

北祁连中段毛藏寺花岗闪长岩 U-Pb 年龄 及岩石地球化学特征

丁启福¹, 黄增保²

(1. 甘肃矿业开发研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 笔者研究了北祁连中段毛藏寺花岗闪长岩体的岩石学、年代学和地球化学特征。毛藏寺岩体主要岩石类型为花岗闪长岩, 锆石 SHRIMP U-Pb 测年获得花岗闪长岩结晶年龄为 (456 ± 3) Ma。花岗闪长岩的 SiO_2 含量较高, 介于 $65.1\% \sim 73.0\%$, 较低的 $\text{Mg}^\#$ 值 ($18 \sim 32$), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 介于 $0.82 \sim 1.37$, $\text{A}/\text{NKC} = 0.9 \sim 1.1$, 总体为高钾钙碱性准铝质花岗岩; 岩石微量元素组成具富集 LILE 元素, 亏损 HFSE 元素, 轻重稀土分异明显 [$(\text{La}/\text{Yb})_N = 11.1 \sim 34.1$], 具弱负 Eu 异常。综合地球化学特征和区域构造演化表明, 花岗闪长岩岩浆源区为下地壳变玄武岩石, 形成于同碰撞构造背景。

关键词: 岩石成因; 花岗闪长岩; 构造意义; 北祁连山

中图分类号: P588.12; P594.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2019)04-0053-10

U-Pb Ages and Geochemistry of Maozangsi Granodiorite in North Qilian Mountains, China

DING Qifu¹, HUANG Zengbao²

(1. Gansu Mining Development Research Institute, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: This paper reports a detailed study of petrology, U-Pb zircon dating and geochemical characteristic for Maozangsi granodiorite in North Qilian Mountains. The Maozangsi pluton is mainly consisted of granodiorite, and the SHRIMP U-Pb zircon dating yield a magma crystallization age of (456 ± 3) Ma for this pluton. The Maozangsi granodiorite has high SiO_2 ($65.1\% \sim 73.0\%$) and low $\text{Mg}^\#$ ($18 \sim 32$) values, its $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio is $0.82 \sim 1.37$ while its A/NKC ratio is $0.9 \sim 1.1$, belonging to high K calc-alkaline granite. It is rich in LILE and depleted in HFSE. The REE data shows strongly fractionated REE patterns, with $(\text{La}/\text{Yb})_N$ ratio of $11.1 \sim 34.1$ and δEu value of $0.6 \sim 0.8$. The geochemical characteristics and evolutionary history of granitoids in North Qilian orogen belt indicate that the magma of the granodiorite was derived from partial melting of basaltic rock in lower crust and formed in collisional tectonic setting.

Keywords: Petrogenesis; granodiorite; tectonic implications; North Qilian orogen belt

北祁连造山带是中国西部典型的加里东期增生造山带, 呈北西向带状挟持于中祁连地块和华北克拉通之间(图 1a)。该造山带经历了早古生代俯冲

消减, 陆-陆碰撞, 以及晚古生代以来的陆内汇聚等阶段(SONG et al., 2013), 以发育高压变质岩、蛇绿岩残片、中酸性侵入岩和岛弧火山岩、复理石建造和

收稿日期: 2019-07-12; 修回日期: 2019-08-22

基金项目: 中国地质调查局“中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务(矿产地质志)”项目(DD20160346)

作者简介: 丁启福(1966-)男, 高级工程师, 长期从事区域地质和矿床地质调查研究。E-mail: 463244954@qq.com

磨拉石建造等为特征。其中,早古生代中酸性岩浆作用十分强烈,多呈岩基、岩株产出,伴随岩浆的侵位形成一系列大型钨钼矿床、稀土矿床和众多中小型铁、铜、铅锌矿床,构成中国重要的钨钼、铜、铅锌和稀土成矿带(毛景文等,2003)。

毛藏寺岩基为北祁连造山带中规模最大、岩石类型最丰富的复式岩基之一。前人资料研究表明,该岩基形成于加里东中晚期,具有多阶段演化特征,先后经历晚奥陶世、志留纪和泥盆纪3个时期,为北祁连碰撞后岩浆作用的代表,记录了北祁连造山带继“古浪运动”碰撞造山,到“祁连运动”造山带去根和倒塌伸展的重要过程。同时,岩浆作用过程形成丰富的钨钼、稀土和金等矿产。因此,该岩体的研究不仅对研究北祁连碰撞后构造演化有重要科学意义,还对钨钼、稀土找矿有重要现实意义。前人曾对岩基个别岩体进行过岩石学、岩石地球化学和年代学的研究(吴才来等,2004;熊子良等,2012;YU et al., 2015;黄增保等,2016;秦海鹏等,2014),取得了重要进展。笔者在1:25万武威幅区域地质调查基础上,对毛藏寺岩基主体组成部分花岗闪长岩开展了系统岩石学、岩石地球化学、年代学的研究,并探讨了岩石成因及构造环境,以期对北祁连构造演化及成矿背景的研究提供基础性资料。

