonics in northern Xinjiang and it's neighbouring areas. Beijing: Geological Publishing House, 26 (in Chinese with English abstract)

Xu XY, Ma ZP, Xia ZH, Xia LQ, Li XM and Wang LS. 2006. TIMS U-Pb isotopic dating and geochemical characteristics of Paleozoic granitic rocks from the middle-western section of Tianshan. Nothwestern Geology, 39(1): 51 – 75 (in Chinese with English abstract)

Zhang C and Huang X. 1992. The age and tectonic settings of ophiolites in west Junggar, Xinjiang. Geological Review, 38: 509 – 524 (in Chinese with English abstract)

Zhu BQ, Feng YM, Yang JL and Zhang KC. 2002. Discovery of ophiolitic mélange and Silurian foreland basin at Gangou of Tokexun, Xinjiang and their tectonic significance. Xinjiang Geology, 20(4): 326 – 330 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF and Song B. 2006. Petrology and SHRIMP chronology of mylonitized Tianger granite, Xinjiang: Also about the dating on hydrothermal zircon rim in granite. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 135 – 144 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

曹福根,涂其军,张晓梅,任燕,李嵩龄,董富荣. 2006. 哈尔里克山早古生代岩浆弧的初步确定——来自塔水河一带花岗质岩体锆石 SHRIMP U-Pb 测年的证据. 地质通报,25(8): 923 – 927

韩宝福,何国琦,吴泰然,李惠民. 2004. 天山早古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义. 新疆地质,22(1): 4 – 11

胡霭琴, 王中刚, 涂光炽等. 1997. 新疆北部地质演化及其成岩成矿规律. 北京:科学出版社,9 – 105

胡霭琴,韦刚健,张积斌,邓文峰,陈林丽. 2007. 天山东段天湖东片麻状花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和构造演化意义. 岩石学报,23(8):1796 – 1802

胡霭琴,张国新,陈义兵等. 2006. 中国新疆地壳演化主要地质事件年代学和地球化学. 北京:地质出版社

李锦轶,肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述. 地质科学,34(4):405 – 419

李伍平,王涛,李金宝,康旭,王福生,韩庆军,马忠平. 2001. 东天山红柳河地区晚加里东期花岗岩类岩石锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地球学报,22(3):231 – 235

龙灵利,高俊,熊贤明,钱青. 2006. 南天山库勒湖蛇绿岩地球化学特征及其年龄. 岩石学报,22(1):65 – 73

马瑞士,王赐银,叶尚夫等. 1993. 东天山构造格架及地壳演化. 南京:南京大学出版社,32 – 47

舒良树,卢华复,Charvet J, Lurent CS, 印栋浩. 2000. 天山东部麻粒岩定年与地球化学研究. 南京大学学报(自然科学), 36(6): 718-727

肖文交,Windley BF,阎全人,秦克章,陈汉林,袁超,孙敏,李继亮,孙枢. 2006. 北疆地区阿尔曼太蛇绿岩锆石 SHRIMP 年龄及其大地构造意义. 地质学报,80(1):33-37

肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清,李铁轶,赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京:地质出版社,1-84

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,659-667

徐学义,马中平,夏祖春,夏林圻,李向民,王立社. 2006. 天山中西段古生代花岗岩 TIMS 法锆石 U-Pb 同位素定年及岩石地球化学特征研究. 西北地质,39(1):51-75

张弛,黄萱. 1992. 新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨. 地质论评, 38(8): 509-524

朱宝清,冯益民,杨军录,张开春. 2002. 新疆中天山干沟一带蛇绿混杂岩和志留纪前陆盆地的发现及其意义. 20(4): 326-330

朱永峰,宋彪. 2006. 新疆天格尔糜棱岩化花岗岩的岩石学及其 SHRIMP 年代学研究:兼论花岗岩中热液锆石边的定年. 岩石学报,22(1):135-144