

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

于小亮¹, 蔡成龙², 张世龙², 魏小林¹, 刘溪溪³

(1. 青海省地质调查局, 青海 西宁 810001; 2. 青海省有色地质矿产勘查局七队, 青海 西宁 810007;
3. 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海 格尔木 816000)

摘要:对南祁连野牛脊山地区侵入岩进行了岩石地球化学和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究, 进而约束其岩石成因和形成的构造背景。该地区侵入岩主要岩性为花岗闪长岩、似斑状花岗闪长岩和似斑状二长花岗岩。地球化学特征显示: 岩石具有高硅、富铝、富钾、富碱和贫钛、铁、镁、钙的特征, 其 $w(\text{SiO}_2) = 64.69\% \sim 78.03\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 7.44\% \sim 14.16\%$, $w(\text{K}_2\text{O}) = 2.98\% \sim 5.23\%$, $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) = 5.13\% \sim 7.92\%$, $w(\text{TiO}_2) = 0.55\% \sim 0.94\%$, $w(\text{FeO}) = 1.52\% \sim 5.00\%$, $w(\text{CaO}) = 1.11\% \sim 3.43\%$, $w(\text{MgO}) = 0.78\% \sim 2.49\%$, 岩石里特曼指数 $\delta = 0.91 \sim 2.89$, A/CNK 为 $0.84 \sim 1.23$, 为准铝质-弱过铝质的钙碱性系列岩石。岩石稀土元素总含量较低 (ΣREE 为 $157.89 \times 10^{-6} \sim 299.15 \times 10^{-6}$), 相对富集轻稀土元素、大离子亲石元素 (Rb、K) 和 Th, 亏损重稀土元素, Ba, Ce, Hf, Zr, Sm, Y, Yb 等明显低于洋脊花岗岩, 具有明显的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.47 \sim 0.66$)。综合地质地球化学资料, 显示该侵入岩属于 S 型花岗岩且来源于地壳物质的重熔。由 $w(\text{Y})-w(\text{Nb})$ 图解和 R1-R2 构造环境判别图解可得知研究区内花岗岩与南祁连造山带板块碰撞有关。在似斑状花岗闪长岩中获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(443.9 \pm 2.1)\text{Ma}$, 侵位时代为早志留世。结合区域构造演化分析, 认为野牛脊山地区侵入岩形成于板块俯冲碰撞的地球动力学背景下。

关键词:早志留世; 花岗岩; 地球化学; 锆石 U-Pb 年代学; 野牛脊山; 南祁连

中图分类号: P588.12; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2018)04-0133-14

Petrogenesis of Early Silurian Intrusive Rocks in Yeniujishan Area of South Qilian: Constraints from Geochemistry and LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology

YU Xiaoliang¹, CAI Chenglong², ZHANG Shilong², WEI Xiaolin¹, LIU Xixi³

(1. Qinghai Geological Survey, Xining 810001, Qinghai, China; 2. No 7 Geological Brigade, Qinghai Provincial Bureau of Nonferrous Metal and Geological Exploration, Xining 810007, Qinghai, China; 3. Qaidam Synthetical Exploration Institute of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province, Geermu 816000, Qinghai, China)

Abstract: In order to to constrain its petrogenetic and tectonic processes, the geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of intrusive rocks from Yeniujishan area in South Qilian has been conducted in this paper. The intrusive rocks in this area are mainly composed of granodior-

收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-06-11

基金项目: 中国地质调查局“柴达木周缘及邻区成矿带地质矿产调查评价”(1212011221151)

作者简介: 于小亮(1988-), 女, 硕士, 工程师, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事地质找矿勘查、矿床学和地球化学研究。

E-mail: xiaoliangyu1988@foxmail.com

ite, porphyritic granodiorite and monzonite granite. Geochemical data show these intrusive rocks are characterized by rich SiO_2 (64.69%~78.03%), Al_2O_3 (7.44%~14.16%), K (2.98%~5.23) and alkali (5.13%~7.92%), but low TiO_2 (0.55%~0.94%), FeO (1.52%~5.00%), CaO (1.11%~3.43%) and MgO (0.78%~2.49%). Their Rittmann indexes (δ) range from 0.91 to 2.89, while their aluminum saturation index (A/CNK) vary from 0.84 to 1.23, belonging to the calc-alkaline series, with the characteristics of metaluminous-weakly peraluminous rocks. These rocks have low ΣREE values ($157.89 \times 10^{-6} \sim 299.15 \times 10^{-6}$), which are relatively enriched in LREE, large ion lithophile elements (Rb, K) and Th element. But, they are relatively depleted in HREE, while their Ce, Hf, Zr, Sm, Y and Yb values are obviously lower than the ones of mid-ocean ridge granitoids, with strong negative Eu anomaly ($\delta\text{Eu}=0.47 \sim 0.66$). The geological and geochemical data suggest that these intrusive rocks are S-type granite, which was formed by the re-melting of crustal material. The discrimination diagrams for tectonic settings ($w(\text{Y})-w(\text{Nb})$ and $\text{R1}-\text{R2}$) show that these granites are related to the plate collision of South Qilian orogenic belt. The U-Pb dating of porphyritic granodiorite yields an age of $(443.9 \pm 2.1) \text{ Ma}$, indicating that these rocks were emplaced in Early Silurian. In combination with the comprehensive analysis of tectonic evolution, it is believed that these intrusive rocks in Yeniujiashan area formed under the geodynamic background of subduction collision.

Keywords: Early Silurian; granite; geochemistry; zircon U-Pb dating; Yeniujiashan; South Qilian

祁连造山带以北西西—南东东走向环绕于青藏高原的东北缘,是世界上典型的造山带之一,也是中国中央造山系的重要组成部分。它经历了不同的时期、不同的构造机制以及不同的动力学体系的长期构造演化,是一个复合造山带,矿产资源十分丰富。因此,历来受到国内外众多专家、学者的高度重视(夏林圻等,1996;李文渊,2004;何世平等,2011)。南祁连位于祁连造山带南部,以柴达木北缘断裂、中祁连南缘断裂及阿尔金左行走滑断裂为界(潘桂堂等,2009),由于其特殊的构造位置形成于独特的地质构造环境和地球动力学背景,一直以来,对其构造属性和演化历史的研究备受关注。而花岗岩类作为造山带中普遍存在的酸性侵入体,记录了板块构造及地壳演化过程的大量信息(胡万龙等,2016)。通过对花岗质侵入岩的特征研究可确定其成因及构造环境,结合花岗质侵入岩的定年结果可分析该地区经历的岩浆事件。因此,研究花岗质岩石的构造背景及成因类型,尤其是结合造山带不同类型花岗质岩的研究是判别构造块体动力学背景及其转换的有效途径(王涛,2007)。前人对北祁连造山带的构造演化和火山岩、花岗岩进行了研究,各种构造模式相继被提出(张旗等,1997;宋述光等,1997;毛景文,2003;秦海鹏,2012)。但对南祁连的研究程度相对

较低,对该地区的岩浆活动研究相对薄弱,年代学数据比较分散。笔者在野外地质调查的基础上,选择出露于南祁连野牛脊山地区的花岗岩组合进行岩石地球化学和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析,探讨了花岗岩的成因类型、形成的构造环境和时代归属,为进一步对南祁连野牛脊山地区岩浆侵入活动及构造演化方面提供新的信息与依据。

1 地质背景和岩石学特征

祁连造山带位于秦祁昆巨型造山带中段,北邻阿拉善地块,南接柴达木地块,西被阿尔金断裂所截,与塔里木地块相隔,向东与北秦岭相接,是典型的加里东期增生造山带。由北往南依次为北祁连褶皱带、中祁连地块和南祁连褶皱带 3 个次一级构造单元,之间均由边界断裂相隔(冯益民等,1996)。南祁连地块以北宗务隆断裂为界,西接阿尔金断裂,中经刚查、青海湖和拉脊山,东至甘肃天水西秦岭造山带,南由柴达木北缘断裂围限(青海省地质矿产局,1991)。

中南祁连弧盆系沿中祁连南缘断裂(疏勒南山—拉脊山缝合带主断裂)又可划分为拉脊山结合带(Ⅲ-1)和南祁连岩浆弧(Ⅲ-2)2 个三级构造单元,笔者所研究区域构造位置上处于南祁连岩浆弧内

(Ⅲ-2),出露地层有石炭纪臭牛沟组火山岩碎屑岩碳酸盐岩建造、二叠纪巴音河群碎屑岩碳酸盐岩建造及第四纪冲洪积物(图1)。区内共发育4条后期脆性断裂,且断裂构造具多期活动的特点,根据断裂产出形态可划分为北西—南东向、北西西—南东向以及北东—南西向断裂,并发育断层破碎带、断层角砾岩等;受不同期次构造应力作用,岩体中次生节理、裂隙十分发育。侵入岩主要为早志留世花岗岩组合,分布于区内野牛脊山地区,南北两侧均被第四纪冲洪积物

