

# 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\*

李舫 王涛\*\* 童英 王彦斌 洪大卫 欧阳志侠

LI Shan, WANG Tao\*\*, TONG Ying, WANG YanBin, HONG DaWei and OUYANG ZhiXia

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2009-06-27 收稿, 2010-10-10 改回.

Li S, Wang T, Tong Y, Wang YB, Hong DW and Ouyang ZX. 2011. Zircon U-Pb age, origin and its tectonic significances of Huitongshan Devonian K-feldspar granites from Beishan orogen, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10):3055–3070

**Abstract** LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields a  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age of  $397 \pm 3\text{Ma}$  (MSWD = 1.1) for the Huitongshan K-feldspar granite, and is interpreted as the emplacement age. Major and trace elements show a transition feature from high-K calc-alkaline or high-fractionated I-type granite to A-type granite. Their  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  values are between -1.3 and +1.2,  $t_{\text{DM}}$  values of 960Ma to 1530Ma; zircon  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values from -1.0 to +5.8, and  $t_{\text{DM2}}$  from 1024Ma to 1455Ma. Integration analysis of structural pattern, geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope, as well as regional geology suggest that this granitic pluton was emplaced in a post-orogenic setting or a late stage of syn-orogenic setting. The granitic magmas were, probably originated from crystallization/differentiation of earlier calc-alkaline granodioritic magmas formed by partial melting of juvenile crust (maybe oceanic crust, island arc or accretionary wedge) due to underplated mantle-derived magmas. Early-middle Devonian granites show associate characteristics of high-fractionated I-type, I-A type and A-type. Therefore, Paleozoic magmatism transformed from syn-orogenic I/S type into I-A type feature at about 397Ma in the Beishan area and tectonic setting has transformed into a post-orogenic extensional setting or a late-stage of syn-orogenic setting.

**Key words** Zircon U-Pb dating; High-fractionated I-A type granite; Sr, Nd, Hf isotope; Tectonic setting; Beishan orogen

**摘要** LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,北山柳园地区辉铜山钾长花岗岩的形成年龄为  $397 \pm 3\text{Ma}$  (MSWD = 1.1)。地球化学特征显示为高钾钙碱性的高分异 I 型花岗岩到 A 型花岗岩过渡的特征。其全岩  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 -1.3 ~ +1.2, Nd 模式年龄( $t_{\text{DM}}$ )为 960 ~ 1530Ma; 锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -1.0 ~ +5.8, 两阶段 Hf 模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )为 1024 ~ 1455Ma。地质背景、地球化学和同位素综合分析显示,辉铜山岩体为造山后伸展拉张背景下,幔源岩浆底侵导致上覆年轻地壳(可能为洋壳、岛弧建造或增生楔物质)部分熔融形成的钙碱性花岗岩长质岩浆经进一步演化及结晶分异形成。北山南带地区早-中泥盆世花岗岩显示出高分异钙碱性 I 型花岗岩、I-A 型花岗岩和 A 型花岗岩的组合特征。因此,在 397Ma 左右,北山地区古生代岩浆已经从 I 型或 S 型转化为 I-A 型特征,构造环境转化为后造山或同造山晚期的伸展环境。

**关键词** 锆石 U-Pb 年龄;高分异 I-A 型花岗岩;Sr、Nd、Hf 同位素;构造环境;北山造山带

**中图法分类号** P588.121; P597.3

中亚造山带是世界上最大的显生宙增生型造山带和大陆地壳生长地区,是研究大陆增生作用的天然实验室,也是近年来国际地质研究的热点之一。近年来,认识到晚古生代晚期是中亚造山带一个重要的动力学转折阶段(Colamen,

1989; Sengör *et al.*, 1993; Sengör and Natal'in, 1996; Windley *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2004, 2008a, b, 2009; 李锦轶等, 2006a, b, c; Li, 2006; 肖文交等, 2006; Jahn *et al.*, 2000, 2004; Hong *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006)。在中亚地区发

\* 本文受国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411307)、中国地质调查局项目(1212010611803)和中俄国际合作基金(40472101)联合资助。

第一作者简介:李舫,男,1983年生,博士研究生,岩石学专业,E-mail:lishan428@163.com

\*\* 通讯作者:王涛,男,博士生导师,从事花岗岩、构造地质研究,E-mail:taowang@cags.net.cn

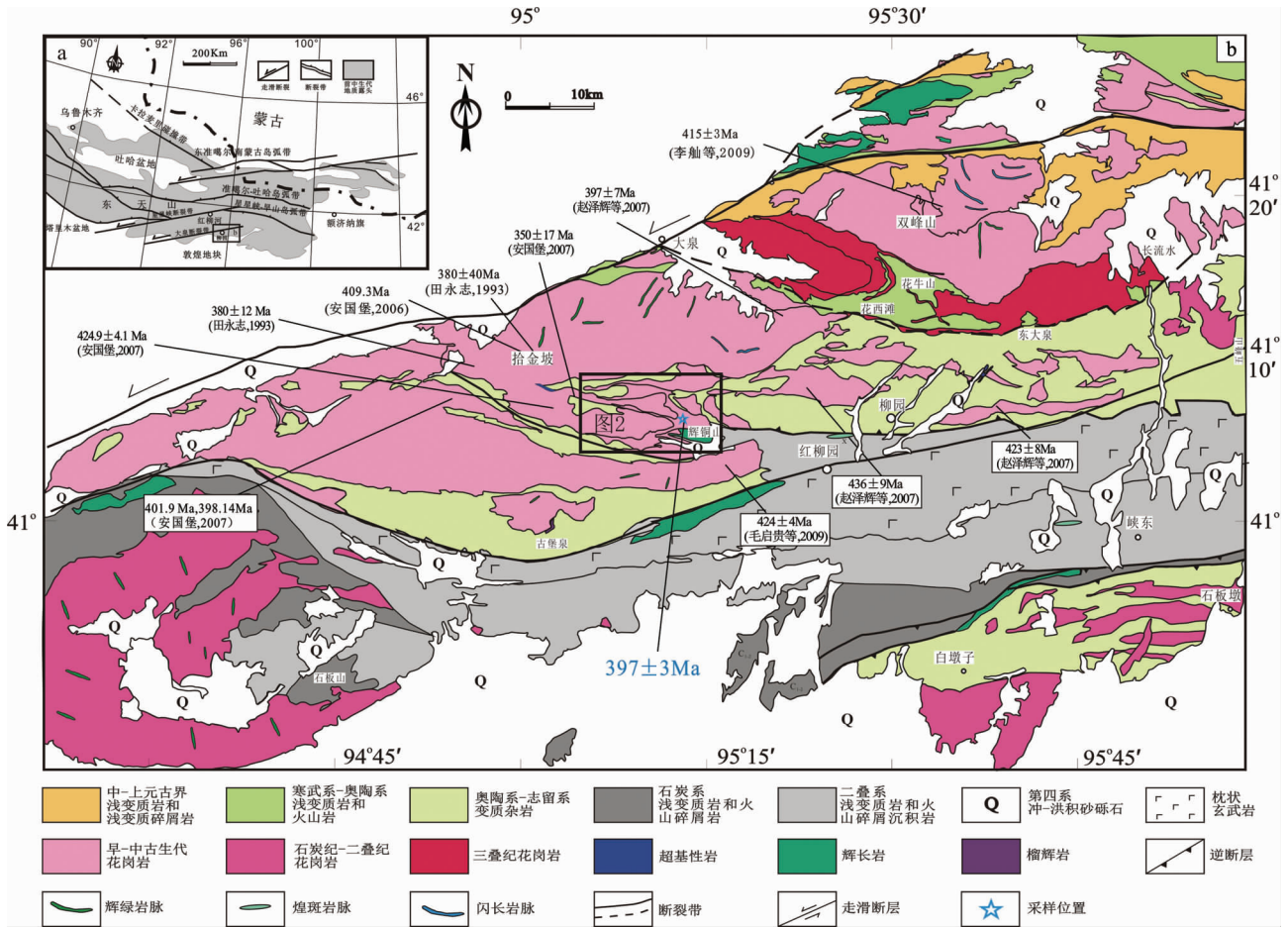


图1 北山及邻区构造简图(a, 据李锦轶等, 2006a 修改)和北山柳园地区地质简图(b, 据甘肃省地质局, 1966<sup>①</sup>, 1967<sup>②</sup>, 1974<sup>③</sup>; 李舳等, 2009 修编)

图中所标年龄均为锆石 U-Pb 年龄

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Beishan and adjacent orogens (a, modified after Li *et al.*, 2006a) and geological sketch map of the Liuyuan area, in Beishan, Gansu (b, modified after Li *et al.*, 2009)

现了大量的石炭纪-二叠纪后造山或后碰撞岩浆作用的纪录 (韩宝福等, 1999, 2006; Wu *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2004; Hong *et al.*, 2004; Kovalenko *et al.*, 2004; 王京彬等, 2006; 顾连兴等, 2006; 王涛等, 2005, 2008; 童英等, 2006), 而对早-中新生代泥盆纪后造山或后碰撞岩浆活动的研究甚少, 从而制约了对整个晚古生代岩浆-构造演化的认识。因此, 对泥盆纪后造山或后碰撞岩浆作用的研究, 对于深入认识古亚洲洋消减闭合过程、增生造山作用及构造演化等问题具有重要的地质意义。

阿尔泰 (Wang *et al.*, 2006; 童英等, 2007)、准噶尔-吐哈 (韩宝福等, 2006; 李锦轶等, 2006c) 和东天山 (王涛等, 2008; 顾连兴等, 2006) 泥盆纪岩浆活动主要表现为同造山特点。

新甘蒙交汇处的北山地区泥盆纪岩浆作用及构造演化问题的研究程度相对较低, 岩浆活动的时限、成因、构造环境等问题还不十分清楚。特别是同造山晚期阶段花岗质岩浆活动具有什么样的特征, 反映的演化特征是什么? 本文选取了柳园地区辉铜山岩体为研究对象, 通过锆石 U-Pb 年代学, 锆石 Hf 同位素, 岩石地球化学及 Sr-Nd 同位素研究, 探讨该区同造山晚期泥盆纪花岗岩的特征、成因及构造环境, 为深入了解古生代构造岩浆演化及构造环境的转变提供依据。

