

# 南祁连北缘东段早志留世刚察大寺花岗岩的成因 ——锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和岩石地球化学制约

师江朋<sup>1)</sup>, 霍腾飞<sup>1)</sup>, 来 强<sup>2)</sup>, 彭祥华<sup>2)</sup>, 杜孙岩<sup>2)</sup>, 杨德彬<sup>1)\*</sup>

1)吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061; 2)中国煤炭地质总局特种技术勘探中心, 北京 100073

**摘要:** 南祁连北缘东段刚察大寺花岗岩的形成时代和成因一直存在争议。本文对其进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和岩石地球化学研究, 进而约束其岩石成因和形成的构造背景。结果表明, 刚察大寺花岗岩主要由花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩组成; 花岗闪长岩中锆石自形程度较好, 阴极发光图像显示振荡生长环带, 具有较高的 Th/U 比值(0.27~0.91), 表明其为岩浆成因; 最小一组岩浆锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为( $435\pm4$ ) Ma, 即岩体形成于早志留世; 花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩具有类似的地球化学属性, 主量元素具有高硅、富碱、富铝和贫镁的特征, 其  $\text{SiO}_2=65.52\% \sim 74.23\%$ 、 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})=6.95\% \sim 8.24\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3=12.33\% \sim 15.26\%$ 、 $\text{MgO}=0.31\% \sim 1.32\%$ , A/CNK 介于 0.85~1.05 之间, 为准铝质-弱过铝质的亚碱性系列岩石; 整体富集轻稀土元素和大离子亲石元素(Rb、Ba、K)、亏损重稀土元素和高场强元素(Nb、Ta), 具有 Eu 的负异常( $\delta\text{Eu}=0.51 \sim 0.80$ )和 Sr、P、Ti 的明显亏损。南祁连北缘东段刚察大寺花岗岩为 I 型花岗岩, 起源于高温低压条件下中、上地壳物质的部分熔融, 结合区域构造演化暗示, 刚察大寺早志留世花岗岩形成于活动大陆边缘的构造背景。

**关键词:** 早志留世; 花岗岩; 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; 刚察大寺; 南祁连

中图分类号: P597.1; P588.121 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2015.06.10

## Petrogenesis of Early Silurian Gangchadasi Granites in the Eastern Segment of the Northern South Qilian Block: Constraints from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry

SHI Jiang-peng<sup>1)</sup>, HUO Teng-fei<sup>1)</sup>, LAI Qiang<sup>2)</sup>, PENG Xiang-hua<sup>2)</sup>, DU Sun-yan<sup>2)</sup>, YANG De-bin<sup>1)\*</sup>

1) College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin 130061;

2) Special Technical Exploration Center of China Coal Geological Bureau, Beijing 100073

**Abstract:** The formation age and petrogenesis of the Gangchadasi granites in the eastern segment of the northern South Qilian block remain controversial. New LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and whole-rock geochemical analysis were conducted in this study to constrain the petrogenetic and tectonic processes during the formation of the granites. The Gangchadasi granites are mainly composed of granodiorite and biotite-monzo-granite. Zircons from the granodiorite show euhedral shape, oscillatory CL zoning and high Th/U ratios (0.27 ~ 0.91), indicative of a magmatic origin. The weighted mean of the youngest group of concordant  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages yielded an emplacement age of ( $435\pm4$ ) Ma. The granodiorite and biotite-monzo-granite share similar geochemical characteristics, such as high content of  $\text{SiO}_2$  ( $65.52\% \sim 74.23\%$ ), total alkali ( $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=6.95\% \sim 8.24\%$ ), and aluminum ( $\text{Al}_2\text{O}_3=12.33\% \sim 15.26\%$ ), and low amounts of magnesium ( $\text{MgO}=0.31\% \sim 1.32\%$ ). Their A/CNK

本文由中国地质调查局地调工作项目(编号: 1212011221145)、教育部新世纪优秀人才支持计划(编号: NCET-12-0237)和国家自然科学基金(编号: 41472052)联合资助。

收稿日期: 2015-04-21; 改回日期: 2015-07-09。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 师江朋, 男, 1990 年生。硕士研究生。主要从事火成岩石学研究。

\*通讯作者: 杨德彬, 男, 1979 年生。博士, 副教授。主要从事岩石学研究。通讯地址: 130061, 长春市建设街 2199 号。

E-mail: yangdb@jlu.edu.cn。

ratios range from 0.85 to 1.05, indicating a transitional composition between metaluminous and peraluminous. The granites are enriched in large ion lithophile elements (e.g., Rb, Ba, and K) and light rare earth elements and depleted in high field strength elements (e.g., Nb and Ta) and heavy rare earth elements, and exhibit prominent negative Eu anomaly ( $\delta\text{Eu}=0.51 \sim 0.80$ ) and depletion of Sr, P, and Ti. It is held that the Gangchadasi granites are I-type granites derived from partial melting of a middle-upper continental crust under the condition of high temperatures and low pressures. In combination with regional tectonic evolution, the authors suggest that the Gangchadasi granites probably formed in an active continental margin during Early Silurian.

**Key words:** Early Silurian; granite; zircon U-Pb dating; geochemistry; Gangchadasi; South Qilian block

祁连—昆仑造山带具有极为复杂的大地构造演化历史，成为近年来研究的热点地区之一(图 1a) (王荃和刘雪亚, 1976; 雍拥等, 2008a; Song et al., 2009, 2013)。南祁连与北祁连、中祁连有着共同的前寒武纪结晶基底(李文渊, 2004)，其构造演化普遍被认为是在北祁连和中祁连发生大陆裂解后，裂陷逐渐向南迁移，进而引起南祁连与中祁连的分离，进一步发育成洋盆，而后在加里东末期又与中祁连发生俯冲-碰撞完成剪刀式拼合，总体具有西段晚于东段的特征(王荃和刘雪亚, 1976; 刘志武等, 2006)。但是，作为祁连造山带的重要组成部分，中祁连与南祁连俯冲-碰撞的时限和机制目前仍存在争议，从而限制了对祁连造山带构造演化的制约。近年来，虽然对柴北缘和北祁连中段的花岗岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究，表明它们形成于 444 ~ 477 Ma 之间，具有岛弧和活动陆缘的构造属性(吴才来等, 2006, 2008, 2010)，但是，对南祁连岩浆活动的研究相对较弱，年代学数据比较分散。刚察大寺花岗岩是南祁连地区出露的典型岩体，前人基于岩体与围岩的接触关系推断其形成于晚志留世(青海省地质矿产局, 1991)，最近对刚察大寺东部岩体的年代学研究发现其具有晚奥陶世(458 Ma; Xie et al., 2014)和晚二叠世、中三叠世(255 Ma, 236 Ma; 谢其锋等, 2014)的年龄，因此，该花岗岩的时代和岩石成因仍需进一步的研究。基于此，本文选择出露于刚察大寺西部的花岗岩(本文称为刚察大寺花岗岩)，进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和岩石地球化学分析，探讨了花岗岩的时代归属、成因类型和形成的构造环境，为进一步制约南祁连的构造演化提供了依据。

