

文章编号: 1006-6616 (2017) 03-0358-11

甘肃北山中泥盆世哈尔特尔德勒花岗岩体的地球化学特征及其构造意义

计波^{1,2}, 余吉远^{1,2}, 郭琳^{1,2}, 过磊^{1,2}, 卜涛^{1,2}

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

2. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054)

摘要: 牛圈子哈尔特尔德勒岩体具有高硅 ($\text{Si} > 72.2\%$)、高碱 ($\text{AR} = 2.9 \sim 5.1$, $\text{K}_2\text{O} = 3.86\% \sim 5.49\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 3.04\% \sim 3.83\%$) 和高 FeOT/MgO 值 ($3.29 \sim 13.47$)、低 Al_2O_3 ($11.48\% \sim 13.42\%$)、贫 CaO ($0.57\% \sim 2.27\%$) 和 MgO ($0.14\% \sim 0.78\%$)、低 FeO_T ($1.33\% \sim 2.34\%$) 的特征, A/NK 值为 $1.43 \sim 1.77$, A/CNK 值为 $1.35 \sim 1.4$, 为过铝质高钾钙碱性花岗岩。 ΣREE 较高, LREE 略富集 ($(\text{La}/\text{Yb}) \text{N} = 4.9 \sim 16$), 轻重稀土元素分馏不明显, Eu 负异常明显 ($\delta\text{Eu} = 0.12 \sim 0.21$); 相对富集 Rb 、 K 、 Pb 等大离子亲石元素, 强烈亏损 Ba 、 Sr 、 P 、 Ti 、 Eu , 并弱亏损 Ta 、 Nb 等元素; 同时具有与地壳更为接近的 Nb/Ta 与 Nd/Th 值, 显示了 A (A_2) 型花岗岩的特征。 LA-ICP-MS 锆石定年获得哈尔特尔德勒岩体的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $371.7 \pm 2.9 \text{ Ma}$, 代表该岩体的形成年龄, 表明其为中泥盆世岩浆活动的产物。结合区域构造演化以及区域同时代 A 型花岗岩的对比显示, 该岩体形成于后碰撞伸展环境。

关键词: 哈尔特尔德勒花岗岩体; A 型花岗岩; 锆石定年; 后碰撞构造; 中泥盆世

中图分类号: P595 P588.121

文献标识码: A

0 引言

北山地区位于内蒙古、甘肃和新疆交界地带, 西邻天山和阿尔泰山, 东邻阿拉善地区。在大地构造位置上属于中亚造山带南缘, 是华北板块、塔里木板块和哈萨克斯坦板块陆缘结合部, 构造极为复杂, 为一多旋回造山^[1-5]。北山地区是中亚造山作用方式及时限研究的关键地区, 对于不同板块或其陆缘带在北山地区延伸的范围、板块间古洋盆闭合的位置以及时间等问题一直存在争议。北山地区自北向南依次存在四条近东西向的蛇绿岩混杂带: I: 红石山—百合山—蓬勃山蛇绿岩带、II: 明水—石板井—小黄山蛇绿岩带、III: 红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿岩带、IV: 柳园—辉铜山—账房山蛇绿岩带^[3,6]。红柳河—牛圈子—洗肠井为北山造山带中部重要的组成部分, 是划分哈萨克斯坦和塔里木板块的重要缝合带^[2,6-8],

但对其演化的时限、大地构造环境等方面存在争议, 特别是对北山地区由碰撞挤压向伸展拉张转变的时限及相应岩浆活动的研究较少。本文选择牛圈子蛇绿岩带南侧的哈尔特尔德勒花岗岩体为研究对象, 通过 LA-ICP-MS 锆石定年和地球化学分析研究, 对该岩体的形成年代、成因机制及构造意义进行探讨, 为牛圈子地区晚古生代的构造环境及其演化提供新的资料。

1 区域地质背景

哈尔特尔德勒花岗岩体 (见图 1) 位于甘肃省牛圈子煤矿南部 54 km 处, 大地构造位置上位于天山—兴蒙造山带塔里木板块东北缘, 主要分布在双鹰山被动陆缘; 南以东大泉深大断裂为界, 与红柳园古生代多旋回裂谷单元相邻, 北与牛圈子弧后盆地单元之间被牛圈子—火石山大断裂分割。区内出露地层包括前长城系敦煌岩群 (AnD)、长城系古硐井群 (ChG)、

收稿日期: 2016-11-08

基金项目: 中国地质大调查项目 (12120113046400)

作者简介: 计波 (1986-), 男, 工程师, 从事区域地质调查、沉积学、岩石地球化学研究。E-mail: 46880421@qq.com

蓟县平头山组 (Jxp)、青白口大豁落组 (Qnd)、奥陶系罗雅楚山组 (Ol)、锡林柯博组 (Ox)、白云山组 (Ob) 以及第四系。区内构造变形复杂,主要包括前长城—长城纪地层内的韧性变形组合,蓟县-青白口系与前长城-长城系之间的伸展构造组合,早古生代末逆冲推覆构造组合,晚古生代走滑构造组合及中生代的断陷盆地组合。研究区内分布有规模较大的复式岩基,其中包括中北部小面积分布的奥陶纪角闪辉长岩 (460 Ma),中北部志留纪角闪闪长岩 (421 ~ 434 Ma)、中—中南部泥盆纪二长花岗岩 (371 Ma) 与晚二叠纪花岗闪长岩 (258 Ma)^[9] 以及多种类型的岩脉,并且在周边地区发现有最老的双峰山早泥盆世 A 型花岗岩 ($415 \pm 3\text{Ma}$)^[10],火石山哈儿根头口布早一中泥盆世 A 型花岗岩 ($387.6 \pm 8.2\text{Ma}$)^[11] 以及花牛山、东大泉等多个中生代 A 型花岗岩体^[12],表明该地区各个时期的岩浆活动十分频繁,晚古生代和中生

代 A 型花岗岩尤为发育。

2 岩体地质及岩相学

哈尔特尔德勒花岗岩体宏观上呈舌状近北东—南西向展布,岩体呈岩基出露,出露面积约 214 km^2 ,具清楚的齿状边界、局部可见烘烤边,无变形,局部风化剥蚀较强,可见球状风化。岩体以黑云母二长花岗岩为主,局部出露钾长花岗岩,两者呈渐变过渡接触。岩体内部发育近南北走向的基性脉岩,岩石以辉绿岩、灰绿玢岩为主,宽 $1\text{ m} \sim 5\text{ m}$ 不等,最长达 3 km 。围岩为奥陶纪罗雅楚山组,与岩体呈明显的侵入接触关系。该组以碎屑岩为主,主要岩性为长石石英砂岩、石英岩、硅质板岩,夹有少量灰岩及砂砾岩,花岗岩体内部也出现罗雅楚山组的顶垂体。