1 地质背景

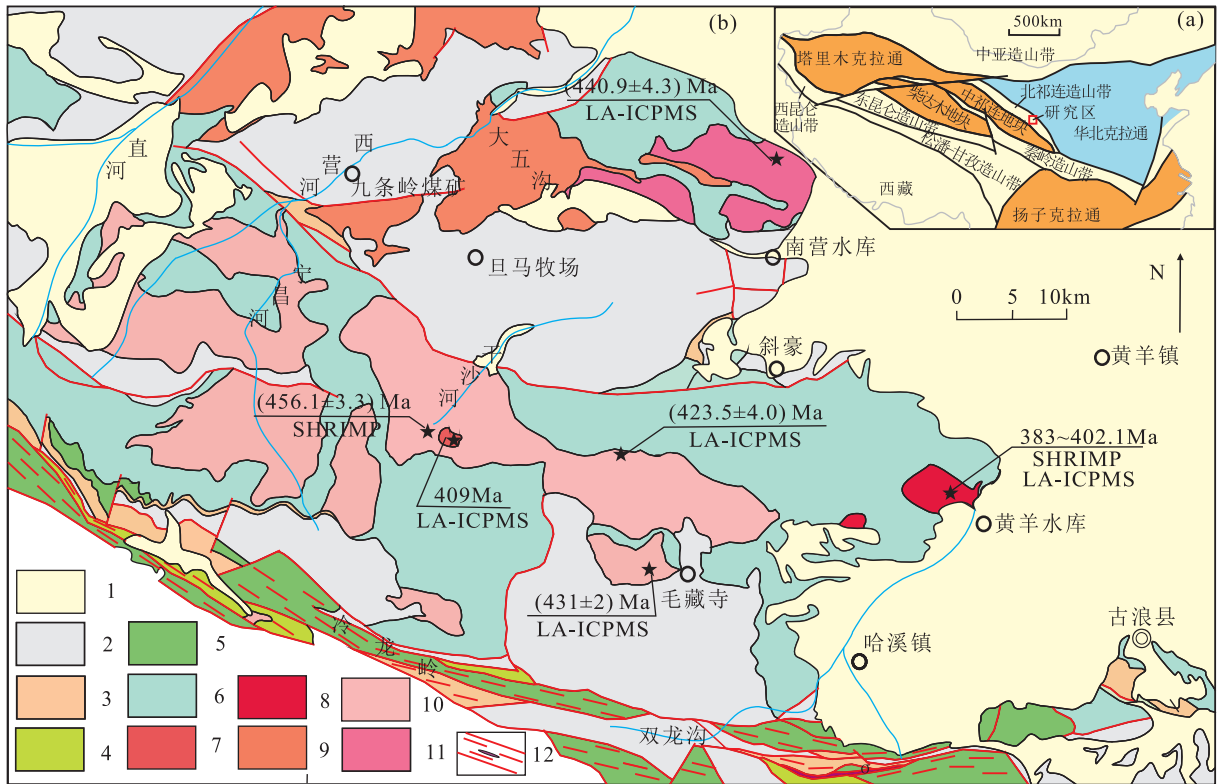
研究区位于甘肃省武威市南10 km的毛藏寺一带,构造上属北祁连弧后盆地。区域上出露的地层主要为早古生代浅变质海相火山-沉积岩系,包括中寒武纪浅变质碎屑岩系、早一中奥陶世阴沟群和车轮沟群岛弧相火山-沉积岩系,以及志留纪复理石建造,其次为晚古生代一中生代陆相碎屑岩系,包括泥盆纪磨拉石建造、石炭纪含煤碎屑岩系,以及二叠-白垩纪河湖相碎屑岩系等。中酸性侵入岩十分发育,呈椭圆形的大岩基产出,出露面积643 km²。侵入于中寒武统大黄山组和下一中奥陶统车轮沟群中,被泥盆系-第四系角度不整合覆盖(图1b)。黄增保(2016)根据侵入穿插关系、年代学资料,将其解体为5个岩体:莲花山英云闪长岩体、毛藏寺花岗闪长岩体、北大坂二长花岗岩体、黄羊河钾长花岗岩体和干沙鄂博霓辉正长斑岩。这些中酸性岩体形成于加里东晚期,大致可划分为2期:早期岩体主要有莲花山英云闪长岩体、毛藏寺花岗闪长岩体和北大坂

二长花岗岩体,属钙碱性-高钾钙碱性系列岩石,侵位时代为456~423 Ma(熊子良等,2012;秦海鹏,2012;YU et al., 2015;黄增保,2016);晚期呈岩株或岩枝产出,有黄羊河钾长花岗岩体和干沙鄂博霓辉正长斑岩,属碱性系列岩石,形成时代为419~383 Ma(吴才来等,2004;熊子良等,2012;黄增保,2016)。

区内矿产资源丰富,多与中酸性岩体有关。例如,毛藏寺钨钼矿分布于毛藏寺花岗闪长岩外接触带内,而干沙鄂博稀土多金属矿床则与干沙鄂博霓辉正长斑岩关系密切。

2 岩体地质和岩相学

毛藏寺花岗闪长岩分布于毛藏寺、张义堡、响水河一带,面积约320 km²,是毛藏寺岩基主体组成部分(图1b)。呈椭圆形展布,侵入于中下奥陶统车轮沟群浅变质碎屑岩系和下奥陶统阴沟群中基性火山熔岩中,沿接触带见石英岩、黑云母瑾青石角岩等接触变质岩。被后期侵入的北大坂二长花岗岩体、黄羊河钾长花岗岩体和干沙鄂博霓辉正长斑岩体等侵入。在冷龙岭、毛藏寺和宁昌河一带被泥盆系-第四系不整合覆盖。岩体内含少量微细粒闪长质包体,主体岩性为灰白-浅绿色中粒花岗闪长岩,局部相变为斑状花岗闪长岩,岩体边缘受侵位影响而成片麻状构造。花岗闪长岩呈灰白色,中粒花岗结构,矿物粒径介于2~4 mm,块状构造。矿物组成:斜长石(55%~63%)、石英(20%~27%)、角闪石(10%~27%)、钾长石(10%~18%)、黑云母(5%~8%);副矿物为微量的磷灰石、榍石和磁铁矿。斜长石呈自形-半自形,环带较发育,为更长石,具弱钠黝帘石化及绢云母化;钾长石呈他形晶充填于斜长石空隙中,为正长石和条纹长石;石英呈他形;角闪石、黑云母均呈自形晶,个别被绿泥石交代,呈假象存在;副矿物为榍石、磷灰石、磁铁矿。斑状花岗闪长岩呈灰白色,似斑状结构,块状构造,斑晶主要为钾长石,粒径为1~2 cm,发育巨片双晶,基质具中粒花岗结构,矿物粒径3~5 mm,矿物成分以石英(20%~25%)、斜长石(为中奥长石45%~55%)、钾长石(15%~20%)为主,暗色矿物较多,以黑云母(5%~10%)为主,次为角闪石(1%左右);副矿物为磁铁矿、锆石、磷灰石、榍石等,含量不足1%。