祁连山系位于青藏高原的北部，是阿拉善地块与柴达木地块之间的复合造山带。阿拉善地块是华北克拉通的一部分，主要由早前寒武纪基底和早古生代沉积盖层组成，柴达木地块则主要由中生代沉积岩组成，而西部的敦煌地块发育太古代的古老结晶基底(Song et al., 2009, 2013)。作为祁连山系的重要组成部分——南祁连地块位于中祁连早古生代造山带以南，以北宗务隆断裂为界，西接阿尔金断裂，



图 1 南祁连地块刚察大寺花岗岩的大地构造(a) 和地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic location (a) and geological map (b) of the Gangchadasi granites in the South Qilian block

中经刚察、青海湖和拉鸡山，东至甘肃天水一带，南由柴达木北缘断裂围限，其与中、北祁连地块具有相似的构造演化历史。南祁连地块出露的最老地层为前寒武系，其次为奥陶系的火山岩和火山碎屑岩，同时还存在志留系、石炭系和中生代地层(刘志武等, 2006)。本文研究区位于南祁连地块与中祁连地块相结合的部位，区内构造活动强烈，岩浆作用较为发育，形成了加里东期和晚华力西—印支期西北—南东向展布的岩浆岩带。岩浆活动以发育大量的花岗岩和少量的中-基性岩为主要特征(青海省地质矿产局, 1991)。刚察大寺岩体位于南祁连北缘东段，大地构造位置属于南祁连地块，总体呈北西—南东向展布。岩体北临疏勒南山—拉鸡山断裂，该断裂为早古生代缝合带主断裂，呈北西—南东向展布，东西两端延入甘肃。该岩体南侧侵入元古代变质岩基底和志留系，岩体内部可见围岩的捕虏体，北侧是二叠纪一套浅海相碎屑沉积地层，与岩体呈断层接触。岩体主要由黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩组成，少量为英云闪长岩，本文采集的花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩样品位于青海省刚察县刚察大寺西南约 6 km 处(图 1b)。

花岗闪长岩，新鲜面灰白色，中细粒半自形粒状结构，块状构造(图 2a)。主要由斜长石(~ 50%)、条纹长石(~ 10%)、石英(~ 20%)、黑云母(~ 10%)和

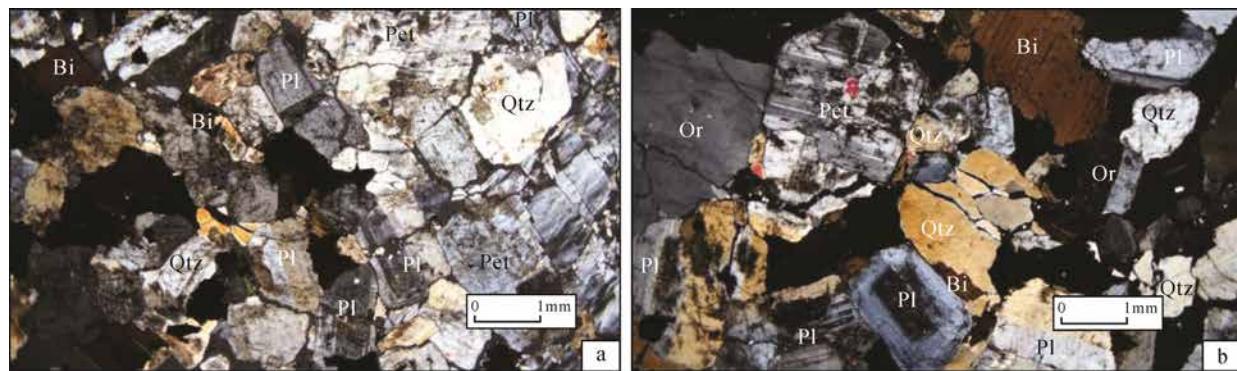


图 2 刚察大寺花岗岩的矿物组成和花岗结构

Fig. 2 Mineral assemblages and granitic texture for the Gangchadasi granites

a-花岗闪长岩; b-黑云母二长花岗岩; Bi-黑云母; Qtz-石英; Pl-斜长石; Pet-条纹长石; Or-正长石  
a-granodiorite; b-biotite monzonite; Bi-biotite; Qtz-quartz; Pl-plagioclase; Pet-perthite; Or-orthoclase

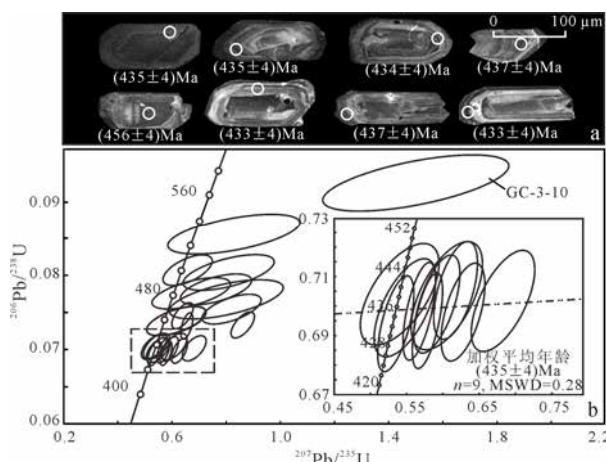


图 3 刚察大寺花岗闪长岩的锆石 CL 图像(a)和 U-Pb 年龄谐和图(b)

Fig. 3 Representative zircon CL images (a) and U-Pb concordia diagrams (b) for the Gangchadasi granodiorite

普通角闪石(~10%)组成。斜长石呈半自形板状，粒度为 0.7~2.4 mm；条纹长石粒度变化于 1.8~4 mm 之间，局部发生高岭土化；石英它形粒状，发育波形消光，粒度多为 1~4 mm；黑云母粒度为 1~2 mm；普通角闪石呈黄绿色多色性，粒度为 1.4~4 mm。副矿物为磷灰石、锆石、榍石。黑云母二长花岗岩，岩石呈浅粉色，中细粒半自形粒状结构、块状构造(图 2b)。主要由正长石(~20%)、条纹长石(~10%)、斜长石(~40%)、石英(~25%)和黑云母(~5%)组成。副矿物为锆石、磷灰石和榍石。

