

# 甘肃北山营毛沱地区花岗岩类 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义

王磊, 杨建国, 王小红, 全守村, 李文明, 谢燮, 齐琦, 姜安定

西安地质矿产研究所, 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 西安 710054

**摘要:**为揭示整个北山地区构造演化特征,对北山营毛沱地区分布的花岗岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、闪长岩等花岗岩类岩石进行了岩石化学研究。结果表明,这些花岗岩类具有偏铝质-过铝质、碱性-钙碱性特征,具有中等的  $\text{SiO}_2$  (62.1%~72.92%) 含量,较高的  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  (5.4%~9.12%) 含量;球粒陨石标准化分配模式图上,具有相对平缓的富集轻稀土元素配分模式,重稀土元素分馏不明显,弱 Eu 负异常;亏损 Nb、Ba、P、Ti,富集 Rb、Pb、K;主微量元素对比及图解分析认为花岗岩类具有 I 型或 I-A 型过渡花岗岩的特点。对其中的花岗闪长岩进行了 LA-LCP-MS 锆石 U-Pb 定年分析,得出其侵位时间为  $384.7 \pm 7.7$  Ma,为中泥盆世早期。结合区域地质分析,指出营毛沱地区的花岗岩类形成于北山早古生代洋盆碰撞造山后的拉伸环境,标志北山地区在中泥盆世已进入新的构造演化阶段,即板内伸展阶段。

**关键词:**花岗岩类;锆石 U-Pb 年龄;岩石地球化学;甘肃北山

中图分类号:P588.21<sup>+</sup>2.5 文章编号:1007-2802(2015)03-0583-09 doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2015.03.015

## LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Its Geological Implications of Yingmaotuo Granitic Rocks

WANG Lei, YANG Jian-guo, WANG Xiao-hong, QUAN Shou-cun, LI wen-ming, XIE Xie, Qi Qi, JIANG An-ding

*Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China*

**Abstract:** In order to reveal the tectonic evolution characteristics of the Beishan area, we analysed the petrological and geochemical characteristics of the granitic rocks in Beishan Yingmaotuo area. Through the rock geochemical analysis, we concluded that the granitic rocks are calc - alkaline and metaluminous - peraluminous series rocks with intermediate  $\text{SiO}_2$  content (62.1% - 72.92%), high content of  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (5.4% - 9.12%). In addition, they exhibit relatively gentle enrichment of light rare elements (LREE), and flat heavy rare earth elements (HREE) and weak negative Eu anomalies in the chondrite-normalized REE patterns. In comparison with other granitic rocks, the granites have the characteristics of I-type or I to A granite. Through the LA-ICP-MS zircon U-Pb dating analysis of granodiorite, we concluded that its emplacement time was  $384.7 \pm 7.7$  Ma. Based on the regional geology, the above characteristics reflected that the granitic rocks in the Yingmaotuo area were formed in the spread tectonic background after the early Paleozoic Beishan ocean basin collisional orogeny, and indicated that the Beishan area entered into a new phase of plate extension.

**Key words:** granitic rocks; zircon U-Pb dating; petrogeochemistry; Beishan, Gansu

北山地区位于甘肃、新疆、内蒙古交界部位,是中国西北地区的一个重要成矿带。区内花岗岩类岩石分布广泛,约占该区全部侵入岩的 95% (聂凤军等, 2002a)。该区经历了复杂的地质构造变动和岩浆活动,具有优越的成矿地质条件,已发现许多重要的黑色、有色、稀有、贵金属及非金属矿产地。北山地区在古生代主要经历了 3 个构造演化阶段:

震旦纪—奥陶纪为古陆裂解及洋盆扩张阶段,志留纪—泥盆纪为板块俯冲及碰撞造山阶段,石炭纪—二叠纪为陆内裂谷阶段。目前对志留—泥盆纪期间的板块俯冲及碰撞造山阶段具体时限问题存在多种认识(左国朝和何国琦, 1990; 左国朝和李茂松, 1996; 龚全胜等, 2002, 2003; 何世平等, 2005; 李舳等, 2011; 李向民等, 2011; 张文等, 2011)。左国朝和

收稿日期: 2014-03-31 收到, 2014-04-27 改回

基金项目: 中国地质调查局地质调查专项 (1212011085090, 12120113046700)

第一作者简介: 王磊 (1985-), 男, 助理研究员。研究方向: 岩石地球化学。E-mail: tleiwang@163.com.

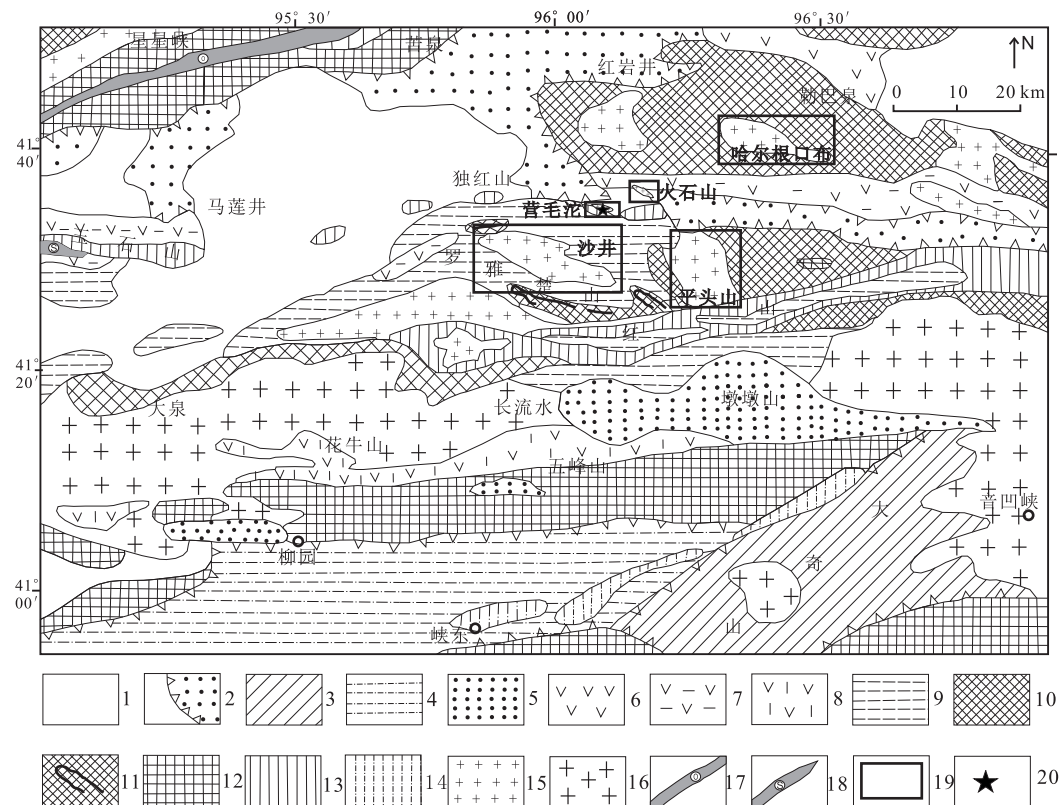
何国琦(1990)认为在志留纪末至早泥盆世北山地区的塔里木—华北板块与哈萨克斯坦板块最终合并,导致洋盆消失和碰撞造山;何世平等(2005)认为石炭纪末哈萨克斯坦和塔里木板块之间洋盆最终闭合,形成统一大陆;龚全胜等(2003)认为北山地区自泥盆纪开始转化为古亚洲洋构造域演化体系;李向民等(2011)认为北山古生代洋盆在晚志留世已经俯冲消亡,并开始发生碰撞造山,完成敦煌地块与明水-旱山地块之间的拼合,而晚泥盆世北山地区进入晚古生代板内伸展阶段;针对这一问题,笔者选取了红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩南缘营毛沱附近的花岗岩类进行了锆石 U-Pb 定年研究及岩石化学研究,探讨其岩石成因与地质构造背景。

