

# 南祁连西北缘肃北红庙沟地区早奥陶世花岗岩 年代学、地球化学特征及其地质意义

计波<sup>1,2,3</sup>, 黄博涛<sup>1,2,3</sup>, 李向民<sup>1,2,3</sup>, 王磊<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710054;  
3. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 笔者对南祁连西北缘红庙沟地区发育的黑云二长花岗岩体进行了精细的年代学和地球化学研究。LA-ICP-MS 测定结果表明, 黑云二长花岗岩加权平均年龄为  $(479.7 \pm 3.4)$  Ma (MSWD = 0.047), 岩体侵位时代为早奥陶世。在地球化学组成上, 黑云二长花岗岩表现为过铝质 ( $A/CNK = 0.96 \sim 1.04$ ) 的 I 型花岗岩特征, 稀土元素总量相对较低 ( $\sum REE = 67.55 \times 10^{-6} \sim 83.07 \times 10^{-6}$ ), 轻稀土相对富集, 具 Eu 负异常; 富集 Rb、Ba 和 K 等大离子亲石元素, 亏损 Sr 和高场强元素 (Nb、Ti、P), 显示弧岩浆特征。综合研究表明, 本区早奥陶世黑云二长花岗岩是南祁连洋向祁连陆块俯冲过程中引起岛弧岩浆活动而形成的产物, 记录了该时期重要的板块构造运动事件, 为认识南祁连造山带的构造演化提供了有益资料和重要依据。

**关键词:** 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 黑云二长花岗岩; 俯冲作用; 南祁连

中图分类号: P588.14

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2019)04-0063-13

## Geochronology and Geochemical Characteristics of the Early Ordovician Granite from Hongmiaogou Area in Northwest Margin of South Qilian and Its Geological Significance

Ji Bo<sup>1,2,3</sup>, Huang Botao<sup>1,2,3</sup>, Li Xiangmin<sup>1,2,3</sup>, Wang Lei<sup>1,2,3</sup>

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Centre for Orogenic Belt Geology, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** This paper makes a detailed study on the chronology and geochemistry of biotite monzonitic granite from Hongmiaogou area in the northwest margin of the South Qilian. Zircon U-Pb dating of biotite monzonitic granite yields a weighted average age of  $(479.7 \pm 3.4)$  Ma (MSWD = 0.047), which indicates this granite had emplaced in Early Ordovician. Geochemical data shows that this pluton has geochemical characteristics of I-type granite and belongs to peraluminous series ( $A/CNK = 0.9 \sim 1.04$ ). It has relatively low total REE contents ( $\sum REE = 67.55 \times 10^{-6} \sim 83.07 \times 10^{-6}$ ) with LREE enrichment and Eu negative anomaly. It shows the geochemical characteristics of arc magma, with an enrichment of some large ion lithophile elements (Rb, Ba, K) and loss of Sr and high field strength elements (Nb, Ti, P). Comprehensive research

收稿日期: 2019-02-05; 修回日期: 2019-07-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“南祁连党河南山地区奥陶纪沉积盆地性质分析”(41802133), 中国地质调查局“甘肃省肃南县西水地区矿产地质调查”项目(DD20160012)。

作者简介: 计波(1986-), 男, 硕士, 工程师, 从事区域地质调查、沉积学、岩石地球化学研究。E-mail: jiboxa@126.com

presents that Early Ordovician biotite monzonitic granite was the product of arc magma and caused by the subduction of South Qilian Ocean. It records the significant event of plate tectonics in early Ordovician and provides useful information, important basis to understand the tectonic evolution of South Qilian orogenic belt.

**Keywords:** Zircon U-Pb dating; geochemistry; biotite monzonitic granite; subduction; South Qilian

祁连山位于中央造山带中部,介于华北克拉通和塔里木克拉通之间(图 1a),是世界上典型的增生型造山带(XIAO et al., 2009),其独特的造山-成矿作用是国际地质科学的前沿课题之一(XIA et al., 2003; XIAO et al., 2009; XIA et al., 2012; SONG et al., 2014; WANG et al., 2016)。南祁连与中祁连、北祁连有着共同的前寒武结晶基底(WANG et al., 2017)。普遍认为其构造演化是在北祁连和中祁连发生大陆裂解后,裂隙逐渐向南迁移,进而引起南祁连与中祁连的分离,进一步发育成洋盆(候青叶等, 2005; XIAO et al., 2009; 闫臻等, 2012; SONG et al., 2014; YAN et al., 2015; WANG et al., 2017);也有学者认为两者仅分离形成大陆裂谷或裂陷槽(曾广策等, 1997; 邱家骧等, 1997; 夏林圻等, 2016; 白旭东等, 2018)。因此,中、南祁连地区早古生代的构造演化历史是研究的焦点。南祁连地区分布有大量的古生代花岗质岩浆岩(图 1b),通过对花岗质岩浆的类型研究(PEARCE et al., 1984; CHAPPEL et al., 1992; BARBARIN, 1990; SCHERMAIER et al., 1997)可以很好地推断造山带深部发生的构造作用过程(HARRIS et al., 1986; SCHERMAIER et al., 1997)。前人对南祁连地区花岗质岩体的年代学以及构造环境的研究主要集中在晚奥陶世—早志留世(卢欣祥等, 2007; 吴才来等, 2008; 罗志文等, 2015; 张翔, 2015; 张新远等, 2018; 于小亮等, 2018),而对早奥陶世( $>470$  Ma)中酸性侵入体的研究又多分布于柴北缘地区(吴才来等, 2001, 2004, 2008),相比之下对于南祁连地区早奥陶世花岗岩的研究较为薄弱,还难以建立精确的时空格架。笔者在南祁连西北缘红庙沟地区的巴龙贡噶尔组中发现了黑云二长花岗岩侵入体,通过对其开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石学以及地球化学研究,以查明岩体的侵位时代,探讨侵入岩的岩石成因类型和构造背景,为研究早古生代南祁

连乃至整个祁连造山带的构造演化提供重要的补充依据。

## 1 区域地质及岩相学特征

祁连造山带是一个早古生代造山系,自北向南由北祁连造山带、祁连陆块、柴北缘高压(HP)—超高压(UHP)变质带组成(夏林圻等, 2016)。祁连造山带从早中奥陶世开始经历了俯冲造山作用,在古生代造山作用中,整个祁连造山带地区引起酸性深成岩浆活动,形成与造山作用过程相关的岩浆岩的侵位(冯益民, 1997)。笔者研究区位于甘肃肃北县一带,构造上处于南祁连造山带西北缘,靠近中、南祁连之间的党河南山断裂。区内地层主要分布在研究区中、南部(图 1c),由北向南发育奥陶纪吾力沟组火山-沉积岩、盐池湾组沉积岩、多索曲组火山-沉积岩以及志留纪巴龙贡噶尔组浅变质沉积岩。侵入岩主要分布在研究区北部与南部,北部出露大面积早古生代花岗岩,岩性包括花岗岩、花岗闪长岩与石英闪长岩,南部出露小规模的花岗闪长岩与闪长岩岩体,以岩脉形式产出于志留纪巴龙贡噶尔组石英片岩之中。本次采样位置见图 1c,其经纬度为:  $E=95^{\circ}34'18''$ ,  $N=38^{\circ}54'49''$ 。

