

# 中南祁连西缘肃北三个洼塘地区古生代两类花岗质侵入岩年代学及其地质意义\*

罗志文<sup>1</sup> 张志诚<sup>1\*\*</sup> 李建锋<sup>1</sup> 冯志硕<sup>2</sup> 汤文豪<sup>1</sup>

LUO ZhiWen<sup>1</sup>, ZHANG ZhiCheng<sup>1\*\*</sup>, LI JianFeng<sup>1</sup>, FENG ZhiShuo<sup>2</sup> and TANG WenHao<sup>1</sup>

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE; School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. China Non-Ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China

2013-06-17 收稿, 2014-01-24 改回.

**Luo ZW, Zhang ZC, Li JF, Feng ZS and Tang WH. 2015. Geochronology of two kinds of Paleozoic granitic plutons from Sangewatang in Subei, the western margin of Central-South Qilian and their geological implications. Acta Petrologica Sinica, 31(1):176-188**

**Abstract** The granitoids from Sangewatang in the western margin of Central-South Qilian are composed of granites, quartz diorites and granodiorites. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of granite is  $416.7 \pm 4.3$  Ma (MSWD = 0.52), while that of quartz diorite and granodiorite are  $442.5 \pm 4.7$  (MSWD = 0.46) and  $443.9 \pm 1.3$  Ma (MSWD = 0.17) respectively, indicating that two magmatic events have occurred in the study area. The granite is peraluminous with high K/Na and K content, and low Mg, Fe and Ca content. Meanwhile, it is enriched in high field strength elements, and depleted in large ion lithophile elements. Its  $\Sigma$ REE is  $122.0 \times 10^{-6}$  and  $\delta$ Eu is 0.05 with significant Eu negative anomaly. In contrast, the granodiorite and quartz diorite are also peraluminous but are enriched in Na. They have a lower content of high field strength elements and a slightly higher content of large ion lithophile elements. Their  $\Sigma$ REE range from  $133.3 \times 10^{-6}$  to  $247.6 \times 10^{-6}$  and  $\delta$ Eu range from 0.73 to 1.09, showing no significant Eu anomalies. Based on these geochemical characteristics, we conclude that the granites belong to A-type granites and were produced by partial melting of continental crust in a post-orogenic extensional setting. In contrast, the granodiorites and quartz diorites are I-type granites and are likely to be the product of island arc magmatism, associated with oceanic subduction. These results are of key importance to constrain the tectonic evolution of Central-South Qilian.

**Key words** Central-South Qilian; Magma activities; Extensional setting; Island arc; Paleozoic

**摘要** 中南祁连西缘三个洼塘附近花岗质岩石由花岗岩、石英闪长岩和花岗闪长岩构成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果表明,花岗岩、石英闪长岩和花岗闪长岩侵位年龄分别为  $416.7 \pm 4.3$  Ma (MSWD = 0.52)、 $442.5 \pm 4.7$  Ma (MSWD = 0.46) 和  $443.9 \pm 1.3$  Ma (MSWD = 0.17), 指示本区发生了两期岩浆活动事件。花岗质岩石均表现为过铝质,花岗岩高钾、K/Na, 低 Mg、Fe、Ca 的主量元素特征,富集高场强元素,亏损大离子亲石元素,  $\Sigma$ REE 为  $122.0 \times 10^{-6}$ ,  $\delta$ Eu 为 0.05, 具明显负铕异常。花岗闪长岩和石英闪长岩多数富钠,高场强元素含量相对花岗岩较低,而大离子亲石元素含量相对花岗岩略高,  $\Sigma$ REE 为  $133.3 \times 10^{-6} \sim 247.6 \times 10^{-6}$ ,  $\delta$ Eu 为 0.73 ~ 1.09, 铕异常特征不明显。综合研究表明,本区花岗岩可能属于造山活动结束后伸展环境下地壳物质部分熔融形成的 A 型花岗岩,花岗闪长岩和石英闪长岩则可能属于洋壳俯冲环境下引起岛弧岩浆活动而形成的 I 型花岗岩,这一成果对于研究中南祁连的构造演化有着重要意义。

**关键词** 中南祁连; 岩浆活动; 拉张环境; 岛弧; 古生代

**中图法分类号** P588.121; P597.3

\* 本文受国家自然科学基金项目(41072148, 40672130 和 40272085)资助。

第一作者简介: 罗志文, 男, 1987 年生, 博士生, 构造地质学专业, E-mail: zhiwenluo@163.com

\*\* 通讯作者: 张志诚, 男, 1963 年生, 主要从事构造地质学研究, E-mail: zczhang@pku.edu.cn

# 1 引言

作为我国西北地区重要山系之一的祁连山,因蕴含有丰富的古板块构造演化信息而成为地质学家们关注的焦点地区之一 (Xiao *et al.*, 2009; 许志琴等, 1994; 万渝生等, 2001; 刘寄陈, 1991; 王荃和刘雪亚, 1976)。造山带是大陆上花岗岩类最为发育的区域 (韩宝福, 2007), 因此, 花岗岩类在造山带的构造演化研究中具有举足轻重的地位。通过花岗质岩浆的类型学特征研究 (Schermaier *et al.*, 1997; Chappell and White, 1974, 1992; Pearce *et al.*, 1984; Barbarin, 1990) 可以很好地推断造山带深部发生的构造作用过程 (Schermaier *et al.*, 1997; Pitcher, 1982; Harris *et al.*, 1986)。花岗质岩浆锆石的精确定年可以排除后期构造热事件的干扰, 确定岩体侵位年代, 进而确定板块构造体制下俯冲、碰撞及后碰撞的造山带序列。因此, 花岗质岩石的构造背景及其成因类型, 尤其是造山带不同类型花岗质岩研究的

结合是判别构造块体动力学背景及其转换的有效途径 (Barbarin, 1999; 王涛等, 2007; Maurel *et al.*, 2004)。

祁连山造山带地区分布有大量的古生代花岗质岩浆岩。对于中祁连和南祁连地区出露的花岗质岩石, 前人做过不少的研究工作, 并取得了一定的研究成果: 借助于花岗质侵入岩的定年结果分析了中祁连地区经历的岩浆事件 (雍拥等, 2008), 并结合岩体地球化学特征确定了其成因及构造环境, 为祁连造山带的构造演化提供了重要的研究线索 (郭进京等, 1999; 苏建平, 2004a, b; 李建锋等, 2010); 通过花岗质侵入岩的特征研究分析了南祁连地区花岗质岩体的形成环境 (赵虹等, 2004; 刘志武等, 2006) 和成因类型 (刘志武和王崇礼, 2007), 重塑了南祁连构造演化史。然而, 前人在中南祁连地区报道的都是单种成因类型的花岗岩, 且中祁连西段酸性侵入岩体的年代学研究依然缺乏高精度的年代资料, 还难以建立精确的时空格架。本次研究在中南祁连西缘肃北三个洼塘地区同时发现了 A 型和 I 型两种不同成因类型的花岗岩, 并准确测定了该地区花岗质岩体的形成时代, 这对于分析探讨中南祁连乃至整个祁连造山带的构造演化具有

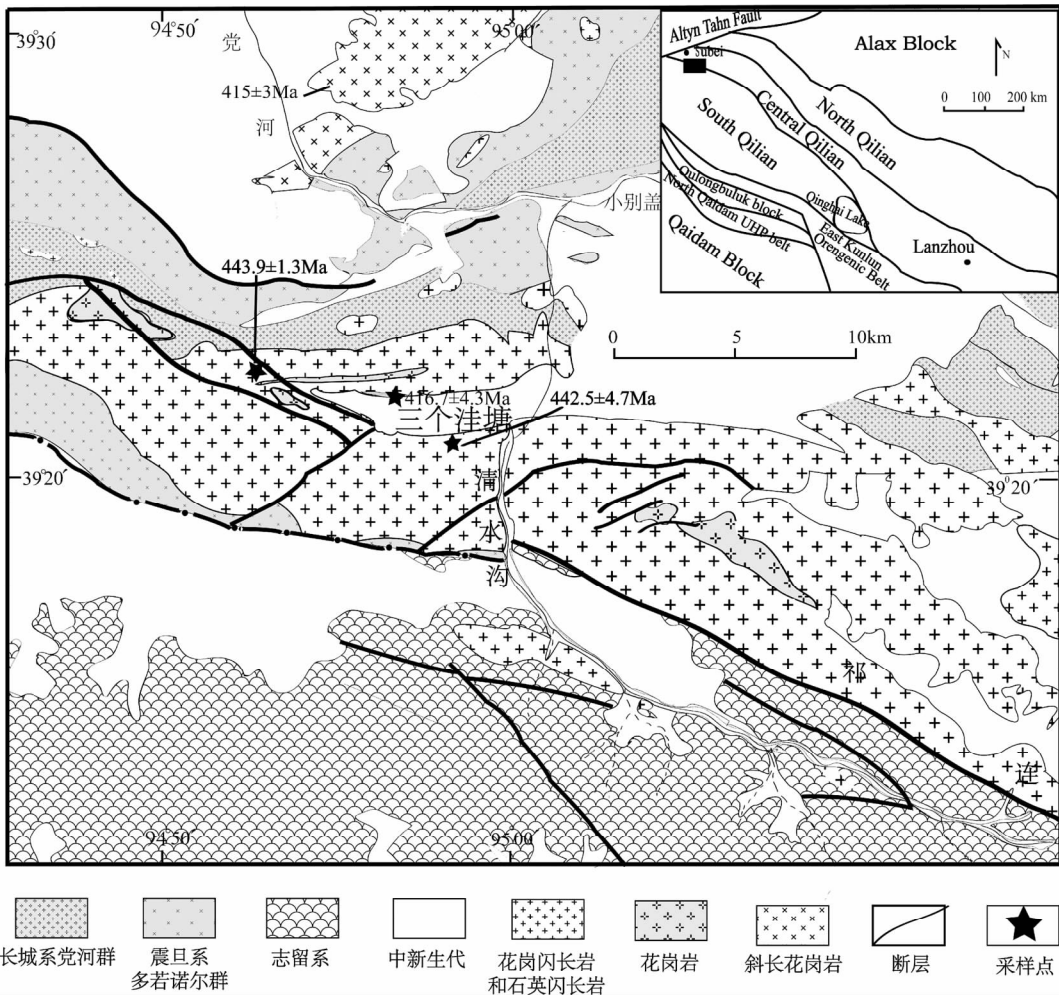


图 1 中-南祁连西缘地质简图 (据甘肃省地质矿产局, 1989)

Fig. 1 Geological sketch map of the western margin of Central-South Qilian Mountain (after BGMRG, 1989)