## 1 区域地质背景

北山造山带位于甘肃、新疆、内蒙交界地区,对于甘肃北山大地构造归属及划分目前还有不同的认识(刘雪亚和王荃,1995;聂凤军等,2002b;左国朝等,2003,2011;杨合群等,2008,2009,2010)。根据左国朝等(2011)的研究,以苦泉—星星峡一线奥

陶纪蛇绿岩带为代表的缝合带为界,其东南侧为塔里木板块,其西北侧为哈萨克斯坦板块。左国朝等(1983,1990,1996,2003,2010)经多年研究,认为新元古代青白口纪末澄江运动后,全球进入罗迪尼亚超大陆时期,震旦纪开始,罗迪尼亚超大陆逐渐裂解,寒武纪转为早古生代板块演化体制,晚古生代板内开合构造阶段,中、新生代为盆山构造。研究区位于塔里木板块北缘,北部为牛圈子深大断裂,南侧为方山口—庙庙井—双鹰山深大断裂。

区内出露地层(图1)主要有中元古界长城系古铜井群、蓟县系平头山组、寒武系西双鹰山组、奥陶系罗雅楚山组及志留系公婆泉群等,缺失泥盆系和石炭系。其中古铜井群分布于大红山北缘背斜核部及勒巴泉西南地区,主要为一套云母石英片岩、云母片岩、绢云千枚岩、石英岩夹大理岩地层。蓟县系平头山组为一套巨厚层块状含硅质条带大理岩,夹硅质岩及白云质大理岩,其可分为4个岩性段,主体以碳酸盐沉积为主,其中第四岩性段产有与火山活动有关的热液喷流沉积变质型铁矿床,长城系、蓟县系组成了塔里木板块的软基底。寒武系西双



1-中、新生代覆盖区;2-二叠纪-侏罗纪断陷盆地;3-晚二叠世拉分盆地;4-早二叠世裂谷带;5-泥盆纪火山-磨拉石盆地;6-志留纪火山岛弧带;7-志留纪弧盆地;8-奥陶纪裂谷带;9-震旦-奥陶纪陆架海;10-新-中元古界基底;11-中元古界蓟县系含铁层;12-古元古界基底;13-中元古界推覆岩片;14-寒武-奥陶系推覆岩片;15-加里东期花岗岩浆带;16-海西-印支期花岗岩浆带;17-塔里木板块与哈萨克斯坦板块之间的缝合带;18-志留纪弧盆地蛇绿岩(423 Ma);19-研究区范围;20-测年样品采集点

图1 甘肃北山营毛沱地区区域地质图(据左国朝等,2011修改)

Fig.1 Geological map of the Beishan Yingmaotuo area, Gansu Province(modified after Zuo Guochao *et al.*,2011)

鹰山组主要分布于罗雅楚山一带,岩性以碳硅质岩、硅质岩、硅质板岩、碳硅质板岩、碳质板岩等一套黑色岩系为主,其中产有磷、钒、铀矿产。奥陶系罗雅楚山组为一套变质砂岩,在营毛沱至平头山一带均有出露,其中产有金矿化。志留系公婆泉群为一套中基性、中酸性火山岩、火山碎屑岩,在研究区内出露范围相对较小,主要位于火石山一带。

研究区内岩浆活动强烈,从基性-超基性岩至中酸性岩均有出露,其中基性-超基性岩主要分布于火石山、怪石山、黑山一带,前人研究获得的基性岩的侵位年龄(Xie *et al.*, 2012; 杨建国等, 2012)为:火石山西拾金滩岩体为 385~333 Ma,怪石山岩体为 358.6±3.9 Ma,黑山岩体为 358~374 Ma,均为泥盆纪。区内中酸性侵入岩广布于沙井、营毛沱、火石山、哈尔滨头口布、平头山等地(图 1)。目前研究区内成岩年龄数据较少,仅王立社等(2009)指出哈尔滨头口布花岗岩侵位年龄为 387.6±8.2 Ma。

## 2 岩石学特征

本次主要采集营毛沱(YM-1至YM-3)、哈尔滨头口布(YM-4至YM-9)、火石山(YM-10)、砂井(YM-11)及平头山(YM-12)几处的岩体及岩脉进行研究(图 2)。

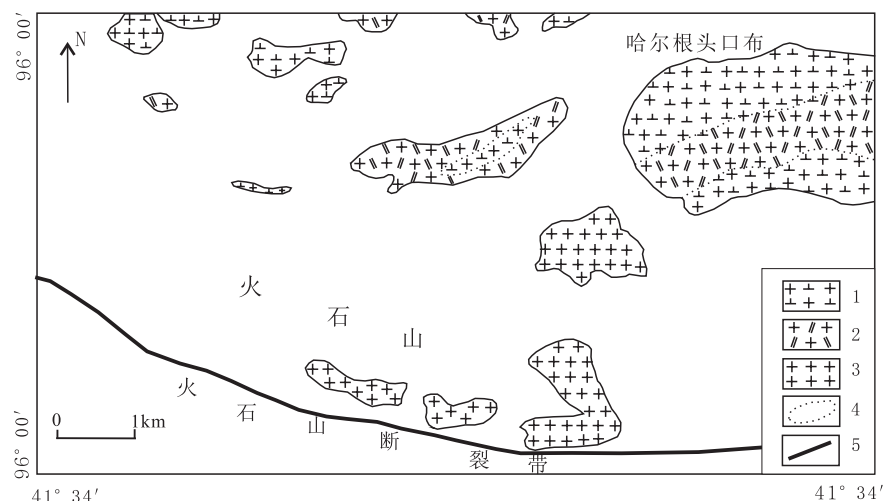
### 2.1 哈尔滨头口布侵入岩

主要由 8 个大小不等岩体构成,呈透镜状、长条状近东西向产出。由闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩等岩石单元组成。其中以花岗闪长岩分布面积最广。二长花岗岩,中-粗粒结构,局部呈斑状结构,块状构造。矿物有斜长石(45%)、钾长石

(30%)、石英(20%)、黑云母和角闪石(2%~10%),副矿物有钛铁矿、磁铁矿、磷灰石、榍石和锆石,蚀变矿物有绢云母、绿泥石、绿帘石和方解石等。花岗闪长岩,岩石具中细粒结构,局部为斑状构造,块状、弱片麻状构造。由斜长石(40%~70%)、石英(20%~30%)、黑云母(5%)和少量白云母组成。副矿物有磁铁矿、磷灰石、锆石、榍石和绿帘石等。蚀变主要有绿泥石化、绢云母化、钠黝帘石化等。闪长岩,岩石具中细粒结构,块状弱片麻状构造。主要由斜长石(55%~60%)、角闪石(10%~35%)、黑云母(0%~10%)及少量石英(2%~5%)组成。副矿物有磁铁矿、磷灰石、锆石、榍石和绿帘石等。蚀变主要为绿泥石化、绢云母化、黝帘石化等。