红庙沟地区花岗质岩体呈北西—南东向的脉状分布,出露面积不大。笔者采集样品为灰色黑云二长花岗岩(图 2a),中粒花岗结构,块状构造。矿物成分主要有斜长石(35%)、碱性长石(29%)、石英(30%)、黑云母(5%)和少量角闪石;副矿物有磁铁矿、磷灰石、榍石等。角闪石多为柱状,伴有蚀变(图 2b);斜长石为半自形晶,局部绿泥石化或绢云母化,可见环带结构,聚片双晶发育;碱性长石为无色透明的他形晶体,有弱的高岭土化现象,条纹发育,无双晶;石英呈他形粒状分布在长石颗粒中;黑云母为片状,呈半自形晶体。

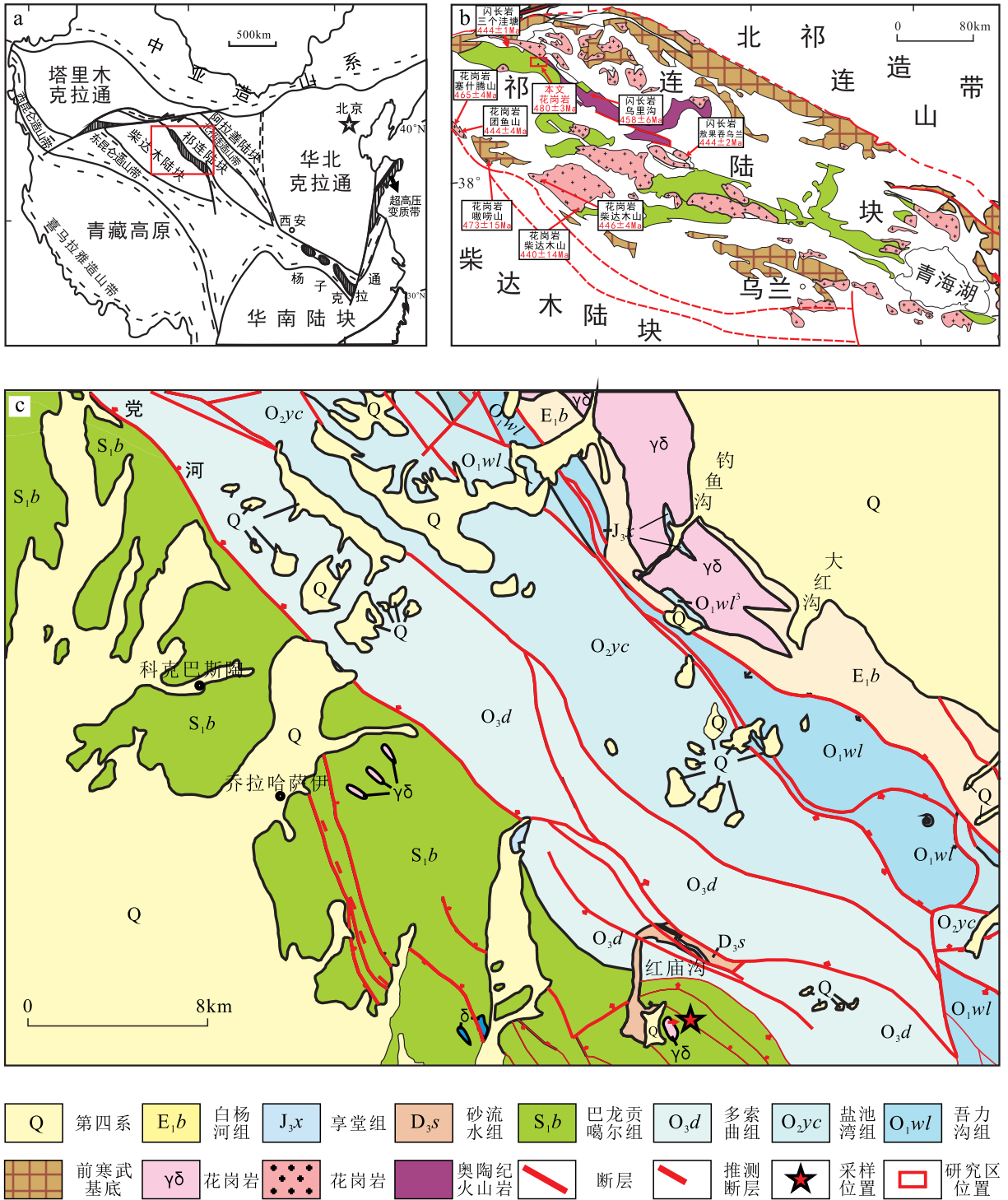
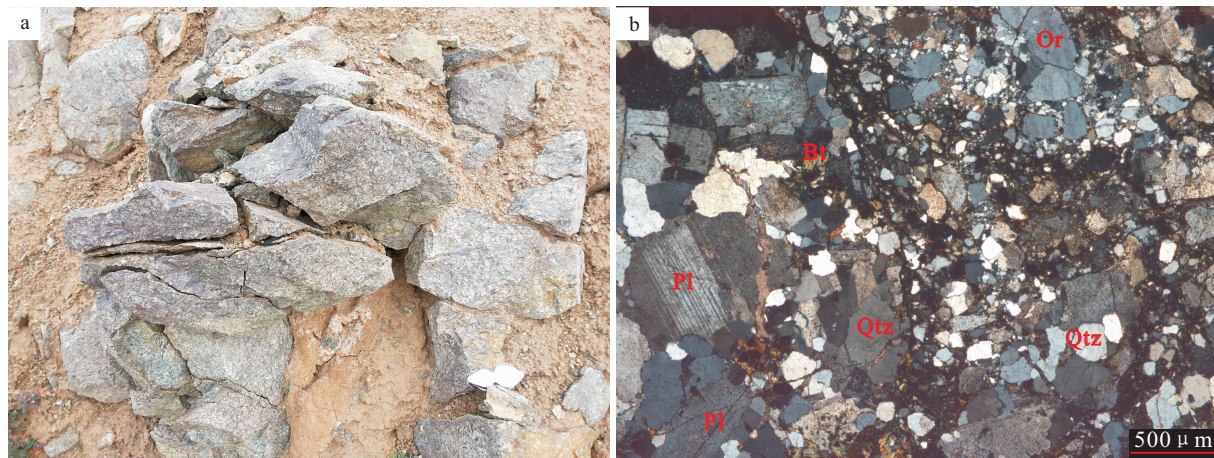


图 1 (a,b)祁连陆块构造位置与地质略图(据夏林圻等,2016)和(c)南祁连西北缘党河南山地区地质质简图(据甘肃地质局,1975)

Fig.1 (a,b) Tectonic position and geological sketch map of Qilian block (After XIA et al. , 2016) and (c)Reginal geological map of the Danghenanshan in northwest of South Qilian(After Gansu Geological Bureau, 1975)



a. 黑云二长花岗岩野外露头照片; b. 黑云二长花岗岩显微镜下照片, 正交偏光, 50x; Qtz. 石英;  
Pl. 斜长石; Or. 碱性长石; Bt. 黑云母

图2 黑云二长花岗岩体的野外照片与显微照片

Fig. 2 Field photograph and microphotograph of the biotite adamellite

## 2 分析方法

笔者用于研究的黑云二长花岗岩年龄样品 1 件, 岩石地球化学样品 6 件, 均采自基岩出露较好的部位, 样品呈块状, 岩石新鲜。锆石阴极发光 (CL) 图像、LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 定年、主量元素、微量元素以及稀土元素分析均在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完成 (图 3)。CL 图像在实验室扫描电镜上完成。锆石 U-Pb 同位素测定的激光剥蚀系统为 GeoLas Pro, ICP-MS 为 Agilent 7700x。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度, 二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。每个时间分辨分析数据包括大约 10 s 的空白信号和 40 s 的样品信号。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,<sup>29</sup>Si 作为内标。每个样品点的数据采集时间为 100 s, 其中前 20 s 为背景信号采集时间, 样品采集时间为 50 s。对分析数据的离线处理 (包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算) 采用软件 Glitter 4.4 完成。主量元素采用 VF320 单道荧光光谱仪 (XRF) 测定, 分析精度优于 5%。用碱熔法测 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 用酸溶法测 FeO; 微量与