## 1 地质背景

北山造山带位于中亚造山带南缘及华北板块、塔里木板

① 甘肃省地质局. 1966. 1:20 万星星峡幅地质图

② 甘肃省地质局. 1967. 1:20 万柳园幅地质图

③ 甘肃省地质局. 1974. 1:20 万方山口幅地质图

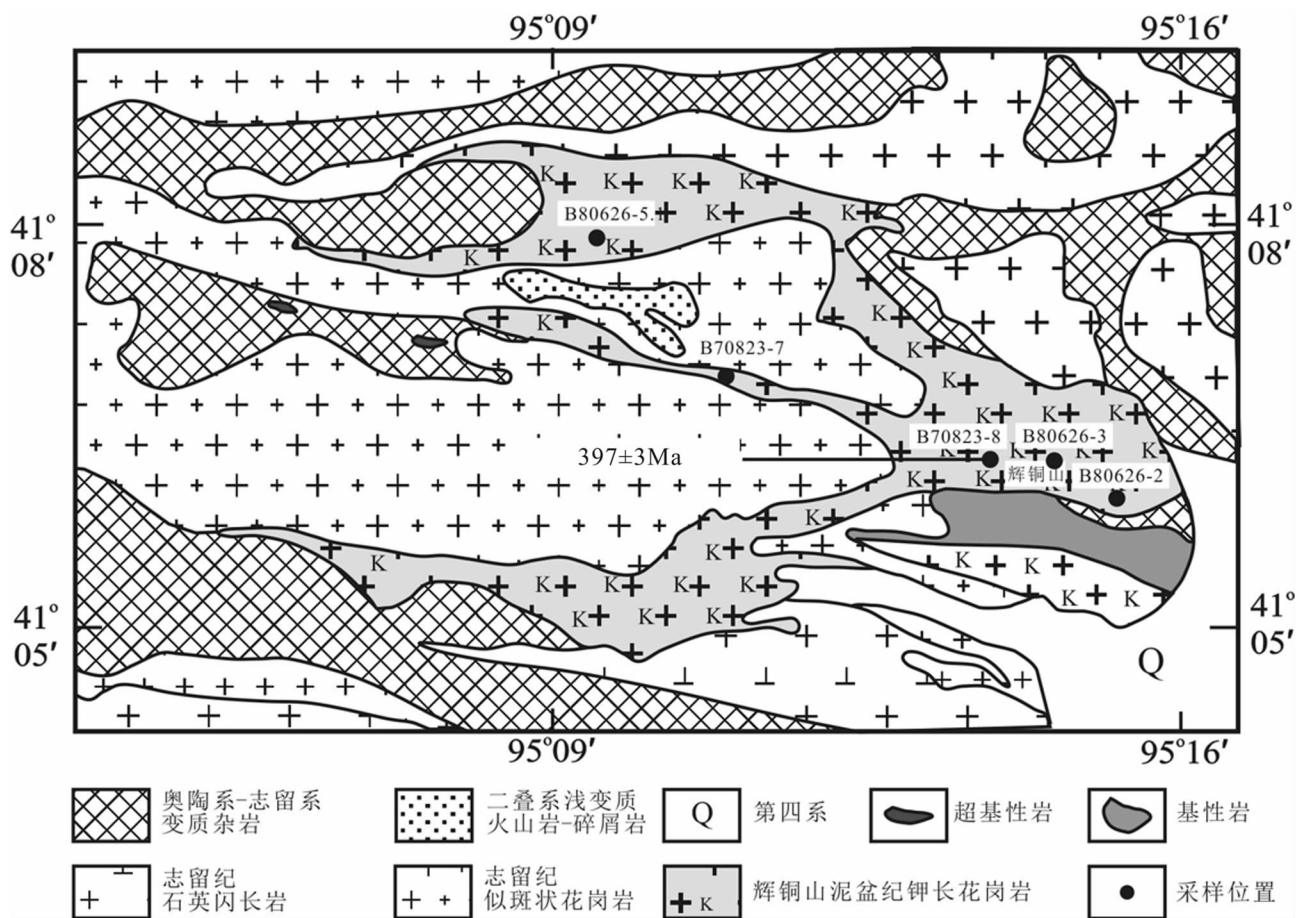


图2 辉铜山岩体地质简图(据甘肃省地质局,1967;江思宏等,2003 修编)

Fig.2 Geological sketch map of the Huitongshan plutons(modified after Jiang *et al.* , 2003)

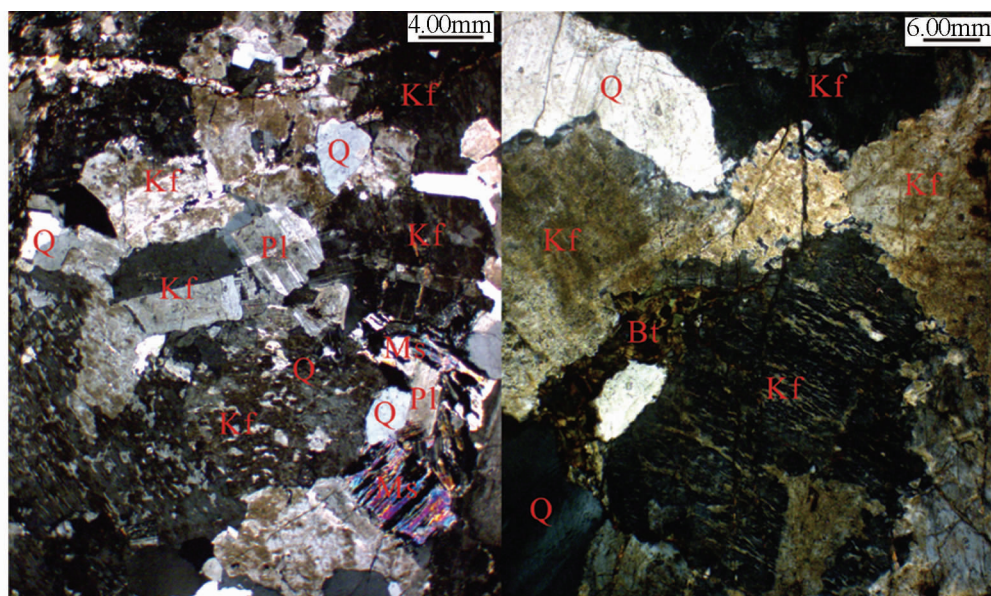


图3 辉铜山钾长花岗岩显微照片

Fig.3 Microphotographs of K-feldspar granites from the Huitongshan

块、西伯利亚板块的交汇部位,是研究中亚造山带造山作用和演化的关键部位之一(图1)。重要的构造位置、复杂的构造格局与演化历史,导致了对北山造山带大地构造归属认识长期存在争议。

关于北山大地构造归属及划分有不同的认识(左国朝和何国琦,1990;左国朝等,2003;Zuo *et al.*, 1991;刘雪亚和王荃,1995;聂凤军等,2002;龚全胜等,2002,2003;何世平等,2005)。根据李锦轶等(2006a)的意见,以红柳河-白云山-小黄山碰撞带、康古尔塔格-碧玉山碰撞带及克拉麦里碰撞带为界,北山造山带由南向北依次划分为敦煌地块、星星峡-早山岛弧带、准噶尔-吐哈岛弧带和东准噶尔-南蒙古岛弧带。

研究区位于北山造山带南部敦煌地块北缘和红柳河-火山-牛圈子早古生代蛇绿混杂岩带南缘,黑石山-大泉断裂以东和古堡泉-红柳园-石板敦断裂以西柳园地区(图1)。区内侵入岩出露广泛,基性-超基性侵入岩呈零星分布(左国朝和何国琦,1990;刘雪亚和王荃,1995;张新虎,1993;聂凤军等,2002);中酸性侵入岩呈岩基、岩株和岩脉状近EW向产出,从石英闪长岩-花岗闪长岩-钾长花岗岩均有出露,以早-中生代花岗岩为主(田永志,1993;安国堡,2006,2007;赵泽辉等,2007;李舳等,2009;毛启贵等,2009)。该区多出露走向近EW、NE和NW向中基性岩脉(刘畅等,1996;安国堡,2007)。柳园南断陷带内发育近东西展布的镁铁-超镁铁质岩,特别是大量枕状玄武岩(赵泽辉等,2006;姜常义等,2007;潘金花等,2007)。区内主断裂走向为EW和NE向,以逆冲断裂和走滑断裂为主。区域内出露中-上元古界浅变质碎屑岩,寒武系-奥陶系火山岩和浅变质碎屑岩,奥陶系-志留系变质杂岩,石炭系-二叠系火山-沉积岩(左国朝和何国琦,1990)。

## 2 岩体地质及岩相学特征

辉铜山岩体出露面积约20km<sup>2</sup>,侵位于奥陶系-志留系变质杂岩和拾金坡晚志留世似斑状花岗闪长岩-二长花岗岩(图2)中,岩体与围岩的边界平直或呈锯齿状。岩体呈岩枝、岩株状产出,岩体边界和围岩未观察到变形。岩体中发育围岩的残留顶盖和捕虏体,基性包体和脉岩少见,在岩体与地层的接触带中产有辉铜山铜矿。

辉铜山岩体的岩性较单一,主要岩石类型为钾长花岗岩,呈砖红色,中-细粒花岗结构,块状构造,主要矿物为石英(25%~35%)、斜长石(10%~20%)、钾长石(50%~60%)和黑云母(3%~5%),有些样品含少量白云母(1%~3%)。标准矿物中出现刚玉,显示铝过饱和的特点。斜长石发育聚片双晶,多已绢云母化;钾长石以条纹长石为主,部分为正长石,发育卡斯巴双晶,多已泥化,部分具碳酸盐化。黑云母,Ng=褐色,Np=浅黄色,部分已绿泥石化。白云母无色,片状,有些白云母与铁质矿物呈黑云母假象(白云母可能不是原生的,是黑云母分解形成的)。副矿物有锆石、磷灰石、磁

铁矿等(图3)。

## 3 测试方法及测试结果

### 3.1 测试方法

样品的常量元素和微量元素分析由中国地质大学(北京)地质实验中心完成。FeO采用标准湿化学法测定,其它常量元素分析使用美国利曼公司PS-950型发射光谱ICP-AES测定。微量元素分析使用英国质谱公司生产的Agilent7500a型等离子质谱仪测定(详细分析方法可参见Han *et al.*, 2007)。Rb-Sr和Sm-Nd同位素测定在中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室完成,其详细的分析技术和流程参阅Qiao(1998)。

样品的锆石分选是在廊坊河北省区域地质调查研究院进行。辉铜山样品(B70823-8)锆石制靶与阴极发光(CL)照相在北京离子探针中心进行。

LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄和锆石原位Lu-Hf同位素测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。所用仪器为英国NuInstruments公司生产的Nu Plasma HR多接收电感耦合离子体质谱仪,详细的实验原理、流程及数据处理参见Yuan *et al.* (2004,2008)。

### 3.2 测试结果

#### 3.2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

辉铜山钾长花岗岩样品(B70823-8)采自辉铜山矿北。挑选出的锆石颗粒较大(80~220μm),晶形较好,为短柱状和不规则形状,柱状晶体长宽比为1:1~2:1;锆石成分单一,具有较好的生长环带和韵律结构(图4),为典型的岩浆结晶锆石。

对该样品共分析了18个测点(表1、图5)。18个测点除10号点高Th( $2426 \times 10^{-6}$ )、U( $2054 \times 10^{-6}$ )含量外,其余点的Th含量变化范围为 $192.6 \times 10^{-6} \sim 802.7 \times 10^{-6}$ ,U含量

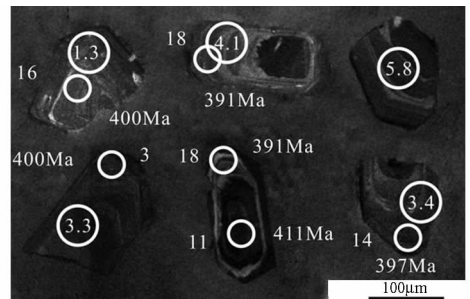


图4 辉铜山钾长花岗岩锆石阴极发光图像

小圆圈为年龄测点,旁边数值为测点编号和年龄值(表1);大圆圈为锆石Hf同位素测点,圈中数值为 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(表4)

Fig. 4 CL images of zircons for the K-feldspar granite from the Huitongshan pluton

表 1 辉铜山钾长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon analyzing results of the K-feldspar granite for the Huitongshan pluton in Beishan area

