

新疆西天山阿吾拉勒山那拉提地区石英二长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义

郝增元¹⁾, 刘旭东²⁾, 李得成¹⁾, 雷东¹⁾, 牛如¹⁾, 丁海波³⁾

1) 西安地质矿产勘查开发院, 西安, 710100; 2) 陕西地矿物化探队, 西安, 710054;
3) 新疆地矿局第三地质大队, 新疆库尔勒, 841000

内容提要: 位于伊犁微板块北缘阿吾拉勒山那拉提地区的石英二长岩侵位于上石炭统伊什基里克组, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 307.0 ± 2.5 Ma, 时代归属于晚石炭世, 代表了岩浆的侵位年龄。岩石地球化学数据显示岩石中 SiO_2 、 Al_2O_3 、碱含量较高, 里特曼指数 σ 为 3.09~3.94, $\text{A}/\text{CNK}=0.75\sim 0.91$, 属准铝质钙碱性—碱性花岗岩系列; 稀土元素总量 (ΣREE) 较高, 稀土配分模式呈轻稀土富集的右倾型 [$(\text{La}/\text{Yb})_N=2.86\sim 6.14$], 轻稀土分异程度大于重稀土, Eu 具有较为明显的负异常 ($\delta\text{Eu}=0.46\sim 1.02$, 平均为 0.69); 强烈富集大离子亲石元素 (LILE) Rb、Th、K, 亏损高场强元素 (HFSE) Nb、Ta、Ti、P; 综合表明那拉提石英二长岩具有 A_2 型花岗岩的特征。高的 Th 含量 ($8.68 \times 10^{-6} \sim 14.62 \times 10^{-6}$) 及低的 Nb/Ta 值 (12.23~29.90, 均值为 18.13) 指示岩浆源区主要为地壳, 但受到了地幔混染作用的影响。在 Nb—Y—Ce、Y/Nb—Ce/Nb 及 Rb—(Nb+Y) 等构造判别图解中样品大多数落入造山后或晚造山花岗岩区, 故笔者等认为该岩体应为造山向造山后或晚造山转换时期的产物, 属造山后或晚造山岩浆作用。结合区域地质背景, 本文认为伊犁微板块在 307.0 ± 2.5 Ma 前已与准噶尔微板块碰合, 北天山洋盆闭合时限早于晚石炭世。这些新资料为西天山区域大地构造演化研究提供了新的约束。

关键词: 石英二长岩; 锆石 U-Pb 年龄; 造山后; 那拉提; 西天山; 新疆

新疆西天山及邻区的哈萨克斯坦—准噶尔板块内部包含了巴尔喀什—准噶尔微板块和穆云库姆—克齐尔库—伊犁微板块, 二者之间存在着一条向南西突出的经巴尔喀什湖西南角向东进入伊犁盆地北缘的早古生代微板块对接带 (肖序常等, 2005)。早古生代, 哈萨克斯坦—准噶尔板块经历了古陆壳由裂解到闭合、呈现多陆块 (微板块) 及多岛弧古亚洲洋的演化, 构成了岛弧系或隆升造山的格局, 洋盆规模大, 板块碰撞强烈; 而后在晚古生代早期再一次裂解, 北侧的准噶尔—巴尔喀什微板块沿着依连哈比尔尕深断裂发生裂解, 形成北天山 (巴音沟) 微洋盆, 随后转入俯冲、闭合阶段 (图 1a; 左国朝等, 2008)。阿吾拉勒山呈东西向横亘于西天山伊犁微板块之内, 晚古生代早期, 伊犁微板块南北分别为南天山洋和北天山洋所俯冲 (段士刚等, 2014; 李永军等, 2010; Gao Jun et al., 2009; Long Lingli et al., 2011), 南天山洋在泥盆纪末至早石炭世末期间逐渐闭合, 塔里木板块与伊犁微陆块发生碰撞, 并在二

叠纪之前完成碰撞 (段士刚等, 2014), 在早二叠世二者已联为一个整体 (Wang Bo et al., 2007)。然而, 北天山洋闭合演化过程及阿吾拉勒山的构造位置定位, 前人的认识存在着一定的分歧: Allen 等认为北天山洋在晚石炭世末闭合, 从早二叠世开始整个西天山地区进入后碰撞演化阶段 (Allen et al., 1992; 王强等, 2006); 张良臣等 (1985) 认为伊犁板块北部稳定大陆边缘至石炭纪发展成为活动大陆边缘, 于晚石炭世早期与准噶尔陆块碰合, 该碰撞在平面上具有右行扭动性质; 高俊等 (2009) 认为西天山增生造山带与早古生代帖尔斯克依古洋、早古生代晚期—晚古生代南天山洋和晚古生代北天山洋 3 个代表洋盆的演化相关, 增生造山结束的时间可能是早石炭世末, 阿吾拉勒山为伊犁地块北缘活动陆缘; 姜常义等 (1993, 1996) 认为当北天山洋于石炭纪逐渐消亡闭合时, 阿吾拉勒带位于大陆型岛弧带的内侧, 北天山古洋于石炭纪晚期闭合; 朱志新等 (2013) 将包括阿吾拉勒山在内的北天山区域由北

注: 本文为中国地质调查局 1:5 万矿产调查与找矿预测项目 (编号: 121201004000150017-49) 的成果。

收稿日期: 2017-11-01; 改回日期: 2018-05-11; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.04.005

作者简介: 郝增元, 男, 1987 年生, 硕士, 工程师, 主要从事区域地质、矿产地质调查工作; Email: 714044937@qq.com。

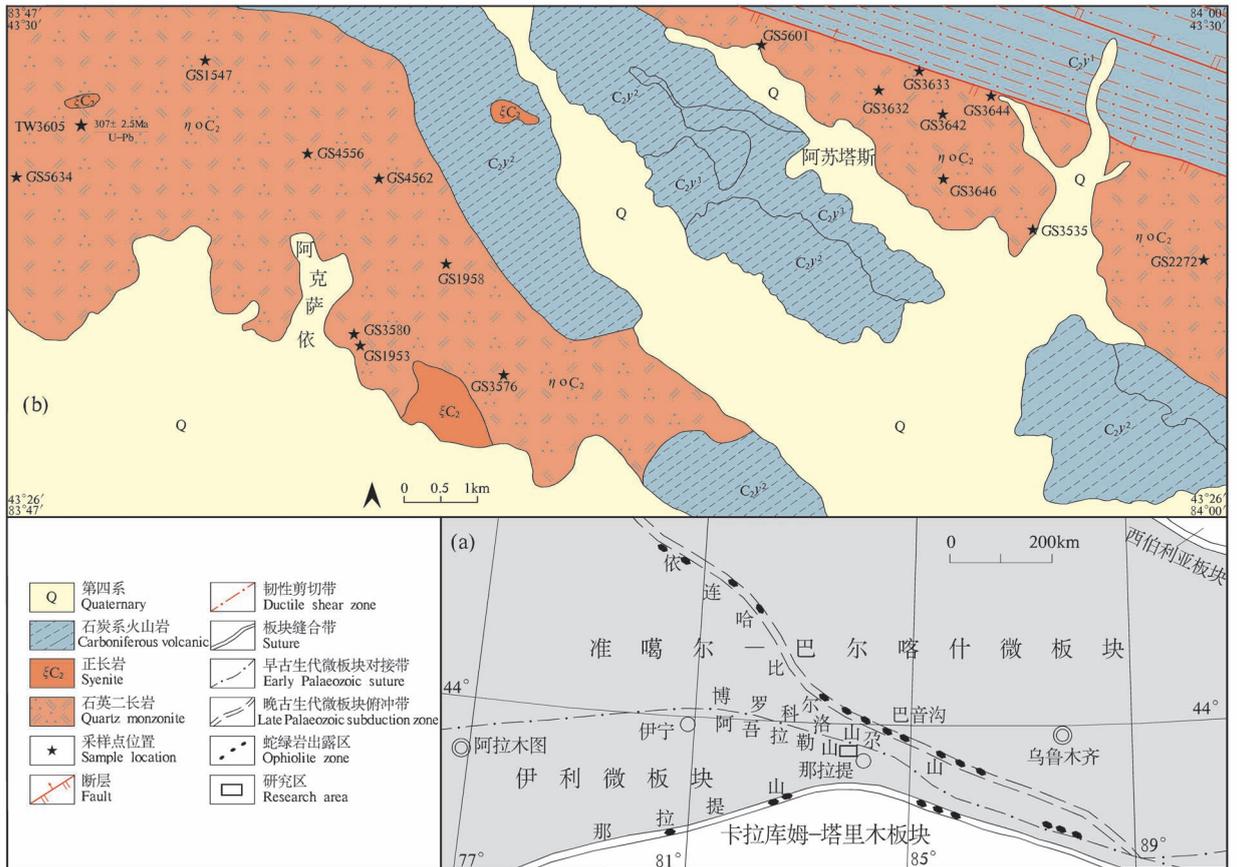


图1 那拉提地区构造简图(a) (据肖序常等,2005;左国朝等,2008)及采样地质图(b)
 Fig. 1 Tectonic sketch map (a) (after Xiao Xuchang et al., 2005; Zuo Guochao et al., 2008) and geological map of the Nalati area showing the sample location (b)

而南依次划分为依连哈比尔尕增生杂岩带、伊犁地块北缘活动陆缘和晚古生代裂谷(火山盆地),阿吾拉勒山位于其中的伊犁地块北缘活动陆缘,确定洋盆闭合时代应在 310 Ma 之前。鉴于前人研究成果的不够统一以及缺乏足够的从造山到造山后转换阶段精确的年代学厘定,有必要提供更多新的基础性数据。本文的研究区位于巴尔喀什—准噶尔微板块晚古生代俯冲带南侧伊犁微板块北缘阿吾拉勒山南坡,本文对阿吾拉勒南坡那拉提地区分布的石英二长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学、岩石学及地球化学等方面研究,旨在探讨其形成时代、岩石成因,揭示其形成的构造背景,以期为该晚古生代构造演化提供约束,为北天山洋的闭合时限提供新的佐证。

1 区域地质概况及岩石学特征

1.1 区域地质概况

新疆西天山阿吾拉勒山南坡那拉提地区位于伊犁微板块北缘,晚古生代时期经历了由阿吾拉勒晚古生代活动陆缘向裂谷构造系统的转换(朱志新等,2013;蒋宗胜,2013;左国朝等,2008;于海峰等,2011)(图1)。区内发育的地层较为单一,主要为晚古生代上石炭统伊什基里克组一套浅海相中性—中酸性火山岩、火山碎屑岩夹碎屑岩组合,出露岩性为红褐色、深灰色、浅灰绿色安山岩、(辉石、粗面、气孔状)安山玢岩、流纹岩、火山碎屑岩及钙质砂岩透镜体等。中生界发育的零星的火山岩及砂砾石层不整合覆盖于上述古老地层之上。区内构造—岩浆活动十分强烈,断裂构造由一系列 NWW 向韧性逆断层、脆性正断层所组成,其中韧性逆断层发育于伊什基里克组的下部层位,韧性剪切变形十分强烈,形成了疏密不等的糜棱岩化带,正断层系列乃区域上闻名遐迩的喀什河断裂的一隅。伊什基里