稀土元素采用 Agilent 7500a 等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定, 分析精度优于 5%~10%。

## 3 锆石 U-Pb 定年结果

从黑云二长花岗岩中选取了一件样品 (PMJ002) 进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定。对黑云二长花岗岩样品进行了 24 个点的 LA-ICP-MS 定年分析, 分析数据见表 1。锆石的颗粒大小不一, 呈柱状, 长度 100~200 μm, 锆石长宽比在 1.5:1~3.5:1 (图 3)。Th、U 含量分别为  $15 \times 10^{-6} \sim 411 \times 10^{-6}$  和  $37 \times 10^{-6} \sim 287 \times 10^{-6}$ , Th/U 值除变化于 0.37~1.43, 显示为岩浆锆石特征。在锆石 U-Pb 年龄谐和图上, 24 颗锆石测点的年龄全部落在 U-Pb 谐和线及其附近 (图 4a), 表明这些颗粒形成后 U-Pb 体系是封闭的, 基本没有 U 或 Pb 同位素的加入或丢失。参与年代学计算的点共有 19 个 (图 4b), 其 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄集中在 476~485 Ma, 具有很好的一致性, <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 的加权平均年龄值为 (479.7 ± 3.4) Ma (MSWD = 0.047), 代表黑云二长花岗岩的侵入年龄, 为早奥陶世岩浆活动的产物。其他 5 颗锆石 PMJ002-03 (524.7 Ma)、PMJ002-04 (555.2 Ma)、PMJ002-08 (553.8 Ma)、PMJ002-14 (527 Ma)、PMJ002-15 (569.9 Ma) 所测年龄偏大, 可能为继承性或捕获锆石。



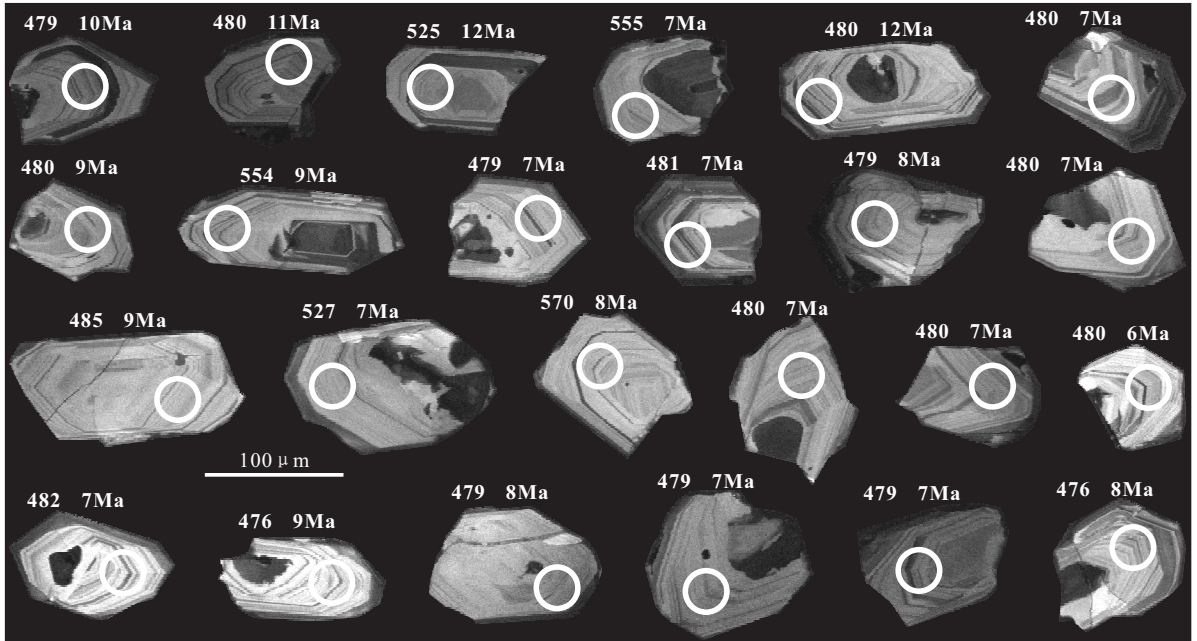


图 3 黑云二长花岗岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 CL image of zircons from biotite adamellite

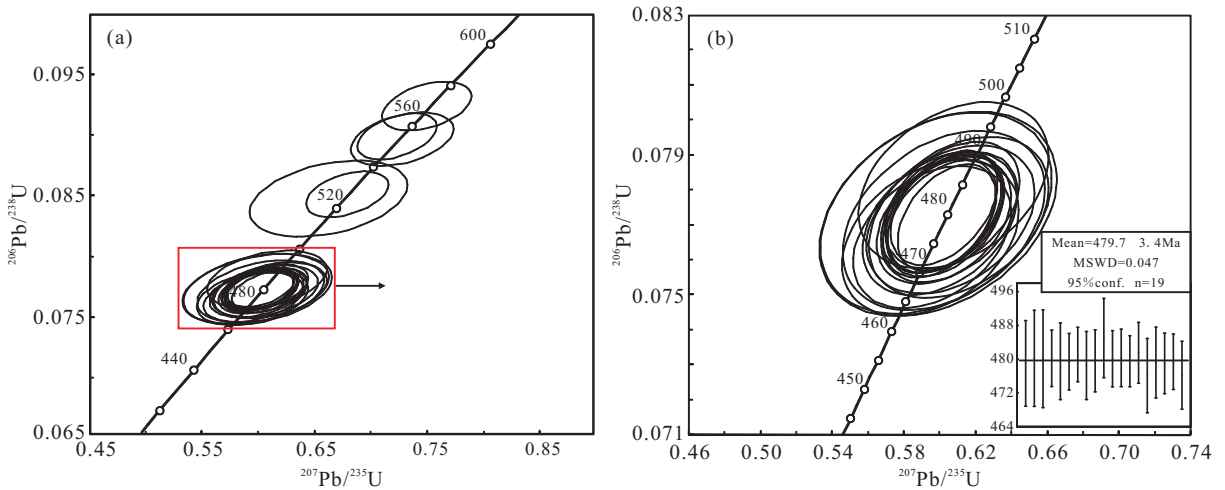


图 4 黑云二长花岗岩 (PMJ002) U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Comcordia diagram of LA-ICP-MS U-Pb for zircons of biotite adamellite (PMJ002)

## 4 地球化学特征

在薄片观察分析的基础上,选取新鲜的岩石样品进行了主量、微量和稀土元素测量分析,结果见表 2。

### 4.1 主量元素

黑云二长花岗岩样品  $\text{SiO}_2$  含量较高,为 71.28%~72.86%, $\text{K}_2\text{O}$  含量为 0.52%~0.63%, $\text{Na}_2\text{O}$  含量

为 5.08%~5.35%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 5.67\% \sim 5.90\%$ ,具有高钠低钾的特征。在  $\text{SiO}_2$ -AR 图解中属偏碱系列(图 5a)。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值变化范围在 0.10~0.12,在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解中,样品落在低钾钙碱性系列(图 5b)。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  值为 13.06%~13.66%,铝饱和指数  $A/\text{CNK} = 0.96 \sim 1.04$ , $A/\text{NK} = 1.43 \sim 1.52$ ,样品基本落入过铝质区域(图 5c)。其主要元素综合特征显示样品应为 I 型花岗岩(CHAPPELL et al., 1974)。