测点号	同位素含量 ( $\times 10^{-6}$ )				同位素比值				U-Pb 年龄 (Ma)										
	Th	U	Th/U	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	$^{206}\text{Pb}^*$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$						
						$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$						
No 1	282.6	610.2	0.5	0.09	44.083	0.05583	0.00119	0.48154	0.01089	0.06254	0.00090	0.01974	0.00037	446	26	399	7	391	5
No 2	383.8	890.9	0.4	0.2	66.220	0.05640	0.00113	0.50361	0.01086	0.06475	0.00092	0.02080	0.00038	468	24	414	7	404	6
No 3	201.0	420.1	0.5	—	31.172	0.05569	0.00126	0.49165	0.01167	0.06402	0.00092	0.02008	0.00038	440	28	406	8	400	6
No 4	405.3	973.0	0.4	2.54	94.667	0.06469	0.00278	0.69719	0.02809	0.07817	0.00117	0.02393	0.00033	764	93	537	17	485	7
No 5	273.3	638.7	0.4	0.49	46.584	0.05523	0.00217	0.47814	0.01748	0.06279	0.00092	0.01958	0.00025	421	90	397	12	393	6
No 6	329.9	587.1	0.6	1.91	45.747	0.06295	0.00308	0.53553	0.02487	0.06170	0.00095	0.01895	0.00025	707	107	435	16	386	6
No 7	192.6	486.0	0.4	—	36.661	0.05488	0.00124	0.49158	0.01163	0.06495	0.00094	0.02072	0.00041	407	28	406	8	406	6
No 8	545.7	1197	0.5	26.49	189.61	0.06717	0.01177	0.58150	0.0121	0.06279	0.00131	0.01914	0.00105	843	393	465	65	393	8
No 9	802.7	1024	0.8	7.42	106.59	0.08300	0.00546	0.75766	0.04814	0.06620	0.00111	0.01972	0.00030	1269	132	573	28	413	7
No 10	2426	2054	1.2	6.14	221.17	0.08701	0.00644	0.78930	0.05669	0.06579	0.00117	0.01950	0.00028	1361	147	591	32	411	7
No 11	298.7	409.5	0.7	2.95	34.914	0.07430	0.00425	0.64011	0.03511	0.06248	0.00102	0.01883	0.00026	1050	118	502	22	391	6
No 12	418.6	696.3	0.6	—	54.193	0.05605	0.00143	0.50023	0.01319	0.06471	0.00096	0.02039	0.00045	454	33	412	9	404	6
No 13	419.0	985.1	0.4	6.39	87.995	0.05682	0.00412	0.49766	0.03517	0.06352	0.00103	0.01974	0.00032	485	165	410	24	397	6
No 14	534.7	1014	0.5	7.65	90.609	0.06193	0.00501	0.51020	0.04034	0.05975	0.00101	0.01839	0.00030	672	179	419	27	374	6
No 15	343.1	795.7	0.4	0.05	58.741	0.05742	0.00158	0.50730	0.01430	0.06407	0.00097	0.02005	0.00048	508	36	417	10	400	6
No 16	387.4	616.7	0.6	—	48.475	0.05565	0.00159	0.49351	0.01432	0.06431	0.00098	0.02129	0.00051	438	38	407	10	402	6
No 17	386.2	822.6	0.5	0.13	59.960	0.05669	0.00162	0.48884	0.01424	0.06252	0.00095	0.01982	0.00049	479	38	404	10	391	6
No 18	363.3	688.9	0.5	0.3	52.659	0.05938	0.00176	0.52650	0.01585	0.06429	0.00099	0.02066	0.00052	581	39	429	11	402	6

注:表中数据均进行普通铅 $^{204}\text{Pb}$ 校正, $^{206}\text{Pb}_c$ 和 $^{206}\text{Pb}^*$ 分别为普通和放射性 $^{206}\text{Pb}$ 部分

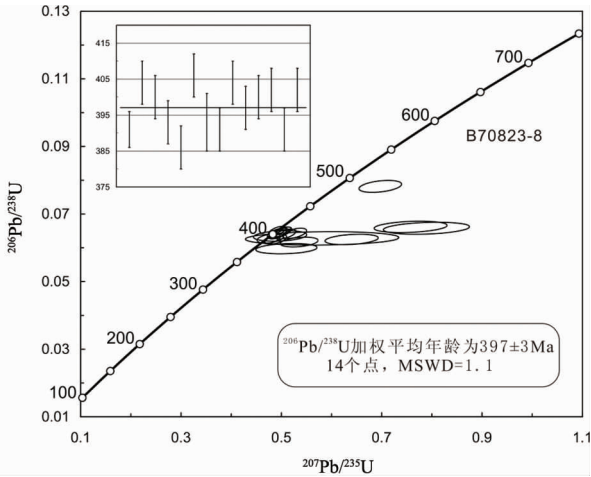


图5 辉铜山钾长花岗岩(B70823-8) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Concordia diagram of LA-ICP-MS zircons U-Pb isotopic data for the K-feldspar granite (sample B70823-8) from the Huitongshan pluton

变化范围为  $409.5 \times 10^{-6} \sim 1197 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值为 0.4 ~ 0.8, Th/U 比值都大于 0.4, 显示岩浆锆石的特征(吴元保和郑永飞, 2004)。18 个分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值在 374 ~ 485Ma 之间。其中 3 个点(4、9、10)的年龄值偏老(411 ~ 485Ma)。这些点多位于锆石的核部, 而且这些点具有相对高的 Th、U 含量, 为继承锆石或俘获锆石的年龄; 另外一个点(14)年龄偏小(374Ma), 可能与其放射性铅的丢失有关, 从而导致年龄数据偏低, 因此这些点不用于加权平均年龄计算。对于年龄比较集中的 14 个数据点进行  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均计算, 其加权平均值为  $397 \pm 3\text{Ma}$  (MSWD = 1.1) (图 5), 可解释为该岩体的形成年龄。

### 3.2.2 地球化学

据辉铜山岩体的地球化学分析结果(表 2), 该花岗岩具有高硅 ( $\text{SiO}_2 = 73.61\% \sim 77.31\%$ )、碱 ( $\text{K}_2\text{O} = 3.44\% \sim 5.00\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 3.66\% \sim 4.99\%$ ) 和  $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$  值 (3.14 ~ 19.58), 低  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12.15% ~ 13.84%) 和  $\text{FeO}^{\text{T}}$  (0.98% ~ 1.54%), 贫 CaO (0.23% ~ 0.84%) 和 MgO (0.07% ~ 0.37%) 的特征。里特曼指数 1.97 ~ 2.55, 碱度率 (AR) 为 3.58 ~ 5.19, 显示碱性至钙碱性过渡的特点, 在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解中(图 6a)显示高钾钙碱性系列的特征。其 A/NK 为 1.1 ~ 1.2, A/CNK 为 0.97 ~ 1.07, 为准铝质-弱过铝质花岗岩的特点(图 6b)。分异指数 (DI) 为 93.8 ~ 96.6, 平均为 95.1; 固结指数 (SI) 为 0.7 ~ 3.7, 平均为 1.8, 反映岩浆具有较高的结晶分异程度。

辉铜山岩体的稀土元素总量较高 ( $\sum \text{REE} = 156.2 \times 10^{-6} \sim 269.6 \times 10^{-6}$ )。轻重稀土分馏不十分明显 ( $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 3.97 \sim 5.71$ ), 与重稀土元素相比略富轻稀土元素, 且轻稀土元素 ( $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 2.80 \sim 3.38$ ) 较重稀土元素 ( $(\text{Gd}/$

表 2 辉铜山花岗岩主要元素 (wt%) 和微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 分析结果

Table 2 Major element (wt%) and trace element ( $\times 10^{-6}$ ) compositions of the granites from the Huitongshan

样品号	B70823-7	B70823-8	B80626-2	B80626-3	B80626-5.1
SiO <sub>2</sub>	77.31	75.41	73.61	74.45	75.61
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.17	0.25	0.22	0.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.43	12.15	13.84	13.04	12.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.61	0.74	0.62	1.51	0.49
FeO	0.43	0.59	0.61	0.18	0.65
MnO	0.00	0.02	0.01	0.00	0.03
MgO	0.19	0.07	0.37	0.08	0.20
CaO	0.30	0.78	0.57	0.23	0.84
Na <sub>2</sub> O	3.83	4.34	4.99	4.65	3.66
K <sub>2</sub> O	5.00	3.67	3.44	4.33	4.41
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.04	0.09	0.04	0.03
Los	0.49	0.97	0.81	0.77	0.89
Total	100.81	99.02	99.28	99.53	99.21
A/NK	1.06	1.09	1.16	1.06	1.13
A/CNK	1.01	0.97	1.07	1.02	0.99
AR	4.02	4.26	3.82	5.19	3.58
FeO <sup>T</sup> /MgO	5.16	18.00	3.14	19.58	5.38
$\sigma$	2.27	1.97	2.31	2.55	1.98
DI	96.63	94.70	93.81	96.32	93.91
SI	1.89	0.74	3.71	0.74	2.15
La	52.20	38.08	28.12	53.10	46.27
Ce	108.26	80.60	59.13	107.49	95.04
Pr	12.15	9.23	6.92	12.25	10.91
Nd	44.51	34.20	25.59	44.70	39.98
Sm	10.19	8.35	6.47	10.15	9.15
Eu	0.44	0.42	0.42	0.44	0.43
Gd	10.01	8.81	6.74	10.53	9.54
Tb	1.68	1.56	1.20	1.69	1.61
Dy	11.00	10.41	8.11	11.19	10.75
Ho	2.32	2.22	1.70	2.34	2.26
Er	6.98	6.53	5.17	6.98	6.73
Tm	1.12	1.10	0.78	1.04	1.00
Yb	6.63	6.50	5.09	6.67	6.24
Lu	0.98	0.96	0.76	0.98	0.91
$\sum \text{REE}$	268.5	209.0	156.2	269.6	240.8
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	5.65	4.20	3.97	5.71	5.32
$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	3.31	2.95	2.80	3.38	3.26
$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$	1.25	1.12	1.10	1.31	1.27
$\delta \text{Eu}$	0.13	0.15	0.19	0.13	0.14
Li			9.27	2.99	2.15
Be			6.56	11.36	4.25
Sc	1.45	1.80	3.26	2.58	1.97
V	6.92	6.46	22.92	11.72	7.27
Cr	2.48	3.05	16.00	3.60	5.13
Mn	34.94	154.3	64.98	51.67	201.5
Co	0.56	0.91	2.09	0.96	1.13
Ni	0.04	0.29	7.55	1.74	1.89
Cu	3.78	6.33	13.31	7.57	2.78
Zn	40.21	42.39	61.36	71.64	86.25
Ga	22.94	19.51	25.34	24.82	23.40
Rb	291	205	292	242	240
Sr	38.8	41.2	85.9	61.3	69.8
Zr	205	196	182	226	208
Nb	19.86	22.73	24.42	22.05	20.48
Mo			0.72	1.22	0.77
Cs	4.13	3.97	8.04	3.30	2.37
Ba	137	168	93.1	148	146
Hf	7.12	6.85	6.33	6.86	6.57
Ta	1.60	2.50	2.20	2.00	1.70
Pb	23.91	24.41	16.82	35.76	25.66
Th	38.11	41.08	33.66	47.11	36.99
U	4.48	5.48	4.24	4.15	3.31
Y	64.29	62.15	48.78	65.17	64.36
10000 * Ga/Al	3.49	3.03	3.46	3.60	3.64
Nb/Ta	12.39	9.10	11.08	11.01	12.06
Zr/Hf	28.73	28.66	28.75	32.89	31.59

表 3 辉铜山岩体 Sr、Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions for the granites from the Huitongshan