克组整体发生隆升褶皱,形成了一系列紧闭或宽缓的背向斜构造,构成了本区褶皱构造的基本格架,也构成了阿吾拉勒复式背斜的基本形态,而阿吾拉勒复式背斜是区域上巩乃斯复向斜的重要组成部分(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993);岩浆活动以华力西晚期岩浆活动为主,分布于那拉提镇—坎苏乡一带,侵入岩呈不同形态的岩基或岩株 NWW 向或近 EW 向展布,展布方向与本区总体构造线方向相吻合,出露侵入岩主要有石英二长岩及正长岩。石英二长岩单个侵入体呈岩基状侵入于石炭纪地层,而被正长岩侵入。

1.2 岩石学特征

本文针对那拉提石英二长岩展开研究,该岩体在巩乃斯河以北地区大面积出露,总体呈北西西向展布,在本项目图幅内总出露面积约 60 km²,向北

西、南东两个方向延伸出图外。岩性整体较为稳定,呈岩基状产出。石英二长岩呈浅肉红色、灰黄色、灰白色,具中细粒半自形粒状结构,变余花岗结构、显微文象结构,块状构造。主要由斜长石、钾长石、石英及黑云母等组成(图 2)。斜长石多呈 0.5~2.5 mm 半自形粒状,具较强的绢云母化和粘土化;钾长石多数 0.5~3 mm 半自形粒状,主要以条纹长石为主,受动力作用影响非常强烈,矿物破碎,裂隙发育,局部呈显微文象结构,黏土化较为强烈;石英 0.3~2 mm 不规则粒状,矿物破碎,裂隙发育;黑云母 0.3~0.5 mm 鳞片状,绿泥石化。斜长石 40%~50%,钾长石 20%~25%,石英 10%~18%,黑云母(绿泥石化)5%~10%,角闪石少量,次生绿泥石、绿帘石、绢云母、磷灰石少量。岩石中局部可见暗色闪长质包体存在。

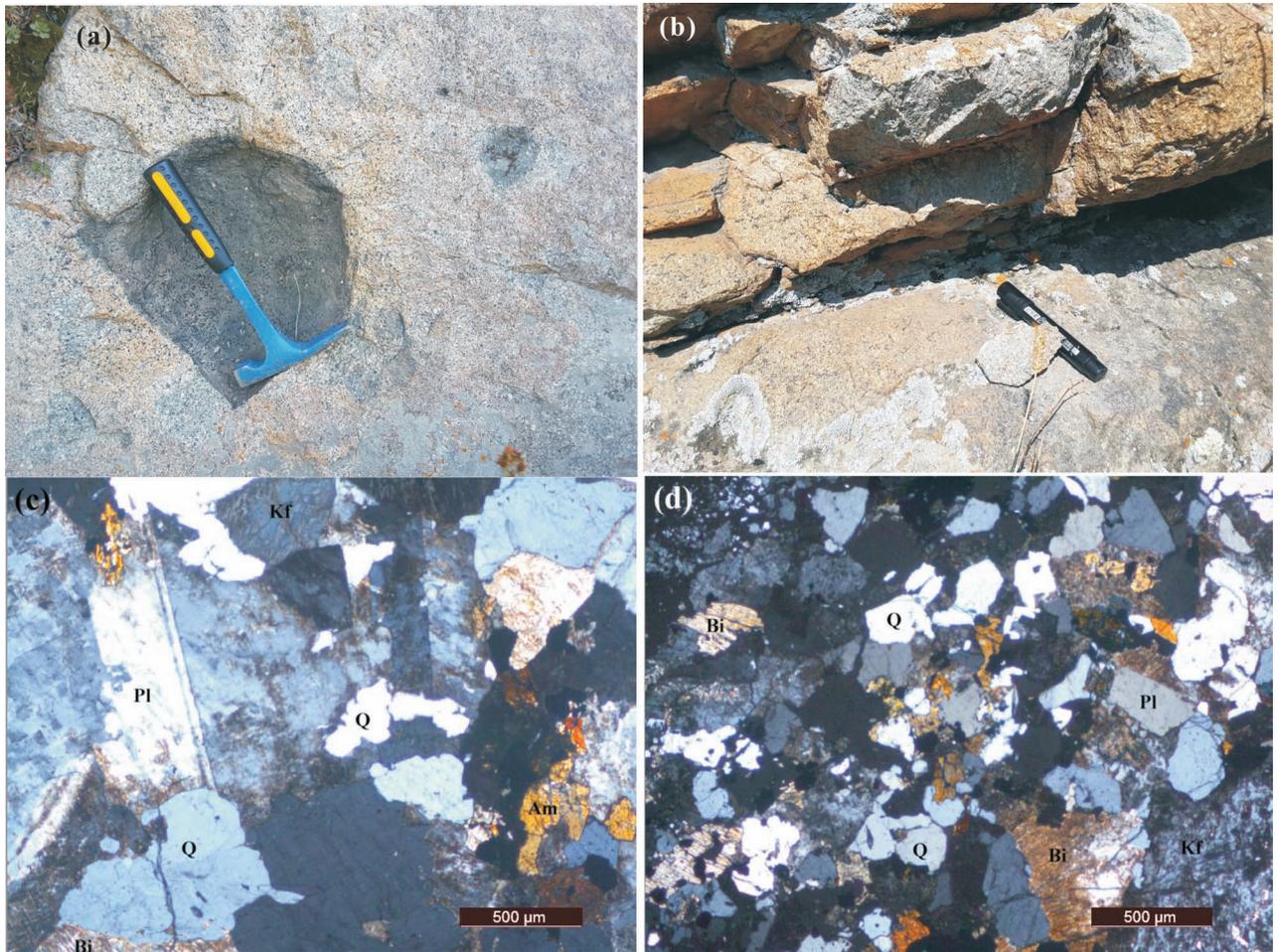


图 2 阿吾拉勒山那拉提石英二长岩野外露头及镜下(正交偏光)特征

Fig. 2 Photographs of quartz monzonite in Nalati area, Awulale Mountain

(a, b)—石英二长岩野外照片;(c, d)—石英二长岩显微照片;Kf—钾长石;Pl—斜长石;Q—石英;Bi—黑云母

(a, b)—photographs of quartz monzonite;(c, d)—microphotographs of quartz monzonite;

Kf—K-feldspar;Pl—Plagioclase;Q—Quartz;Bi—Biotite

2 样品分析方法

本次工作在石英二长岩岩体的不同部位共采集 17 件新鲜岩石样品进行岩石地球化学分析(图 1b),选取其中的 1 件样品(TW3605)进行锆石 U-Pb 测年。主量元素、微量及稀土元素的测定均由新疆地质矿产勘查开发局第三地质大队实验室完成。主量元素采用原子吸收分光光度仪及紫外可见分光光度仪(XD3S-YQ-026、XD3S-YQ-032)测定,相对标准偏差为 2%~5%。微量及稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪(XD3S-YQ-028)测定,相对标准偏差小于 10%。

测年样品中锆石的挑选由河北省廊坊区域地质调查研究所完成,经机械粉碎后,用浮选、电磁选方法进行分离,然后在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒用于年龄测定。锆石制靶(李怀坤等,2009)、阴极发光(CL)图像分析及 LA-ICP-MS 锆石微区原位单点定年均在于西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。使用仪器分别为 Agilent 7500 型 ICP-MS、ComPex102 ArF 准分子激光器(工作物 ArF 波长 193nm)和 GeoLas 200M 光学系统。采样方式为单点剥蚀,激光束斑直径为 20 μm ,剥蚀深度为 20~40 μm 。实验室采用 He 作为激光剥蚀物质的载气,采用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化,实验原理及步骤参见 Yuan Honglin 等

(2004)。

锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质,元素 Pb、U、Th 含量采用 NIST SRM610 作为外标,²⁹ Si 作为内标。数据处理采用 Glitter (Macquarie University) 程序,加权平均年龄计算及谐和图的绘制采用 ISPLIT(ver3.0) 程序(Ludwig, 2001)。按照 LAM-ICP-MS Common Lead Correction(ver3.15)(Andersen,2002)对普通铅进行校正。采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄的加权平均值作为石英二长岩的结晶年龄,同位素比值和年龄误差 1 σ ,可信度 95%。

3 测试结果

3.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年

石英二长岩样品采自那拉提镇北西阿克萨依,地理坐标:东经 83°48'06",北纬 43°29'00"。TW3605 样品共选取 25 颗锆石,共计 25 个测点。所测锆石呈透明柱状,晶型较好,长宽比多为 2:1~3:1,阴极发光(CL)图像(图 3)显示出锆石具典型的明暗相间的振荡环带结构,表明其属于岩浆结晶的产物(吴元保等,2004)。锆石的 Th、U 含量分别为 $41 \times 10^{-6} \sim 77 \times 10^{-6}$ 、 $76 \times 10^{-6} \sim 220 \times 10^{-6}$,Th/U 比值除个别点外均大于 0.5,进一步说明了锆石属于典型岩浆成因范围(李志昌等,2004)(表 1)。在锆石 U-Pb 年龄²⁰⁶Pb/²³⁸U—²⁰⁷Pb/²³⁵U 谐和图(图 4)中,所有数据点均分布在谐和线上,²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 307.0 \pm 2.5 Ma(95%信度,MSWD=0.14),时代属于

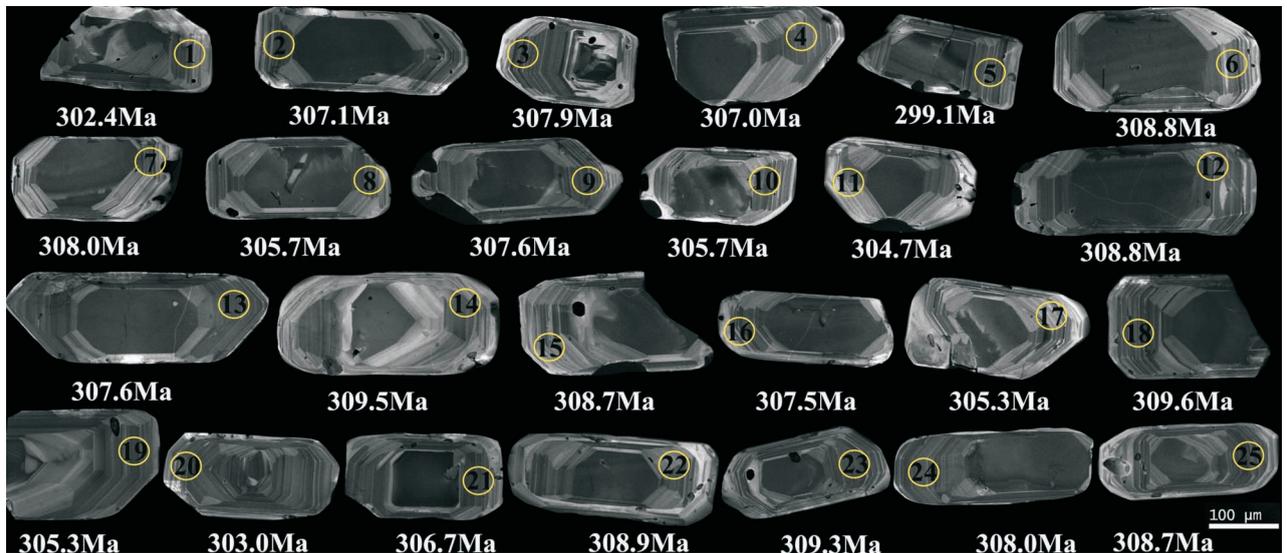


图 3 阿吾拉勒山那拉提石英二长岩中锆石的阴极发光图

Fig. 3 CL images of representative zircons of quartz monzonite in Nalati area, Awulale Mountain

