北阿尔金恰什坎萨依花岗闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义

戚学祥 李海兵 吴才来 杨经绥 张建新 孟繁聪 史仁灯 陈松永

(中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室, 北京 100037. E-mail: qixuexiang@ccsd.org.cn)

摘要 恰什坎萨依花岗闪长岩虽然经历了强烈的片麻岩化作用, 但其铝饱和指数(A/CNK)为 0.81~0.99, $Na_2O/K_2O>1$, $TiO_2<1.0\%$, 轻稀土富集, 分馏程度高, 重稀土富集程度较低, 分馏系数小, Eu弱负异常或无异常, 微量元素Ba, Ti为负异常及在微量元素构造环境判别图解上样品点落在岛弧型花岗岩区等都展示出岛弧型花岗岩的典型特征. 阴极发光图像反映锆石内部存在清晰的韵律生长纹, 无残留锆石晶核和新生长的环边结构, U, Th含量分别变化于 574~870 和 279~556 μg/g之间, Th/U值在 0.52~0.68 之间, 显示出岩浆锆石性质. 锆石SHRIMP U-Pb定年结果为 481.5±5.3 Ma, 代表花岗闪长岩侵位时代, 与北祁连岛弧火山岩带的形成时代一致, 证实了该区存在早古生代岛弧岩浆活动.

关键词 北阿尔金 花岗闪长岩 岛弧 锆石 **SHRIMP U-Pb** 定年

近年来, 人们对北阿尔金近东西向红柳沟-拉配泉俯冲碰撞杂岩带的研究日趋深入, 其内的深水沉积、基性火山岩[1]、蛇绿岩带[2~7]等被相继发现. 研究表明, 这些岩石是早古生代洋壳俯冲过程中在海沟及其附近堆积形成的一套混杂岩. 其中, 枕状玄武岩的Sm-Nd等时线年龄为 508~524 Ma [1)]. 折返至混杂岩中的高压变质泥岩[8~10]内多硅白云母的Ar/Ar热年代学数据为 574.7±2.5 Ma[8]. 这些都与北祁连俯冲碰撞杂岩带的类似, 是北祁连俯冲碰撞杂岩带的西延部分[9,11]. 陈宣华等人[12,13]对阿尔金北缘早古生代花岗岩进行了研究, 认为它们可能形成于岛弧或大陆弧环境, 但缺少必要的地球化学数据和岩浆活动的年代. 恰什坎萨依花岗闪长岩体分布于红柳沟-拉配泉俯冲碰撞杂岩带西北缘喀孜萨依-山沙界花岗岩带的西部和南部边缘, 其形成时代及其形成环境尚未有人进行过研究. 鉴于此, 本文选择该岩体进行岩石学及锆石的SHRIMP U-Pb定年研究, 为阿尔金造山带构造格局及其演化提供岩石学证据, 并探讨该区是否存在早古生代岛弧岩浆作用.

1 俯冲碰撞杂岩带地质背景

红柳沟-拉配泉俯冲碰撞杂岩带位于阿尔金造山带北缘, 构成北阿尔金近东西向构造带的重要组成部分, 北部为塔里木地块太古宙变质基底, 南部为前寒武纪阿尔金群变质岩, 其间分别以边界性断裂为界[14](图 1).

红柳沟-拉配泉俯冲碰撞杂岩带走向近东西, 宽约 20 km, 主要由蛇绿岩、具复理石特征的深海、半深海碎屑岩、碳酸盐岩和变质岩组成. 蛇绿岩主要由玄武岩、枕状玄武岩、细碧岩、凝灰岩、硅质岩及大量基性、超基性岩脉或岩墙组成, 具有过渡型洋中脊玄武岩性质, 并与洋岛玄武岩共生[4,7,9,15]. 变质岩主要为高压变质泥岩(兰片岩), 出露于俯冲增生楔杂岩中部贝克滩东侧, 呈薄层状或透镜状产出, 走向近东西, 南北宽 1~5 km, 东西长约 40 km, 与围岩呈断层接触, 主要矿物都发生不同程度的塑性变形, 如石英呈缎带状亚颗粒定向分布, 与多硅白云母、蓝晶石等片柱状矿物一起构成走向近东西, 向南陡倾的糜棱面理, 是陆壳物质俯冲到约 80 km深处形成的一套高压变质岩系[13,15]. 碳酸盐岩呈团块状或薄层状产出.