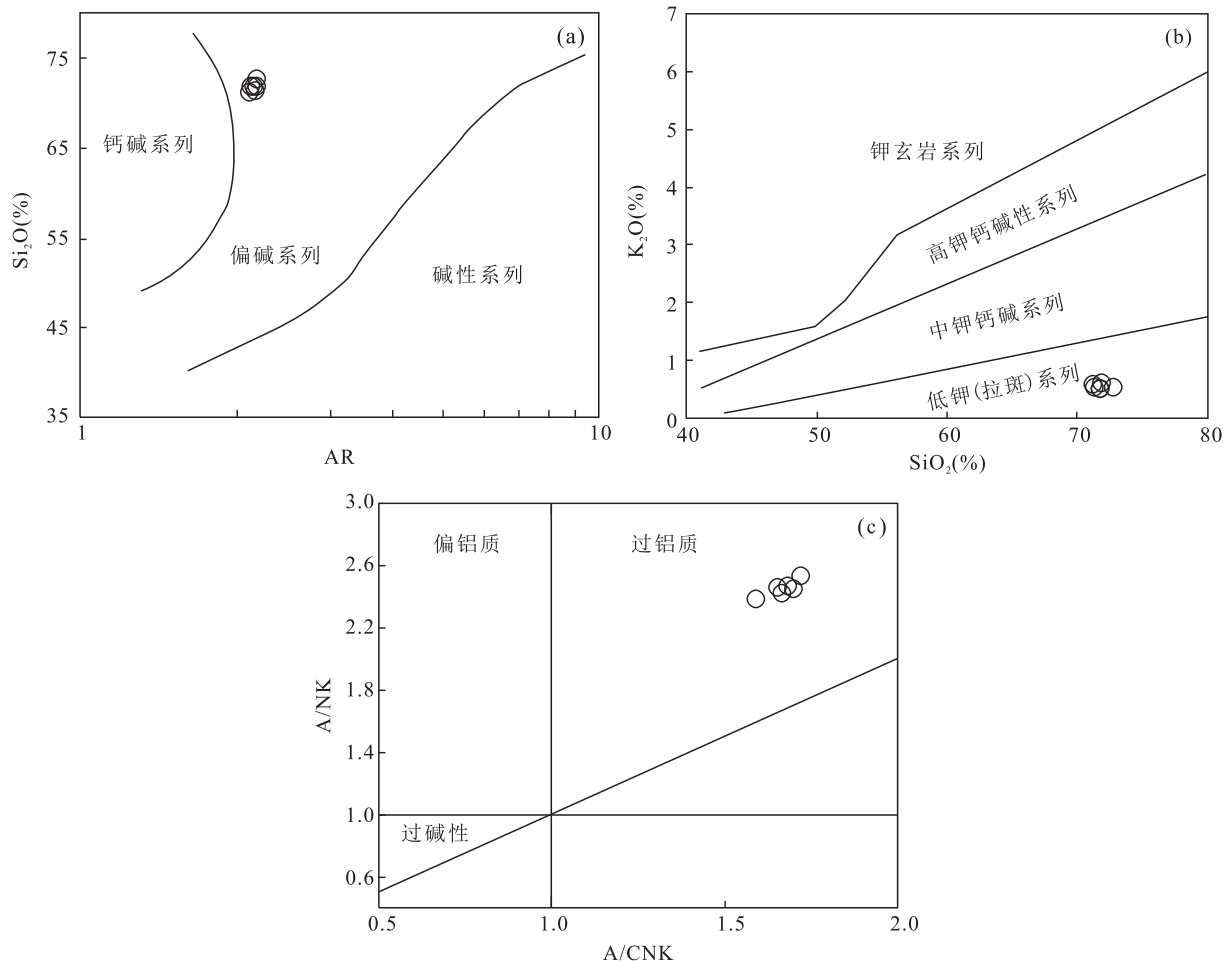
表1 南祁连西缘黑云二长花岗岩锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄测试结果表

Tab.1 Zircon U-Pb LA-ICP-MS dating for biotite adamellite in the western margin of South Qilian

测点号	$^{206}\text{Pb}$ ( $10^{-6}$ )	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	Th/U	同位素比值					年龄(Ma)						
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
PMJ002-01	22	67	43	0.64	0.0566	0.0033	0.6046	0.0336	0.0771	0.0017	475.2	123.8	480.2	21.3	479.0	10.1
PMJ002-02	20	59	24	0.40	0.0561	0.0038	0.6003	0.0386	0.0773	0.0019	453.8	142.4	477.4	24.5	480.2	11.4
PMJ002-03	26	72	44	0.61	0.0566	0.0037	0.6651	0.0416	0.0848	0.0021	476.4	138.7	517.7	25.4	524.7	12.3
PMJ002-04	18	48	25	0.53	0.0583	0.0017	0.7259	0.0202	0.0899	0.0013	539.5	62.1	554.2	11.9	555.2	7.4
PMJ002-05	34	102	64	0.63	0.0562	0.0039	0.6014	0.0396	0.0773	0.0019	458.6	145.6	478.1	25.1	480.1	11.6
PMJ002-06	36	110	60	0.54	0.0565	0.0018	0.6051	0.0185	0.0773	0.0011	471.4	68.5	480.5	11.7	480.2	6.7
PMJ002-07	20	60	26	0.43	0.0573	0.0029	0.6130	0.0299	0.0772	0.0015	503.5	108.2	485.5	18.8	479.5	9.1
PMJ002-08	17	44	16	0.37	0.0588	0.0022	0.7303	0.0269	0.0897	0.0015	559.5	81.1	556.7	15.8	553.8	8.6
PMJ002-09	28	83	39	0.47	0.0563	0.0018	0.6023	0.0186	0.0772	0.0011	465.0	69.2	478.7	11.8	479.4	6.7
PMJ002-10	95	287	411	1.43	0.0564	0.0017	0.6046	0.0173	0.0775	0.0011	465.6	64.3	480.2	10.9	481.1	6.5
PMJ002-11	16	48	19	0.39	0.0565	0.0025	0.6022	0.0256	0.0771	0.0014	469.2	95.4	478.6	16.2	478.5	8.1
PMJ002-12	23	69	35	0.50	0.0568	0.0022	0.6073	0.0226	0.0772	0.0012	483.7	83.4	481.9	14.3	479.6	7.4
PMJ002-13	12	37	12	0.33	0.0564	0.0031	0.6097	0.0319	0.0781	0.0016	466.5	116.4	483.4	20.1	485.0	9.4
PMJ002-14	16	43	17	0.40	0.0578	0.0019	0.6809	0.0214	0.0852	0.0012	520.8	69.7	527.3	12.9	527.0	7.3
PMJ002-15	19	49	28	0.57	0.0588	0.0019	0.7516	0.0233	0.0924	0.0013	558.5	68.0	569.2	13.5	569.9	7.9
PMJ002-16	19	56	24	0.43	0.0565	0.0019	0.6048	0.0195	0.0773	0.0011	473.0	72.5	480.3	12.4	480.1	6.7
PMJ002-17	20	60	25	0.42	0.0564	0.0019	0.6032	0.0201	0.0774	0.0011	466.1	74.3	479.3	12.7	480.3	6.8
PMJ002-18	36	107	78	0.72	0.0567	0.0015	0.6055	0.0159	0.0772	0.0010	479.3	58.3	480.7	10.0	479.5	6.0
PMJ002-19	20	60	29	0.48	0.0567	0.0021	0.6085	0.0223	0.0776	0.0012	480.8	82.1	482.6	14.1	481.5	7.2
PMJ002-20	21	63	26	0.41	0.0563	0.0029	0.5962	0.0296	0.0766	0.0015	462.1	110.9	474.8	18.8	476.1	8.8
PMJ002-21	12	37	15	0.39	0.0569	0.0027	0.6074	0.0280	0.0772	0.0014	488.6	102.7	481.9	17.7	479.2	8.4
PMJ002-22	16	49	21	0.42	0.0566	0.0022	0.6036	0.0223	0.0771	0.0012	475.5	82.9	479.5	14.1	479.0	7.2
PMJ002-23	38	113	90	0.80	0.0566	0.0018	0.6041	0.0191	0.0772	0.0011	476.2	70.9	479.8	12.1	479.4	6.6
PMJ002-24	21	64	29	0.45	0.0563	0.0026	0.5967	0.0264	0.0767	0.0013	464.8	98.9	475.2	16.8	476.2	8.0