覆盖,西侧延伸至图外,东侧与石炭纪臭牛沟组和二叠纪地层成角度不整合接触。该岩体呈岩基状产出,平面形态呈椭圆状,总体出露面积约 51.66 km²,其中花岗闪长岩($\gamma\delta$)出露面积为 27.63 km²,似斑状花岗闪长岩($\pi\gamma\delta$)出露面积为 13.52 km²,似斑状二长花岗岩($\pi\eta\gamma$)出露面积为 10.51 km²。笔者主要针对早志留世侵入岩进行采样和分析,所采样品为花岗闪长岩、似斑状花岗闪长岩及似斑状二长花岗岩,各岩石特征描述如下。

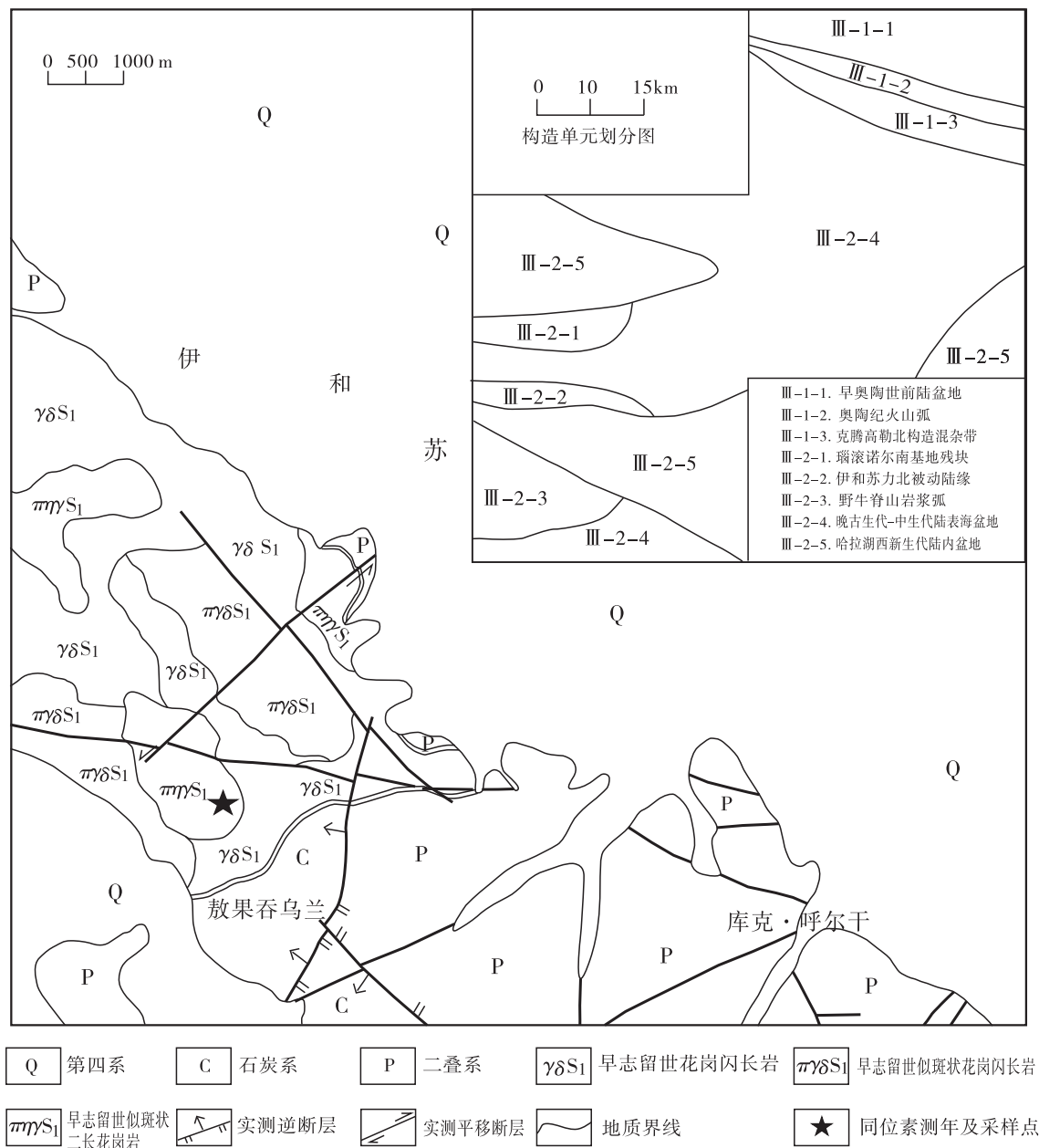


图 1 南祁连野牛脊山地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of Yeniujishan area of South Qilian

花岗闪长岩($\gamma\delta$):灰白色,花岗结构,块状构造。岩石由斜长石、钾长石、石英及暗色矿物、不透明矿物和少量的锆石、榍石、磷灰石等构成。其中,斜长石呈半自形板状晶,含量约48%,粒度为0.65~3.15 mm,具较强的绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化蚀变。由于蚀变较强,钾长石呈他形粒状晶,含量约16%,粒度大小在3.38~4.95 mm,具黏土化蚀变,颗粒表面显污浊,见少量的石英、黑云母和斜长石颗粒分布其中;石英呈他形粒状晶或不规则状晶,含量约25%,粒度约0.45~3.35 mm,分布在其他矿物颗粒间;暗色矿物主要为黑云母,含量约10%,粒度为0.38~2.95 mm,绝大多数被绿泥石交代,少数被方解石和褐色黑云母交代,从保留的假象来看多为黑云母假象。副矿物主要为锆石、榍石及磷灰石等,均呈包体分布,部分不透明矿物沿节理缝析出。岩石因受构造应力影响,发育很多很多裂纹、裂隙,后被方解石充填成脉,还见有黑云母解理缝发生曲折变形,以及石英所具的波状消光假象。

似斑状花岗闪长岩($\pi\gamma\delta$):灰白色,似斑状结构,块状构造。岩石由似斑晶和基质组成。斑晶为浅肉红色钾长石,呈半自形板状晶,含量约15%,粒度为3.61~2.95 mm,具条纹构造,为条纹长石,轻微黏土化蚀变,受动力影响颗粒较为破碎,细小的石英、黑云母等沿裂隙充填。基质以斜长石为主,其次为石英、黑云母及部分不透明矿物和少量的锆石、磷灰石、绿帘石等。

似斑状二长花岗岩($\pi\eta\gamma$):岩石为肉红色或灰白色,似斑状结构,块状构造。斑晶为钾长石和斜长石。其中,钾长石呈半自形板状晶,含量约20%,粒度为2.05~4.35 mm,具轻微的黏土化蚀变,颗粒表面略显混浊,可见少许细小的他形粒状石英、长石和片状的黑云母分布其中;斜长石呈半自形板状晶,含量约8%,粒度为2.55~3.50 mm,具较强的绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化蚀变,可见聚片双晶。基质以斜长石为主,其次为石英、钾长石、黑云母及部分不透明矿物和少量的锆石、榍石、磷灰石等。受热液作用,沿岩石裂隙充填在方解石及细粒石英中,呈脉状存在。

2 分析方法

笔者采集该地区花岗闪长岩、似斑状花岗闪长

岩和似斑状二长花岗岩共21件新鲜岩石样品开展了主量、微量和稀土元素地球化学研究,测试单位为国土资源部武汉矿产资源监督检测中心。除 H_2O 用重量法和FeO用容量滴定法测定外,其余主量元素都用X荧光光谱仪测定,分析精度(相对误差)优于1%。微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,分析误差小于5%。

对该地区新鲜的似斑状二长花岗岩进行了锆石LA-ICP-MS U-Pb同位素年代学研究,测试单位为国土资源部天津地质矿产研究所测试室。通过同位素实验室激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)来测定(李怀坤等,2010),采用质谱仪为ThermoFisher公司制造的Neptune,激光剥蚀系统为ESI公司生产的UP193-FX ArF准分子激光器,利用193nm FX激光器对锆石进行剥蚀,激光斑束35 μm ,采用Adersen方法对普通铅进行校正,详细分析方法及仪器参数见李怀坤等(2010)。原始数据数据处理、年龄计算及绘图使用ICPMS DataCal程序(LIU et al., 2010)和ISO-PLOT程序(LUDWING, 2003)。同位素比值误差为1 σ ,年龄值选 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄,加权平均年龄误差为95%置信度误差。

