

·专题研究·

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

李 舫, 王 涛, 童 英, 洪大卫, 欧阳志侠

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘 要: 北山柳园地区分布有大量的早中古生代花岗岩类岩石。柳园双峰山岩体具有高硅、高碱($AR = 3.99 \sim 5.05$, $NK/A > 0.85$)、高 FeO^T/MgO 比值和 $10\,000 \times Ga/Al$ 值、低 Al_2O_3 、贫 CaO 和 MgO 的特征, 显示出准铝质、碱质花岗岩的特点; ΣREE 较高, $LREE$ 略富集, 轻重稀土元素分馏不十分明显, Eu 负异常明显, 相对富集 Rb 、 K 、 Pb 等大离子亲石元素(LILE), 强烈亏损 Ba 、 Sr 、 P 、 Eu 、 Ti , 弱亏损 Ta 、 Nb 等元素, 同时具有较高的 Rb/Nb 和 Y/Nb 比值, 显示了 A_2 型铝质花岗岩的特征。采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法, 获得双峰山岩体的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 415 ± 3 Ma ($MSWD = 1.5$), 代表该岩体的形成年龄, 即双峰山岩体形成于早泥盆世。地球化学及 Nd 同位素特征综合分析显示, 该岩体可能由幔源岩浆底侵导致上覆地壳物质(可能由洋壳和岛弧建造组成)部分熔融形成的花岗闪长质岩浆经进一步结晶分异作用形成, 为该区较早的钙碱性花岗岩演化到后期的产物。岩体特征、年代学、地球化学和地质背景综合分析结果表明, 该岩体形成于后造山或造山作用演化晚期阶段。双峰山早泥盆世 A 型花岗岩为目前北山地区发现的最老的 A 型花岗岩, 这对探讨古生代花岗岩成因类型及岩浆演化具有重要的意义。

关键词: A 型花岗岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 双峰山; 北山柳园地区

中图分类号: P588.12⁺1; P542

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)05-0407-16

Identification of the Early Devonian Shuangfengshan A-type granites in Liuyuan area of Beishan and its implications to tectonic evolution

LI Shan, WANG Tao, TONG Ying, HONG Da-wei and OUYANG Zhi-xia

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

Abstract: Lots of early-middle Paleozoic granitoids occur in Liuyuan area of Beishan. The Shuangfengshan granitic pluton in Liuyuan is characterized by high Si, alkali ($AR = 3.99 \sim 5.05$, $NK/A > 0.85$), FeO^T/MgO and $10\,000 \times Ga/Al$ values, and low Al_2O_3 , CaO and MgO content, showing metaluminous and alkali features. The granites show high REE, slight richness of LREE, a weak fractionation between LREE and HREE, and an evidently negative Eu anomaly. They are enriched in Rb, Th, Zr and Hf, strongly depleted in Ba, Sr, P, Eu and Ti, and slightly depleted in Ta and Nb. These rocks also have high Rb/Nb and Y/Nb ratios, implying the aluminous A_2 -type granite. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yielded a $^{206}Pb/^{238}U$ age of 415 ± 3 Ma ($MSWD = 1.5$), considered to be the emplacement age of the Shuangfengshan granitic pluton. All these geochemical features indicate that these granites probably resulted from the earlier calc-alkaline granitic magmas which might crystallized

收稿日期: 2008-07-31; 修订日期: 2009-07-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2007CB411307); 中国地质调查局资助项目(1212010611803); 中俄国际合作基金资助项目(40472101)

作者简介: 李 舫(1983-), 男, 硕士, 岩石大地构造学专业, E-mail: lishan428@sina.com; 通讯作者: 王 涛, 博士生导师, 从事花岗岩、构造地质研究, E-mail: taowang@cags.net.cn

from differentiation of granodioritic magmas formed by partial melting of continental crust (oceanic crust and island arc) due to the underplating of the mantle-derived magma. Based on characteristics of outcrops, chronology, geochemistry and geological setting, the authors hold that the Shuangfengshan granitic pluton might be a post-orogenic or late stage orogenic pluton. The Early Devonian Shuangfengshan A-type granite is the oldest A-type granitic pluton ever found in Beishan, which provides important information for the researches on magmatic and tectonic evolution.

Key words: A-type granite; zircon U-Pb dating; geochemistry; Shuangfengshan; Liuyuan areas of Beishan

中亚造山带(CAOB)是世界上最大的古生代增生造山带和最大的显生宙大陆地壳生长带(Sengör *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 2000; Kovalenko *et al.*, 2004; Xiao *et al.*, 2008), 其中产出大量晚古生代—中生代(330~200 Ma)高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的A型花岗岩(Jahn *et al.*, 2000, 2009; 许保良等, 2001; Hong *et al.*, 2004; Kovalenko *et al.*, 2004; 苏玉平等, 2006, 2008; 唐红峰等, 2007; 毛启贵等, 2008), 被认为是显生宙后造山或板内环境下岩浆作用的产物(Han *et al.*, 1997; Wu *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2000, 2004; Chen and Jahn, 2004; Hong *et al.*, 2004; 王涛等, 2005)。但是, 其中的早中古生代A型花岗岩却很少有人报道。早中古生代A型花岗岩的研究不仅对深入了解中亚造山带古生代花岗岩的岩石类型、岩浆演化和成因具有重要意义, 而且可以为认识整个中亚造山带显生宙的增生造山作用及构造演化提供信息。

北山地处中亚造山带南缘, 西邻东天山, 东接阿拉善, 以阿尔金和星星峡两大走滑断裂为界, 位于一个构造楔形区内(左国朝等, 1990; 龚全胜等, 2002, 2003)。由于其构造位置独特、构造-岩浆活动强烈, 近年来逐渐受到国内外研究学者的关注。目前资料及前人研究成果(修群业, 1999; 聂凤军等, 2002; 贺锋等, 2004; 江思宏等, 2006; 刘明强等, 2006; 唐俊华等, 2007; 赵泽辉等, 2007)显示, 北山主要经历了早中古生代(460~370 Ma)、晚古生代(330~260 Ma)、早中生代(250~200 Ma)3期构造岩浆事件。北山西南侧的柳园地区主要出露有早中古生代花岗岩类岩石和部分早中生代花岗岩类岩石。前人对北山邻区晚古生代A型花岗岩做了大量的研究(Han *et al.*, 1997; Jahn *et al.*, 2000; Hong *et al.*, 2004; 唐红峰等, 2007; 苏玉平等, 2006, 2008), 北山地区也有一些报道(许保良等, 2001; 贺锋等, 2004; 齐瑞荣等, 2006; 王立社等, 2009)。韩宝福等(2004)曾报道

天山地区出露有一些早古生代铝质A型花岗岩。本文选取北山西南部柳园地区的双峰山岩体为研究对象, 通过锆石U-Pb定年、岩石学和地球化学研究, 确定岩石类型, 并初步探讨了花岗岩的成因及构造意义。

1 地质背景

北山地区位于蒙甘新交汇处, 对其大地构造归属问题目前仍存在着不同的看法, 主要观点有4种: 一种观点认为以明水-石板井-小黄山蛇绿混杂岩带为界, 由南向北把北山地区依次划分为塔里木-中朝板块中段北缘、哈萨克斯坦板块东段地区(左国朝等, 1990, 2003); 另一种观点则认为以柳园-大奇山和红石山-黑鹰山-六驼山这两条深大断裂为界, 由南向北把北山地区依次划分出塔里木板块、哈萨克斯坦板块和西伯利亚板块(刘雪亚等, 1995; 聂凤军等, 2002); 第3种观点以红石山-黑鹰山-六驼山蛇绿混杂岩带为界, 将北山从南向北分为塔里木板块和哈萨克斯坦板块(龚全胜等, 2002, 2003; 何世平等, 2002, 2005); 第4种观点则以红柳河-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, 由南向北把北山地区依次划分为敦煌地块、星星峡-旱山岛弧带、准噶尔-吐哈岛弧带和东准噶尔-南蒙古岛弧带(李锦轶等, 2006)。

研究区位于北山西南部地区, 构造上隶属于敦煌地块北缘, 位于红柳河-火石山-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-石板敦断裂以西地区(图1)。区内主要断裂走向为EW和NE向, 岩石地层主要由下元古界中深变质岩、浅变质碎屑岩, 中上元古界浅变质碎屑岩、寒武系—奥陶系火山碎屑岩、浅变质碎屑岩, 石炭系—二叠系火山—沉积岩系组成。

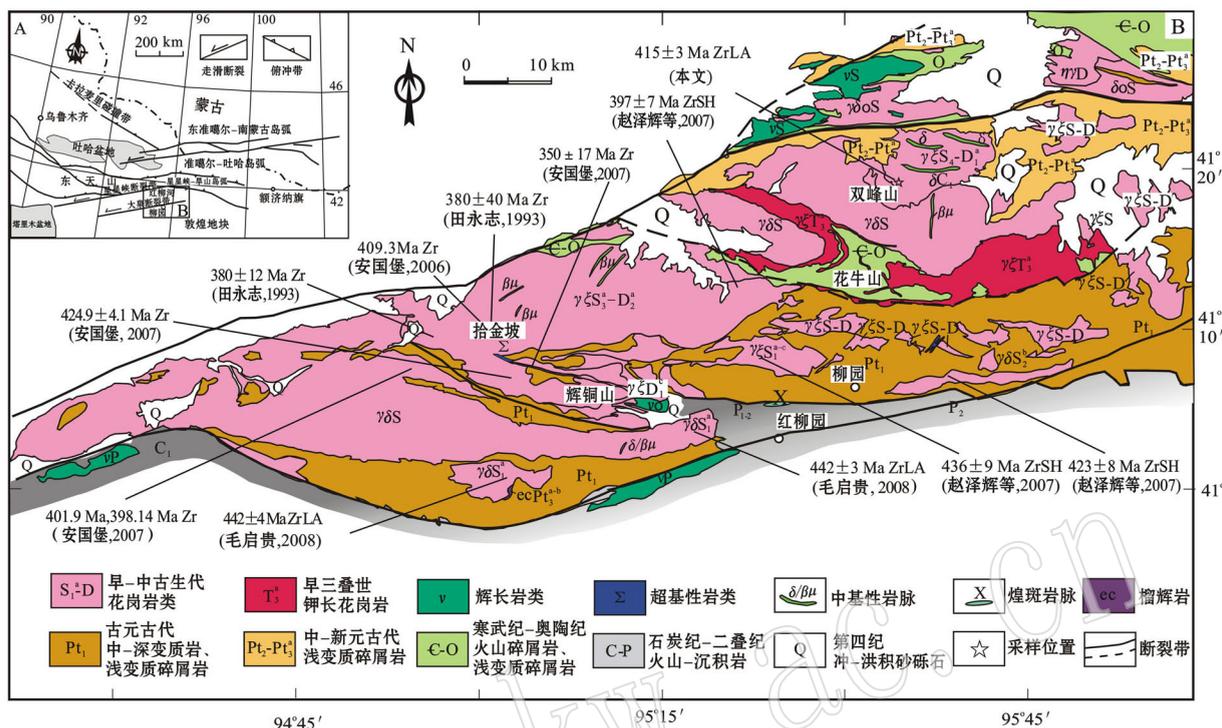


图 1 北山柳园地区花岗岩体地质简图(据 1:20 万红柳园幅①、方山口幅②和星星峡幅③修编)