1. 第四系; 2. 石炭系—白垩系; 3. 泥盆纪磨拉石建造; 4. 志留纪复理石建造; 5. 奥陶系阴沟群; 6. 奥陶系车轮沟群; 7. 干沙鄂博碱性岩体; 8. 黄羊河钾长花岗岩; 9. 北大坂二长花岗岩; 10. 毛藏寺花岗闪长岩; 11. 莲花山英云闪长岩; 12. 蛇绿混杂岩带

图 1 (a)祁连地区构造简图和(b)毛藏寺地区地质图(据黄增保, 2016)

Fig. 1 (a)Simplified tectonic framework map of the Qilian area and(b) Geological map of the Maozangsi region (After HUANG Zengbao, 2016)

3 样品及分析方法

笔者研究挑选了 7 件毛藏寺花岗闪长岩中新鲜未蚀变质样品,进行了全岩地球化学分析,测试在国土资源部中南测试中心进行,除 H₂O 采用重量法外,其余主量元素都用 AXIOS 型 X 射线荧光光谱仪测定,分析精度(相对误差)优于 1%。微量和稀土元素采用 X Series II 型等离子体质谱仪,其元素的分析误差小于 5%。

本次同位素测年的样品采自毛藏寺花岗闪长岩中部的细粒花岗闪长岩中(ZBSTW-6),选择无蚀变质新鲜岩石样品 5 kg,在河北省区域地质调查队进行锆石挑选,首先按常规方法粉碎,用磁选、电选方法得到重砂矿物,再淘洗获得锆石精矿,最后在双目镜下挑选出晶形较好、透明锆石晶体作为 SHRIMP

U-Pb 同位素测定对象。制靶和阴极发光图像照相是在北京离子探针中心完成,首先将锆石样品置于环氧树脂中进行抛光,使锆石核心出露,然后进行阴极发光(CL)和透反射光照相,选择无裂缝和包裹体具有明显的岩浆震荡环带自形岩浆锆石晶体进行测试。锆石 U-Pb 同位素测定在北京离子探针中心完成,分析仪器为高灵敏度高分辨率离子探针(SHRIMP II)完成,分析流程及原理参见 WILLIAMS(1998)。测试过程中每测试 3 次,采用标准锆石 TEMORA 1(BLACK et al., 2003)(参考年龄为 417 Ma)进行同位素分馏校正一次,应用标准锆石 91500(1 062.4 Ma)标定样品的 U、Th、Pb 含量。普通铅根据实测的²⁰⁴Pb 进行校正。同位素比值误差为 1σ,年龄值选²⁰⁶Pb/²³⁸U,加权平均年龄的误差为 95%置信度。数据处理、年龄计算和绘图使用 ISOPLOT 程序(LUDWIG, 2003)。

4 测试结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

本次对出露于干沙河脑一带的毛藏寺花岗闪长岩(图 1b)在北京离子探针中心进行了 SHIRMP 锆石 U-Pb 测年,获得 (456 ± 3) Ma 同位素年龄。

岩石中锆石颗粒较大,呈透明-半透明,多数为短柱状晶体,少数为他形粒状晶体,长 $100 \sim 300 \mu\text{m}$,宽 $100 \sim 150 \mu\text{m}$,长宽比介于 $1:1 \sim 3:1$,柱面 $\{110\}$ 、 $\{100\}$ 和锥面 $\{111\}$ 均发育。锆石 CL 图像中震荡环清晰(图 2a),具岩浆锆石特征,部分锆石继承性核。

花岗闪长岩中的锆石共测 14 个点,结果见表 1 和图 2b、图 2c。从表中可以看出,锆石 U 含量低,介于 $32 \times 10^{-6} \sim 357 \times 10^{-6}$,Th 含量介于 $97 \times 10^{-6} \sim 369 \times 10^{-6}$,Th/U 值介于 $0.33 \sim 0.98$, >0.1 ,与变质锆石不同(Th/U <0.1),属于岩浆锆石的范畴(HOSKIN et al., 2000)。除 2.2 和 8.2 测点外,其余 12 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $444.3 \sim 473.9$ Ma,在谐和线上形成一个年龄集中区(图 2b),在 95%置信度 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 (456 ± 3) Ma(MSWD=1.8),准确反映了岩体形成年龄。2.2 和 8.2 测点获得较低的谐和年龄,分别为 404.2 Ma 和 410.8 Ma,可能代表了后期岩浆热事件年龄。