序号	样品号	岩性	岩体	Age (Ma)	Rb ( $\times 10^{-6}$ )	Sr ( $\times 10^{-6}$ )	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma$	$I_{\text{Sr}}$	Sm ( $\times 10^{-6}$ )	Nd ( $\times 10^{-6}$ )	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ga})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$	数据来源
1	B80626-5-1	钾长花岗岩	辉铜山	397	245.8	68.2	10.487	0.76732	11	0.7080	9.41	40.99	0.1387	0.512425	12	-4.2	-0.29	-1.2	1.47	1.47	1.24	本文
2	B70823-6	钾长花岗岩	辉铜山	397	455.3	19.3	70.685	1.04794	11	0.6483	10.27	59.38	0.1045	0.512463	12	-3.4	-0.47	1.2	0.96	0.96	1.04	本文
3	B70823-7	钾长花岗岩	辉铜山	397	295.1	38.1	22.646	0.81574	12	0.6877												本文
4	B70823-8	钾长花岗岩	辉铜山	397	223.5	41.7	15.631	0.78484	11	0.6965	7.97	33.88	0.1423	0.512453	14	-4.0	-0.28	-1.3	1.53	1.53	1.24	本文
5	B89-318	钾长花岗岩	辉铜山	397	111.9	52.9	6.097	0.74369		0.7092												安国堡, 2007
6	B70823-2	似斑状花岗岩	拾金坡	420	135.2	106.4	3.684	0.72715	18	0.7051	6.15	28.49	0.1306	0.512352	10	-5.6	-0.34	-2.0	1.46	1.46	1.32	本文

注:  $\epsilon_{\text{Nd}} = ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{s}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1) \times 10000$ ,  $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{s}} / ((^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1)$ , 其中 s = sample,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$  和  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1966$ . 模式年龄  $t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln(1 + ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{s}} - 0.51315) / ((^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{s}} - 0.2137))$ .  $t_{\text{DM2}} = t_{\text{DM1}} - (t_{\text{DM1}} - t)(f_{\text{ec}} - f_{\text{s}}) / (f_{\text{ec}} - f_{\text{DM}})$ ;  $f_{\text{ec}}$ ,  $f_{\text{s}}$ ,  $f_{\text{DM}}$  分别为地壳、样品和亏损地幔的  $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$  平均值;  $f_{\text{ec}} = -0.4$ ,  $f_{\text{DM}} = 0.08592$ ,  $t =$  岩体侵位年龄,  $-0.2 < f_{\text{Sm}/\text{Nd}} < -0.6$  采用  $t_{\text{DM1}}$ ,  $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} < -0.6$  或  $> -0.6$  采用  $t_{\text{DM2}}$

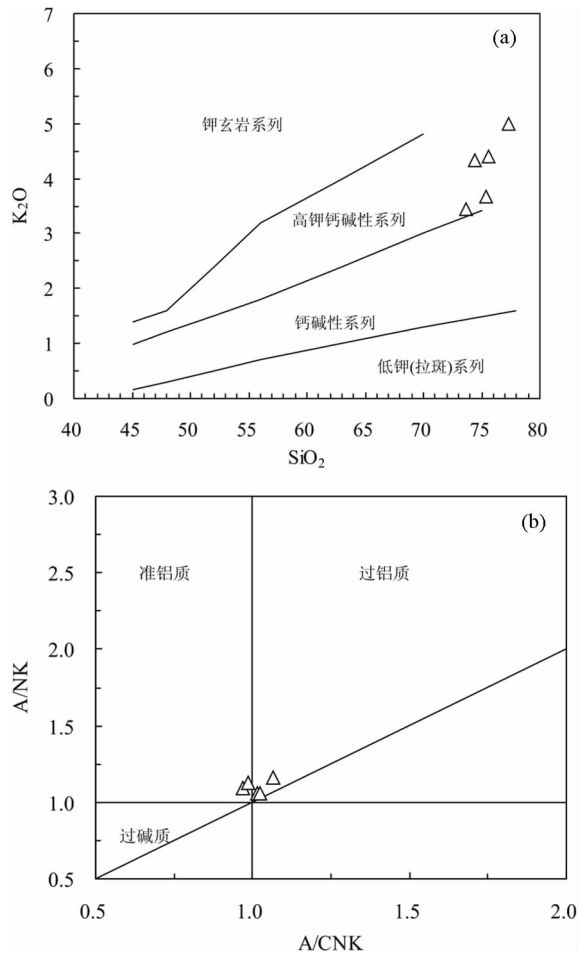


图 6 辉铜山钾长花岗岩主要元素图解 (据 Peccerillo and Taylor, 1976)

(a)  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解; (b)  $\text{A}/\text{NK}$ - $\text{A}/\text{CNK}$  图解

Fig. 6 Major element diagrams for rock types of the Huitongshan K-feldspar granites from the Beishan (after Peccerillo and Taylor, 1976)

$\text{Yb}_N = 1.10 \sim 1.31$ ) 分馏明显;  $\text{Eu}$  负异常明显 ( $\delta\text{Eu} = 0.13 \sim 0.19$ )。在球粒陨石标准化的 REE 图解中 (图 7a), 呈一定程度的“V”字型。在原始地幔标准化的蛛网图解中 (图 7b), 明显富集 Rb、K 等大离子亲石元素及 Zr、Hf 等高场强元素, 强烈亏损 Ba、Sr、P、Eu、Ti 及弱亏损 Ta、Nb 等元素。其  $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  值为  $3.03 \sim 3.65$ 。在 A 型花岗岩判别图中 (图 8), 样品大都位于 A 型与 I、S 型花岗岩区边界附近, 似乎显示了 I、S 型和 A 型过渡的特点。

## 3.2.3 Sr-Nd 同位素

辉铜山岩体 Sr-Nd 同位素测试结果列于表 3。计算时采用的年龄是新测得的锆石年龄 (397Ma)。钾长花岗岩 Sr 的初始比值  $I_{\text{Sr}} = 0.6483 \sim 0.7080$ 。个别  $I_{\text{Sr}}$  小于 0.700 的数值可能与其高 Rb 贫 Sr, 高 Rb/Sr 比值及测试误差过大有关, 所测结果可能没有地质意义 (Jahn *et al.*, 2000)。样品  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值为  $0.512425 \sim 0.512463$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $-1.3 \sim$

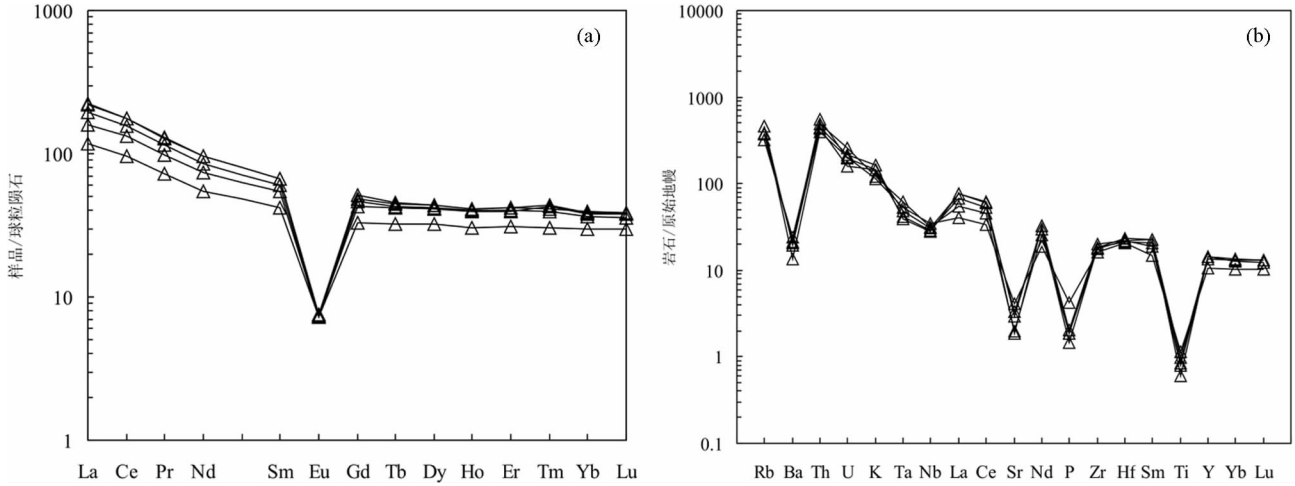


图7 辉铜山钾长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分布模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) (据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution pattern (a) and primitive mantle normalized spidergram (b) for the Huitongshan K-feldspar granites (after Sun and McDonough, 1989)

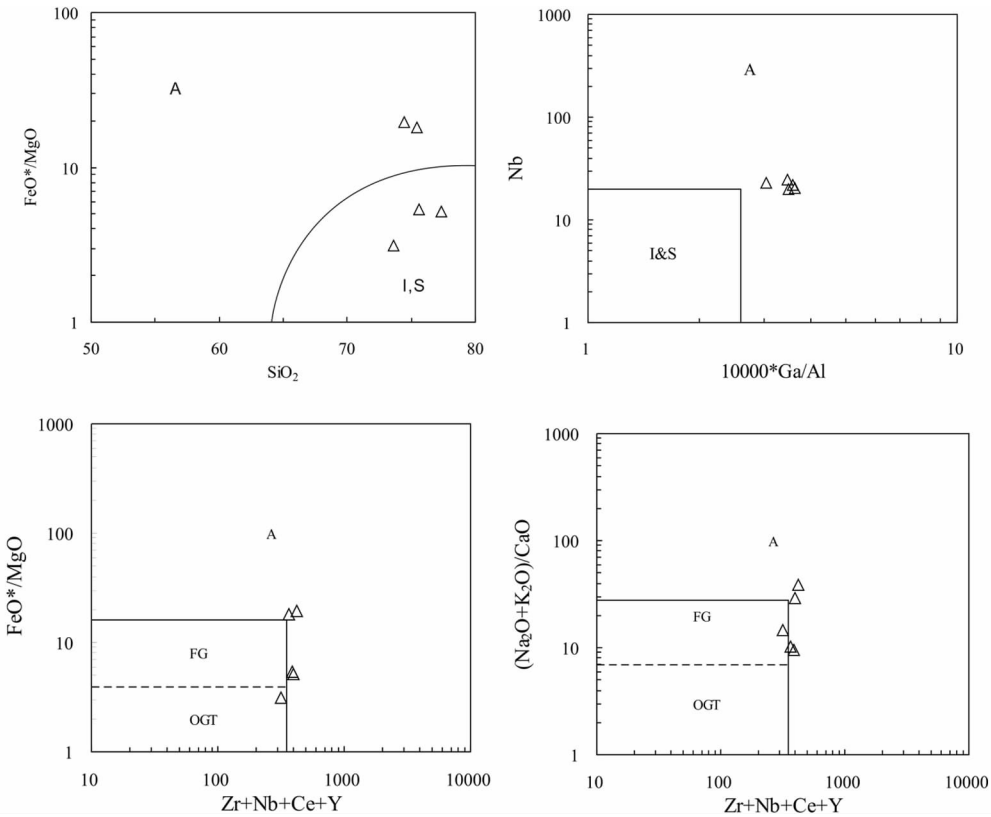


图8 辉铜山钾长花岗岩成因类型判别图(据 Whalen *et al.*, 1987)

I, S, A-I 型、S 型和 A 型花岗岩分布区; FG-分异的 I, S 型花岗岩分布区; OGT-I, S, M 型花岗岩分布区

Fig. 8 Discrimination diagrams for A-type granites from the Huitongshan K-feldspar granites (after Whalen *et al.*, 1987)

+ 1.2, Nd 模式年龄  $t_{DM}$  为 960 ~ 1560 Ma。

### 3.2.4 锆石 Hf 同位素

对上述样品 B70823-8 中的 9 颗锆石进行了 Lu-Hf 同位

素测定(表 4), 其中一个点可能由于放射性成因 Pb 的增加造成年龄偏老, 因此不将其考虑在内。除这个不谐和年龄点外, 其余的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  为 0.282514 ~ 0.282698,  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  为



表 4 辉铜山岩体 LA-MC-ICPMS 锆石原位 Lu-Hf 同位素测定结果

Table 4 Zircon Lu-Hf isotopic LA-MC-ICPMS analyzing results for the granites from the Huitongshan, in Beishan area