## 1 分析方法

野外采集新鲜无蚀变的花岗岩样品 5 kg。将样品粉碎至 200 目，用电磁分离和重液分选方法挑选出锆石，将晶形较好的锆石颗粒粘在双面胶上，套上样品靶环后灌注环氧树脂，烘干后抛光露出锆石表面。对锆石进行反射光、透射光和阴极发光(CL)图像采集。在此基础上进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb

定年。U-Pb 同位素分析在天津地质矿产研究所完成。采样方式为单点剥蚀，数据采集选用跳峰方式，国际标准锆石 91500 作为外标，标准玻璃 NIST610 作为内标校正锆石的微量元素，分析结果采用 Glitter 4.0 处理和计算。全岩主量元素和微量元素分析在国土资源部保定矿产资源监督检测中心(河北省地矿中心实验室)完成。主量元素采用玻璃熔片 X-射线荧光光谱法(XRF)分析，样品含量由标准物质双变量拟合的工作曲线确定，校正程序为 Traill-Lachance 程序，分析精度小于 5%。微量元素采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法，用 HNO<sub>3</sub> 和 HF 酸溶样后制备测试溶液，并使用 USGS 标准 W-2 和 G-2 及国内标准 GSR-1、GSR-2 和 GSR-3 来校正所测样品的元素含量，分析精度优于 10%，详细的实验流程见文献 Hu 等(2012)。

## 2 分析结果

### 2.1 锆石 U-Pb 年代学

刚察大寺花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果见表 1。花岗闪长岩中锆石的 CL 图像显示，锆石呈半自形-自形晶，长柱状，长宽比介于 1:2~1:4 之间，内部结构清晰，部分锆石发育核-边结构，它们均具有典型的振荡环带特征，暗示其为岩浆成因(图 3a)，这也得到相对高的 Th/U 比值(0.27 ~ 0.91) 的支持。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中(图 3b)，所有的测试数据大体可以分成两组，一组为岩浆锆石边部测试的数据(图 3a)，年龄集中在谐和线的下部，多数位于谐和线上，少量沿水平方向偏离谐和线，主要是由于对锆石的 <sup>207</sup>Pb 测不准造成的，但是它们的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄比较均一，其 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄介于 433~439 Ma 之间，加权平均年龄为(435±4) Ma(n=9, MSWD=0.3)，代表了岩体的形成时代；另一组为锆石核部测试的数据(图 3a)，年龄相

表 1 刚察大寺花岗闪长岩的锆石 U-Pb 定年数据  
Table 1 Zircon U-Pb data for the Gangchadasi granodiorite

样号	Th	U	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
GC-3	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$													
-1	28	76	0.37	0.0807	0.0008	0.6574	0.0372	0.0591	0.0033	0.0271	0.0011	500	5	513	29
-2	37	76	0.49	0.0739	0.0008	0.6159	0.0449	0.0605	0.0043	0.0269	0.0010	459	5	487	36
-3	21	45	0.47	0.0768	0.0011	0.8008	0.0860	0.0756	0.0078	0.0340	0.0015	477	7	597	64
-4	24	47	0.51	0.0775	0.0009	0.6708	0.0591	0.0627	0.0055	0.0304	0.0010	481	5	521	46
-6	9	25	0.37	0.0856	0.0011	0.8284	0.0996	0.0702	0.0088	0.0384	0.0019	530	7	613	74
-7	16	44	0.35	0.0804	0.0010	0.8090	0.0688	0.0730	0.0062	0.0334	0.0016	498	6	602	51
-8	19	51	0.38	0.0781	0.0009	0.7635	0.0533	0.0709	0.0050	0.0300	0.0013	485	5	576	40
-10	5	17	0.30	0.0926	0.0015	1.5031	0.1387	0.1177	0.0114	0.0745	0.0034	571	9	932	86
-11	16	60	0.27	0.0754	0.0008	0.8199	0.0447	0.0789	0.0042	0.0494	0.0016	469	5	608	33
-12	530	585	0.91	0.0695	0.0007	0.5784	0.0087	0.0604	0.0008	0.0189	0.0004	433	4	463	7
-13	172	498	0.35	0.0698	0.0007	0.5678	0.0091	0.0590	0.0009	0.0201	0.0004	435	4	457	7
-14	252	757	0.33	0.0732	0.0007	0.6554	0.0096	0.0649	0.0009	0.0221	0.0005	456	4	512	7
-15	192	411	0.47	0.0702	0.0007	0.6829	0.0179	0.0706	0.0018	0.0220	0.0006	437	4	528	14
-17	193	271	0.71	0.0699	0.0007	0.5476	0.0173	0.0568	0.0017	0.0162	0.0005	436	4	443	14
-18	161	325	0.50	0.0694	0.0007	0.5353	0.0102	0.0559	0.0010	0.0162	0.0004	433	4	435	8
-19	147	352	0.42	0.0698	0.0007	0.6276	0.0123	0.0652	0.0011	0.0175	0.0005	435	4	495	10
-20	168	197	0.85	0.0745	0.0007	0.6391	0.0161	0.0622	0.0015	0.0181	0.0004	463	5	502	13
-21	112	305	0.37	0.0733	0.0007	0.8601	0.0175	0.0851	0.0016	0.0289	0.0007	456	4	630	13
-22	134	301	0.45	0.0701	0.0007	0.5924	0.0127	0.0613	0.0012	0.0191	0.0005	437	4	472	10
-23	131	263	0.50	0.0704	0.0007	0.6056	0.0203	0.0624	0.0021	0.0179	0.0006	438	5	481	16
-24	182	503	0.36	0.0704	0.0007	0.5410	0.0219	0.0557	0.0024	0.0175	0.0006	439	4	439	18

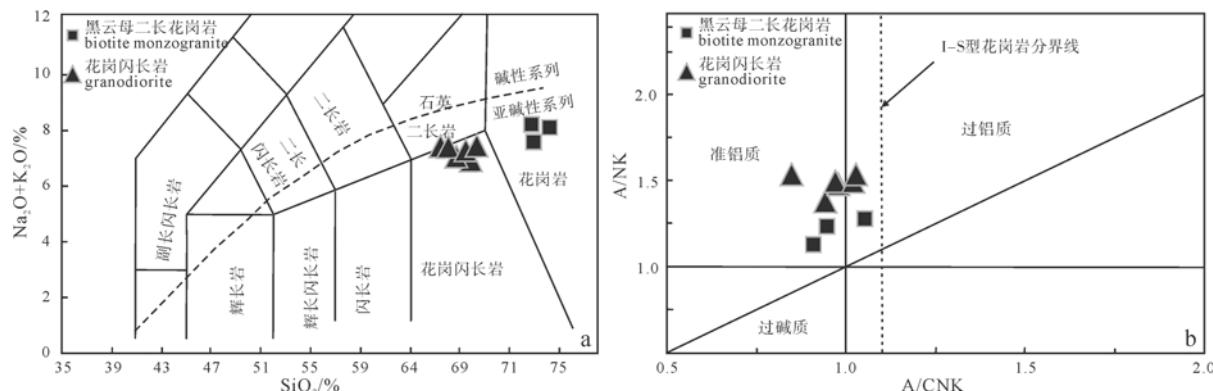


图 4 刚察大寺花岗岩 TAS(a)和铝饱和指数图解(b)