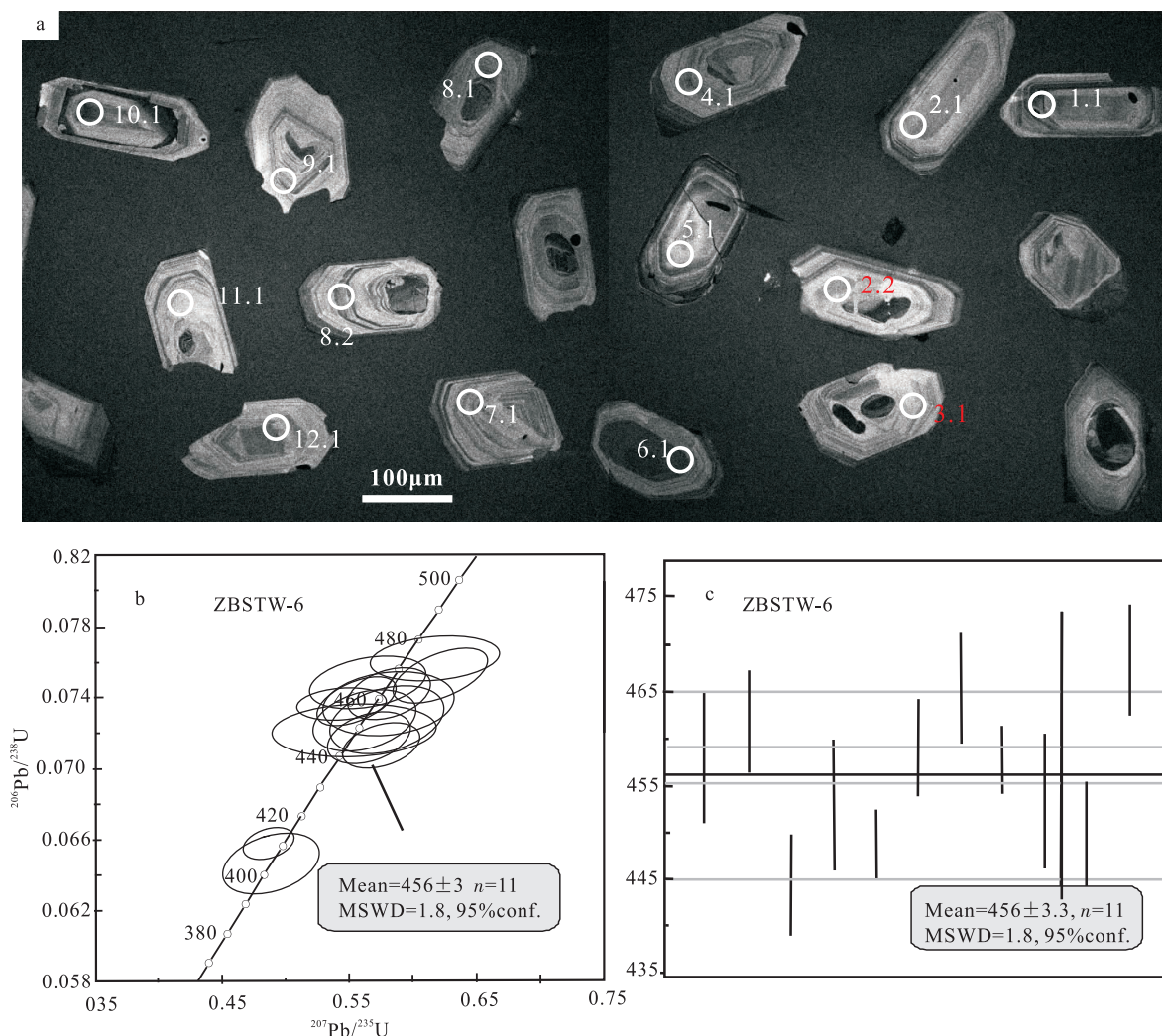


图 2 (a)毛藏寺花岗闪长岩锆石阴极发光图像和(b) $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图

Fig. 2 (a) Cathodoluminescence (CL) images and (b) $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Concordia diagram of representative zircons from the Maozangsi granodiorite

4.2 地球化学

4.2.1 主量元素特征

毛藏寺花岗闪长岩主量元素和微量元素含量见表 2。从表中可知,岩石 SiO₂ 介于 65.1%~73.0%,属酸性岩类;K₂O + Na₂O 为 5.12%~6.67%,且 K₂O/Na₂O 介于 0.82~1.37,里特曼指数(δ)为 1.1~2.0,在 SiO₂-K₂O 图中(图 3a)多数

样品落入高钾钙碱性系列岩石区,个别落入钙碱性系列区;Al₂O₃ 含量为 12.4%~15.1%,CaO 含量为 2.68%~4.44%,A/NKC 介于 0.9~1.0,均小于 1.1,且岩石不含标准矿物刚玉,表明铝不饱和,属准铝质花岗岩(图 3b)。岩石较低的 MgO 含量和 Mg[#] [Mg[#] = 100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺)],分别为 0.82%~2.68%和 18~32。

表 1 毛藏寺花岗闪长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年数据表
Tab. 1 Zircon LA-ICPMS U-Pb isotopic data of the Maozangsi granodiorite

样品号 ZBSTW-6	(10 ⁻⁶)				同 位 素 比 值						同位素年龄(Ma)	
	Pb	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
1.1	0.48	100	69	0.69	0.060 7	4.2	0.618 7	4.5	0.073 9	1.6	458.0	7.0
2.1	0.00	167	111	0.67	0.053 6	3.5	0.546 6	3.7	0.074 0	1.2	461.8	5.5
2.2	0.45	97	32	0.33	0.054 2	4.9	0.482 8	5.2	0.064 7	1.6	404.2	6.4
3.1	0.00	196	129	0.66	0.061 1	3.1	0.603 2	3.3	0.071 6	1.2	444.3	5.3
4.1	0.55	173	122	0.71	0.060 7	3.4	0.613 2	3.8	0.073 2	1.5	452.9	6.8
5.1	0.83	155	112	0.72	0.060 3	3.5	0.599 0	3.7	0.072 0	1.3	446.7	5.6
6.1	0.00	169	111	0.65	0.052 4	3.5	0.531 9	3.7	0.073 6	1.2	459.2	5.4
7.1	0.73	137	89	0.65	0.055 9	3.8	0.578 2	4.0	0.075 0	1.3	465.3	6.1
8.1	0.48	365	357	0.98	0.059 6	3.8	0.608 8	3.9	0.074 1	0.8	457.6	3.6
8.2	0.25	369	199	0.54	0.054 4	2.5	0.494 1	2.7	0.065 9	0.9	410.8	3.5
9.1	0.28	203	154	0.76	0.056 7	4.5	0.568 8	4.7	0.072 8	1.6	453.5	7.0
10.1	0.60	194	140	0.72	0.062 8	3.0	0.663 9	3.2	0.0767	1.1	473.9	5.4
11.1	0.65	154	124	0.81	0.062 5	3.1	0.627 6	3.4	0.072 8	1.3	449.6	5.8
12.1	0.38	193	133	0.69	0.057 8	3.2	0.598 4	3.5	0.075 1	1.3	468.3	5.9