3 岩石地球化学

3.1 主量元素特征

本地区花岗闪长岩、似斑状花岗闪长岩和似斑状二长花岗岩的地球化学分析结果见表1,其岩石地球化学成分一致性较好。岩石中 $w(SiO_2)$ 变化范围不大但含量较高,为64.69%~78.03%,平均为67.66%,属酸性岩范畴; $w(Al_2O_3)$ 含量为7.44%~14.16%,平均为12.97%; $w(TiO_2)$ 、 $w(FeO)$ 、 $w(CaO)$ 、 $w(MgO)$ 含量低,分别为0.55%~0.94%(平均为0.79%)、1.52%~5.00%(平均为4.10%)、1.11%~3.43%(平均为2.20%)、0.78%~2.49%(平均为1.98%); $w(Na_2O+K_2O)$ 、 $w(K_2O)$ 含量较高,全碱含量为5.13%~7.92%(平均为6.36%), $w(K_2O)$ 含量为2.98%~5.23%(平均为4.05%), $w(Na_2O)$ 含量为0.43%~2.90%(平均为2.32%)。该岩石明显具有高硅、富铝、富钾、富碱和贫钛、铁、镁、钙的特点,属高钾岩石。

表 1 野牛脊山地区侵入岩主量元素分析结果及参数特征表

Tab. 1 Major elements composition analysis results and parameter characteristics of the intrusive rocks in Yeniujishan area

样号	岩性	氧化物含量(%)													
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	LOI	Σ
I GS8503	花岗闪长岩	70.64	0.59	11.94	1.02	3.40	0.09	2.42	1.11	2.22	3.71	0.17	0.53	2.26	99.57
I GS8506-1		69.63	0.69	12.36	0.91	4.40	0.08	2.49	1.68	2.27	3.80	0.17	0.12	0.86	99.34
I Pm401Gs10-2		66.33	0.94	13.55	0.82	5.00	0.10	2.34	2.44	2.34	3.78	0.19	0.38	1.40	99.23
I Pm401Gs11-2		78.03	0.56	7.44	2.88	1.52	0.04	0.78	1.32	0.43	5.23	0.10	0.72	1.37	99.70
I Pm401Gs1-1		65.72	0.84	13.63	0.75	4.85	0.11	2.27	2.16	2.12	3.98	0.18	0.61	2.78	99.39
I Pm401Gs7-1		66.85	0.76	13.34	0.87	4.03	0.09	1.92	2.49	2.38	3.99	0.19	0.83	2.50	99.41
I GS8504	似斑状花岗闪长岩	66.86	0.89	12.94	1.84	4.10	0.11	1.82	2.81	2.69	3.19	0.27	0.22	1.90	99.42
I GS8407		68.63	0.81	12.53	0.79	4.35	0.09	2.05	1.38	1.84	4.59	0.21	0.10	2.16	99.43
I Pm401Gs2-1		66.17	0.87	13.82	0.90	4.20	0.09	1.67	3.06	2.90	3.72	0.21	0.16	1.75	99.36
I Pm401Gs2-3		66.38	0.84	13.73	1.06	4.30	0.09	1.95	2.66	2.14	4.11	0.21	0.51	1.86	99.33
I Pm401Gs4-1		66.94	0.84	13.62	0.93	4.32	0.09	1.80	2.51	2.38	4.32	0.20	0.20	1.51	99.46
I Pm401Gs6-2		67.77	0.75	13.69	0.92	3.78	0.09	1.58	2.33	2.59	4.53	0.17	0.29	1.30	99.5
I Pm401Gs8-1		67.81	0.80	13.35	0.83	4.30	0.09	1.99	2.13	2.36	4.19	0.18	0.11	1.6	99.63
I Pm401Gs9-1		66.51	0.89	13.18	0.89	4.93	0.10	2.28	3.12	2.15	2.98	0.18	0.29	2.16	99.37
I Pm401Gs10-1		65.50	0.93	14.16	1.06	4.72	0.09	2.34	2.46	2.54	3.97	0.16	0.33	1.28	99.21
I Pm401Gs3-1		二长花岗岩	64.69	0.74	13.78	1.24	4.67	0.12	2.16	1.48	2.90	5.02	0.18	0.58	2.29
I Pm401Gs3-2	67.18		0.83	13.08	1.24	4.15	0.09	2.38	1.73	2.57	4.04	0.19	0.31	1.97	99.45
I Pm401Gs5-1	65.28		0.73	13.07	0.84	3.75	0.08	1.83	3.43	2.50	4.04	0.18	2.00	3.62	99.35
I Pm401Gs5-2	67.83		0.81	12.69	0.98	4.03	0.08	1.90	1.79	2.40	4.30	0.19	0.61	2.52	99.52
I Pm401Gs6-1	66.34		0.87	13.34	1.20	4.4	0.08	1.83	2.54	2.51	3.68	0.20	0.83	2.35	99.34
I Pm401Gs14-1	69.87		0.55	13.08	1.20	2.99	0.06	1.84	1.56	2.39	3.83	0.12	0.29	1.87	99.36
样号	岩性	主 要 参 数													
		σ	SI	A/CNK	A/NK	MgO/FeO	K ₂ O/Na ₂ O	Na ₂ O+K ₂ O	R1	R2					
I GS8503	花岗闪长岩	1.27	9.56	1.23	1.56	0.71	1.67	5.93	2 994	486					
I GS8506-1		1.38	8.00	1.13	1.57	0.57	1.67	6.07	2 823	554					
I Pm401Gs10-2		1.61	6.80	1.10	1.71	0.47	1.62	6.12	2 575	657					
I Pm401Gs11-2		0.91	6.02	0.85	1.17	0.51	12.16	5.66	3 760	332					
I Pm401Gs1-1		1.64	6.79	1.16	1.75	0.47	1.88	6.10	2 607	633					
I Pm401Gs7-1		1.70	6.71	1.05	1.62	0.48	1.68	6.37	2 601	643					
I GS8504	似斑状花岗闪长岩	1.45	6.28	1.00	1.64	0.44	1.19	5.88	2567.79	644.58					
I GS8407		1.61	6.73	1.19	1.57	0.47	2.49	6.43	2681.60	495.02					
I Pm401Gs2-1		1.89	5.65	0.96	1.57	0.40	1.28	6.62	2344.85	681.13					
I Pm401Gs2-3		1.67	6.47	1.07	1.72	0.45	1.92	6.25	2531.37	650.48					
I Pm401Gs4-1		1.88	5.94	1.04	1.58	0.42	1.82	6.70	2437.14	624.84					
I Pm401Gs6-2		2.05	5.80	1.02	1.49	0.42	1.75	7.12	2386.36	596.04					
I Pm401Gs8-1		1.73	6.57	1.09	1.59	0.46	1.78	6.55	2536.56	588.33					
I Pm401Gs9-1		1.12	6.81	1.06	1.95	0.46	1.39	5.13	2785.84	705.27					
I Pm401Gs10-1		1.88	7.07	1.09	1.67	0.50	1.56	6.51	2349.61	656.88					
I Pm401Gs3-1		二长花岗岩	2.89	6.46	1.07	1.35	0.46	1.73	7.92	1986	553				
I Pm401Gs3-2	1.81		7.94	1.11	1.52	0.57	1.57	6.61	2513	574					
I Pm401Gs5-1	1.92		6.78	0.89	1.54	0.49	1.62	6.54	2477	746					
I Pm401Gs5-2	1.81		6.60	1.07	1.47	0.47	1.79	6.07	2580	551					
I Pm401Gs6-1	1.64		5.97	1.05	1.64	0.42	1.47	6.19	2569	644					
I Pm401Gs14-1	1.44		8.14	1.20	1.62	0.62	1.60	6.22	2854	528					

在 $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O}$ 图(图 2)上显示为高钾钙碱性系列。岩石的里特曼指数 $\delta=0.91\sim2.89$,为中强钙碱性岩系。在 AFM 图解(图 3)中均落在钙碱性系列区内,并且均沿 AF 线分布,同样表现出富碱贫铁镁的特点;铝饱和指数 $(\text{A/CNK})=0.84\sim1.23$,在铝饱和指数图解中分别落在准铝质-弱过铝质岩石(图 4)。

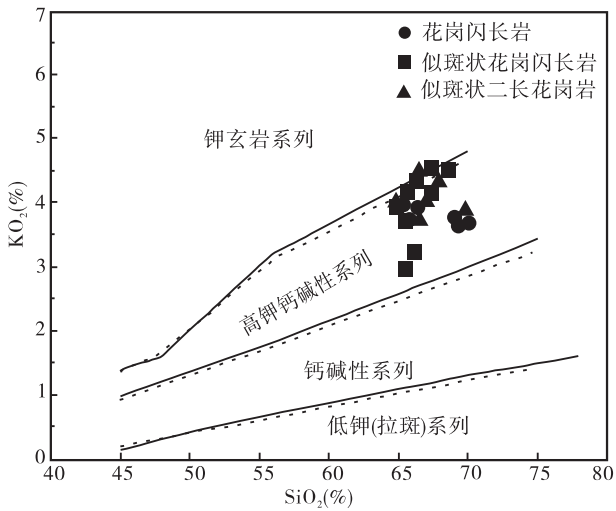


图 2 野牛脊山地区侵入岩 $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O}$ 图解
(底图据 PECCERILLO R et al., 1976)
Fig. 2 $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O}$ diagrams of the intrusive rocks
in Yeniujiashan area