表 1 新疆西天山阿吾拉勒山那拉提石英二长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年数据
Table 1 LA-ICP-MS Zircon U-Pb isotopic dates of quartz monzonite in Nalati area, Awulale Mountain, Western Tianshan Mountains, Xinjiang

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度 (%)
	Pb	Th		U	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	
1	6	56	102	0.05252	0.00378	0.34819	0.02299	0.04803	0.00109	308.2	155.1	303.4	17.3	302.4	6.7	100
2	7	59	110	0.05425	0.00361	0.36535	0.02204	0.04879	0.00107	381.4	142.8	316.2	16.4	307.1	6.6	97
3	7	63	106	0.05532	0.00270	0.37349	0.01532	0.04892	0.00094	425.1	105.0	322.2	11.3	307.9	5.8	96
4	7	59	112	0.05253	0.00262	0.35362	0.01496	0.04878	0.00093	308.5	109.6	307.4	11.2	307.0	5.7	100
5	7	65	122	0.05261	0.00404	0.34484	0.02454	0.04749	0.00112	312.1	165.4	300.8	18.5	299.1	6.9	99
6	6	46	97	0.05239	0.00319	0.35485	0.01934	0.04908	0.00102	302.5	133.0	308.4	14.5	308.8	6.3	100
7	8	77	133	0.05233	0.00244	0.35346	0.01364	0.04894	0.00091	300.0	103.0	307.3	10.2	308.0	5.6	100
8	6	55	105	0.05257	0.00266	0.35228	0.01520	0.04856	0.00093	310.1	111.2	306.4	11.4	305.7	5.7	100
9	6	57	100	0.05565	0.00301	0.37539	0.01765	0.04888	0.00095	437.9	116.3	323.6	13.0	307.6	5.9	95
10	7	65	115	0.05240	0.00270	0.35117	0.01551	0.04856	0.00094	302.9	113.3	305.6	11.7	305.7	5.8	100
11	6	51	101	0.05039	0.00280	0.33656	0.01634	0.04840	0.00097	212.8	123.7	294.6	12.4	304.7	6.0	103
12	6	51	97	0.05455	0.00321	0.36940	0.01936	0.04907	0.00098	393.6	126.8	319.2	14.4	308.8	6.0	97
13	6	52	102	0.05234	0.00273	0.35308	0.01585	0.04888	0.00095	300.1	114.7	307.0	11.9	307.6	5.8	100
14	6	57	103	0.05242	0.00350	0.35577	0.02166	0.04918	0.00105	303.8	145.3	309.1	16.2	309.5	6.4	100
15	5	49	84	0.05450	0.00317	0.36898	0.01897	0.04906	0.00100	391.5	125.2	318.9	14.1	308.7	6.2	97
16	5	48	79	0.05445	0.00403	0.36718	0.02509	0.04886	0.00113	389.5	158.3	317.6	18.6	307.5	6.9	97
17	6	61	94	0.05259	0.00362	0.35205	0.02214	0.04851	0.00107	311.0	148.8	306.3	16.6	305.3	6.6	100
18	5	41	76	0.05302	0.00340	0.36003	0.02082	0.04920	0.00104	329.7	138.4	312.2	15.5	309.6	6.4	99
19	6	49	98	0.05253	0.00352	0.35159	0.02143	0.04850	0.00105	308.3	145.4	305.9	16.1	305.3	6.5	100
20	5	47	80	0.05504	0.00763	0.36553	0.04878	0.04812	0.00176	413.7	283.1	316.3	36.3	303.0	10.8	96
21	7	60	114	0.05603	0.00266	0.37680	0.01492	0.04872	0.00092	453.3	102.5	324.7	11.0	306.7	5.7	94
22	6	53	91	0.05635	0.00618	0.38170	0.03989	0.04908	0.00150	465.3	226.8	328.3	29.3	308.9	9.2	94
23	8	70	119	0.05449	0.00287	0.36969	0.01682	0.04916	0.00097	391.3	113.8	319.4	12.5	309.3	6.0	97
24	13	61	220	0.05459	0.00395	0.36874	0.02454	0.04894	0.00113	395.4	154.7	318.7	18.2	308.0	7.0	97
25	5	46	82	0.05268	0.00362	0.35658	0.02240	0.04905	0.00108	314.8	148.5	309.7	16.8	308.7	6.6	100

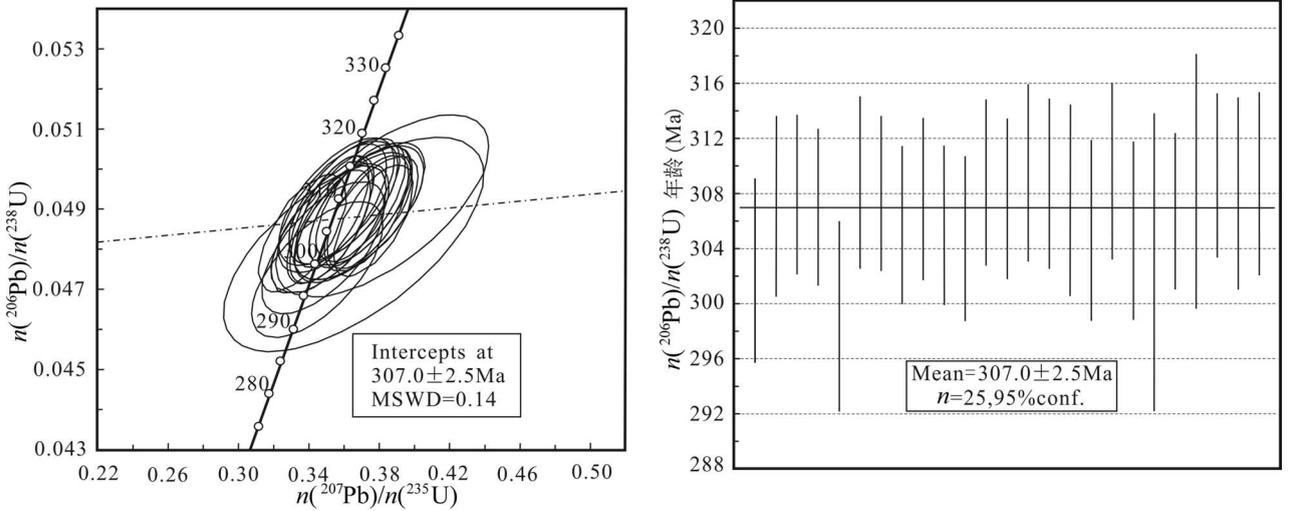


图4 阿吾拉勒山那拉提石英二长岩锆石 U-Pb 同位素谐和图

Fig. 4 U-Pb isotopic concordia diagram for zircons of quartz monzonite in Nalati area, Awulale Mountain

晚石炭世。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素

岩石中 SiO₂ 含量为 63.50%~69.74%，平均为 66.50%，属于中酸性岩系列(表 2)。Al₂O₃ 含量较高，为 13.70%~15.20%。K₂O 含量为 2.34%~4.29%，Na₂O 含量为 4.75%~6.59%，Na₂O+K₂O 含量较高，为 8.42~9.58%，平均为 9.02%，所有样品 K₂O/Na₂O 均小于 1，显示出富钠而相对贫钾的特征。岩石里特曼指数 σ 为 3.09~3.94(3.3 左右)，属于钙碱性—碱性岩类，在 SiO₂—(Na₂O+K₂O) 图

解中(图 5)样品在碱性系列与亚碱性系列分界线两侧均有分布。Mg[#] = 9.52~38.14，平均为 22.25。A/NCK = 0.75~0.91 (<1)，A/NK = 1.03~1.23 (<2)，显示出准铝质岩浆的特征，在 A/CNK—A/NK 图解(图 5)中样品也均投影到准铝质系列中(桑隆康等，2012)。

3.2.2 稀土元素和微量元素

从稀土元素分析结果表(表 2)看出，石英二长岩稀土总量较高，变化于 166.43 × 10⁻⁶~288.15 × 10⁻⁶，平均为 236.25 × 10⁻⁶，轻稀土总量(LREE 平均为 196.17 × 10⁻⁶)明显高于重稀土(HREE 平均为

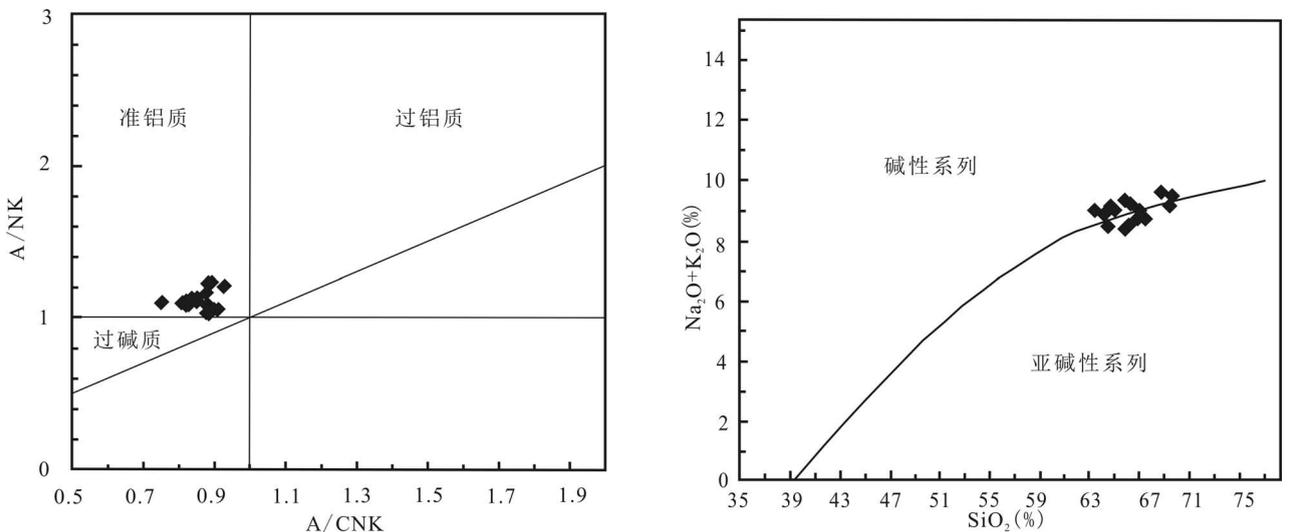


图5 SiO₂—(Na₂O+K₂O)和 A/CNK—A/NK 图解

Fig. 5 SiO₂—(Na₂O + K₂O) and A/CNK—A/NK diagrams

表 2 新疆西天山阿吾拉勒山那拉提石英二长岩主要元素(%)、微量元素和稀土元素($\times 10^{-6}$)组成Table 2 Major (%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) contents of quartz monzonite in Nalati area, Awulale Mountain, Western Tianshan Mountains, Xinjiang