Fig. 4 Diagrams of TAS (a) and aluminum saturation indices (b) for the Gangchadasi granites

对偏高和分散，其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄介于 456~530 Ma 之间，代表了该地区早期的岩浆事件(刘志武等, 2006; Xie et al., 2014)。而偏离谐和线较远的点(GC-3-10 点)，误差较大可能存在 Pb 的丢失，没有地质意义。

## 2.2 主量元素

刚察大寺花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩的主量元素和微量元素分析结果列于表 2。花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩整体具有类似的地球化学属性，主量元素具有高硅、富碱、富铝和贫铁、镁的特征，其中，花岗闪长岩的  $\text{SiO}_2=65.52\% \sim 68.36\%$ 、 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})=6.95\% \sim 7.54\%$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.93 \sim 1.09$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3=13.92\% \sim 15.26\%$ 、 $\text{CaO}=2.57\% \sim 4.28\%$ 、 $\text{TiO}_2=0.58\% \sim 0.72\%$ 、 $\text{MgO}=0.31\% \sim 1.32\%$ 、

$\text{FeO}^T=4.20\% \sim 4.97\%$ 、 $\text{A/CNK}$  介于 0.85~1.03 之间；黑云母二长花岗岩的  $\text{SiO}_2=72.79\% \sim 74.23\%$ 、 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})=7.69\% \sim 8.64\%$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.24 \sim 1.99$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3=12.33\% \sim 13.60\%$ 、 $\text{CaO}=1.34\% \sim 1.37\%$ 、 $\text{TiO}_2=0.22\% \sim 0.40\%$ 、 $\text{MgO}=0.31\% \sim 0.57\%$ 、 $\text{FeO}^T=1.68\% \sim 2.75\%$ 、 $\text{A/CNK}$  介于 0.91~1.05 之间。在 TAS 图解上(图 4a)，花岗闪长岩投影在花岗闪长岩及其与石英二长岩相交的区域，黑云母二长花岗岩则投影在花岗岩区域，它们均属于亚碱性系列岩石。在铝饱和指数图解上(图 4b)，花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩样品均落在准铝质-弱过铝质区域。

## 2.3 微量元素

刚察大寺花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩具有类似的稀土元素和微量元素组成(表 2)。从球粒陨

表 2 刚察大寺花岗岩的主要元素(%)和微量元素( $10^{-6}$ )组成  
Table 2 Major (%) and trace element ( $10^{-6}$ ) compositions of the Gangchadasi granites

样号	GC-1	GC-2	GC-3	GC-4	GC-5	GC-6	GC-7	GC-8	GC-9	上地壳	中地壳	下地壳*
	花岗闪长岩						黑云母二长花岗岩					
SiO <sub>2</sub>	67.37	67.88	66.71	65.86	68.36	65.52	74.23	72.89	72.79	66.6	63.5	53.4
TiO <sub>2</sub>	0.58	0.66	0.71	0.72	0.64	0.70	0.25	0.40	0.22	0.64	0.69	0.82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.91	14.53	14.83	15.26	13.92	15.24	12.33	12.77	13.60	15.4	15.0	16.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.05	0.82	1.16	1.50	0.81	1.25	0.60	0.68	0.48	-	-	-
FeO	3.59	3.59	3.76	3.62	3.47	3.35	1.58	2.14	1.25	-	-	-
FeO <sup>T</sup>	4.53	4.33	4.80	4.97	4.20	4.33	2.12	2.75	1.68	5.04	6.02	8.57
MnO	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.02	0.03	0.01	0.1	0.1	0.1
MgO	0.66	1.20	0.31	1.21	1.05	1.32	0.31	0.48	0.57	2.48	3.59	7.24
CaO	2.57	2.57	4.28	3.02	2.57	2.87	1.53	1.77	1.34	3.59	5.25	9.59
Na <sub>2</sub> O	3.62	3.40	3.58	3.61	3.60	3.86	3.4	3.43	2.76	3.27	3.39	2.65
K <sub>2</sub> O	3.69	3.55	3.50	3.92	3.84	3.68	4.75	4.26	5.48	2.8	2.3	0.61
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.18	0.19	0.20	0.18	0.20	0.07	0.10	0.03	0.15	0.15	0.10
Los	1.57	0.66	0.98	0.82	1.12	1.39	0.46	0.55	0.80	-	-	-
Total	101.42	99.82	100.81	100.51	100.58	100.75	99.88	99.89	99.80	-	-	-
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.02	1.04	0.98	1.09	1.07	0.95	1.40	1.24	1.99	0.86	0.68	0.23
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	7.31	6.95	7.08	7.53	7.44	7.54	8.15	7.69	8.24	6.07	5.69	3.26
A/CNK	1.02	1.03	0.85	0.97	0.94	0.98	0.91	0.95	1.05	1.59	1.37	1.32
V	34.5	38.4	54.3	50.6	49.0	55.3	10.6	9.82	13.5	97	107	196
Cr	13.5	15.6	23.3	16.3	15.8	19.4	9.73	9.06	6.83	92	76	215
Co	5.42	6.74	9.06	8.34	8.83	8.37	2.50	2.25	3.61	17.3	22	38
Ni	4.99	5.02	7.34	5.73	5.43	6.16	2.53	2.64	4.49	47	33.5	88
Rb	121	164	121	125	126	116	159	148	120	82	65	11
Sr	210	175	237	242	237	269	88.7	108	206	320	282	348
Y	47.1	35.5	56.4	51.0	52.7	56.0	15.9	26.5	24.9	21	20	16
Zr	318	277	398	330	292	304	130	118	170	193	149	68
Nb	25.1	26.8	32.7	29.2	28.8	28.7	18.5	14.4	13.9	12	10	5
Ba	1174	725	948	1015	928	909	433	406	838	628	532	259
Hf	6.24	7.00	8.57	7.34	7.26	8.29	7.54	7.62	11.5	5.3	4.4	1.9
Ta	0.98	1.56	1.14	1.07	1.01	0.93	0.48	0.72	0.36	0.9	0.6	0.6
Th	20.5	14.8	23.9	19.9	16.7	18.6	17.6	10.7	20.8	10.5	6.5	1.2
U	2.23	2.73	2.35	1.85	2.09	1.80	1.65	1.38	2.18	2.7	1.3	0.2
La	89.9	73.2	93.0	81.0	76.2	78.9	36.8	29.0	32.7	31	24	8
Ce	169	136	178	157	149	149	71.3	54.6	65.1	63	53	20
Pr	19.8	16.0	20.8	17.9	17.7	17.5	8.60	6.77	7.89	7.1	5.8	2.4
Nd	68.8	56.7	75.5	65.2	63.9	63.3	30.1	24.6	29.8	27	25	11
Sm	10.9	9.06	12.8	11.6	11.0	11.6	5.5	4.92	5.78	4.7	4.6	2.8
Eu	2.04	1.50	2.09	2.04	2.04	1.98	0.96	1.00	1.48	1	1.4	1.1
Gd	9.40	7.58	11.8	10.5	10.8	10.9	4.61	4.96	5.34	4	4	3.1
Tb	1.42	1.16	1.85	1.69	1.75	1.79	0.64	0.82	0.80	0.7	0.7	0.48
Dy	7.94	6.60	10.7	9.59	10.2	10.7	3.43	4.94	4.39	3.9	3.8	3.1
Ho	1.55	1.27	2.04	1.88	1.99	2.06	0.59	0.97	0.90	0.83	0.82	0.68
Er	4.40	3.45	5.56	5.09	5.17	5.44	1.47	2.54	2.39	2.3	2.3	1.9
Tm	0.56	0.47	0.71	0.63	0.70	0.71	0.20	0.32	0.35	0.3	0.32	0.24
Yb	3.71	2.74	4.38	4.02	4.19	4.38	1.17	1.87	2.26	2	2.2	1.5
Lu	0.59	0.40	0.68	0.62	0.64	0.68	0.20	0.29	0.39	0.31	0.4	0.25
$\Sigma$ REE	390	316	420	369	356	359	166	138	160	148	128	56
(La/Yb) <sub>N</sub>	17.4	19.2	15.2	14.5	13.1	12.9	22.6	11.1	10.4	11.08	7.8	3.81
$\delta$ Eu	0.60	0.54	0.51	0.55	0.56	0.53	0.57	0.61	0.80	0.72	0.96	1.14
Nb/U	11.3	9.82	13.9	15.8	13.8	9.82	11.2	10.4	6.38	4.44	7.69	25
Rb/Sr	0.58	0.93	0.51	0.51	0.53	0.43	1.79	1.37	0.58	0.26	0.23	0.03

