内蒙古北山马山花岗岩LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 及其地质意义

易鹏飞1,李宁1,高峰1,冯伟华1,唐力1,高云鹏1,李琦1, 刘 渭2,宋得郓2

YI Pengfei¹, LI Ning¹, GAO Feng¹, FENG Weihua¹, TANG Li¹, GAO Yunpeng¹, LI Qi¹, LIU Wei², SONG Deyun²

1.陕西省地质调查中心,陕西 西安 710046;
2.陕西省核工业地质调查院,陕西 西安 710046
1. Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710046, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Nuclear Industry Geology Surveying Institute, Xi'an 710046, Shaanxi, China

摘要:对内蒙古北山南带东段的马山花岗岩体进行了LA-ICP-MS 锆石U-Pb年代学和岩石地球化学研究,结果表明,马山花 岗岩以花岗闪长岩为主,偏铝质-过铝质,中钾钙碱性特征,具有较高的SiO₂(64.85%~79.17%)、Na₂O+K₂O(5.13%~6.62%),富钠 (Na₂O/K₂O>1);在球粒陨石标准化配分模式图上,配分曲线相对平缓,富集轻稀土元素,重稀土元素分馏不明显且相对亏损, δ Eu=0.65~0.91,具有弱Eu负异常;在微量元素原始地幔标准化蛛网图上,亏损Ba、Nb、Ta、P、Ti,富集Rb、Th、U、K。通过 LA-ICP-MS 锆石U-Pb测年,马山花岗岩体的侵位年龄为281.8±3.2Ma。结合区域地质背景,认为马山花岗岩体是壳幔混合 成因的,形成于早二叠世后碰撞伸展体制之下,北山南带于早二叠世晚期进入后碰撞裂谷伸展发育阶段。 关键词:内蒙古;北山南带;花岗岩;LA-ICP-MS 锆石U-Pb 年龄;后碰撞伸展阶段;马山

中图分类号:P588.12*1;P597*.3 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2017)02/03-0331-11

Yi P F, Li N, Gao F, Feng W H, Tang L, Gao Y P, Li Q, Liu W, Song D Y. LA–ICP–MS zircon U–Pb ages of the granites from Mashan of Inner Mongolia and their geological significances. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(2/3):331–341

Abstract: This paper reports LA–ICP–MS zircon U–Pb ages and geochemistry of the granite in Mashan, east of the southern Beishan, Inner Mongolia, with the purpose of constraining its formation age and petrogenesis. The results show that the granitic body mainly consists of granodiorite which belongs to middle–K calc–alkaline series with metaluminous–peraluminous characteristics and high content of SiO₂(64.85%~79.17%), Na₂O+K₂O (5.13%~6.62%) and Na₂O/K₂O > 1. In addition, the granite invariably exhibits relatively gentle light rare earth elements (LREE) enrichment with flat heavy rare earth element (HREE) and weak negative Eu anomalies (δ Eu=0.65~0.91) in the chondrite–normalized REE patterns, depletion of Ba, Nb, Ta, P, Ti and enrichment of Rb, Th, U, K in the spidergram. The LA–ICP–MS zircon U–Pb age of the granite is 281.8±3.2Ma. Based on regional geology, the above characteristics indicate that the Mashan granite was the mixing product of crustal and mantle derived magmas and was formed under the tectonic setting of post–collisional extension in Early Permian. This implies that the east of southern Beishan Mountain turned to the stage of rift in post–collisional extensional period during Early Permian.

Key words: Inner Mongolia; southern Beishan Mountain; granite; LA–ICP–MS zircon U–Pb age; post–collisional extensional period; Mashan Mountain

收稿日期:2016-01-27;修订日期:2016-05-05

资助项目:内蒙古自治区地质勘查基金管理中心项目《内蒙古自治区阿拉善盟梧桐沟等五幅1:5万区域矿产地质调查》(编号:NMKD2013-31) 作者简介:易鹏飞(1988-),男,硕士,从事区域地质调查工作。E-mail:yc.ypfei@163.com