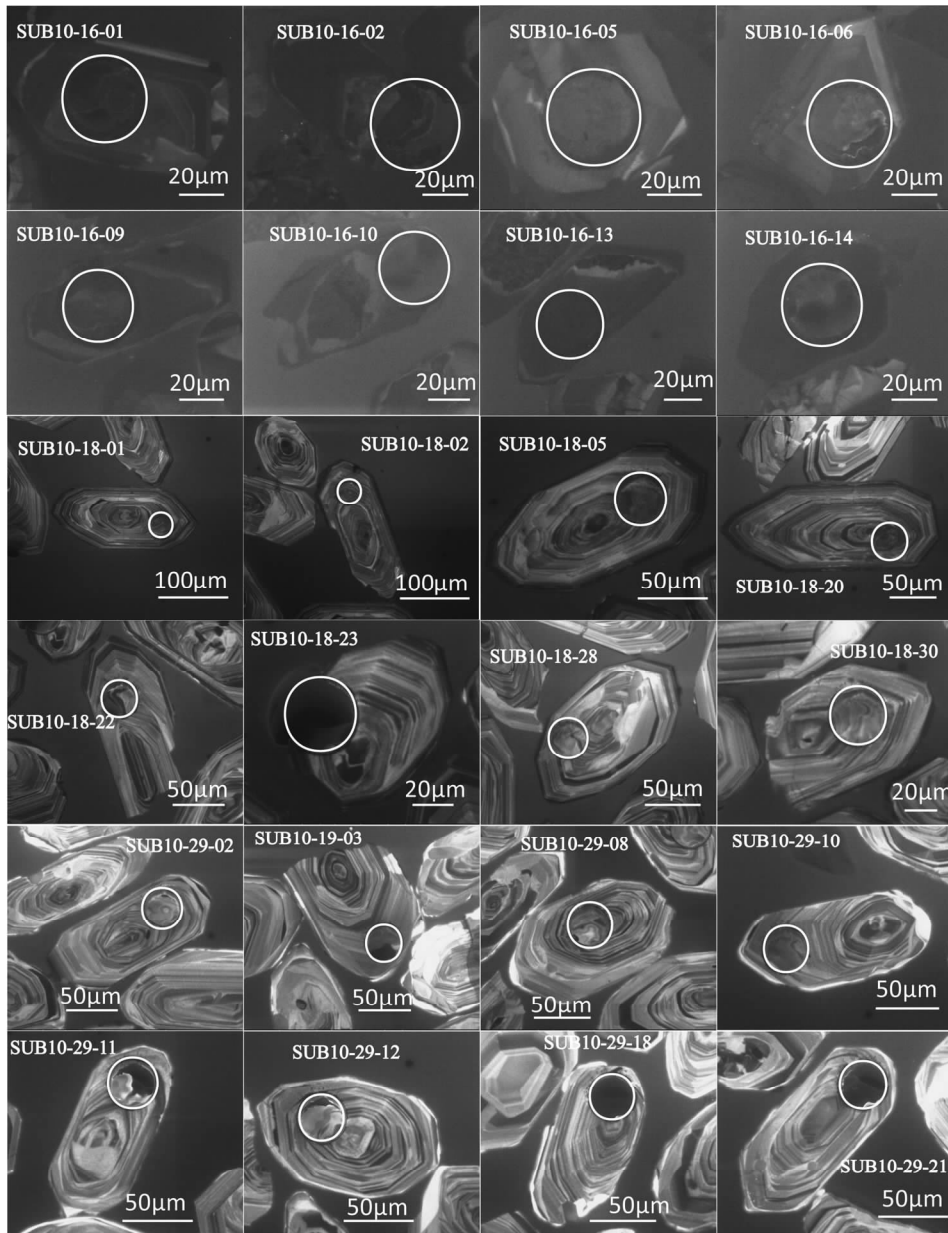


图2 花岗质岩体锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 2 CL image of zircons from granitic plutons

重要意义。

## 2 区域地质及岩相学特征

祁连造山带自北向南可分为阿拉善地块、北祁连、中祁连、南祁连、欧龙布鲁克微陆块和柴北缘超高压带等几个构造单元(Xiao *et al.*, 2009)。祁连造山带从早中奥陶世开始经历了俯冲造山作用(冯益民, 1997),到晚志留世末,残留海盆封闭,两侧刚性大陆碰撞,新生的碰撞造山带形成,并开始陆内造山作用过程。古生代造山作用,在整个祁连造山带地区引起酸性深成岩浆活动,形成与造山过程相关的花岗岩类

岩浆岩的侵位(冯益民, 1997)。本文研究区位于甘肃省肃北县境内,构造上处于中、南祁连交界处附近,一条北西-南东向的大断裂将研究区划分为中祁连和南祁连两个构造单元(图1)。断裂以北的中祁连地区出露大面积的花岗质岩体,岩体侵入于长城系党河群中岩组含榴二云石英片岩、含榴二云斜长变粒岩夹大理岩,以及震旦系多若诺尔群下岩组泥质板岩、砂岩、玄武岩夹硅质岩和中岩组辉石玄武岩、杏仁状玄武岩、中基性角砾熔凝灰岩等,部分地区与志留系地层呈断层接触;第三系和第四系的沉积物分布于山间盆地中。断裂以南的南祁连地区主要出露志留系二云石英片岩、绢云母片岩、斜长透闪片岩和长石砂岩等,而花岗质岩体仅在局部地

区零星分布;第四纪沉积物也仅分布于山间盆地中。本次采样位置如图所示,其经纬度为: N39°21'2.3" ~ 39°22'15", E94°53'10" ~ 94°58'8.4"之间(图1)。

三个洼塘花岗岩体位于肃北县东南21km处,主体为花岗闪长岩、石英闪长岩和花岗岩,花岗闪长岩体和石英闪长岩体呈西北西-东南东展布的巨型长条状,出露面积大约237km<sup>2</sup>。花岗岩体出露面积不大,约9km<sup>2</sup>,呈东西向或者北西-东南向的细长条状分布,侵入花岗闪长岩体和石英闪长岩体中。花岗闪长岩为细粒花岗岩结构,主要矿物有石英(35%)、斜长石(45%)、角闪石(10%)以及黑云母(5%),副矿物有磷灰石、榍石、锆石等,斜长石具绢云母化和绿帘石化现象。石英闪长岩为半自形粒状结构,主要矿物有石英(10%)、斜长石(65%)、角闪石(10%)和黑云母(10%),还含有少量的白云母和榍石等。花岗岩为中粒等粒结构,主要矿物组成为石英(45%)、斜长石(35%)、碱性长石(15%),还可见少量条纹长石,副矿物有磷灰石、锆石、榍石等。

### 3 分析方法

本文锆石的阴极发光(CL)图像在北京大学物理学院电子显微镜专业实验室扫描电镜上完成。锆石 U-Th-Pb 定年在中国地质大学(北京)地学实验中心元素地球化学实验室完成,使用的分析仪器为激光等离子体质谱仪(LA-ICP-MS),由美国 New Wave Research Inc. 公司生产的 UP193SS 型激光剥蚀进样系统和美国 AGILENT 科技有限公司生产的 Agilent 7500a 型四级杆等离子体质谱仪联合构成。激光剥蚀系统为美国 New Wave 贸易有限公司的 UP193SS 型、深紫外(DUV)193nm、ArF 准分子激光剥蚀系统。激光束斑直径为36μm。实验中采用载气 He,流速0.7L/min,年龄计算时以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值校正,用标准锆石 TEM(417Ma)做监控盲样,元素含量以国际标样 NIST610 为外标,Si 为内标计算,NIST612 和 NIST614 做监控盲样。同位素比值处理用 Glitter4.4 软件,单个数据点的误差为1σ,加权平均值误差为2σ。

岩石样品的主量元素在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,采用 X 荧光光谱(XRF)方法测试,测试精度在1%之内;微量和稀土元素在核工业北京地质研究院分析测试研究中心利用电感耦合等离子谱仪测定。测试时室内温度20℃,相对湿度35%,仪器型号为 ELEMENT 等离子体质谱分析仪。在整个测量过程中,以标样和平行样对测量进行严格的质量监控和检验,以保证数据的准确性,稀土元素精度可达5%以内,微量元素精度在10%以内。

### 4 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

从花岗岩、花岗闪长岩和石英闪长岩样品中各选取了1件样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定。花岗岩样品

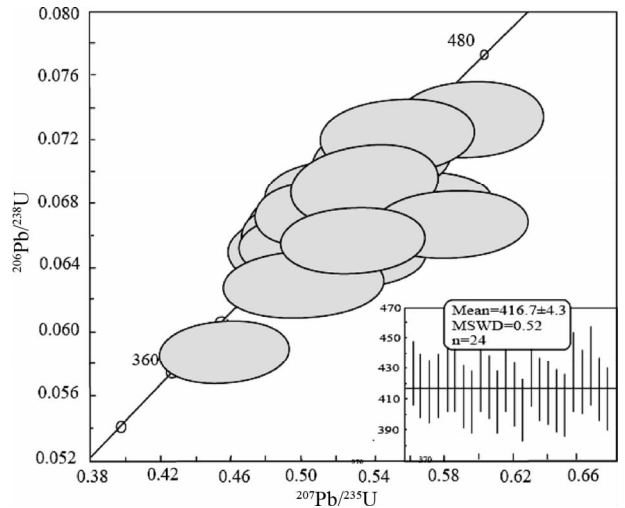


图3 花岗岩(SUB10-16)锆石 U-Pb 年龄谐和图  
Fig. 3 Concordia diagram of LA-ICP-MS U-Pb for zircons of granite (sample SUB10-16)

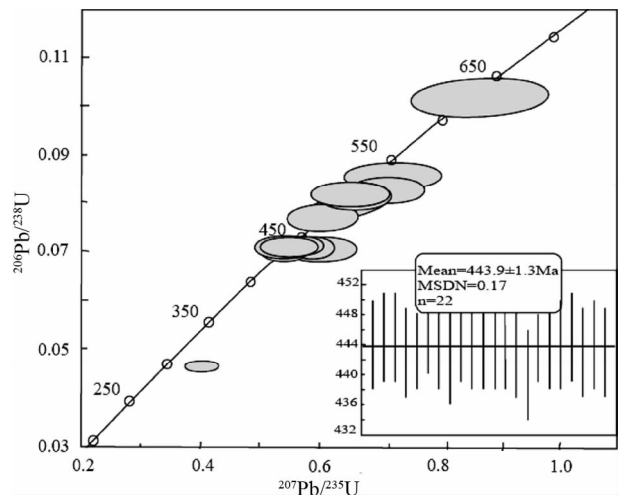


图4 花岗闪长岩(SUB10-18) U-Pb 年龄谐和图  
Fig. 4 Concordia diagram of LA-ICP-MS U-Pb for zircons of granodiorite (sample SUB10-18)