Fig. 1 Geological sketch map of the granite plutons in Liuyuan area, Beishan, Gansu Province(modified after 1:20 000 Hongliuyuan ①, Fangshankou ② and Xingxingxia ③ geological map)

Zr 为锆石 U-Pb 方法, 其中 ZrSH 为锆石 SHRIMP 定年方法, ZrLA 为锆石 LA-ICP-MS 定年方法

Zr means zircon U-Pb method, ZrSH is zircon SHRIMP dating method, and ZrLA is LA-ICP-MS dating method

2 岩体及岩石学特征

研究区范围内岩浆活动强烈。侵入岩分布广泛,多呈岩基、岩株、岩枝和岩脉状产出,出露多种岩石类型:超基性岩、辉长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、斑状花岗岩、二长花岗岩、钾长花岗岩和煌斑岩等。这些侵入岩侵位到太古宙—奥陶纪地层中,大部分沿二叠纪火山岩带北部区域近 EW 向条带状展布(图 1)。花岗岩类岩石出露广泛,大都呈近东西向条带状或岩株状产出(田永志, 1993; 安国堡, 2006, 2007; 赵泽辉等, 2007)。

双峰山岩体呈等轴状,面积约 54 km²,侵位于中新元古代地层中,岩体中发育 NW 和近 EW 向、宽约 1~3 m 的中基性岩脉,平行排列延伸数百米。该岩

体主要岩石类型为碱长花岗岩和正长花岗岩,肉红色,具中-细粒花岗结构,主要矿物为石英(30%~35%)、斜长石(20%~25%)、碱性长石(40%~45%)和黑云母(约 5%)。斜长石发育聚片双晶,多已绢云母化。碱性长石以条纹长石为主,具条纹结构,部分为微斜长石,发育格子状双晶并多与条纹长石组成微斜条纹长石,且常交代斜长石。黑云母 Ng = 淡绿色, Np = 浅褐色,他形,部分已绿泥石化。副矿物有锆石、磷灰石、磁铁矿等。

3 样品分析方法

样品的常量元素和微量元素分析由中国地质大学(北京)地学实验中心完成。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-

① 甘肃省地质局第一区域地质测量队. 1996. 中华人民共和国区域地质测量报告(红柳园幅)(1:20 万)(矿产部分).
 ② 甘肃省地质局第二区域地质测量队. 1973. 中华人民共和国区域地质测量报告(方山口幅)(1:20 万)(地质部分).
 ③ 甘肃省地质局第一区域地质测量队. 1966. 中华人民共和国区域地质测量报告(星星峡幅)(1:20 万)(地质部分).

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 Agilent7500 a 型等离子质谱仪测定,详细分析方法可参考有关文献(如 Han *et al.*, 2007)。Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测定在中国地质科学院地质研究所同位素室完成,Rb-Sr 和 Sm-Nd 含量分析、Sr 同位素分析用 MAT-262 固体同位素质谱计测定,Nd 同位素分析用 MC-ICP-MS 测定,其详细的分析技术和流程参阅张宗清等(2002) 和何学贤等(2007)。

样品的锆石分选在廊坊河北省区域地质调查研究院进行。首先将原岩样品破碎至 100 μm 左右,先用磁法和重液分选,然后在双目显微镜下手工挑选。锆石制靶在中国地质科学院矿产资源研究所实验室进行,将挑选后具有代表性的锆石颗粒粘在双面胶上,然后将其固定在环氧树脂上,并对其进行抛光,直到样品露出一个光洁的平面。测试前在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室进行阴极发光(CL)照相。

锆石 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室按标准测定程序进行。年龄测定在 LA-MC-ICP-MS 仪器上进行,仅用 LA-Q-ICP-MS 仪器对其进行年龄测定,由 Elan6100DRC ICP-MS 与 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统 Geolas2005 联机完成,激光剥蚀束斑直径为 32 μm 。激光剥蚀采集方式为单点剥蚀,每测定 5 个样品点测定 1 个标准锆石 91500,每测定 10 个样品点测 1 次 NIST610。采用国际标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST NRM 610 作为外标, ^{29}Si 作为内标元素进行校正。样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER(ver4.0) 软件,并采用 Andersen(2002) 软件对测试数据进行普通 ^{204}Pb 校正,年龄计算和成图采用 ISOPLOT(ver 3)(Ludwig, 2003) 软件完成。详细的实验原理、流程及数据处理参见 Yuan 等(2003, 2004, 2008)。

4 锆石 U-Pb 定年

双峰山碱长花岗岩样品(SF07)绝大多数锆石颗粒为浅黄色-无色透明短柱状和不规则形状,颗粒多在 80~220 μm 之间,柱状晶体长宽比为 2:1~3:1。阴极发光图像(图 2) 显示出较清晰的岩浆生长环带和韵律结构,为典型的岩浆锆石。对样品共分析了 20 个测点,分析数据见表 1。锆石的 Th、U 含量较高,

Th 含量为 $66.85 \times 10^{-6} \sim 1\,232.3 \times 10^{-6}$,U 含量为 $95.94 \times 10^{-6} \sim 2\,073.89 \times 10^{-6}$,Th/U 比值为 0.50~0.71,Th/U 比值都大于 0.4 显示岩浆锆石的特征(吴元保等 2004)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值在 $395 \pm 5 \sim 486 \pm 7$ Ma 之间。其中 3 个点(点 7、9、1) 年龄偏老,点 7(486 Ma) 年龄测点位于锆石的暗黑色边部,CL 图显示无振荡环带,且 Th($1\,232.3 \times 10^{-6}$)、U($2\,073.89 \times 10^{-6}$) 含量明显高于其他锆石;点 9(427 Ma) 也位于锆石的暗黑色的边部,且 Th(672.72×10^{-6})、U(947.51×10^{-6}) 含量也较高,这两个点年龄偏老可能是由于结晶后流体作用引起不同程度放射性成因铅的增加所致;点 1(433 Ma) 锆石具有较清晰的核边环带结构,测点位于锆石的核部,该点年龄解释为捕获或继承锆石的年龄,可能与志留纪岛弧岩浆事件有关。点 8(395 Ma) 年龄偏小,可能是因为放射性成因铅的丢失导致年龄数据偏低。对于年龄比较集中的 16 个数据点(421~400 Ma) 进行 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均计算,其加权平均年龄为 415 ± 3 Ma(图 3)。这些测点位于锆石的不同部位,锆石 CL 图像均显示较清晰的环带结构。该加权平均年龄解释为锆石的结晶年龄,代表该岩体的形成年龄。

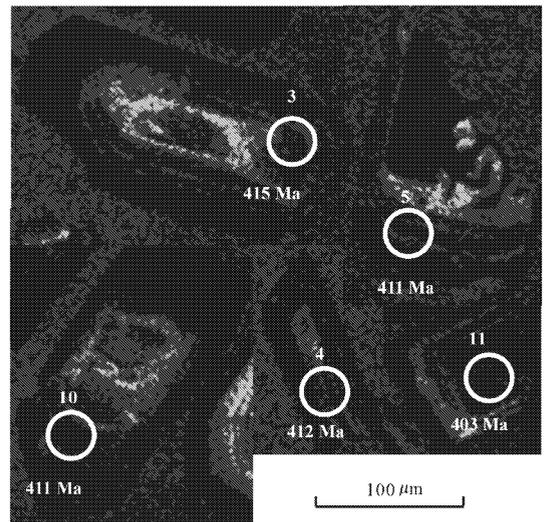


图 2 双峰山花岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 2 CL images of zircons from Shuangfengshan granite

5 地球化学特征

双峰山花岗岩主量元素分析结果如表 2 和图 4 所示。该岩体具有高硅($\text{SiO}_2 = 73.33\% \sim 76.71\%$)、高碱($\text{K}_2\text{O} = 4.32\% \sim 5.00\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 3.46\% \sim$

表 1 双峰山花岗岩锆石 LA-ICP-MS 分析结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS analyzing results of zircons from Shuangfengshan granites, Beishan area