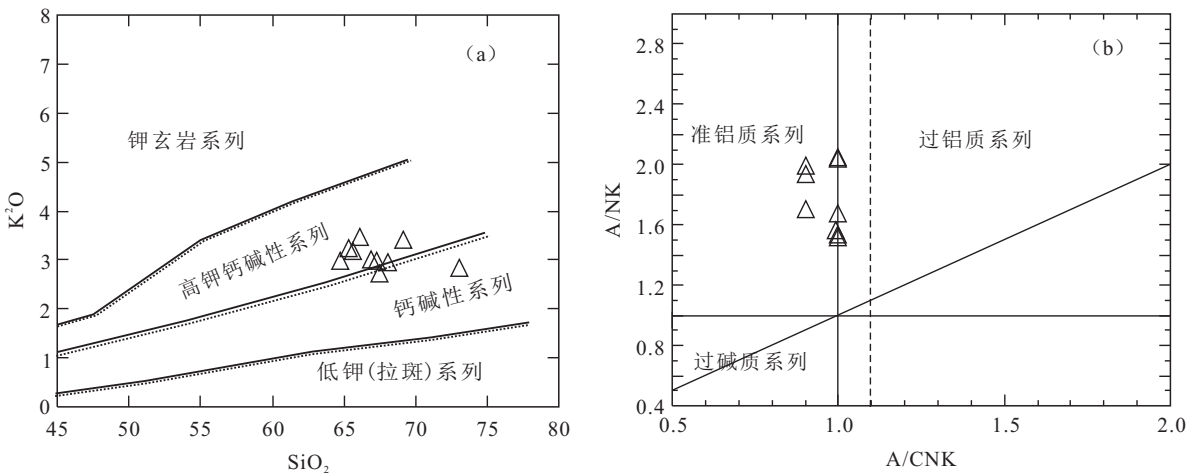


图 3 (a)SiO₂-K₂O 图(据 PECCERILLO et al. , 1976)和(b)A/NK-A/CNK 图解(据 MANIAR et al. , 1989)

Fig. 3 (a)SiO₂ vs. K₂O(After PECCERILLO et al. , 1976)and (b)A/NKvs. A/CNK diagrams of the Maozangsi granodiorite (After MANIAR et al. , 1989)

4.2.2 微量元素特征

毛藏寺花岗闪长岩稀土总量(∑REE)变化于

199 × 10⁻⁶ ~ 690 × 10⁻⁶, 且 LREE/HREE = 3.7 ~ 9.3, (La/Yb)_N 为 11.1 ~ 34.1, (La/Sm)_N 为 4.3 ~

7.3, $(Gd/Yb)_N$ 为 1.2~1.8, δEu 为 0.6~0.8, 稀土配分模式也表现为右倾平滑曲线(图 4a)。总体反映岩石轻稀土富集, 亏损重稀土元素, 且轻稀土元素分馏明显, 而重稀土元素分馏不明

显, 具弱负 Eu 异常。原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4b), 表现为 Nb、Ta、Ce、Ti 的负异常和 Rb、U、Th 的正异常, 具活动大陆边缘花岗岩的特征。

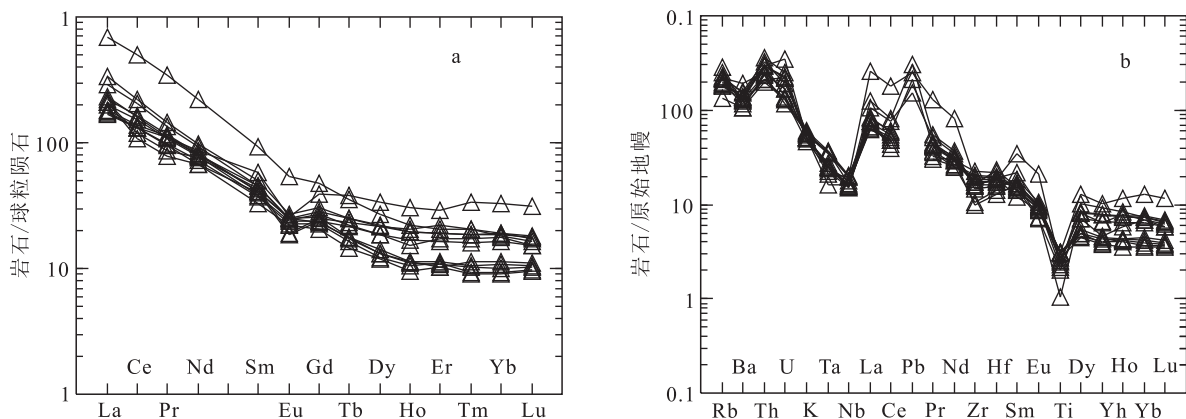


图 4 (a)毛藏寺花岗闪长岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式(据 BOYNTON, 1984)和
(b)地幔标准化微量元素蛛网图(据 SUN et al., 1989)

Fig. 4 (a)Chondrite-normalized REE patterns (After BOYNTON, 1984) and (b) Primitive mantle normalized trace element spider diagrams (After SUN et al., 1989) from the Maozangsi granodiorite

表 2 毛藏寺花岗闪长岩岩石化学(wt %)及稀土微量元素(10^{-6})分析结果表

Tab. 2 Analysis of chemical composition(wt %), REE and trace elements(10^{-6}) of the Maozangsi granodiorite

样号	D1326	D1222	D4315	403-1	403-2	403-3	403-4
SiO ₂	73.0	67.3	65.1	68.1	69.1	67.4	66.9
Al ₂ O ₃	12.4	14.0	15.1	13.7	13.5	14.1	14.0
Fe ₂ O ₃	0.77	3.04	1.05	4.56	4.05	4.94	4.80
FeO	2.16	1.88	3.58	—	—	—	—
CaO	2.68	4.02	3.57	4.11	3.06	3.93	4.44
MgO	0.82	1.78	2.68	1.75	1.60	1.97	1.87
K ₂ O	2.85	2.98	3.01	2.95	3.42	2.72	3.01
Na ₂ O	3.03	2.18	3.66	2.37	2.64	2.40	2.29
TiO ₂	0.21	0.4	0.61	0.45	0.42	0.48	0.46
P ₂ O ₅	0.05	0.08	0.20	0.09	0.08	0.09	0.09
MnO	0.05	0.08	0.07	0.08	0.07	0.09	0.08
LOI	1.12	1.43	0.823	1.85	2.03	2.04	1.88
Total	99.1	99.1	99.5	100	100	100	99.8
A/NCK	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9
δ	1.1	1.1	2.0	1.1	1.4	1.1	1.2
Mg [#]	18	23	32	23	24	24	24
Cr	6.35	13.4	46.6	29.4	26.2	33.8	30.8
Ni	4.40	5.00	36.0	9.30	8.54	10.8	10.1
Co	8.45	8.50	11.8	18.7	16.4	19.9	19.6
Li	14.7	26.3	22.2	15.2	14.1	14.3	13.2
Rb	114	172	120	136	151	131	132
Cs	2.15	3.90	3.04	2.97	4.23	3.90	2.51
Sr	194	243	527	444	295	330	497
Ba	780	703	878	1017	844	821	1 251