2 岩石样品及分析方法

花岗闪长岩体呈不规则的岩株产出, 被近东西向韧性剪切带切割, 具有一定程度的糜棱岩化和混合岩化. 岩体内片麻状构造和糜棱结构发育, 局部达到片麻岩或糜棱岩, 面理走向近东西, 向北陡倾. 与此同时, 恰什坎萨依花岗岩体边部穿插于花岗闪长岩体内, 顺片麻理或糜棱面理分布, 花岗岩体内亦可见近东西向分布的花岗闪长岩捕虏体. 花岗闪长岩主要由斜长石、钾长石和石英等浅色矿物和角闪石等

1) 刘良. 阿尔金高压变质岩与蛇绿岩及其大地构造意义. 中国科学院地质研究所博士学位论文, 1999. 1~71

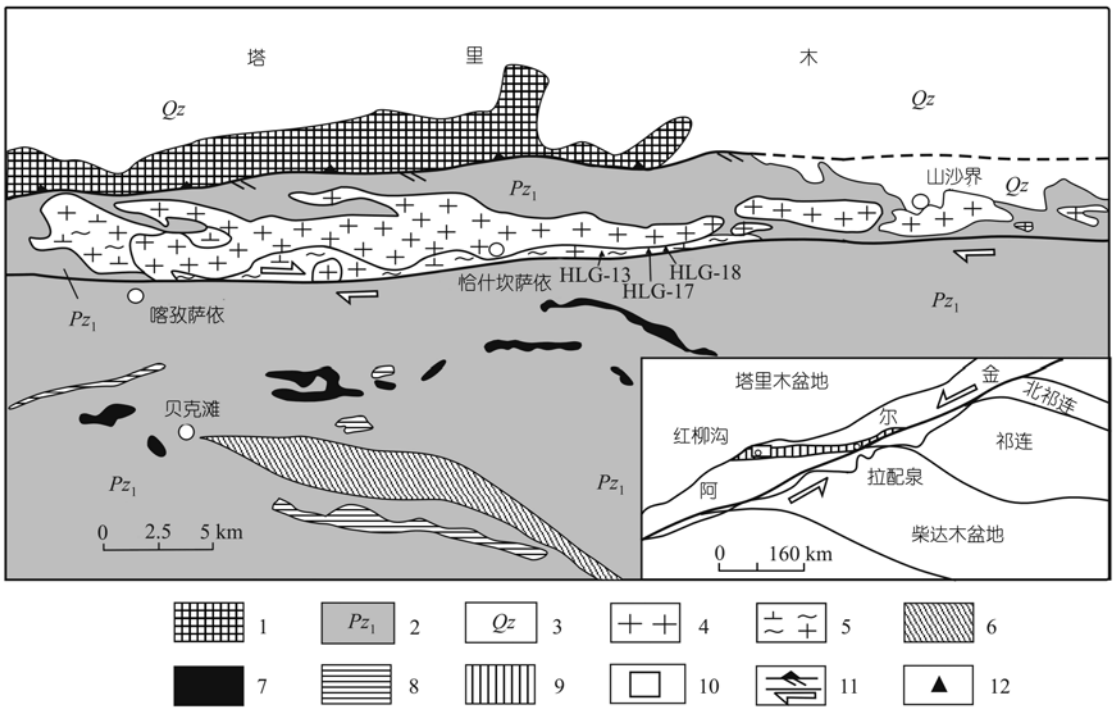


图 1 恰什坎萨依花岗闪长岩地质略图(据巴什考供幅地质图(1/200000)修编)

1. 太古宙变质岩; 2. 早古生代俯冲碰撞杂岩; 3. 第四纪沉积物; 4. 花岗岩; 5. 片麻状花岗闪长岩; 6. 高压变质泥岩; 7. 超基性; 8. 辉长岩; 9. 红柳沟-拉配泉俯冲碰撞杂岩带; 10. 工作区; 11. 斜向逆冲断层和平移断层; 12. 采样位置

暗色矿物组成, 副矿物有榍石、磁铁矿, 偶见磷灰石和锆石. 斜长石呈他形~半自形板柱状, 粒度较均匀, 含量约 47%, 绢云母化较强; 钾长石主要为格子双晶发育的微斜长石, 含量约 10%, 绢云母化明显; 石英呈他形粒状分布于长石颗粒间, 部分呈团块状产出, 波状消光, 含量约 15%; 角闪石呈他形~半自形柱状, 含量约 25%, 相对集中定向分布, 与浅色矿物相间, 构成面理; 副矿物呈星点状分布, 含量约 3%.