样号	^{232}Th		^{238}U		Th/U	$^{206}\text{Pb}_c$ /%	同位素比值				同位素年龄/Ma							
	^{232}Th	^{238}U	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			
SF07-1	215.08	362.01	31.24	0.59	0.59	1.77	0.0553	0.0026	0.5296	0.0240	0.0694	0.0009	426	108	432	16	433	5
SF07-2	96.45	155.64	13.54	0.62	0.62	2.31	0.0567	0.0032	0.5270	0.0285	0.0674	0.0009	479	127	430	19	421	6
SF07-3	186.46	315.64	25.35	0.59	0.59	0.87	0.0547	0.0025	0.5013	0.0221	0.0665	0.0009	398	106	413	15	415	5
SF07-4	319.76	477.47	39.69	0.67	0.67	1.49	0.0584	0.0030	0.5312	0.0262	0.0659	0.0009	546	115	433	17	412	5
SF07-5	198.98	375.91	27.98	0.53	0.53	—	0.0576	0.0016	0.5231	0.0146	0.0658	0.0009	516	38	427	10	411	5
SF07-6	404.53	718.20	62.58	0.56	0.56	0.83	0.0550	0.0031	0.4860	0.0260	0.0641	0.0009	412	127	402	18	400	6
SF07-7	1232.30	2073.89	227.28	0.59	0.59	5.71	0.0567	0.0031	0.6128	0.0320	0.0784	0.0011	480	123	485	20	486	7
SF07-8	204.13	314.61	24.34	0.65	0.65	—	0.0547	0.0010	0.4763	0.0096	0.0632	0.0008	398	23	396	7	395	5
SF07-9	672.72	947.51	89.24	0.71	0.71	—	0.0593	0.0011	0.5602	0.0108	0.0686	0.0009	576	21	452	7	427	5
SF07-10	171.32	283.70	22.36	0.60	0.60	—	0.0579	0.0013	0.5264	0.0119	0.0659	0.0009	527	26	429	8	411	6
SF07-11	203.77	320.71	25.12	0.64	0.64	0.49	0.0587	0.0028	0.5223	0.0238	0.0646	0.0010	556	107	427	16	403	6
SF07-12	147.15	242.80	24.29	0.61	0.61	—	0.0548	0.0015	0.5103	0.0106	0.0675	0.0008	404	27	419	7	421	5
SF07-13	66.85	95.94	7.71	0.70	0.70	—	0.0532	0.0018	0.4912	0.0145	0.0669	0.0008	338	45	406	10	418	5
SF07-14	135.81	205.07	17.37	0.66	0.66	0.29	0.0588	0.0019	0.5461	0.0142	0.0674	0.0008	560	36	442	9	420	5
SF07-15	185.22	366.84	30.65	0.50	0.50	0.14	0.0582	0.0019	0.5405	0.0146	0.0673	0.0008	537	38	439	10	420	5
SF07-16	278.29	536.00	38.80	0.52	0.52	—	0.0564	0.0014	0.5210	0.0092	0.0670	0.0007	467	21	426	6	418	4
SF07-17	126.80	227.30	19.21	0.56	0.56	—	0.0568	0.0016	0.5270	0.0116	0.0673	0.0008	483	29	430	8	420	5
SF07-18	195.85	339.04	25.24	0.58	0.58	0.86	0.0564	0.0022	0.5059	0.0187	0.0651	0.0008	468	88	416	13	406	5
SF07-19	147.30	261.84	21.92	0.56	0.56	—	0.0599	0.0017	0.5457	0.0121	0.0661	0.0007	600	29	442	8	413	4
SF07-20	203.93	371.17	28.60	0.55	0.55	—	0.0552	0.0014	0.5122	0.0095	0.0673	0.0007	421	23	420	6	420	4

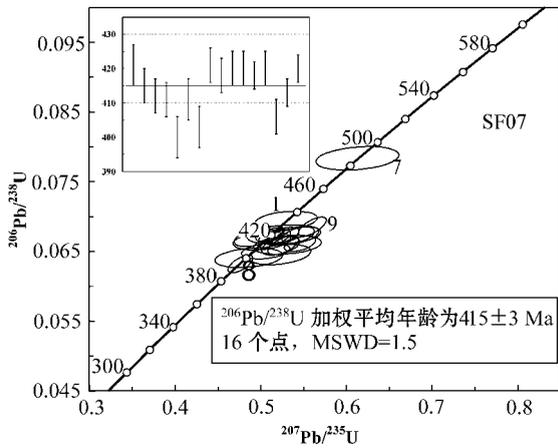


图3 双峰山(SF07)A型花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 Concordia diagram of zircons LA-ICP-MS U-Pb isotopic data for an A-type granite sample (SF07) from the Shuangfengshan pluton

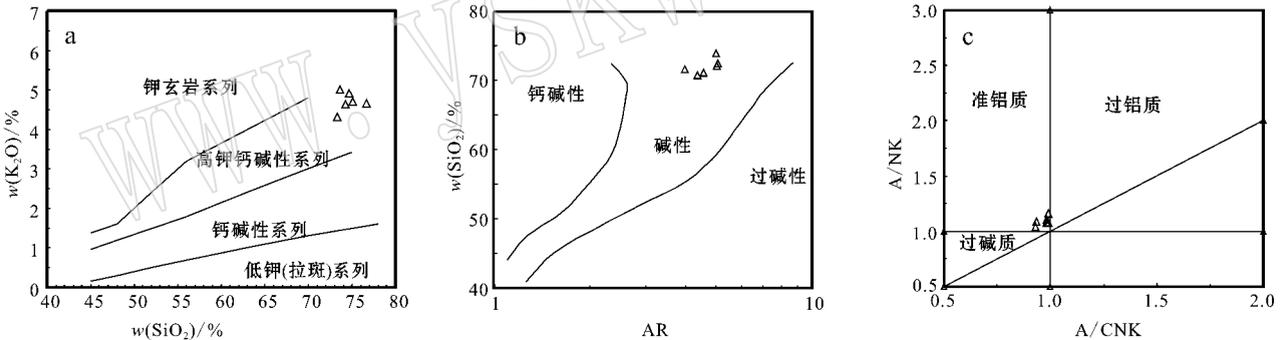


图4 双峰山A型花岗岩主要元素的岩石类型图解

a 为 K_2O-SiO_2 图解(据 Peccerillo 和 Taylor, 1976); b 为 SiO_2-AR 图解(据 Wright, 1969); c 为 $A/NK-A/CNK$ 图解(据 Peccerillo 和 Taylor, 1976)

Fig. 4 Major element diagrams for rock types of the Shuangfengshan A-type granites

(a) K_2O-SiO_2 diagram(after Peccerillo and Taylor, 1976); (b) SiO_2-AR diagram(after Wright, 1969); (c) $A/NK-A/CNK$ diagram(after Peccerillo and Taylor, 1976)

(图 5a),呈一定程度的“V”字型,与该区同造山钙碱性花岗岩类岩石明显不同(赵泽辉等, 2007)。

在原始地幔标准化的蛛网图解中(图 5b),明显富集 Rb、K、Pb 等大离子亲石元素,强烈亏损 Ba、Sr、P、Eu、Ti,并弱亏损 Ta、Nb 等元素。100 00×Ga/Al 值为 3.25~3.87,明显高于 I 型和 S 型花岗岩的平均值(分别为 2.1 和 2.28)(Whalen *et al.*, 1987)。在 Whalen 等(1987)建立的 A 型花岗岩判别图(图 6)中,全部落入 A 型花岗岩区域。该岩石的 Nb/Ta

4.17%)和高 FeO^T/MgO 值(5.88~12.78),低 Al_2O_3 (11.64%~12.71%),贫 CaO(0.56%~1.06%)和 MgO(0.10%~0.35%),低 FeO^T (1.27%~2.46%)的特征,与典型 A 型花岗岩的主要元素特征一致。在 K_2O-SiO_2 图解中(图 4a)显示高钾钙碱性系列的特点。样品碱度率 AR 为 3.10~4.40,在 SiO_2-AR 图解中(图 4b)全部落入碱性岩区域。A/NK 为 1.04~1.17, A/CNK 为 0.93~0.99,在 A/NK-A/CNK 图解中(图 4c)显示准铝质花岗岩的特点。

微量分析结果列于表 2。该岩体的稀土元素含量较高, $\Sigma REE=(199.77\sim 331.07)\times 10^{-6}$,轻重稀土元素分馏不十分明显($La/Yb)_N=3.09\sim 7.81$,与重稀土元素相比略富轻稀土元素,且轻稀土元素[($La/Sm)_N=2.94\sim 4.25$]较重稀土元素[($Gd/Yb)_N=0.81\sim 1.34$]分馏明显, Eu 负异常明显($\delta Eu=0.12\sim 0.27$)。在球粒陨石标准化的 REE 图解中

值为 11.13~13.67,平均为 12.50;Nd/Th 值为 0.6~1.9,平均为 1.25;Ti/Y 和 Ti/Zr 值均较低,分别为 53.12~71.73 和 3.27~5.14。

该岩体及该区花岗岩闪长质岩石的 Sr、Nd 同位素结果见表 3。计算时采用的年龄是新测得的锆石年龄。双峰山花岗岩 Sr 的初始比值(I_{Sr})异常低(0.68786~0.70369),这可能与其高 Rb 贫 Sr、高 Rb/Sr 比值有关。对于 I_{Sr} 异常低(小于 0.700)的情况,可能与其测试过程中的问题有关,所测结果可能没有

表 2 双峰山花岗岩主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)含量表Table 2 Major element($w_B/\%$) and trace element($w_B/10^{-6}$) compositions of the granites from the Shuangfengshan