SUB10-16 的锆石颗粒大小不一,呈柱状,其 CL 图像(图2)环带比较模糊,部分颗粒含老的继承性锆石核。花岗闪长岩样品 SUB10-18 的锆石为柱状,锆石长宽比在2:1~3.5:1之间,其 CL 图像(图2)显示颗粒内部的振荡环带结构发育良好。石英闪长岩样品 SUB10-29 的锆石颗粒也为柱状,锆石长宽比在1.5:1~3.5:1之间,晶型为半自形-自形,其 CL 图像(图2)清晰明亮,颗粒内部显示良好的振荡环带结构。

对花岗岩样品 SUB10-16、花岗闪长岩样品 SUB10-18 和石英闪长岩样品 SUB10-29 分别进行了30个点的 LA-ICP-MS 定年分析,分析数据如表1所示。花岗岩样品 SUB10-16 的30个锆石颗粒中,所有数据点都落于谐和线上及其附近(图3),表明这些颗粒形成后 U-Pb 体系是封闭的,基本没有 U 或

表1 中-南祁连西缘花岗岩体锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄测试结果

Table 1 Zircon U-Pb LA-ICP-MS data for granitoids in the western margin of Central-South Qilian

测点号	U-Pb 同位素比值								U-Pb 同位素年龄 (Ma)							
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
	比值	误差	比值	误差	比值	误差	比值	误差	年龄	误差	年龄	误差	年龄	误差	年龄	误差
SUB10-16-01	0.05565	0.00159	0.52555	0.01501	0.0685	0.0009	0.02256	0.0004	438	40	429	10	427	5	451	8
SUB10-16-02	0.05693	0.00161	0.52702	0.01496	0.06715	0.00088	0.003	0.00006	489	40	430	10	419	5	61	1
SUB10-16-03	0.05502	0.00154	0.50421	0.01417	0.06648	0.00087	0.02113	0.00038	413	40	415	10	415	5	423	8
SUB10-16-04	0.05808	0.00163	0.50491	0.01422	0.06306	0.00083	0.00381	0.00007	533	39	415	10	394	5	77	1
SUB10-16-05	0.05584	0.00166	0.51754	0.01538	0.06722	0.00089	0.02234	0.00041	446	43	424	10	419	5	447	8
SUB10-16-06	0.06079	0.0018	0.56905	0.01682	0.0679	0.0009	0.00544	0.00011	632	41	457	11	423	5	110	2
SUB10-16-07	0.05551	0.00172	0.51953	0.01604	0.06789	0.00091	0.02235	0.00042	433	45	425	11	423	5	447	8
SUB10-16-08	0.0559	0.00162	0.54599	0.01583	0.07084	0.00094	0.01594	0.0003	448	41	442	10	441	6	320	6
SUB10-16-09	0.05884	0.00176	0.59513	0.01775	0.07335	0.00098	0.00504	0.0001	561	42	474	11	456	6	102	2
SUB10-16-10	0.05517	0.00161	0.50143	0.0146	0.06592	0.00087	0.0192	0.00036	419	42	413	10	412	5	384	7
SUB10-16-11	0.05659	0.00167	0.51033	0.01505	0.06541	0.00087	0.01187	0.00023	476	42	419	10	408	5	239	5
SUB10-16-12	0.05656	0.00166	0.53048	0.01548	0.06802	0.0009	0.01096	0.00021	474	41	432	10	424	5	220	4
SUB10-16-13	0.05619	0.00192	0.45547	0.01538	0.05879	0.00081	0.01212	0.00026	460	50	381	11	368	5	243	5
SUB10-16-14	0.05528	0.00164	0.51029	0.01509	0.06695	0.00089	0.02202	0.00041	424	42	419	10	418	5	440	8
SUB10-16-15	0.05476	0.00163	0.49332	0.01465	0.06534	0.00087	0.02136	0.00041	402	43	407	10	408	5	427	8
SUB10-16-16	0.05678	0.00172	0.53125	0.016	0.06786	0.0009	0.0102	0.0002	483	43	433	11	423	5	205	4
SUB10-16-17	0.0557	0.00167	0.50842	0.01512	0.0662	0.00088	0.0225	0.00043	440	43	417	10	413	5	450	9
SUB10-16-18	0.05781	0.00184	0.51397	0.01625	0.06448	0.00087	0.01244	0.00027	523	46	421	11	403	5	250	5
SUB10-16-19	0.05623	0.00181	0.53651	0.01707	0.06919	0.00093	0.01534	0.00035	461	47	436	11	431	6	308	7
SUB10-16-20	0.05493	0.00167	0.50559	0.01525	0.06676	0.00089	0.0221	0.00043	409	44	415	10	417	5	442	9
SUB10-16-21	0.05503	0.00169	0.50344	0.0153	0.06635	0.00088	0.00963	0.00019	413	44	414	10	414	5	194	4
SUB10-16-22	0.05554	0.00171	0.50161	0.01527	0.0655	0.00087	0.01683	0.00033	434	44	413	10	409	5	337	7
SUB10-16-23	0.05939	0.00187	0.53198	0.01657	0.06496	0.00087	0.0127	0.00025	581	44	433	11	406	5	255	5
SUB10-16-24	0.05475	0.00175	0.5185	0.01643	0.06868	0.00092	0.01869	0.00039	402	47	424	11	428	6	374	8
SUB10-16-25	0.05525	0.00183	0.51397	0.01679	0.06747	0.00091	0.01536	0.00031	422	49	421	11	421	5	308	6
SUB10-16-26	0.05608	0.00179	0.53657	0.01694	0.06939	0.00093	0.01638	0.00034	456	46	436	11	432	6	328	7
SUB10-16-27	0.0576	0.00221	0.50119	0.01893	0.0631	0.00089	0.01064	0.00024	515	58	413	13	394	5	214	5
SUB10-16-28	0.0636	0.00199	0.58572	0.0181	0.06679	0.00089	0.01904	0.00038	728	43	468	12	417	5	381	8
SUB10-16-29	0.05569	0.00182	0.55551	0.0179	0.07233	0.00097	0.0025	0.00006	440	48	449	12	450	6	50	1
SUB10-16-30	0.05838	0.00188	0.52923	0.01681	0.06573	0.00088	0.00606	0.00013	544	46	431	11	410	5	122	3
SUB10-18-01	0.05902	0.00207	0.58032	0.02025	0.0713	0.00095	0.01971	0.00039	568	53	465	13	444	6	395	8
SUB10-18-02	0.0556	0.00195	0.54778	0.01912	0.07144	0.00095	0.02012	0.0004	436	54	444	13	445	6	403	8
SUB10-18-03	0.05633	0.00231	0.55517	0.02269	0.07147	0.00097	0.01819	0.00038	465	66	448	15	445	6	364	8
SUB10-18-04	0.05587	0.00187	0.5475	0.01826	0.07106	0.00093	0.01994	0.00038	447	51	443	12	443	6	399	8
SUB10-18-05	0.05612	0.00181	0.55201	0.0177	0.07132	0.00093	0.0193	0.00038	457	48	446	12	444	6	386	8
SUB10-18-06	0.05506	0.00209	0.54384	0.02054	0.07163	0.00096	0.01977	0.00039	415	60	441	14	446	6	396	8
SUB10-18-07	0.05555	0.00171	0.54638	0.01678	0.07133	0.00093	0.02015	0.00038	434	45	443	11	444	6	403	8
SUB10-18-08	0.06088	0.00281	0.72129	0.03309	0.08591	0.00121	0.02023	0.00049	635	74	551	20	531	7	405	10
SUB10-18-09	0.05892	0.00192	0.65223	0.02121	0.08027	0.00105	0.01598	0.00033	564	48	510	13	498	6	320	7
SUB10-18-10	0.05585	0.00207	0.54604	0.0201	0.0709	0.00095	0.01993	0.00041	446	58	442	13	442	6	399	8
SUB10-18-11	0.06028	0.00176	0.59454	0.01732	0.07152	0.00092	0.0185	0.00036	614	41	474	11	445	6	371	7
SUB10-18-12	0.05632	0.00187	0.55426	0.01836	0.07137	0.00093	0.01993	0.00039	465	50	448	12	444	6	399	8
SUB10-18-13	0.06204	0.00182	0.39923	0.01164	0.04666	0.0006	0.00881	0.00018	675	40	341	8	294	4	177	4
SUB10-18-14	0.05547	0.00176	0.54534	0.01718	0.07129	0.00093	0.01893	0.00035	431	47	442	11	444	6	379	7
SUB10-18-15	0.05893	0.00198	0.57955	0.01938	0.07131	0.00094	0.01471	0.00031	565	50	464	12	444	6	295	6
SUB10-18-16	0.05555	0.00239	0.54642	0.02339	0.07133	0.00096	0.02019	0.0004	434	71	443	15	444	6	404	8
SUB10-18-17	0.06174	0.00181	0.60627	0.01773	0.07121	0.00092	0.01568	0.00031	665	41	481	11	443	6	314	6
SUB10-18-18	0.06167	0.00255	0.60114	0.02466	0.07068	0.00101	0.01352	0.00041	663	63	478	16	440	6	271	8
SUB10-18-19	0.05772	0.00215	0.56824	0.02099	0.07139	0.00096	0.01938	0.00042	519	57	457	14	445	6	388	8
SUB10-18-20	0.05593	0.00178	0.54936	0.01739	0.07123	0.00094	0.02005	0.0004	450	47	445	11	444	6	401	8
SUB10-18-21	0.0617	0.00034	0.86718	0.0471	0.10193	0.00172	0.01615	0.00041	664	87	634	26	626	10	324	8