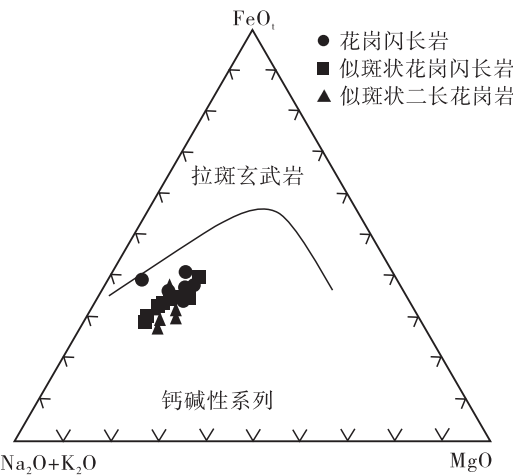


图 3 野牛脊山地区侵入岩的 AFM 图解
(底图据 IRVINE et al., 1971)
Fig. 3 AFM diagrams for the intrusive rocks
in Yeniujiashan area

3.2 稀土和微量元素特征

岩石稀土元素及特征参数见表 2。岩石稀土总

量 ΣREE 为 $157.89\times10^{-6}\sim299.15\times10^{-6}$,平均为 244.32×10^{-6} ,明显具有壳源特征;其中轻稀土含量 LREE 为 $141.57\times10^{-6}\sim267.57\times10^{-6}$,重稀土含量 HREE 为 $16.32\times10^{-6}\sim31.58\times10^{-6}$,轻重稀土比值 $\text{LREE}/\text{HREE}=7.02\sim9.96$; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 $3.55\sim5.63$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $6.85\sim14.71$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $1.30\sim2.02$;在稀土元素分配曲线上显示轻稀土元素曲线向右倾斜,重稀土元素呈平缓型(图 5a),说明轻稀土元素分馏明显,可能是受到岩浆源区内斜长石、橄榄石或辉石的影响;中稀土元素分馏程度小于轻稀土大于重稀土,显示岩浆源区的残留矿物可能含有角闪石,因为中稀土的富集主要受角闪石的控制;重稀土元素则表现为平坦型,分馏不明显。 $\delta\text{Eu}=0.47\sim0.66$,平均为 0.55,显示明显的 Eu 负异常,说明源区在部分熔融过程中有斜长石残留或岩浆演化过程中斜长石发生了结晶分异作用。各岩石稀土配分曲线近于平行,反映属同源岩浆的产物。

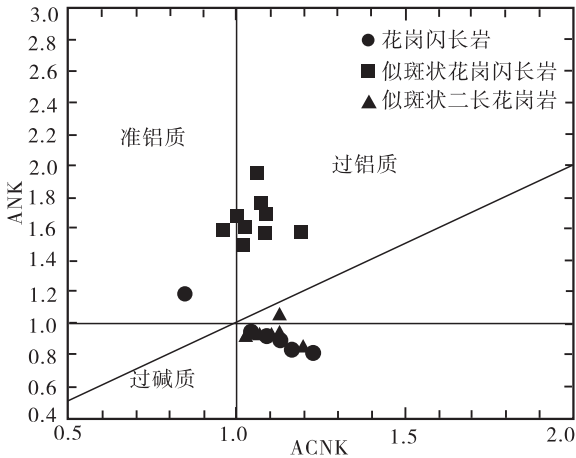


图 4 野牛脊山地区侵入岩 A/CNK--A/NK 图解
(底图据 MANIA P D, 1989)
Fig. 4 A/CNK--A/NK diagrams of the intrusive
rocks in Yeniujiashan area

岩石微量元素特征见表 3,各岩石中 Rb/Sr 为 $0.52\sim2.55$,呈降低趋势,并且均远远高于地壳值(0.24)。以洋脊(ORG)为标准的微量元素蛛网图中(图 5b)各岩石表现出相似的特征,Rb 具有明显富集, K、Th 含量较高, Ba 相对亏损, Ce、Hf、Zr、Sm、Y、Yb 等明显低于洋脊花岗岩,与阿曼同碰撞花岗岩的分布形式(PEARCE, 1984)相似,反映出壳源花岗岩的特征。

表 2 野牛脊山地区侵入岩岩石稀土元素分析结果及参数特征表
Tab. 2 REE analysis results and parameter characteristics of the intrusive rocks in Yeniujiashan area

样号	岩性	轻稀土元素(10^{-6})						重稀土元素(10^{-6})								
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ
I GS8503	花岗闪长岩	34.11	65.88	7.58	27.39	5.45	1.16	5.18	0.80	4.26	0.86	2.37	0.36	2.18	0.326	157.89
I GS8506-1		49.27	96.79	11.24	41.24	7.84	1.47	6.92	1.09	5.99	1.21	3.20	0.50	2.98	0.42	230.15
I Pm401Gs10-2		57.60	114.00	13.80	50.80	9.41	1.49	8.64	1.35	7.03	1.41	3.97	0.61	4.18	0.63	275.35
I Pm401Gs11-2		61.30	95.20	10.60	38.00	6.84	1.38	7.02	1.09	5.52	1.11	3.01	0.43	2.81	0.41	234.75
I Pm401Gs1-1		47.40	95.00	11.50	42.90	7.83	1.42	7.39	1.16	5.93	1.19	3.25	0.48	3.13	0.46	229.10
I Pm401Gs7-1		47.30	96.30	11.50	43.30	8.25	1.42	7.60	1.23	6.32	1.22	3.34	0.49	3.15	0.46	231.86
I GS8504	似斑状花岗闪长岩	63.70	124.40	14.30	53.36	10.13	1.67	9.25	1.50	8.31	1.72	4.64	0.77	4.73	0.66	299.15
I GS8407		59.84	119.10	13.81	50.40	9.50	1.66	8.51	1.35	7.27	1.46	3.90	0.63	3.63	0.53	281.63
I Pm401Gs2-1		44.90	91.10	10.09	41.20	7.85	1.58	7.46	1.26	6.73	1.36	3.79	0.55	3.55	0.54	222.80
I Pm401Gs2-3		48.50	100.00	11.80	43.70	8.19	1.43	7.61	1.24	6.61	1.31	3.61	0.54	3.48	0.52	238.79
I Pm401Gs4-1		53.70	108.00	12.40	45.80	8.64	1.46	7.94	1.29	6.79	1.35	3.71	0.56	3.68	0.54	255.42
I Pm401Gs6-2		47.90	93.70	11.10	41.30	7.70	1.35	7.34	1.13	5.79	1.13	3.13	0.46	3.02	0.43	225.44
I Pm401Gs8-1		52.90	105.00	12.50	46.80	8.75	1.46	8.26	1.29	6.94	1.40	3.84	0.57	3.77	0.56	254.13
I Pm401Gs9-1		57.40	112.00	13.50	49.50	8.92	1.36	8.36	1.28	6.72	1.37	3.72	0.55	3.72	0.56	269.28
I Pm401Gs10-1		57.80	112.00	13.50	50.10	9.07	1.59	8.79	1.35	7.10	1.45	3.92	0.58	3.80	0.57	271.99
I Pm401Gs3-1	二长花岗岩	44.50	92.30	11.30	41.90	7.88	1.50	7.04	1.17	6.19	1.23	3.51	0.52	3.45	0.51	222.87
I Pm401Gs3-2		55.50	111.00	13.30	49.40	9.16	1.45	8.62	1.35	7.27	1.46	4.04	0.59	3.81	0.57	267.97
I Pm401Gs5-1		49.50	95.60	11.70	43.50	8.21	1.43	7.83	1.20	6.43	1.27	3.53	0.51	3.35	0.49	234.57
I Pm401Gs5-2		60.50	119.00	14.20	52.30	9.65	1.58	8.83	1.37	7.07	1.40	3.78	0.55	3.59	0.53	284.35
I Pm401Gs6-1		51.60	110.00	12.30	45.30	8.30	1.40	7.76	1.23	6.29	1.24	3.4	0.51	3.35	0.50	252.80
I Pm401Gs14-1		40.20	77.10	9.01	32.80	6.52	1.05	6.37	1.11	6.12	1.28	3.74	0.58	3.96	0.58	190.40
样号	岩性	主 要 参 数														
		Σ REE	LREE	HREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	La/Yb	δ Eu	δ Ce					
I GS8503	花岗闪长岩	157.89	141.57	16.32	8.67	10.55		3.94	1.92	15.64	0.66	0.95				
I GS8506-1		230.15	207.85	22.31	9.32	11.13		3.95	1.87	16.51	0.60	0.95				
I Pm401Gs10-2		275.35	247.53	27.82	8.90	9.29		3.85	1.67	13.78	0.50	0.95				
I Pm401Gs11-2		234.75	213.33	21.42	9.96	14.70		5.63	2.02	21.8	0.60	0.83				
I Pm401Gs1-1		229.10	206.11	22.99	8.97	10.23		3.81	1.91	15.17	0.56	0.95				
I Pm401Gs7-1		231.86	208.05	23.80	8.74	10.13		3.61	1.95	15.03	0.54	0.96				
I GS8504	似斑状花岗闪长岩	299.15	267.57	31.58	8.47	9.09		3.95	1.58	13.48	0.52	0.95				
I GS8407		281.63	254.34	27.29	9.32	11.12		3.96	1.89	16.49	0.55	0.96				
I Pm401Gs2-1		222.80	197.56	25.24	7.83	8.51		3.59	1.69	12.63	0.62	0.96				
I Pm401Gs2-3		238.79	213.88	24.92	8.58	9.39		3.73	1.76	13.92	0.55	0.98				
I Pm401Gs4-1		255.42	229.57	25.85	8.88	9.85		3.91	1.74	14.61	0.53	0.97				
I Pm401Gs6-2		225.44	203.02	22.42	9.06	10.69		3.91	1.96	15.85	0.54	0.94				
I Pm401Gs8-1		254.13	227.52	26.61	8.55	9.47		3.80	1.77	14.05	0.52	0.95				
I Pm401Gs9-1		269.28	242.99	26.29	9.24	10.39		4.05	1.81	15.40	0.47	0.94				
I Pm401Gs10-1		271.99	244.43	27.56	8.87	10.26		4.01	1.87	15.21	0.54	0.94				
I Pm401Gs3-1	二长花岗岩	222.87	199.26	23.61	8.44	8.70		3.55	1.65	12.91	0.6	0.97				
I Pm401Gs3-2		267.97	240.27	27.71	8.67	9.83		3.81	1.83	14.58	0.49	0.96				
I Pm401Gs5-1		234.57	209.94	24.62	8.53	9.96		3.79	1.89	14.77	0.54	0.93				
I Pm401Gs5-2		284.35	257.24	27.12	9.49	11.36		3.95	1.98	16.85	0.51	0.95				
I Pm401Gs6-1		252.80	228.52	24.28	9.41	10.38		3.91	1.87	15.39	0.53	1.01				
I Pm401Gs14-1		190.40	166.66	23.74	7.02	6.85		3.88	1.30	10.15	0.49	0.94				