测点号	$t$ (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM1}}$ (Hf)	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$t_{\text{DM2}}$ (Hf)
B70823-8-1	397	0.069869	0.002694	0.282641	0.000021	-4.7	3.3	0.8	910	-0.92	1179
B70823-8-2	485	0.038217	0.001348	0.282715	0.000023	-2.1	8.2	0.8	771	-0.96	938
B70823-8-3	397	0.034999	0.001272	0.282622	0.000020	-5.4	3.0	0.7	903	-0.96	1200
B70823-8-4	397	0.029074	0.001046	0.282698	0.000017	-2.7	5.8	0.6	790	-0.97	1024
B70823-8-5	397	0.038009	0.001365	0.282664	0.000019	-3.9	4.5	0.7	845	-0.96	1107
B70823-8-7	397	0.030087	0.001117	0.282631	0.000021	-5.1	3.4	0.7	886	-0.97	1176
B70823-8-8	397	0.066238	0.002095	0.282514	0.000020	-9.2	-1.0	0.7	1079	-0.94	1455
B70823-8-9	397	0.063623	0.002034	0.282580	0.000025	-6.9	1.3	0.9	982	-0.94	1307
B70823-8-10	397	0.033024	0.001202	0.282653	0.000024	-4.3	4.1	0.8	857	-0.96	1128

0.001046 ~ 0.002694。根据该样品锆石平均年龄(397Ma)统一计算的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化于 -1.0 ~ +5.8 之间,两阶段模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )为 1024 ~ 1455Ma。

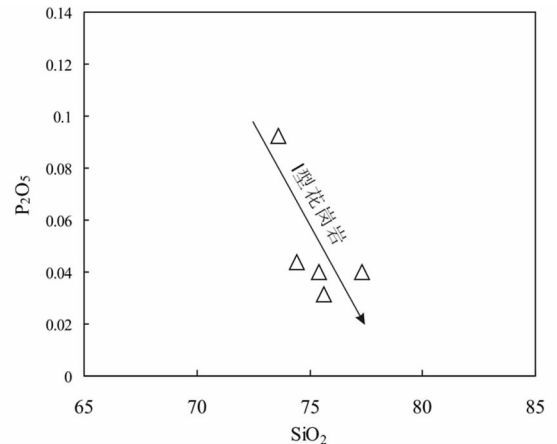
## 4 讨论

### 4.1 岩体成岩年龄及意义

关于辉铜山岩体的成岩年龄一直颇有争议。安国堡(2007)测得锆石 U-Pb 年龄(TIMs 法)为  $350 \pm 17\text{Ma}$ , 全岩 Rb-Sr 年龄为  $350.12 \pm 17\text{Ma}$ 。左国朝和何国琦(1990)依据 1:20 万区域地质调查资料,认为属海西晚期岩浆活动的产物。周良仁和蔡厚维(1992)依据 K-Ar 年龄(239 ~ 190Ma)和 Rb-Sr 年龄(235 ~ 220Ma),认为属印支早期岩浆活动的产物。江思宏等(2003)测得钾长石 Ar-Ar 年龄为  $192 \pm 3\text{Ma}$ 。上述野外和地球化学特征表明,该岩体组成较均一,并不是复式岩体。所以,上述不同的测年结果所反映的构造热事件的意义还有待于研究和核实。

本次 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得了较好的结果,其中一个点的年龄较老(485Ma)可解释为捕获锆石或继承锆石年龄。另外两个年龄在 411 ~ 413Ma 之间残留锆石核的年龄与其周围的二长花岗岩和似斑状花岗岩的年龄(安国堡,2007)一致,也可能是捕获锆石年龄。年龄集中的 14 个点获得了较好的结果( $397 \pm 3\text{Ma}$ ),代表该岩体的成岩年龄。而上述 350Ma 左右的 U-Pb 年龄和 Rb-Sr 年龄与周围拾金坡金矿和辉铜山铜矿的成矿年龄相近,并且也发育同期的辉绿岩脉(351Ma),可能与其后期构造-岩浆热事件有关(安国堡,2007)。

以往多认为柳园地区的花岗岩类岩石形成于晚古生代(海西中晚期)(左国朝和何国琦,1990;穆治国等,1992;聂凤军等,2002;江思宏和聂凤军,2006)。最新的锆石 U-Pb 年龄资料显示柳园地区花岗岩主要为早-中古生代(442 ~ 350Ma)(田永志,1993;安国堡,2006,2007;赵泽辉等,2007;李舫等,2009;毛启贵等,2009)。本文的研究进一步确定了该区早中古生代花岗岩的发育。

图 9 辉铜山钾长花岗岩  $\text{SiO}_2$ - $\text{P}_2\text{O}_5$  相关图Fig. 9  $\text{SiO}_2$ - $\text{P}_2\text{O}_5$  discriminate diagram of the Huitongshan K-feldspar granites

### 4.2 岩浆物源及成因探讨

辉铜山岩体 A/CNK 为 0.97 ~ 1.07 小于 1.1,且没有出现富铝的硅酸盐矿物,因此不具有 S 型花岗岩的特点。在  $\text{SiO}_2$ - $\text{P}_2\text{O}_5$  图上(图 9),该花岗岩的  $\text{SiO}_2$  与  $\text{P}_2\text{O}_5$  呈负相关关系,显示似 I 型花岗岩的演化趋势。岩体具有高硅,高碱,高  $\text{FeO}^*/\text{MgO}$  值和  $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  值,低  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 贫 CaO 和 MgO 的特征;富集 Rb、K 等大离子亲石元素(LILE)及 Zr、Hf 等高场强元素(HFSE),强烈亏损 Ba、Sr、P 等元素,具显著的 Eu 负异常,似乎与 A 型花岗岩较为相似。然而其较高的  $\Sigma\text{REE}$  值( $156.2 \times 10^{-6} \sim 269.6 \times 10^{-6}$ )及亏损 Ta、Nb 又似乎与典型 A 型花岗岩不同。在 A 型花岗岩判别图解中(图 8),样品位于 I、S 型或高分异花岗岩与 A 型花岗岩边界附近,显示其过渡的特点。这似乎有高分异 I 型花岗岩(或 I-A 型过渡花岗岩特点,特别是 Ba 的强亏损)。如果这样,该岩体中出现少量的白云母(除了一些次生的以外)可能也是这种高分异作用的产物,这也类似很多高分异成因的含白云母的 I 型花岗岩(Wu *et al.*, 2003; Jahn *et al.*, 2001)。此外,样品在  $(\text{Zr} + \text{Ce} + \text{Y}) - (\text{Rb}/\text{Ba})$  图解中(图 10a),大部分落在分异 I 型与

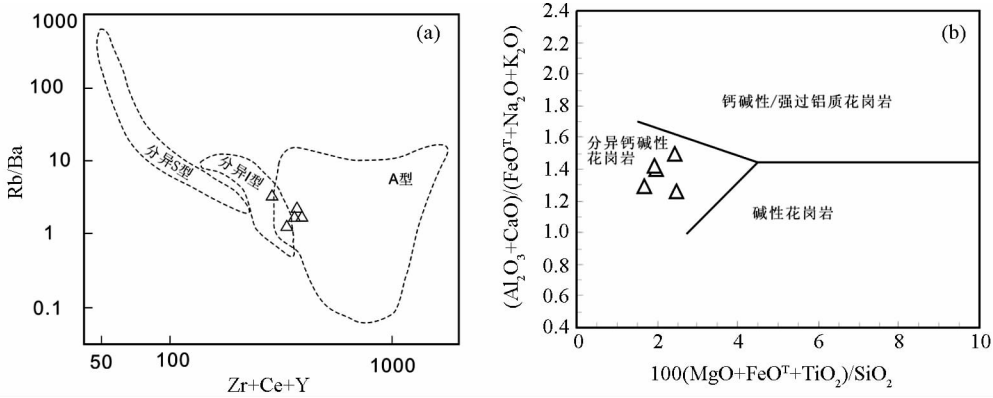


图 10 (Zr + Ce + Y)-(Rb/Ba) 图解 (a) 和  $100(\text{MgO} + \text{FeO}^{\text{T}} + \text{TiO}_2)/\text{SiO}_2 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO})/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  图解 (b) (据 Sylvester, 1989)

Fig. 10 (Zr + Ce + Y)-(Rb/Ba) diagram (a) and  $100(\text{MgO} + \text{FeO}^{\text{T}} + \text{TiO}_2)/\text{SiO}_2 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO})/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  diagram (b) (after Sylvester, 1989)

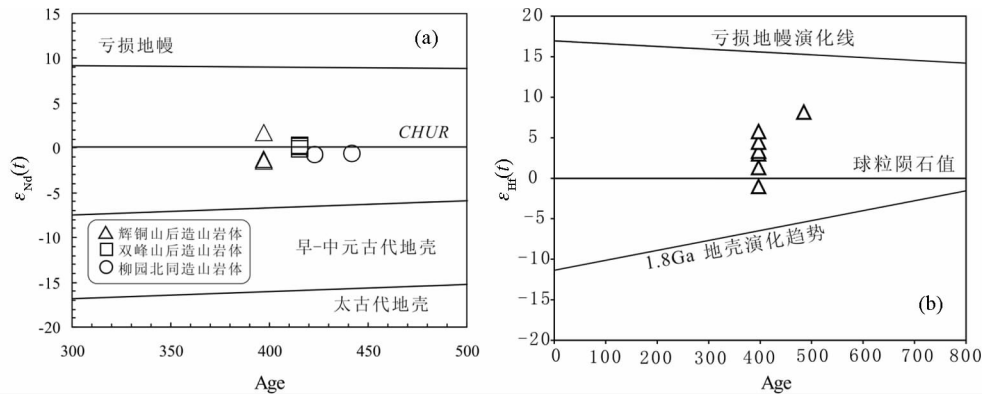


图 11 辉铜山钾长花岗岩侵位年龄- $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (a) 和侵位年龄- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值 (b)

Fig. 11 Intrusive age- $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  value (a) and intrusive age- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  value (b) diagrams for the Huitongshan K-feldspar granites