样品	B70822-8	B80624-7.1	B80624-8	B80624-9.1	B80624-9.2	B80624-11.3
SiO ₂	76.71	75.05	73.33	73.63	74.67	74.23
TiO ₂	0.15	0.11	0.30	0.26	0.17	0.24
Al ₂ O ₃	11.64	12.45	12.71	12.66	12.51	12.49
Fe ₂ O ₃	0.44	0.50	0.98	0.69	0.56	0.97
FeO	0.94	0.83	1.58	1.33	1.01	1.01
MnO	0.02	0.02	0.05	0.05	0.03	0.04
MgO	0.14	0.10	0.35	0.33	0.18	0.26
CaO	0.59	0.81	0.80	1.06	0.56	1.03
Na ₂ O	3.50	4.17	4.14	3.79	3.83	3.46
K ₂ O	4.66	4.70	4.32	5.00	4.90	4.64
P ₂ O ₅	0.07	0.09	0.06	0.08	0.04	0.06
Los	0.41	0.84	1.09	0.80	0.71	0.93
Total	99.25	99.65	99.71	99.69	99.18	99.37
A/NK	1.08	1.04	1.11	1.09	1.08	1.17
A/CNK	0.98	0.93	0.98	0.93	0.99	0.99
AR	3.67	4.40	4.17	3.47	3.83	3.10
FeO ^T /MgO	9.78	12.78	6.95	5.88	8.43	7.15
La	49.81	34.37	65.10	62.94	42.64	45.75
Ce	98.00	76.66	136.67	127.05	88.97	92.49
Pr	11.12	9.05	15.19	13.74	10.11	10.50
Nd	39.81	32.78	55.62	48.87	36.50	38.47
Sm	8.55	7.54	11.65	9.55	8.02	8.10
Eu	0.33	0.30	0.86	0.79	0.46	0.73
Gd	8.39	7.86	11.73	9.36	8.45	8.30
Tb	1.51	1.45	1.92	1.51	1.45	1.35
Dy	9.53	9.91	12.25	9.51	9.89	8.95
Ho	2.09	2.23	2.55	2.00	2.17	1.87
Er	6.53	7.21	7.72	6.00	6.91	5.75
Tm	1.03	1.19	1.17	0.92	1.08	0.87
Yb	6.57	7.99	7.48	5.78	7.09	5.60
Lu	0.95	1.24	1.16	0.90	1.09	0.87
Y	61.87	66.76	71.73	55.58	64.24	53.12
Rb	244.13	300.83	185.48	215.02	257.73	216.10
Sr	26.65	25.63	57.11	81.00	32.23	60.50
Zr	267.07	201.39	395.57	304.41	235.50	294.99
Nb	22.56	25.46	26.17	20.55	20.60	19.99
Ba	161.61	114.08	360.37	404.90	189.75	319.10
Hf	6.61	6.95	9.67	7.30	6.61	7.24
Ta	1.65	2.00	2.00	1.68	1.85	1.64
Pb	17.11	27.91	21.83	21.79	28.32	22.83
Th	32.01	51.57	36.84	26.08	35.52	31.78
U	2.95	3.60	2.56	2.50	6.43	3.03
ΣREE	244.21	199.77	331.07	298.90	224.83	229.60
(La/Yb) _N	5.44	3.09	6.24	7.81	4.31	5.86
(La/Sm) _N	3.76	2.94	3.61	4.25	3.43	3.65
(Gd/Yb) _N	1.06	0.81	1.30	1.34	0.99	1.22
δEu	0.12	0.12	0.22	0.25	0.17	0.27
10 000 Ga/Al	3.35	3.87	3.74	3.25	3.41	3.38
Y/Nb	2.74	2.62	2.74	2.70	3.12	2.66
Rb/Nb	10.82	11.81	7.09	10.46	12.51	10.81

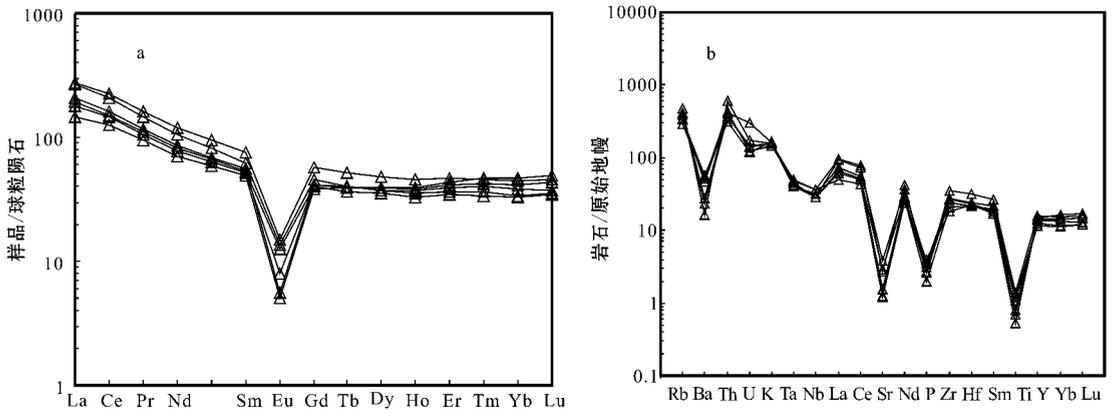


图 5 双峰山 A 型花岗岩体稀土元素球粒陨石标准化 (Sun and McDonough, 1989) 分布模式图 (a) 和原始地幔标准化 (据 Sun and McDonough, 1989) 蛛网图 (b)

Fig. 5 Chondrite-normalized (after Sun and McDonough, 1989) REE patterns (a) and primitive mantle normalized (after Sun and McDonough, 1989) spidergram (b) of the Shuangfengshan A-type granites

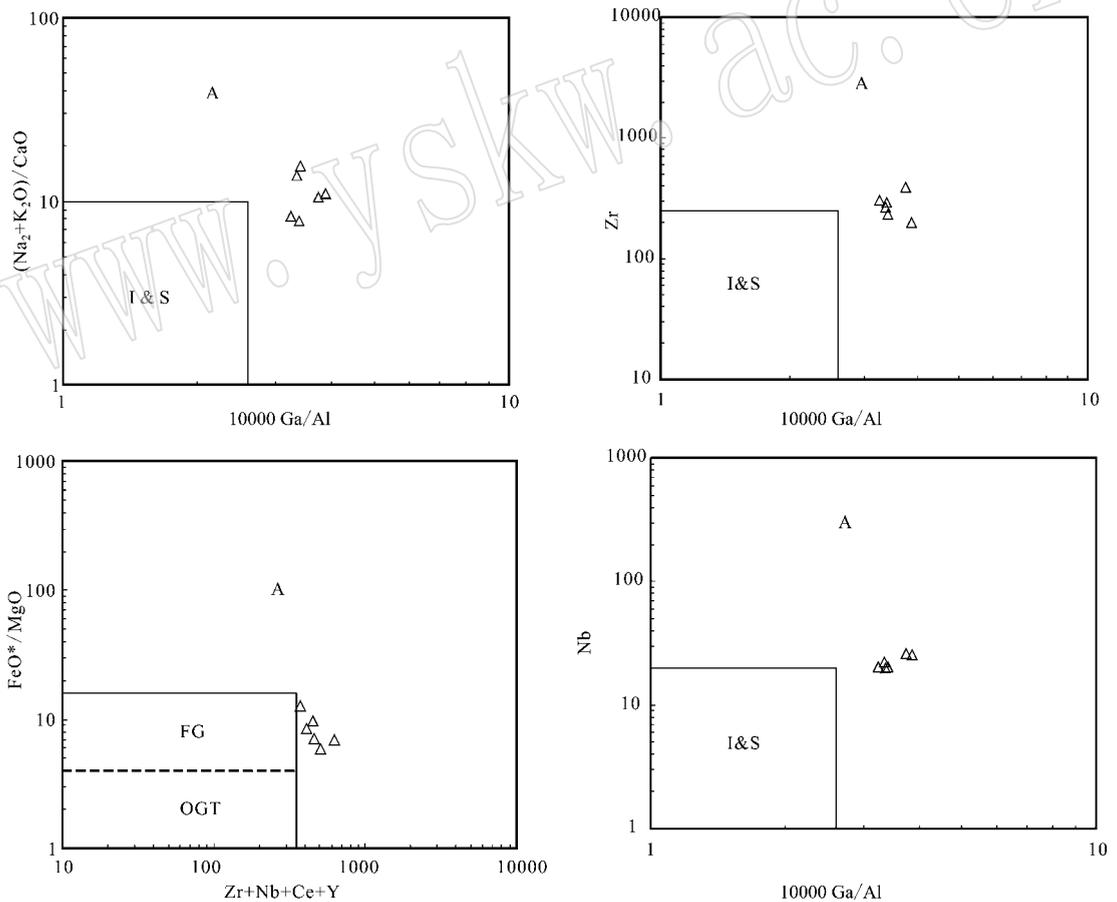


图 6 双峰山 A 型花岗岩判别图 (据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 6 Discrimination diagrams of the Shuangfengshan A-type granites (after Whalen *et al.*, 1987)

地质意义 (Jahn *et al.*, 2000), 因此主要以 Nd 同位素结果为主。双峰山花岗岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为

0.512 423~0.512 492 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -0.1~0.3 模式年龄 t_{DM} 为 1.16~1.38 Ga。该岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值略高

表 3 双峰山岩体 Sr、Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd compositions of Shuangfengshan granites

样号	岩性	年龄 /Ma	$\omega_B/10^{-6}$		$\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}$	$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$	2 σ_m	I_{Sr}	$\omega_B/10^{-6}$		
			Rb	Sr					Sm	Nd	
SF07	碱长花岗岩	415	247.90	24.40	29.842 0	0.864 24	16	0.687 86	8.77	41.67	
B80624-7.1	正长花岗岩	415	297.73	24.44	35.924 2	0.900 75	12	0.688 42	6.75	28.98	
B80624-9.1	正长花岗岩	415	234.13	81.43	8.359 0	0.753 09	11	0.703 69	9.74	49.72	
LYB19-2	花岗闪长岩	440	67.43	604.90	0.322 5	0.708 29	15	0.706 27	3.62	21.18	
LY-12-17	花岗闪长岩	423	79.59	1 016.50	0.226 6	0.707 71	14	0.706 34	4.53	34.78	

样号	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}$	2 σ_m	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM}	$t_{\text{DM-1}}/\text{Ga}$	$t_{\text{DM-2}}/\text{Ga}$	数据来源
SF07	0.127 3	0.512 466	5	-3.4	-0.35	0.3	1.21	1.21	1.13	本文
B80624-7.1	0.140 9	0.512 492	11	-2.8	-0.28	0.1	1.38	1.38	1.15	本文
B80624-9.1	0.118 5	0.512 423	11	-4.2	-0.40	-0.1	1.16	1.16	1.16	本文
LYB19-2	0.103 4	0.512 337	14	-5.9	-0.47	-0.6	1.12	1.12	1.23	毛启贵(2008)
LY-12-17	0.078 8	0.512 275	9	-7.1	0.60	-0.7	0.99	0.99	1.22	赵泽辉等(2007)