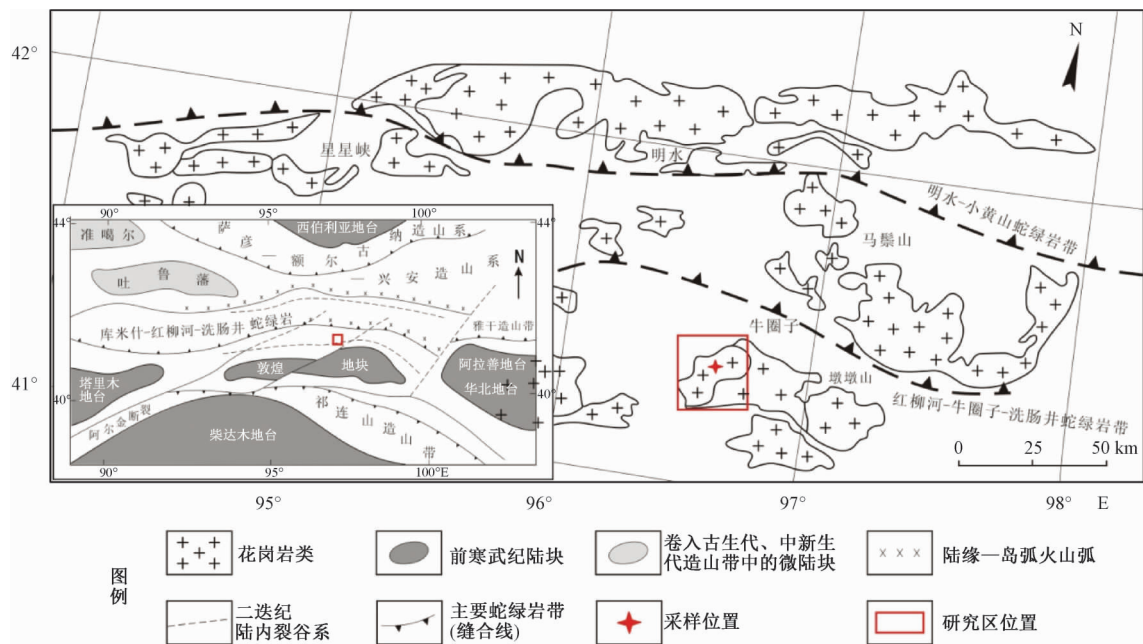


图1 甘肃北山哈尔特尔德勒岩体地质简图^[13]

Fig. 1 Geological sketch map of the granite mass in Haarteerdele area, Beishan, Gansu Province

黑云母二长花岗岩: 浅肉红色, 花岗结构, 块状构造。主要组成矿物为钾长石 (35% ~ 45%)、斜长石 (25% ~ 30%)、石英 (20% ~ 25%)、黑云母 (5% ~ 10%)。钾长石由具格状双晶的微斜长石组成, 颗粒越大相对自形程度越高; 斜长石多呈半自形板状、粒状, 常见聚片双晶, 局部有斜长石形成的蠕虫结构, 具轻微的绢云母化、黝帘石化; 石英呈他行粒状; 黑云母呈片状, 多色性明显, 具绿泥石化。含微量磷灰石、不透明矿物, 次生矿物为绢

云母、黝帘石、绿泥石与绿帘石。

3 样品特征及分析方法

3.1 样品特征

本次野外地球化学样品均采自哈尔特尔德勒岩体内部基岩出露较好的部位, 采集位置避开了岩体内的接触带, 蚀变带和断裂破碎带等, 样品新鲜, 能够代表整个岩体的特征。经过仔细的镜

下鉴定挑选出 10 件黑云母二长花岗岩样品,用于锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年的样品采自黑云母二长花岗岩(编号:TW07)的内部,采样处经纬度为 96.545°, 41.351°。

3.2 分析方法

主量元素、微量元素、锆石的 CL 图像以及 LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 年龄测定均由中国地质调查局西安地质调查中心国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室分析测试。主量元素通过荧光光谱仪(XRF)测定,分析精度优于 5%,分析方法采用熔融制片法,用碱熔法测 Fe₂O₃,用酸溶法测 FeO。微量元素采用 ICP-MS(等离子质谱法)分析,分析精度均高于 10%。锆石年龄采用国际

标准锆石 91500 作为外标标准物质,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标,²⁹Si 作为内标。测试结果通过 GLITTER(ver4.0, Mac-quaie University)软件计算得出,用 LAM-ICPMS Common Lead Correction(ver3.15)对其进行了普通铅校正,年龄计算及谐和图采用 Isoplot(ver3.0)完成。详细分析步骤和数据处理方法参见参考文献^[14]。

4 分析结果

4.1 地球化学特征

哈尔特尔德勒岩体二长花岗岩主量元素、微量元素、稀土元素分析结果见表 1。

表 1 哈尔特尔德勒二长花岗岩主量元素及稀土、微量元素分析结果

样品	YQ-3	YQ-21	YQ-32	YQ-6	YQ-9	YQ-23	YQ-41	YQ-1	YQ-15	YQ-26
SiO ₂	78.0	74.59	76.15	76	76.28	75.66	77.0	75.6	74.98	72.2
Al ₂ O ₃	11.5	13.31	12.38	12.34	12.19	12.33	12.1	12.5	12.58	13.42
Fe ₂ O ₃	0.01	0.01	0.01	0.58	0.06	0.24	0.01	0.01	0.1	0.01
FeO	1.32	1.74	1.96	1.02	1.45	1.6	1.33	2.33	1.82	2.3
CaO	0.74	0.57	0.8	0.67	0.84	0.7	0.6	0.89	1.24	2.27
MgO	0.21	0.33	0.22	0.2	0.14	0.15	0.14	0.21	0.42	0.78
K ₂ O	4.37	5.49	4.92	4.86	4.59	5.32	5.05	4.84	4.52	3.86
Na ₂ O	3.2	3.83	3.14	3.35	3.5	3.04	3.07	3.35	3.25	3.72
TiO ₂	0.12	0.17	0.16	0.14	0.13	0.15	0.12	0.14	0.22	0.24
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.06
MnO	0.02	0.02	0.03	0.02	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04
LOI	0.7	0.76	0.74	0.77	0.75	1.06	0.63	1.08	0.79	1.69
Pb	34.2	22	29.7	38.3	34	26.8	39.7	36.3	25.4	26.3
Cr	6.49	9.46	15.2	8.5	4.31	11.6	2.16	4.24	7.71	9.14
Ni	1.87	3.49	6.21	4.77	1.55	2.42	0.83	1.94	3.14	5.38
Co	1.08	2.72	1.29	2.16	0.87	1.94	0.62	1.1	2.66	3.2
Rb	273	164	251	214	339	182	191	222	199	209
Cs	3.54	1.58	2.38	4.14	11	2.33	1.74	4.02	2.22	4.64
Sr	41.4	77.4	74.5	45.8	27.1	69.1	40.4	39.4	80.7	174
Ba	121	350	297	150	114	414	145	151	404	366
Sc	1.83	7.22	3.63	2.62	1.6	7.46	2.66	1.54	8.91	6.05
Nb	14.6	10.2	12.9	17.4	19.5	12.8	11.3	14.5	13.1	15.2
Ta	1.15	0.85	1.03	1.28	1.54	0.94	0.93	1.14	0.95	1.3
Zr	130	241	265	220	203	235	178	160	201	156
Hf	5.45	6.86	7.43	6.62	7.28	6.71	5.8	5.59	6.21	5.04
U	3.76	1.86	1.83	2.75	4.9	1.58	1.92	1.76	2.34	2.36
Th	45.3	18.8	25.5	25.6	29.7	19.5	18.2	25.9	20	21
La	49.9	82.1	103	73.8	53.3	112	42.7	54.1	58.8	46.4
Ce	110	175	195	150	120	209	83.4	117	132	97.5
Pr	12.7	20.2	20.9	18.4	13.7	22.5	9.54	13.7	15.8	12
Nd	48.8	78.2	78.2	69.8	53.6	85.7	34.3	53	64.3	47
Sm	10.5	14.8	15.8	14.4	12.2	15.2	8.33	11.5	15.5	11.4
Eu	0.4	0.64	0.74	0.56	0.41	0.82	0.53	0.48	0.72	0.62
Gd	9.9	11.8	14.9	12.9	12.3	13.2	6.98	10.9	16.6	11.8
Tb	1.7	1.78	2.41	2.14	2.07	2.04	1.09	1.8	2.75	2.08
Dy	9.98	9.08	13.5	11.4	12.6	10.8	5.89	10.4	15.6	12.5
Ho	1.96	1.66	2.58	2.28	2.51	2.12	1.18	2.02	2.98	2.52
Er	5.56	4.4	6.78	6.22	7.27	5.76	3.18	5.63	7.83	7.1
Tm	0.87	0.64	0.96	0.9	1.09	0.82	0.49	0.85	1.09	1.08
Yb	5.31	3.73	5.55	5.32	7.05	5.02	3.17	5.26	6.3	6.74
Lu	0.77	0.53	0.75	0.78	0.97	0.73	0.51	0.78	0.85	0.93
Y	57.3	37.8	69.4	60.2	74.3	54.4	27.7	55.1	85.3	74.7
LREE	232.3	370.94	413.64	326.96	253.21	445.22	178.8	249.78	287.12	214.92
HREE	36.05	33.62	47.43	41.94	45.86	40.49	22.49	37.64	54	44.75
δEu	0.12	0.14	0.15	0.12	0.1	0.17	0.21	0.13	0.14	0.16