续表 2

样号	D1326	D1222	D4315	403-1	403-2	403-3	403-4
V	33.4	91.7	76.8	97.7	88.0	113	106
Sc	12.0	19.7	9.99	16.8	14.9	19.2	17.2
Nb	10.2	9.97	10.6	13.1	9.83	10.4	10.6
Ta	1.01	0.96	0.60	0.77	0.82	0.88	0.91
Zr	103	110	168	196	168	180	156
Hf	3.56	3.96	6.50	5.13	4.58	5.06	4.41
Be	3.88	3.72	2.08	2.35	2.03	2.18	2.27
Ga	21.0	21.1	22.5	17.2	15.6	16.8	17.4
U	4.32	3.36	4.58	6.86	2.36	2.67	3.34
Th	16.8	19.1	23.9	23.2	18.7	17.1	20.1
La	49.7	49.4	42.8	165	68.7	55.1	80.3
Ce	73.2	65.4	85.2	306	126	99.0	135
Pr	8.12	7.44	10.7	32.5	12.9	10.5	13.6
Nd	36.0	31.8	37.1	103	43.7	37.6	45.7
Sm	6.64	6.08	6.22	14.2	6.94	6.91	7.64
Eu	1.10	1.07	1.45	3.16	1.41	1.46	1.58
Gd	5.11	4.92	4.80	9.86	5.56	5.87	6.32
Tb	0.86	0.80	0.66	1.32	0.83	0.93	0.93
Dy	5.48	4.72	3.35	6.83	4.75	5.67	5.44
Ho	1.17	0.87	0.64	1.26	0.95	1.12	1.10
Er	3.68	2.87	1.72	3.44	2.69	3.18	3.19
Tm	0.52	0.44	0.29	0.52	0.41	0.48	0.47
Yb	3.06	3.00	1.94	3.27	2.82	3.28	3.17
Lu	0.42	0.39	0.28	0.44	0.39	0.46	0.45
Y	27.3	20.0	16.7	39.8	28.1	33.2	33.9
∑REE	222	199	214	690	306	265	339
δEu	0.6	0.6	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7

注: $Mg^\# = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$; — 代表未检测项目。

5 讨论

5.1 成岩时代

由毛藏寺花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分析结果可知, 锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为(456 ± 3) Ma, 精确确定了毛藏寺花岗闪长岩体侵位年龄, 属晚奥陶世早期岩浆活动的产物。这一结果明显老于目前北祁连中段毛藏寺地区所报道的早古生代中酸性侵入岩。例如, 莲花山花岗闪长岩体(440.9 ~ 426 Ma)(秦海鹏等, 2012; 刘明强, 2013)、北大坂二长花岗岩(414 Ma)(黄增保等, 2010)、黄羊河钾长花岗岩体(402 ~ 383 Ma)(吴才来等, 2004; 熊子良等, 2012)和干沙鄂博霓辉正长斑岩(419 ~ 409 Ma)(黄增保, 2016), 也早于前人获得的毛藏寺花岗闪长岩侵位年龄。例如, 熊子良等(2012)获得毛藏寺花

岗闪长岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 423.5 Ma, YU et al. (2015)测得该岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 431 Ma。笔者获得毛藏寺花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄代表了北祁连中段毛藏寺地区最早一次岩浆活动, 同时反映出该岩体具有多阶段侵位特征, 至少分为 2 个阶段, 早期侵位时代为(456 ± 3) Ma, 晚期侵位时代为 431 ~ 421 Ma。

5.2 岩体成因及构造环境

毛藏寺花岗闪长岩体内含少量微细粒闪长质包体, 暗色矿物主要为普通角闪石, 副矿物为磁铁矿、磷灰石、榍石等, 具 I 型花岗岩矿物学特征; 岩石里特曼指数(δ)介于 1.1 ~ 2.0, A/NKC 值介于 0.9 ~ 1.0, 属高钾钙碱性系列准铝质花岗岩类(图 3a、图 3b); 微量元素组成具有 I 型花岗岩的地球化学特征和活动大陆边缘花岗岩的特征(图 4a、图 4b)。在 La-La/Sm 图(5a)和 Ce-Ce/Yb 图(图 5b)中, 样点

呈右倾上升直线,显示部分熔融在岩浆演化过程中占主导作用,与熊子良等(2012)研究结果基本吻合。但本文样品岩石具较低的 MgO、Cr、Ni 含量和 $Mg^\#$ 值(18~32),表明岩浆形成过程基本没有幔源物质的加入,可能为下地壳或地壳中玄武质岩石部分熔融的产物(BOYNTON et al., 1984; CHAPPELL et al., 1992)。据熊子良等(2012)研究结果,毛藏寺花岗闪长岩具较低的 Sr 同位素初始比值($I_{Sr}=0.7063\sim 0.7065$)和稍偏负的 $\epsilon Nd(t)$ 值(-1.5~-1.1),岩浆物质可能主要来自北祁连山类似于早古生代火山岩物质的部分熔融。

目前,对毛藏寺花岗闪长岩形成的构造背景认识主要为碰撞后环境,但对岩浆诱发机制存在分歧。熊子良等(2012)认为岩石形成与碰撞后俯冲板片断离诱发地壳物质熔融有关,而 YU et al. (2015)认为岩石具埃达克质岩地球化学特征,形成与同碰撞期陆壳加厚地壳物质部分熔融有关。笔者获得样品数据均为毛藏寺花岗闪长岩早期侵位的岩石,不具有埃达克岩地球化学特征,而且具较低的 MgO、Cr、Ni 含量和 $Mg^\#$ 值(18~32),结合区域地质背景分析,认为可能与北祁连造山带同碰撞期加厚地壳物质部分熔融有关。