表 3 野牛脊山地区侵入岩岩石微量元素分析结果表(10⁻⁶)

Tab. 3 Composition results of trace elements of the intrusive rocks in Yeniujiashan area (10⁻⁶)

样号	岩性	K	Rb	Sr	Ba	Th	Ta	Nb	Ce	Zr	Hf	Sm	Y	Yb	Rb/ Sr
I GS8503	花岗闪长岩	15 397	113. 6	180	686	13. 22	0. 93	10. 60	65. 88	197. 80	7. 50	5. 45	22. 31	2. 18	0. 63
I GS8506 - 1		15 770	162. 5	234	565	18. 40	1. 01	12. 69	96. 79	250. 30	8. 60	7. 84	30. 25	2. 98	0. 69
I Pm401Gs10 - 2		15 687	163	165	937	21. 20	1. 75	17. 90	114. 00	299. 00	9. 77	9. 41	37. 10	4. 18	0. 99
I Pm401Gs11 - 2		21 705	194	134	893	9. 76	0. 76	7. 33	95. 20	154. 00	4. 62	6. 84	32. 00	2. 81	1. 45
I Pm401Gs1 - 1		16 517	152	59. 5	1 101	18. 00	1. 50	14. 70	95. 00	269. 00	9. 11	7. 83	30. 10	3. 13	2. 55
I Pm401Gs7 - 1		16 559	134	82	1 012	18. 70	1. 43	14. 20	96. 30	244. 00	8. 82	8. 25	30. 90	3. 15	1. 63
I GS8504	似斑状花岗闪长岩	13 238. 5	121. 2	130	825	17. 58	1. 67	21. 23	124. 40	343. 20	16. 50	10. 13	43. 68	4. 73	0. 93
I GS8407		19 048. 5	184. 6	152	895	18. 41	1. 48	18. 36	119. 10	284. 90	11. 30	9. 50	36. 98	3. 63	1. 21
I Pm401Gs2 - 1		15 438	127	188	957	15. 30	2. 17	17. 10	91. 10	285. 00	10. 10	7. 85	35. 30	3. 55	0. 68
I Pm401Gs2 - 3		17 056. 5	157	169	951	18. 40	1. 74	17. 30	100. 00	280. 00	10. 10	8. 19	32. 80	3. 48	0. 93
I Pm401Gs4 - 1		17 928	168	168	868	19. 50	1. 65	16. 30	108. 00	301. 00	11. 00	8. 64	34. 10	3. 68	1. 00
I Pm401Gs6 - 2		18 799. 5	165	159	992	17. 90	1. 48	14. 50	93. 70	261. 00	9. 66	7. 70	28. 20	3. 02	1. 04
I Pm401Gs8 - 1		17 388. 5	190	198	833	18. 70	1. 74	15. 90	105. 00	244. 00	8. 81	8. 75	36. 40	3. 77	0. 96
I Pm401Gs9 - 1		12 367	113	218	743	23. 10	1. 63	16. 90	112. 00	291. 00	9. 87	8. 92	33. 50	3. 72	0. 52
I Pm401Gs10 - 1		16 475. 5	183	166	1 030	21. 00	2. 05	19. 30	112. 00	276. 00	9. 15	9. 07	36. 40	3. 80	1. 10
I Pm401Gs3 - 1	二长花岗岩	20 833	161	157	1 130	18. 60	1. 60	15. 60	92. 30	270. 00	9. 34	7. 88	30. 70	3. 45	1. 03
I Pm401Gs3 - 2		16 766	149	141	891	19. 50	1. 61	16. 00	111. 00	298. 00	10. 90	9. 16	37. 70	3. 81	1. 06
I Pm401Gs5 - 1		16 766	153	166	864	16. 20	1. 44	14. 60	95. 60	248. 00	8. 96	8. 21	33. 20	3. 35	0. 92
I Pm401Gs5 - 2		17 845	159	177	969	20. 90	1. 58	16. 40	119. 00	296. 00	10. 60	9. 65	35. 80	3. 59	0. 90
I Pm401Gs6 - 1		15 272	115	190	893	19. 20	1. 51	16. 70	110. 00	305. 00	10. 30	8. 30	32. 50	3. 35	0. 61
I Pm401Gs14 - 1		15 895	175	198	520	19. 90	1. 51	11. 70	77. 10	179. 00	5. 84	6. 52	34. 10	3. 96	0. 88

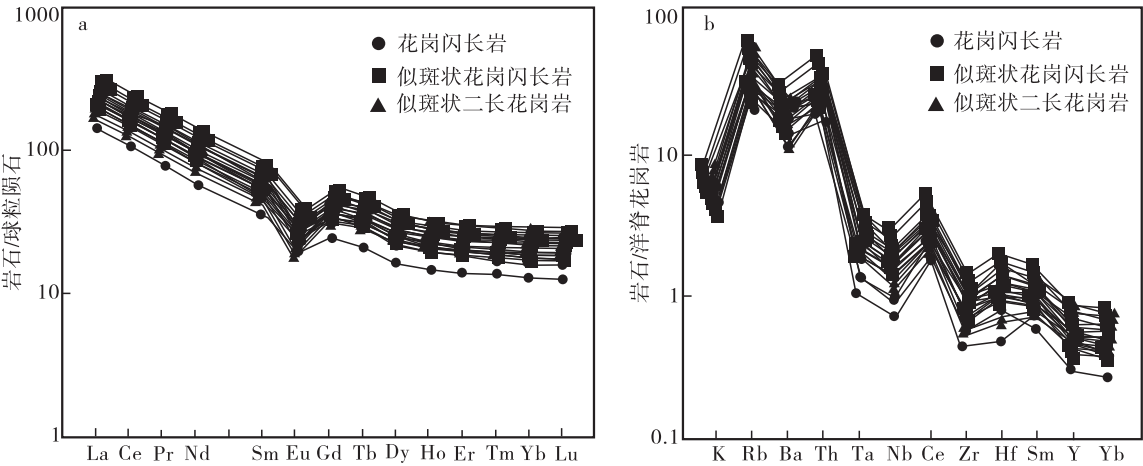


图 5 野牛脊山地区侵入岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图和微量元素洋脊花岗岩标准化蛛网图(球粒陨石标准化数值据 SUN et al. ,1989;洋脊花岗岩标准化数值据 PEARCE,1984)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE diagram and ORG-normalized trace element spider diagram of the intrusive rocks in Yeniujiashan area