4. 1. 1 主量元素

该岩体中二长花岗岩的主量元素具有高硅 ($\text{SiO}_2 = 72.2\% \sim 78.03\%$)、高碱 ($\text{K}_2\text{O} = 3.86\% \sim 5.49\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 3.04\% \sim 3.83\%$) 和高 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 值 ($3.29 \sim 13.47$, 平均值 8.8)、低 Al_2O_3 ($11.48\% \sim 13.42\%$)、贫 CaO ($0.57\% \sim 2.27\%$, 平均值 0.95%) 和 MgO ($0.14\% \sim 0.78\%$)、低 FeO^{T} ($1.33\% \sim 2.34\%$) 的特征, 与典型 A 型花

岗岩的主量元素特征较为一致, 并且在 A 型花岗岩判别图中^[15-16] (见图 2), 基本都落入了 A 型花岗岩区域。岩石的碱度率 AR 为 $2.9 \sim 5.1$, 里特曼指数 ($\sigma = 1.6 \sim 2.7$) 均小于 3.3 , 属钙碱性系列, 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中 (见图 3a) 也显示高钾钙碱性系列的特点。A/NK 值为 $1.43 \sim 1.77$, A/CNK 值为 $1.35 \sim 1.4$, 在铝饱和指数判别图解中 (见图 3b) 显示过铝质花岗岩的特点。

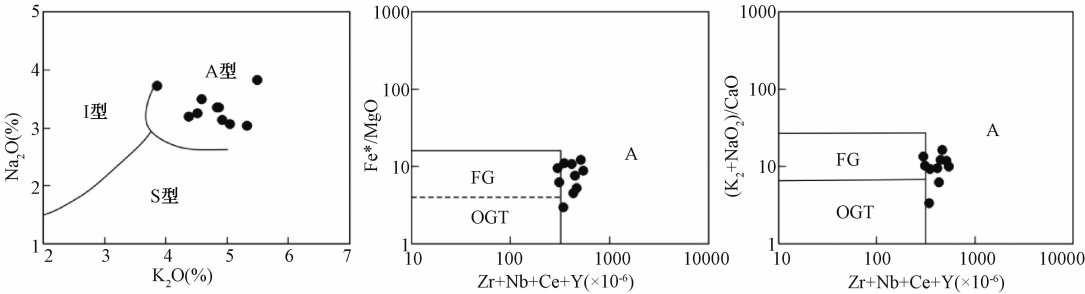


图 2 哈尔特尔德勒花岗岩类型判别图^[15-16]
Fig. 2 Discrimination diagrams of the Haarteerdele granite types

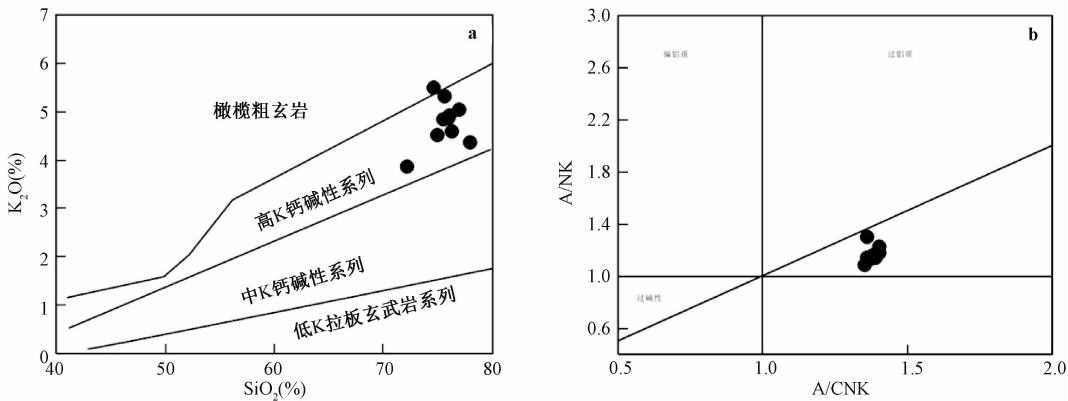


图 3 哈尔特尔德勒花岗岩 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解 (a)^[17] 和 $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ 图解 (b)^[18]
Fig. 3 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram (a) and $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ diagram (b) of the Haarteerdele granites

4. 1. 2 微量元素与稀土元素

该岩体的稀土元素含量较高, $\Sigma\text{REE} = (101.51 \sim 616.04) \times 10^{-6}$, 轻重稀土元素分馏不十分明显, 除一个样品值较高外, 其余 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 4.9 \sim 16$, 平均值 9.6 , 与重稀土元素相比略富轻稀土元素, 且轻稀土元素 $[(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 2.4 \sim 4.8]$ 较重稀土元素 $[(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.4 \sim 2.6]$ 分馏明显, 在球粒陨石标准化图解中 (见图 4a) 表现较为平坦。Eu 负异常明显 ($\delta\text{Eu} = 0.12 \sim 0.21$), 暗示斜长石在源区残留, 稀土元素分配模式总体呈近“海鸥型”。