续表 1

Continued Table 1

测点号	U-Pb 同位素比值								U-Pb 同位素年龄 (Ma)							
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
	比值	误差	比值	误差	比值	误差	比值	误差	年龄	误差	年龄	误差	年龄	误差	年龄	误差
SUB10-18-22	0.05675	0.0022	0.558	0.02146	0.07131	0.00097	0.02021	0.00044	482	61	450	14	444	6	404	9
SUB10-18-23	0.05783	0.00216	0.57048	0.02115	0.07154	0.00096	0.01645	0.00036	523	58	458	14	445	6	330	7
SUB10-18-24	0.06176	0.00255	0.70531	0.02881	0.08282	0.00114	0.01871	0.00044	666	64	542	17	513	7	375	9
SUB10-18-25	0.05933	0.00192	0.66831	0.02146	0.08169	0.00107	0.01829	0.00038	579	47	520	13	506	6	366	8
SUB10-18-26	0.05672	0.00238	0.60405	0.02506	0.07723	0.00108	0.0186	0.00045	481	67	480	16	480	6	372	9
SUB10-18-27	0.05882	0.00197	0.57719	0.0192	0.07116	0.00094	0.0174	0.00037	560	49	463	12	443	6	349	7
SUB10-18-28	0.05677	0.00198	0.55761	0.01926	0.07123	0.00094	0.01907	0.0004	483	53	450	13	444	6	382	8
SUB10-18-29	0.05742	0.00235	0.65052	0.02639	0.08216	0.00112	0.0173	0.00039	508	65	509	16	509	7	347	8
SUB10-18-30	0.05593	0.00204	0.54911	0.01986	0.0712	0.00095	0.01962	0.00041	450	56	444	13	443	6	393	8
SUB10-29-01	0.05589	0.00212	0.55786	0.02111	0.07237	0.00097	0.02137	0.00038	448	60	450	14	450	6	427	8
SUB10-29-02	0.05602	0.00203	0.55182	0.01997	0.07143	0.00093	0.02103	0.00037	453	57	446	13	445	6	421	7
SUB10-29-03	0.05555	0.0022	0.54005	0.02137	0.07049	0.00094	0.02159	0.00045	434	64	438	14	439	6	432	9
SUB10-29-04	0.05572	0.00159	0.54075	0.01551	0.07038	0.0009	0.02116	0.00033	441	41	439	10	438	5	423	7
SUB10-29-05	0.05613	0.0019	0.56679	0.01925	0.07322	0.00095	0.02176	0.00036	458	52	456	12	456	6	435	7
SUB10-29-06	0.05597	0.00195	0.55283	0.01918	0.07162	0.00096	0.02162	0.00038	451	53	447	13	446	6	432	8
SUB10-29-07	0.05572	0.00213	0.55285	0.02112	0.07195	0.00095	0.02083	0.00036	441	61	447	14	448	6	417	7
SUB10-29-08	0.05589	0.0017	0.54416	0.01662	0.0706	0.0009	0.02116	0.00033	448	45	441	11	440	5	423	7
SUB10-29-09	0.05578	0.00297	0.53751	0.02842	0.06987	0.00102	0.02147	0.00051	444	92	437	19	435	6	429	10
SUB10-29-10	0.05882	0.00244	0.57546	0.02383	0.07095	0.00096	0.02131	0.00045	560	67	462	15	442	6	426	9
SUB10-29-11	0.05569	0.00231	0.55439	0.02293	0.07219	0.00098	0.02139	0.00045	440	68	448	15	449	6	428	9
SUB10-29-12	0.05624	0.00219	0.563	0.0219	0.07259	0.00097	0.02087	0.00041	462	62	453	14	452	6	417	8
SUB10-29-13	0.05502	0.0018	0.51431	0.01689	0.06778	0.00088	0.02089	0.00035	413	50	421	11	423	5	418	7
SUB10-29-14	0.05579	0.00174	0.53463	0.01675	0.06948	0.0009	0.01997	0.00032	444	47	435	11	433	5	400	6
SUB10-29-15	0.05604	0.00208	0.5535	0.02045	0.07162	0.00097	0.02042	0.00048	454	58	447	13	446	6	409	10
SUB10-29-16	0.05534	0.00226	0.52946	0.02156	0.06938	0.00095	0.02122	0.00046	426	66	431	14	432	6	424	9
SUB10-29-17	0.056	0.00227	0.55269	0.02239	0.07156	0.00095	0.02085	0.00042	452	66	447	15	446	6	417	8
SUB10-29-18	0.05581	0.00209	0.55374	0.0207	0.07194	0.00095	0.02194	0.00039	445	59	447	14	448	6	439	8
SUB10-29-19	0.05608	0.00202	0.55676	0.01993	0.07198	0.00098	0.02137	0.0004	456	55	449	13	448	6	427	8
SUB10-29-20	0.05741	0.00288	0.64144	0.03194	0.08102	0.00121	0.02317	0.0007	507	83	503	20	502	7	463	14
SUB10-29-21	0.05591	0.00278	0.55283	0.02737	0.0717	0.00099	0.02104	0.00045	449	86	447	18	446	6	421	9
SUB10-29-22	0.05594	0.00215	0.55386	0.02125	0.07179	0.00097	0.02143	0.0004	450	61	448	14	447	6	429	8
SUB10-29-23	0.05589	0.00209	0.55438	0.02072	0.07193	0.00095	0.02101	0.0004	448	59	448	14	448	6	420	8
SUB10-29-24	0.05592	0.00223	0.5614	0.02235	0.0728	0.00098	0.02105	0.00041	449	64	452	15	453	6	421	8
SUB10-29-25	0.05616	0.00214	0.53779	0.02039	0.06943	0.00094	0.01381	0.00029	459	60	437	13	433	6	277	6
SUB10-29-26	0.05587	0.002	0.54927	0.01959	0.07129	0.00095	0.02117	0.00042	447	55	445	13	444	6	423	8
SUB10-29-27	0.05575	0.00284	0.52632	0.02666	0.06846	0.001	0.02181	0.00063	442	87	429	18	427	6	436	12
SUB10-29-28	0.05601	0.00224	0.55258	0.02201	0.07154	0.00096	0.02169	0.00041	453	64	447	14	445	6	434	8
SUB10-29-29	0.05586	0.00187	0.54407	0.01819	0.07062	0.00093	0.02132	0.00039	447	51	441	12	440	6	426	8
SUB10-29-30	0.05614	0.00239	0.57306	0.02431	0.07402	0.00099	0.02214	0.00043	458	70	460	16	460	6	443	9

Pb 同位素的加入或丢失。参与年代学计算的点共有 24 个, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄集中在 403 ~ 431Ma 之间,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的加权平均值为  $416.7 \pm 4.3\text{Ma}$  (MSWD = 0.52), 代表该花岗岩的侵入年龄, 为中志留世晚期岩浆活动的产物。其它 6 颗锆石中, SUB10-16-04 (394Ma)、SUB10-16-13 (368Ma)、SUB10-16-27 (394Ma) 所测年龄偏小, 可能是后期热事件影响所致, 另外 3 颗所测年龄偏大, 分别为 441Ma、450Ma 和 456Ma, 可能为继承性或捕获锆石。花岗闪长岩样品 SUB10-18 的 30 个颗粒中, 除 1 个分析点外, 其余分析点均落在谐和线上及其

附近 (图 4), 参与年代学计算的点共有 22 个, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄集中在 440 ~ 446Ma 范围内, 具有很好的一致性,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的加权平均值为  $443.9 \pm 1.3\text{Ma}$  (MSWD = 0.17), 视为侵位年龄, 时代为晚奥陶纪晚期, 另外 8 个分析点中, 编号为 SUB10-18-13 的点年龄 (294Ma) 明显偏小且偏离谐和线, 可能是 Pb 丢失所致, 而其余 7 个分析点所测年龄偏大, 分别为 531Ma、498Ma、626Ma、513Ma、506Ma、480Ma 和 509Ma, 可能代表继承性或捕获锆石的年龄。石英闪长岩样品 SUB10-29 的 30 个锆石颗粒中, 所有分析点都落在谐和线上 (图 5), 参与年

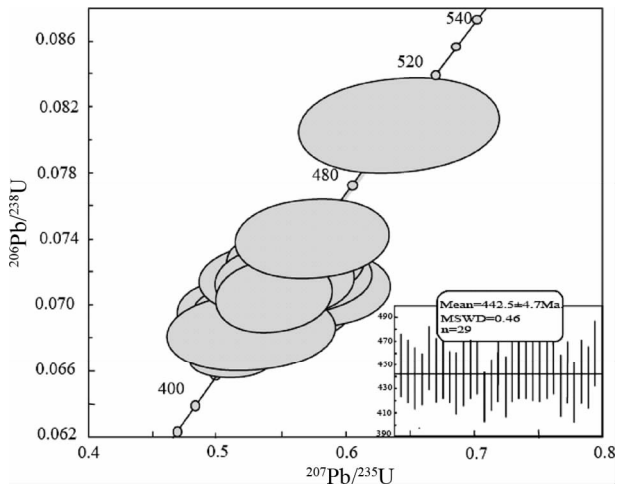


图5 石英闪长岩(SUB10-29)U-Pb 年龄谐和图  
Fig.5 Concordia diagram of LA-ICP-MS U-Pb for zircons of quartz diorite (sample SUB10-29)

代学计算的点有 29 个,其<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄比较集中,在 427 ~ 460Ma 之间,<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 442.5 ± 4.7 (MSWD = 0.46),视为侵位年龄,时代为晚奥陶纪晚期或者早志留纪早期,而点号 SUB10-29-20 所测年龄(502Ma)偏老,可能是继承性或捕获锆石。

### 5 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,结果如表 2 所示。其中样品 SUB10-16 与其余样品在地球化学特征上有较为明显的差别。

#### 5.1 主量元素

样品 SUB10-16 SiO<sub>2</sub> 含量为 79.92%,在 TAS 图解(图 6)中落入花岗岩范围内。Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O 含量为 6.3%,K<sub>2</sub>O 含量

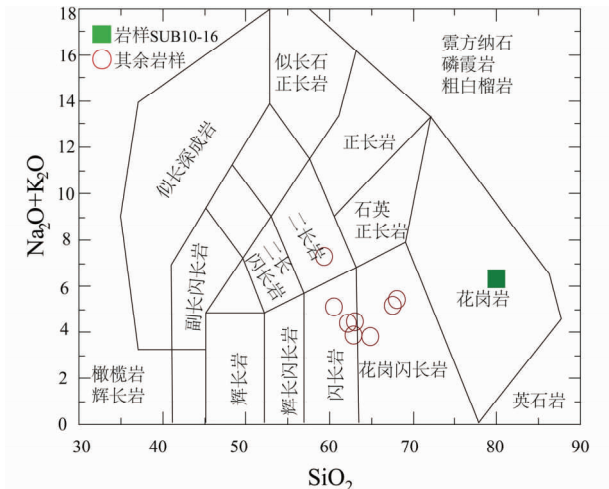


图6 花岗质岩 TAS 图解(据 Middlemost, 1994)

图 7-图 11 样品图例同此图

Fig.6 TAS diagram of granitoids (after Middlemost, 1994)