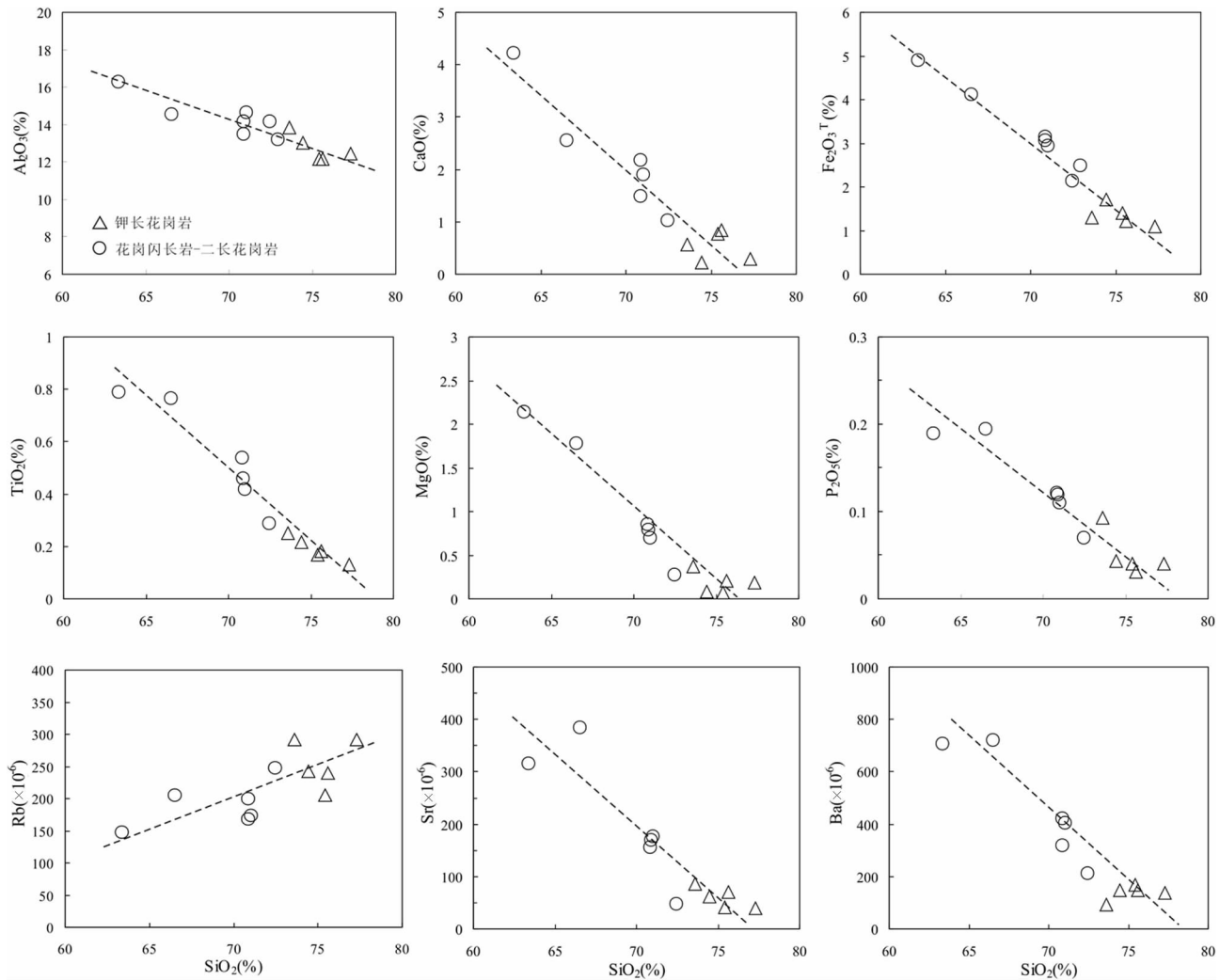
A 型花岗岩过渡区域内; 在  $100(\text{MgO} + \text{FeO}^{\text{T}} + \text{TiO}_2)/\text{SiO}_2 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO})/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  图解中 (图 10b), 所有样品都落在高分异钙碱性花岗岩的区域, 进一步表明辉铜山花岗岩应属于具有 I-A 型过渡特点的高分异钙碱性花岗岩, 而不是典型的 A 型花岗岩。

该岩体相对富集 LREE、LILE 元素而亏损 HFSE, 不相容元素 Ta-Nb-Ti 具有负异常; 其 Nb/La 值较低 (0.38 ~ 0.87), 表明岩体源区有部分陆壳物质参与。岩体的 Nb/Ta 值为 9.10 ~ 12.39, 平均为 11.13, 明显低于幔源岩石 ( $17.5 \pm 2$ , Hofmann, 1988; Green, 1995), 而非常接近陆壳岩石 (11 左右, Taylor and McLennan, 1985; Green, 1995); Zr/Hf 比值为 28.66 ~ 32.89, 平均为 30.13, 低于幔源岩石 ( $36.27 \pm 2.0$ , Hofmann, 1988; Green, 1995), 而接近壳源岩石 (33 左右, Taylor and McLennan, 1985; Green, 1995)。以上特征表明该岩体可能主要为陆壳物质部分熔融形成。该岩体具有较高  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (-1.3 ~ +1.2), 较小的 Nd 模式年龄 ( $t_{\text{DM}} = 960 \sim 1560\text{Ma}$ ) (图 11a); 高的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值 (-1.0 ~ +5.8), 较小的

两阶段 Hf 模式年龄 ( $t_{\text{DM2}} = 1024 \sim 1455\text{Ma}$ ) (图 11b), 表明这种陆壳物质是从幔源物源分异演化时间不长的年轻物质, 即年轻地壳。研究区附近出露有早古生代镁铁质-超镁铁质岩及蛇绿混杂岩 (左国朝和何国琦, 1990; 左国朝等, 2003; 张新虎, 1993) 和具有埃达克质的岛弧花岗岩以及早古生代增生杂岩 (毛启贵, 2008), 并且这些岛弧性质的物质与该岩体在地球化学上具有连续的演化性和相似的 Nd 同位素特征 (李勉等, 2009)。因此, 这些年轻地壳物质可能由洋壳、岛弧建造或增生楔物质组成。

此外, 在该岩体中未观察到明显的壳幔岩浆混合现象, 该区也未见同期的镁铁质-超镁铁质岩, 所以, 可以排除新的幔源物质 (岩浆) 直接参与了花岗岩浆形成的可能性。但是, 该岩体形成的热源可能与幔源岩浆的底侵有关, 可能是幔源岩浆的底侵导致上覆年轻陆壳物质部分熔融。

辉铜山岩体强烈亏损 Eu、Sr、Ba 等元素, 显示了可能经历了斜长石、磷灰石和黑云母的分异结晶作用; P 和 Ti 的亏损说明岩浆经历了磷灰石及榍石、角闪石、黑云母等矿物的

图 12 主要元素和微量元素对  $\text{SiO}_2$  变化图解

花岗岩闪长岩-二长花岗岩数据引自未发表数据及赵泽辉等,2007

Fig. 12 Variation diagrams of major elements and trace elements vs.  $\text{SiO}_2$ 

分离结晶作用。辉铜山钾长花岗岩与围岩拾金坡花岗岩闪长岩-二长花岗岩,随着  $\text{SiO}_2$  含量的递增,大多数主要元素、微量元素的含量都表现出有明显有规律的线性变化趋势(图 12),表明两者可能是同源岩浆不同演化阶段的产物。该岩体与其周围钙碱性花岗岩闪长质岩石具有较相似的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 ( $-2.0 \sim -0.6$ ) 和  $t_{\text{DM}}$  值 ( $0.99 \sim 1.46\text{Ga}$ ) (毛启贵,2008;赵泽辉等,2007;本文)。因此,该岩体很可能是早期钙碱性岩浆高度演化及分异结晶作用形成的。该岩体与周围拾金坡复式岩体的 U-Pb 年龄相近,且拾金坡复式岩体为 I 型花岗岩,由早期到晚期经历了从闪长岩-斑状二长花岗岩-黑云母二长花岗岩的演化(安国堡,2007),辉铜山钾长石花岗岩可能为岩浆高度演化到最晚期的产物。该岩体形成年龄 ( $397 \pm 3\text{Ma}$ ) 晚于辉铜山东钾长花岗岩 ( $436 \pm 9\text{Ma}$ ; 赵泽辉等,2007),但两者具有较相似的地球化学和 Nd 同位素特征,反映可能具有相似的源区,赵泽辉等(2007)认为辉铜山东钾长

花岗岩可能源于软流圈地幔岩浆作用而导致的上覆地壳物质的部分熔融。综上所述,辉铜山岩体可能是由幔源岩浆底侵引起上覆年轻地壳部分熔融形成的钙碱性花岗岩闪长质岩浆,经高度演化及结晶分异作用形成的。

前人认为辉铜山钾长花岗岩和花牛山钾长花岗岩为同期同源岩浆的产物(聂凤军等,2002;江思宏等,2003),并把两者放在一起探讨其成因及构造演化(赵泽辉等,2007)。本文研究显示,辉铜山钾长花岗岩的年龄为早泥盆世 ( $397\text{Ma}$ ),花牛山钾长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为晚三叠世 ( $221\text{Ma}$ ) (未发表数据),两者的地球化学特征也不同,明显为两期非同源的岩浆产物,不应把两者放在同一背景下来探讨。

柳园北侧双峰山钾长花岗岩 ( $415 \pm 3\text{Ma}$ ) 具有 A 型花岗岩的特点(李舫等,2009)。王立社等(2009)也报道了红柳河-牛圈子蛇绿岩带北缘火石山哈尔滨头口布岩体 ( $387.6 \pm$

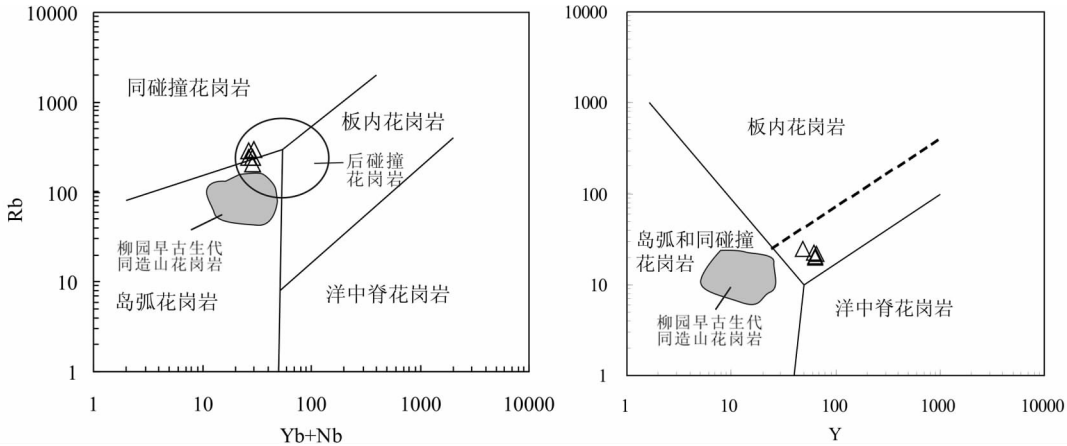


图 13 辉铜山钾长花岗岩构造环境判别图(据 Pearce *et al.*, 1984)

同造山花岗岩区域根据收集有关资料和作者未刊资料编绘

Fig. 13 Discrimination diagrams for tectonic settings from the Huitongshan K-feldspar granites (after Pearce *et al.*, 1984)

8.2Ma)显示出A型花岗岩的特点。辉铜山钾长花岗岩具I-A型花岗岩或高分异钙碱性I型花岗岩的特点。因此北山地区早-中泥盆世花岗岩显示出高分异钙碱性I型花岗岩、I-A过渡型花岗岩和A型花岗岩的组合特征。

#### 4.3 构造意义

柳园地区位于敦煌地块北缘,红柳河-牛圈子蛇绿岩带的南侧,侵入作用受构造控制。在区域构造演化上,北山地区在太古宙形成古陆核,早-中元古代褶皱增生,初陆壳开始形成(左国朝和何国琦,1990;龚全胜等,2002,2003;何世平等,2005)。辉铜山岩体锆石两阶段Hf模式年龄( $t_{DM2}$ )变化于1024~1455Ma之间,柳园南古堡泉榴辉岩的原岩年龄为1007Ma(杨经绥等,2006),显示在中元代发生了壳幔分离,增生形成该区古老地壳。这也与该区早-中新生代花岗岩的全岩Nd同位素结果一致(李舳等,2009;赵泽辉等,2007)。这说明中元古代可能是柳园地区重要的地壳生长时期。随后,新元古代构造热事件,在柳园南形成了榴辉岩(变质年龄819Ma)和带状花岗岩质岩石带(880~721Ma)及强变质的韧性剪切带(梅华林等,1999;杨经绥等,2006;于海峰等,1999;王静永,2008),显示新元古代早期陆块(地块)的汇聚、拼合作用。早古生代发生俯冲-增生造山作用,并发育有大量的同造山钙碱性花岗岩类(胡霭琴等,2007;李伍平等,2001;王涛等,2008;赵泽辉等,2007;毛启贵等,2009)。