在原始地幔标准化蛛网图中 (见图 4b), 明显

富集 Rb、K、Pb 等大离子亲石元素, 强烈亏损 Ba、Sr、P、Ti, Eu, 并若亏损 Ta、Nb 等元素。在花岗岩类型判别图中^[15] (见图 2), 样品基本落入 A 型花岗岩区域。该岩石的 Nb/Ta 值为 $11.69 \sim 13.78$, 平均值为 12.74 ; Nd/Th 值为 $1.07 \sim 4.39$, 平均值为 2.66 ; Ti/Y 和 Ti/Zr 值均较低, 分别为 $8.44 \sim 32.66$ 和 $1.99 \sim 11.25$, 平均值为 16.64 和 4.85 。

4. 2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

本文对牛圈子地区哈尔特尔德勒花岗岩体的黑云母二长花岗岩样品 (TW07) 的锆石进行了 U-Pb 同位素年龄测试。样品岩石新鲜, 无蚀变现象。

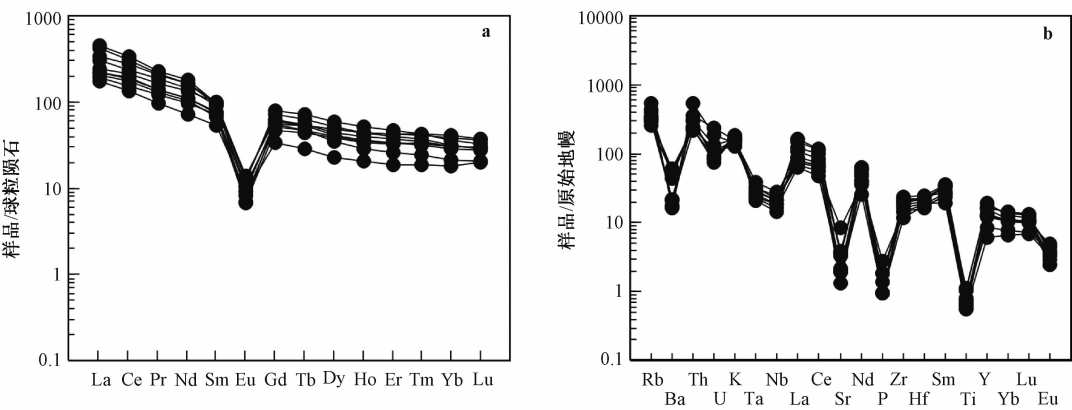


图 4 哈尔特德勒花岗岩体稀土元素球粒陨石标准化分布模式图 (a) 和原始地幔标准化蛛网图 (b)^[19]
Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized spidergram (b) of the Haerteerdele granite mass

从中选取的锆石颗粒在 50 ~ 150 μm。阴极发光图像 (CL) 显示大部分锆石具有良好的晶形，多呈长柱状或短柱状，长短轴之比约为 2:1 ~ 4:1。大部分锆石呈岩浆结晶的环带或条带结构，具有岩浆锆石的特征 (见图 5)，少量锆石内部模糊，可能是退晶质化等后期作用影响。黑云母二长花岗岩 (编号: TW07) 中选取的 14 个锆石点 U-Pb 同

位素分析结果见表 2，其中 Th 和 U 的含量较高，Th/U 比值在 0.27 ~ 0.52 之间，具有岩浆锆石的特征^[20~21]，表面年龄在 365 ~ 377.8 Ma 范围内，加权平均年龄为 371.7 ± 2.9 Ma (n = 14, MSWD = 0.56) 代表了锆石结晶年龄 (见图 6)，即哈尔特德勒花岗岩体形成年龄，表明该岩体形成于晚泥盆世。

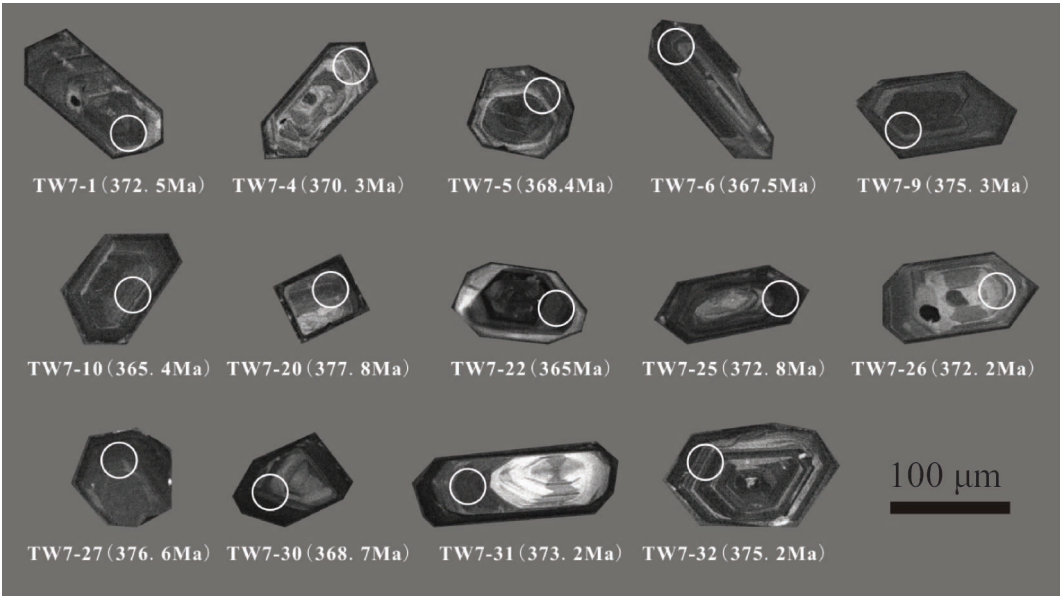


图 5 哈尔特德勒岩体锆石特征和 LA-ICP-MS 测点位置
Fig. 5 Zircon characteristics and LA-ICP-MS measuring points of the Haerteerdele granite mass

5 讨论

5.1 成岩年龄及其意义

前人认为北山牛圈子哈尔特德勒花岗岩类

岩石主要为华里西期，测得该岩体年龄为 329.9 ± 3Ma^[22]，并将其归入早石炭世；笔者参与的北山牛圈子 1:5 万区域地质调查工作中，测得该岩体二长花岗岩年龄为 371.7 ± 2.9Ma，属晚泥盆世。在研究区西面营毛沱地区，发现酸性花岗岩岩体，

表 2 哈尔特尔德勒二长花岗岩 (TW07) 锆石 U-Pb 同位素分析结果
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb zircons dating results of Haerteerdele monzonitic granites (TW07)