3.81%,K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 为 1.54,显示为富钾质特征,在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O (图 7a) 图解中落入高钾钙碱性系列区域。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 11.11%,CaO 含量 0.83%,MgO 含量 0.02%,铝饱和指数 ANK 为 1.14,在铝饱和指数图解(图 7b)上落入过铝质花岗岩区。该岩体富硅富钾而贫 Ca、Mg、Al 的特征表明其属于 A 型花岗岩(Frost *et al.*, 2001; 翁望飞等, 2011)。

其余样品 SiO<sub>2</sub> 含量在 59.28% ~ 67.97% 之间,在 TAS 图解(图 6)中落入二长岩、闪长岩和花岗闪长岩区域内,显示为一套中酸性的火成岩类。Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O 含量为 3.81% ~ 7.28%,K<sub>2</sub>O 含量在 1.56% ~ 3.21% 之间,K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 为 0.29 ~ 1.45,在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解(图 7a)中有 3 个落入高钾钙碱性系列中,其余属于钙碱性系列,表明该套岩体兼有富钠和富钾的特征,但以富钠为主。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量在 14.87% ~ 17.31% 之间,铝饱和指数 ANK 在 0.81 ~ 1.17 之间,在铝饱和指数图解(图 7b)上除 SUB10-30 落入准铝质花岗岩区外,

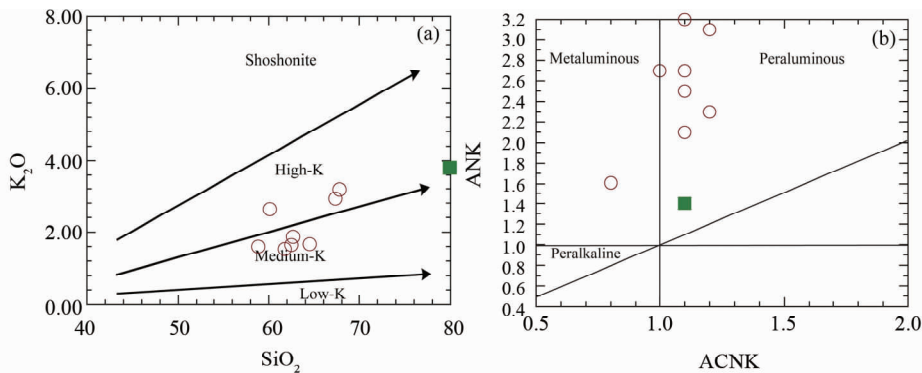


图7 花岗质岩 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解(a)和铝饱和指数图解(b)

Fig.7 SiO<sub>2</sub> vs. K<sub>2</sub>O diagram (a) and ANK vs. ACNK diagram (b) of granitoids

表2 花岗岩质岩主量元素 (wt%)、微量和稀土元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 分析结果

Table 2 Major element (wt%), trace and REE element ( $\times 10^{-6}$ ) compositions of granitoids

样品号	SUB10-16	SUB10-17	SUB10-18	SUB10-19	SUB10-29	SUB10-30	SUB10-31	SUB10-32	SUB10-33
岩性	花岗岩	花岗岩闪长岩	花岗岩闪长岩	花岗岩闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩
SiO <sub>2</sub>	79.92	67.97	67.59	60.46	62.81	59.28	64.82	62.98	62.13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.11	14.87	15.78	17.31	17.28	17.21	16.53	17.13	17.06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.64	4.19	3.85	6.08	5.73	5.83	5.57	5.56	5.77
CaO	0.83	3.75	3.56	5.24	5.44	5.63	4.87	5.36	5.55
MgO	0.02	1.66	1.94	2.41	2.41	2.68	2.27	2.31	2.42
K <sub>2</sub> O	3.81	3.21	2.96	2.65	1.68	1.64	1.70	1.90	1.56
Na <sub>2</sub> O	2.49	2.20	2.22	2.47	2.20	5.64	2.10	2.57	2.84
MnO	0.01	0.07	0.07	0.13	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12
TiO <sub>2</sub>	0.06	0.65	0.42	0.67	0.61	0.49	0.56	0.59	0.56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.001	0.177	0.104	0.257	0.193	0.208	0.165	0.197	0.213
LOI	1.04	1.07	1.41	2.15	1.40	1.05	1.14	1.13	1.61
Total	99.92	99.82	99.90	99.82	99.86	99.77	99.85	99.85	99.83
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	6.30	5.41	5.18	5.12	3.89	7.28	3.81	4.47	4.40
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.53	1.45	1.34	1.07	0.76	0.29	0.81	0.74	0.55
A/CNK	1.14	1.17	1.08	1.05	1.13	0.81	1.17	1.07	1.04
A/NK	1.35	2.10	2.30	2.50	3.17	1.56	3.12	2.72	2.69
Li	2.2	18.6	24.9	11.8	15.5	14.4	16.1	14.1	16.7
Be	1.54	1.76	1.60	1.85	1.82	1.64	1.82	1.98	1.95
Sc	1.31	10.10	9.99	11.60	17.00	21.20	16.90	15.20	14.80
V	7	103	96	130	130	143	118	134	130
Cr	4.8	18.7	16.0	10.7	13.2	15.5	15.7	13.7	12.9
Co	0.5	10.2	11.1	14.3	13.4	15.5	12.6	13.9	14.7
Ni	1.27	14.80	8.43	7.74	9.35	10.50	8.81	8.78	9.34
Cu	2.9	68.7	10.3	16.9	15.8	26.0	13.5	13.6	28.0
Zn	13.8	68.8	42.4	90.4	99.3	110.0	95.1	100.0	93.5
Ga	13.5	18.0	15.2	19.4	21.1	23.9	20.6	20.6	20.7
Rb	143.0	83.7	121.0	81.0	50.4	49.5	56.1	52.9	43.7
Sr	25.50	393	304	610	578	643	587	597	607
Y	60.4	25.2	19.0	25.8	33.6	25.3	19.1	32.9	27.7
Nb	39.60	12.60	9.67	10.20	9.98	7.02	6.99	10.00	8.88
Mo	1.04	1.78	5.45	0.91	0.18	0.16	0.16	0.17	0.29
Cd	0.06	0.08	0.09	0.08	0.09	0.12	0.16	0.22	0.16
In	0.01	0.03	0.03	0.07	0.13	0.10	0.09	0.06	0.06
Sb	0.18	0.20	0.23	0.10	0.03	0.04	0.05	0.07	0.04
Cs	1.00	2.02	3.94	1.16	2.50	1.68	1.91	2.26	1.92
Ba	206	1278	596	1109	628	662	744	797	603
Ta	1.89	1.07	0.95	0.92	1.05	0.47	0.47	1.15	0.96
W	2.53	0.94	2.12	0.49	0.24	0.34	0.22	0.16	0.22
Re	0.002	0.005	0.002	0.011	0.005	-	-	0.005	-
Tl	0.65	0.51	0.65	0.40	0.25	0.19	0.29	0.27	0.23
Pb	19.0	25.3	21.5	19.5	15.1	17.8	14.8	18.1	17.3
Bi	0.07	0.14	0.18	0.16	0.10	0.07	0.01	0.04	0.05
Th	45.40	15.70	18.30	8.43	5.18	10.30	9.71	5.10	6.74
U	5.22	3.44	3.63	1.52	0.57	0.60	0.51	0.90	0.82
Zr	170	217	80.8	36.7	31.7	33.9	29.1	31.1	32.5
Hf	8.22	5.10	2.66	1.31	1.00	1.48	0.85	1.35	1.56
La	15.7	56.9	30.3	33.6	28.8	56.7	48.1	25.7	34.2
Ce	38.4	107.0	56.3	69.7	67.5	104	83.7	55.1	66.9
Pr	5.30	12.10	6.37	8.80	9.01	11.20	8.55	7.65	8.53
Nd	21.7	45.0	21.9	37.2	37.9	40.0	30.5	32.3	32.4
Sm	5.13	6.20	4.03	6.41	7.55	6.23	4.69	6.10	5.85
Eu	0.10	1.70	0.97	2.17	1.75	1.55	1.44	1.73	1.60
Gd	6.50	6.11	3.63	5.55	6.84	5.87	4.80	6.27	4.88
Tb	1.46	0.90	0.56	0.89	1.12	0.86	0.70	1.05	0.86
Dy	9.92	5.07	3.85	5.42	6.75	5.27	4.04	6.32	5.71
Ho	2.08	0.90	0.67	0.97	1.23	1.01	0.67	1.29	1.00
Er	7.05	2.50	2.10	2.63	3.57	2.68	1.96	3.23	2.55
Tm	1.10	0.42	0.30	0.40	0.56	0.36	0.30	0.58	0.46
Yb	6.57	2.43	2.01	2.70	3.08	2.51	1.63	3.54	2.91
Lu	0.97	0.38	0.30	0.37	0.42	0.31	0.27	0.52	0.40
ΣREE	122.0	247.6	133.3	176.8	176.1	238.5	191.3	151.4	168.3
(La/Yb) <sub>N</sub>	1.7	16.8	10.8	8.9	6.7	16.2	21.2	5.2	8.4
δEu	0.05	0.83	0.76	1.09	0.73	0.77	0.92	0.85	0.89



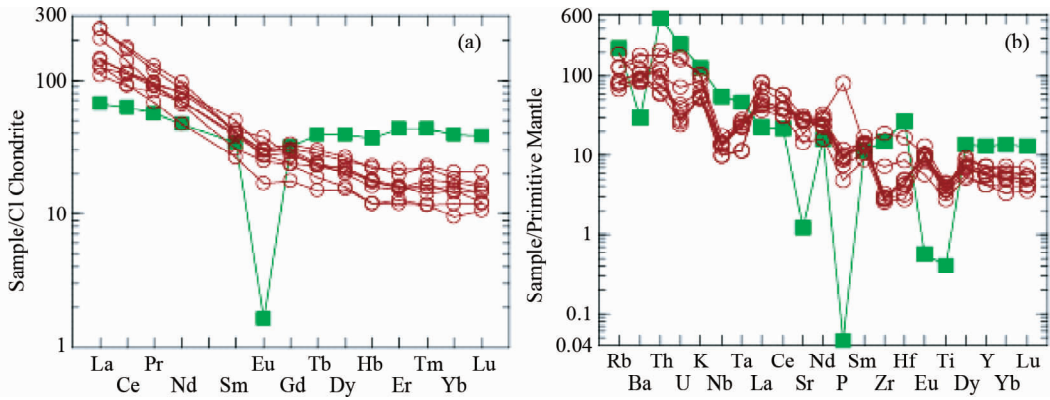


图8 花岗质岩石稀土元素球粒陨石标准化配分图解(a)和微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)  
Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagram (b) for granitoids (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