北山地区花岗岩类岩石分布广泛,约占该区 全部侵入岩的95%四。虽然前人对本区的花岗岩类 进行了大量的研究,积累了丰富的资料[2-19],但对 北山同一时代花岗岩构造属性的认识却不相同, 尤其是华力西期花岗岩,对其构造属性^[20-21]和岩浆 成因的认识存在分歧。对北山花岗岩地区构造属 性、岩浆成因特点和与区域构造演化关系的认识影 响了对区域动力学的进一步探讨。另外,花岗岩体 的多集中在北山北带,而北山南带很少。目前仅有 3处石炭纪一二叠纪花岗岩的精确定年报道:桥湾 北花岗岩 303.7±2.4Ma^[22]、音凹峡南花岗岩 281.7± 2.9Ma^[23]、石板泉花岗岩 280.5±5.5Ma^[24]。因此,对北 山南带的花岗岩体形成时代、岩石成因的研究,对 于研究其构造岩浆作用具有重要的意义。近年来, 北山南带东段地区发现了一系列与花岗岩类侵入体 密切相关的金属矿床,如白山堂铜矿[25]、玉山钨矿[26-28] 等,对花岗岩类侵入体的认识在一定程度上制约了 该地区的找矿勘探工作。基于此,本文针对北山南 带东段梧桐沟马山花岗岩体,进行了详细的地球化 学测试和锆石 U-Pb 测年, 对其形成时代和岩石成 因进行约束,并结合区域资料,对其地球动力学意 义进行探讨,以期为北山南带构造岩浆研究提供可 靠的地质资料。

1 区域地质背景

研究区梧桐沟—神螺山一带位于北山南带东 段,内蒙古西南侧与甘肃省接壤位置。地质背景 较复杂,左国朝等¹³、龚全胜等¹²⁹、何世平等¹³⁰认为 其属于塔里木板块增生带北缘,并将其进一步划 归为磁海-红柳园-白山堂晚古生代陆内裂谷带; 刘雪亚等^[3]、张新虎^[32]、聂凤军等^[1]认为其属于哈 萨克斯坦板块的南缘。区内以晚古生代石炭纪 一二叠纪火山-沉积地层为主,少量前震旦纪基 底形成规模较小的推覆体,奥陶系浅变质碎屑岩 发育;下石炭统红柳园组可分为上、下2段,下段 为正粒序的碎屑岩组合,底部为砾岩,向上变细, 上段为火山熔岩及碎屑岩组合,熔岩包括安山岩 和顶部的流纹岩,少量英安岩及流纹质熔结凝灰 岩,局部为灰岩,上石炭统芨芨台子组为白云质 灰岩;下二叠统双堡塘组为磨拉石组合,由砾岩、 含砾砂岩、粗砂岩、杂砂岩组成正粒序层;双堡塘 组与红柳园组为平行不整合接触或断层接触,与 上覆中二叠统金塔组为整合接触,金塔组以大面 积出露玄武岩、枕状玄武岩及少量安山岩、火山-沉积碎屑岩为主,上二叠统方山口组以凝灰质为 主,夹少量沉凝灰岩,与金塔组无直接接触关系; 差异性沉降地区为中新生界不整合覆盖。侵入 岩以晚华力西期为主,主要岩石类型包括英云闪 长岩、二长花岗岩、黑云母二长花岗岩、花岗闪长 岩,多以岩株或小岩基产出,基性侵入岩十分发 育,主要为辉长岩及辉绿岩,前者为小岩株,后者 多为岩脉。

2 岩体地质特征

马山小岩体位于北山南带东段梧桐沟一带(图 1-a),岩体外表似椭球状,长约2.7km,宽约1km,出 露面积约2.67km²,中心坐标为北纬40°37′45″、东经 98°35′30″。侵入下石炭统红柳园组砂岩中,后被下 二叠统双堡塘组砾岩、含砾砂岩覆盖。前人粗略地 将其归入到华力西中晚期岩浆侵入活动⁰。

该岩体由花岗闪长岩组成(图2-a),其内部无 明显结构分带和成分分带,为一次岩浆侵入活动的 产物。岩石具有典型的花岗结构(图2-b),矿物成 分较简单,主要由斜长石、条纹长石和石英组成。 长石0.4~3.8mm,整体表面褐色粘土化显著,较石英 脏,斜长石半自形-自形板状,双晶纹可见;石英呈 他形粒状,表面干净透明,波状消光,粒径为0.3~ 2.7mm,充填于其他矿物之间。