注: 上、中、下地壳数据引自 Rudnick and Gao, 2003。

石标准化配分型式图中可以看出, 刚察大寺花岗岩的稀土元素配分型式呈右倾型(图 5a), 轻重稀土元素分馏明显, (La/Yb)<sub>N</sub>介于 10.4 ~ 22.6 之间, 平均为 15.14, 轻稀土元素(LREEs)相对富集, 重稀土元素(HREEs)相对亏损, 具有明显的 Eu 负异常( $\delta$ Eu=0.51

~0.80)。其中花岗闪长岩的稀土元素总量较黑云母二长花岗岩相对偏高, 整体与上地壳物质的稀土元素配分型式相似(Rudnick and Gao, 2003)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中富集大离子亲石元素(LILEs) (Rb、Ba、K)、亏损高场强元素(HFSEs)

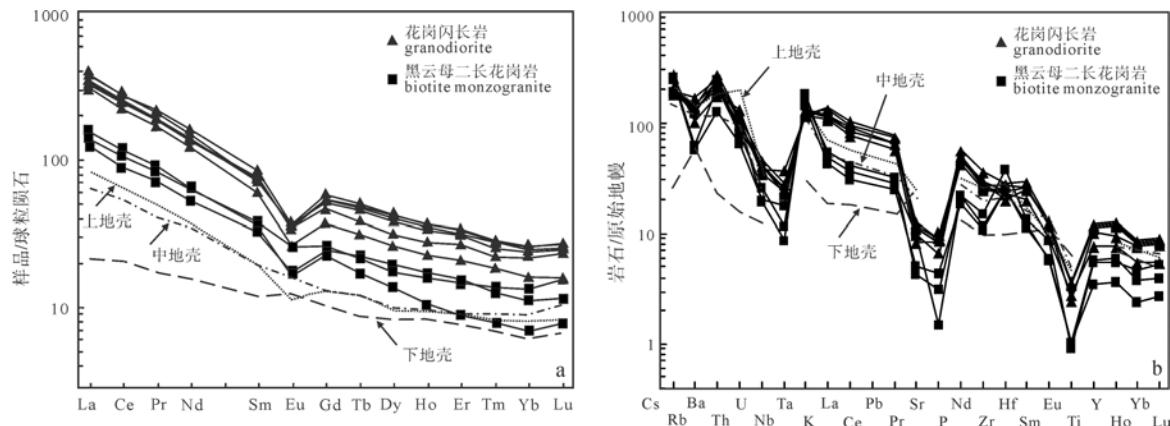


图 5 刚察大寺花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分型(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagram of trace elements (b) for the Gangchadasi granites

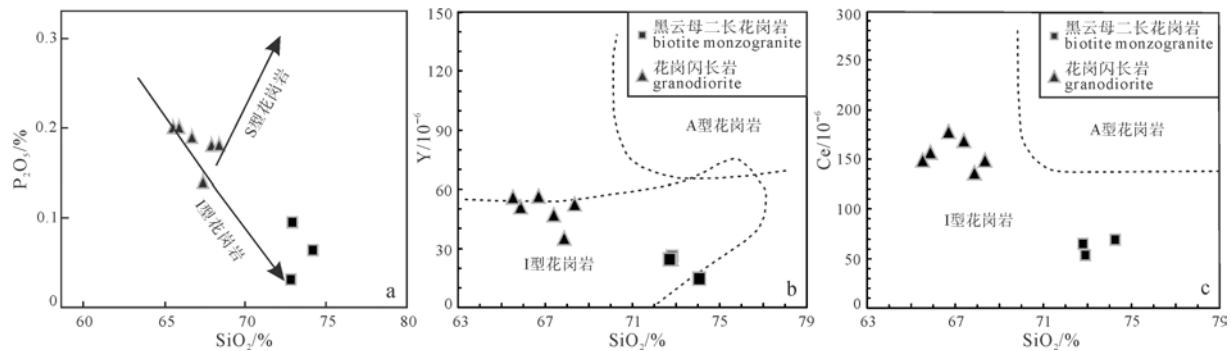


图 6 刚察大寺花岗岩成因类型判别图解(据 Chappell and White, 1992)