晚古生代,特别是晚古生代早期的构造环境还并不十分清楚。辉铜山岩体呈近东西向岩枝或岩脉状产出,岩体不发育边缘片麻理构造,围岩接触变质变形不明显,其构造型式显示相对拉张环境下被动定位的后构造特点。其岩石类型为高分异I型花岗岩或I-A型过渡性花岗岩。在微量元素构造判别图中(图13),它们均位于板内或后碰撞区域,这些特征与该区同造山花岗岩相比更加明显。该岩体北部双峰山A型花岗岩(415Ma),为后造山伸展背景下的岩浆产物(李

舳等,2009)。最近,王立社等(2009)报道了红柳河-牛圈子蛇绿岩带北缘哈尔根头口布中泥盆世A型花岗岩(388Ma),可能产于构造挤压向构造伸展的转折阶段。区域上泥盆纪辉铜山-墩墩山一带发育的山前火山-磨拉石坳陷带,反映了处于造山后期环境(左国朝等,1995;何世平等,2005)。考虑到区域地质背景、岩体构造特征及岩石地球化学征,该岩体可能形成于后造山环境或同造山晚期阶段。在被动拉张环境下,幔源岩浆底侵使上覆年轻地壳部分熔融,形成辉铜山早泥盆世钾长花岗岩。

以上的研究结果进一步证实,该时期(早-中泥盆世)北山地区构造环境已经由同造山转换为后造山或造山晚期阶段。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415Ma左右(李舳等,2009),并有可能一直持续到397Ma左右。在华北北缘也发现了泥盆纪早期伸展背景下的岩浆岩(邵济安,1991;罗镇宽等,2001;Zhang *et al.*, 2007),显示敦煌地块北缘和华北北缘当时可能都处于相对伸展构造体制下。因此本区泥盆纪(415~388Ma)花岗岩为后造山或后碰撞构造背景,反映出同造山水平增生的年轻地壳物质(可能为洋壳、岛弧建造或增生楔物质)的再循环是本区大规模地壳增生的重要方式之一。

## 5 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析表明,辉铜山钾长花岗岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $397 \pm 3\text{Ma}$  (MSWD = 1.5), 代表其形成年龄。这为北山造山带早-中古生代后造山岩浆作用提供了一个可靠年代学约束。

(2) 地球化学特征显示辉铜山岩体具有 I-A 型过渡的高钾钙碱性花岗岩或高分异钙碱性 I 型花岗岩的特点。这为 A 型、I-A 过渡型和钙碱性 I 型花岗岩组合系列及钙碱性-碱性岩浆的连续过渡提供了一个物证。

(3) 该岩体可能是幔源岩浆底侵导致上覆年轻地壳(可能为洋壳、岛弧建造或增生楔物质)部分熔融形成的钙碱性岩浆经进一步演化及结晶分异形成。同造山水平增生的年轻地壳物质的再循环是本区大规模地壳增生的重要方式之一。

(4) 辉铜山岩体为北山造山带后造山或同造山晚期花岗岩体, 397Ma 左右, 古生代花岗岩已经转化为 I-A 型特征, 显示构造环境转化为后造山或同造山晚期的伸展环境。

**致谢** 感谢郭谦谦和康凯同学在野外工作中的帮助, 王晓霞研究员有益的学术讨论和帮助及两位审稿人的宝贵修改意见。

## References

An GB. 2006. Characteristics of Shijinpao gold deposit and genesis analyze. *Mineral Deposits*, 25(4): 483 - 490 (in Chinese with English abstract)

An GB. 2007. Characteristics of Shijinpao granites and their relationship to gold metallogenesis in the Beishan mountains, northwestern Gansu. *Gansu Geology*, 16(3): 19 - 25 (in Chinese with English abstract)

Chen B and Jahn BM. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 691 - 703

Coleman GR. 1989. Continental growth of Northwest China. *Tectonics*, 8: 621 - 635

Gong QS, Liu MQ, Li HL, Liang MH and Dai WJ. 2002. The type and basic characteristics of Baishan rogenic belt, Gansu. *Northwestern Geology*, 35(3): 28 - 34 (in Chinese with English abstract)

Gong QS, Liu MQ, Liang MH and Li HL. 2003. The tectonic facies and tectonic evolution of Beishan orogenic belt, Gansu. *Northwestern Geology*, 36(1): 11 - 17 (in Chinese with English abstract)

Green TH. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chem. Geol.*, 120: 347 - 359

Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Wang YX, Tang JH, Wang CS, Xi XH and Zheng YC. 2006. Some problems on granites and vertical growth of the continental crust in the eastern Tianshan Mountains, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1103 - 1120 (in Chinese with English abstract)

Han BF, He GQ and Wang SG. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and nature of basement of Zhuiger. *Science in China (Series D)*, 29(1): 16 - 21 (in Chinese)

Han BF, Li JQ, Song B, Chen LH and Zhang L. 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077 - 1086 (in Chinese with English abstract)

Han YG, Zhang SH, Franco P *et al.* 2007. Evolution of the Mesozoic granites in the Xiong'er-shan-Waifangshan region, western Henan Province, China and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 81: 253 - 265

He SP, Zhou HW, Ren BC, Yao WG and Fu LP. 2005. Crustal evolution of Palaeozoic in Beishan area, Gansu and Inner Mongolia, China. *Northwestern Geology*, 38(3): 6 - 15 (in Chinese with English abstract)

Hofmann AW. 1988. Chemical differentiation of the earth: The

relationship between large crust, and oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 90: 297 - 314

Hong DW, Wang SG, Xie XL, Zhang JS and Wang T. 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: Evidence from the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 799 - 813

Hu AQ, Wei GJ, Zhang JB, Zheng WF and Chen LL. 2007. SHRIMP U-Pb age for zircons of East Tianhu granitic gneiss and tectonic evolution significance from the eastern Tianshan mountains, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1795 - 1802 (in Chinese with English abstract)

Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth Sciences*, 91: 181 - 193

Jahn BM, Wu FY, Capdevila R, Martineau F, Zhao ZH and Wang YX. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. *Lithos*, 59: 171 - 198

Jahn BM, Windley B, Natal'in B, and Dobretsov N. 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 599 - 603

Jiang CY, Xia MZ, Yu X, Lu DX, Wei W and Ye SF. 2007. Liuyuan Trachybasalt belt in the Northeastern Tarim Plate: Products of Asthenosphere mantle decompression melting. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1765 - 1778 (in Chinese with English abstract)

Jiang SH, Nie FJ, Chen W, Liu Y, Bai DM, Liu XY and Zhang SH. 2003. Discovery of Yanshanian K-feldspar granite in Huitongshan copper deposit, Gansu Province, and its implication. *Mineral Deposits*, 22(2): 185 - 194 (in Chinese with English abstract)

Jiang SH and Nie FJ. 2006. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology of the granitoids in Beishan mountain, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2719 - 2732 (in Chinese with English abstract)

Kovalenko VI, Yarmolyuk VV, KovachVP, Kotov AB, Kozakov IK Sal'nikova EB, and Larin AM. 2004. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt: Geological and isotopic evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 605 - 627

Li JY. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26: 207 - 224

Li JY, Wang KZ, Li YP, Sun GH, Chu CH, Li LQ and Zhu ZX. 2006a. Geomorphological features, crustal composition and geological evolution of the Tianshan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 895 - 909 (in Chinese with English abstract)

Li JY, He GQ, Xu X, Li HQ, Sun GH, Yang TN, Gao LM and Zhu ZX. 2006b. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148 - 168 (in Chinese with English abstract)

Li JY, Wang KZ, Sun GH, Mo SG, Li WQ, Yang TN and Gao LM. 2006c. Paleozoic active margin slices in the southern Turfan-Hami basin: Geological records of subduction of the Paleo-Asian Ocean plate in central Asian regions. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1087 - 1102 (in Chinese with English abstract)

Li S, Wang T, Tong Y, Hong DW and Ouyang ZX. 2009. Identification of the early Devonian Shuangfengshan A-type granites in Liuyuan areas of the Beishan, NW China, and its implications for tectonic evolution. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 407 - 422 (in Chinese with English abstract)

Li WP, Wang T, Li JB *et al.* 2001. The U-Pb age of zircon from Late Caledonian granitoids in Hongliuhe area, east Tianshan Mountains, northwest China and their geological implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3): 232 - 235 (in Chinese with English abstract)

Liu C, Zhao ZH and Guo ZJ. 2006. Chronology and geochemistry of

- lamprophyre dykes from Beishan area, Gansu Province and implications for the crust-mantle interaction. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5):1294–1306 (in Chinese with English abstract)
- Liu XY and Wang Q. 1995. Tectonics of orogenic belts in Beishan, western China and their evolution. *Dixue Yanjiu*, 28: 37–48 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZK, Miao LC, Guan K *et al.* 2001. SHRIMP chronological study of Shuiquangou intrusive body in Zhangjiakou area, Hebei Province and its geochemical significance. *Geochimica*, 30(2): 116–122 (in Chinese with English abstract)
- Mao QG. 2008. Paleozoic to Early Mesozoic accretionary and collisional tectonics of the Beishan and adjacent area, northwest China. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, CAS (in Chinese with English summary)
- Mao QG, Xiao WJ, Han CM, Sun M, Yuan C, Zhang JE, Ao SJ and Li JL. 2009. Discovery of Middle Silurian adakite granite and its tectonic significance in Liuyuan area, Beishan Mountains, NW China. *Acta Petrologica Sinica* 26(2): 584–896 (in Chinese with English abstract)
- Mei HL, Li HM, Lu SN, Yu HF, Zuo YC and Li S. 1999. The age and origin of the Liuyuan granitoid, northwestern Gansu. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18(1): 14–17 (in Chinese with English abstract)
- Mu ZG, Liu C, Huang BL, Hou GT, Zuo GC, Liu CY and Feng YZ. 1992. The isotope age-dating and tectonics thermal events in the Beishan region, Gansu Province. *Universitatis Pekinensis (Acta Scientiarum Naturalium)*, 28(4): 486–497 (in Chinese with English abstract)
- Nie FJ, Jiang SH, Bai DM, Wang XL, Su XS, Li JC, Liu Y and Zhao XM. 2002. Metallogenic Studies and Ore Prospecting in the Conjunction Area of Inner Mongolia, Gansu and Xinjiang (Beishan Mt.), Northwest China. Beijing: Geological Publishing House, 1–408 (in Chinese with English abstract)
- Pan JH, Guo ZJ, Liu C and Zhang Y. 2007. Environmental response of Early Permian volcanism in Hongliuhe area on the border between Xinjiang and Gansu provinces. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1779–1784 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25:956–983
- Peccerillo R and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamoun area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58: 63–81
- Qiao GS. 1998. Normalization of isotopic dilution analyses: A new program for isotope mass spectrometric analysis. *Scientia Sinica (Series A)*, 31: 1263–1268
- Sengör AMC, Natal'in BA, and Burtman US. 1993. Evolution of the Altiid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 209–304
- Sengör AMC and Natal'in BA. 1996. Turcic-type orogeny and its role in the making of the continental crust. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 24: 263–337
- Shao JA. 1991. Crust Evolution in the Middle Segment of the Northern Margin of Sino-Korea Plate. Beijing: Peking University Press, 1–136 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, 42: 313–345
- Sylvester PJ. 1989. Post-collisional alkaline granites. *Journal of Geology*, 97: 261–280
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 91–92
- Tian YZ. 1993. Study on the features and auriferous potentiality of Shijinpo rock body in Beishan mountain, Gansu Province. *Journal of Xi'an College of Geology*, 15(4): 62–69 (in Chinese with English abstract)
- Tong Y, Wang T, Kovach VP, Hong DW and Han BF. 2006. Age and origin of the Takeshiken postorogenic alkali-rich intrusive rocks in southern Altai, near the Mongolian border in China and its implications for continental growth. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1267–1278 (in Chinese with English abstract)
- Tong Y, Wang T, Hong DW, Dai YJ, Han BF and Liu XM. 2007. Ages and origin of the Early Devonian granite from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1933–1944 (in Chinese with English abstract)
- Wang JB, Wang YW and Zhou TF. 2008. Metallogenic spectrum related to post-collisional mantle-derived magma in north Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 743–752 (in Chinese with English abstract)
- Wang JY. 2008. Identification of granitic orthogneiss of Dunhuang rock group in Xiadong area of Gansu Province and its significance. *Gansu Geology*, 17(3): 22–26 (in Chinese with English abstract)
- Wang LS, Yang JG, Xi CL, Lei YX, Wang YX, Chao HX, Yang PF, Qi YL and Jin SL. 2009. Geochronology and geochemistry of Haergentoukoubu granites in the Beishan area, Gansu, China and their geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 377–387 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Hong DW, Tong Y, Han BF and Shi YR. 2005. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: Its implications for vertical continental growth. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 640–650 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Hong DW, Jahn BM, Tong Y, Wang YB, Han BF and Wang XX. 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountain, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen. *The Journal of Geology*, 114: 735–751
- Wang T, Li WP, Li JB, Hong DW, Tong Y and Li S. 2008. Increase of juvenile mantle-derived composition from syn-orogenic to post-orogenic granites of the east part of the eastern Tianshan (China) and implications for continental vertical growth: Sr and Nd isotopic evidence. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 762–772 (in Chinese with English abstract)
- 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
- Windley BF, Alexeiev D, Xiao WJ, Kröner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic belt. *Journal of the Geological Society, London*, 164: 31–47
- Wu FY, Jahn BM, Wilde S and Sun DY. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328: 89–113
- Wu FY, Jahn BM, Wilde S, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66: 241–273
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Study on the genetic mineralogy of zircon and its constraint on the explanation on zircon U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese)
- Xiao WJ, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li JL, Qin KZ and Wang Z. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: Implications for the lateral growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society, London*, 161: 339–342
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Lin SF, Li ZL, Mao QG, Zhang JN, Sun S and Li JL. 2006. The unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of northern Xinjiang (NW China): Constraints for the tectonics of the southern Paleasian