4 锆石 U-Pb 年代学

本次研究针对该地区的似斑状二长花岗岩样品选取了一件样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定。似斑状二长花岗岩中的锆石多为浅黄色、无色透明的短柱状、中长柱状晶体,少部分为半截状,粒度多为 80~200 μm,大多数锆石长宽比介于 1.5:1~2:1,个别锆石长宽比为 4:1,边界清晰、平直,柱面发育。阴极发光图像表现出典型的岩浆韵律环带和明暗相间的条带结构,属于典型的岩浆结晶产物。锆石内部结构比较简单,部分锆石颗粒具有窄的浅色边和港湾状的溶蚀边,但大多数锆石显示出清晰的岩浆环带特征,浅色边可能为后期的

变质增生边。

本次测年样品似斑状二长花岗岩(IPm401Bb2-3)共测试 24 颗锆石,获得有效点 24 个,测试得到的同位素比值和年龄数据见表 4,锆石 U 含量为 $124\times 10^{-6}\sim 995\times 10^{-6}$,Pb 含量为 $9\times 10^{-6}\sim 451\times 10^{-6}$,Th/U 值为 0.09~0.81,绝大部分大于 0.4(平均为 0.46),显示典型的岩浆成因锆石(吴元保,2004),说明锆石 U-Pb 测年结果代表了岩体的形成时代。测试 24 个测点多数集中在一个小的范围内,且 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的谐和性较好,表明了锆石结晶以后它的 U-Pb 体系一直保持封闭状态。加权平均年龄为 $(443.9\pm 2.1)\text{Ma}$ (MSWD=0.19)(图 6),代表了野牛脊山地区似斑状二长花岗岩的结晶年龄,即该期侵入岩形成的地质时期为早志留世。

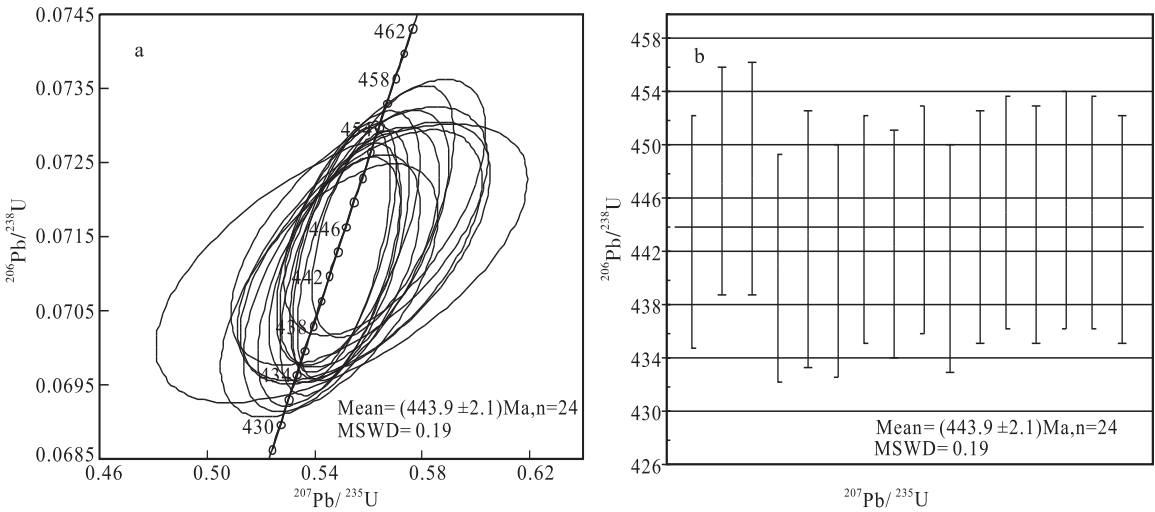


图 6 似斑状花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图和同位素表明年龄加权平均值图

Fig. 6 LA-ICP-MS Zircon U-Pb concordia diagram and the weighted mean age diagram of porphyritic granodiorite

5 讨论

5.1 岩石成因

花岗岩成因类型判定是花岗岩研究中最重要基础问题,目前比较常用的花岗岩分类方案为 I、S、M 和 A 型花岗岩,已被地质学家们广泛应用(吴福元等,2007)。野牛脊山地区侵入岩具有较高的 SiO₂ 含量(64.69%~78.03%)和全碱含量(Na₂O+K₂O=5.13%~7.92%),里特曼指数小于 3.3($\delta=0.91\sim 2.89$),铝饱和指数(A/CNK)为 0.84~1.23,P₂O₅ 含量为 0.10%~0.27%,是一套高硅、富

铝、富碱的准铝质-弱过铝质岩石,SYLVESTER 等(1998)研究也表明过铝质花岗岩是地壳硅铝层物质的重熔,以上特征均显示出 S 型花岗岩的相关特征。在 ACF 图解中(图 7),全部样品点均落在 S 型花岗岩区内。因此,可以判断该地区侵入岩为 S 型花岗岩,且来源于地壳物质的重熔。

前人对花岗岩的源区做了大量的实验研究,结果表明,如果是中基性岩石发生了部分熔融,通常会导致偏中性的花岗闪长质的准铝质花岗岩类的形成;如果是碎屑沉积岩类发生了部分熔融,则一般会导致偏酸性的过铝质花岗岩类的形成;而如果是泥砂质沉积岩类发生了部分熔融,则可能形成强烈富

表 4 野牛脊山地区似斑状花岗闪长岩 (IPm401Bb2-3) LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表
Tab. 4 LA-ICP-MS Zircon U-Pb data of porphyritic granodiorite in Yeniuishan area (IPm401Bb2-3)

样号	元素含量(10 ⁻⁶)			同位素原子比率						同位素年龄(Ma)							
	Pb	U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ
IPm401Bb2-3																	
1	20	221	0.092 8	0.000 8	0.875 5	0.008 7	0.068 4	0.000 8	0.064 9	0.001 5	0.087	572	3	639	21	882	15
2	13	163	0.075 9	0.000 7	0.608 1	0.009 3	0.058 1	0.001 7	0.028 3	0.000 8	0.362	472	5	482	10	533	15
3	26	297	0.075 5	0.000 9	0.611 9	0.012 3	0.058 8	0.001 9	0.028 3	0.001 7	0.747	469	1	485	13	559	39
4	17	220	0.075 4	0.001 1	0.589 1	0.010 5	0.056 7	0.001 1	0.029 2	0.000 7	0.344	469	3	470	5	478	25
5	40	124	0.283 4	0.000 7	3.878 1	0.011 1	0.099 3	0.000 7	0.093 9	0.000 8	0.59	1608	2	1609	9	1610	24
6	14	178	0.071 2	0.000 8	0.557 2	0.009 2	0.056 7	0.001 6	0.022 1	0.000 9	0.634	444	2	450	7	481	17
7	19	247	0.071 8	0.000 9	0.565 4	0.008 7	0.057 1	0.000 9	0.021 5	0.000 9	0.62	447	4	455	11	495	25
8	10	132	0.071 9	0.001 3	0.566 1	0.009 6	0.057 1	0.001 3	0.021	0.001 3	0.68	448	1	455	5	496	19
9	17	229	0.070 8	0.000 7	0.545 5	0.009 9	0.055 9	0.000 7	0.023	0.000 7	0.418	441	5	442	17	448	12
10	9	129	0.071 1	0.000 9	0.55	0.011 1	0.056 1	0.000 9	0.023 4	0.000 9	0.381	443	3	445	11	455	17
11	23	337	0.070 9	0.001 1	0.546 2	0.012 7	0.055 9	0.001 5	0.026 5	0.001 1	0.12	441	1	443	15	448	16
12	60	799	0.071 3	0.000 8	0.549 9	0.012 3	0.056	0.000 8	0.020 6	0.000 8	0.561	444	2	445	12	451	10
13	26	353	0.071 1	0.000 8	0.549 6	0.010 2	0.056 1	0.001 7	0.021 1	0.000 8	0.462	443	3	445	13	456	15
14	451	777	0.480 2	0.000 7	11.104 4	0.016 3	0.167 7	0.000 7	0.134 1	0.000 7	0.81	2528	5	2532	18	2535	13
15	50	729	0.071 4	0.000 8	0.550 6	0.017 1	0.056	0.000 8	0.021 8	0.003 4	0.186	444	2	445	15	451	15
16	28	347	0.070 9	0.000 9	0.545 4	0.015 8	0.055 8	0.000 9	0.023 9	0.000 9	0.748	442	1	442	6	444	18
17	263	995	0.262 6	0.001 3	3.448 2	0.010 8	0.095 2	0.001 3	0.087	0.001 3	0.202	1503	2	1515	12	1533	14
18	52	303	0.165 2	0.000 7	2.675 1	0.014 9	0.117 4	0.000 7	0.05	0.001 5	0.3	986	2	1322	11	1917	19
19	18	238	0.071 3	0.000 8	0.554 7	0.019 5	0.056 5	0.001 5	0.028 4	0.001 8	0.415	444	2	448	10	470	24
20	23	310	0.071 5	0.000 9	0.552 3	0.008 8	0.056	0.003 3	0.025 9	0.000 9	0.421	445	1	447	13	454	21
21	12	150	0.071 3	0.001 3	0.558 3	0.010 7	0.056 8	0.002 3	0.026 5	0.001 3	0.73	444	3	450	12	483	15
22	15	212	0.071 5	0.000 7	0.556 5	0.011 6	0.056 4	0.004 3	0.028 3	0.000 7	0.296	445	5	449	10	470	17
23	22	299	0.071 5	0.000 9	0.558 4	0.008 9	0.056 7	0.000 8	0.026 6	0.000 9	0.418	445	2	450	9	478	19
24	36	448	0.071 2	0.001 3	0.554 3	0.012 5	0.056 4	0.001 3	0.026 2	0.001 3	0.622	444	3	448	11	469	15