锆石分选在河北省地质调查研究院完成. 样品经常规的粉碎、磁选和重选, 分选出纯度较高的锆石, 然后在双目显微镜下经人工挑选出纯度在 99%以上的锆石. 用环氧树脂将高纯度的锆石和标样固定成圆饼状, 用不同型号砂纸和磨料将锆石磨去一半并抛光. 然后在美国斯坦福大学离子探针开放实验室对抛光好的锆石进行阴极发光成像观察, 查明锆石内部生长层的分布和结构, 并在斯坦福大学离子探针开放实验室的高分辨率高灵敏度离子探针 SHRIMP Ⅱ仪器上进行锆石 U-Pb 同位素定年测试. 样品的 Pb/U 值是根据测量时标样的 UO/U-Pb/U 关系和样品的 UO/U 来标定的, 样品中的 U, Th 和 Pb 含量是根据标样的 Zr, U, Th 含量和测定的 Zr, U 和 Pb 值来校正的. 测定的标样为 TEMORA 锆石, 每测定 3 个点后插入一次标样测定, 以便及时校正. 岩石的常量元素、微量元素和稀土元素分析在中国地质科学院测试中心完成. 其中, 常量元素是用 X 射线荧光光谱仪测定(XRF), 并用等离子光谱法进行验正; 微量元素和稀土元素采用等离子质谱仪测定(ICP-MS).

3 锆石特征及 SHRIMP U-Pb 定年结果

锆石大部分呈短柱状或次圆状, 粒度在 0.05~0.2 mm之间, 长宽比 1.5:1, 个别可达 2:1, 晶形为半自形~自形, 晶面整洁光滑. 锆石阴极发光图像显示锆石内部韵律环带发育,不存在继承性锆石(图 2). 锆石U, Th 含量分别变化于 574~870 和 279～556 μg/g之间, Th/U值在 0.52~0.68 之间(表 1), 大于 0.5, 且锆石的 Th, U值之间具有一定程度的正相关性. 由此可见, 本样品中的锆石无疑为岩浆成因[16~19].

测定的 12 颗锆石 SHRIMP U-Pb 年龄变化于 475.1±1.9~492.3±1.8 Ma 之间(表 1). 在谐和图上, 所有样品点相对集中分布于一致线 481 Ma 附近区域

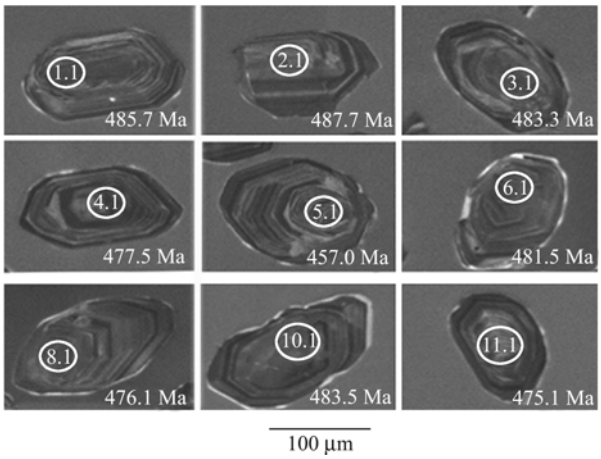


图 2　锆石阴极发光图像

(图 3(a)). 样品点数据统计计算获得平均年龄值为 481.5±5.3 Ma, 置信度为 95%, MSWD 为 0.32(图 3(b)). 这组年龄数据点在谐和图上相对集中分布, 可信度高, 是锆石结晶年龄或岩浆侵位时代的具体展现.