- Domain. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5):1362-1376 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Sun M, Lin SF, Chen H, Li Z, Li J and Sun S. 2008a. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 102-117
- Xiao WJ, Pirajno F and Seltmann R. 2008b. Geodynamics and metallogeny of the Altaid orogen. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 77-81
- Xiao WJ, Windley BF, Yuan C, Sun M, Han CM, Lin SF, Chen HL, Yan QR, Liu DY, Qin KZ, Li JL and Sun S. 2009. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altai. *American Journal of Science*, 309, 221-270
- Yang JS, Wu CL, Chen SY, Shi RD, Zhang JX, Meng FC, Zuo GC, Wu HQ and Elena C. 2006. Neoproterozoic eclogitic metamorphic age of the Beishan eclogite of Gansu, China: Evidence from SHRIMP U-Pb isotope dating. *Geology in China*, 33(2):318-326 (in Chinese with English abstract).
- Yu HF, Lu Sn, Mei HL, Zhao FQ, Li HK and Li HM. 1999. characteristics of Neoproterozoic eclogite-granite zones and deep level ductile shear zone in western China and their significance for continental reconstruction. *Acta Geologica Sinica*, 15(4): 532-538 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li HM, Gunther D and Wu FY. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical*, 28(3):353-370
- Yuan HL, Gao S, Dai MN, Chun LZ, Gunther D, Gisela HF, Xiao ML and Diwu CR. 2008. Simultaneous determination of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247:100-118
- Zhang FH, Zhao Y, Song B *et al.* 2007. Petrogenesis of the Middle Devonian Gushan diorite pluton on the northern margin of the North China block and its tectonic implications. *Geol. Mag.*, 144(3): 1-16
- Zhang XH. 1993. Tectonostratigraphic evolution of the Qilian and Beishan orogenic belt in Gansu, Qinghai, Inner Mongolia. *Acta Geologica Gansu*, 2(1):80-875 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Guo ZJ, Han BF, Wang Y and Liu C. 2006. Comparative study on Permian basalts from eastern Xinjiang-Beishan area of Gansu Province and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5):1279-1293 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Guo ZJ and Wang Y. 2007. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic implications of the granitoids from Liuyuan area, Beishan, Gansu Province, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1847-1860 (in Chinese with English abstract)
- Zhou LR and Cai XW. 1992. Geology of the Indosinian Huanishan granite. *Geology of Northwest China*, 13(3):7-13 (in Chinese)
- Zuo GC and He GQ. 1990. Plate Tectonics and Metallogenic Regularities in Beishan Region. Beijing: Peking University Publishing House, 1-209 (in Chinese with English abstract)
- Zuo GC, Zhang S, He GQ and Zhang Y. 1991. Plate tectonic characteristics during the Early Paleozoic in Beishan near the Sino-Mongolian border region, China. *Tectonophysics*, 188: 385-392
- Zuo GC, Liu CY, Bai WC and Feng YZ. 1995. Volcano-molasse geological structure and geochemical signature in Devonian Period collision orogenic in Beishan, Gansu-Inner Mongolia. *Acta Geologica Gansu*, 4(1):35-44 (in Chinese with English abstract)
- Zuo GC, Liu YK and Liu CY. 2003. Framework and evolution of the tectonic structure in Beishan area across Gansu Province, Xinjiang autonomous region and Inner Mongolia autonomous region. *Acta Geologica Gansu*, 12(1):1-15 (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 安国堡. 2006. 甘肃北山拾金坡金矿床地质特征及成因分析. *矿床地质*, 25(4):483-490
- 安国堡. 2007. 甘肃北山拾金坡花岗岩特征及其与金成矿的关系. *甘肃地质*, 16(3):19-25
- 龚全胜, 刘明强, 李海林等. 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, 梁明宏等. 2003. 北山造山带大地构造相及构造演化. *西北地质*, 36(1):11-17
- 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志等. 2006. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识. *岩石学报*, 22(5):1103-1120
- 韩宝福, 何国琦, 王式洸. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底性质. *中国科学(D辑)*, 29(1):16-21
- 韩宝福, 季建清, 宋彪等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限. *岩石学报*, 22(5):1077-1086
- 何世平, 周会武, 任秉琛等. 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
- 胡霁琴, 韦刚健, 张积斌等. 2007. 天山东段天湖东片麻状花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和构造演化意义. *岩石学报*, 23(8):1795-1802
- 江思宏, 聂凤军, 陈文等. 2003. 甘肃辉铜山铜矿床燕山期钾长花岗岩的发现及其地质意义. *矿床地质*, 22(2):185-194
- 江思宏, 聂凤军. 2006. 北山地区花岗岩类的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 同位素年代学研究. *岩石学报*, 22(11):2719-2732
- 姜常义, 夏明哲, 余旭等. 2007. 塔里木板块东北部柳园粗面玄武岩带:软流圈地幔减压熔融的产物. *岩石学报*, 23(7):1765-1778
- 李锦轶, 王克卓, 李亚萍等. 2006a. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化. *地质通报*, 25(8):895-909
- 李锦轶, 何国琦, 徐新等. 2006b. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨. *地质学报*, 80(1):148-168
- 李锦轶, 王克卓, 孙桂华等. 2006c. 东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片:中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录. *岩石学报*, 22(5):1087-1102
- 李舫, 王涛, 童英等. 2009. 北山柳园地区双峰山早泥盆世 A 型花岗岩的确定及构造演化意义. *岩石矿物学杂志*, 28(5):407-422
- 李伍平, 王涛, 李金宝等. 2001. 东天山红柳河地区晚加里东花岗岩类岩石的锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *地球学报*, 22(3):232-235
- 刘畅, 赵泽辉, 郭召杰. 2006. 甘肃北山地区煌斑岩的年代学和地球化学及其壳幔作用过程讨论. *岩石学报*, 22(5):1294-1306
- 刘雪亚, 王荃. 1995. 中国西北部北山造山带的大地构造及其演化. *地质研究*, 28:37-48
- 罗镇宽, 苗来成, 关康等. 2001. 河北张家口水泉沟岩体 SHRIMP 年代学研究及其意义. *地球化学*, 30(2):116-122
- 毛启贵. 2008. 北山及邻区古生代-早中生代增生与碰撞大地构造格局. 博士学位论文. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 孙敏, 袁超, 张继恩, 敖松坚, 李继亮. 2009. 北山柳园地区中志留世埃达克质花岗岩类及其地质意义. *岩石*

- 学报,26(2):584-896
- 梅华林,李惠民,陆松年等. 1999. 甘肃柳园地区花岗质岩石时代及成因. 岩石矿物学杂志, 18(1):14-17
- 穆治国,刘驰,黄宝玲,等. 1992. 甘肃北山地区同位素定年与构造岩浆热事件. 北京大学学报(自然科学版),28(4):486-497
- 聂凤军,江思宏,白大明,王新亮,苏新旭,李景春,刘妍,赵省民. 2002. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向. 北京:地质出版社,1-408
- 潘金花,郭召杰,刘畅等. 2007. 新甘交界红柳河地区早二叠世火山作用的环境响应. 岩石学报,23(7):1779-1784
- 邵济安. 1991. 中朝板块北缘中段地壳演化. 北京:北京大学出版社,1-136
- 田志永. 1993. 甘肃北山拾金坡岩体特征及其含金性研究. 长安大学学报(地球科学版),15(4):62-68
- 童英,王涛,Kovach VP等. 2006. 阿尔泰中蒙边界塔克什肯口岸后造山富碱侵入岩体的形成时代、成因及其地壳生长意义. 岩石学报, 22(5):1267-1278
- 童英,王涛,洪大卫等. 2007. 中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义. 岩石学报,23(8):1933-1944
- 王京彬,王玉往,周涛发. 2008. 新疆北部后碰撞与幔源岩浆有关的成矿谱系. 岩石学报,24(4):743-752
- 王静永. 2008. 甘肃北山南带峡东地区敦煌岩群中花岗质正片麻岩的确定及其意义. 甘肃地质,17(3):22-26
- 王立社,杨建国,谢春林等. 2009. 甘肃北山火山山哈尔根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
- 王涛,洪大卫,童英,韩宝福,石玉若. 2005. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义. 岩石学报,21(3):640-650
- 王涛,李伍平,李金宝等. 2008. 东天山东段同造山到后造山花岗岩幔源组分的递增及陆壳垂向生长意义——Sr、Nd 同位素证据. 岩石学报,24(4):762-772
- 吴元保,郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报,49:1589-1604
- 肖文交,韩春明,袁超等. 2006. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用:对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约. 岩石学报,22(5):1062-1076
- 杨经绥,吴才来,陈松永等. 2006. 甘肃北山地区榴辉岩的变质年龄:来自锆石的 U-Pb 同位素定年证据. 中国地质, 33(2):317-325
- 于海峰,陆松年,梅华林等. 1999. 中国西部新元古代榴辉岩-花岗岩带和深层次韧性剪切带特征及其大陆再造意义. 岩石学报, 15(4):532-538
- 张新虎. 1993. 甘、青、蒙祁连山、北山造山带构造地层演化史. 甘肃地质学报,8(1):80-86
- 赵泽辉,郭召杰,韩宝福等. 2006. 新疆东部-甘肃北山地区二叠纪玄武岩对比研究及其构造意义. 岩石学报,22(5):1279-1293
- 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
- 周良仁,蔡厚维. 1992. 花牛山印支期岩体的地质特征. 西北地质, 13(3):7-13
- 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,刘春燕,白万成,冯永忠. 1995. 北山泥盆纪碰撞造山火山-磨拉石地质构造及地球化学特征. 甘肃地质学报, 4(1):35-43
- 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