铝和富钾的花岗岩类(JOHANNES W et al,1996; PATIÑO DOUCE A E et al,1998;CASTRO A et al,1999)。SYLVESTER 等(1998)研究表明,花岗岩的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值能够有效追踪其源区成分,一般来说贫长石、富黏土的泥质岩部分熔融产生的熔体 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 较低(<0.30),而富长石、贫黏土的砂质岩部分熔融产生的熔体 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 较高(>0.30)。野牛脊山的花岗岩均为富 Al、富 K 的钙碱性系列花岗岩, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 $0.5\sim3.07$,表明其源岩可能为黏土、长石含量较高的泥砂质沉积岩类。

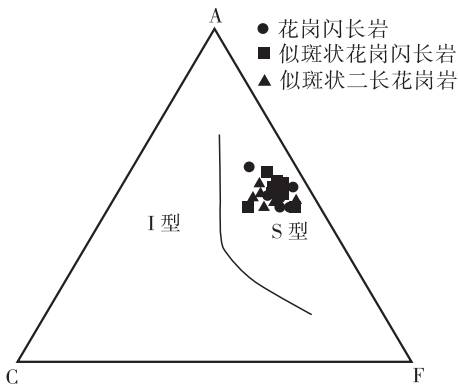


图 7 野牛脊山地区侵入岩 ACF 图解
(底图据 Irvine,1971)

Fig. 7 ACF diagram for the intrusive rocks in Yeniuujishan area (after Irvine,1971)

前人对源岩的熔融机制的研究表明,变质沉积岩的熔融作用主要有饱和水固相线上的熔融、白云母脱水熔融和黑云母脱水熔融 3 种机制,不同的部分熔融机制通常会产生不同类型的熔体。通常由白云母脱水熔融产生的熔体具有较低 Fe、Mg、Ti 以及较高的 K 含量(BROWN M, 2002; MCDERMOTT F et al,1996);而黑云母脱水熔融产生的熔体通常具有较高的 Fe、Mg 以及 Ti 含量。野牛脊山似斑状二长花岗岩具有较高的 $\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ 含量($3.25\sim4.55$,平均为 3.87), K_2O 含量较低($2.98\%\sim5.23\%$,平均为 4.05%),这说明野牛脊山的花岗岩源岩的部分熔融机制应该是黑云母脱水熔融作用。

5.2 构造环境分析

花岗岩形成的构造环境是指形成时的地球动力学背景,PEACE 等(1984)在研究花岗岩与板块构造关系时,将花岗岩分为 4 种基本类型:洋脊花岗岩

(ORG)、火山弧花岗岩(VAG)、板内花岗岩(WPG)和碰撞花岗岩(COLG)。本次研究样品在 $w(\text{Y})-w(\text{Nb})$ 构造环境判别图解(图 8)上,大部分样品落在火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩;在 $\text{R1}-\text{R2}$ 构造环境判别图解中(图 9),样品几乎全部落在同碰撞。总体显示野牛脊山地区侵入岩具有同碰撞花岗岩的特征,侵入岩构造环境应属同碰撞构造环境。

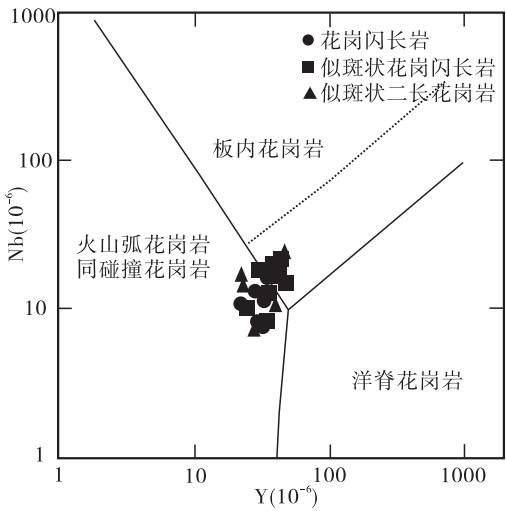
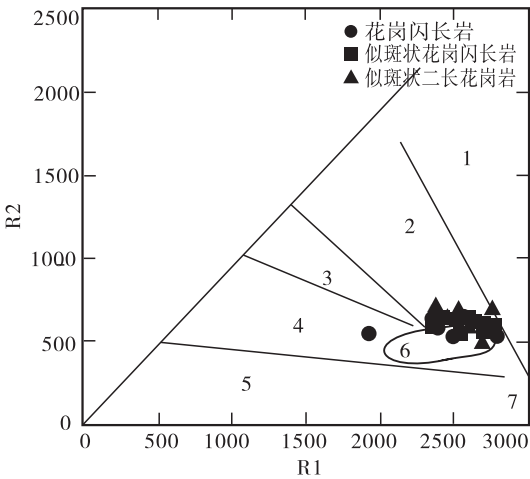


图 8 野牛脊山地区侵入岩 Y-Nb 构造环境判别图解
(底图据 PEARCE et al. ,1984)

Fig. 8 Discrimination diagrams for tectonic settings of the intrusive rocks in Yeniuujishan area(Y-Nb)



1. 地幔分离;2. 板块碰撞前的;3. 碰撞后的抬升;4. 造山晚期的;5. 非造山的;6. 同碰撞的;7. 造山后的
图 9 野牛脊山地区侵入岩 $\text{R1}-\text{R2}$ 构造背景图解
(底图据 BATCHELOR R A et al. ,1985)

Fig. 9 Diagrams for tectonic settings of the intrusive rocks in Yeniuujishan area($\text{R1}-\text{R2}$)

前人对南祁连造山带的结构及地球动力学演化意见不统一(夏林圻等,1996;张旗等,1997;秦海鹏,2012),认为南祁连地区的地球动力学演化并非经历了多期“开-合构造”旋回,而主要由柴北缘洋-陆俯冲、陆-陆深俯冲、陆块拼贴碰撞、中祁连陆内裂谷拉张闭合并存的复合造山带。其演化历史主要经历了古元古代一中元古代末期古陆块形成、新元古代陆块差异性演化、加里东期柴北洋洋盆、南祁连洋盆开始闭合、微陆块自南向北碰撞拼贴、华里西一印支期柴北带缝合造山、华里西期宗务隆增生楔造山、中新生代北东向构造-岩浆活动等阶段。

其中加里东运动早期,有限洋盆发育阶段,形成500~540 Ma的蛇绿岩(宋述光,1997),古洋壳向微陆块发生初次正向俯冲作用,形成加里东期活动陆缘岛弧火山岩(514~486 Ma)(李怀坤等,2010;何世平等,2011);接着古洋壳高角度的下插俯冲以及俯冲大洋岩石圈拖曳陆块深俯冲作用,在30~60 km深度形成高压-超高压变质带,并伴随形成与板块俯冲及碰撞有关的I型和S型花岗岩(445~496 Ma)(贾群子,2006)。

结合野牛脊山地区花岗岩的地球化学特征和构造图解,该岩体应该形成于加里东运动期,并经历了古洋壳高角度的下插俯冲以及俯冲大洋岩石圈拖曳陆块深俯冲作用过程。

5.3 成岩时代

LA-ICP-MS锆石U-Pb测年结果表明,野牛脊山地区似斑状二长花岗岩的结晶年龄为 (443.9 ± 2.1) Ma(MSWD=0.19),形成的地质时期为早志留世。在野外路线地质调查及剖面测制工作中,见有岩体与早石炭世臭牛沟组、早二叠世草地沟组呈角度不整合接触,依据区域地质特征、岩石组分、同位素测年及岩体空间接触关系,将该岩体形成时代厘定为早志留世。