锆石 U-Pb 年龄样品的采集位置为北纬 40°37′ 46″、东经 98°35′30″。

3 分析方法

对采集的样品进行主量、稀土和微量元素及 LA-ICP-MS 锆石U-Pb 年龄测定。在进行化学分 析前,先在镜下观察薄片以确定样品的适应性。主 量、微量元素由中国冶金地质总局西北地质勘查院 测试中心测定,采用XRF荧光光谱样分析方法,分 析精度优于5%;微量和稀土元素采用ICP-MS分 析,利用国家一级标准物质进行质量监控(GB/ T14506—1993),含量大于10×10⁻⁶的元素测试精度 为5%,小于10×10⁻⁶的测试精度为10%。

用常规方法分选出锆石单矿物,然后在双目镜 下根据锆石颜色、自形程度、形态、透明度等进行初 步分类,挑选出具有代表性的锆石。将锆石样品用



图 1 马山二长花岗岩体地质简图及大地构造位置图(b据参考文献[30]修改) Fig. 1 Simplified geological map and tectonic location map of Mashan granite 1—第四系;2—下二叠统双堡塘组;3—下石炭统红柳园组;4—二叠纪花岗岩;5—二叠纪辉长岩;6—不整 合界线;7—锆石 U-Pb采样位置;8—国界;9—板块缝合带;10—早古生代缝合带;11—主干断裂;12—省 界;13—隐伏断裂;14—构造单元。Ⅰ—西伯利亚板块;Ⅰ-1—一大南湖-雀儿山-狐狸山早古生代活动带陆 缘带;Ⅱ—塔里木板块;Ⅱ-1-1—黄山-红石山-路井晚古生代陆内裂谷带;Ⅱ-1-2—星星峡-明水-旱山地 块;Ⅱ-1-3—白玉山南-公婆泉-东七-山早古生代晚期活动带陆缘带;Ⅱ-2—红柳河-洗肠井构造混杂 岩带;Ⅱ-3-1—方山口-营毛沱-鹰咀红山早古生代中期活动陆缘带;Ⅱ-3-2—花牛山早古生代陆缘 裂谷带(裂陷槽);Ⅱ-3-3—磁海-红柳园-白山堂晚古生代陆内裂谷带;Ⅱ-3-4—敦煌地块

双面胶粘在载玻片上,放上PVC杯,然后将环氧树 脂和固化剂进行充分混合后注入PVC杯中,待树脂 充分固化后将其从载玻片上剥离,打磨和抛光至错 石中心部位暴露,然后拍摄透射光、反射光和阴极 发光(CL)图像。最后用体积百分比为3%的HNO₃ 清洗样品制成样品靶备用。



图 2 马山花岗岩的野外露头(a)及显微特征(b,正交偏光) Fig.2 Field outcrop (a) and microscopic features (b) of Mashan granites (crossed polarizers) PI--斜长石;Bt--黑云母;Am--角闪石

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定在西安地 质矿产研究所实验测试中心完成。测定时根据可 见光、CL和BSE(背散射电子成像)图像选择合适的 测点位置,如避免包裹体、裂隙位置等。详细的分 析步骤和数据处理方法见参考文献[33-34],用 Glitter(4.0版)程序处理原始数据。普通铅扣除时,其组 成由 Stacey 等¹⁵⁵的模式给出,年龄加权平均计算及 U-Pb 谐和图的绘制采用 Isoplot(3.0版)¹⁵⁰完成。

4 锆石U-Pb年龄

从样品中选取的锆石以浅黄色为主,个别颜 色为浅玫瑰色和近于无色,玻璃-金刚光泽。按晶



图 3 马山花岗岩体的锆石阴极发光(CL)图像、测点位置及²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄值 Fig. 3 CL image dating spots and ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of zircons from Mashan granite