注： $\epsilon_{\text{Nd}} = [(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_{\text{s}} / (\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_{\text{CHUR}} - 1] \times 10\ 000$ ， $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = (\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}})_{\text{s}} / (\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}})_{\text{CHUR}} - 1$ ，其中 s = sample， $(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_{\text{CHUR}} = 0.512\ 638$ ， $(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}})_{\text{CHUR}} = 0.196\ 6$ ；模式年龄 $t_{\text{DM-1}} = 1/\lambda \times \ln[1 + (\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_{\text{s}} - 0.513\ 15] / [(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}})_{\text{s}} - 0.213\ 7]$ ； $t_{\text{DM-2}} = t_{\text{DM-1}} - (t_{\text{DM-1}} - t) \chi (f_{\text{cc}} - f_{\text{s}}) / (f_{\text{cc}} - f_{\text{DM}})$ ； f_{cc} 、 f_{s} 、 f_{DM} 分别为地壳、样品和亏损地幔的 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 平均值； $f_{\text{cc}} = -0.4$ ， $f_{\text{DM}} = 0.085\ 92$ ， t 为岩体侵位年龄； $-0.2 < f_{\text{Sm}/\text{Nd}} < -0.6$ 采用 $t_{\text{DM-1}}$ ， $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} < -0.2$ 或 > -0.6 采用 $t_{\text{DM-2}}$ 。

于该区南侧花岗岩闪长质岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-0.7 ~ -0.6) 而与花岗闪长质岩石的模式年龄 $t_{\text{DM}}(0.99 \sim 1.12\ \text{Ga})$ 较为相近(赵泽辉等 2007; 毛启贵 2008)。

6 讨论

6.1 成岩年龄及意义

双峰山岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 16 个点的加权平均年龄为 $415 \pm 3\ \text{Ma}$, 代表该岩体的成岩年龄, 表明该岩体形成于早泥盆世。前人认为北山柳园地区花岗岩类岩石主要为海西中晚期(1:20 万区域地质报告, 1966^①; 左国朝等, 1990), 但近年的测年数据(442~380 Ma)(田永志, 1993; 安国堡, 2006, 2007; 赵泽辉等, 2007)显示柳园地区花岗岩类岩石主要形成于早中古生代。本文研究进一步确定了早中古生代花岗岩的发育。

该区南缘出露有志留纪超基性-基性岩和埃达克质花岗岩(毛启贵 2008), 显示该区当时可能发生了俯冲-碰撞增生造山作用并伴有大量的岩浆活动。双峰山岩体的成岩年龄略晚于该地区同造山花岗岩类岩石的年龄(442~421 Ma)(赵泽辉等 2007; 毛启贵 2008), 并且该岩体也包含有 433~427 Ma 的继承锆石, 因此, 该岩体可能是同造山期后被动侵位

的。韩宝福等(2004)曾报道天山一些早中古生代花岗岩具有铝质 A 型花岗岩(如拉尔墩达坂钾长花岗岩)的特征, 并进行了 TIMS 法锆石 U-Pb 定年(380~490 Ma)和地球化学研究。最近, 王立社等(2009)测得红柳河-牛圈子蛇绿岩带北缘火石山哈尔根头口布 A 型花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $387.6 \pm 8.2\ \text{Ma}$ 。双峰山 A 型花岗岩与天山地区铝质 A 型花岗岩的特征较相似, 可能反映它们处于相似的岩浆带中或具有相似的构造背景。

6.2 A 型花岗岩物源及成因探讨

如前所述, 双峰山花岗岩具有铝质 A 型花岗岩的特点。关于 A 型花岗岩的成因, 前人提出的成岩模式很多, 主要包括: ① 幔源基性岩浆高度结晶分异(Turner *et al.*, 1992; Beyth *et al.*, 1994; Han *et al.*, 1997; Mushkin *et al.*, 2003); ② 幔源物质和壳源物质混合(邱检生等, 1999; Mingram *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2006; Konopelko *et al.*, 2007); ③ 中下地壳特殊源岩的部分熔融, 如已亏损熔体的麻粒岩相岩石(Collins *et al.*, 1982; Clemens *et al.*, 1986; Whalen *et al.*, 1987; King *et al.*, 1997) 英云闪长岩-花岗闪长岩(Creaser *et al.*, 1991; patino Douce *et al.*, 1997)。

该带南侧和北侧出露有少量奥陶纪-志留纪基

① 甘肃省地质局第一区域地质测量队, 1996. 中华人民共和国区域地质测量报告(红柳园幅 1:20 万)(矿产部分)。

性岩类,但是双峰山岩体周围很少发现有大量基性岩类。该岩体的 Nb/Ta 值为 11.13~13.67,平均为 12.50,明显低于幔源岩石 (17.5 ± 2 , Hofmann, 1988; Green, 1995),而较接近陆壳岩石 (~ 11 , Taylor and McLennan, 1985; Green, 1995)。Nd/Th 值为 0.6~1.9,平均为 1.25,略低于壳源岩石 (≈ 3 , Bea *et al.*, 2001)而明显有别于幔源岩石 (>15 , Bea *et al.*, 2001)。因此其由幔源基性岩浆高度结晶分异形成的可能性较小,而可能具壳源特征。已亏损的麻粒岩相残留岩比早期 I 型花岗岩的初始源岩更富集 Ca、Al、Mg 而亏损 K、Si 及不相容元素 (Creaser *et al.*, 1991),这样的残留相岩石作为源岩很难产生本区富 Si、富碱的 A 型花岗岩。该岩体 Nb 负异常

及 Pb 正异常特征,也显示其壳源的特点。并且该岩体中几乎没有见有基性岩包体,也没有见到其他岩浆混合的迹象,因此壳幔混合并不强烈。在 A 型花岗岩亚类判别图中(图 7),双峰山 A 型花岗岩落入 A₂ 型花岗岩的区域。Eby 等 (1992) 研究认为 A₂ 型花岗岩来源于大陆地壳或板下地壳,且与陆-陆碰撞或岛弧岩浆作用有关。双峰山 A 型花岗岩具有较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 ($-0.1 \sim 0.3$) 和较年轻的模式年龄 (t_{DM}) ($1.16 \sim 1.38$ Ga),显示了较年轻地壳组分的贡献。因此,可以推测要形成如此规模的花岗岩体,幔源岩浆底侵可能是其重要的热源机制。综合分析,可以认为,双峰山 A 型花岗岩更可能是幔源岩浆底侵而导致上覆年轻地壳的部分熔融的产物。

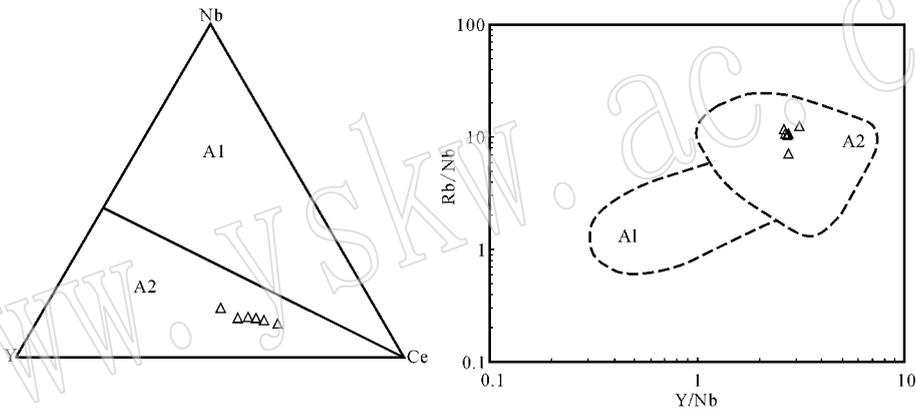


图 7 双峰山 A 型花岗岩亚类判别图(据 Eby, 1992)

Fig. 7 Discrimination diagrams for the subdivision of the Shuangfengshan A-type granites (after Eby, 1992)

该区附近并没有发现同期的镁铁质-超镁铁质岩,而在柳园北侧出露有早古生代蛇绿混杂岩(左国朝等, 1990, 2003; 张新虎, 1993)和具有埃达克质的岛弧花岗岩(毛启贵, 2008),因此这些年轻地壳物质可能由洋壳或岛弧建造组成。这些年轻地壳物质经部分熔融形成花岗闪长质岩浆,并在该区形成大量具有岛弧性质的花岗闪长质岩石(赵泽辉等, 2007; 毛启贵, 2008)。

综合对比上述花岗闪长质岩石与 A 型花岗岩的地球化学和 Nd 同位素特征可知, A 型花岗岩可能由早期花岗闪长质岩浆经进一步结晶分异作用形成,主要表现在: ①从花岗闪长质岩石到碱长花岗岩,随着 SiO₂ 含量的递增,大多数主元素、微量元素的含量及 A/NK、10 000 × Ga/Al 值、Rb/Sr 等比值都表现

出了明显有规律的线性变化趋势(图 8),表明两者可能是同源岩浆不同演化阶段的产物; ②A 型花岗岩强烈亏损 Eu、Sr、Ba 等元素,显示斜长石、磷灰石和黑云母的分离结晶作用趋势; P 和 Ti 的亏损说明岩浆经历了磷灰石以及榍石、角闪石、黑云母等矿物的分离结晶作用; ③A 型花岗岩的投点在 Rb/Sr - SiO₂ 协变图上(图 9a)呈指数曲线,在由强不相容元素(Rb)与强相容元素(Sr)组成的对数图解上(图 9b)呈现陡倾斜的负相关性,表明分离结晶作用是该岩体的主导成岩作用; ④A 型花岗岩与花岗闪长质岩石具有较相似的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和 t_{DM} 值,表明两者可能来源于相似的母岩浆; ⑤在空间上,花岗闪长质岩石以小岩体的形式发育于岛弧带的南缘,在时间上,花岗闪长质岩石比 A 型花岗岩形成时间稍早。