4　讨论与结论

新疆地质局[20]在 1/200000 地质图上, 将俯冲碰撞杂岩带内的火山岩、沉积岩及变质岩定位于晚元古代, 将恰什坎萨依花岗闪长岩和花岗岩确定为晚元古代中期第二次和第三次侵入的产物, 并认为该区岩浆活动主要在晚元古代. 然而, 俯冲碰撞杂岩带内玄武岩Sm-Nd等时线年龄为 508~524 Ma[9], 恰什坎萨依花岗岩的形成时代为 402.7±3.1 Ma(另文发表). 恰什坎萨依花岗闪长岩侵位于俯冲碰撞杂岩中, 后又被花岗岩穿插, 其侵位时代应介于二者之间. 恰什坎萨依花岗闪长岩虽然经历了片麻岩化变形变质, 但锆石阴极发光图像清晰地反映锆石内部韵律环带结构, 不存在新生环边以及高 Th, U 含量和 Th/U 比值等都清晰地展示出锆石的岩浆成因, 后期的变形变质作用并未对锆石结构和组成产生实质性的影响. 因此, 锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄 481.5±5.3 Ma 代表了花岗闪长岩的侵位时代, 说明在这一时期发生过一次重要的岩浆活动.

化学分析结果(表 2)显示恰什坎萨依花岗闪长岩常量元素中SiO_2含量在 58.12%~62.25%之间, Na_2O/K_2O远大于 1, 在K_2O-Na_2O图解上, 位于I型花岗岩区[21], Na_2O/CaO比值为 0.42~1.46, 在AR-SiO_2图解[22]上位于钙碱性岩区, Al_2O_3含量变化于 15.69%~ 18.07%之间, 铝饱和指数(A/CNK)<1.0, ANK>1.0, 在铝饱和指数图解[23]上位于准铝质花岗岩区. 总体展现出恰什坎萨依花岗闪长岩具有Na_2O高, K_2O低, A/CNK偏低的特性, 岩石类型为高钠钙碱性花岗闪长岩, 属 I 型, 其岩浆具有下地壳和上地幔岩石混合物的特性[24].

花岗闪长岩稀土元素丰度偏低, LREE / HREE变化于 6.25~20.73 之间(表 2), 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线向右陡倾斜(图 4(a)), δEu在 0.78~0.90 之间, 平均 0.86, 属轻度亏损型或无亏损型, $(La/Sm)_N$为 4.26~5.10, 平均 4.23, $(Gd/Yb)_N$小于 2.39, 反映岩石具有稀土总量较低, 轻稀土强烈富集, 分馏程度高, 重稀土相对亏损, 分馏程度较低及Eu轻度亏损的特

表 1　花岗闪长岩锆石SHRIMP U-Pb 定年数据[a)]

样品测试点	含量/μg · g^{-1}			Th/U	^{204}Pb/%	^{207}Pb*/^{206}Pb*	%	^{206}Pb*/^{238}U	%	^{207}Pb*/^{235}U	%	年龄/Ma	
	U	Th	^{206}Pb*									^{206}Pb*/^{238}U	1σ
HLG17-1	870	512	58.5	0.61	0.04	0.0569	1.2	0.0782	0.4	0.614	1.2	485.7	1.8
HLG17-2	574	279	38.8	0.50	0.04	0.0582	1.5	0.0786	0.5	0.631	1.6	487.8	2.4
HLG17-3	680	343	45.5	0.52	0	0.0563	2.0	0.0779	0.4	0.605	2.0	483.8	2.0
HLG17-4	658	429	43.5	0.67	0.07	0.0561	1.4	0.0769	0.4	0.595	1.5	477.5	2.1
HLG17-5	865	444	56.9	0.53	0.08	0.0565	1.2	0.0765	0.4	0.596	1.2	475.0	1.8
HLG17-6	800	441	53.3	0.57	0.04	0.0555	2.5	0.0776	0.4	0.594	2.5	481.6	1.8
HLG17-7	845	556	57.6	0.68	0.02	0.0563	1.1	0.0794	0.4	0.616	1.2	492.4	1.8
HLG17-8	761	473	50.1	0.64	0.04	0.0560	1.2	0.0767	0.4	0.592	1.3	476.1	1.8
HLG17-9	624	316	41.1	0.52	0	0.0550	1.3	0.0766	0.5	0.581	1.4	475.9	2.4
HLG17-10	786	395	52.6	0.52	0.06	0.0568	1.2	0.0779	0.4	0.610	1.3	483.5	1.9
HLG17-11	738	416	48.5	0.58	0	0.0563	1.2	0.0765	0.4	0.593	1.2	475.1	1.9
HLG17-12	631	316	42.5	0.52	0.08	0.0569	1.3	0.0784	0.4	0.615	1.4	486.5	2.1