体形态可以分为2类,一类呈自形双锥柱状,长 60~160 µm, 宽 30~120 µm, 长宽比多为 2~3, 透射 光下可见锆石内部发育少量裂纹和包裹体,包裹 体以长条形和椭圆形为主,多为小锆石包体,阴极 发光图像显示,锆石具有典型的岩浆韵律环带和 明暗相间的条带构造等,显示岩浆锆石的特征(图 3);另一类则有溶蚀现象,锆石长20~30 µm,宽 100~120 µm,长宽比多为4~5。部分锆石具有残留 的核部,为继承核或捕获核,部分锆石颗粒具有窄 的浅色边,但核部仍显示出清晰的岩浆环带特征。 测得的28个颗粒的28个数据中(表1),21个²⁰⁶Pb/ ²³⁸U年龄(不包括1、4、10、12、14、20、28点)介于 270.7±6.0~294.0±8.0Ma之间,给出的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄 加权平均值为281.8±3.2Ma(MSWD=1.15, n=21, 2σ)(图4)。U、Th含量分别为155×10⁻⁶~1444×10⁻⁶ 和92×10-6~660×10-6。Th/U值除2个样品略低于 0.4(0.39、0.31)外,其余的比值均介于0.42~0.99之 间,表现出典型岩浆锆石的特征。该年龄代表了岩 体的结晶年龄。此外还获得了3组年龄:①10、12、 20这3个点的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄分别为258.4±6.0Ma、 258.2±7.6Ma、260.8±6.3Ma,其年龄加权平均值为 259.2±0.1Ma, 锆石具有较规则的外形, CL图像较 亮,具有弱分带特征,为热液变质锆石,可能代表一 期热液蚀变活动;②有2个点获得了334.4Ma、 369.9Ma的年龄数据。这些锆石略磨圆,锆石环带 特征不清楚,疑为继承性锆石;③1、28这2个点的年 龄数据采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄,分别为2487±35.9Ma、 1784.1±40.2Ma,锆石外形不规则,具磨圆,环带特征 不清楚,可能为老基底的捕获锆石。

5 岩石地球化学特征

5.1 主量元素

马山花岗岩类的岩石地球化学分析(表2)表明,SiO₂含量为64.85%~69.75%,平均含量67.35%,属于酸性岩类,在SiO₂-(Na₂O+K₂O)图解(图5)上,大多数样品点投入花岗闪长岩区域;Na₂O含量为2.66%~4.72%,平均值3.68%,K₂O含量为1.90%~2.71%,平均值为2.23%,Na₂O+K₂O含量为5.13~6.62%,平均值为5.91%,Na₂O/K₂O值为0.98~2.48,平均值为1.69;Al₂O₃含量为13.55%~15.49%,平均值为14.63%;TiO₂含量为0.41%~0.76%,平均值为0.55%;A/CNK值为0.96~1.07,平均值为1.0,在



A/CNK-A/NK图解(图6)中,样品点主要投入到偏 铝质岩石范围内,2个样品投入过铝质范围内;里特 曼指数σ为1.15~1.84,为钙碱性系列岩石;在SiO₂--K₂O图解(图7)上,样品点全部投入中钾钙碱性系

分析点	含量/10-6		222001 (238x X	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		206Pb/238U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		206Pb/238U	
	²³² Th	²³⁸ U	- ²³² Th/ ²³⁸ U ·	比值	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ
TW01-1	280.96	449.94	0.62	9.3972	0.2158	0.4182	0.0092	2377.6	21.07	2252.3	41.73
TW01-2	523.95	1099.59	0.48	0.3621	0.0089	0.0437	0.0010	313.8	6.64	275.4	5.97
TW01-3	375.06	699.75	0.54	0.3941	0.0100	0.0456	0.0010	337.4	7.29	287.1	6.31
TW01-4	594.83	576.85	1.03	0.8243	0.0212	0.0526	0.0012	610.4	11.79	330.4	7.55
TW01-5	349.29	359.94	0.97	0.3703	0.0110	0.0431	0.0010	319.9	8.13	272	6.38
TW01-6	92.39	154.58	0.60	0.4218	0.0152	0.0456	0.0012	357.3	10.86	287.3	7.47
TW01-7	401.97	1310.93	0.31	0.3223	0.0078	0.0438	0.0010	283.7	6.01	276.4	5.96
TW01-8	191.06	372.5	0.51	0.3463	0.0101	0.0438	0.0010	301.9	7.58	276.3	6.38
TW01-9	292.29	294.14	0.99	0.3421	0.0102	0.0444	0.0011	298.8	7.73	280	6.53
TW01-10	99.79	354.71	0.28	0.3287	0.0093	0.0409	0.0010	288.5	7.14	258.4	5.96
TW01-11	408.08	804.03	0.51	0.3764	0.0095	0.0436	0.0010	324.4	7.02	275	6.06
TW01-12	49.69	106.02	0.47	0.4079	0.0170	0.0409	0.0012	347.4	12.27	258.2	7.6
TW01-13	133.16	156.37	0.85	0.4344	0.0141	0.0433	0.0011	366.3	10	273	6.93
TW01-14	81.57	213.17	0.38	0.5080	0.0149	0.0603	0.0015	417.1	10.03	377.7	8.81
TW01-15	291.58	308.2	0.95	0.3552	0.0104	0.0437	0.0010	308.6	7.79	275.7	6.45
TW01-16	252.32	605.27	0.42	0.3590	0.0094	0.0429	0.0010	311.5	7	270.7	6.04
TW01-17	660.33	1444.13	0.46	0.4373	0.0104	0.0461	0.0010	368.4	7.36	290.5	6.29
TW01-18	216.72	353.49	0.61	0.4315	0.0124	0.0451	0.0011	364.2	8.77	284.6	6.69
TW01-19	477.93	938.69	0.51	0.3581	0.0090	0.0457	0.0010	310.8	6.72	287.9	6.32
TW01-20	212.5	325.28	0.65	0.3001	0.0098	0.0413	0.0010	266.4	7.68	260.8	6.33
TW01-21	108.44	260.92	0.42	0.3980	0.0129	0.0456	0.0012	340.2	9.38	287.2	7.13
TW01-22	158.92	169.8	0.94	0.4177	0.0160	0.0467	0.0013	354.4	11.43	294	8.04
TW01-23	372.22	946.18	0.39	0.3493	0.0087	0.0449	0.0010	304.2	6.53	283.2	6.21
TW01-24	315.24	351.81	0.90	0.4617	0.0139	0.0457	0.0011	385.5	9.65	288.2	7.02
TW01-25	261.36	418.89	0.62	0.3418	0.0098	0.0458	0.0011	298.6	7.41	288.6	6.66
TW01-26	157.57	259.58	0.61	0.3533	0.0108	0.0458	0.0011	307.2	8.13	288.7	6.87
TW01-27	157.3	231.78	0.68	0.3569	0.0112	0.0456	0.0011	309.9	8.4	287.7	6.93
TW01-28	77.52	182.09	0.43	4.3637	0.1037	0.2902	0.0066	1705.5	19.64	1642.3	32.72