### 2.2 火石山侵入岩

主要由 3 个岩体组成,主要岩性有花岗岩、二长花岗岩、英云闪长岩、花岗闪长岩、闪长岩等,以英云闪长岩和花岗闪长岩分布面积最广。花岗岩为不等粒花岗结构,块状构造。主要由钾长石、正长石、石英、黑云母和少量角闪石组成。副矿物有磷灰石、锆石、金红石、钛铁矿和榍石等。钾长石含量约 50%,主要为条纹长石和微斜长石,具轻微绢云母和高岭土化,石英为他形粒状,含量约 45%。二长花岗岩为似斑状构造,基质呈半自形粒状结构,由斜长石、钾长石、石英和少量黑云母、磁铁矿、榍石和锆石等矿物组成。斑晶主要为钾长石(25%),基质矿物为斜长石、石英和少量黑云母。英云闪长岩具细-中粒结构,块状构造。由斜长石(50%~70%)、石英(20%)、黑云母(8%~10%)、角闪石(20%)和少量磁铁矿、锆石、磷灰石矿物构成,次生



1-花岗闪长岩;2-二长花岗岩;3-花岗岩;4-岩相分界线;5-断裂带

图 2 北山火石山—哈尔滨头口布一带花岗岩类分布图(据王立社等, 2009 修改)

Fig.2 Sketch map of granites distribution in the Beishan Huoshishan-Haergentoukoubu area(modified after Wang Lishe *et al.*, 2009)

蚀变矿物有绢云母、绿泥石、绿帘石等。

3 锆石 U-Pb 定年分析

锆石在无污染条件下,经过手工破碎、淘洗、磁选、重液分离选出,并在双目镜下认真挑选。样品靶制备和分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。将分选出的锆石晶体粘在双面胶上,用无色透明的环氧树脂固定制成靶,待固化后磨至约一半使锆石内部暴露,用于阴极发光(CL)研究和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析。锆石 U-Pb 同位素组成分析在激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪上完成,分析采用激光剥蚀孔径 30 μm,剥蚀深度 20~40 μm,激光脉冲为 10 Hz,能量为 32~36 mJ。同位素组成用锆石 91500 进行外标校正,每隔 5 个分析点测 1 次标准锆石 91500 外标准物质,以保证标准和样品的仪器条件完全一致。在 10 次锆石的分析前后各测 2 次 NISTSRM610,以 Si 作内标来测定锆石中 U、Th 和 Pb 的含量。样品的同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER 程序,并进行同位素比值的校正,以扣除普通铅的影响(Andersen, 2002)。年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot 程序完成。LA-ICP-MS 分析方法和流程详见袁洪林等(2003)。

营毛沱花岗闪长岩(YM-3)中选出的锆石阴极发光(CL)图像(图 3)显示,多数锆石呈淡黄色、灰色,颗粒为自形晶,少数为半自形晶,粒径一般为 100~250 μm,长宽比大于 1,多呈长柱状,晶型大多较完好。具明显的岩浆锆石所特有的振荡环带,与基性-超基性岩中锆石相比,环带较为密集,反映其形成温度相对较低,微量元素扩散速度慢。大多数

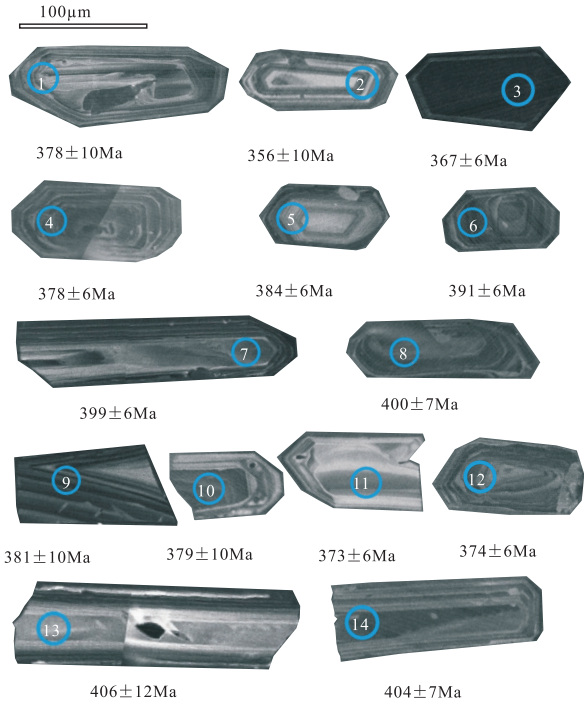


图 3 营毛沱花岗闪长岩中锆石阴极发光图像  
Fig.3 CL images of zircons from the Yingmaotuo granite

锆石无扇形分带结构,表明锆石结晶时外部环境相对稳定。未见锆石有变质新生边,说明锆石形成后受后期变质作用影响较小。一般岩浆锆石的 Th、U 含量较高,Th/U 值一般较大(>0.4),本次研究所得锆石中 Th/U 值均大于 0.8,具典型岩浆锆石的特征。少量锆石中存在继承锆石的残留核。本文选择了其中 14 个信号较好的数据进行年龄统计计算,分析结果见表 1。

利用 Isoplot(ver2.02)(Ludwig, 2002)程序对样品锆石进行谐和和曲线投影和 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄的计算。结果可见,在 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U-<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U 谐和

表 1 营毛沱花岗岩中锆石 LA-LCP MS U-Pb 定年数据  
Table 1 LA-LCP-MS zircon U-Pb dating of the Yingmaotuo granite

| 分析点     | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U |         | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U |         | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U |       | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U |       |
|---------|-------------------------------------|---------|-------------------------------------|---------|-------------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|
|         | 比值                                  | 1σ      | 比值                                  | 1σ      | t/Ma                                | 1σ    | t/Ma                                | 1σ    |
| YM-3-01 | 0.50871                             | 0.01625 | 0.06045                             | 0.00172 | 417.6                               | 10.94 | 378.4                               | 10.46 |
| YM-3-02 | 0.46382                             | 0.01688 | 0.05681                             | 0.00164 | 386.9                               | 11.71 | 356.2                               | 10.03 |
| YM-3-03 | 0.45934                             | 0.00897 | 0.05854                             | 0.00095 | 383.8                               | 6.24  | 366.7                               | 5.81  |
| YM-3-04 | 0.47446                             | 0.00934 | 0.06042                             | 0.00097 | 394.3                               | 6.43  | 378.2                               | 5.91  |
| YM-7-05 | 0.44296                             | 0.01311 | 0.06145                             | 0.00105 | 372.3                               | 9.22  | 384.4                               | 6.36  |
| YM-3-06 | 0.49618                             | 0.00991 | 0.06146                             | 0.00100 | 409.1                               | 6.73  | 384.5                               | 6.09  |
| YM-3-07 | 0.52011                             | 0.01291 | 0.06257                             | 0.00105 | 425.2                               | 8.62  | 391.2                               | 6.39  |
| YM-3-08 | 0.49662                             | 0.01072 | 0.06391                             | 0.00104 | 409.4                               | 7.28  | 399.3                               | 6.30  |
| YM-3-09 | 0.50452                             | 0.01402 | 0.06395                             | 0.00109 | 414.8                               | 9.46  | 399.6                               | 6.63  |
| YM-3-10 | 0.53561                             | 0.01990 | 0.06088                             | 0.00172 | 435.5                               | 13.16 | 381.0                               | 10.45 |
| YM-3-11 | 0.54255                             | 0.01757 | 0.06059                             | 0.00173 | 440.1                               | 11.57 | 379.2                               | 10.51 |
| YM-3-12 | 0.51440                             | 0.00941 | 0.05969                             | 0.00097 | 421.4                               | 6.31  | 373.7                               | 5.89  |
| YM-3-13 | 0.49894                             | 0.01851 | 0.06502                             | 0.00191 | 411.0                               | 12.54 | 406.1                               | 11.54 |
| YM-3-14 | 0.54007                             | 0.01248 | 0.06466                             | 0.00107 | 438.5                               | 8.23  | 403.9                               | 6.5   |