Fig. 6 Genetic type discrimination diagrams for the Gangchadasi granites (after Chappell and White, 1992)

(Nb、Ta), 具有明显的 Sr、P、Ti 负异常(图 5b), 这与中、上地壳物质的微量元素蛛网图模式相似, 而不同于下地壳物质的组成(Rudnick and Gao, 2003)。

### 3 讨论

#### 3.1 岩体的形成时代

刚察大寺花岗岩的形成时代一直存在争议。最近, 对刚察大寺东部岩体的锆石 U-Pb 年代学研究发现其具有晚奥陶世(458 Ma; Xie et al., 2014)和晚二叠世、中三叠世(255 Ma、236 Ma; 谢其峰等, 2014)的年龄, 由此可见, 刚察大寺地区的花岗岩可能不是一个单一的岩体, 而存在多期岩浆活动。鉴于此, 本文对刚察大寺西部的花岗闪长岩进行了锆石 U-Pb 年代学分析, 结果表明, 花岗闪长岩中锆石均为岩浆成因, 其边部的年龄代表了岩体的结晶时代, 最小一组锆石的  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄介于 433~439 Ma 之间, 加权平均年龄为(435±4) Ma, 即刚察大寺花岗岩形成于早志留世, 而非前人基于野外关系推测的晚志留世, 同时与东部岩体的测年结果(Xie et al., 2014; 谢其峰等, 2014)明显不同。刚察大寺早志留世花岗岩的形成时代与中祁连肃北、石包城花岗岩的年龄((435±4) Ma; 李建锋等, 2010)相一致, 同时

与中祁连湟源新店黑云母二长花岗岩((446±1) Ma; 雍拥等, 2008b)、南祁连裕龙沟黑云母角闪辉石岩 ID-TIMS 锆石 U-Pb 年龄((442±2) Ma; 高永宝等 2012)以及车路沟岩体的锆石 U-Pb 年龄((446±3) Ma; 贾群子等, 2007)相类似, 反映了南祁连地区存在一期 435 Ma 左右的岩浆事件(毛景文, 2003)。结合刚察大寺东部岩体的年代学研究结果暗示, 刚察大寺花岗岩可能是一个不同时代岩浆侵位的复式岩体。刚察大寺地区的早古生代(435~458 Ma; Xie et al., 2014)、晚二叠世(255 Ma)和中三叠世(236 Ma) (谢其峰等, 2014)岩浆事件, 与中祁连和南祁连地区报道的古生代和中生代岩浆活动相一致(毛景文, 2003; 刘志武等, 2006)。

#### 3.2 成因类型和源区性质

花岗岩的成因类型目前比较常用的分类方案为 I、S、A 和 M 型花岗岩, 已被地质学家们广泛应用(吴福元等, 2007)。刚察大寺岩体以花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩为主要岩石类型, 暗色矿物为黑云母和普通角闪石; 主量元素以高硅、富碱为特征, 具有明显的 Eu 负异常; 微量元素富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损重稀土元素和高场强元素, 具有明显的 Eu 和 Ba、Sr、P、Ti 的亏损, 暗示

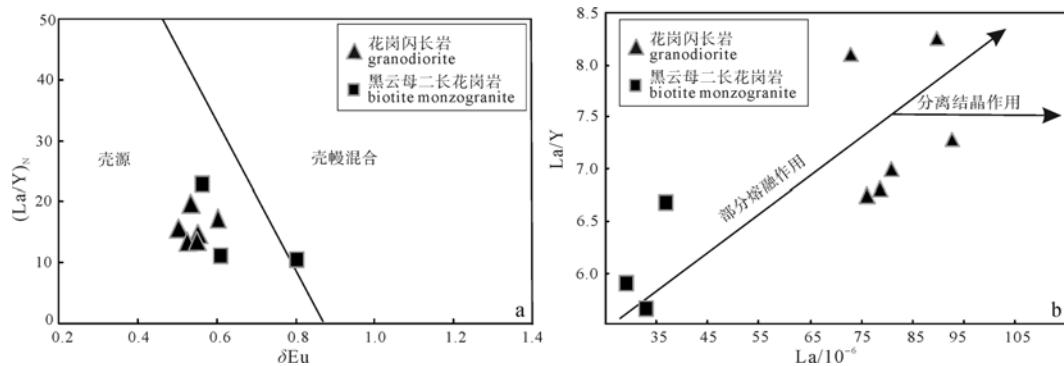


图 7 刚察大寺花岗岩微量元素判别图解(据 Saunders et al., 1988)

Fig. 7 Trace element discrimination diagrams for the Gangchadasi granites (after Saunders et al., 1988)

它们具有高分异 I 型花岗岩或者 A 型花岗岩的部分特征。刚察大寺花岗岩中暗色矿物以黑云母和普通角闪石为主, 属于准铝质-弱过铝质岩石, 显示出 I 型花岗岩的相关特征。此外, Rb/Sr 比值多数小于 0.9, 平均为 0.80, 也表现为 I 型花岗岩的属性(王德滋等, 1993)。在  $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$  图解中(图 6a),  $\text{SiO}_2$  与  $\text{P}_2\text{O}_5$  呈负相关关系, 明显不同于 S 型花岗岩的分布趋势, 而与 I 型花岗岩的趋势一致。在  $\text{SiO}_2\text{-Y}$ (图 6b)和  $\text{SiO}_2\text{-Ce}$ (图 6c)的成因类型判别图解中, 刚察大寺花岗岩主要落入 I 型花岗岩范围内, 与 A 型花岗岩特征明显不同。因此, 综合上述判别标准我们认为刚察大寺花岗岩属于 I 型花岗岩。