Analysis	Th	U	Th/U	Pb207/Pb206		Pb207/U235		Pb206/U238		Pb208/Th232		Pb207/U235		Pb206/U238		Pb208/Th232	
				ratio	1sigma	ratio	1sigma	ratio	1sigma	ratio	1sigma	ratio	1sigma	ratio	1sigma	ratio	1sigma
TW7-1	185.31	357.06	0.52	0.05393	0.00261	0.44243	0.01727	0.05949	0.00092	0.01816	0.00042	372	12.16	372.5	5.62	363.7	8.38
TW7-4	120.70	330.65	0.37	0.05399	0.00303	0.44027	0.0211	0.05913	0.00101	0.01947	0.00062	370.4	14.87	370.3	6.16	389.8	12.2
TW7-5	183.47	462.75	0.40	0.0539	0.00249	0.4371	0.01587	0.05881	0.00089	0.01904	0.00045	368.2	11.21	368.4	5.4	381.2	8.97
TW7-6	219.49	743.12	0.30	0.05385	0.00208	0.43574	0.01158	0.05867	0.0008	0.01985	0.0004	367.2	8.19	367.5	4.9	397.3	7.97
TW7-9	212.08	493.50	0.43	0.054	0.00233	0.44641	0.01452	0.05995	0.00087	0.01837	0.00039	374.8	10.19	375.3	5.31	367.9	7.74
TW7-10	255.38	619.72	0.41	0.05482	0.0024	0.4409	0.01468	0.05832	0.00086	0.01855	0.00041	370.9	10.34	365.4	5.22	371.4	8.05
TW7-20	354.68	1074.24	0.33	0.05414	0.00242	0.45062	0.01556	0.06037	0.0009	0.01959	0.00049	377.7	10.89	377.8	5.48	392.2	9.68
TW7-22	132.62	357.72	0.37	0.05462	0.00363	0.43867	0.02606	0.05825	0.00113	0.0197	0.00077	369.3	18.4	365	6.9	394.3	15.22
TW7-25	281.59	842.06	0.33	0.05411	0.0022	0.44406	0.01303	0.05953	0.00084	0.01909	0.0004	373.1	9.16	372.8	5.14	382.2	7.99
TW7-26	70.35	180.46	0.39	0.05413	0.00374	0.44357	0.02759	0.05944	0.00117	0.01646	0.00068	372.8	19.41	372.2	7.14	329.9	13.51
TW7-27	261.00	730.45	0.36	0.05416	0.00195	0.44916	0.01012	0.06016	0.0008	0.02093	0.00034	376.7	7.09	376.6	4.88	418.6	6.75
TW7-30	177.79	600.40	0.30	0.05378	0.00256	0.43647	0.01657	0.05886	0.00091	0.0192	0.00053	367.8	11.72	368.7	5.55	384.5	10.58
TW7-31	76.48	212.91	0.36	0.05403	0.00295	0.44391	0.02056	0.0596	0.00101	0.01977	0.0006	373	14.46	373.2	6.12	395.7	11.99
TW7-32	258.61	957.70	0.27	0.05418	0.00185	0.44755	0.00886	0.05992	0.00078	0.02023	0.00032	375.6	6.21	375.2	4.76	404.9	6.32

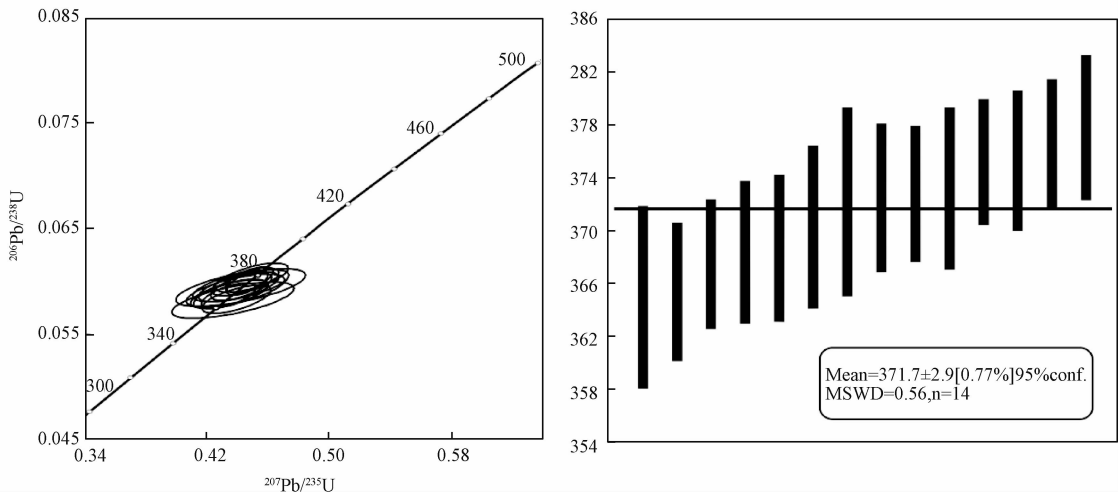


图 6 单颗粒锆石的谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄直方图
Fig. 6 Concordia diagram and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age histogram of single-grain zircon

侵入年龄为 $384.7 \pm 7.7\text{Ma}$ ^[23]；研究区北面火石山哈儿根头口布 A 型花岗岩体同位素年龄为 $387.6 \pm 8.2\text{Ma}$ ^[11]；天山也曾报道天山一些早中古生代具铝质 A 型花岗岩 TIMS 法锆石 U-Pb 定年年龄为 380~490 Ma。牛圈子哈尔特尔德勒 A 型花岗岩与周边地区 A 性花岗岩的特征较相似，形成年代多为中古生代泥盆世，它们很可能处于相似的岩浆带中或具有相似的伸展构造背景。

5.2 A 型花岗岩成因探讨

A 性花岗岩的实质是低压条件下熔融的花岗岩类^[24]，其成因有多种模式，主要包括：（1）幔源基性岩浆高度结晶分异^[25~28]；（2）壳幔物质混合^[29~32]；（3）中下地壳特殊源岩部分熔融^[15~16,33~34]。哈尔特尔德勒花岗岩体样品的主微

量分析结果显示（见表 1），Nb/Ta 值为 11.7~13.8，平均为 12.7，明显低于幔源岩石的 17.5 ± 2 ^[35~36]，而更接近陆壳岩石值 11^[37~38]。Nd/Th 值为 1.1~4.2，平均为 2.7，接近于壳源岩石，明显小于幔源岩石^[39]；K/Nb 比值为 1 953.2~4 466.2，平均值 2 928.3，与地壳相应比值（1 498~2 976）近似，且明显高于地幔相应比值（249~349）^[39]。因此哈尔特尔德勒岩体由幔源基性岩浆高度结晶分异形成的可能性较小，而更具壳源特征，并且在岩体中几乎未见基性岩包体，壳幔混合也不明显。此外，前人对中国花岗岩研究发现^[40~41]，典型的壳源花岗岩类多见于钾质花岗岩和二长花岗岩， $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均值小于 10， $\delta\text{Eu} < 0.5$ ，Eu 负异常明显，花岗岩稀土元素分配模式图为右倾“V”

型分布;而幔型花岗岩类多以闪长岩、花岗闪长岩及石英闪长岩为主, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均值大于 10, $\delta\text{Eu} > 0.84$, 花岗岩稀土元素分配模式图为右倾的较平滑型分布。前人研究发现认为绝大多数 A 型花岗岩多为南岭型花岗岩^[42], 并且哈尔特尔德勒花岗岩体样品投点基本都落入南岭型花岗岩类之中 (见图 7a), 表明其形成于低压条件之下, 代表