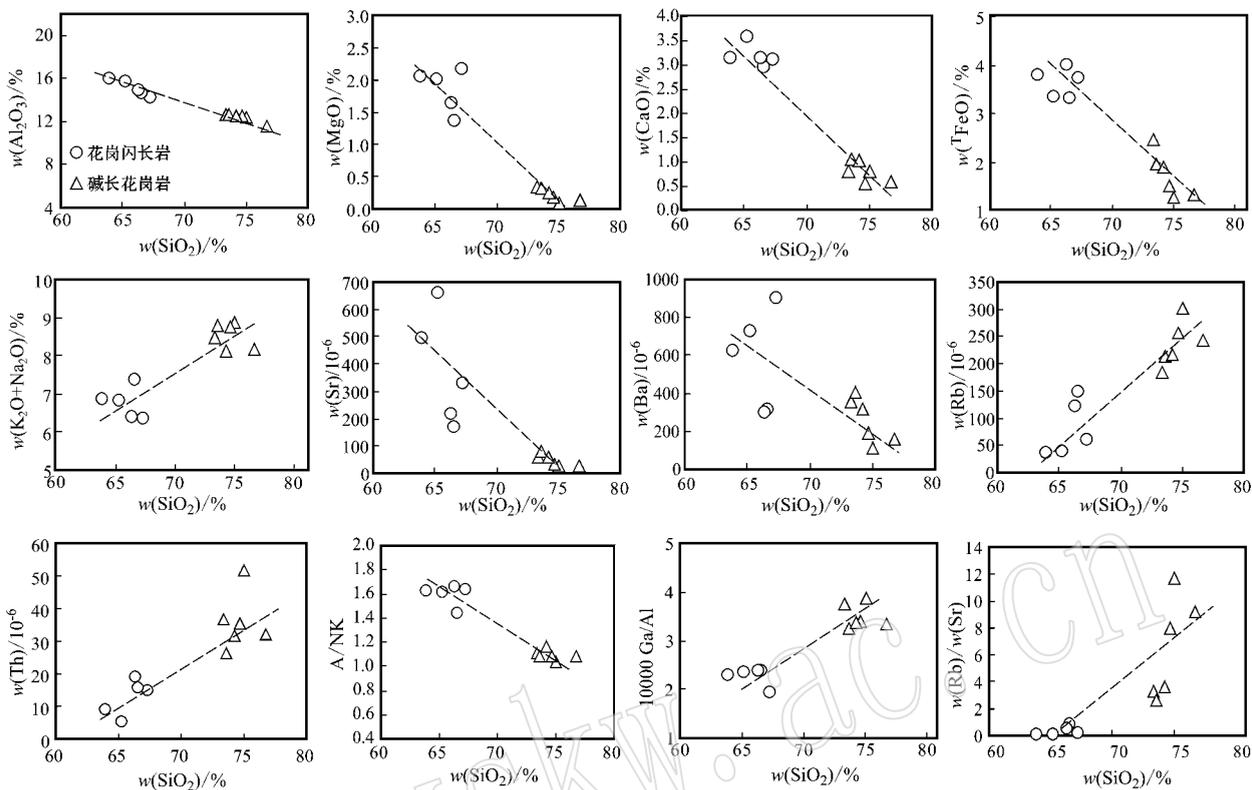


图 8 主量元素 (%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 对 SiO_2 变化图解 (花岗岩闪长质岩石的数据引自毛启贵, 2008)

Fig. 8 Variations of major elements and trace elements with SiO_2 (data of granodiorites from Mao Qigui, 2008)

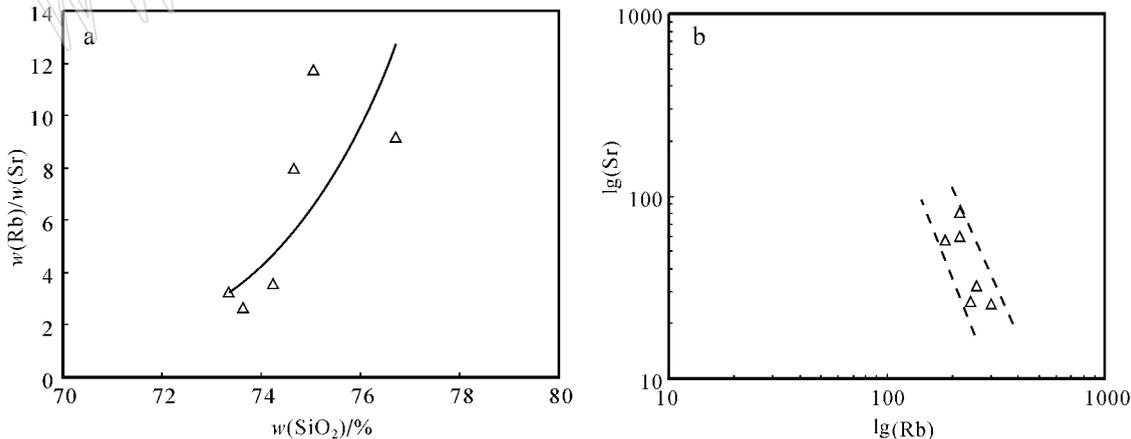


图 9 Rb/Sr - SiO_2 (a) 及 Sr - Rb (b) 微量元素判别图

Fig. 9 Rb/Sr versus SiO_2 (a) and Sr versus Rb (b) trace-element discriminate diagrams

因此,该岩体可能是该区较早的钙碱性花岗岩演化到后期形成的,为幔源岩浆底侵而导致上覆年轻地壳(洋壳或岛弧建造组成)部分熔融形成的花岗岩闪长质岩浆经进一步结晶分异作用的产物。

6.3 构造演化的意义

研究显示,北山及东天山发育大量早中生代

同造山花岗岩,揭示了俯冲造山的构造背景(李伍平等 2001; Wang *et al.*, 2006; 胡霏琴等, 2007; 唐俊华等 2007; 赵泽辉等, 2007; 王涛等, 2008)。例如,北山地区 450~420 Ma 的花岗岩具有典型的 I 型花岗岩特征(赵泽辉等 2007; 毛启贵, 2008),与俯冲造山有关。在东天山,红柳河地区的洋壳早在早寒武

世(516 Ma)之前形成,并在 412 Ma 之前闭合(郭召杰等,2006;于福生等,2006;张元元等,2008)。早奥陶世,洋盆发展到鼎盛阶段,并在敦煌地块北缘花牛山-五峰山一带撕裂成陆缘裂谷海槽,双峰山 486 Ma 继承锆石的年龄,可能反映了一次重要的构造-岩浆事件。中晚奥陶世,该区进入沟、弧、盆体系发育的俯冲增生造山阶段,胡霏琴等(2007)测得东天山天湖东二长花岗岩的 SHRIMP U-Pb 年龄为 467 ± 10 Ma,具岛弧花岗岩的地球化学特征。随后该地区进入碰撞增生造山阶段(442~415 Ma),并发育有大量的同造山花岗岩类岩石,如毛启贵(2008)获得柳园地区辉铜山南具有埃达克质地球化学特征的花岗闪长质岩石的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 442 ± 3 Ma,赵泽辉等(2007)采用 SHRIMP 法测得柳园地区花岗闪长岩的年龄为 423 ± 8 Ma,辉铜山东钾长石花岗岩和二长花岗岩的年龄分别为 436 ± 9 Ma 和 397 ± 7 Ma,均是后碰撞背景下的岩浆产物。在红柳河地区也出露有该期的同造山花岗岩类岩石(李伍平等,2001;王涛等,2008)。到泥盆纪,在辉铜山-墩墩山一带形成山前火山-磨拉石拗陷带,反映了造山后期环境(左国朝等,1995;何世平等,2005)。

相对而言,在北山及东天山还发现一些(铝质)A型花岗岩。韩宝福等(2004)曾报道天山地区出露有一些早古生代铝质 A 型花岗岩,与早古生代的一次造山过程的晚期伸展阶段有关。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中泥盆世 A 型花岗岩,显示可能产于构造挤压向构造伸展的转折阶段。

双峰山花岗岩也具有与之相似的 A 型花岗岩特

点,在 $Y/Nb - Rb/Nb$ 和 $Nb - Y - Ce$ 判别图(图 7)中,均落在 A_2 型花岗岩区域;在 $Y + Nb - Rb$ 和 $Y - Nb$ 构造环境判别图中(图 10),均落在后碰撞区域。该岩体不发育边缘片麻理构造,围岩接触变质变形不明显,显示了被动定位的特点。这些岩石的地球化学和构造特征以及区域地质背景显示,该岩体形成于后造山或造山晚期环境。这进一步证实,该时期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。重要的是,该岩体是该区目前报道的最老的 A 型花岗岩,它的发现,说明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,为进一步精确限定后造山或造山后的时间提供了新的证据。

7 结论

(1) 采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法,获得双峰山岩体的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 415 ± 3 Ma (MSWD=1.5),代表该岩体的形成年龄,即双峰山岩体为早泥盆世岩体。

(2) 该岩体可能源于幔源岩浆底侵而导致上覆地壳物质(可能由洋壳和岛弧建造组成)部分熔融形成的花岗闪长质岩浆经进一步结晶分异作用形成,可能为该区较早的钙碱性花岗闪长质岩石演化到后期的产物。

(3) 双峰山岩体具有 $A(A_2)$ 型花岗岩的特点,结合岩体构造特征和区域背景,特别是与 450~420 Ma 具有 I 型花岗岩特征的同造山花岗岩对比分析,认为该岩体形成于后造山或造山作用演化晚期相对