区域构造演化特征表明,南祁连造山带整体上为始特提斯洋盆闭合,微陆块或地体自南向北不断俯冲拼贴-聚合形成的一个具有多期次复合造山作用的碰撞造山带。早志留世(435 Ma左右)时期,在南祁连与中祁连之间,由于大洋板块的南向俯冲,将深海沉积物带入到地幔处,同时深部的俯冲洋壳在高温下发生脱水熔融,熔融的熔体上涌,幔源岩浆沿着深大断裂不断上升到中、上地壳底部,烘烤地壳物

质进而发生部分熔融作用而形成了花岗岩体,野牛脊山地区花岗岩就形成于此时,最终在志留纪晚期-泥盆纪末期,中祁连与南祁连完成拼贴和碰撞(刘志武等,2006)。因此,认为该地区花岗岩可能是由这种俯冲碰撞的地球动力学背景下形成的。

6 结论

(1)野牛脊山地区花岗岩主要由花岗闪长岩、似斑状花岗闪长岩及似斑状二长花岗岩组成,以高硅、富铝、富钾、富碱和贫钛、铁、镁、钙为特征,岩石里特曼指数 $\delta=0.91\sim 2.89$,A/CNK为 $0.84\sim 1.23$,总体显示为准铝质-弱过铝质的钙碱性系列岩石;稀土和微量元素组成上,显示大离子亲石元素Rb、K、LREE和活泼不相容元素Th明显富集,Ba相对亏损,Ce、Hf、Zr、Sm、Y、Yb等明显低于洋脊花岗岩,具有明显的Eu负异常,属于S型花岗岩且来源于地壳物质的重熔。另外,其地球化学特征表明,其源岩可能为黏土、长石含量较高的泥砂质沉积岩类,源岩部分熔融机制应该是黑云母脱水熔融作用。

(2)早志留世岩体在 $w(Y)-w(Nb)$ 和R1-R2构造环境判别图解中,均落入同碰撞花岗岩,并结合地球化学特征和构造图解可推出该区花岗岩与南祁连造山带加里东运动期的板块碰撞有关,并经历了古洋壳高角度的下插俯冲以及俯冲大洋岩石圈拖曳陆块深俯冲作用过程。

(3)野牛脊山地区似斑状花岗闪长岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (443.9 ± 2.1) Ma,表明其形成于早志留世。结合该地区构造演化,认为野牛脊山地区侵入岩形成于板块俯冲碰撞的地球动力学背景下。

参考文献(References):

- 夏林圻,夏祖春,徐学义. 北祁连山海相火山岩岩石成因[M]. 北京:地质出版社,1996,1-153.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, XU Xueyi. Genetic Environments of Early Paleozoic Marine Volcanics of North Qilian Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996, 1-153(in Chinese)
- 李文渊. 祁连山主要矿床组合及其成矿动力学分析[J]. 地

- 球学报, 2004, 25(3): 313-320.
- LI Wenyuan. Main Mineral Deposit Associations in the Qilian Mountains and Their Metallogenic Dynamics[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(3): 313-320 (in Chinese with English abstract).
- 何世平, 李荣社, 王超, 等. 南祁连东段化隆岩群形成时代的进一步限定[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(8): 34-44.
- HE Shiping, LI Rongshe, WANG Chao, et al. The further age constraint of Hualong Rock Group in the eastern segment of South Qilian Mountains[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(1): 34-44 (in Chinese with English abstract).
- 潘桂堂, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 1-28.
- PAN Guitang, XIAO Qinghui, LU Songnian, et al. Subdivision of Tectonic Units in China[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 1-28 (in Chinese with English abstract).
- 胡万龙, 贾志磊, 王金荣, 等. 南祁连化石沟花岗岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 高校地质学报, 2016, 22(02): 242-253.
- HU Wanlong, JIA Zhilei, WANG Jinrong, et al. Geochronology and Geochemistry characteristics of the granites from the Huashigou area, South Qilian and their tectonic significance[J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(02): 242-253 (in Chinese with English abstract).
- 王涛, 王晓霞, 郑亚东, 等. 花岗岩构造研究及花岗岩构造动力学刍议[J]. 地质科学, 2007, 42(1): 91-113.
- WANG Tao, WANG Xiaoxia, ZHENG Yadong, et al. Studies on structures of granitic plutons and granitic tectonic dynamics[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(1): 91-113 (in Chinese with English abstract).
- 张旗, 孙晓猛, 周德进, 等. 北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义[J]. 地球科学进展, 1997, 12(4): 366-393.
- ZHANG Qi, SUN Xiaomeng, ZHOU Dejin, et al. The characteristics of North Qilian ophiolites, forming setting and their tectonic significance[J]. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(4): 366-393 (in Chinese with English abstract).
- 宋述光. 北祁连山俯冲杂岩带的构造演化[J]. 地球科学进展, 1997, 12(4): 351-365.
- SONG Shuguang. Tectonic evolution of subductive complex belts in the North Qilian Mountains[J]. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(4): 351-365 (in Chinese with English abstract).
- 毛景文. 北祁连山西段铜金铁钨多金属矿床成矿系列和找矿评价[M]. 北京: 地质出版社, 2003, 1-55.
- MAO Jingwen. The copper, gold, iron and tungsten polymetallic metallogenic series of ore deposit and prospecting evaluation in northwestern Qilian mountain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003, 1-55 (in Chinese).
- 秦海鹏. 北祁连造山带早古生代花岗岩岩石学特征及其与构造演化的关系[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
- QIN Haipeng. Petrology of Early Paleozoic granites and their relation to tectonic evolution of orogen in the North Qilian Orogenic Belt[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2012 (in Chinese with English abstract).
- 冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京: 地质出版社, 1996, 1-135.
- FENG Yimin, HE Shiping. Geotectonic and Orogeny of the Qilian Mountain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996, 1-153 (in Chinese).
- 青海省地质矿产局. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991, 1-7.
- Qinghai Geology and Mineral Resources Bureau. Regional geological record of Qinghai Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991, 1-7 (in Chinese).
- 李怀坤, 朱士兴, 向振群, 等. 北京延庆高庄组凝灰岩锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束[J]. 岩石学报, 2010, 26(8): 2131-2140.
- LI Huaikun, ZHU Shixing, XIANG Zhenqun, et al. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(8): 2131-2140 (in Chinese with English abstract).
- 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 Yuanbao, ZHENG Yongfei. Study on genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589-1604 (in Chinese with English abstract).

- 吴福元,李献华,杨进辉,等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报,2007,23(06):1217-1238.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, YANG Jinhui, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract).
- 贾群子,杨钟堂,肖朝阳,等. 祁连成矿带成矿规律和找矿方向[J]. 西北地质,2006,39(02):96-113.
- JIAQunzi, YANG Zhongtang, XIAO Chaoyang, et al. Metallogenic Characteristics and Prospecting Target in the Qilian Metallogenic Zone[J]. *Northwestern Geology*, 2006, 39 (02): 96-113 (in Chinese with English abstract).
- 刘志武,王崇礼,石小虎. 南祁连党河南山花岗岩类特征及其构造环境[J]. 现代地质,2006,20(4):545-554.
- LIU Zhiwu, WANG Chongli, SHI Xiaohu. Granitoids Characteristics and Tectonic Setting of Danghenanshan Area in South Qilian Mountains[J]. *Geoscience*, 2006, 20 (4): 545-554(in Chinese with English abstract).
- LIU Yongsheng, HU Zhaochu, ZONG Keqing, et al. Reappraisal and refinement of zircon U - Pb isotope and trace element analyses by LA - ICP - MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15):1535-1546.
- LUDWIG K R. ISOPLOT 3: a User Manual, a Geochronological Toolkit for Microsoft excel[M]. California, Geochronology Centreat Berkeley, Special Publication, 2003, (4):1-74.
- PECCERILLO R, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58:63-81.
- IRVINE T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8:523-548.
- MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101:635-643.
- PEARCE J A, HARRIS 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.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society of London Special Publication*, 1989, 42(1):313-345.
- SYLVESTER P J. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 1998, 45:29-44.
- JOHANNES W, HOLTZ F. Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- PATINO DOUCE A E, MCCARTHY T C. Melting of crustal rocks during continental collision and subduction// Hacker B R, Liou J G (ed.). *When continents collide: Geodynamics of Ultra-high Pressure Rocks*[C]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998, 27-55.
- CASTRO A, PATINO DOUCE A E, CORRETGE L G, et al. Origin of peraluminous granites and granodiorites, Iberian massif, Spain; An experimental test of granite petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 135(2-3): 255-276.
- BROWN M. Retrograde processes in migmatites and granulites revisited[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2002, 20: 25-40.
- MCDERMOTT F, HARRIS N B W, HAWKESWORTH C J. Geochemical constraints on crustal anatexis: A case study from the PanAfrican granitoids of Namibia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, 123: 406-423.
- BATCHELOR R A, BOWDEN P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 1985, 48(1):43-55.