a) Pb* 为放射成因铅；年龄误差为±1σ

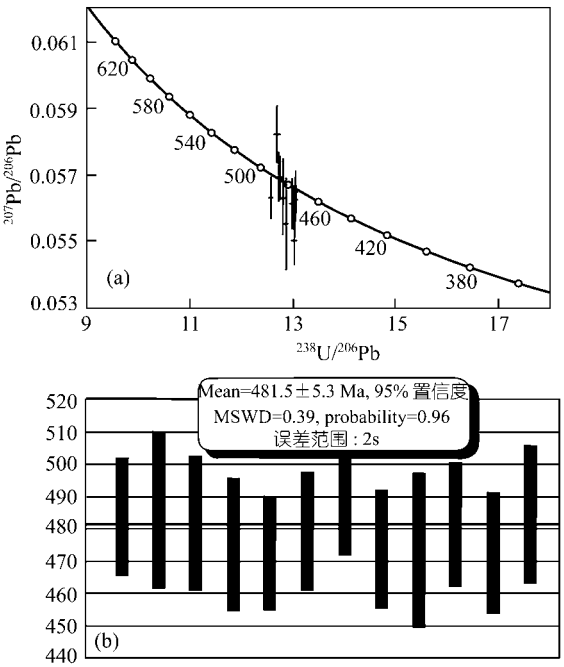


图 3 锆石 SHRIMP U-Pb 定年谐和图(a)及年龄直方图(b)

性，与岛弧区安山岩稀土配分型式[25]相似. 微量元素中，大离子亲石元素Sr, K, Rb, Ba, Th, Nb, Ce含量远高于MORB值, Ti, Y, Yb, Sc低于MORB值(表 2). 在MORB标准化的微量元素蛛网图上(图 4(b)), Ba, Ti具有明显的负异常，Th, Ce, Yb为正异常，Sr/Y和La/Yb值较高，Rb/Sr和Rb/Ba值偏低，尤其是TiO_2含量小于1.0%[24~26]等特征与来自于新西兰火山弧英安岩和流纹岩、科西嘉正常弧花岗岩[27,28]及北祁连岛弧钙碱性玄武岩[29]的微量元素分布特点相似，在Pearce等人[30]Rb-(Yb+Ta), Rb-(Y+Nb), Ta-Yb和Nb-Y微量元素构造环境判别图解上，所有的样品点均落在火山弧花岗岩区(图 5). 总体来看，恰什坎萨依花岗闪长岩的常量元素、稀土元素和微量元素特征都清晰的勾勒出典型的岛弧型岩浆岩性质[26,31,32].

红柳沟-拉配泉俯冲碰撞杂岩带内早古生代大洋玄武岩和洋岛玄武岩的存在表明该区在寒武纪为一洋盆. 随着洋壳向陆壳下俯冲，这些具洋壳性质的火山岩、深海沉积岩以及呈透镜状显示“外来岩块”特征的碎屑岩、灰岩等被刨刮下来形成俯冲增生杂岩，一部分物质俯冲到地下深处. 随着温度、压力的增大，俯冲到深部的物质脱掉水(气)等挥发份，这些挥发组分加入上覆地幔楔，并导致其发生部分熔融而形成玄武质岩浆，经分异作用或同化部分地壳物质而演化出花岗闪长岩岩浆[32~34]，这些岩浆沿着构造薄弱地带上升到地壳上部喷发或侵位，形成岛弧火山岩