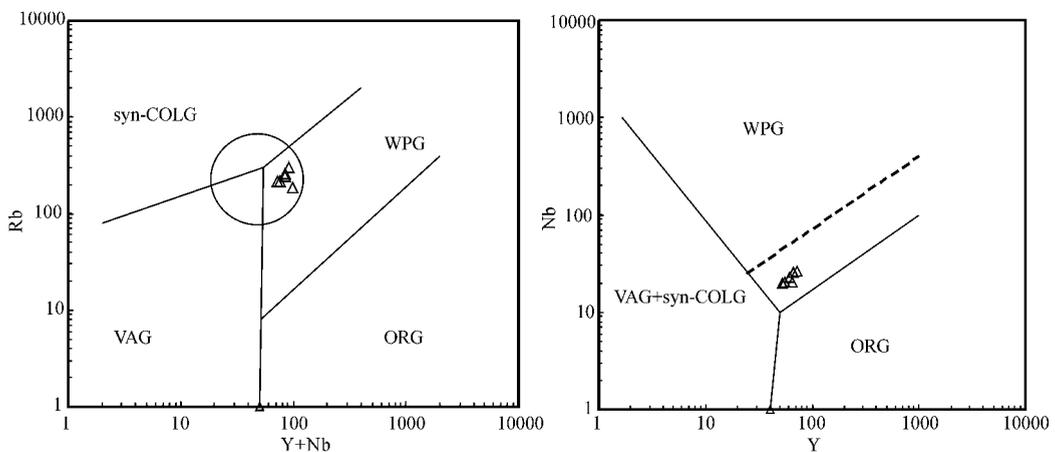


图 10 双峰山 A 型花岗岩构造环境判别图(据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 10 Discrimination diagrams for tectonic settings of the Shuangfengshan A-type granites (after Pearce *et al.*, 1984)

伸展的环境。

(4) 双峰山早泥盆世 A 型花岗岩为北山地区出现的最老的 A 型花岗岩,为进一步精确限定后造山或造山后的时间提供了新的证据,表明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。

致谢 感谢郭谦谦和康凯同学在野外工作中的帮助及王彦斌研究员在锆石 U-Pb 年龄分析中的指导与帮助。感谢审稿人对本文提出的建议和修改意见。

References

- An Guobao. 2006. Characteristics of Shijinpao gold deposit and genesis analysis [J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 483~490 (in Chinese).
- An Guobao. 2007. Characteristics of Shijinpao granites and their relationship to gold metallogenesis in the Beishan mountains, northwestern Gansu [J]. *Gansu Geology*, 16(3): 19~25 (in Chinese with English abstract).
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chem. Geol.*, 192: 59~79.
- Bea F, Arzamastsev A, Montero P, et al. 2001. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: evidence of mantle-driven metasomatic fluids affecting crustal materials [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 140: 554~566.
- Beyth M, Stern R J, Altherr R, et al. 1994. The Late Precambrian Timna igneous complex, Southern Israel: Evidence for comagmatic-type sanukitoid monzodiorite and alkali granite magma [J]. *Lithos*, 31(3~4): 103~124.
- Chen B and Jahn B M. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 691~703.
- Clemens J D, Holloway J R and White A J R. 1986. Origin of an A-type granite; experimental constraints [J]. *American Mineralogist*, 71(3~4): 317~324.
- Collins W, Beams S, White A, et al. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189~200.
- Creaser R A, Price R C and Wormald R J. 1991. A-type granites revisited; assessment of a residual-source model [J]. *Geology*, 19(2): 163~166.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implication [J]. *Geology*, 20: 641~644.
- Gong Quansheng, Liu Mingqiang, Li Hailin, et al. 2002. The type and basic characteristics of Baishan orogenic belt, Gansu [J]. *Northwestern Geology*, 35(3): 28~34 (in Chinese with English abstract).
- Gong Quansheng, Liu Mingqiang, Liang Minghong, et al. 2003. The tectonic facies and tectonic evolution of Beishan orogenic belt, Gansu [J]. *Northwestern Geology*, 36(1): 11~17 (in Chinese with English abstract).
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. *Chem. Geol.*, 120: 347~359.
- Guo Z J, Shi H Y, Zhang Z C, et al. 2006. The tectonic evolution of the south Tianshan paleo-oceanic crust inferred from the spreading structures and Ar-Ar dating of the Hongliuhe ophiolite, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 95~102 (in Chinese with English abstract).
- Han B, Wang S, Jahn B M, et al. 1997. Depleted mantle source for the U-lungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for the Phanerozoic crustal growth [J]. *Chemical Geology*, 138: 135~159.
- Han Baofu, He Guoqi, Wu Tairan, et al. 2004. Zircon U-Pb dating and geochemical features of early Paleozoic granites from Tianshan, Xinjiang: Implications for tectonic evolution [J]. *Xinjiang Geology*, 22(1): 4~11 (in Chinese with English abstract).
- Han Yigui, Zhang Shihong, Franco Pirajno, et al. 2007. Evolution of the Mesozoic Granites in the Xiong'er-shan-Wufangshan Region, Western Henan Province, China and Its Tectonic Implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81: 253~265.
- He Feng, Xu Liquan, Su Hongwei, et al. 2004. Characteristics and tectonic setting of Middle-Permian A-type granites in Tianshuijing area, west of inner Mongolia [J]. *North western geology*, 37(3): 7~14 (in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Ren Bingchen, Yao Wenguang, et al. 2002. The division of tectonic units of Beishan area, Gansu-Inner Mongolia [J]. *North-western Geology*, 35(4): 30~40 (in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Zhou Huiwu, Ren Bingchen, et al. 2005. Crustal evolution of Palaeozoic in Beishan area, Gansu and Inner Mongolia, China [J]. *Northwestern Geology*, 38(3): 6~15 (in Chinese with English abstract).
- He Xuexian, Tang Suohan, Zhu Xiangkun, et al. 2007. Precise Measurement of Nd Isotopic Ratios by Means of Multi-collector Magnetic Sector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 8(4): 405~410 (in Chinese with English abstract).
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the earth: the relationship between large crust, and oceanic crust Earth Planet [J]. *Sci. Lett.*, 90: 297~314.
- Hong D W, Wang S G, Xie X L, et al. 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: evidence from the Central Asian Orogenic Belt [J]. *J. Asian Earth Sci.*, 23(5): 799~813.
- Hu Aiqin, Wei Gangjian, Zhang Jibing, et al. 2007. SHRIMP U-Pb age for zircons of East Tianhu granitic gneiss and tectonic evolution significance from the eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1795~1802 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Capdevila R, Liub D, et al. 2004. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor-Ulaan Baatar, Mongolia: geochemical and Nd isotopic evidence, and implications for

- Phanerozoic crustal growth [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23 : 629~653.
- Jahn B M, Litvinovsky B A, Reichov M, *et al.* 2009. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian-Transbaikalian Belt : evolution, petrogenesis and tectonic significance [J] (in press).
- Jahn B M, Wu F Y, Chen B, *et al.* 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions Royal Society of Edinburgh* [J]. *Earth Sciences*, 91 : 181~193.
- Jiang Sihong and Nie Fengjun. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of the granitoids in Beishan mountain, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2 719~2 732 (in Chinese with English abstract).
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, South-eastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Konopelko D, Biske G, Seltmann R, *et al.* 2007. Hercynian post-collisional A-type granites of the Kokshaal Range, Southern Tien Shan, Kyrgyzstan [J]. *Lithos*, 97(1~2): 140~160.
- Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, *et al.* 2004. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt : geological and isotopic evidence [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 605~627.
- Li Jinyi, Wang Kezhao, Li Yaping, *et al.* 2006. Geomorphological features, crustal composition and geological evolution of the Tianshan Mountains [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 895~909 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuping, Wang Tao, Li Jingbao, *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 [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3): 232~235 (in Chinese with English abstract).
- Liu Mingqiang, Wang Jianjun and Dai Wenjun. 2006. Single grain zircon U-Pb ages and geological significance of Maanshanbei granite in the Hongshishan area in the Beishan orogenic belt, Gansu [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(6): 473~479 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xueya and Wang Quan. 1995. Tectonics of orogenic belts in Beishan, western China and their evolution [J]. *Dixue Yanjiu*, (28): 37~48 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.00 : a geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4 : 1~70.
- Mao Qigui. 2008. Paleozoic to Early Mesozoic accretionary and collisional tectonics of the Beishan and adjacent area, northwest China (Doctoral Dissertation) [D]. Institute of Geology and Geophysics, CAS (in Chinese with English abstract).
- Mei Hualin, Li Huimin, Lu Songnian, *et al.* 1999. The Age and Origin of the Liuyuan Granitoid, Northwestern Gansu [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18(1): 14~17 (in Chinese with English abstract).
- Mingram B, Trumbull R B, Littman S, *et al.* 2000. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia : evidence for mixing of crust and mantle-derived components [J]. *Lithos*, 54(1~2): 1~22.
- Mushkin A, Navon O, Halicz L, *et al.* 2003. The petrogenesis of A-type magmas from the Amram Massif, Southern Israel [J]. *Journal of Petrology*, 44(5): 815~832.
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Bai Daming, *et al.* 2002. Metallogenic Studies and Ore Prospecting in the Conjunction Area of Inner Mongolia, Gansu and Xinjiang (Beishan Mt.), Northwest China [M]. Beijing : Geol. Pub. House, 1~408 (in Chinese with English abstract).
- Patiño Douce A E. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids [J]. *Geology*, 25(8): 743~746.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25 : 956~983.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamoun area, northern Turkey [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58 : 63~81.
- Qi Ruirong, Huang Zengbao and Jin Xia. 2006. Geochemical characteristics and tectonic implication of the Dashishan A-type granitic intrusion in Beishan area, Gansu Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(2): 90~96 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Guangsheng. 1998. Normalization of isotopic dilution analyses : a new program for isotope mass spectrometric analysis [J]. *Scientia Sinica (Series A)*, 31 : 1 263~1 268 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi and McInnes B I A. 1999. Geochemistry and petrogenesis of the I- and A-type composite granite masses in the central area of Zhejiang and Fujian provinces [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 237~246 (in Chinese with English abstract).
- Sengör A M C, Natal'in B A and Burtman U S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 364 : 209~304.
- Su Yuping, Tang Hongfeng and Cong Feng. 2008. Zircon U-Pb age and petrogenesis of the Huangyangshan alkali granite body in East Junggar, Xinjiang [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(2): 117~126 (in Chinese with English abstract).
- Su Yuping, Tang Hongfeng, Liu Congqiang, *et al.* 2006. The determination and preliminary study of Sujiquan aluminous A-type granites in East Junggar, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(3): 175~184 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in Ocean Basins* [C]. *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 42 : 315~345.
- Tang Hongfeng, Qu Wenjun, Su Yuping, *et al.* 2007. Genetic connection of Sareshike tin deposit with the alkaline A-type granites of Sabei body in Xinjiang : constraint from isotopic ages [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1 989~1 997 (in Chinese with English abstract).
- Tang Junhua, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, *et al.* 2007. Characteris-