刚察大寺花岗岩以高硅、富碱、贫铁和贫镁为特征, 结合 LREE 和 U、Th、Pb 元素的富集以及 HFSE(Nb、Ta)的亏损, 表明它们具有陆壳来源的地球化学属性。刚察大寺花岗岩的 Nb/U 比值介于 6.38 ~ 15.94 之间, 与大陆地壳物质(Nb/U=10 左右)相接近, 也暗示了它们的壳源属性(Hofmann, 1997, 2007)。那么, 刚察大寺花岗岩的岩浆源区为下地壳、中地壳还是上部陆壳物质, 这可以从它们的稀土元素和微量元素组成得到回答。刚察大寺花岗岩富集 LREE、亏损 HREE, 具有明显的 Eu 负异常, 这与中、上地壳物质的稀土元素配分型式相类似, 而不同于下地壳物质(图 5a)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中, 它们富集 LILE(Rb、Ba、K)和 Th、U 元素, 与中、上地壳物质的微量元素特征相似, 而与具有相对低的 Rb、Th 和 U 元素特征的下地壳物质模式不同(图 5b)(Rudnick and Gao, 2003), 上述结果表明, 刚察大寺花岗岩的源区主要为中、上地壳物质的部分熔融。在  $\delta\text{Eu}\text{-}(\text{La}/\text{Yb})_N$  图解中(图 7a), 除 1 个样品落在壳幔混合源与壳源的分界线处外, 其它样品均落入壳源范围内, 表明刚察大寺花岗岩在岩浆源区或者侵位过程中很少受到幔源组分的影响, 这与花岗岩高硅和低铁、镁含量相一致。在  $\text{La-La/Y}$  图解中(图 7b), 样品的 La 与 La/Y 比值呈正相关关

系, 表明岩浆演化过程中以部分熔融作用为主, 而分离结晶作用相对较弱。刚察大寺花岗岩中 Sr、Eu 的明显亏损暗示岩浆源区可能存在斜长石的残留, 而 P、Ti 的强烈亏损则表明岩浆源区可能存在磷灰石和钛铁矿等矿物的残留。

### 3.3 构造背景

刚察大寺早志留世花岗岩的矿物组成和主量元素、微量元素特征已经表明, 其具有 I 型花岗岩的成因特征, 通常形成于洋壳向大陆地壳之下俯冲的活动大陆边缘构造背景或者陆-陆俯冲碰撞之前洋盆闭合的构造环境, 它们的共同特点是在俯冲洋壳之上存在厚度可达 70 km 的大陆地壳, 而与洋-洋汇聚的岛弧环境不同(Pitcher, 1983)。刚察大寺花岗岩在微量元素 Y+Ta-Rb 和 Yb-Ta 构造环境判别图解上, 均投影于火山弧花岗岩区域内, 暗示它们具有活动大陆边缘或者岛弧的构造背景。然而, 刚察大寺 I 型花岗岩具有高硅和相对富铝、富钾的地球化学特征, 岩石中富集石英和碱性长石矿物, 这与岛弧火成岩的特征不同(吴福元等, 2007), 表明它们可能形成于活动大陆边缘的构造背景。结合该地区的构造背景表明(Song et al., 2009, 2013), 南祁连北缘和中祁连南缘在寒武纪晚期至奥陶纪早期处于洋盆扩张期, 而于早奥陶世晚期之后逐渐转化为洋盆消减体制; 北祁连地块则在中-晚奥陶世处于俯冲背景下的汇聚时期(甘肃省地质矿产局, 1989; 杨建国等, 2005; 吴才来等, 2010)。早古生代晚期, 随着伊利运动的发生, 以太古代变质岩为基底的中祁连地块快速向南运移, 洋壳逐渐向南祁连地块之下消亡, 并在南祁连北缘山前坳陷地带形成广泛的志留纪复理石沉积建造(王荃和刘雪亚, 1976)。早志留世(435 Ma 左右)时期, 在南祁连与中祁连之间, 由于大洋板片的南向俯冲, 将深海沉积物带入到地幔深处, 同时深部的俯冲洋壳在高温下发生脱水熔融, 熔融的熔体上涌交代上覆地幔橄榄岩形成玄武质岩浆, 带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形成刚察大寺早志留世花岗岩, 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)。

## 4 结论

(1)刚察大寺花岗岩主要由花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩组成。花岗闪长岩的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为( $435\pm4$ ) Ma, 表明其形成于早志留世。

(2)刚察大寺花岗岩以高硅、富钾、富铝和贫铁、镁为特征, 富集 LREEs 和 LISEs(Rb、Ba、K)、亏损 HREEs 和 HFSEs(Nb、Ta), 具有 Eu 的负异常和 Sr、P、Ti 的明显亏损, 显示了 I 型花岗岩的地球化学属性。

(3)刚察大寺 I 型花岗岩起源于高温、低压条件下中、上地壳物质的部分熔融, 形成于活动大陆边缘的构造背景。

**致谢:** 野外工作和室内整理得到中国煤炭地质总局特种技术勘探中心宋宗伟总经理、乔树岩和王致山高工的热情帮助, 三位匿名审稿专家和编辑提供了建设性意见, 谨此一并表示感谢。

## Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. 1212011221145), Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-12-0237) and National Natural Science Foundation of China (No. 41472052).

## 参考文献:

- 甘肃省地质矿产局. 1989. 甘肃省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 高永宝, 李文渊, 张照伟, 李超, 周利敏, 郭周平, 张江伟, 李侃, 钱兵, 王亚磊, 谭文娟. 2012. 南祁连裕龙沟铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素物质来源示踪研究[J]. 地球学报, 33(6): 899-906.
- 贾群子, 杨忠堂, 肖朝阳. 2007. 祁连山铜金钨铅锌矿床成矿规律和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社.
- 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[J]. 岩石学报, 26(8): 2431-2444.
- 李文渊. 2004. 祁连山主要矿床组合及其成矿动力学分析[J]. 地球学报, 25(3): 313-320.
- 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[J]. 现代地质, 20(4): 545-554.
- 毛景文. 2003. 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.
- 青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志[M]. 北京: 中国

纺织出版社.

王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 陈繁荣. 1993. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩的对比[J]. 岩石学报, 9(1): 44-54.

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[J]. 地质科学, 1: 42-55.

吴才来, 鄢源红, 吴锁平, 陈其龙, WOODEN J L, MAZADAB F K, MATTINSON C. 2008. 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征[J]. 中国科学: 地球科学, 38(8): 930-949.

吴才来, 徐学义, 高前明, 李向民, 雷敏, 鄢源红, FROST R B, WOODEN J L. 2010. 北祁连早古生代花岗岩质岩浆作用及构造演化[J]. 岩石学报, 26(4): 1027-1044.

吴才来, 姚尚志, 杨经绥, 曾令森, 陈松永, 李海兵, 戚学祥, WOODEN J L, MAZADAB F K. 2006. 北祁连洋早古生代双向俯冲的花岗岩证据[J]. 中国地质, 33(9): 1197-1208.

吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.

谢其峰, 周立发, 刘羽. 2014. 青海刚察大寺地区花岗岩类 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 33(9): 1379-1390.

杨建国, 杨林海, 任有祥, 李智佩, 宋忠宝. 2005. 北祁连山寒山金矿床成矿作用同位素年代学[J]. 地球学报, 26(4): 315-320.