表1 马山花岗岩体LA-ICP-MS 锆石(TW01) U-Th-Pb 同位素数据 Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating data of granite from Mashan(TW01)

列;在K₂O-Na₂O图解(图8)上,样品点均投入I型 花岗岩区域。岩石的分异指数(DI)为65.74~76.80, 表明原始岩浆的结晶分异程度一般。马山岩体主 量元素特征显示,其具有钙碱性序列岩石的属性, 属于中等分异程度的I型花岗岩。

5.2 微量和稀土元素

(1)稀土元素

稀土元素分析结果如表2所示。样品的稀土元 素 总 量 为 80.57 × 10⁻⁶~125.29 × 10⁻⁶,平 均 值 为 106.44×10⁻⁶,稀土元素总含量较低;在球粒陨石标准 化配分模式图(图 9-a)上,具有相对平缓的富集轻 稀土元素(LREE)的稀土元素配分模式,重稀土元 素(HREE)分馏不明显且相对亏损,但都明显高于 球粒陨石丰度10倍。ΣLREE/ΣHREE值为1.70~ 2.43,平均值为1.99;轻稀土元素内部分异较明显, (La/Sm)_N=2.37~3.37,平均值为2.80;La/Yb=5.81~ 7.23,平均值为6.23,(La/Yb)_N=4.17~5.19,平均值为 4.47;(Gd/Yb)_N=0.85~1.25,δEu=0.65~0.91,平均 值为0.80,具有弱负Eu异常,可能与斜长石在源区 残留有关。

(2)微量元素

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图9-b) 上,所有样品的稀土元素配分模式和原始地幔标准 化图基本平行,显示同源演化的特征;显著亏损Ba、