图上(图4),所有分析点都集中在相对较小的区域内,所得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 $384.7 \pm 7.7 \text{ Ma}$ ( $\text{MSWD}=3.6, 2\sigma$ )。

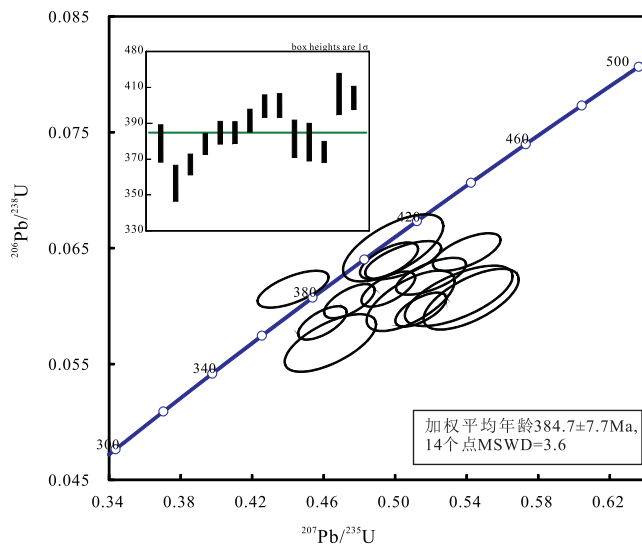


图4 营毛沱花岗闪长岩中锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig.4 Concordia U-Pb plots of zircons from the Yingmaotuo granite

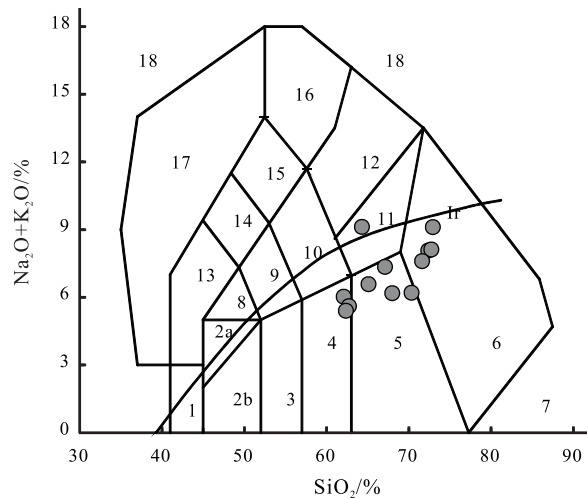
## 4 岩石地球化学特征

野外选取新鲜的没有次生蚀变的具有代表性的不同岩石类型(花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩等)进行主量、微量和稀土元素分析。样品分析在西安地质矿产研究所实验测试中心完成。主量元素采用 ICP-AES 方法分析,方法详见李献华等(2002),分析误差小于 2.5%;微量稀土元素采用 ICP-MS 方法分析(刘颖等,1996),分析误差小于 5%。分析结果见表 2。岩石地球化学数据处理及作图采用 Geokit 软件(路远发,2004)。

### 4.1 主量元素特征

营毛沱中酸性侵入岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 62.1% ~ 72.92%,富铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 13% ~ 16.92%), $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 3.31% ~ 5.05%, $\text{K}_2\text{O}$  含量为 1.4% ~ 5.42%,大部分为 2% ~ 3%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  为 4.25% ~ 9.12%,平均 6.72%,全碱含量中等; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  为 0.69 ~ 3.11,平均为 1.74,大部分大于 1,富含钠质成分。 $\text{MgO}$  含量为 0.24% ~ 2.42%,平均为 1.23%; $\text{CaO}$  含量为 1.32% ~ 6.2%,平均为 3.09%; $\text{P}_2\text{O}_5$  含量为 0.05% ~ 0.38%,平均为 0.18%; $\text{TFeO}$  含量为 1.54% ~ 7.59%,平均为 3.79%。在( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )- $\text{SiO}_2$  图解上(图5),除 YM-9 外,均落入亚碱性系列区域。在  $\text{SiO}_2$ -AR 图解中(图6),位于碱性-钙碱性区域,计算得出样品的里特曼指数为 1.4 ~ 3.86,为碱性-

钙碱性花岗岩系列, $\text{A/NCK}$  为 0.832 ~ 1.026,为偏铝质-过铝质花岗岩类。



1-橄辉长岩;2a-碱性辉长岩;2b-亚碱性辉长岩;3-辉长闪长岩;4-闪长岩;5-花岗闪长岩;6-花岗岩;7-石英岩;8-二长辉长岩;9-二长闪长岩;10-二长岩;11-石英二长岩;12-正长岩;13-副长石辉长岩;14-副长石二长闪长岩;15-副长石二长正长岩;16-副长正长岩;17-副长深成岩;18-霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩;Ir 分界线,上方为碱性,下方为亚碱性

图5 营毛沱地区花岗岩( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )- $\text{SiO}_2$  图解

Fig.5 Diagram of ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )- $\text{SiO}_2$  from the Yingmaotuo granite

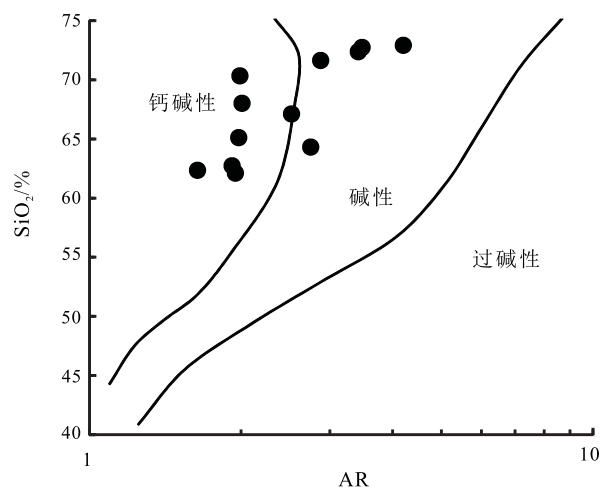


图6 营毛沱地区花岗岩  $\text{SiO}_2$ -AR 图解

Fig.6 Diagram of  $\text{SiO}_2$ -AR from the Yingmaotuo granite

### 4.2 微量元素地球化学

微量元素对于判别岩石类型和示踪岩石演化及成岩物质来源具有重要意义(毛景文等,2000)。营毛沱地区的花岗岩类普遍高  $\text{Sr}$  ( $76 \times 10^{-6} \sim 415 \times 10^{-6}$ )、 $\text{Ba}$  ( $329 \times 10^{-6} \sim 4140 \times 10^{-6}$ ),低  $\text{Zr}$  ( $86 \times 10^{-6} \sim 440 \times 10^{-6}$ ),中等  $\text{Nb}$  ( $6.7 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$ ) 等特征。不相容元素  $\text{Rb}$  和  $\text{Sr}$  在岩浆结晶过程中趋于分离,

其比值可以指示岩石的演化程度及来源,营毛沱地区花岗岩类 Rb/Sr 值比较接近,大多数为 0.16 ~ 1.09,其中除了 YM4-6 大于 1 以外,均小于 1,显示了 Rb 相对 Sr 含量亏损的特征。在 Y+Nb-Rb 图解上(图 7),所有样品均落入后碰撞范围,而且可以看出所有样品具有弧的特征。样品与典型的后碰撞花岗岩具有类似的趋势,也说明营毛沱地区的花岗岩类具有后碰撞花岗岩的特征。