表 2 恰什坎萨依花岗闪长岩地球化学分析

主要成分/%	HLG-13	HLG-17	HLG-18	1138[20]	稀土元素 /μg · g^{-1}	HLG-13	HLG-17	HLG-18	微量元素 /μg · g^{-1}	HLG-13	HLG-17	HLG-18
SiO_2	60.06	62.25	58.12	61.46	La	113	46.5	16.1	Sr	691	135	141
TiO_2	0.44	0.51	0.70	0.51	Ce	213	89.1	35.3	Rb	148	61.6	54.1
Al_2O_3	18.07	15.91	15.80	15.69	Pr	23.8	9.61	4.53	Ba	1165	551	259
Fe_2O_3	1.94	2.64	2.98	2.56	Nd	85.4	34.3	19.5	Th	57.8	22.8	8.1
FeO	3.66	2.71	4.01	4.18	Sm	13.8	5.74	4.14	Nb	22	21.8	9.86
MnO	0.18	0.14	0.14	0.15	Eu	2.9	1.37	1.17	Zr	422	135	141
MgO	1.80	2.24	4.09	3.25	Gd	8.59	4.80	3.81	Y	25.2	17.5	16.6
CaO	3.44	5.26	6.61	6.64	Tb	1.09	0.71	0.60	Sc	11.1	9.65	20.2
Na_2O	5.02	4.02	3.63	2.76	Dy	5.38	3.48	3.39	Ta	0.85	0.59	0.6
K_2O	3.37	1.89	1.36	0.92	Ho	0.93	0.70	0.66	V	95.2	119	212
P_2O_5	0.23	0.24	0.20	0.12	Er	2.7	2.15	2.01	Yb+Ta	3.22	2.61	2.47
H_2O+	1.02	1.46	1.40		Tm	0.37	0.29	0.29	Y+Nb	47.2	39.3	26.46
CO_2	0.50	0.31	0.31		Yb	2.37	2.02	1.87	Rb/Ba	0.13	0.11	0.21
总量	99.73	99.58	99.35	98.24	Lu	0.37	0.32	0.28	Sr/Y	27.42	7.71	8.49
Na_2O/CaO	1.46	0.76	0.55	0.42	ΣREE	473.70	201.09	93.65	La/Yb	47.68	23.02	8.61
MgO/TFeO	0.32	0.42	0.59	0.48	LREE/HREE	20.73	12.90	6.25	Rb/Sr	0.21	0.46	0.38
Al_2O_3/TiO_2	41.07	31.20	22.57	30.76	δEu	0.90	0.78	0.89				
ACNK	0.99	0.87	0.81	0.89	$(La/Sm)_N$	4.26	5.10	2.45				
ANK	1.52	1.84	2.12	2.83	$(Gd/Yb)_N$	2.39	1.92	1.64				

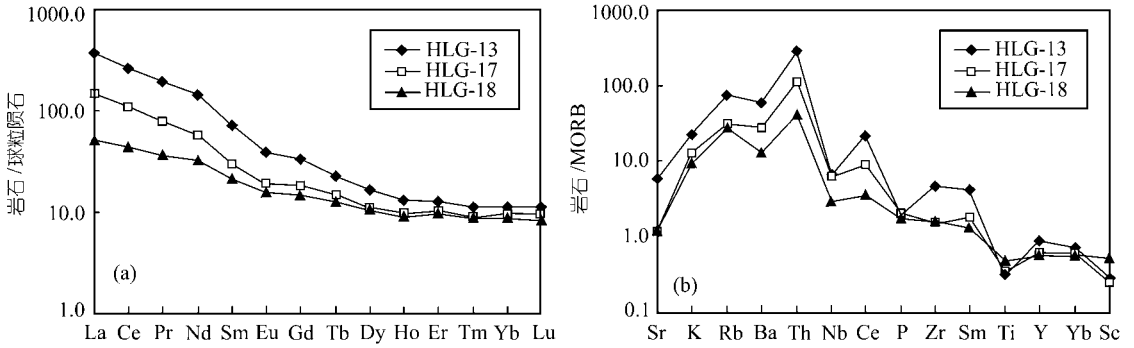


图 4　恰什坎萨依花岗闪长岩稀土配分型式(a)和微量元素蛛网图(b)