其余均落入过铝质花岗岩区。其主量元素综合特征显示接近于I型花岗岩(Frost *et al.*, 2001; 马鸿文, 1992; 刘宝山等, 2007)。

## 5.2 微量元素和稀土元素

花岗岩稀土元素总量 $\Sigma$ REE为 $122.0 \times 10^{-6}$ ,  $(La/Yb)_N$ 为1.7,  $\delta Eu$ 为0.05, 在球粒陨石标准化配分图解(图8a)中, 显示明显的负铕异常, 形成近水平的“V”型REE分布模式。以原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图8b)显示, 花岗岩富集U、Th、Zr、Hf、Nb、Ta等高场强元素(HFSE), 其中U含量 $5.22 \times 10^{-6}$ , Th含量 $45.4 \times 10^{-6}$ , Zr含量 $170 \times 10^{-6}$ , Hf含量 $8.22 \times 10^{-6}$ , Nb含量 $39.6 \times 10^{-6}$ , Ta含量 $1.89 \times 10^{-6}$ 。同时亏损大离子亲石元素如Rb、Ba、Sr、Eu等, Rb/Sr值为5.6。以上分析表明该花岗岩的微量元素与稀土元素特征均与A型花岗岩特征非常相似(张玉泉和谢应雯, 1995; 翁望飞等, 2011)。

花岗闪长岩和石英闪长岩高场强元素(HFSE)相比于花岗岩含量较低, 且Nb、Ta和Zr、Hf等元素亏损比较明显(图8b), 其中Nb含量为 $6.99 \times 10^{-6} \sim 12.60 \times 10^{-6}$ , Ta含量在 $0.47 \times 10^{-6} \sim 1.15 \times 10^{-6}$ 之间, Zr除样品SUB10-17含量( $217 \times 10^{-6}$ )异常高外, 其余在 $29.1 \times 10^{-6} \sim 80.8 \times 10^{-6}$ 区间内, Hf含量为 $0.85 \times 10^{-6} \sim 5.10 \times 10^{-6}$ 。而Ba、Sr、Eu等大离子亲石元素含量相对更高, 其中Ba含量为 $628 \times 10^{-6} \sim 1278 \times 10^{-6}$ 之间, Sr含量介于 $304 \times 10^{-6} \sim 643 \times 10^{-6}$ 之间, Rb/Sr在0.07~0.40之间。稀土元素总量 $\Sigma$ REE为 $133.3 \times 10^{-6} \sim 247.6 \times 10^{-6}$ ,  $(La/Yb)_N$ 介于5.2~21.2之间,  $\delta Eu$ 为0.73~1.09, 在球粒陨石标准化配分图解(图8a)中, 呈轻稀土富集的平滑右倾型REE配分模式, 铕负异常特点不明显。以上微量和稀土元素特征显示研究区花岗闪长岩和石英闪长岩属于I型花岗岩(张玉泉和谢应雯, 1995; 王中刚等, 1998)。

## 6 讨论

### 6.1 年代学

通过以上对岩体的锆石U-Pb年龄分析可知, 花岗闪长岩和石英闪长岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄分别为 $443.9 \pm 1.3$ Ma和 $442.5 \pm 4.7$ Ma, 二者在误差范围内一致, 侵位时代为晚奥陶世到早志留世。雍拥等(2008)在中祁连地区对董家庄和新店花岗岩进行了研究, 分别获得了 $446 \pm 1$ Ma和 $454 \pm 5$ Ma的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄结果。苏建平等(2004a)获得的中祁连西段黑沟梁子花岗岩TIMS锆石U-Pb同位素年龄为 $444 \pm 38$ Ma。陈隽璐等(2008)在中祁连构造带东部什川岩基中, 获得二长花岗岩单颗粒锆石微区LA-ICP-MS U-Pb加权平均年龄444.6Ma。何世平等(2008)在中祁连东部马街山岩群变质基底岩系中发现大量基性岩墙, 获得变辉长岩墙的侵入年龄为 $441.1 \pm 1.4$ Ma。张照伟等(2012)在南祁连获得了裕龙沟侵入岩体的精确年龄 $442.4 \pm 1.6$ Ma。Li *et al.* (2014)对肃北地区肃北盆地中的新生代沉积地层进行了碎屑锆石年代学研究, 获得了440Ma的主峰值年龄。前人的这些结果与本次研究所得的花岗闪长岩年龄非常一致, 表明中南祁连地区在晚奥陶世-早志留世期间有过一期岩浆活动事件。花岗岩侵位于花岗闪长岩体和石英闪长岩体中, 从野外关系分析, 其应晚于花岗闪长岩体和石英闪长岩体的形成时代, 本研究获得了花岗岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 $416.7 \pm 4.3$ Ma, 侵位时代为晚志留世晚期。李建锋等(2010)在中祁连西段肃北地区的斜长花岗闪长岩中获得SHRIMP锆石U-Pb加权平均年龄为 $415 \pm 3$ Ma(志留纪晚期)。陈隽璐等(2008)在中祁连构造带东部什川岩基中, 获得二长花岗岩单颗粒锆石微区LA-ICP-MS U-Pb一组加权平均年龄414.3Ma。何世平等(2008)在中祁连东部马街山岩群变质基底岩系变辉长岩墙的主变质期年龄为 $414.3 \pm 1.2$ Ma。这些结果表明中南祁连地区在晚志留世期间存在有另一期构造岩浆活动事件。

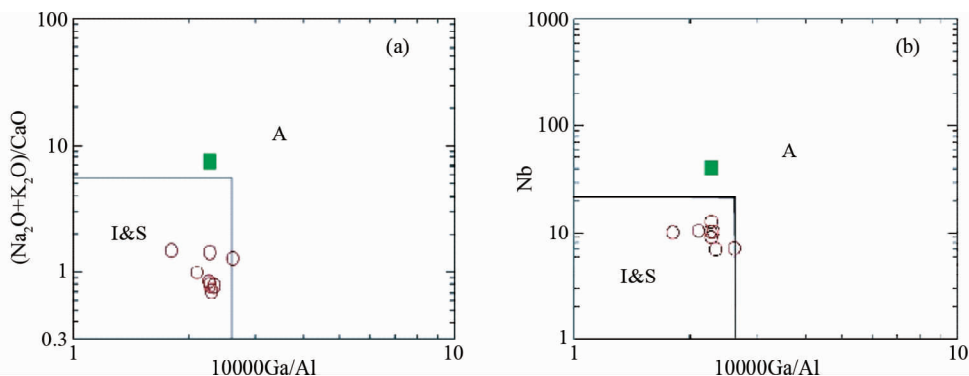


图9 花岗质岩分类的 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Ca}$ - $10000\text{Ga}/\text{Al}$ 判别图解(a)和 $\text{Nb}$ - $10000\text{Ga}/\text{Al}$ 图解(b) (据 Whalen *et al.*, 1987)  
Fig. 9  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Ca}$  vs.  $10000\text{Ga}/\text{Al}$  discrimination diagram (a) and  $\text{Nb}$  vs.  $10000\text{Ga}/\text{Al}$  discrimination diagram (b) of granitoids (after Whalen *et al.*, 1987)

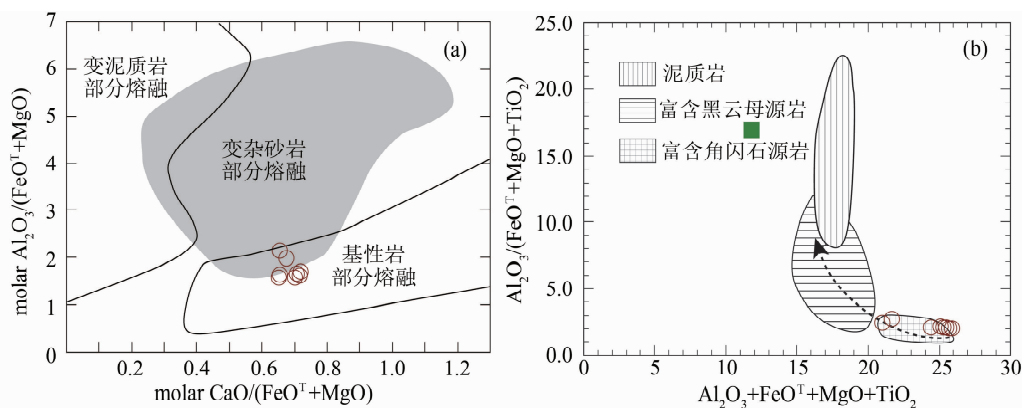


图10 花岗质岩 $A/\text{MF-C}/\text{MF}$ 摩尔比值图(a, 据 Alther *et al.*, 2000)和源岩图解(b, 据 Douce, 1999)  
Fig. 10  $A/\text{MF-C}/\text{MF}$  diagram (a, after Alther *et al.*, 2000) and source diagram (b, after Douce, 1999) of granitoids

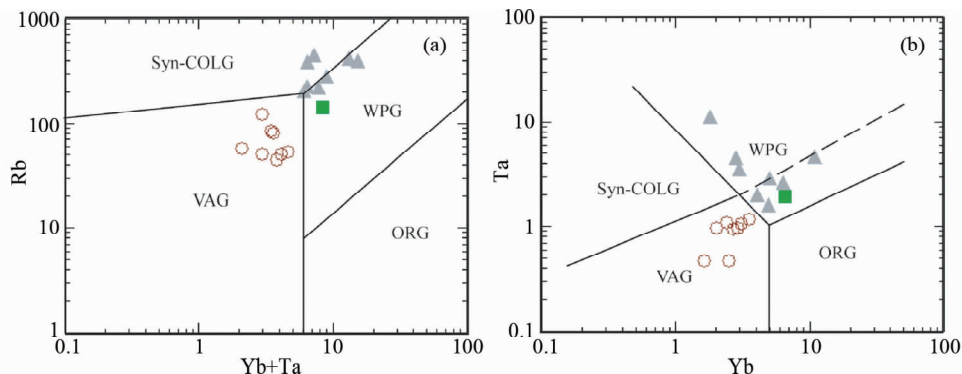


图11 研究区花岗质岩以及北祁连新开沟-南坝地区花岗质岩的 $\text{Rb}-\text{Yb} + \text{Ta}$ 图解(a)和 $\text{Ta}-\text{Yb}$ 图解(b) (据 Pearce *et al.*, 1984)  
三角形代表北祁连新开沟-南坝地区花岗质岩(据秦海鹏, 2012); WPG-板内花岗岩; ORG-洋脊花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; Syn-COLG-同碰撞花岗岩; Late-COLG-后碰撞花岗岩  
Fig. 11  $\text{Rb}-\text{Yb} + \text{Ta}$  diagram (a) and  $\text{Ta}-\text{Yb}$  diagram (b) of granitoids in the study area and Xinkaigou-Nanba granitoids in North Qilian (after Pearce *et al.*, 1984)