#### 4.3 稀土元素地球化学

由表 2 可见,营毛沱地区花岗岩类的稀土元素总量中等,为  $116.89 \times 10^{-6} \sim 194.82 \times 10^{-6}$ 。在球粒陨石标准化配分模式图上(图 8),呈较强的轻稀土富集“V”型,REE 总量为 128.29 ~ 166.97,平均为 150.57;Eu 负异常明显, $\delta\text{Eu}$  值为 0.32 ~ 0.68,平均为 0.42。 $\delta\text{Ce}$  值为 0.6 ~ 1.02,平均为 0.86,表现为弱的负 Ce 异常; $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为 9.60 ~ 28.89,平均为 19.7,LREE/HREE 为 8.22 ~ 14.78,平均 12.33,轻重稀土分馏明显。

花岗闪长岩稀土总量为 116.89 ~ 152.14,平均为 135.56,Eu 负异常明显, $\delta\text{Eu}$  值为 0.68 ~ 0.89,平均为 0.76; $\delta\text{Ce}$  值为 0.88 ~ 1.34,平均为 1.09,Ce 异常不明显; $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为 8.11 ~ 15.43,平均为 11.23,LREE/HREE 为 7.55 ~ 14.8,平均为 10.19;轻重稀土分馏明显;闪长岩 REE 总量为 145.18 ~ 194.82,平均为 177.71。 $\delta\text{Eu}$  值为 0.71 ~ 0.88,平均为 0.77; $\delta\text{Ce}$  值为 0.73 ~ 1.00,平均为 0.90; $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为 6.09 ~ 14.68,平均为 9.02,LREE/HREE 为 5.61 ~ 8.6,平均为 6.09,轻重稀土分馏相对明显。二长花岗岩具有轻重稀土分馏中等, $\delta\text{Eu}$  和  $\delta\text{Ce}$  值近于 1,Eu 呈弱的正异常,Ce 异常不明显

的特征。所有样品重稀土相对较为平坦,分馏不明显。相对花岗岩,花岗闪长岩具有稀土总量降低、 $\delta\text{Eu}$  和  $\delta\text{Ce}$  值变大、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值变小的趋势,也就是稀土总量降低,轻重稀土分馏程度较低的趋势,这与岩浆演化过程一致。由花岗岩至闪长岩,轻重稀土分馏程度降低。这也说明,此地区的花岗岩类是同源岩浆演化形成的。

## 5 讨论

营毛沱地区花岗岩类岩石具有偏铝质-过铝质、碱性-钙碱性花岗岩系列的特征。Pearce 等(1984)首先系统地研究了已知大地构造背景的花岗岩的地球化学特征,并有选择的 600 个花岗岩的微量元素浓度数据对  $\text{SiO}_2$  含量进行作用的初步分析表明,元素 Y、Yb、Rb、Ba、K、Nb、Ta、Ce、Sm、Zr、Hf 最能有效的区分不同大地构造环境的花岗岩。在 Y+Nb-Rb 和 Ta-Yb 图解上(图 7),样品均落入火山弧或后碰撞范围,而且可以看出所有样品具有弧的特征。在  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$  图解上(图 9),样品具有 I 型和 A 型花岗岩的特征。A 型是非造山花岗岩,地幔玄武岩浆演化,或玄武岩浆上升后,与地壳混染或亏损地壳熔融的产物,主要见于非造山带和造山后,I 型是造山花岗岩,为未经风化的火成岩熔融形成的岩浆产物,造山带的产物;营毛沱地区的花岗岩类呈小岩株和近东西向的岩枝或岩脉状产出,围岩接触变质不明显,其构造形式显示相对拉张环境下被动定位的后构造特点。李舫等(2009)指出双峰山 A 型花岗岩(415 Ma)为后造山伸展背景下的岩浆产物,王立社等(2009)报道指出红柳河—牛圈子蛇绿岩带北缘哈尔滨头口布泥盆纪 A 型花岗岩(388 Ma)

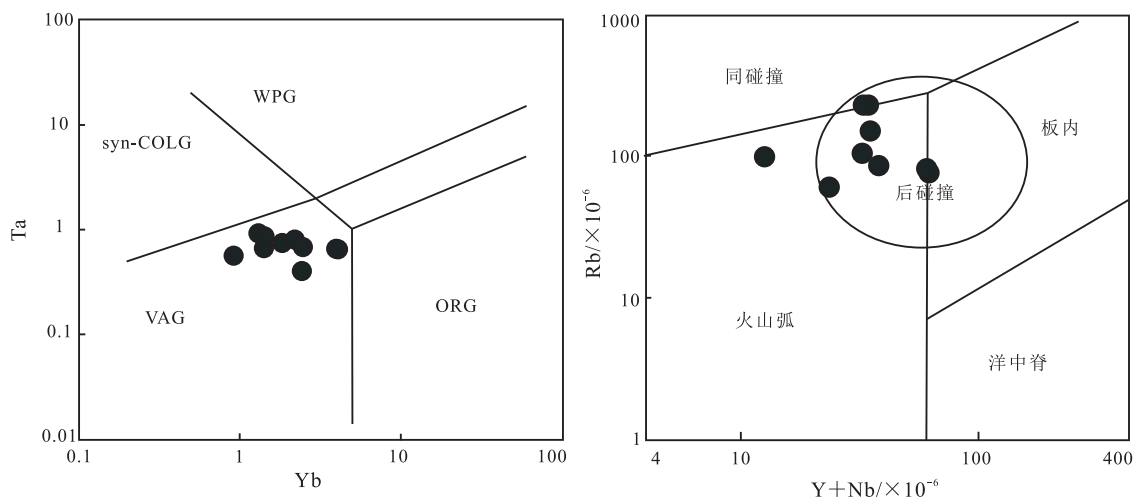


图 7 营毛沱地区花岗岩 Ta-Yb 和 Rb-Y+Nb 图解 (Pearce *et al.*, 1984; Pearce, 1996)

Fig.7 Diagrams of Ta-Yb and Rb-Y+Nb from the Yingmaotuo granite (Pearce *et al.*, 1984; Pearce, 1996)

表2 营毛沱地区花岗岩类主量元素(%)和微量元素( $\times 10^{-6}$ )分析结果Table 2 Major element(%) and trace element( $\times 10^{-6}$ ) compositions of the granites from the area of Yingmaotuo