- tics, age and origin of the Xianshuiquan gneissose granite in eastern Tianshan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1 803 ~ 1 820 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust : Its Composition and Evolution* [J]. Oxford : Blackwell, 91 ~ 92.
- Tian Yongzhi. 1993. Study on the features and auriferous potentiality of Shijinpao rock body in Beishan mountain, Gansu provied [J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 15(4): 62 ~ 69 (in Chinese with English abstract).
- Turner S P, Foden J D and Morrison R S. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma : An example from the Padthaway Ridge, South Australia [J]. *Lithos*, 28(2): 151 ~ 179.
- Wang Lishe, Yang Jianguo, Xi Chenlin, *et al.* 2009. Geochronology and Geochemistry of Haergentoukou Granite in the Beishan Area, Gansu, China and Their Geological Significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 377 ~ 387 (in Chinese with English abstract).
- Wang T, Hong D W, Jahn B M, *et al.* 2006. Timing, Petrogenesis, and Setting of Paleozoic Synorogenic Intrusions from the Altai Mountain, Northwest China : Implications for the Tectonic Evolution of an Accretionary Orogen [J]. *The Journal of Geology*, 114 : 735 ~ 751.
- Wang Tao, Hong Dawei, Tong Ying, *et al.* 2005. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen : its implications for vertical continental growth [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 640 ~ 650 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Li Wuping, Li Jinbao, *et al.* 2008. Increase of juvenile mantle-derived composition from syn-orogenic to post-orogenic granites of the east part of the east Tian Shan (China) and implications for continental vertical growth : Sr and Nd isotopic evidence [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 762 ~ 772 (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites : geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407 ~ 419.
- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis [J]. *Geol. Mag.*, 106 : 370 ~ 384.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S, *et al.* 2000. Phanerozoic crustal growth : U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China [J]. *Tectonophysics*, 328 : 89 ~ 113.
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Study on the genetic mineralogy of zircon and it's constraint on the explanation on zircon U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1 589 ~ 1 604 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, *et al.* 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of North Xinjiang, NW China : implications for the tectonic evolution of Central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32 : 102 ~ 117.
- Xiu Qunye. 1999. Geochemical characteristics and tectonic significance of the granitoids in Beishan area, Gansu province [J]. *Progress in Precambrian Research*, 22(1): 31 ~ 39 (in Chinese with English abstract).
- Xu Baoliang, Yan Guohan, Lu Fengxiang, *et al.* 2001. Petrology of rich-alkaline and alkaline intrusive complexes in Beishan-Alxa region [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 263 ~ 272 (in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, *et al.* 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China : Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence [J]. *Lithos*, 89(1 ~ 2): 89 ~ 106.
- Yu Fusheng, Li Jinbao and Wang Tao. 2006. The U-Pb Isotopic Age of Zircon from Hongliuhe Ophiolites in East Tianshan Mountains, Northwest China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(3): 213 ~ 216 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, *et al.* 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry [J]. *Geostandards and Geoanalytical*, 28(3): 353 ~ 370.
- Yuan H L, Wu F Y, Gao S, *et al.* 2003. Determination of U-Pb age and rare and rare earth element concentration of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(22): 2 411 ~ 2 421.
- Yuan Honglin, Gao Shan, Dai Mengning, *et al.* 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 [J]. *Chemical Geology*, 247 : 100 ~ 118.
- Zhang Xinhui. 1993. Tectonostratigraphic evolution of the Qilian and Beishan orogenic belt in Gansu, Qinghai, Inner Mongolia [J]. *Acta Geology Gansu*, 2(1): 80 ~ 87 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuanyuan and Guo Zhaojie. 2008. Accutrain on formation and emplacement age of Hongliuhe ophiolite, boundary region between and Xinjiang and Gansu Provinces and its tectonic implication [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 803 ~ 809 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei and Tang Suohan. 2002. Isotopic geochronology of metamorphic strata in the southern Qinling area [M]. Beijing : Geological Publishing House, 226 ~ 230 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zehui, Guo Zhaojie and Wang Yi. 2007. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic implications of the granitoids from Liuyuan area, Beishan, Gansu province, northwest China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1 847 ~ 1 860 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao and He Guoqi. 1990. Plate Tectonics and Metallogenic Regularities in Beishan Region [M]. Beijing : Peking University Publishing House, 1 ~ 209 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Liu Chunyan, Bai Wancheng, *et al.* 1995. Volcano-molasse geological structure and geochemical signature in Devonian period collision orogenic in Beishan, Gansu-In Mongolia [J]. *Acta Geologica Gansu*, 4(1): 35 ~ 44 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Liu Yike, Liu Chunyao, *et al.* 2003. Framework and evolution of the tectonic structure in Beishan area across Gansu province, Xinjiang autonomous region and inner Mongolia au-

onomous region[J]. Acta Geology Gansu, 1(12): 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[J]. 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[J]. 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[J]. 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化[J]. 西北地质, 36(1): 11~17.
- 郭召杰, 史宏宇, 张志诚, 等. 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[J]. 岩石学报, 22(1): 95~102.
- 韩宝福, 何国琦, 吴泰然, 等. 2004. 天山早古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义[J]. 新疆地质, 22(1): 4~11.
- 何世平, 任秉琛, 姚文光, 等. 2002. 甘肃内蒙古北山地区构造单元划分[J]. 西北地质, 35(4): 30~40.
- 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[J]. 西北地质, 38(3): 6~15.
- 何学贤, 唐索寒, 朱祥坤, 等. 2007. 多接收器等离子体质谱(MC-ICPMS)高精度测定 Nd 同位素方法[J]. 地球学报, 28(4): 405~410.
- 贺锋, 许立权, 苏宏伟, 等. 2004. 内蒙古西部甜水井地区中二叠世 A 型花岗岩[J]. 西北地质, 37(3): 7~14.
- 胡霏琴, 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[J]. 岩石学报, 23(08): 1795~1802.
- 江思宏, 聂凤军. 2006. 北山地区花岗岩类的⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 22(11): 2719~2732.
- 李锦轶, 王克卓, 李亚萍, 等. 2006. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化[J]. 地质通报, 25(8): 895~909.
- 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[J]. 地球学报, 22(3): 232~235.
- 刘明强, 王建军, 代文军, 等. 2006. 甘肃北山红石山地区马鞍山北花岗岩体的单颗粒锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 25(6): 473~479.
- 刘雪亚, 王荃. 1995. 中国西部北山造山带的大地构造及其演化[J]. 地学研究, 第 28 号: 37~48.
- 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[D](博士论文). 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 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[J]. 岩石矿物学杂志, 18(1): 14~17.
- 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 2002. 北山地区金属矿床成矿规律与找矿方向[M]. 北京: 地质出版社, 1~408.
- 齐瑞荣, 黄增保, 金霞. 2006. 甘肃北山大石山 A 型花岗岩体地球

化学特征及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 25(2): 90~96.

- 邱检生, 王德滋, McInnes, B. I. A. 1999. 浙闽沿海地区 I 型-A 型复合花岗岩体的地球化学及成因[J]. 岩石学报, 15(02): 237~246.
- 苏玉平, 唐红峰, 丛峰. 2008. 新疆东准噶尔黄山碱性花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄和岩石成因[J]. 矿物学报, 28(2): 117~126.
- 苏玉平, 唐红峰, 刘丛强, 等. 2006. 新疆东准噶尔苏吉泉铝质 A 型花岗岩的确立及其初步研究[J]. 岩石矿物学杂志, 25(3): 175~184.
- 唐红峰, 屈文俊, 苏玉平, 等. 2007. 新疆萨惹什克锡矿与萨北碱性 A 型花岗岩成因关系的年代学制约[J]. 岩石学报, 23(8): 1989~1997.
- 唐俊华, 顾连兴, 张遵忠, 等. 2007. 东天山咸水泉片麻状花岗岩特征、年龄及成因[J]. 岩石学报, 23(8): 1803~1820.
- 田永志. 1993. 甘肃北山拾金坡岩体特征及其含金性研究[J]. 西安地质学院学报, 15(4): 62~69.
- 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[J]. 地质学报, 83(3): 377~387.
- 王涛, 洪大卫, 童英, 等. 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[J]. 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-后造山花岗岩幔源组分的递进及陆壳垂向生长的意义——Sr、Nd 同位素证据[J]. 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[J]. 科学通报, 49: 1589~1604.
- 修群业. 1999. 甘肃北山地区花岗岩类地球化学特征及大地构造意义[J]. 前寒武纪研究进展, 22(1): 31~39.
- 许保良, 阎国翰, 路凤香, 等. 2001. 北山-阿拉善地区二叠-三叠纪富碱侵入岩的岩石学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 20(3): 263~272.
- 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[J]. 地球学报, 27(3): 213~216.
- 张新虎. 1993. 甘、青、蒙祁连山、北山造山带构造地层演化史[J]. 甘肃地质学报, 2(1): 80~87.
- 张元元, 郭召杰. 2008. 甘新交界红柳河蛇绿岩形成和侵位年龄的准确限定及大地构造意义[J]. 岩石学报, 24(4): 803~809.
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒. 2002. 南秦岭变质地层同位素年代学[M]. 北京: 地质出版社, 226~230.
- 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[J]. 岩石学报, 23(8): 1847~1860.
- 左国朝, 何国琦. 1990. 北山板块构造及成矿规律[M]. 北京: 北京大学出版社, 1~226.
- 左国朝, 刘春燕, 白万成, 等. 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[J]. 甘肃地质学报, 4(1): 35~44.
- 左国朝, 刘义科, 刘春燕. 2003. 甘新蒙北山地区构造格局及演化[J]. 甘肃地质学报, 12(1): 1~15.