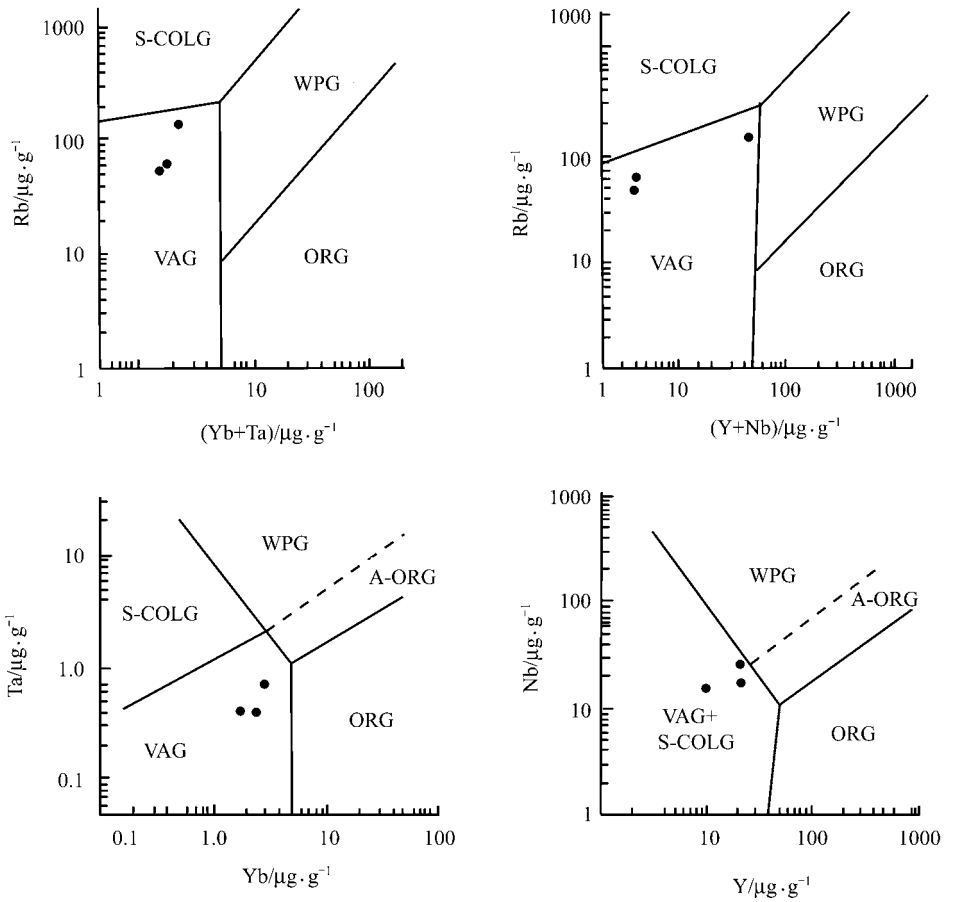


图 5　恰什坎萨依花岗闪长岩微量元素判别图解

VAG: 火山弧花岗岩; ORG: 洋脊花岗岩; WPG: 板内花岗岩; S-COLG: 同碰撞花岗岩

或侵入岩. 恰什坎萨依花岗闪长岩为高钠的 I 型岩浆岩, 形成于早奥陶纪的岛弧环境, 与北祁连岛弧型火山岩的地球化学特征一致, 其形成时代 481 Ma也在北祁连岛弧形成期内 495~445 Ma[29,35] 由此可以说明恰什坎萨依花岗闪长岩是红柳沟-拉配泉区洋壳闭合以前火山岛弧区岩浆活动的一个组成部分, 为该区岛弧带的存在提供了一个佐证. 在后期发生的弧-陆斜向碰撞并沿边界引发大规模走滑作用过程中,

分布于弧陆边界的岛弧型花岗闪长岩体发生变质变形, 形成片麻理构造或糜棱面理构造发育的花岗闪长岩.

致谢 在研究过程中, 许志琴院士给予了大力支持, 杨天南副研究员给予了有益的帮助, 在此表示衷心感谢. 本工作受国家重点基础研究发展规划专项项目(2003CB716500)、国家自然科学基金(批准号: 40272096)和中国地质调查局地质调查项目(200313000058)资助.