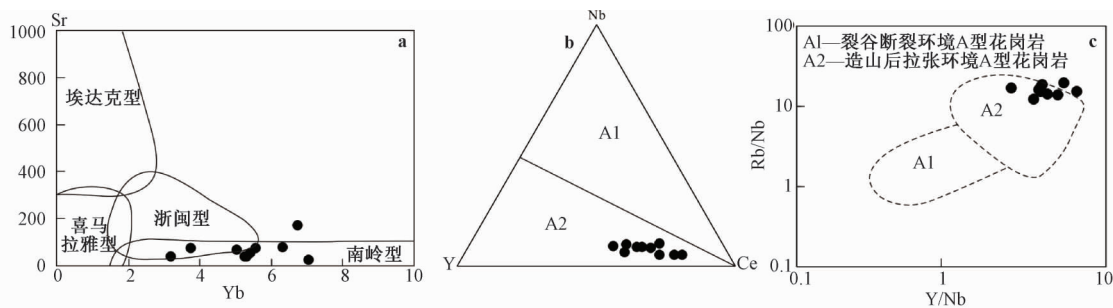


图 7 哈尔特尔德勒花岗岩按 Sr-Yb 分类图 (a)^[42] 和 A 型花岗岩亚类判别图 (b 和 c)^[43]

Fig. 7 Sr-Yb classification chart (a) and discrimination diagrams of the subdivision of the Haertelede A-type granite (b&c)

5.3 动力学过程及其对构造的指示意义

北山地区早寒武世大量发育薄层状大理岩、灰岩等海相环境沉积物;中晚寒武世出现青灰色硅质岩夹薄层状灰岩,表明该地区沉积时期海相环境稳定;至早奥陶纪大陆裂解加剧,出露大量灰黑色—黑色的硅质岩,表明北山处于最大拉张期,中晚奥陶世裂谷裂解演化成红柳河-牛圈子-洗肠井洋盆,将古陆分割为北侧的哈萨克斯坦板块和南侧的塔里木板块^[8],该区进入沟—弧—盆体系发育的俯冲增生造山阶段;中-晚泥盆世地层与寒武纪、奥陶纪地层之间均为不整合接触关系,并且北山的泥盆系主要分布在南部干泉—柳园—墩墩山—碱泉子一带和北部雀儿山—大红山—百合山—芦苇井一带,均发育晚泥盆系的磨拉石建造,反映了造山后期环境,中部红柳河、公婆泉、石板井等地区缺失泥盆系,表明此时北山中部地区为抬升剥蚀区,两侧为沉积区,代表该地区早古生代洋盆演化已经结束,已进入陆内造山阶段。因此,早泥盆世应该是北山古生代洋盆闭合时限的上限^[44]。

在北山及东天山曾有一些早古生代 A 型花岗岩的报道,在红柳河—牛圈子蛇绿岩带南缘柳园地区发现最老的 A 型花岗岩 (415 ± 3 Ma)——双峰山早泥盆世 A 型花岗岩^[10],为后造山或造山作用晚期的产物;北缘发现早—中泥盆世火石山哈

减薄的地壳。在 A 型花岗岩亚类判别图中 (见图 7b、7c),样品均落入 A₂ 型中,而 A₂ 型主要来源于大陆地壳或板下地壳^[43],与分析结果相符,由此可以推断哈尔特尔德勒花岗岩是与地壳更亲缘的 A₂ 型花岗岩,可能为幔源岩浆底侵而导致上覆年轻地壳部分熔融的产物。

儿根头口布 A 型花岗岩 (387.6 ± 8.2 Ma),产于构造挤压向构造伸展的转折阶段^[11]。

哈尔特尔德勒花岗岩体为也具有与之相似的 A 型花岗岩特征,前已述及该岩体为 A₂ 型花岗岩,岩浆起源于地壳或岛弧岩浆派生,产于碰撞后或造山期后的张性构造环境。花岗岩样品在 $(Y + Nb)/Rb$ 、 Y/Nb 以及 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 环境判别图中基本落入后碰撞区域 (见图 8a, 8b, 8c),并且在 R1—R2 构造环境判别图中 (见图 8d) 落入造山期后花岗岩类 (A₂ 型)。这些岩石的地球化学和构造特征以及区域地质背景显示,该岩体形成于后碰撞环境。

6 结论

(1) 北山牛圈子地区哈尔特尔德勒花岗岩体为过铝质高钾钙碱性系列岩石,具有高 Si、K、 FeO^T/MgO 和低 Al、Ca、Mg 等特点,与 A 型花岗岩特征一致。

(2) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得哈尔特尔德勒花岗岩体锆石年龄为 371.7 ± 2.9 Ma,代表该岩体的形成年龄,表明其为中泥盆世岩浆活动的产物。

(3) 哈尔特尔德勒花岗岩的 A (A₂) 型花岗岩特点,区域构造演化,以及与区域同时代 A 型

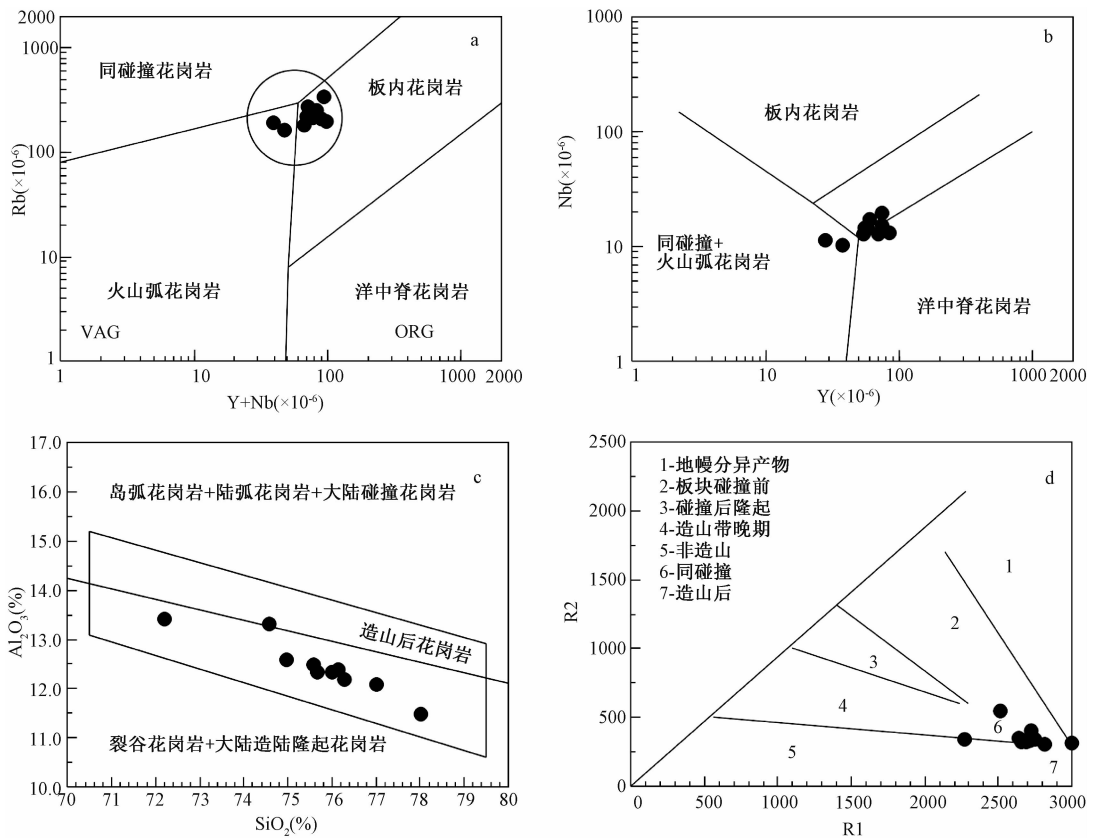


图 8 哈尔特尔德勒花岗岩体构造环境判别图解^[45-46]