样品编号	GS5634	GS3605	GS1547	GS3580	GS3576	GS1953	GS4562	GS1958	GS4556	GS5601	GS3644	GS3535	GS2272	GS3632	GS3646	GS3633	GS3642
SiO ₂	64.61	63.50	65.73	68.80	69.30	69.20	64.45	69.74	64.28	65.92	66.56	66.06	65.95	67.15	66.66	65.14	67.48
Al ₂ O ₃	14.75	15.20	14.94	14.25	14.11	14.09	15.14	13.90	15.09	14.06	14.48	14.59	14.66	14.50	13.97	13.70	14.27
TiO ₂	0.85	0.91	0.73	0.56	0.52	0.54	0.87	0.45	0.71	0.93	0.99	1.00	0.80	0.96	0.82	0.88	0.80
Fe ₂ O ₃	2.85	2.81	2.38	1.90	2.65	2.65	2.85	2.56	3.53	3.10	3.01	3.25	2.40	2.15	3.32	3.65	1.66
FeO	3.06	3.42	3.30	2.34	1.89	1.80	3.27	1.28	2.47	2.43	1.93	2.83	2.93	2.16	2.25	2.21	1.89
CaO	2.40	2.38	1.94	1.30	1.21	1.25	2.67	1.29	2.56	2.26	2.13	2.02	2.30	2.55	2.39	3.18	2.46
MgO	0.85	1.51	0.86	0.36	0.45	0.37	1.15	0.56	1.42	0.31	0.67	0.79	0.78	0.78	0.86	1.00	1.17
MnO	0.10	0.14	0.13	0.11	0.06	0.07	0.15	0.06	0.13	0.13	0.09	0.18	0.13	0.06	0.09	0.07	0.08
K ₂ O	2.54	3.14	3.19	3.43	3.34	3.27	2.95	4.29	4.11	2.53	3.41	3.46	3.18	2.34	4.02	4.22	2.55
Na ₂ O	6.59	5.85	6.12	6.15	5.90	6.16	5.55	5.15	4.75	5.89	5.75	5.06	6.13	6.51	4.88	4.79	6.16
P ₂ O ₅	0.29	0.28	0.24	0.16	0.13	0.10	0.30	0.06	0.29	0.23	0.24	0.26	0.26	0.26	0.25	0.29	0.11
H ₂ O ⁺	0.13	0.12	0.13	0.15	0.13	0.13	0.18	0.18	0.16	0.07	0.09	0.06	0.15	0.09	0.17	0.18	0.21
烧失	0.63	0.85	0.43	0.53	0.43	0.46	0.55	0.41	0.44	1.31	0.66	0.49	0.46	0.57	0.44	0.26	0.76
总量	99.66	100.12	100.12	100.04	100.12	100.09	100.09	99.91	99.94	99.18	100.01	100.05	100.12	100.08	100.11	99.54	99.59
Na ₂ O+K ₂ O	9.13	8.99	9.31	9.58	9.24	9.43	8.50	9.43	8.86	8.42	9.16	8.52	9.31	8.85	8.90	9.01	8.71
σ	3.86	3.94	3.81	3.56	3.25	3.39	3.37	3.33	3.69	3.09	3.56	3.15	3.77	3.24	3.34	3.67	3.10
A/NK	1.08	1.17	1.10	1.03	1.06	1.03	1.23	1.06	1.23	1.13	1.10	1.21	1.08	1.09	1.13	1.10	1.11
A/CNK	0.82	0.88	0.88	0.88	0.91	0.88	0.88	0.90	0.89	0.85	0.85	0.93	0.83	0.81	0.83	0.75	0.82
Mg [#]	21.19	31.18	22.05	13.73	15.91	13.58	26.04	21.81	31.00	9.52	20.52	19.66	21.39	25.33	22.67	24.48	38.14
K	21651	24208	23382	25388	25540	24898	24148	25308	23996	23255	25164	27103	23395	20940	20932	24254	24339
Ba	532.93	540.61	544.48	445.50	534.42	457.95	558.76	495.68	549.56	529.99	588.65	789.87	562.31	614.83	615.55	709.43	651.25
Rb	96.25	112.77	104.54	112.75	104.13	102.75	122.23	106.07	118.20	120.70	106.87	141.15	86.40	84.44	92.25	94.40	103.43
Hf	11.78	11.24	12.35	12.03	12.40	11.94	10.83	11.90	11.12	11.21	11.96	10.42	10.82	9.86	9.94	10.01	10.40
Ta	1.38	0.72	0.62	1.45	1.36	1.26	1.13	1.63	1.45	0.34	0.93	0.59	0.78	0.93	0.93	1.03	1.03
Nb	23.13	21.56	16.93	25.66	26.04	23.51	20.59	23.15	22.26	5.36	12.63	13.28	20.36	13.53	12.50	13.24	12.54
Sr	215.51	175.39	165.83	111.43	141.15	120.36	218.64	130.25	210.51	150.88	178.91	194.23	210.53	233.83	246.00	265.09	168.52
Th	8.68	11.86	10.12	10.13	11.43	10.89	8.75	11.55	11.05	11.38	10.68	14.62	12.81	12.03	9.43	8.95	10.20
Y	53.20	53.38	58.24	59.89	68.65	60.75	49.19	60.75	51.20	69.91	60.48	54.66	48.60	74.96	73.42	61.33	57.31
Zr	489.25	456.89	503.83	480.09	492.80	473.71	447.91	490.17	470.72	415.13	445.81	393.46	438.74	358.92	386.77	378.50	393.92
P	1231.63	1307.18	1015.74	776.51	530.62	476.94	1313.15	429.21	1258.36	1068.82	1024.28	1070.05	1006.84	1059.96	935.93	1190.53	1011.96
Ti	4965.85	5000.83	4299.68	3275.95	2929.65	3120.50	4946.10	2979.78	4868.56	5546.54	5543.81	5708.04	4300.52	5609.62	4776.38	5623.56	5592.42
Cr	31.28	30.43	30.07	24.63	21.17	24.24	30.73	20.52	23.79	27.85	25.10	21.74	31.88	26.11	27.75	29.21	26.52
Sc	12.44	12.87	11.02	9.29	8.52	8.82	12.61	8.13	13.03	12.76	12.01	12.97	11.72	12.77	12.18	14.40	13.37
La	40.08	48.14	54.73	55.50	48.28	34.74	37.77	35.41	39.90	35.53	39.23	24.34	40.32	39.16	26.98	29.32	36.30
Ce	90.36	106.20	109.69	109.48	107.44	84.25	85.72	87.04	88.45	77.87	81.25	52.62	84.45	91.97	58.35	67.90	96.48

样品编号	GS5634	GS3605	GS1547	GS3580	GS3576	GS1953	GS4562	GS1958	GS4556	GS5601	GS3644	GS3535	GS2272	GS3632	GS3646	GS3633	GS3642
Pr	11.65	13.84	14.69	13.41	14.79	11.36	11.19	12.18	11.28	10.36	10.08	7.29	10.69	12.56	7.95	8.93	13.49
Nd	46.38	54.72	56.26	51.01	59.35	45.96	45.33	48.61	45.85	44.89	40.52	33.27	42.37	55.66	34.82	38.32	57.84
Sm	9.14	11.02	10.83	9.94	11.90	9.62	9.37	10.31	9.19	10.68	9.17	8.57	8.52	12.97	8.52	9.12	13.12
Eu	1.91	2.02	1.95	1.68	1.74	1.69	1.73	1.86	1.79	2.92	3.10	2.52	1.79	2.92	2.58	2.87	3.04
Gd	8.29	9.88	9.80	9.27	10.72	8.76	8.40	9.31	8.30	10.39	9.26	8.24	7.94	12.19	8.20	8.98	12.14
Tb	1.44	1.71	1.71	1.61	1.92	1.64	1.49	1.74	1.47	1.96	1.74	1.64	1.41	2.29	1.59	1.71	2.32
Dy	8.79	10.40	10.22	9.94	11.75	10.24	9.15	10.91	8.90	12.33	11.12	10.66	8.64	14.63	10.23	10.99	14.66
Ho	1.79	2.14	2.09	2.08	2.48	2.18	1.87	2.28	1.82	2.55	2.34	2.22	1.79	2.98	2.13	2.30	2.97
Er	5.29	6.32	6.22	6.18	7.52	6.54	5.55	6.77	5.42	7.39	6.92	6.45	5.37	8.78	6.31	6.75	8.77
Tm	0.83	0.99	0.97	0.99	1.20	1.06	0.88	1.10	0.86	1.15	1.10	1.01	0.87	1.39	1.02	1.05	1.40
Yb	5.44	6.48	6.42	6.48	7.86	6.87	5.68	7.15	5.61	7.43	7.11	6.61	5.62	8.94	6.60	6.69	9.11
Lu	0.85	1.01	0.99	1.00	1.21	1.06	0.88	1.11	0.84	1.16	1.11	1.02	0.88	1.38	1.06	1.03	1.35
ΣREE	232.23	274.87	286.57	278.58	288.15	225.96	224.99	235.76	229.68	226.59	224.04	166.43	220.65	267.79	176.32	195.94	272.99
LREE	199.52	235.94	248.15	241.02	243.50	187.60	191.10	195.40	196.46	182.24	183.34	128.60	188.13	215.23	139.20	156.44	220.27
HREE	32.71	38.93	38.42	37.56	44.65	38.35	33.89	40.36	33.22	44.35	40.70	37.84	32.52	52.56	37.12	39.50	52.72
LREE/HREE	6.10	6.06	6.46	6.42	5.45	4.89	5.64	4.84	5.91	4.11	4.50	3.40	5.78	4.09	3.75	3.96	4.18
δEu	0.66	0.58	0.57	0.53	0.46	0.55	0.58	0.57	0.61	0.84	1.02	0.90	0.65	0.70	0.93	0.96	0.72
(La/Yb) _N	5.28	5.33	6.12	6.14	4.41	3.63	4.77	3.55	5.10	3.43	3.96	2.64	5.15	3.14	2.93	3.15	2.86
(La/Sm) _N	2.83	2.82	3.26	3.60	2.62	2.33	2.60	2.22	2.80	2.15	2.76	1.83	3.06	1.95	2.05	2.08	1.79
(Gd/Yb) _N	1.26	1.26	1.26	1.18	1.13	1.05	1.22	1.08	1.22	1.16	1.08	1.03	1.17	1.13	1.03	1.11	1.10

40.08×10⁻⁶)。在球粒陨石标准化稀土配分图中(图6),具有相对明显的富集轻稀土元素的右倾型配分形式(LREE/HREE变化于3.40~6.46,平均为4.97),轻重稀土分馏较为明显,(La/Yb)_N变化于2.86~6.14,平均为4.15,轻稀土分馏程度大于重稀土,(La/Sm)_N变化于1.79~3.06,平均为2.49;(Gd/Yb)_N变化于1.03~1.26,平均为1.14。Eu具有较为明显的负异常(δEu为0.46~1.02,平均为0.69),表明可能发生了斜长石的分离结晶作用或斜长石在源区的残留。

从微量元素分析结果表(表2)结合原始地幔标准化的蛛网图(图6)可以看出石英二长岩明显富集了强不相容元素Rb、Th,相对富集了易溶于水的大离子亲石元素(LILE)K,而强烈亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti、P,呈现Rb、Th峰和Nb、Ta谷,可能为地幔物质部分熔融形成,但Nb、Ta、Ti的亏损,表明了石英二长岩源岩物质与地壳密切相关(李再会等,2012)。曲线形态与Pearce等(1984)建立的用于花岗岩构造环境判别的微量元素图解中的过渡型相似,且与其中的钙碱性—碱性系列更加接近,形态介于火山弧型和板内花岗岩之间。