参 考 文 献

1 张显庭, 郑健康, 苟金. 阿尔金东段槽型晚奥陶世地层的发现及其意义. 地质论评, 1984, 30(2): 184~186
2 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1994. 43~47
3 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金茫崖地区早古生代蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄证据. 科学通报, 1998, 43(8): 880~883
4 郭召杰, 张志诚, 王建君. 阿尔金山边缘蛇绿岩带的 Sm-Nd 等时线年龄及其大地构造意义. 科学通报, 1998, 43(18): 1981~1984
5 杨经绥, 吴才来, 史仁灯, 等. 阿尔金米兰红柳沟的席状岩墙群: 海底扩张的重要证据. 地质通报, 2002, 21(2): 69~74
6 边千韬, 赵大升, 叶正仁, 等. 初论昆祁秦缝合系. 地球学报, 2002, 23(6): 501~508
7 吴峻, 兰朝利, 李继亮, 等. 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, 2002, 21(1): 24~30
8 车自成, 刘良, 刘洪福, 等. 阿尔金山地区高压变质泥质岩石的发现及其产出环境. 科学通报, 1995, 40(14): 1298~1300
9 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义. 岩石学报, 1999, 15(1): 57~64
10 刘良, 车自成, 罗金海, 等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义. 科学通报, 1996, 41(16): 1485~1488
11 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. 地质学报, 1999, 73(3): 193~204
12 陈宣华, Gehrels G, 王小凤, 等. 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, 2003, 22(4): 294~298
13 陈宣华, 王小凤, 杨风, 等. 阿尔金山北缘早古生代岩浆活动的构造环境. 地质力学学报, 2001, 7(3): 193~200
14 Chen X H, Yin A, George E, Gehrels G, et al. Two phase of Mesozoic north-south extension in the eastern Altyn Tagh range, northern Tibetan plateau. Tectonics, 2003, 22(5): 8-1~8-22 [DOI]
15 Sobel E R, Arnaud N. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China. Tectonics, 1999, 18(1): 64~74 [DOI]
16 Claesson V S, Vetrin T, Bayanova H D. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola Peninsula, Russia: A record of geological evolution from the Archean to the Palaeozoic. Lithos, 2000, 51: 95~108 [DOI]
17 Hanchar J M, Miller C F. Zircon zonation patterns as revealed by cathodolumine scene and backscattered electron images. Chemical Geology, 1993, 110: 1~13 [DOI]
18 Sue k, David S, William C. Identifying granite sources by SHRIMP U-Pb zircon geochronology: An application to the Lachlan fold belt. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 137: 323~341 [DOI]
19 Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hanchar J M, Hoskin P W O, eds. Zircon: Reviews in Mineralogy & Geochemistry. New York: Americal Mineralogy Society, 2003, 53: 27~62
20 新疆维吾尔自治区地质局. 区域地质调查报告(1/20 万, 巴什考供幅). 1981. 18~152
21 Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of a type granites with particular reference to South-eastern Australia. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80: 189~200
22 Wright J B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. Geological Magazine, 1969, 106: 370~384
23 Shand S J. Eruptive Rocks. London: The Woodbridge Press, 1927. 10~50
24 Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan fold belt. Trans R Soc Edinburgh. Earth Sciences, 1992, 83: 1~26
25 李昌年. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992. 74~109
26 Kampunzu A B, Tombale A R, Zhai M, et al. Major and trace element geochemistry of plutonic rocks from Francistown, NE Botswana: Evidence for a neoarchean continental active margin in the Zimbabwe craton. Lithos, 2003, 71: 431~460 [DOI]
27 Poli G, Ghezzo C, Conticelli S. Geochemistry of granitic rocks from the Hercynian Sardinia-Corsica batholith: Implication for magma genesis. lithos, 1989, 23: 247~266 [DOI]
28 Sivell W J, Waterhouse J B. Petrogenesis of Gympic group volcanics: Evidence for remnants of an early Permian volcanic arc in eastern Australia. Lithos, 1988, 21: 81~95 [DOI]
29 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山构造-火山岩浆演化动力学. 西北地质科学, 1995, 16(1): 12~17
30 Pearce J A, Nigel B W, Harris et al. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 1984, 25: 956~983
31 Forster H J, Tischendorf G, Trumbll R B. An evaluation of Rb vs (Y+Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks. Lithos, 1997, 40: 261~293 [DOI]
32 Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca batholith, Peru. Journal of Petrology, 1996, 37(6): 1491~1521
33 Peacock S M. Large scale hydration of the lithosphere above subducting slabs. Chemical Geology, 1993, 108: 49~59 [DOI]
34 Santo A P, Jacobsen S B, Baker J. Evolution and genesis of calc-alkaline magmas at Filicudi Volcano, Aeolian Arc (southern Tyrrhenian Sea, Italy). Lithos, 2004, 72: 73~96 [DOI]
35 张建新, 许志琴, 徐惠芬, 等. 北祁连加里东期俯冲-增生楔结构及动力学. 地质科学, 1998, 33(3): 290~299

(2004-08-08 收稿, 2004-11-26 收修改稿)