表2 黑云二长花岗岩主量元素(wt%)、微量和稀土元素( $10^{-6}$ )分析结果表Tab. 2 The concentration of major (wt%), trace element ( $10^{-6}$ ) and REE for biotite adamellite

样号	PMJ002-1	PMJ002-2	PMJ002-3	PMJ002-4	PMJ002-5	PMJ002-6
岩性	花岗闪长岩					
SiO <sub>2</sub>	71.28	71.86	71.96	71.41	71.83	72.86
TiO <sub>2</sub>	0.32	0.31	0.29	0.28	0.29	0.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.66	13.45	13.28	13.45	13.50	13.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.29	1.18	1.04	1.01	1.18	0.98
FeO	2.32	2.30	2.42	2.20	2.29	2.25
MnO	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
MgO	1.18	1.12	1.06	0.97	1.06	0.99
CaO	2.27	2.21	2.18	2.56	2.46	2.20
Na <sub>2</sub> O	5.08	5.17	5.08	5.35	5.20	5.12
K <sub>2</sub> O	0.60	0.54	0.63	0.55	0.52	0.55
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
LOI	1.04	0.82	0.85	1.06	0.98	0.89
Total	99.16	99.07	98.9	98.95	99.42	99.32
A/NK	1.52	1.48	1.47	1.43	1.48	1.45
A/CNK	1.04	1.03	1.02	0.96	0.99	1.01
Y	24.20	30.30	27.40	31.30	25.10	24.20
Zr	124.00	145.00	132.00	127.00	119.00	123.00
Hf	3.90	4.21	4.14	3.88	3.69	3.68
Li	2.17	2.07	1.28	1.70	1.34	1.76
Be	0.53	0.57	0.50	0.57	0.61	0.51
Sc	14.00	16.30	15.20	15.70	13.70	14.40
Cr	5.35	5.61	3.89	5.03	3.45	5.17
Co	8.12	7.40	5.96	6.41	6.47	5.75
Ni	10.30	2.52	2.56	2.60	2.50	2.30
Cu	17.90	18.50	13.90	13.90	12.60	11.60
Zn	33.50	35.80	30.90	31.00	33.60	28.10
Ga	11.90	13.10	13.40	12.80	12.40	11.80
Rb	12.20	11.40	11.00	10.70	9.71	9.63
Sr	124.00	122.00	108.00	121.00	122.00	111.00
Nb	6.58	7.31	6.97	6.80	6.18	6.05
Cs	0.51	0.48	0.50	0.50	0.46	0.45
Ba	148.00	151.00	150.00	150.00	136.00	146.00
Ta	0.86	0.79	0.72	0.83	0.75	0.73
Pb	2.90	3.19	2.89	3.26	3.87	2.83
Th	2.38	2.69	2.82	2.71	2.61	2.36
U	0.70	0.79	0.69	0.74	0.76	0.71
La	10.60	12.10	12.90	12.00	10.90	10.00
Ce	25.10	27.60	29.80	26.90	24.40	22.90
Pr	3.30	3.55	3.76	3.34	3.11	2.91
Nd	13.60	14.10	14.60	14.10	13.70	12.60
Sm	3.49	3.62	3.74	3.64	3.47	3.30
Eu	0.74	0.74	0.76	0.72	0.67	0.65
Gd	3.68	3.96	4.12	3.93	3.69	3.58
Tb	0.67	0.68	0.71	0.66	0.64	0.61
Dy	4.14	4.47	4.57	4.34	4.20	4.04
Ho	0.89	0.98	1.00	0.94	0.91	0.87
Er	2.69	2.90	2.97	2.81	2.68	2.56
Tm	0.42	0.46	0.48	0.45	0.43	0.41
Yb	2.75	3.12	3.18	3.08	2.92	2.69
Lu	0.43	0.48	0.48	0.47	0.45	0.43
REE	72.50	78.76	83.07	77.38	72.17	67.55



(a). SiO<sub>2</sub>-AR 图解 (WRIGHT, 1969); (b). K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解 (RICKWOOD, 1989); (c). A/NK-A/CNK 图解 (MANIAR et al., 1989)

图 5 黑云二长花岗岩地球化学图解

Fig. 5 Geochemical diagrams for the biotite adamellite

## 4.2 微量元素和稀土元素

黑云二长花岗岩稀土元素总量  $\sum \text{REE} = 67.55 \times 10^{-6} \sim 83.07 \times 10^{-6}$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2.67 \sim 2.91$ , 表明轻稀土略富集, 重稀土分布较为平坦, 样品  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.05 \sim 1.11$ ,  $\text{Y}/\text{Yb} = 8.6 \sim 10.16$ , 说明重稀土分馏程度低;  $\delta \text{Eu} = 0.57 \sim 0.63$ , 显示负 Eu 异常。在球粒陨石标准化配分图解 (图 6a) 中, 显示明显的负 Eu 异常, 所有样品表现为轻稀土略富集的平坦型 REE 配分模式。

原始地幔标准化的微量元素蛛网图 (图 6b) 显示, 黑云二长花岗岩中高场强元素 Th、U、Zr、Hf、Ta 和大离子亲石元素 Rb、Ba、K 富集, 高场强元素 Nb、Ti、P 亏损。以上微量元素和稀土元素特征显示研究区黑云二长花岗岩属于 I 型花岗岩 (张玉泉等, 1995)。

## 5 讨论

### 5.1 成岩时代

通过以上对岩体的锆石 U-Pb 年龄分析可知, 黑云二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $(479.7 \pm 3.4) \text{ Ma}$ , 侵位时代为早奥陶世。已有研究发现南祁连地区奥陶纪时期岩浆活动频繁 (图 1b)。吴才来等 (2001) 在南祁连地区通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年获得柴达木山花岗岩体年龄为  $(446 \pm 4) \text{ Ma}$ ; 吴才来等 (2004, 2008) 在柴北缘地区噶崂山、塞什腾山、团鱼山花岗岩体中分别获得锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $(473 \pm 15) \text{ Ma}$ 、 $(465 \pm 4) \text{ Ma}$  以及  $(444 \pm 4) \text{ Ma}$ ; 卢欣祥等 (2007) 通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年研究, 认为柴达木山塔塔楞环斑花