4 讨论

4.1 岩浆侵位时代、成因及构造环境

本文对那拉提地区石英二长岩锆石U-Pb定年获得²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为307.0±2.5 Ma,可以与区域上同时期形成的则克台晚石炭世角闪辉长岩(308.2±1.2 Ma)(徐学义等,2006)、雾岭晚石炭世闪长岩(307.7±0.8 Ma)(段士刚等,2014)及诺尔西北晚石炭世钾长花岗岩(304.2±5.6 Ma)(李晓英,2013)等侵入体进行对比,同为伊犁地块北缘晚古生代侵入岩带的一员。着眼于西天山广大范围内330~300 Ma岩浆活动也有报道,其中,玉奇布拉克和乌图精河两个岩体的形成年龄分别为301 Ma和303 Ma(杨蓉等,2017);玉希莫勒盖岩体形成于310 Ma(牛贺才等,2010);阿吾拉勒南正长岩形成于312 Ma(Sun Linhua et al.,2008),这表明晚石炭世开始,西天山地区出现了一期活动范围广、强度大的岩浆活动。因此,本文所测年龄

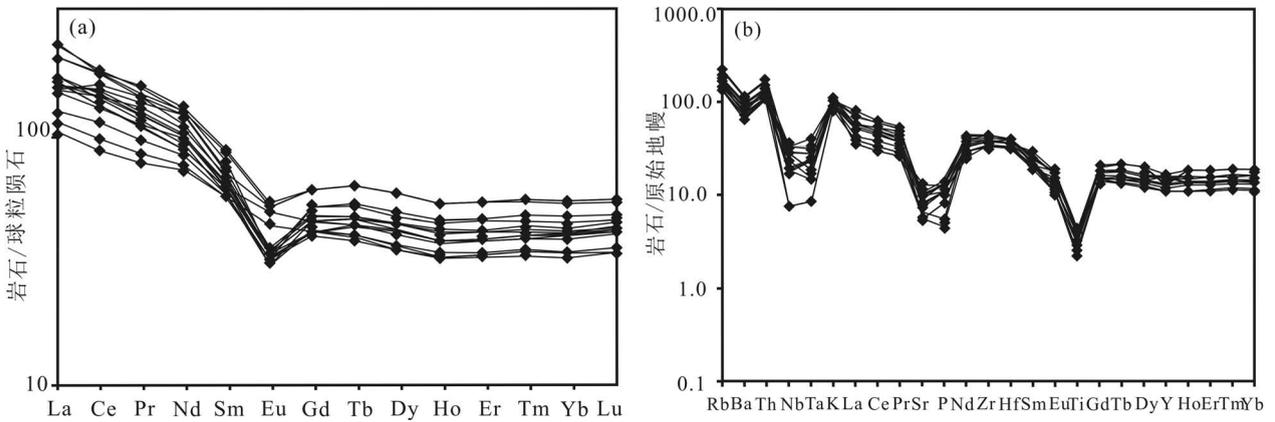


图 6 阿吾拉勒山那拉提石英二长岩的稀土元素球粒陨石标准化配分型式图(a)和微量元素原始地幔蛛标准化蛛网图(b) (标准化值来源于 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite normalized REE distribution pattern(a) and primitive mantle normalized trace elements spider diagram(b) of quartz monzonite in Nalati area, Awulale Mountain(normalization values after Sun and McDonough, 1989)

数据可信,代表了岩浆结晶侵位年龄,岩体形成时代属于晚石炭世。

那拉提地区石英二长岩按其野外空间分布位置可划分为阿克萨伊岩体与阿苏塔斯岩体,二者位置临近,共同侵入于晚石炭世同一火山岩地层,且二者在矿物组成、结构、构造等方面均显示出高度的一致性。阿克萨伊岩体与阿苏塔斯岩体的野外地质、时空关系及岩相学等方面的信息共同揭示了二者具有成因联系,在两岩体的 SiO_2 与 TiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 Al_2O_3 、 TFeO 、 P_2O_5 等主量元素之间及 Rb、Y 等微量元素之间也均存在着一定的相关性(张旗, 2012)(图 7)。尽管二者在部分化学特征上存在着一定的差异,显示了不均一性,但这可能与岩浆的局部受混合、混染程度不同有关,二者仍应为同源岩浆侵位所形成。

石英二长岩矿物组合为斜长石、钾长石、石英、黑云母及磷灰石等,有少量闪长质暗色包体发育,岩石主量元素显示出富 SiO_2 、 Al_2O_3 及碱含量较高的特征, $A/NCK=0.75\sim 0.91 (<1)$, 强烈富集大离子亲石元素 Rb、Th、K, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 等, 稀土元素配分模式呈现轻稀土富集的右倾海鸥型, 具有较为明显的负 Eu 异常, 这些特征与 A 型花岗岩相一致。样品的 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 值分布于 $514.01\times 10^{-6}\sim 694.92\times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 606.96×10^{-6} , 符合典型 A 型花岗岩 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}>350\times 10^{-6}$ 的范围(Whalen et al., 1987), 在成因判别图解中(图 8)所有样品也均落入 A 型花岗岩区域。尽管在 Whalen 图解中, 典型的 A 型花岗岩与高分异(离)I 型、S 型

花岗岩有重叠(邓晋福等, 2015a), 在该重叠区域内区分三者有一定的困难, 但仍可以根据特征矿物和化学特征等加以区分。S 型花岗岩通常为过铝质的($A/NCK>1.1$), 常出现白云母、堇青石、石榴子石、电气石及尖晶石等典型特征矿物, 且 Na_2O 含量通常较低(均值为 2.81%), P_2O_5 与 SiO_2 呈正相关关系(Chappell et al., 1992; 杨多等, 2017)。而本文石英二长岩的所有样品中均未见上述富铝特征矿物, A/NCK 为 0.75~0.91, 均小于 1.1, 属准铝质系列而非 S 型过铝质系列, 并且 Na_2O 含量为 4.75%~6.59%, 均大于 S 型花岗岩 Na_2O 的均值, P_2O_5 与 SiO_2 也未呈正相关关系(图 7), 因此那拉提地区的石英二长岩并非属于 S 型。A 型花岗岩与高分异(离)I 型花岗岩可以从典型特征矿物、稀土配分模式特征及 FeO^T 含量等方面进行区分(King et al., 1997)。首先, I 型花岗岩通常含有特征矿物角闪石, 而本文的所有样品中暗色矿物均以黑云母为主, 角闪石仅个别样品中出现且含量极少。其次, I 型花岗岩的 REE 含量较低($<114.71\times 10^{-6}$), 且几乎没有 Eu 谷(吴锁平等, 2007), 而本文石英二长岩样品的 REE 为 $166.43\times 10^{-6}\sim 288.15\times 10^{-6}$, 平均为 236.25×10^{-6} , δEu 为 0.46~1.02, 平均为 0.69, 具有较为明显的负 Eu 异常。另外, I 型花岗岩的 FeO^T 含量一般小于 1.00%(王强等, 2000), 而本文石英二长岩样品的 FeO^T 含量为 1.28%~3.42%, 均大于 1.00%, 故那拉提地区的石英二长岩也非 I 型花岗岩。综上所述, 其应为准铝质钙碱性—碱性 A 型花岗岩, 这一特征同样也符合后造山或碰撞后环境碱

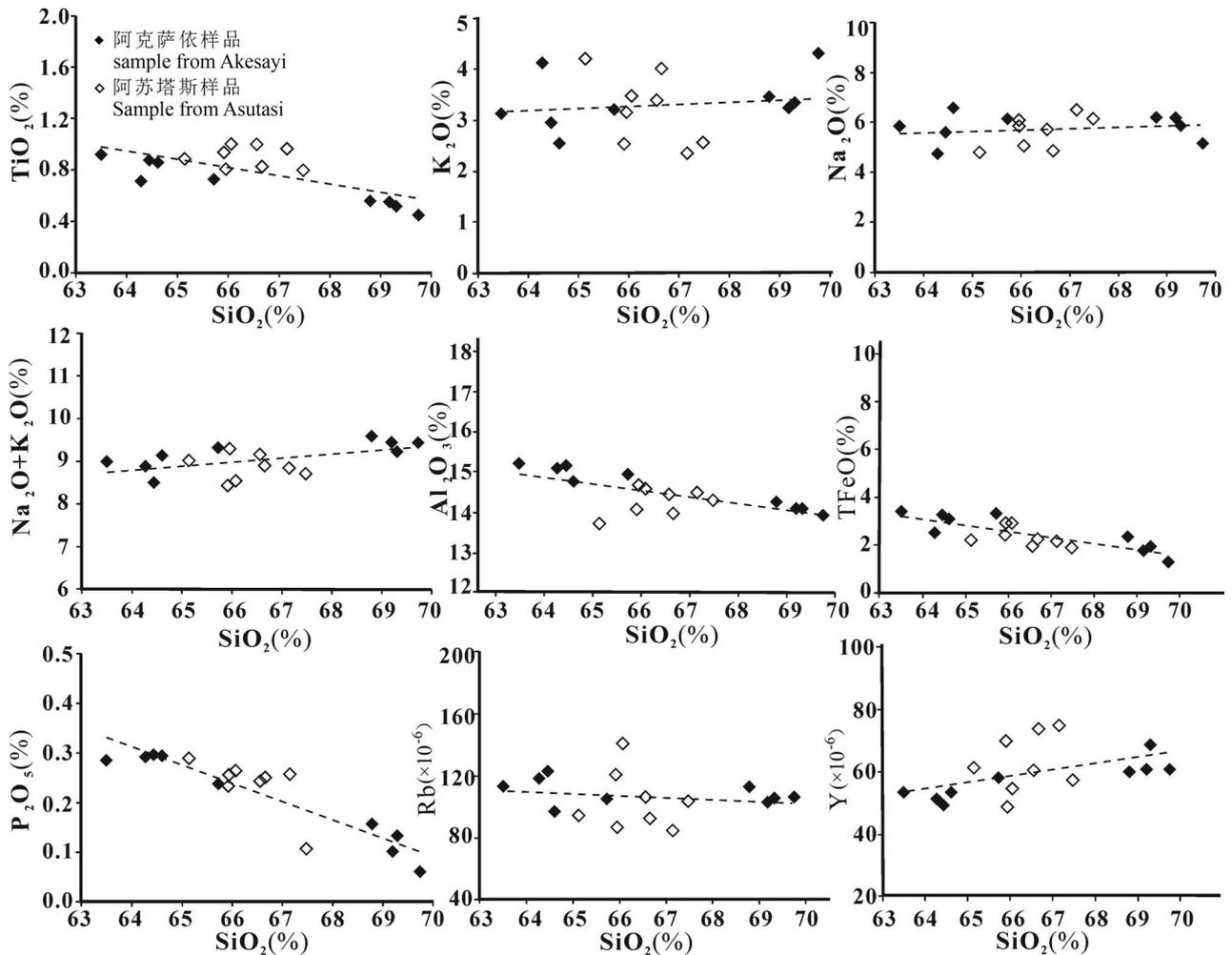


图7 阿吾拉勒山那拉提石英二长岩的哈克图解

Fig. 7 Harker diagrams of quartz monzonite in Nalati area, Awulale Mountain

性花岗岩与钙碱性花岗岩共生的侵入岩组合(邓晋福等,2007;陆凤香等,2002)。

目前,关于A型花岗岩的成因主要有幔源岩浆分异或部分熔融(Pearce et al., 1984)、壳幔物质混合熔融(Qiu Jiansheng et al., 2004)及壳源物质部分熔融(King et al., 1997)等几种解释。地幔中Th的丰度仅为 0.05×10^{-6} (Sun, 1980),而地壳(尤其是花岗岩)中的Th含量高达 $16 \times 10^{-6} \sim 21 \times 10^{-6}$ (Pitcher et al., 1985),那拉提石英二长岩的Th含量为 $8.68 \times 10^{-6} \sim 14.62 \times 10^{-6}$,远高于地幔丰度均值而更接近于地壳。李昌年(1992)认为Nb的负异常能反映花岗岩具有大陆壳的特征,那拉提石英二长岩样品的Nb/Ta值为12.23~29.90,均值为18.13,远低于地幔平均值60,而更接近地壳平均值11(Green et al., 1987)。综合表明岩浆源区主要为地壳,但受到了地幔混染作用的影响,这与西天山在晚石炭世大范