| 样品号                            | YM-1   | YM-2   | YM-3   | YM-4   | YM-5   | YM-6   | YM-7   | YM-8   | YM-9   | YM-10  | YM-11  | YM-12  |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO <sub>2</sub>               | 62.1   | 62.72  | 65.11  | 72.92  | 72.38  | 72.74  | 67.11  | 68     | 64.3   | 70.34  | 71.63  | 62.35  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.48  | 14.49  | 15.99  | 13.26  | 13.41  | 13     | 14.61  | 14.67  | 16.92  | 15.38  | 13.15  | 16.11  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.42   | 2.21   | 0.67   | 0.68   | 0.23   | 1.03   | 0.13   | 1.34   | 0.05   | 0.44   | 0.26   | 0.96   |
| FeO                            | 6.31   | 5.77   | 3.11   | 0.93   | 1.79   | 0.64   | 3.9    | 1.79   | 3.98   | 2      | 2.2    | 4.64   |
| CaO                            | 4.24   | 3.36   | 4.03   | 1.55   | 1.32   | 1.67   | 2.41   | 3.72   | 2.63   | 3.36   | 2.53   | 6.2    |
| MgO                            | 1.42   | 1.35   | 1.56   | 0.24   | 0.42   | 0.36   | 1.9    | 2.42   | 1.1    | 0.94   | 0.82   | 2.27   |
| K <sub>2</sub> O               | 2.44   | 2.16   | 2.42   | 5.42   | 4.5    | 4.81   | 2.71   | 2.69   | 4.07   | 1.67   | 3.8    | 1.4    |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.58   | 3.45   | 4.16   | 3.69   | 3.57   | 3.31   | 4.64   | 3.49   | 5.05   | 4.53   | 3.8    | 4      |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.04   | 1.05   | 0.54   | 0.24   | 0.27   | 0.3    | 0.5    | 0.4    | 0.62   | 0.34   | 0.24   | 0.92   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.38   | 0.38   | 0.2    | 0.05   | 0.1    | 0.13   | 0.16   | 0.12   | 0.16   | 0.11   | 0.11   | 0.22   |
| MnO                            | 0.13   | 0.13   | 0.07   | 0.06   | 0.04   | 0.03   | 0.08   | 0.07   | 0.08   | 0.047  |        | 0.13   |
| 灼失*                            | 2.2    | 2.65   | 1.91   | 0.03   | 0.03   | 0.03   |        |        |        | 0.96   |        | 0.05   |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 1.55   | 2.25   | 1.24   | 1.28   | 0.98   | 1.41   | 2.31   | 1.59   | 1.38   | 0.78   |        | 0.12   |
| 总计                             | 101.29 | 101.97 | 101.01 | 100.35 | 99.04  | 99.46  | 100.46 | 100.3  | 100.34 | 100.9  | 98.54  | 99.37  |
| A/CNK                          | 0.892  | 1.026  | 0.952  | 0.899  | 1.02   | 0.95   | 0.977  | 0.952  | 0.967  | 1.001  | 0.879  | 0.832  |
| AR                             | 1.95   | 1.92   | 1.98   | 4.2    | 3.42   | 3.48   | 2.52   | 2.01   | 2.75   | 1.99   | 2.88   | 1.64   |
| A/MF                           | 1.01   | 1      | 1.74   | 4.74   | 3.44   | 4.15   | 1.39   | 1.41   | 1.99   | 2.66   | 2.38   | 1.19   |
| C/MF                           | 0.54   | 0.42   | 0.8    | 1.01   | 0.62   | 0.97   | 0.42   | 0.65   | 0.56   | 1.06   | 0.83   | 0.83   |
| $\sigma_{43}$                  | 1.84   | 1.55   | 1.92   | 2.76   | 2.2    | 2.2    | 2.21   | 1.51   | 3.86   | 1.4    | 2      | 1.49   |
| SI                             | 9.36   | 9.04   | 13.09  | 2.19   | 4      | 3.56   | 14.31  | 20.65  | 7.72   | 9.81   | 7.54   | 17.11  |
| R1                             | 2109   | 2271   | 2224   | 2252   | 2487   | 2545   | 2103   | 2601   | 1425   | 2632   | 2495   | 2246   |
| R2                             | 829    | 732    | 840    | 442    | 434    | 461    | 651    | 816    | 675    | 714    | 578    | 1101   |
| Sr                             | 255    | 378    | 248    | 100    | 140    | 76     | 150    | 415    | 270    | 379    |        |        |
| Rb                             | 82     | 78.6   | 85     | 230    | 152    | 228    | 106    | 100    | 86     | 60.8   |        |        |
| Ba                             | 684    | 847    | 384    | 770    | 630    | 670    | 960    | 1000   | 4140   | 329    |        |        |
| Th                             | 11.7   | 12.7   | 10.7   | 25     | 19     | 27     | 13     | 12.7   | 8.2    | 5.05   |        |        |
| Ta                             | 0.65   | 0.64   | 0.4    | 0.85   | 0.67   | 0.66   | 0.74   | 0.91   | 0.8    | 0.55   |        |        |
| Nb                             | 13.4   | 13.9   | 7.95   | 16     | 9.4    | 15     | 13     | 6.8    | 15     | 6.7    |        |        |
| Zr                             | 268    | 276    | 298    | 110    | 86     | 120    | 150    | 120    | 440    | 166    |        |        |
| Hf                             | 6.38   | 6.48   | 6.03   | 3.5    | 2.4    | 3.8    | 4.9    | 3.4    | 14     | 5.56   |        |        |
| Sm                             | 7.68   | 8.18   | 5.78   | 5.71   | 5.39   | 6.12   | 4.27   | 3.11   | 6.2    | 4.13   |        |        |
| Yb                             | 4      | 4.11   | 2.44   | 1.43   | 2.48   | 1.42   | 1.84   | 1.32   | 2.2    | 0.92   |        |        |
| La                             | 35.2   | 34.9   | 27.6   | 37.2   | 33.2   | 34.5   | 26     | 28.4   | 31     | 30.8   | 59.6   | 39.3   |
| Ce                             | 75.6   | 73.2   | 63.8   | 64.8   | 55.7   | 71.5   | 46.6   | 71     | 62.8   | 57.6   | 61.9   | 55     |
| Pr                             | 9.26   | 9.19   | 7.75   | 8.22   | 7.25   | 7.9    | 5.98   | 5.08   | 7.4    | 6.06   | 8.28   | 7.66   |
| Nd                             | 36.8   | 36.5   | 28.1   | 28.7   | 24.9   | 26     | 20.5   | 20.5   | 29.1   | 20.76  | 19.8   | 20.3   |
| Sm                             | 7.68   | 8.18   | 5.78   | 5.71   | 5.39   | 6.12   | 4.27   | 3.11   | 6.2    | 4.13   | 5.34   | 6.18   |
| Eu                             | 1.92   | 1.94   | 1.32   | 0.54   | 0.49   | 0.52   | 0.85   | 0.84   | 2.2    | 0.81   | 0.71   | 1.62   |
| Gd                             | 8.27   | 8.26   | 5.42   | 3.8    | 3.63   | 3.14   | 3.16   | 2.49   | 4.8    | 2.86   | 3.42   | 4.7    |
| Tb                             | 1.28   | 1.3    | 0.82   | 0.69   | 0.66   | 0.51   | 0.57   | 0.35   | 0.9    | 0.44   | 0.54   | 0.77   |
| Dy                             | 7.48   | 7.91   | 4.6    | 3.72   | 4.63   | 3.49   | 3.89   | 2.21   | 5.4    | 2.3    | 3.12   | 4.19   |
| Ho                             | 1.76   | 1.79   | 1.06   | 0.68   | 0.89   | 0.58   | 0.76   | 0.49   | 1      | 0.36   | 0.6    | 0.83   |
| Er                             | 4.26   | 4.49   | 2.67   | 1.66   | 2.42   | 1.47   | 1.88   | 1.43   | 2.4    | 0.96   | 1.7    | 2.09   |
| Tm                             | 0.67   | 0.71   | 0.39   | 0.26   | 0.38   | 0.23   | 0.3    | 0.22   | 0.4    | 0.15   | 0.25   | 0.32   |
| Yb                             | 4      | 4.11   | 2.44   | 1.43   | 2.48   | 1.42   | 1.84   | 1.32   | 2.2    | 0.92   | 1.48   | 1.92   |
| Lu                             | 0.64   | 0.64   | 0.39   | 0.21   | 0.36   | 0.22   | 0.29   | 0.2    | 0.3    | 0.14   | 0.23   | 0.3    |
| Y                              | 45.8   | 46.4   | 28.6   | 16     | 24.7   | 19     | 18.3   | 5.24   | 22     | 16.3   | 17.1   | 21     |
| $\Sigma$ REE                   | 194.82 | 193.12 | 152.14 | 157.62 | 142.38 | 157.60 | 116.89 | 137.64 | 156.10 | 128.29 | 166.97 | 145.18 |
| LREE                           | 166.46 | 163.91 | 134.35 | 145.17 | 126.93 | 146.54 | 104.20 | 128.93 | 138.70 | 120.16 | 155.63 | 130.06 |
| HREE                           | 28.36  | 29.21  | 17.79  | 12.45  | 15.45  | 11.06  | 12.69  | 8.71   | 17.40  | 8.13   | 11.34  | 15.12  |
| LREE/HREE                      | 5.87   | 5.61   | 7.55   | 11.66  | 8.22   | 13.25  | 8.21   | 14.80  | 7.97   | 14.78  | 13.72  | 8.60   |
| (La/Yb) <sub>N</sub>           | 6.31   | 6.09   | 8.11   | 18.66  | 9.60   | 17.43  | 10.14  | 15.43  | 10.11  | 24.01  | 28.89  | 14.68  |
| $\delta$ Eu                    | 0.73   | 0.71   | 0.71   | 0.33   | 0.32   | 0.32   | 0.68   | 0.89   | 1.19   | 0.68   | 0.47   | 0.88   |
| $\delta$ Ce                    | 1.00   | 0.98   | 1.05   | 0.87   | 0.84   | 1.02   | 0.88   | 1.34   | 0.98   | 0.97   | 0.60   | 0.73   |