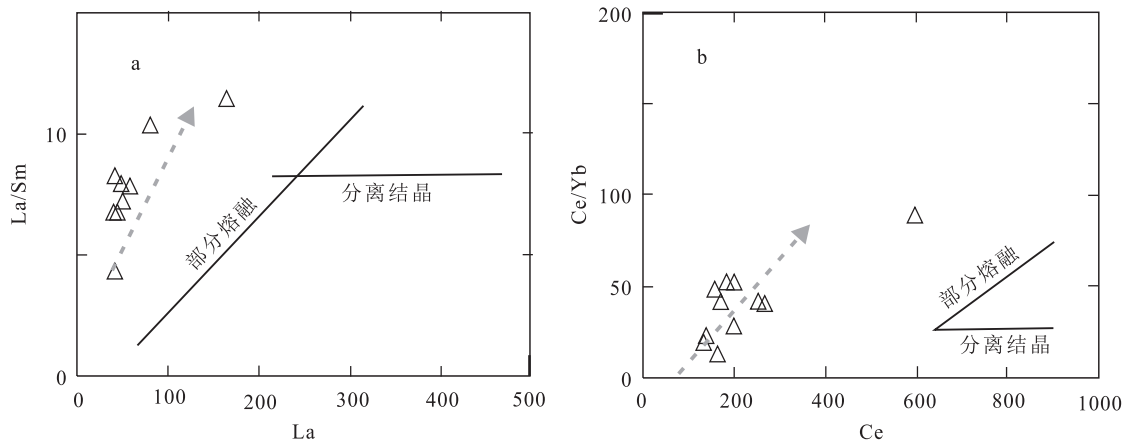


图5 毛藏寺花岗闪长岩岩石成因图

Fig. 5 La-La/Sm and Ce-Ce/Yb diagrams of the Maozangsi granodiorite

6 地质意义

区域地质资料表明,北祁连裂解始于新元古代(~679 Ma)至晚寒武世(~505 Ma),形成有一定规模的洋盆,发育 MORB 特征的基性熔岩;在早奥陶世至中奥陶世(490~460 Ma),北祁连洋盆俯冲消减形成较完整的沟-弧-盆体系(夏林圻等,1998;宋述光等,2009;宋泰忠等,2016;王晓伟等,2018)。越来越多的证据表明晚奥陶世的“古浪运动”是造成北祁连洋盆闭合的主要原因。重要证据有北祁连地区上奥陶统与中奥陶统之间普遍存在的不整合接触,而且上奥陶统最年轻岩浆锆石年龄为 467~450 Ma(甘肃省地矿局,1989;黄增保,2016);北祁连高压变质带中榴辉岩等折返退变质形成蓝闪石和多硅白云母 Ar-Ar 坪年龄集中在 442~455 Ma(林宜慧等,2012;LIU et al., 2006);还有同碰撞形成的低镁埃

达克质岩浆侵位于 440~465 Ma,如莲花山岩体、雷公山岩体、西格拉岩体、屈吴山岩体,巴米山二长花岗岩、黑石川花岗岩等(TSENG et al., 2009;秦海鹏,2012;CHEN et al., 2012;YANG et al., 2015; YU et al., 2015),以及同碰撞期形成的 S 型花岗岩,如什川岩体、董家庄和新店岩体,其侵位时代为 444~454 Ma(雍拥等,2008;陈隽璐等,2008)。由此可见,“古浪运动”发生的时代主要在 460~440 Ma。

综上所述,毛藏寺花岗闪长岩侵位时代为晚奥陶世早期(456 ± 3) Ma,即发生在“古浪运动”早期,为晚奥陶世中祁连地块与北祁连岛弧杂岩发生碰撞作用的产物。区域上同期构造热事件还有北祁连造山带中榴辉岩等初次折返退变质形成蓝闪石和多硅白云母(林宜慧等,2012;LIU et al., 2006)、雷公山等低镁埃达克质岩浆侵位(TSENG et al., 2009)等。

7 结论

(1)北祁连中段的毛藏寺花岗闪长岩具有多阶段侵位特征,至少分为2个阶段,早期侵位时代为(456±3) Ma,晚期侵位时代为431~421 Ma,笔者利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,获得毛藏寺花岗闪长岩早期侵位年龄。

(2)毛藏寺早期花岗闪长岩为高钾钙碱性准铝质花岗岩,成因为I型花岗岩,形成于同碰撞期,可能与北祁连造山带同碰撞期加厚地壳物质部分熔融有关。

(3)毛藏寺花岗闪长岩侵位时代为晚奥陶世早期(456±3) Ma,即发生在“古浪运动”早期,为晚奥陶世中祁连地块与北祁连岛弧杂岩带发生碰撞作用的产物。

致谢:本文在编写过程中受到甘肃省地矿局副局长叶得金的悉心指导,在此表示衷心的感谢。

参考文献(References):

陈隽璐,徐学义,曾佐勋,等. 中祁连东段什川杂岩基的岩石化学特征及年代学研究[J]. 岩石学报,2008,24(4): 841-854.

CHEN Junlu, XU Xueyi, ZENG Zuoxun, et al. Geochemical characters and LA-ICPMS zircon U-Pb dating constraints on the petrogenesis and tectonic setting of the Shichuan intrusion, east segment of the Central Qilian, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(4): 841-854.

甘肃省地质矿产局. 甘肃省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1989.

Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. Regional Geology of Gansu Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.

黄增保,李葆华,金霞,等. 北祁连山中段北大坂岩体成因及构造环境讨论[J]. 矿物岩石,2010,30(4): 62-68.

HUANG Zengbao, LI Baohua, JIN Xia, et al. Petrogenesis of Beidaban granite pluton in North Qilian Mountain and its setting[J]. Journal Mineral Petrology, 2010, 30(4): 62-68.

黄增保. 北祁连中段碱性杂岩成因与稀土成矿作用[D]. 武汉:中国地质大学(武汉)2016,1-180.

HUANG Zengbao. Petrogenesis of alkalic complex and asso-

ciated Rare Earth Mineralization in the middle sector of North Qilian, NW China[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2016, 1-180.