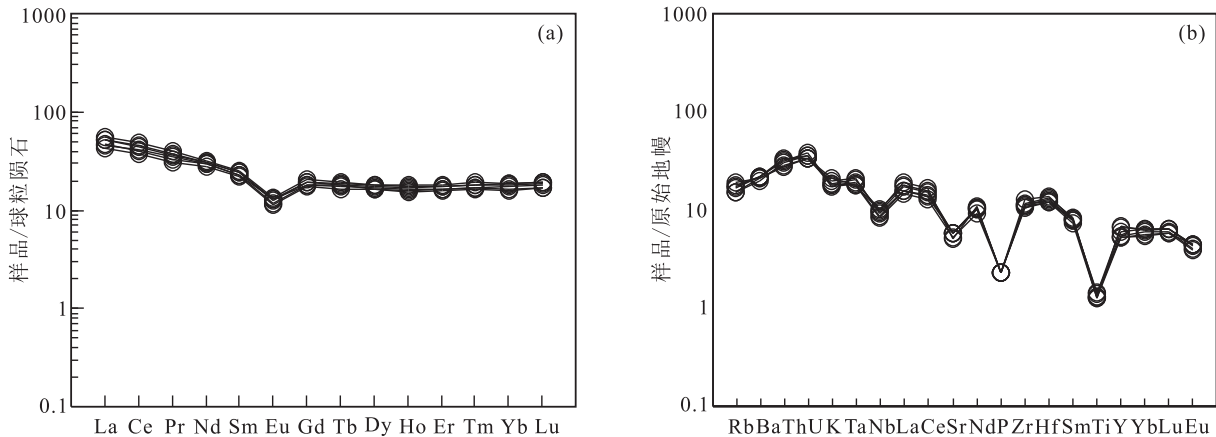


图 6 (a)黑云二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分图解和(b)微量元素蛛网图(标准化值据 SUN et al. ,1989)  
Fig. 6 (a)Chondrite-normalized REE patterns and(b) primitive mantle-normalized spider diagram for biotite adamellite (Normalization values after SUN et al. ,1989)

岗岩成岩年龄为(440±14) Ma;张翔(2015)在南祁连北部乌里沟地区发现闪长岩岩体,其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(458±6) Ma;罗志文等(2015)在党和南山三个洼塘地区获得花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(458±6) Ma;张新远等(2018)通过 LA-ICP-MS 锆石研究获得熬果吞乌兰岩体 U-Pb 年龄为(444±2) Ma。这些结果表明南祁连一柴北缘地区在奥陶纪存在 2 期花岗岩岩浆活动事件,主要发生在早中奥陶世(480~450 Ma)和晚奥陶世(450~440 Ma),这 2 期岩浆活动均分别与洋壳俯冲作用以及陆壳俯冲作用有关(吴才来等, 2008)。因此,本次研究的黑云二长花岗岩可能为早奥陶世洋壳俯冲作用下的产物。

此外,由于黑云二长花岗岩侵位于原志留系巴龙贡噶尔组之中,说明该地层形成时期应早于早奥陶世,而非形成于早志留世。与此同时,在肃北科克巴斯陶地区志留纪地层中已解体出新元古代拐杖山组(计波等,2018),将其与研究区黑云二长花岗岩的围岩地层进行对比,认为区内原巴龙贡噶尔组很可能属拐杖山组,形成于新元古代。

### 5.2 岩浆成因

通过对岩体地球化学特征的分析可知,研究区黑云二长花岗岩属低钾钙碱性系列,显示其 I 型花岗岩的属性(WOLF et al. ,1994;PETFORD et al. , 1996)。此外,岩石富钠贫钾,在微量元素蛛网图和稀土配分曲线图上展示出 Rb、K 和 Ba 相对原始地幔富集,Nb、Sr、P、Ti 和 Eu 的负异常,与中祁连西缘三个洼塘地区具壳幔混合成因的 I 型花岗岩的地球化学特征(罗志文等,2015)基本一致,并且其源岩

与基性岩的部分熔融有关(图 7),具有地幔来源的特征。此外,岩石中的 Nb/U 和 Ce/Pb 值与源区有关,而与岩浆过程无关(汪岩等,2013)。因此,可以反映岩浆源区的性质。地幔来源岩浆具有较高的 Nb/U 和 Ce/Pb 值,分别为 47 和 27(HOFMANN et al. ,1988),而壳源物质则为 6.2 和 3.9(RUDNICK et al. , 2003)。红庙沟地区花岗岩 Nb/U 值为 8.1~10.1,平均值为 9.1,Ce/Pb 值为 6.3~10.3,平均值为 8.4,均介于幔源岩浆与壳源岩浆之间,反映岩石圈地幔源区可能受到地壳物质污染。花岗岩构造判别图中(图 8a,8b)样品均落入弧花岗岩中,表明其源岩可能为岛弧火山岩。

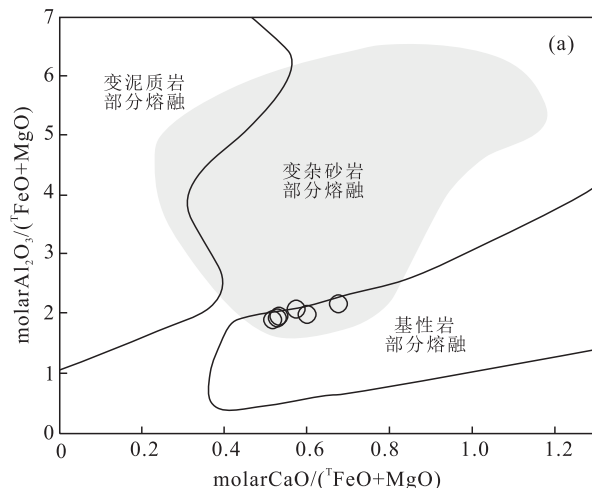
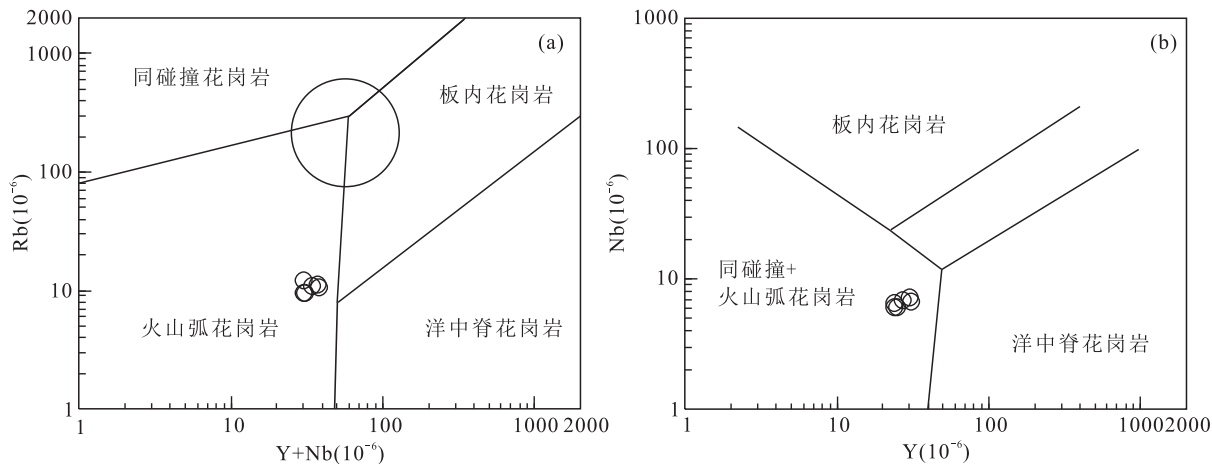


图 7 黑云二长花岗岩 A/MF-C/MF 摩尔比值图 (据 ALTHER et al. ,2000)

Fig. 7 A/MF vs C/MF diagram for the biotite adamellite (ALTHER et al. ,2000)



(a). 底图据 MANIAR et al. (1989); (b). 底图据 PEARCE et al. (1984)