## 6.2 源岩和构造环境分析

通过上述对岩体地球化学特征的分析可知,花岗闪长岩和石英闪长岩具有高钾钙碱性系列和钙碱性系列两类,且属于 I 型花岗岩,在花岗质岩分类判别图解(图 9)中全部落入 I&S 区域,对属于 I 型花岗岩这一认识予以了佐证,表明其源岩应为未经风化的火成岩(路凤香和桑隆康,2002),且源岩富含角闪石(图 10b),同时在 A/MF-C/MF 图解(图 10a)中显示为基性岩部分熔融形成,与前述结论一致。在 Rb-Y + Nb 图解(图 11)上均落入岛弧区域,表明其形成很可能是岛弧岩浆活动的结果。花岗岩属于高钾过铝质岩,在花岗质岩分类判别图解(图 9)中投点后落入 A 型花岗岩区,A 型花岗岩的物质来源具有多样性(贾小辉等,2009;李万友等,2012),但以陆壳重熔和幔源为主(李彪,2008),在  $Al_2O_3 + FeO^T + MgO + TiO_2 - Al_2O_3 / (FeO^T + MgO + TiO_2)$  (图 10b)上显示其源岩与泥质岩非常接近,表明本研究区 A 型花岗岩很可能为陆壳物质受地幔物质的底侵发生部分熔融形成的。同时在 Rb-Y + Nb 图解(图 11)中落入板内花岗岩区,与北祁连新开沟-南坝地区同时代(422 ~ 417.8Ma)的板内 A 型花岗岩(秦海鹏,2012)类似(图 11),表明可能整个祁连造山带在晚志留世都存在一期 A 型花岗岩岩浆事件。

## 6.3 地质意义

本次研究获得的花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄为  $416.7 \pm 4.3$  Ma(晚志留世晚期),石英闪长岩和花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄分别为  $442.5 \pm 4.7$  Ma(晚奥陶世晚期-早志留世早期)和  $443.9 \pm 1.3$  Ma(晚奥陶世晚期),通过构造环境判别图解可知,石英闪长岩和花岗闪长岩落入岛弧花岗岩区,而花岗岩落入板内花岗岩区。已有研究工作表明,在早古生代北祁连洋盆可能存在向南的俯冲作用(张旗等,1997;吴才来等,2006,2010;Xiao *et al.*,2009),晚奥陶世至早志留世期间(495 ~ 440Ma)中祁连南部为无俯冲作用的南祁连洋(Xiao *et al.*,2009)。本文花岗闪长岩和石英闪长岩侵位于中祁连构造带内,属于岛弧型花岗岩,对于中祁连出露的岛弧型岩浆岩,前人已做过一定的研究工作(李建锋等,2010;苏建平,2004b;杨瑞瑛等,2006)。同时,本区花岗闪长岩和石英闪长岩属于 I 型花岗岩,而 I 型花岗岩多伴随消减带产出(张玉泉和谢应雯,1995)。因此,推断本区岛弧型花岗闪长岩和石英闪长岩的形成过程可能为北祁连洋壳向南俯冲时俯冲洋壳板片发生部分熔融和壳幔岩浆混合而形成的。本研究区花岗岩位于板内花岗岩区,且属于 A 型花岗岩,而 A 型花岗岩形成于伸展构造背景下(李万友等,2012;贾小辉等,2009)。同时本区 A 型花岗岩侵位于中祁连构造带内,平面展布呈北西-南东向,暗示着中祁连构造带在晚志留世晚期存在北东-南西向的伸展作用。由此推断其形成过程可能为伸展作用下陆壳物质受地幔物质的底侵发生部分熔融形成的。李建锋等

(2010)对中祁连西段的肃北岩体( $415 \pm 3$ Ma)进行研究后认为其形成于后造山阶段,表明在晚志留世晚期造山活动已结束。在柴北缘地区,自 420Ma 起,俯冲的大洋岩石圈与跟随俯冲的大陆岩石圈脱离,大陆地壳开始折返,发生隆升和造山(宋述光,2009);秦海鹏(2012)对北祁连新开沟-南坝花岗岩体(422 ~ 418.1Ma)研究后发现其属于造山期后的 A 型花岗岩。由此可知,中祁连乃至整个祁连地区在晚志留世晚期已完成碰撞造山过程,转而进入了造山后的伸展作用阶段,而伸展作用很可能是造山带深部岩石圈的拆沉引起的。

总之,本研究区早古生代花岗闪长岩、石英闪长岩和花岗岩代表了岛弧和造山结束后的两次岩浆活动事件,为认识中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,这对于研究中祁连乃至重建整个祁连地区的构造演化模式无疑有着重要的地质意义。

## 7 结论

(1) 研究区花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $416.7 \pm 4.3$  Ma,石英闪长岩和花岗闪长岩年龄分别为  $442.5 \pm 4.7$  Ma 和  $443.9 \pm 1.3$  Ma,表明其侵位时代均为早古生代,指示了晚奥陶世-早志留世早期和晚志留世晚期两期岩浆活动事件。

(2) 地球化学分析结果,并结合区域地质背景及构造环境判别图解表明研究区花岗闪长岩和石英闪长岩属于洋壳俯冲环境下发生岛弧岩浆活动形成的 I 型花岗岩,花岗岩则属于造山作用结束后伸展环境下陆壳物质发生部分熔融形成的 A 型花岗岩。

(3) 晚奥陶世期间,北祁连洋盆发生向南的俯冲作用,引起岛弧岩浆活动形成 I 型花岗岩;晚志留世晚期中祁连乃至整个祁连地区结束造山发生伸展作用,导致地幔物质底侵从而引起陆壳物质发生部分熔融形成 A 型花岗岩。

**致谢** 感谢中国地质大学(北京)苏黎博士在 LA-ICP-MS 实验过程中的指导和数据处理方面所提供的帮助。感谢韩宝福和刘树文教授在研究工作过程中的有益建议和指导。

## References

- Altherr R, Holl A, Hegner E, Langer C and Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1-3): 51-73
- Barbarin B. 1990. Granitoids: Main petrogenetic classifications in relation to the origin and tectonic setting. *Geological Journal*, 25(3-4): 227-238
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46(3): 605-626
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province (BGMRG). 1989. Regional Geology of Gansu Province. Beijing: Geological

- Publishing House (in Chinese)
- Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173 – 174
- Chappell BW and White AJR. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Edinburgh, Earth Science*, 83(1–2): 1–26
- Chen JL, Xu XY, Zeng ZX, Xiao L, Wang HL, Wang ZQ and Xiao SW. 2008. Geochemical characters and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating constraints on the petrogenesis and tectonic setting of the Shichuan intrusion, east segment of central Qilian, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 841 – 854 (in Chinese with English abstract)
- Douce AEP. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? In: Castro A, Fernandez C and Vigneresse JL (eds.). *Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques*. Geological Society, London, Special Publications, 168: 55–75
- Feng YM. 1997. Investigatory summary of the Qilian orogenic belt, China, history, presence and prospect. *Advance in Earth Science*, 12(4): 307–314 (in Chinese with English abstract)
- Frost BR, Barnes CG, Collins WJ, Arculus RJ, Ellis DJ and Frost CD. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048
- Guo JJ, Zhao FQ and Li HK. 1999. Jinningian collisional granite belt in the eastern sector of the Central Qilian massif and its implication. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(1): 10–15 (in Chinese with English abstract)
- Han BF. 2007. Diverse post-collisional granitoids and their tectonic setting discrimination I. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 64–72 (in Chinese with English abstract)
- Harris NBW, Pearce JA and Tindle AG. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. Geological Society, London, Special Publications, 19: 67–81
- He SP, Wang HL, Chen JL, Xu XY, Zhang HF, Ren GM and Yu JY. 2008. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of basic dikes within Maxianshan rock group in the Central Qilian orogenic belt and its tectonic implications. *Journal of China University of Geosciences*, 33(1): 35–45 (in Chinese with English abstract)
- Jia XH, Wang Q and Tang GJ. 2009. A-type granites: Research progress and implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 446–474 (in Chinese with English abstract)
- Li B. 2008. Research review of A-type granite. *Journal of Shanxi Teachers University (Natural Science Edition)*, 22: 69–72 (in Chinese)
- Li JF, Zhang ZC and Han BF. 2010. Geochronology and geochemistry of Early Paleozoic granitic plutons from Subei and Shibaocheng areas, the western segment of Central Qilian and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2431–2444 (in Chinese with English abstract)
- Li JF, Zhang ZC, Tang WH, Li K, Luo ZW, and Li J. 2014. Provenance of Oligocene-Miocene sediments in the Subei area, eastern Altyn Tagh fault and its geological implications: Evidence from detrital zircons LA-ICP-MS U-Pb chronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 87: 130–140
- Li WY, Ma CQ, Liu YY and Robinson PT. 2012. Discovery of the Indosinian aluminum A-type granite in Zhejiang Province and its geological significance. *Science China (Earth Sciences)*, 55(1): 13–25
- Liu BS, Ren FH, Li YC and Zhao HL. 2007. Characteristics and tectonic setting of Late Indosinian I-type granite zone in the Yichun area. *Geology and Prospecting*, 43(1): 74–78 (in Chinese with English abstract)
- Liu JC. 1991. Tectonics of continental block in North Qilian orogenic belt. *Earth Science*, 16(6): 635–642 (in Chinese with English abstract)
- Liu ZW, Wang CL and Shi XF. 2006. Granitoids characteristics and tectonic setting of Danghenanshan area in South Qilian Mountains. *Geoscience*, 20(4): 545–554 (in Chinese with English abstract)
- Liu ZW and Wang CL. 2007. Granitoid geochemistry and gold-copper mineralization in the Danghenanshan area, southern Qilian Mountains. *Geology and Prospecting*, 43(1): 64–73 (in Chinese with English abstract)
- Lu FX and Sang LK. 2002. *Petrology*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Ma HW. 1992. Discrimination of genetic types of granitoid rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 8(4): 341–350 (in Chinese with English abstract)
- Maurel O, Respaut JP, Monié P, Arnaud N and Brunel M. 2004. U-Pb emplacement and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  cooling ages of the eastern Mont-Louis granite massif (Eastern Pyrenees, France). *Comptes Rendus Geoscience*, 336(12): 1091–1098
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 215–224
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983
- Pitcher W. 1982. Granite type and tectonic environment. In: Hsü K (ed.). *Mountain Building Processes*. London: Academic Press, 263
- Qin HP. 2012. Petrology of Early Paleozoic granites and their relation to tectonic evolution of orogen in the North Qilian Orogenic Belt. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geologic Sciences (in Chinese with English summary)
- Schermaier A, Haunschmid B and Finger F. 1997. Distribution of Variscan I- and S-type granites in the Eastern Alps: A possible clue to unravel pre-Alpine basement structures. *Tectonophysics*, 272(2–4): 315–333
- Song SG, Niu YL, Zhang LF and Zhang GB. 2009. Time constraints on orogenesis from oceanic subtraction to continental subduction, collision and exhumation: An example from North Qilian and North Qaidam HP-UHP belts. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2067–2077 (in Chinese with English abstract)
- Su JP, Hu NG, Zhang HF and Feng BZ. 2004a. U-Pb zircon and genesis of the Heigouliangzi granitic intrusion in the western segment of the Middle Qilian Mountains. *Geoscience*, 18(1): 70–74 (in Chinese with English abstract)
- Su JP, Zhang XH, Hu NG, Fu GM and Zhang HF. 2004b. Geochemical characteristics and genesis of adakite-like granites at Yema Nanshan in the western segment of the Central Qilian Mountains. *Geology in China*, 31(4): 365–371 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42(1): 313–345
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419
- Wan YS, Xu ZQ, Yang JS and Zhang JX. 2001. Ages and compositions of the Precambrian high-grade basement of the Qilian Terrane and its adjacent areas. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 375–384 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q and Liu XY. 1976. Paleo-oceanic crust of the Chilianshan region, western China and its tectonic significance. *Scientia Geologica Sinica*, (1): 42–55 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Wang XX, Zhen YD, Hong DW and Wang XS. 2007. Studies on structures of granitic plutons and granitic tectonic dynamics. *Chinese Journal of Geology*, 42(1): 91–113 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZG, Zhao ZH and Zou TR. 1998. *Geochemistry of Granitoid Rocks in Altai Mountains*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Weng WF, Zhi LG, Cai LY, Xu SF and Wang BM. 2011. Petrogenesis and geochemical comparison of two types of Yanshanian granite in South Anhui and its surrounding area. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 30(4): 433–448 (in Chinese with English abstract)
- Wu CL, Yao SZ, Yang JS, Zeng LS, Chen SS, Li HB, Wei XX, Wooden JL and Mazdab FK. 2006. Double subduction of the Early