注:YM-4至YM-9、YM-12数据来源于1:25万马鞍山幅区调报告;YM-11;来源1:5万云母头幅区调报告。

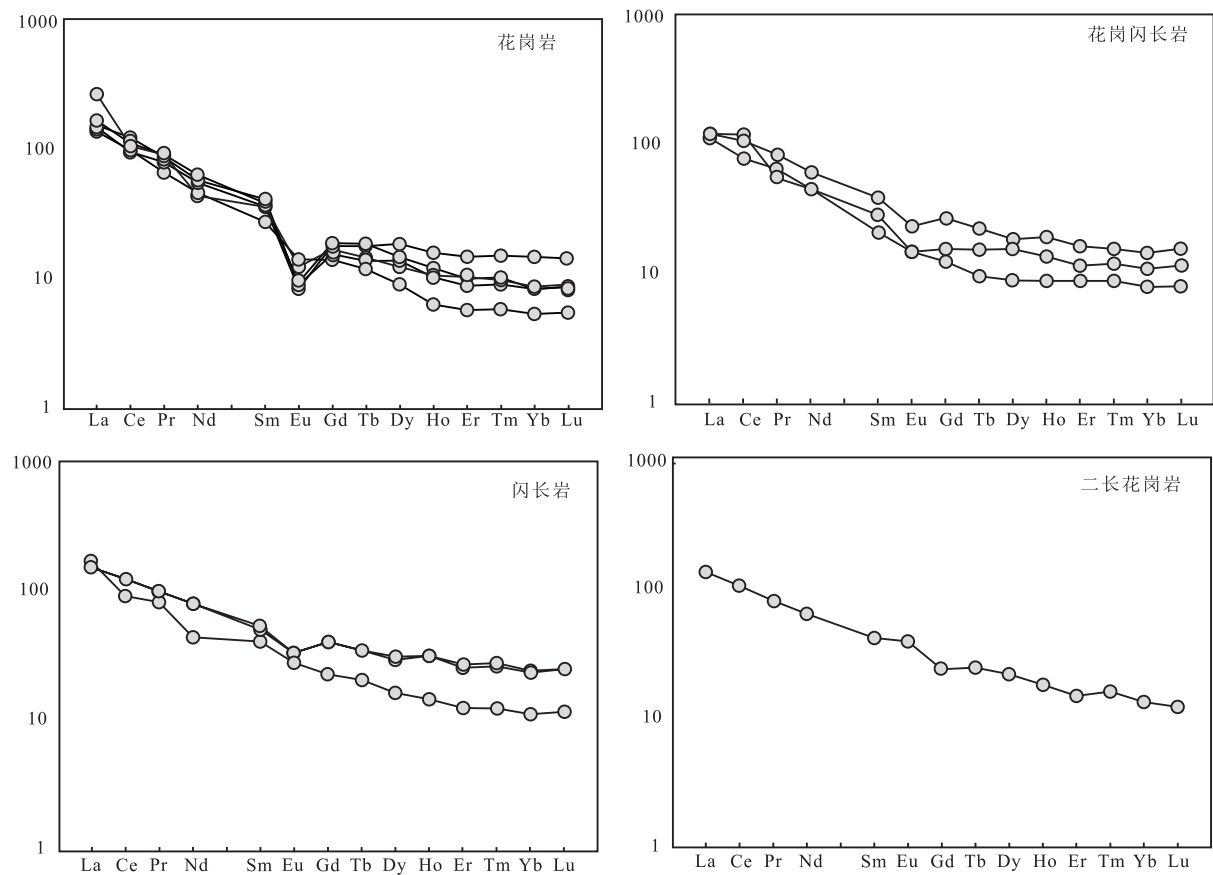


图 8 营毛沱地区花岗岩类稀土元素球粒陨石标准化分布模式图(标准化值据 Sun and McDonough,1989)

Fig.8 Chondrite-normalized REE distribution pattern for the Yingmaotuo granite(after Sun and McDonough,1989)

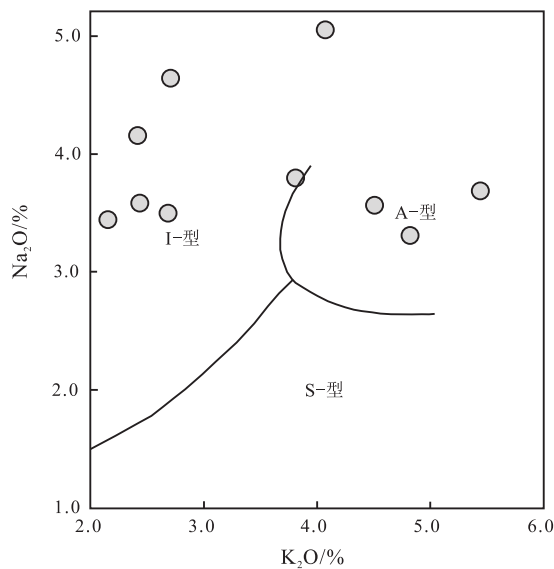


图 9 营毛沱地区花岗岩类  $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解 (Collions,1982)

Fig.9 Diagram of  $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{K}_2\text{O}$  from the Yingmaotuo granite( Collions,1982)