图 8 黑云二长花岗岩构造判别图解

Fig. 8 Tectonic discriminating diagrams for the biotite adamellite

### 5.3 构造环境及其地质意义

柴达木地体与祁连陆块之间存在过新元古代—早古生代的南祁连洋,并在寒武纪—奥陶纪期间向北俯冲至祁连陆块之下(吴才来等,2008; SONG et al., 2014; 夏林圻等, 2016)。吴才来等(2008)认为南祁连洋向北俯冲发生在晚寒武世—中奥陶世(494~460) Ma, 该时期形成的岩体多为具岛弧性质或活动大陆边缘性质的弧花岗岩; 夏林圻等(2016)认为早寒武世—晚奥陶世(520~442) Ma 南祁连大洋岩石圈向东北方向俯冲, 相伴软流圈上涌, 期间发育滩涧山群弧火山岩和弧花岗岩类侵入体。

本次研究获得的黑云二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(479.7±3.4) Ma(早奥陶世), 为高钠低钾的 I 型花岗岩, 而 I 型花岗岩多伴随消减带产出(张玉泉等, 1995), 反映其形成与大洋俯冲作用有关。而微量元素中 LREE 和 LILE 相对富集, 尤其是 Nb、P、Ti 负异常揭示其岛弧型岩浆岩的性质及其形成与俯冲作用有成因联系(TATSUMI et al., 1995; LAN et al., 1996)。在(Y+Rb)-Rb 和 Y-Nb 构造环境判别图中(图 8a、图 8b), 样品均位于火山弧花岗岩区域, 表明样品具有岛弧花岗岩的特征, 与前人研究结果一致。此外, 南祁连与柴北缘地区奥陶纪花岗质岩体(图 1b)前人已有研究显示, 柴北缘西段塞什腾山岩体(465±4) Ma、噶喇山岩体(473±15) Ma 和团鱼山岩体(444±4) Ma 均为 I 型花岗岩, 形成于岛弧或活动大陆边缘环境, 与洋壳俯冲作用有关(吴才来等, 2008); 南祁连三个

洼塘地区闪长岩岩体(444±1) Ma 为洋壳俯冲的产物(罗志文等, 2015); 南祁连鸡叫沟地区角闪闪长岩体(458±6) Ma 形成与岛弧岩浆活动有关(张翔, 2015); 南祁连南部柴达木山花岗岩体(446±4) Ma 是柴达木陆块向祁连陆块深俯冲的产物(吴才来等, 2007); 南祁连北部敖果吞乌兰岩体(444±2) Ma 则形成于陆-陆碰撞环境(张新远等, 2018)。因此, 结合本次花岗岩体的研究结果可知, 南祁连及其周缘地区已发现的早中奥陶世(480~450) Ma 花岗质岩体均为 I 型花岗岩, 指示与洋壳俯冲作用有关的岛弧岩浆特征, 其形成与南祁连洋俯冲时洋壳板片发生部分熔融和壳幔岩浆混合作用有关; 而晚奥陶世(450~440) Ma 的花岗质岩体开始反映出陆-陆碰撞特征, 该时期区内不同地段板块已发生了陆壳俯冲, 板块运动由洋-陆碰撞逐渐转换为陆-陆碰撞。

综合区域构造背景与岩浆岩源区特征, 研究区早奥陶世黑云二长花岗岩属于南祁连洋向北俯冲过程中的产物, 记录了该时期重要的洋壳俯冲及其引发的岛弧岩浆活动事件, 为认识南祁连造山带的构造演化提供了很好的年代学和地球化学方面的地质信息。

## 6 结论

(1) 研究区花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(479.7±3.4) Ma, 表明其侵位时代为早奥陶

世,指示了早奥陶世的岩浆活动事件。

(2)结合地球化学分析,源区特征以及区域地质背景可知,研究区黑云二长花岗岩属于洋壳俯冲环境下发生岛弧岩浆活动而形成的I型花岗岩,其形成与南祁连洋向北俯冲过程中引发的壳幔岩浆混合作用有关。

## 参考文献(References):

白旭东,杨波,赵忠国,等. 青海南祁连晚奥陶世火山岩 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. 西北地质, 2018, 51(01): 125-136.

BAI Xudong, YANG Bo, ZHAO Zhongguo, et al. LA-MC-ICP MS Zircon U-Pb and Geochemical Characteristics of Late Ordovician Volcanic Rocks in Southern Qilian Moutains, Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(1): 125-136.

冯益民. 祁连造山带研究概况—历史、现状及展望[J]. 地球科学进展, 1997, 12(4): 307-314.

FENG Yimin. Investigatory summary of the Qilian orogenic belt, China history, presence and prospect[J]. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(4): 307-314.

侯青叶,张宏飞,张本仁,等. 祁连造山带中部拉脊山古地幔特征及其归属:来自基性火山岩的地球化学证据[J]. 地球科学, 2005, 30(1): 61-70.

HOU Qingye, ZHANG Hongfei, ZHANG Benren, et al. Characteristics and tectonic affinity of Lajishan Paleomantle in Qilian orogenic belt: A geochemical study of basalts[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(1): 61-70.

卢欣祥,孙延贵,张雪亭,等. 柴达木盆地北缘塔塔楞环斑花岗岩的 SHRIMP 年龄[J]. 地质学报, 2007, 81(05): 626-634.

LU Xinxiang, SUM Yangui, ZHANG Xueying, et al. The SHRIMP age of Tatalin Rapakivi granite at the north margin of Qaidam basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(05): 626-634.

罗志文,张志诚,李建峰,等. 中南祁连西缘肃北三个洼塘地区古生代两类花岗岩侵入岩年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(1): 176-188.

LUO Zhiwen, ZHANG Zhicheng, LI Jianfeng, et al. Geochronology of two kinds of Paleozoic granitic plutons from Sangewatang in Subei, the western margin of Central-South Qilian and their geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(1): 176-188.

邱家骧,曾广策,王思源,等. 拉脊山早古生代海相火山岩与成矿[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1996.

QIU Jiexiang, ZENG Guangce, WANG Siyuan, et al. Early Paleozoic Marine volcanic rocks and mineralization in Laji Mountains[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996.

汪岩,付俊彧,那福超,等. 内蒙古扎赉特旗辉长岩—闪长岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 2013, 32(10): 1525-1535.

WANG Yan, FU Junyu, NA Fuchao, et al. Geochemical characteristics and zircon U-Pb age of the gabbro-diorite in Jalaid Banner of Inner Mongolia and their geological significance. Geological Bullentin of China[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(10): 1525-1535.

吴才来,郜源红,吴锁平,等. 柴达木盆地北缘大柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 2007, (8): 1861-1875.

WU Cailai, HAO Yuanhong, WU Suoping, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from the Da Qaidam area in the north margin of Qaidam basin, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(8): 1861-1875.

吴才来,郜源红,吴锁平,等. 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(8): 930-949.

WU Cailai, HAO Yuanhong, WU Suoping, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemical characteristics of granites from the western of the north margin of Qaidam [J]. Science Chnia (Ser. D), 2008, 38(8): 930-949.

吴才来,杨经绥, Trevor Ireland, 等. 祁连南缘噶喇山花岗岩 SHRIMP 锆石年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 215-221.

WU Cailai, YANG Jingsui, TREVOR Ireland, et al. Zircon SHRIMP ages of Aolaoshan granite from the south margin of Qilianshan and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(2): 215-221.

吴才来,杨经绥,杨宏仪,等. 北祁连东部两类 I 型花岗岩定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 425-432.