围内存在一期强烈的壳、幔源并存的岩浆活动的背景相吻合(杨蓉等,2017)。

A型花岗岩又分为A₁型和A₂型两类,其中A₁型以其微量元素比值与洋岛玄武岩相类似为特征,岩浆来源于地幔并产生于大陆裂谷或地幔热柱、热点环境,为非造山型;A₂型的微量元素比值与平均地壳及岛弧玄武岩相类似,其岩浆起源于地壳或岛弧岩浆派生,产生于碰撞后或造山期后的张性构造环境,为后造山型(Eby, 1992)。许保良等(1998)具体指出:A₁型花岗岩通常形成于陆壳抬升、陆内裂谷、板内拉张及热点—地幔柱等环境,而A₂型花岗岩形成于碰撞后或造山期后环境,一般为活动大陆边缘环境。邓晋福等(2007)认为大陆裂谷的火成岩组合中侵入岩以无共生的钙碱性花岗岩区别于后造山环境,而那拉提地区的石英二长岩为钙碱性—碱性系列,故不应为陆内裂谷型。那拉提石英二长

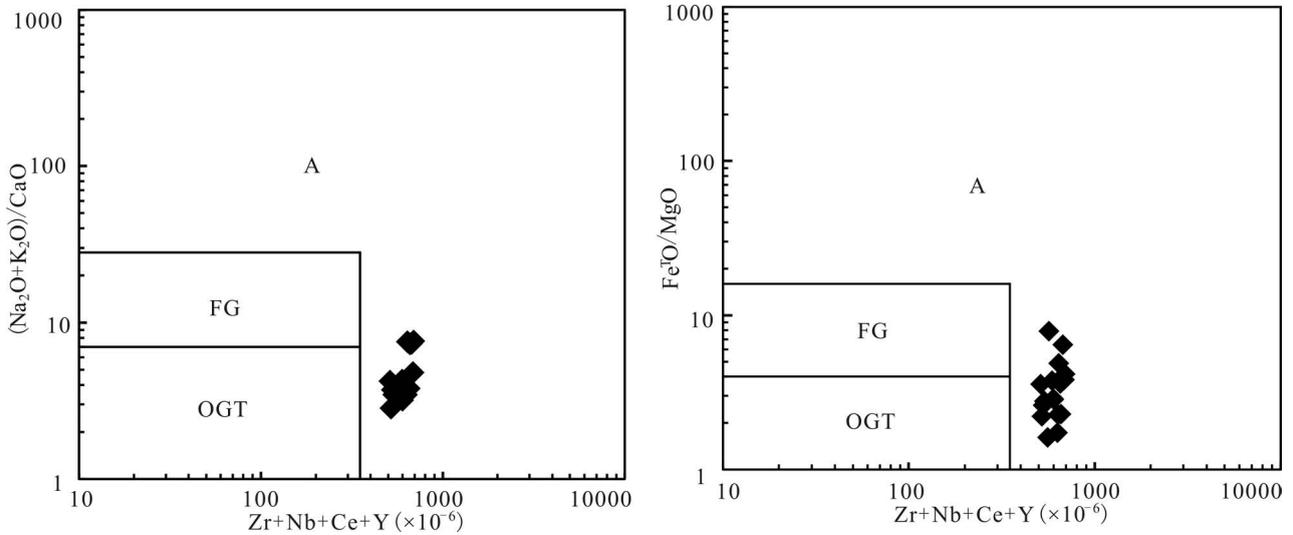


图 8 阿吾拉勒山那拉提石英二长岩(A 型花岗岩)的构造环境判别图解(据 Whalen et al., 1987)

Fig. 8 Tectonic setting discrimination diagrams of quartz monzonite(A-type granite)
in Nalati area, Awulale Mountain(after Whalen et al., 1987)

FG—分异 I,S 型花岗岩类分布区;OGT—未分异 I,S,M 型花岗岩类分布区

FG—distribution area of fractionated,I,S-type granites;OGT—distribution area of aschistic,I,S,M-type granites

岩的微量元素比值 Y/Nb 、 Ce/Nb 分别为 2.30 ~ 5.87、3.58 ~ 7.70, 与 A_2 型花岗岩相类似(Whalen et al., 1987; Eby, 1992), 在 $Nb-Y-Ce$ 与 $Y/Nb-Ce/Nb$ 图解(图 9a、b)中样品均落入造山后 A_2 型花岗岩区。在 $Nb-Y$ (图略)、 $Rb-(Y+Nb)$ 判别图解(图 9d)中样品大多均落入火山弧花岗岩、同碰撞花岗岩与板内花岗岩交界部位, 而这一部位也是造山后(碰撞后)花岗岩的投影范围(张旗等, 2008; 邓晋福等, 2015b), 在 $R1-R2$ 图解(图 9c)中所有样品均落入晚造山花岗岩区(Hugh, 2002)。综合研究认为该岩体应为造山后(碰撞后)或晚造山岩浆作用的产物, 为构造环境转换时形成侵位, 是在碰撞事件之后松弛阶段由壳源而生、地幔混染而成, 其形成与碰撞后的热释放导致温度升高及因区域性上隆引起地幔底辟上升造成的减压熔融有关, 指示由挤压状态向拉伸状态的转变(赵明国等, 1998; 陆凤香等, 2002)。

4.2 构造意义

晚古生代早期, 伊犁微板块南北分别为南天山洋和北天山洋所俯冲(李永军等, 2010; Gao Jun et al., 2009; Long Lingli et al., 2011), 南天山洋在泥盆纪末至早石炭世末期间逐渐闭合, 塔里木板块与伊犁微陆块发生碰撞, 并在二叠纪之前完成碰撞(段士刚等, 2014)。北天山洋于石炭纪逐渐消亡闭合

时, 曾向两侧俯冲(姜常义等, 1993)。然而巴音沟蛇绿岩 325 Ma 的 SHRIMP 年龄的确定及硅质岩中泥盆纪、石炭纪放射虫的存在说明北天山洋盆在早石炭世还有一定的规模。故有人认为西天山增生造山带增生造山结束的时间可能是早石炭世末(高俊等, 2009)。侵入于北天山蛇绿岩中的四棵树花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(316 ± 3 Ma)(Han Baofu et al., 2010)及南部依连哈比尕岩基为晚石炭世(280 ~ 310 Ma)同碰撞花岗岩, 共同限定了北天山洋的闭合时间应在 310 Ma 之前(朱志新等, 2013)。由此表明, 西天山地区在晚石炭世时期北天山洋盆已关闭, 并发生陆块碰撞拼贴转入陆内构造演化阶段。晚石炭世早期西天山北缘的伸展裂隙活动导致了不同程度的火山喷发活动(于海峰等, 2011), 伊宁地块晚石炭世火山岩—侵入岩建造, 是区域性伸展构造背景的产物, 是板块缝合后的陆内建造(李永军等, 2017)。西天山与后碰撞伸展环境相关的花岗岩多形成于晚石炭世(Xu Xueyi et al., 2013), 暗示西天山地区晚石炭世成为该区洋—陆转化和深部动力学转变的重要阶段。本文所研究的那拉提石英二长岩按其所属的大地构造单元划分为伊犁地块北缘花岗岩带(Long Lingli et al., 2011), 按其分布的山脉地理位置及年代为北天山博罗科努—依连哈比尕晚古生代侵入岩带(朱志新等, 2011), 构造位

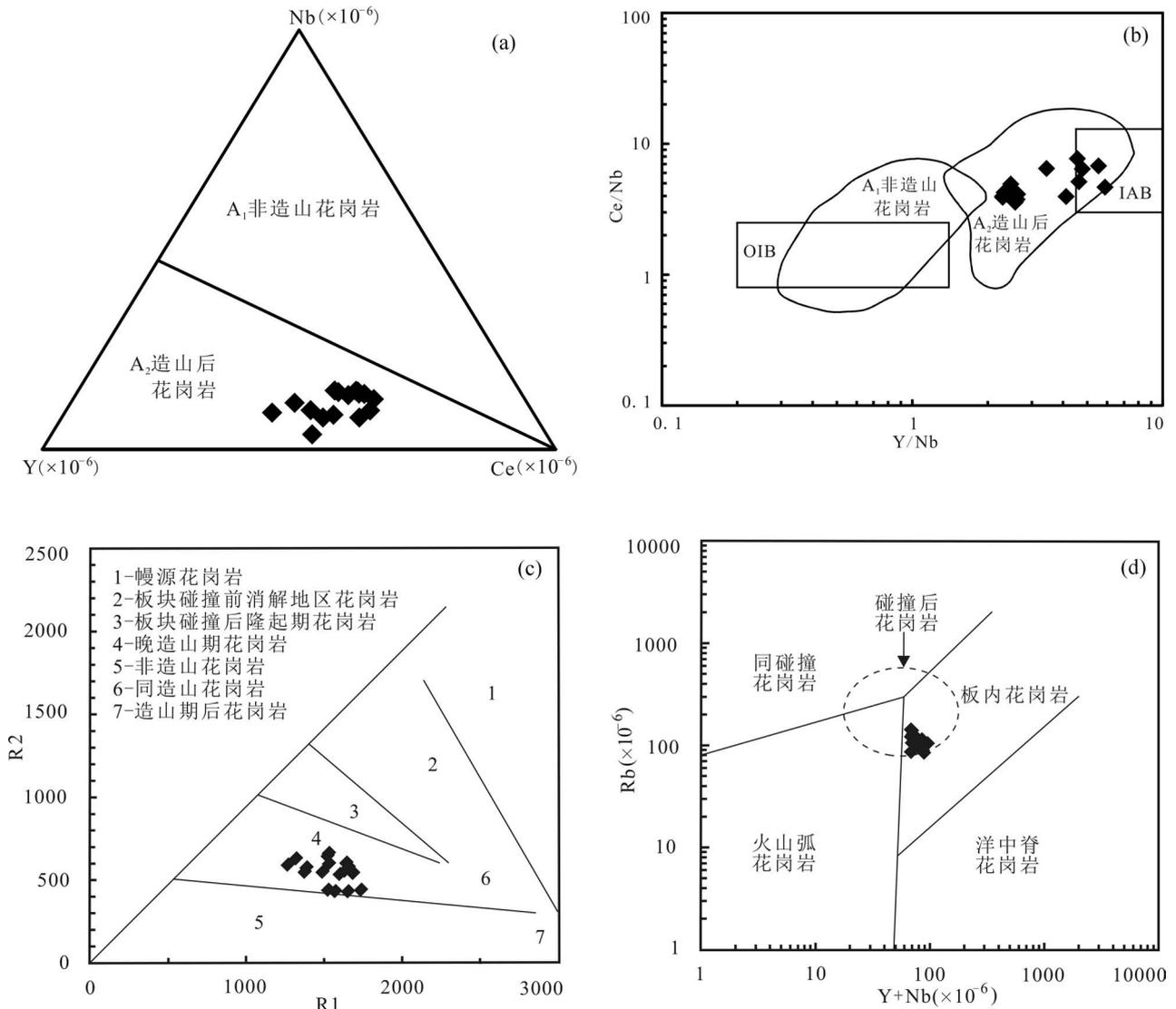


图9 阿吾拉勒山那拉提石英二长岩的构造环境判别图解(据 Eby, 1992; Pearce et al., 1984; Bechelor et al., 1985)