Fig. 8 Tectonic environment discrimination diagrams of the Haerteerdele granite mass

花岗岩的对比显示, 该岩体形成于后碰撞伸展环境。

参 考 文 献

[1] 龚全胜, 刘明强, 梁明宏, 等. 北山造山带大地构造相及构造演化 [J]. 西北地质, 2003, 36 (1): 11~17.
GONG Quan-sheng, LIU Ming-qiang, LIANG Ming-hong, et al. The tectonic facies and tectonic evolution of Beishan orogenic belt, Gansu [J]. Northwestern Geology, 2003, 36 (1): 11~17.

[2] 何世平, 周会武, 任秉琛, 等. 甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化 [J]. 西北地质, 2005, 38 (3): 6~15.
HE Shi-ping, ZHOU Hui-wu, REN Bing-chen, et al. Crustal evolution of Palaeozoic in Beishan area, Gansu and Inner Mongolia, China [J]. Northwestern Geology, 2005, 38 (3): 6~15.

[3] 左国朝, 何国琦. 北山板块构造及成矿规律 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1990, 1~226.
ZUO Guo-chao, HE Guo-qi. Plate tectonics and metallogenic regularities in Beishan region [M]. Beijing: Peking University Press, 1990, 1~226.

[4] 左国朝, 刘义科, 刘春燕. 甘蒙北山地区构造格局及演化 [J]. 甘肃地质学报, 2003, 12 (1): 1~15.

ZUO Guo-chao, LIU Yi-ke, LIU Chun-yan. Framework and evolution of the tectonic structure in Beishan area across Gansu Province, Xinjiang autonomous region and inner Mongolia autonomous region [J]. Acta Geologica Gansu, 2003, 12 (1): 1~15.

[5] 李锦轶, 张进, 杨天南, 等. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2009, 39 (4): 584~605.
LI Jin-yi, ZHANG Jin, YANG Tian-nan, et al. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the North Asian orogenic region and its adjacent areas [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39 (4): 584~605.

[6] 杨合群, 李英, 赵国斌, 等. 北山蛇绿岩特征及构造属性 [J]. 西北地质, 2010, 43 (1): 26~36.
YANG He-qun, LI Ying, ZHAO Guo-bin, et al. Character and structural attribute of the Beishan ophiolite [J]. Northwestern Geology, 2010, 43 (1): 26~36.

[7] 杨合群, 李英, 李文明, 等. 北山成矿构造背景概论 [J]. 西北地质, 2008, 41 (1): 22~28.
YANG He-qun, LI Ying, LI Wen-ming, et al. General discussion on metallogenic tectonic setting of Beishan Mountain northwestern China [J]. Northwestern Geology, 2008, 41 (1): 22~28.

- [8] 何世平, 任秉琛, 姚文光, 等. 甘肃内蒙古北山地区构造单元划分 [J]. 西北地质, 2002, 35 (4): 30 ~ 40.
HE Shi-ping, REN Bing-chen, YAO Wen-guang, et al. The division of tectonic units of Beishan area, Gansu-Inner Mongolia [J]. Northwestern Geology, 2002, 35 (4): 30 ~ 40.
- [9] 余吉远, 郭琳, 过磊, 等. 甘肃牛圈子地区六幅 1:5 万区域地质调查报告 [R]. 西安: 中国地质调查局西安地质调查中心, 2017.
YU Ji-yuan, GUO Lin, GUO Lei, et al. Six of 1: 50000 regional geological survey report in Niuquanzi, Gansu [R]. Xi'an: China Geological Survey Xi'an, Xi'an Geological Survey Center, 2017.
- [10] 李舫, 王涛, 童英, 等. 北山柳园地区双峰山早泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造演化意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28 (5): 407 ~ 422.
LI Shan, WANG Tao, TONG Ying, et al. Identification of the early devonian Shuangfengshan A-type granites in Liuyuan area of Beishan and its implications to tectonic evolution [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 28 (5): 407 ~ 422.
- [11] 王立社, 杨建国, 谢春林, 等. 甘肃北山火石山哈尔滨头口布花岗岩年代学、地球化学及其地质意义 [J]. 地质学报, 2009, 83 (3): 377 ~ 387.
WANG Li-she, YANG Jian-guo, XIE Chun-lin, et al. Geochronology and geochemistry of Haergentoukoubu granites in the Beishan Area, Gansu, China and their geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83 (3): 377 ~ 387.
- [12] 殷先明. 甘肃北山地区中生代 A 型花岗岩特征与成矿作用 [J]. 甘肃地质, 2010, 19 (4): 13 ~ 19.
YIN Xian-ming. Characteristics and metallogenesis of Mesozoic A-type granitoid in Beishan region of Gansu Province [J]. Gansu Geology, 2010, 19 (4): 13 ~ 19.
- [13] 郑荣国, 吴泰然, 张文, 等. 甘肃北山中带早泥盆世的构造——岩浆作用: 来自公婆泉花岗岩体年代学和地球化学证据 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2012, 48 (4): 603 ~ 616.
ZHENG Rong-guo, WU Tai-ran, ZHANG Wen, et al. Early Devonian Tectono-magmatic events in the Middle Beishan, Gansu Province: Evidence from chronology and geochemistry of Gongpoquan granite [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48 (4): 603 ~ 616.
- [14] Yuan HL, Gao S, Liu XM, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28 (3): 353 ~ 370.
- [15] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95 (4): 407 ~ 419.
- [16] Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80 (2): 189 ~ 200.
- [17] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, northern Turkey [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58 (1): 63-81.
- [18] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. GSA Bulletin, 1989, 101 (5): 635 ~ 643.
- [19] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basin [M]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42 (1): 313 ~ 345.
- [20] Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143 (5): 602 ~ 622.
- [21] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. 科学通报, 2004, 49 (16): 1589 ~ 1604.
WU Yuan-bao, ZHENG Yong-fei. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49 (15): 1554 ~ 1569.
- [22] 龚全胜, 梁明宏, 刘明强, 等. 马鬃山幅 K47C003001 1/25 万区域地质调查报告 [R]. 甘肃: 甘肃省地质调查院, 2001.
GONG Quan-sheng, LIANG Ming-hong, LIU Ming-qiang, et al. 1: 250000 regional geological survey report in Mazongshan, Gansu [R]. Gansu: Geology investigation institute in gansu province, 2001.
- [23] 王磊, 杨建国, 王小红, 等. 甘肃北山营毛沱地区花岗岩类 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34 (3): 583 ~ 591.
WANG Lei, YANG Jian-guo, WANG Xiao-hong, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and its geological implications of Yingmaotuo granitic rocks [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34 (3): 583 ~ 591.
- [24] 张旗. A 型花岗岩的标志和判别——兼答汪洋等对 "A 型花岗岩的实质是什么" 的质疑 [J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32 (2): 267 ~ 274.
ZHANG Qi. The criteria and discrimination for A-type granites: A reply to the question put forward by Wang Yang and some other persons for "A-type granites: What is the essence?" [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2013, 32 (2): 267 ~ 274.
- [25] Turner SP, Foden J D, Morrison R S. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia [J]. Lithos, 1992, 28 (2): 151 ~ 179.
- [26] Beyth M, Stern R J, Altherr R, et al. The Late Precambrian Timnaigneous complex, Southern Israel: Evidence for comagmatic-type sanukitoid monzodiorite and alkali granite magma [J]. Lithos, 1994, 31 (3/4): 103 ~ 124.