WU Cailai, YANG Jingsui, YANG Hongyi, et al. Dating of two types of granite from north Qilian, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 425-432.

夏林圻,李向民,余吉远,等. 祁连山新元古代中—晚期至早古生代火山作用与构造演化[J]. 中国地质, 2016, 43(04): 1087-1138.

XIA Linqi, LI Xiangmin, YU Jiyuan, et al. Mid-Late Neo-

- proterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain[J]. *Geology in China*, 2016, 43(4): 1087-1138.
- 闫臻, 王宗起, 李继亮, 等. 西秦岭楔的构造属性及其增生造山过程[J]. *岩石学报*, 2012, 28(6): 1808-1828.
- YAN Zhen, WANG Zongqi, LI Jiliang, et al. Tectonic setting and accretionary orogenesis of the West Qinling Terrane, northeastern margin of the Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(6): 1808-1828.
- 于小亮, 蔡成龙, 张世龙, 等. 南祁连野牛脊山地区早志留世侵入岩的岩石成因: 岩石地球化学和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学制约[J]. *西北地质*, 2018, 51(4): 133-146.
- YU Xiaoliang, CAI Chenglong, ZHANG Shilong, et al. Petrogenesis of Early Silurian Intrusive Rocks in Yeniu-jishan Area of South Qilian: Constraints from Geochemistry and LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology[J]. *Northern Geology*, 2018, 51(4): 133-146.
- 张翔, 张莉莉, 汪绿波, 等. 党河南山乌里沟中酸性岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及与金矿的关系[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(5): 597-607.
- ZHANG Xiang, ZHANG Lili, WANG Lubo, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics of neutral-acidic intrusions of Wuligou in South Qilian Mountains: their implications on forming gold deposit [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2015, 42(5): 597-607.
- 张新远, 王春涛, 欧阳光文, 等. 南祁连敖果吞乌兰侵入岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2018, 40(5): 546-562.
- ZHANG Xinyuan, WANG Chuntao, OUYANG Guangwen, et al. Zircon U-Pb ages and their geological significance of Aogutunwulan Pluton in South Qilian, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2018, 40(5): 546-562.
- 张玉泉, 谢应雯. 横断山区花岗岩类地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- ZHANG Yuquan, XIE Yingwen. *Geochemistry of Granitoid Rocks in Hengduan Mountains Region* [M]. Beijing: Science Press, 1995.
- ALTHERR R, HOLL A, HEGNER E, et al. High-potassium calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 2000, 50(1-3): 51-73.
- CHAPPELL B W, WHITE A J R. Two contrasting granite types[J]. *Pacific Geology*, 1974, 8(2): 173-174.
- CHAPPELL B W, WHITE A J R. I and S type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Edinburgh, Earth Science*, 1992, 83(1-2): 1-26.
- BARBARIN B. Granitoids: Main petrogenetic classifications in relation to the origin and tectonic setting[J]. *Geological Journal*, 1999, 25(3-4): 227-238.
- WOLF M B, LONDON D. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanism[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994, 58(19): 4127-4145.
- WRIGHT J B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis[J]. *Geological Magazine*, 1969, 106(4): 370-384.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, XU Xueyi. Magmagenesis in the Ordovician backarc basins of the Northern Qilian Mountains, China[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2003, 115(12): 1510-1522.
- XIA Liqin, XIA Zuchun, XU Xueyi, et al. Mid-late-Neoproterozoic rift related volcanic rocks in China: Geological records of rifting and break-up of Rodinia[J]. *Geosci. Front.*, 2012, 3(4): 375-399.
- XIAO Wenjiao, Windley B F, YONG Yong, et al. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(3-4): 323-333.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, WU Cailai, et al. Timing and mechanism of formation and exhumation of the northern Qaidam ultrahighpressure metamorphic belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 28(2-3): 0-173.
- RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247-263.
- RUDNICK R L, GAO Shan. Composition of the continental crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 3: 1-64.
- SCHERMAIER A, HAUNSCHMID B, FINGER F. Distribution of Variscan I and S type granites in the Eastern Alps: A possible clue to unravel pre-alpine basement structures [J]. *Tectonophysics*, 1997, 272(2-4): 315-333.
- SONG Shugugang, NIU Yaoling, SU Li, et al. Continental orogenesis from ocean subduction, continental collision subduction, to orogen collapse, and recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China [J]. *Earth Science Review*, 2014, 129: 59-84.
- SONG Shuguang, NIU Yaoling, SU Li, et al. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. *Gondwana Re-*

search, 2013, 23 (4): 1378-1401.

SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in Oceanic Basins[J]. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 1989, 42(1): 313-345.

TATSUMI Y, EGGINS S. Subduction Zone Magmatism [M]. Boston: Blackwell Publishing. 1995.

WANG Chao, LI Rongshe, SMITHIES R H, et al. Early Paleozoic felsic magmatic evolution of the western Central Qilian belt, Northwestern China, and constraints on convergent margin processes [J]. Gondwana Research, 2017, 41: 301-324.

WANG Tao, WANG Zongqi, YAN Zhen, et al. Geochronological and Geochemical evidence of amphibolites from the Hualong Group, Northwest China: Implication for the early Paleozoic accretionary tectonics of the Central Qilian belt[J]. Lithos, 2016, 248-251: 12-21.

MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin,

1989, 101(5): 635-643.

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.

PETFORD N, ATHERTON M. Na-rich Partial Melts from Newly Underplated Basaltic Crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru[J]. Journal of Petrology, 1996, 37 (6): 1491-1521.

HARRIS N B W, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1986, 19(1): 67-81.

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.

LAN C Y, Jahn B M, Mertzman S A, Wu T W. Subduction-related granitic rocks of Taiwan [J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1996, 14(1-2): 11-28.

\*\*\*\*\*

## 夏日哈木式基性-超基性岩同生铜镍矿床

成矿区带:东昆仑成矿带(Ⅲ-26)。

建造构造:古元古界金水口岩群变质岩系中侵入基性超基性岩体,先侵入辉长岩,后侵入辉石岩,底部局部有橄榄岩透镜体,两次侵入体之间为突变关系,铜镍矿与辉石岩-橄榄岩关系密切。岩石 m/f 变化于 1.5~6.29。夏日哈木条带状辉石岩锆石 U-Pb 年龄( $393.5 \pm 3.4$ ) Ma,而侵入于辉石岩中的闪长岩脉的年龄为( $382.5 \pm 2.5$ ) Ma(李世金,2012)。

成矿时代:泥盆纪。

成矿组分:Cu, Ni, (Co, Au, Ag, S)

矿产地实例:(青)格尔木市夏日哈木、石头坑德铜镍矿床,清水河、冰沟南铜镍矿点。

简要特征:夏日哈木铜镍矿床矿体赋存在辉石岩-橄榄岩相中,含矿岩性主要为二辉橄榄岩和辉石岩。矿石硫化物分布呈浸染状、海绵陨铁状、准块状-块状。矿石矿物有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、紫硫镍铁矿、黄铁矿、马基诺矿;非金属矿物有橄榄石、辉石、蛇纹石、滑石、次闪石、绿泥石等。主矿体品位:Ni 含量为 0.20%~6.69%, Cu 含量为 0.20%~4.34%, Co 含量为 0.013%~0.055%。

成因认识:泥盆纪,在深部地幔热柱上涌和上部柴达木地块覆盖保温的耦合条件下,地幔岩部分熔融的镁铁质岩浆,沿地块南缘薄弱地带侵入地壳,经中间岩浆房深部分异,多次脉动上侵于断裂带成矿。

(中国地质调查局西安地质调查中心 杨合群)