Fig. 9 Tectonic setting discrimination diagrams of quartz monzonite in Nalati area, Awulale Mountain

(after Eby, 1992; Pearce et al., 1984; Bechelor et al., 1985)

置为活动大陆边缘。岩石具有 A_2 型花岗岩的地球化学特征, 指示构造环境由挤压状态向拉伸状态的转变, 即由造山(碰撞)向造山后(碰撞后)或晚造山的转换, 为造山后(碰撞后)或晚造山岩浆作用的产物。是在碰撞事件之后松弛阶段由壳源而生、地幔混染而成, 其形成与碰撞后的热释放导致温度升高有关, 且地幔的熔融与因区域性上隆引起地幔底辟上升造成的减压熔融有关。从而形成了该期特有的岩浆类型, 构成了西天山晚古生代演化过程最为广泛和强烈的一次构造—岩浆热事件(韩宝福等, 1998)。这一岩浆活动的出现意味着陆间碰撞造山、陆内碰撞造山作用旋回的结束, 而进入后造山演

化阶段(邓晋福等, 2007)。前文已指出那拉提石英二长岩侵位于晚石炭世, 而其又形成于造山后或晚造山大地构造环境, 故笔者认为伊犁微板块在 307.0 ± 2.5 Ma 前已与准噶尔微板块碰合, 北天山洋盆闭合时限早于晚石炭世。

5 结论

(1) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学表明, 那拉提石英二长岩年龄为 307.0 ± 2.5 Ma, 代表岩体的成岩年龄, 属于晚石炭世。

(2) 主量元素富 SiO_2 、 Al_2O_3 及碱含量较高, 稀土元素配分模式呈现轻稀土富集的右倾海鸥型, 具

有较为明显的负 Eu 异常,强烈富集大离子亲石元素 Rb、Th、K,亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P,加之矿物组成、岩石成因,共同表明那拉提石英二长岩为准铝质 A₂ 型花岗岩;为造山(碰撞)向造山(碰撞)后或晚造山转换时岩浆作用的产物,属造山后或晚造山花岗岩,岩浆源区主要为地壳,但受到了地幔混染作用的影响。

(3) 那拉提石英二长岩形成于造山后或晚造山作用阶段,表明伊犁微板块在 307.0±2.5 Ma 前已与准噶尔微板块碰合,北天山洋盆闭合时限早于晚石炭世。

致谢:野外工作得到了新疆地质矿产勘查开发局第三地质大队领导及同仁的指导与帮助,样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室弓老师的指导下完成,感谢野外一起工作的同事,感谢审稿专家及章雨旭研究员对本文提出的宝贵修改意见,使我受益良多,在此深表谢意。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

邓晋福,肖庆辉,苏尚国,刘翠,赵国春,吴宗絮,刘勇.2007.火山岩组合与构造环境:讨论.高校地质学报,13(3):392~402.

邓晋福,冯艳芳,狄永军,刘翠,肖庆辉,苏尚国,赵国春,孟斐,马帅,姚图.2015a.岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换.地质论评,61(3):473~484.

邓晋福,刘翠,冯艳芳,肖庆辉,狄永军,苏尚国,赵国春,段培新,戴蒙.2015b.关于火成岩常用图解的正确使用:讨论与建议.地质论评,61(4):717~734.

段士刚,张作衡,魏梦元,田敬佳,蒋宗胜,李凤鸣,赵军,王厚方.2014.新疆西天山雾岭铁矿闪长岩地球化学及锆石 U-Pb 年代学.中国地质,41(6):1757~1770.

高俊,钱青,龙灵利,张喜,李继磊,苏文.2009.西天山的增生造山过程.地质通报,28(12):1804~1816.

韩宝福,王式洗,孙元林,洪大卫.1998.正 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值的准铝过铝花岗岩:新疆也布山岩体.科学通报,43(12):1324~1328.

Hugh R. Rollison. 2000. 岩石地球化学. 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜. 译. 合肥: 中国科学技术大学出版社: 106~117, 155~160.

姜常义, 吴文奎, 谢广成, 李伍平. 1993. 西天山北部石炭纪火山岩特征与沟弧盆体系. 岩石矿物学杂志, 12(3): 224~231.

姜常义, 吴文奎, 张学仁, 崔尚森. 1996. 西天山阿吾拉勒地区岩浆活动与构造演化. 西安地质学院学报, 18(2): 18~24.

蒋宗胜. 2014. 西天山智博铁矿区石炭纪火山作用与铁成矿研究. 导师: 张作衡. 北京: 中国地质科学院博士学位论文: 1~192.

李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社: 97~109.

李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究. 矿物学报, 29(增刊): 600~601.

李晓英. 2013. 西天山阿吾拉勒地区花岗岩及形成构造环境研究. 导师: 徐学义. 西安: 长安大学硕士学位论文: 1~112.

李永军, 李注苍, 佟丽莉, 高占华, 佟黎明. 2010. 论天山古洋盆关闭的地质时限——来自伊宁地块石炭系的新证据. 岩石学报, 26(10): 2905~2912.

李永军, 吴乐, 李书领, 李甘雨, 沈锐, 李钊, 王祚鹏, 汪振宇. 2017. 伊宁地块石炭纪火山岩及其对构造演化的约束. 岩石学报, 33(1): 1~15.

李再会, 林仕良, 丛峰, 邹光富, 谢韬. 2012. 滇西腾冲—梁河地块石英闪长岩—二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义. 地质学报, 86(7): 1047~1062.

李志昌, 路远发, 黄奎成. 2004. 放射性同位素地质学方法与进展. 武汉: 中国地质大学出版社: 160~164.

陆凤香, 桑隆康. 2002. 岩石学. 北京: 地质出版社: 373~385.

牛贺才, 单强, 罗勇, 杨武斌, 周昌平, 廖思平, 于学元. 2010. 西天山玉希莫勒盖达坂石英闪长岩的微量元素地球化学及同位素年代学研究. 岩石学报, 26(10): 2935~2945.

桑隆康, 马昌前. 2012. 岩石学. 2 版. 北京: 地质出版社: 72~78, 181~197.

王强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏—大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定. 岩石矿物学杂志, 19(4): 297~306.

王强, 赵振华, 许继峰, Derek A. WYMAN, 熊小林, 资峰, 白正华. 2006. 天山北部石炭纪埃达克岩—高镁安山岩—富 Nb 岛弧玄武岩: 对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义. 岩石学报, 22(1): 11~30.

吴锁平, 王梅英, 戚开静. 2007. A 型花岗岩研究现状及其评述. 岩石矿物学杂志, 26(1): 59~61.

吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589~1604.

肖序常, 何国琦, 成守德, 李锦轶, 郝杰. 2005. 中国新疆及邻区大地构造图(1:250000)及说明书. 北京: 地质出版社.

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: 1~841.

许保良, 闫国翰, 张臣, 李之彤, 何中甫. 1998. A 型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源. 地学前缘, 5(3): 113~124.

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 TMS 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): 50~75.

杨多, 陈满, 龚全德, 陈天红, 黄菲, 吴昊, 李昊璐. 2017. 内蒙古阿巴嘎旗白音图嘎地区晚石炭世花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 地质论评, 63(5): 1209~1225.

杨蓉, 张成立, 陈春勇, 张晓琪, 苟龙龙, 马中平, 高晓峰, 魏强, 孙吉明, 李平. 2017. 西天山晚石炭世岩浆混合花岗岩的确定及其地质意义. 地质论评, 63(5): 1226~1254.

于海峰, 王福君, 潘明臣, 梁有为, 郭洪方. 2011. 西天山造山带区域构造演化及其大陆动力学解析. 西北地质, 44(2): 25~40.

战明国. 1998. 花岗岩类分类与定位机制研究动向和进展. 中国区域地质, 17(2): 182~188.

张良臣, 吴乃元. 1985. 天山地质构造及演化史. 新疆地质, 3(3): 1~14.

张旗, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤, 李承东. 2008. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别. 地质通报, 27(1): 1~18.

张旗. 2012. 评花岗岩的哈克图解. 岩石矿物学杂志, 31(3): 425~431.

朱志新, 董连慧, 王克卓, 赵同阳, 徐仕琪, 陈邦学, 李平, 靳留圆. 2013. 西天山造山带构造单元划分与构造演化. 地质通报, 32(2~3): 297~306.