可能产于构造挤压向构造伸展的转折阶段;李舳等(2009)指出营毛沱地区和柳园地区由同造山挤压环境向后造山或造山晚期伸展环境的转化时间可

能在 415 Ma 左右,并有可能一直持续到 384 Ma 左右;赵泽辉等(2007)对柳园地区泥盆纪花岗岩类进行了研究,认为其形成于后碰撞构造背景下,岩浆形成可能与俯冲板片的断离有关。前人对红柳河蛇绿岩带以及附近的花岗岩做过大量研究,认为塔里木板块和哈萨克斯坦板块之间的古大洋俯冲闭合在 412 Ma 之前(郭召杰等,2006;于福生等,2006)。王立社等(2009)对火石山哈尔根头口布花岗岩岩体进行了年龄测试,所得年龄为  $387.6 \pm 8.2$  Ma,为中泥盆世晚期,本次对营毛沱花岗岩所测的得年龄  $384.7 \pm 7.7$  Ma,也为中泥盆世晚期。结合区域地质背景、岩体构造特征及岩石地球化学特征,认为营毛沱地区泥盆纪花岗岩类可能形成于北山早古生代洋盆碰撞造山后拉伸环境,并标志北山地区进入新的构造演化阶段,即板内伸展阶段。

6 结论

- (1)通过对营毛沱地区花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究,得出其侵位时间为  $384.7 \pm 7.7$  Ma,为中泥盆世早期。
- (2)岩石地球化学分析结果表明,营毛沱地区

的花岗岩类具有偏铝质-过铝质、碱性-钙碱性特征,具有中等  $\text{SiO}_2$  (62.1%~72.92%) 含量,较高的  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (5.4%~9.12%) 含量;球粒陨石标准化分配模式图上,具有相对平缓的富集轻稀土元素稀土配分模式,重稀土元素分馏不明显, Eu 具有弱负异常的特征;在微量元素原始地幔标准化蛛网图上,具有亏损 Nb、Ba、P、Ti,富集 Rb、Pb、K 的特征。

(3)主微量元素对比可知,花岗岩类具有 I 型或 I-A 型过渡花岗岩的特点,结合区域地质分析,营毛沱地区的花岗岩类形成于北山早古生代洋盆碰撞造山后拉伸环境,标志北山地区在中泥盆世进入新的构造演化阶段,即板内伸展阶段。

**致谢:**感谢西北大学大陆动力学实验室在锆石 U-Pb 定年中给予的帮助与支持!

### 参考文献 (References):

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192: 59-79
- Collins W T. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to Southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189-200
- Ludwig KR. Isoplot/Ex Version 2.02, 2002. A geochronological tool-kit for microsoft excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1a
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace-element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956-983
- Pearce J A. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19: 120-125
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society London Special Publication, 42: 313-345
- Xie W, Song X Y, Deng Y F, Wang Y S, Ba D H, Zheng W Q, Li X B. 2012. Geochemistry and petrogenetic implications of a Late Devonian mafic ultramafic intrusion at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 144-145: 209-230
- 龚全胜, 刘明强, 李海林, 梁明宏, 代文军. 2002. 甘肃北山造山带类型及基本特征. *西北地质*, 35(3): 28-34
- 龚全胜, 刘明强, 梁明宏, 李海林. 2003. 北山造山带大地构造相及构造演化. *西北地质*, 36(1): 11-17
- 郭召杰, 史宏宇, 张志诚, 张进江. 2006. 新疆甘肃交界红柳河蛇绿岩中伸展构造与古洋盆演化过程. *岩石学报*, 22(1): 95-102
- 何世平, 周会武, 任秉琛, 姚文光, 付力浦. 2005. 甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化. *西北地质*, 38(3): 6-15
- 李舫, 王涛, 童英, 洪大卫, 欧阳志侠. 2009. 北山柳园地区双峰山早泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造演化意义. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 407-422
- 李舫, 王涛, 童英, 王彦斌, 洪大卫, 欧阳志侠. 2011. 北山辉铜山泥盆纪钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、成因及构造意义. *岩石学报*, 27(10): 3055-3070
- 李献华, 刘颖, 涂湘林, 胡光黔, 曾文. 2002. 硅酸盐岩石化学组成

的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比. *地球化学*, 31(3): 289-294

- 李向民, 余吉远, 王国强, 武鹏, 周志强. 2011. 甘肃北山红柳园地区泥盆系三个井组合墩墩山群 LA-LCP-MS 锆石 U-Pb 测年及其意义. *地质通报*, 30(10): 1501-1507
- 刘雪亚, 王荃. 1995. 中国西部北山造山带的大地构造及其演化. *地质研究*, 28: 37-48
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. *地球化学*, 25(6): 552-558
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. *地球化学*, 33(5): 459-464
- 毛景文, 王志良. 2000. 中国东部大规模成矿时代及其动力学背景的初步探讨. *矿床地质*, 19(4): 289-297
- 聂凤军, 江思宏, 白大明, 王新亮, 苏新旭, 李景春, 刘妍, 赵省民. 2002a. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向. 北京: 地质出版社, 1-499
- 聂凤军, 江思宏, 刘妍, 陈文. 2002b. 甘肃花牛山东钾长花岗岩  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素年龄及其地质意义. *地质科学*, 37(4): 415-422
- 王立社, 杨建国, 谢春林, 王育习, 雷永孝, 曹红霞, 杨鹏飞, 齐亚林. 2009. 甘肃北山火山岩头口布花岗岩年代学、地球化学及其地质意义. *地质学报*, 83(3): 377-387
- 杨合群, 李英, 李文明, 杨建国, 赵国斌, 孙南一, 王小红, 谭文娟. 2008. 北山成矿构造背景概论. *西北地质*, 41(1): 22-27
- 杨合群, 李英, 李文明, 杨建国, 赵国斌, 王小红. 2009. 北山花岗岩 S 型/I 型空间变化规律及含矿性. *地球学报*, 30(5): 627-633
- 杨合群, 赵国斌, 李文明, 杨建国, 李英, 王小红, 姜寒冰, 谭文娟. 2010. 内蒙古盘陀山—鹰嘴红山含钨花岗岩带形成时代及源区示踪. *地质与勘探*, 46(3): 407-413
- 杨建国, 王磊, 王小红, 谢燮, 齐正广. 2012. 甘肃北山地区黑山铜镍矿化基性-超基性杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义. *地质通报*, 31(2-3): 448-454
- 于福生, 李金宝, 王涛. 2006. 东天山红柳河地区蛇绿岩 U-Pb 同位素年龄. *地球学报*, 27(3): 213-216
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. *科学通报*, 48(4): 1511-1520
- 张文, 冯继承, 郑荣国, 吴泰然, 罗红玲, 贺元凯, 荆旭. 2011. 甘肃北山音凹峡花岗岩体的锆石 LA-LCP-MS 定年及其构造意义. *岩石学报*, 27(6): 1649-1661
- 赵泽辉, 郭召杰, 王毅. 2007. 甘肃北山柳园地区花岗岩类的年代学、地球化学特征及构造意义. *岩石学报*, 23(8): 1847-1860
- 左国朝. 1983. 西秦岭泥盆纪构造——构造带及地壳演化. *甘肃地质* (2), 99-109
- 左国朝, 何国琦. 1990. 北山板块构造及成矿规律. 北京: 北京大学出版社, 1-209
- 左国朝, 李茂松. 1996. 甘蒙北山地区早古生代岩石圈形成和演化. 兰州: 甘肃科学技术出版社
- 左国朝, 刘义科, 刘春燕. 2003. 甘新蒙北山地区构造格局及演化. *甘肃地质学报*, 12(1): 1-15
- 左国朝, 刘义科, 李绍雄. 2010. 甘肃北山地区红山铁矿床成因及成矿机制. *甘肃地质*, 19(3): 9-18.
- 左国朝, 刘义科, 李绍雄. 2011. 甘肃省北山地区罗雅楚山—大红山一带区域构造格局、褶皱样式及断裂系. *甘肃地质*, 20(1): 6-15

(本文责任编辑:刘莹)