- [27] Han B F, Wang S G, Jahn B M, et al. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth [J]. *Chemical Geology*, 1997, 138 (3/4): 135 ~ 159.
- [28] Mushkin A, Navon O, Halicz L, et al. The petrogenesis of A-type magmas from the Amram Massif, southern Israel [J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44 (5): 815 ~ 832.
- [29] 邱检生, 王德滋, McInnes BIA. 浙闽沿海地区 I 型—A 型复合花岗岩体的地球化学及成因 [J]. *岩石学报*, 1999, 15 (2): 237 ~ 246.
- QIU Jian-sheng, WANG De-zi, McInnes BIA. Geochemistry and petrogenesis of the I-and A-type composite granite masses in the coastal area of Zhejiang and Fujian Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15 (2): 237 ~ 246.
- [30] Mingram B, Trumbull R B, Littman S, et al. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: Evidence for mixing of crust and mantle-derived components [J]. *Lithos*, 2000, 54 (1/2): 1 ~ 22.
- [31] Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence [J]. *Lithos*, 2006, 89 (1/2): 89 ~ 106.
- [32] Konopelko D, Biske G, Seltmann R, et al. Hercynian post-collisional A-type granites of the Kokshaal Range, Southern Tien Shan, Kyrgyzstan [J]. *Lithos*, 2007, 97 (1/2): 140 ~ 160.
- [33] Clemens J D, Holloway J R, White A J R. Origin of an A-type granite: Experimental constraints [J]. *American Mineralogist*, 1986, 71 (3/4): 317 ~ 324.
- [34] King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38 (3): 371 ~ 391.
- [35] Hofmann A W. Chemical differentiation of the earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90 (3): 297 ~ 314.
- [36] Green T H. Significance of Nb/Ta as an Indicator of geochemical processes in the Crust-Mantle System [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120 (3/4): 347 ~ 359.
- [37] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985, 91 ~ 92.
- [38] Bea F, Arzamastsev A, Montero P, et al. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: Evidence of mantle-derived metasomatic fluids affecting crustal materials [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 140 (5): 554 ~ 566.
- [39] Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33 (3): 267 ~ 309.
- [40] 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989, 223 ~ 224.
- WANG Zhong-gang, YU Xue-yuan, ZHAO Zhen-hua, et al. Rare earth elements geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1989, 223 ~ 224.
- [41] 赵振华, 王中刚, 邹天人, 等. 阿尔泰花岗岩类型与成岩模型的 REE 及 O、Pb、Sr、Nd 同位素组成依据 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1991, 10 (3): 176 ~ 178.
- ZHAO Zhen-hua, WANG Zhong-gang, ZOU Tian-ren, et al. The REE, isotopic composition of O, Pb, Sr, Nd and diagenetic model of granitoids in Altai region [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1991, 10 (3): 176 ~ 178.
- [42] 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 标志 [J]. *岩石学报*, 2010, 26 (4): 985 ~ 1015.
- ZHANG Qi, JIN Wei-jun, LI Cheng-dong, et al. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb content: Index [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26 (4): 985 ~ 1015.
- [43] Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 1992, 20 (7): 641 ~ 644.
- [44] 余吉远, 李向民, 梁积伟, 等. 甘新蒙北山地区古生代构造演化研究——北山古生代洋盆开启、闭合时限最新进展 [J]. *新疆地质*, 2012, 30 (2): 205 ~ 209.
- YU Ji-yuan, LI Xiang-min, LIANG Ji-wei, et al. Evolution of the geological structure in Beishan area across Gansu Province, Xinjiang autonomous region and Inner Mongolia autonomous region—constraints on the timing of opening and closing of the Beishan Paleozoic oceanic basin [J]. *Xinjiang Geology*, 2012, 30 (2): 205 ~ 209.
- [45] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25 (4): 956 ~ 983.
- [46] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. *Chemical Geology*, 1985, 48 (1/4): 43 ~ 55.

GEOCHEMISTRY CHARACTERISTICS AND TECTONIC SIGNIFICANCE OF THE HAERTEERDELE GRANITE MASS IN MIDDLE DEVONIAN IN BEISHAN, GANSU

JI Bo^{1,2}, YU Ji-yuan^{1,2}, GUO Lin^{1,2}, GUO Lei^{1,2}, BU Tao^{1,2}

(1. Research Center for Orogenic Geology, Xi'an Center of Geological Survey, Geological Survey of China, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Ministry of Land and Resources,

Xi'an Center of Geological Survey, Geological Survey of China, Xi'an 710054, China)

Abstract: The Haerteerdele granite mass in Niuquanzi shows a high content of Si (>72.2%), alkaline (AR = 2.9 ~ 5.1, K₂O = 3.86% ~ 5.49%, Na₂O = 3.04% ~ 3.83%) and FeOT/Mg (3.29 ~ 13.47), and a low content of Al₂O₃ (11.48% ~ 13.42%), CaO (0.57% ~ 2.27%), MgO (0.14% ~ 0.78%) and FeOT (1.33% ~ 2.34%). It is determined that the granites are peraluminous granitoids of the calc-alkaline suite (A/NK = 1.43 ~ 1.77, A/CNK = 1.35 ~ 1.4), with the characteristics that an enriched pattern with a high Σ REE content and a slight high LREE content ((La/Yb) N = 4.9 ~ 16), unapparent fractionation of heavy and rare earth elements, obvious Eu negative abnormality (δ Eu = 0.12 ~ 0.21), relatively large concentration of large ion lithophile elements such as Rb, K, Pb, strong depletion of the elements of Ba, Sr, P, Ti, Eu, and weak depletion of Ta, Nb and other elements. Also the granites have the similar value in Nb/Ta and Nd/Th with the earthcrust, showing the characteristic of typeA (A2) granite. The chronology result of LA-ICP-MS zircon dating shows the age of ²⁰⁶Pb/²³⁸U of the Haerteerdele granite mass is 371.7 ± 2.9Ma, which represents the formation age of the granite mass and the formation period is the middle Devonian. Taking into consideration the regional tectonic evolution and the comparison with the contemporary type A granite, it shows that the granite mass is the product of postcollision to extension.

Key words: Haerteerdele granite mass; typeA granite; zircon dating; post-collision structure; Middle Devonian