朱志新, 李锦轶, 董连慧, 王克卓, 张晓帆, 徐仕琪. 2011. 新疆西天山古生代侵入岩的地质特征及构造意义. 地学前缘, 18(2): 170~

- 179.
- 左国朝,张作衡,王志良,刘敏,王龙生.2008.新疆西天山地区构造单元划分、地层系统及其构造演化.地质论评,54(6):748~767.
- Allen M B, Windley B F, Zhang C. 1992. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tianshan, central Asia. *Tectonophysics*, 220:89~115.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1~2):59~79.
- Batchelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48(1):43~55
- Chappell B W, White A J R. 1992. I and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83:1~26.
- Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Liu Cui, Zhao Guochun, Wu Zhongxu, Liu Yong. 2007. Igneous petrotectonic assemblages and tectonic settings; discussion. *Geological Journal of China Universities*, 13(3):392~402.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Meng Fei, Yao Tu. 2015a. Magmatic arc and Ocean—Continent Transition; discussion. *Geological Review*, 61(3):473~484.
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015b. On the correct application in the common igneous petrological diagrams; discussion and suggestion. *Geological Review*, 61(4):717~734.
- Duan Shigang, Zhang Zuoheng, Wei Mengyuan, Tian Jingquan, Jiang Zongsheng, Li Fengming, Zhao Jun, Wang Houfang. 2014. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the diorite associated with the Wuling iron deposit in Western Tianshan mountains, Xinjiang. *Geology in China*, 41(6):1757~1770.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids; Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7):641~644.
- Gao Jun, Long Lingli, Klemd Reiner, Qian Qing, Liu Dunyi, Xiong Xianming, Su Wen, Liu Wei, Wang Yitian, Yang Fuquan. 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China; Geochemical and age constraints of granitoid rocks. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6):1221~1238.
- Gao Jun, Qian Qin, Long Lingli, Zhang Xi, Li Jilei, Su Wen. 2009. Accretionary orogenic process of Western Tianshan, China. *Geological Bulletin of China*, 28(12):1804~1816.
- Green T H, Pearson N J. 1987. An experimental study of Nb and Ta partitioning between Ti-rich minerals and silicate liquids at high pressure and temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(1):55~62.
- Han Baofu, Wang Shiguang, Sun Yuanlin, Hong Dawei. 1998. Metaluminous—Peraluminous granite with positive $\epsilon\text{Nd}(T)$ values; Yebushan pluton, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 43(12):1324~1328.
- Han Baofu, Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Zhang Lei, Chen Jiafu, Song Biao. 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tianshan suture zone, western China. *Geological Society of American Bulletin*, 122(3):627~640.
- Hugh R R. 2002. *Petrological Geochemistry*. Yang Xueming, Yang Xiaoyong, Chen Shuangxi. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 106~117, 155~160.
- Jiang Changyi, Wu Wenkui, Xie Guangcheng, Li Wuping. 1993. Characteristics of Carboniferous volcanic rocks and the trench—arc basin system in the northern part of Western Tianshan mountains. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(3):224~231.
- Jiang Changyi, Wu Wenkui, Zhang Xueren, Cui Shangsen. 1996. Magma action and tectonic evolution in Awulale district, Western Tianshan mountain. *Journal of XI AN College of Geology*, 18(2):18~24.
- Jiang Zongsheng. 2014. Carboniferous volcanism and Fe mineralization at the Zhibo iron deposit in the Western Tianshan. Supervisor: Zhang Zuoheng. Beijing: A dissertation submitted to Chinese academy of Geological Sciences for Doctoral Degree: 1~192.
- King P L, White A J R, Chappell B W, Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3):371~391.
- Li Changnian. 1992. Petrology of trace elements in igneous rocks. Wuhan: China University of Geosciences Press, 97~109.
- Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, Zhang Yongqing, Li Huimin. 2009. Research on the dating zircon U - Pb age by LA - MC - ICPMS. *Journal of Mineralogy*, 29(Sup):600~601.
- Li Xiaoying. 2013. Research of granite formation and tectonic environment of the Awulale region, Western Tianshan mountain, China. Supervisor: Xu Xueyi. Xi'an: A dissertation submitted for the Degree of Master: 1~112.
- Li Yongjun, Li Zhucang, Tong Lili, Gao Zhanhua, Tong Liming. 2010. Revisit the constraints on the closure of the Tianshan ancient oceanic basin new evidence from Yining block of the Carboniferous. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10):2905~2912.
- Li Yongjun, Wu Le, Li Shuling, Li Ganyu, Shen Rui, Li Zhao, Wang Zuopeng, Wang Zhenyu. 2017. Tectonic evolution of Yining block: Insights from Carboniferous volcanic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 33(1):1~15.
- Li Zaihui, Lin Shiliang, Cong Feng, Zou Guangfu, Xie Tao. 2012. U-Pb dating and Hf isotopic compositions of quartz and monzonitic granite from the Tengchong—Lianghe block, Western Yunnan, and its geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 86(7):1047~1062.
- Li Zhichang, Lu Yuanfa, Huang Kuicheng. 2004. *Methodology and Progress in Radioactivity Isotope Geology*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 160~164.
- Long Lingli, Gao Jun, Klemd Reiner, Beier Christoph, Qian Qian, Zhang Xi, Wang Jingbin, Jiang Tuo. 2011. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan orogeny: Implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 126:321~340.
- Ludwig K R. 2001. *Squid 1.02: A user's manual*. Berkeley Geochronology Centre, Special Publication, 2:15~25.
- Lu Fengxiang, Sang Longkang. 2002. *Petrology*. Beijing: Geological Publish House, 373~380.
- Niu Hecai, Shan Qiang, Luo Yong, Yang Wubin, Zhou Changping, Liao Siping, Yu Xueyuan. 2010. Geochronological and geochemical studies on quartz diorite in Yuximolegai Daban, West Tianshan and its tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10):2935~2945.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25:656~682.
- Pitcher W S and Cobbing E J. 1985. Phanerozoic plutonism in the Peruvian edge. (in) Pitcher et al (eds). *Magmatism at a plate edge*, London: Blackie, 19~25.
- Qiu Jianshen, Wang Dezi, McInnes B I A, Jiang Shaoyong, Wang Rucheng, Kanisawa S. 2004. Two subgroups of A-type granites in the

- coastal area of Zhejiang and Fujian provinces, SE China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh; Earth Sciences*, 95(1~2): 227~236.
- Shang Longkang, Ma Changqian. 2012. *Petrology*. Second. Beijing: Geological Publish House, 72~78, 181~197.
- Sun Linhua, Wang Yuejun, Fan Weiming, Zi Jianwei. 2008. Post-collisional potassic magmatism in the Southern Awulale Mountain, western Tianshan Orogen: Petrogenetic and tectonic implications. *Gondwana Research*, 14(3): 383~394.
- Sun S S. 1980. Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Phil. R. Soc. Lond.*, 297: 409~445.
- Wang Bo, Chen Yan, Zhan Sheng, Shu Liangshu. 2007. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from the Yili Block (NW China) and their implications on the geodynamic evolution of Chinese Tianshan Belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 263: 288~308.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin. 2000. The ascertainments of Late-Yanshannian A-type granites in Tongbai—Dabie orogenic belt. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 297~306.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, Wyman D A, Xiong Xiaolin, Zi Feng, Bai Zhenghua. 2006. Carboniferous adakite—high-Mg andesite—Nb-enriched basaltic rock suites in the Northern Tianshan area: Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia Orogenic Belt and Cu—Au mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 11~30.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~419.
- Wu Suoping, Wang Meiyang, Qi Kaijing. 2007. Present situation of researches on A-type granites: a review. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 59~61.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genetic mineralogy of zircons and its constraints to the age of U-Pb geochronology. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589~1604.
- Xu Baoliang, Yan Guohan, Zhang Chen, Li Zhitong, He Zhongpu. 1998. Petrological subdivision and source material of A-type granites. *Earth Science Frontier*, 5(3): 113~124.
- Xu Xueyi, Ma Zhongping, Xia Zuchun, Xia Linqi, Li Xiangmin, Wang Lishi. 2006. TMS U - Pb Isotopic dating and geochemical characteristics of Paleozoic granitic rocks from the Middle—Western section of Tianshan. *Northwestern Geology*, 39(1): 50~75.
- Xu Xueyi, Wang Hongliang, Li Ping, Chen Junlu, Ma Zhongping, Zhu Tao, Wang Ning, Dong Yunpeng. 2013. Geochemistry and geochronology of Paleozoic intrusions in the Nalati (Narati) area in Western Tianshan, Xinjiang, China: Implications for Paleozoic tectonic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 33~62.
- Yang Duo, Chen Man, Gong Quande, Chen Tianhong, Huang Fei, Wu Hao, Li Haolu. 2017. Geochemical characteristics, zircon U - Pb ages of the Late Carboniferous granite in Baiyintuga area, Abaga Banner, Inner Mongolia and their Geological significance. *Geological Review*, 63(5): 1209~1225.
- Yang Rong, Zhang Chengli, Chen Chunyong, Zhang Xiaoqi, Gou Longlong, Ma Zhongping, Gao Xiaofeng, Wei Qiang, Sun Jiming, Li Ping. 2017. Determination and geological significance of Late Carboniferous magma mixing granitoids in the Western Tianshan mountains—Evidence from zircon LA - ICP - MS U - Pb age and petro-geochemical characteristics of Yuqibulake and Wutujinghe plutons. *Geological Review*, 63(5): 1226~1254.
- Yu Haifeng, Wang Fujun, Pan Mingchen, Liang Youwei, Guo Hongfang. 2011. Regional tectonic evolution and continental dynamic characteristics of Western Tianshan orogenic belt. *Northwestern Geology*, 44(2): 25~40.
- Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, Li Huiming, Günthe Detler, Wu Fuyua. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353~370.
- Zhan Mingguo. 1998. Trend and progress in the study of the classification and emplacement mechanism of granitoids. *Regional Geology of China*, 17(2): 182~188.
- Zhang Liangchen, Wu Naiyuan. 1985. The geotectonic and its evolution of Tianshan. *Xinjiang Geology*, 3(3): 1~14.
- Zhang Qi, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia Xiuqin, Li Chengdong. 2008. Criteria for the recognition of pre-, syn- and post-orogenic granitic rocks, China. *Geological Bulletin of China*, 27(1): 1~18.
- Zhang Qi. 2012. A discussion on Harker diagram of granites. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(3): 425~431.
- Zhu Zhixin, Dong Lianhui, Wang Kezhao, Zhao Tongyang, Xu Shiqi, Chen Bangxue, Li Ping, Jin Liuyuan. 2013. Accretionary orogenic process of Western Tianshan, China. *Geological Bulletin of China*, 32(2~3): 297~306.
- Zhu Zhixin, Li Jinyi, Dong Lianhui, Wang Kezhao, Zhang Xiaofan, Xu Shiqi. 2011. Geological characteristics and tectonic significance of Paleozoic intrusive rocks in western Tianshan of Xinjiang Province. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 170~179.
- Zuo Guochao, Zhang Zuoheng, Wang Zhiliang, Liu Min, Wang Longsheng. 2008. Tectonic division, Stratigraphical system and the evolution of Western Tianshan mountains, Xinjiang. *Geological Review*, 54(6): 748~767.

Zircon U-Pb LA-ICP-MS Dating and Tectonic Significance of the Quartz Monzonite from the Nalati Area of Awulale Mountain, Western Tianshan Mountains, Xinjiang

HAO Zengyuan¹⁾, LIU Xudong²⁾, LI Decheng¹⁾, LEI Dong¹⁾, NIU Ru¹⁾, DING Haibo³⁾

1) Xi'an Institute of Geological Survey and Mineral Exploration, Xi'an, 710100;

2) Shaanxi Bureau of Geological and Mineral Resources, Geophysical and Geochemical Exploration Team, Xi'an, 710043;

3) No. 3 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geological and Mineral Resources, Korla, Xinjiang, 841000

Abstract: The Nalati quartz monzonite located at Awulale mountain, northern margin of the Ili tiny Plate, intruded in the Upper Carboniferous Yishenjilike Formation, The weighted average age dated by LA-ICP-MS U-Pb method of zircons is 307.0 ± 2.5 Ma, representing its crystalline and intrusive age. Petrogeochemical analyses suggest the quartz monzonite belongs to calc-alkaline—alkaline metaluminous granite series, which is characterized by high silica, aluminum and alkaline, σ is $3.09 \sim 3.94$, A/CNK is $0.75 \sim 0.91$; the rocks have relatively high total of Rare Earth Elements (REE) content with LREE riched patterns [$(La/Yb)_N = 2.86 \sim 6.14$] of chondrite normalized, LREE are differentiated intenser than HREE, Eu show obviously negative anomalies ($\delta Eu = 0.46 \sim 1.02$, average = 0.69); The rocks enriched in large ion lithophile elements (LILE) Rb, Th and K, while strongly depleted in high field strength elements (HFSE) Nb, Ta, Ti and P; these show that the Nalati quartz monzonite has the characteristics of A_2 -type granite. The high Th values ($8.68 \times 10^{-6} \sim 14.62 \times 10^{-6}$) and low Nb/Ta ratios ($12.23 \sim 29.90$, average 18.13) imply that the main source of magma was continental crust, but the magma experienced a significant contamination by mantle. In the tectonic setting discrimination diagrams (Nb—Y—Ce, Y/Nb—Ce/Nb, Rb—(Nb+Y) et al.), the most data project into the area of post-orogenic or late orogenic granite.

Writers reach a consensus that the rock was the product formed during the period syn-orogen transformed to post-orogen or late orogen, it was formed by post-orogenic or late orogenic magmatism. Combining with regional geological setting, this study suggests that the Ili tiny Plate and Junggar tiny Plate had collided before the time of 307.0 ± 2.5 Ma, the northern Tianshan oceanic basin had closed before Late Carboniferous. These new data provide new constrains for tectonic evolution of the Western Tianshan Mountains.

Keywords: quartz monzonite; zircon U-Pb age; Post-orogen; Nalati; Western Tianshan Mountains, Xinjiang

Acknowledgement: This study was supported by China Geological Survey and Mineral Prediction Program (1 : 50000) (NO.121201004000150017-49).

First author: HAO Zengyuan, male, born in 1987, engineer, mainly engaged in regional and mineral geological survey; Email: 714044937@qq.com

Manuscript received on: 2017-11-01; Accepted on: 2018-05-11; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.04.005