- Paleozoic North Qilian oceanic plate; Evidence from granites in the central segment of North Qilian, NW China. *Geology in China*, 33(6): 1197–1208 (in Chinese with English abstract)
- Wu CL, Xu XY, Gao QM, Li XM, Lei M, Gao YH, Frost RB and Wooden JL. 2010. Early Palaeozoic granitoid magmatism and tectonic evolution in North Qilian, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1027–1044 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Windley BF, Yong Y, Yan Z, Yuan C, Liu CZ and Li JL. 2009. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3–4): 323–333
- Xu ZQ, Xu HF, Zhang JX, Li HB, Zhu ZZ, Qu JC, Chen DZ, Chen JL and Yang KC. 1994. The Zhoulangnanshan Caledonian subductive complex in the northern Qilian Mountains and its dynamics. *Acta Geologica Sinica*, 68(1): 1–15 (in Chinese with English abstract)
- Yang RY, Jia XQ and Zhang HZ. 2006. Geochemical characteristics of rocks from Qingshuigou of Middle Qilian ophiolite by NAA. *Journal of Isotopes*, 19(2): 65–69 (in Chinese with English abstract)
- Yong Y, Xiao WJ, Yuan C, Yan Z and Li JL. 2008. Geochronology and geochemistry of Paleozoic granitic plutons from the eastern Central Qilian and their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 855–866 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Sun XM, Zhou DJ, Qian Q, Chen Y, Wang YM, Jia XQ and Han S. 1997. The characteristics of North Qilian ophiolites, forming settings and their tectonic significance. *Advance in Earth Sciences*, 12(4): 366–393 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ and Xie YY. 1995. *Geochemistry of Granitoid Rocks in Hengduan Mountains Region*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Zhang ZW, Li WY, Gao YB, Zhang JW, Guo ZP and Li K. 2012. ID-TIMS zircon U-Pb age of Yulongqun intrusive rocks in southern Qilian Mountain and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 31(2–3): 455–462 (in Chinese with English abstract)
- Zhao H, Dang B and Wang CL. 2004. The geochemical characteristics of Ordovician volcanic rocks in southern Danghe mountain in southern Qilian mountains, Gansu Province. *Geoscience*, 18(1): 64–69 (in Chinese with English abstract)
- 岗岩带特征及其构造背景. *地质与勘探*, 43(1): 74–78
- 刘奇陈. 1991. 北祁连造山带陆块构造. *地球科学*, 16(6): 635–642
- 刘志武, 王崇礼, 石小虎. 2006. 南祁连党河南山花岗岩类特征及其构造环境. *现代地质*, 20(4): 545–554
- 刘志武, 王崇礼. 2007. 南祁连党河南山花岗岩类地球化学及其金铜矿化. *地质与勘探*, 43(1): 64–73
- 路凤香, 桑隆康. 2002. *岩石学*. 北京: 地质出版社
- 马鸿文. 1992. 花岗岩成因类型的判别分析. *岩石学报*, 8(4): 341–350
- 秦海鹏. 2012. 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. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院
- 宋述光, 牛耀龄, 张立飞, 张贵宾. 2009. 大陆造山运动: 从大洋俯冲到大陆俯冲、碰撞、折返的时限——以北祁连山、柴北缘为例. *岩石学报*, 25(9): 2067–2077
- 苏建平, 胡能高, 张海峰, 冯备战. 2004a. 中祁连西段黑沟梁子花岗岩的锆石 U-Pb 同位素年龄及成因. *现代地质*, 18(1): 70–74
- 苏建平, 张新虎, 胡能高, 付国民, 张海峰. 2004b. 中祁连西段野马南山埃达克质花岗岩的地球化学特征及成因. *中国地质*, 31(4): 365–371
- 万渝生, 许志琴, 杨经绥, 张建新. 2001. 祁连山带及邻区前寒武纪深变质基底的时代和组成. *地质学报*, 75(4): 375–384
- 王荃, 刘雪亚. 1976. 我国西部祁连山区的古海洋地壳及其大地构造意义. *地质科学*, (1): 42–55
- 王涛, 王晓霞, 郑亚东, 洪大卫, 王新社. 2007. 花岗岩构造研究及花岗岩构造动力学刍议. *地质科学*, 42(1): 91–113
- 王中刚, 赵振华, 邹天人. 1998. *阿尔泰花岗岩类地球化学*. 北京: 科学出版社
- 翁望飞, 支利庚, 蔡连友, 徐生发, 王邦民. 2011. 皖南及邻区燕山期两个类型花岗岩地球化学对比与岩石成因. *矿物岩石地球化学通报*, 30(4): 433–448
- 吴才来, 姚尚志, 杨经绥, 曾令森, 陈松永, 李海兵, 戚学祥, Wooden JL, Mazdab FK. 2006. 北祁连洋早古生代双向俯冲的花岗岩证据. *中国地质*, 33(6): 1197–1208
- 吴才来, 徐学义, 高前明, 李向民, 雷敏, 郜源红, Frost RB, Wooden JL. 2010. 北祁连早古生代花岗质岩将作用及其构造演化. *岩石学报*, 26(4): 1027–1044
- 许志琴, 徐惠芬, 张建新, 李海兵, 朱志直, 曲景川, 陈代璋, 陈金禄, 杨开春. 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学. *地质学报*, 68(1): 1–15
- 杨瑞瑛, 贾秀琴, 张海珠. 2006. 中子活化法研究中祁连清水沟蛇绿岩中稀土元素的地球化学特征. *同位素*, 19(2): 65–69
- 雍拥, 肖文交, 袁超, 闰臻, 李继亮. 2008. 中祁连东段古生代花岗岩的年代学、地球化学特征及其大地构造意义. *岩石学报*, 24(4): 855–866
- 张旗, 孙晓猛, 周德进, 钱青, 陈雨, 王岳明, 贾秀琴, 韩松. 1997. 北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义. *地球科学进展*, 12(4): 366–393
- 张玉泉, 谢应雯. 1995. *横断山区花岗岩类地球化学*. 北京: 科学出版社
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 张江伟, 郭周平, 李侃. 2012. 南祁连裕龙沟岩体 ID-TIMS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地质通报*, 31(2–3): 455–462
- 赵虹, 党彝, 王崇礼. 2004. 甘肃南祁连党河南山中奥陶世火山岩的地球化学特征. *现代地质*, 18(1): 64–69

## 附中文参考文献

- 陈隽璐, 徐学义, 曾佐勋, 肖林, 王洪亮, 王宗起, 肖绍文. 2008. 中祁连东段什川杂岩基的岩石学特征及年代学研究. *岩石学报*, 24(4): 841–854
- 冯益民. 1997. 祁连造山带研究概况——历史、现状及展望. *地球科学进展*, 12(4): 307–314
- 甘肃省地质矿产局. 1989. *甘肃省区域地质志*. 北京: 地质出版社
- 郭进京, 赵凤清, 李怀坤. 1999. 中祁连东段晋宁期碰撞型花岗岩及其地质意义. *地球学报*, 20(1): 10–15
- 韩宝福. 2007. 后碰撞花岗岩类的多样性及其构造环境判别的复杂性. *地学前缘*, 14(3): 64–72
- 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 徐学义, 张宏飞, 任光明, 余吉远. 2008. 中祁连马衙山岩群内基性岩墙群锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其构造意义. *地球科学*, 33(1): 35–45
- 贾小辉, 王强, 唐功建. 2009. A 型花岗岩的研究进展及意义. *大地构造与成矿学*, 33(3): 446–474
- 李彪. 2008. A 型花岗岩研究综述. *山西师范大学学报(自然科学版)*, 22: 69–72
- 李建锋, 张志诚, 韩宝福. 2010. 中祁连西段肃北、石包城地区早古生代花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 26(8): 2431–2444
- 李万友, 马昌前, 刘圆圆, Robinson PT. 2012. 浙江印支期铝质 A 型花岗岩的发现及其地质意义. *中国科学(地球科学)*, 42(2): 173–174
- 刘宝山, 任风和, 李仰春, 赵焕力. 2007. 伊春地区晚印支期 I 型花