雍拥, 肖文交, 袁超, 李继亮, 闫臻, 毛启贵. 2008b. 中祁连东段花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 新疆地质, 26(1): 62-70.

雍拥, 肖文交, 袁超, 闫臻, 李继亮. 2008a. 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, 24(4): 855-866.

## References:

- CHAPPELL B W, WHITE A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachan fold belt[J]. Geological Society of America Special Papers, 272: 1-26.
- HOFMANN A W. 2007. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: Isotopes and trace elements[J]. Treatise on Geochemistry, 2: 61-101.
- HOFMANN A W. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism[J]. Nature, 385(6613): 219-229.
- HU Zhao-chu, LIU Yong-sheng, GAO Shan, LIU Wen-gui, WEN Zhang, TONG Xi-run, LIN Lin, ZONG Ke-qing, LI Ming, CHEN Hai-hong, ZHAO Lian, YANG Lu. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 27(9): 1391-1399.
- Gansu Geology and Mineral Resources Bureau. 1989. Regional geological record of Gansu province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- GAO Yong-bao, LI Wen-yuan, ZHANG Zhao-wei, LI Chao, ZHOU

- Li-min, GUO Zhou-ping, ZHANG Jiang-wei, LI Kan, QIAN Bing, WANG Ya-lei, TAN Wen-juan. 2012. Re-Os Isotopic Analysis of the Yulonggou Cu-Ni Sulfide Deposit in the South Qilian Mountain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(6): 899-906(in Chinese with English abstract).
- JIA Qun-zi, YANG Zhong-tang, XIAO Chao-yang. 2007. The metallogenetic regularity and metallogenetic prediction of copper, gold and tungsten deposits in Qilian mountain[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LI Jian-feng, ZHANG Zhi-cheng, HAN Bao-fu. 2010. Geochronology and geochemistry of Early Paleozoic granitic plutons from Subei and Shibaoceng areas, the western segment of central Qilian and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2431-2444(in Chinese with English abstract).
- LI Wen-yuan. 2004. Main Mineral Deposit Associations in the Qilian Mountains and Their Metallogenetic Dynamics[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(3): 313-320.
- LIU Zhi-wu, WANG Chong-li, SHI Xiao-hu. 2006. Granitoids Characteristics and Tectonic Setting of Danghenanshan Area in South Qilian Mountains[J]. *Geoscience*, 20(4): 545-554(in Chinese with English abstract).
- MAO Jing-wen. 2003. The copper, gold, iron and tungsten poly-metallic metallogenetic series of ore deposits and prospecting evaluation in northwestern Qilian mountain[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- PITCHER W S. 1983. Granite type and tectonic environment[M]. Mountain Building Processes, Academic Press: 19-40.
- Qinghai Geology and Mineral Resources Bureau. 1991. Regional geological record of Qinghai Province[M]. Beijing: China Textile Press: 1-128(in Chinese).
- RUDNICK R, GAO S. 2003. Composition of the continental crust[M]. Traetise on Geocheemistry, 3: 1-64.
- SAUNDERS A D, NORRY M J, TARNEY J. 1988. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: Trace element costrants[J]. *Journal of Prtrolology*, 1: 415-445.
- SONG Shu-guang, NIU Yao-ling, SU Li, XIA Xiao-hong. 2013. Tectonics of the north Qilian orogen, NW China[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1378-1401.
- SONG Shu-guang, NIU Yao-ling, ZHANG Li-ren, WEI Chun-jing, LIOU J G, SU Li. 2009. Tectonic evolution of early Paleozoic HP metamorphic rocks in the north Qilian mountains, NW China: New perspectives[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 334-353.
- WANG De-zi, LIU Chang-shi, SHEN Wei-zhou, CHEN Fan-rong. 1993. The contrast between Tonglu I-type and Xiangshan S-type clastoporphyritic lava[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(1): 44-54(in Chinese with English abstract).
- WANG Quan, LIU Xue-ya. 1976. Paleo-oceanic crust of the Chiliebshan region, western China and tectonic significance[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1: 42-55(in Chinese with English abstract).
- WU Cai-lai, HAO Yuan-hong, WU Suo-ping, CHEN Qi-long, WOODEN J L, MAZADAB F K, MATTINSON C. 2008. The zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemistry characteristics of western part of northern Qaidam granite[J] *Science in China: Earth Science*, 38(8): 930-949(in Chinese).
- WU Cai-lai, XU Xue-yi, GAO Qian-ming, LI Xiang-min, LEI Min, GAO Yuan-hong, FROST R B, WOODEN J L. 2010. Early Palaeozoic grranitoid magmatism and tectonic evolution in north Qilian, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1027-1044(in Chinese with English abstract).
- WU Cai-lai, YAO Shang-zhi, YANG Jing-sui, ZENG Ling-sen, CHEN Song-yong, LI Hai-bing, WEI Xue-xiang, WOODEN J L, MAZADAB F K. 2006. Double subduction of the Early Palaeozoic north Qilian oceanic plate: Evidence from granites in the central segment of north Qilian, NW China[J]. *Geology in China*, 33(9): 1197-1208(in Chinese with English abstract).
- WU Fu-yuan, LI Xian-hua, YANG Jin-hui, ZHENG Yong-fei. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238(in Chinese with English abstract).
- XIE Qi-feng, ZHOU Li-fa, LIU Yu. 2014. Geochronology, geochemistry and tectonic implications of granites in Gangchadasi area from Qinghai Province[C]/International Conference on Continental Dynamics: ICCD. IAGR Conference Series, 18: 270.
- XIE Qi-feng, ZHOU Li-fa, LIU Yu. 2014. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of Gangchadasi granite in Qinghai province and their geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(9): 1379-1390(in Chinese with English abstract).
- YANG Jian-guo, YANG Lin-hai, REN You-xiang, LI Zhi-pei, SONG Zhong-bao. 2005. Isotopic Geochronology of the Ore-forming Process in the Hanshan Gold Deposit of the North Qilian Mountains[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(4): 315-320(in Chinese with English abstract).
- YONG Yong, XIAO Wen-jiao, YUAN Chao, LI Ji-liang, YAN Zhen, MAO Qi-gui. 2008b. LA-ICPMS zircon U-Pb ages of granitic plutons from the eastern sector of the central Qilian and their geologic implication[J]. *Xinjiang Geological*, 26(1): 62-70(in Chinese with English abstract).
- YONG Yong, XIAO Wen-jiao, YUAN Chao, LI Ji-liang. 2008a. The dating, geochemical charateristics and tectonic significance of granitic plutons from the eastern sector of the central Qilian[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 855-866(in Chinese with English abstract).