林宜慧,张李飞. 北祁连山清水沟蓝片岩带中含硬柱石蓝片岩和榴辉岩的岩石学,⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学及其意义[J]. 地质学报,2012,86(9):1503-1524.

LIN Yihui, ZHANG Lifei. Petrology and ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology of the Lawsonite-Bearing Blueschist and Eclogite from the Qingshuigou Blueschist Belt in North Qilian Mountains in the NW China and their tectonic implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(9): 1503-1524.

毛景文,张招崇,杨建民. 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, 157-239.

MAO Jingwen, ZHANG Zhaochong, YANG Jianmin. Mineralogical series of Cu, Fe, Au, W deposits and prospecting evaluation in the west sector of the Northern Qilian Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003. 157-239.

秦海鹏,吴才来,王次松,等. 祁连山东部高Sr/Y型花岗岩 LA-ICPMS 锆石定年及其地球化学特征[J]. 岩石学报,2014,30(12): 3759-3771.

QIN Haipeng, WU Cailai, WANG Cisong, et al. LA-ICPMS zircon and geochemical characteristics of high Sr/Y-type granite from Xigela, eastern Qilian area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(12): 3759-3771.

宋述光. 北祁连山古大洋俯冲带高压变质岩研究评述[J]. 地质通报,2009,28(12): 1769-1778.

SONG Shuguang. High-pressure metamorphic rocks in the North Qilian oceanic subduction zone, China: A review [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(12): 1769-1778.

宋泰忠,刘建栋,李杰,等. 北祁连柏木峡地区辉长岩、玄武岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 西北地质,2016,49(4):32-43.

SONG Taizhong, LIU Jiandong, LI Jie, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Gabbro and Basalt in the Baimuxia area of North Ailian and Its Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2016,49(4):32-43.

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(03): 425-432.

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

熊子良,张宏飞,张杰. 北祁连东段冷龙岭地区毛藏寺岩体

- 和黄羊河岩体的岩石成因及其构造意义[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 214-255.
- XIONG Ziliang, ZHANG Hongfei, ZHANG Jie. Petrogenesis and tectonic implications of the Maozangsi and Huangyanghe granitic intrusions in Lenglongling area, the eastern part of North Qilian Mountains, NW China [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 214-227.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 北祁连山早古生代洋脊—洋岛和弧后盆地火山作用[J]. 地质学报, 1998, 72(4): 301-312.
- XIA Linqi, XIA Zunchun, XU Xueyi, et al. Early Palaeozoic mid-ocean ridge-ocean island and back-arc basin volcanism in the North Qilian Mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 1998, 72(4): 301-312.
- 雍拥, 肖文交, 袁超, 等. 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[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 855-866.
- YONG Yong, XIAO Wenjiao, YUAN Chao, et al. Geochronology and geochemistry of Paleozoic granitic Plutons from the eastern Central Qilian and their tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(4): 855-866.
- 王晓伟, 杨春霞, 王玉玺, 等. 北祁连扎柯山寒武纪高镁安山岩地球化学及构造动力学特征[J]. 西北地质, 2018, 51(1): 34-44.
- WANG Xiaowei, YANG Chunxia, WANG Yuxi, et al. Geochemistry of Cambrian high-Mg Andesites in North Qilian and Its Geodynamic implication[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(1): 34-44.
- BLACK, LP., KAMO, SL., WILLIAMS, CM., et al. The application of SHRIMP to phanerozoic geochronology: a critical appraisal of four zircon standards[J]. Chemical Geology, 2003, 200, 171-188.
- BOYNTON WV, BOWDEN P. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[M]. Hendrson P (ed). Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, 1984, 63-114.
- CHAPPELL BW., WHITE AJR. I and S type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth Sciences, 1992, 83: 1-26.
- CHEN YX, XIA XH, SONG SG. Petrogenesis of Aoyougou high-silica adakite in the North Qilian orogen, NW China: Evidence for decompression melting of oceanic slab[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57.
- DEFANT MJ, DRUMMOND MS. derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere[J]. Nature, 1990, 347: 62-665.
- HOSKIN PWO and BLACK LP. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18(4): 423-439.
- LIU YJ, NEUBAUER F, GENSER J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of blueschist facies Delitic schists from Qingshuigou in the Northern Qilian Mountains, western China[J]. Island Arc. 2006, 15(1): 187-198.
- LUDWIG KR. ISOPLLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. California[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publishing, 2003, 4: 1-71.
- MANIAR PD, PICCOLI PM. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101: 635-643.
- SUN SS, MCDONOUGH WF. Chemical and isotope systematic of oceanic basalts: Implication for the mantle composition and processes [A]. In: Saunder AD and Norry MJ(eds). Magmatism in the Ocean Basins[C]. Geological Society of London Special Publication, 1989, 42(1): 313-345.
- SONG SG, NIU YL, SU L, et al. Tectonics of the North Qilian Orogen, NW China[J]. Gondwana Research, 2013, 23: 1378-1401.
- TARNEY J, JONES CE. Trace element geochemistry of orogenic igneous rocks and crustal growth[J]. Journal of the Geological Society. 1994, 51(5): 855-868.
- TSENGCY, YANG HJ, YANG HY, et al. Continuity of the North Qilian and North Qinling orogenic belts, Central Orogenic System of China: Evidence from newly discovered Paleozoic adakitic rock[J]. Gondwana Research, 2009, 16: 285-293.
- WILLIAMS, I. S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[A]. In: McKibben, M. A., Shanks, W. C. III., Ridley, W. I. (Eds.), Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes [C]. Reviews on Economic Geology 1998, 7, 1-3.
- YANG H, ZHANG HF, LUO BJ, et al. Early Paleozoic intrusive rocks from the eastern Qilian orogen, NE Tibetan Plateau: Petrogenesis and tectonic significance[J]. Lithos, 2015, 224-225: 13-31.
- YU SY, ZHANG JX, QIN HP, et al. Petrogenesis of the early Paleozoic low-Mg and high-Mg adakitic rocks in the North Qilian orogenic belt, NW China: Implications for transition from crustal thickening to extension thinning[J]. Journal Asian Earth Sciences, 2015, 107: 122-139.