样品号	P1/GS1	P1/GS3	P13/GS3	P13/GS5	P16/GS1 XT1	P16/GS2 XT2
岩石名称	花岗质碎裂岩	花岗质碎岩	中粗粒花岗闪长岩	中粗粒花岗闪长岩	黑云母花岗闪长岩	黑云母花岗闪长岩
SiO ₂	65.48	68.06	69.75	69.21	64.85	66.77
Al_2O_3	15.00	13.55	14.09	14.33	15.30	15.49
Fe_2O_3	1.40	1.13	1.95	2.08	3.41	3.01
FeO	3.44	3.02	1.68	1.75	2.22	1.88
TiO ₂	0.76	0.62	0.41	0.43	0.56	0.53
MgO	2.55	2.05	1.36	1.20	1.78	1.62
CaO	3.92	2.93	3.15	3.57	3.48	3.25
P_2O_5	0.16	0.16	0.07	0.09	0.12	0.12
K_2O	1.90	2.71	2.40	2.29	2.21	1.90
MnO	0.09	0.07	0.07	0.08	0.08	0.07
Na ₂ O	3.23	2.66	3.74	3.67	4.05	4.72
烧失量	1.55	3.72	0.82	0.54	1.60	1.29
总量	99.46	100.69	99.49	99.23	99.66	100.65
A/CNK	1.04	1.07	0.97	0.96	0.99	0.99
NK/A	0.49	0.54	0.62	0.59	0.59	0.63
σ	1.17	1.15	1.41	1.35	1.79	1.84
Rb	88.84	114.35	75.02	170.00	47.34	48.32
Ba	430.78	435.03	370.10	481.29	109.25	283.55
Th	12.55	13.66	8.49	17.14	6.92	4.94
U	2.10	1.30	1.44	3.79	1.68	1.40
Nb	13.36	11.54	5.78	12.36	5.75	4.42
Та	1.18	1.20	0.62	1.28	0.64	0.49
Sr	255.42	139.70	209.88	195.36	291.65	226.93
Zr	143.82	72.81	127.41	374.10	196.08	185.01
V	101.52	64.53	71.65	23.01	78.67	64.00
Cr	54.31	43.16	22.04	21.90	18.38	22.06
Co	13.38	6.74	6.29	1.34	10.11	7.72
Cu	15.99	16.80	7.21	3.16	22.49	17.54
Zn	76.13	53.91	33.03	41.80	47.13	39.88
Ga	18.83	16.43	15.27	16.56	14.36	13.37
La	18.00	18.59	15.70	12.85	14.47	13.48
Ce	24.17	31.86	31.06	19.91	37.94	34.31
Pr	5.07	4.90	3.65	3.23	4.69	3.94
Nd	19.47	18.51	14.39	12.23	18.34	15.69
Sm	4.14	4.16	3.01	2.83	3.94	3.60
Eu	1.08	0.85	0.86	0.74	0.91	0.90
Gd	3.76	3.84	2.77	2.56	3.31	3.16
ТЬ	0.74	0.81	0.55	0.48	0.60	0.59
Dy	4.40	4.95	3.57	3.00	3.52	3.57
Но	0.88	1.00	0.81	0.66	0.75	0.76
Er	2.80	3.34	2.57	2.21	2.08	2.10
Tm	0.40	0.55	0.37	0.34	0.34	0.33
Yb	2.49	3.19	2.70	2.06	2.29	2.28
Lu	0.40	0.45	0.38	0.33	0.36	0.36
Y	23.71	28.29	20.30	17.14	19.75	20.25
REE	111.51	125.29	102.69	80.57	113.29	105.31
LREE	71.93	78.87	68.67	51.79	80.29	71.91
HREE	39.58	46.42	34.02	28.78	33.00	33.39
LREE/HREE	1.82	1.70	2.02	1.80	2.43	2.15

表2 马山花岗岩体主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Analytical data of major, trace, and rare earth elements of granite from Mashan

注:元素由中国冶金地质总局西北地质勘查院测试中心测定;δEu=Eu_N/SQRT(Sm_N*Gd_N);主量元素含量单位为%,微量 和稀土元素为10⁻⁶

4.47

2.93

1.03

0.84

4.54

2.37

1.20

0.77

4.25

2.42

1.15

0.82

4.17

3.37

0.85

0.91

(La/Yb)_N

(La/Sm)_N (Gd/Yb)_N

δEu

5.19

2.81

1.25

0.84

4.18

2.88

1.00

0.65



图5 SiO₂-(Na₂O +K₂O)图解(底图据参考文献[37]) Fig. 5 SiO₂ versus Na₂O +K₂O diagram

Nb、Ta、P、Ti, Zr、Rb、Th、U、K, 富集 Zr 和亏损 Nb、 Ta、Ti, 表明岩浆源区岩石以陆壳组分为主。

岩石具有高Rb、低Sr(均小于400×10⁻⁶)、高Yb (大于2×10⁻⁶)的特征,Sr/Y值很低(Sr/Y=4.94~ 14.77,平均值为10.57),马山花岗岩微量元素Sr、Yb 特征与华南低Sr、高Yb型花岗岩相似。低Sr、高 Yb型花岗岩为浙闽型花岗岩,与其平衡的是斜长 石和角闪石残留相^[38],说明形成的压力较低(小于



Fig. 7 SiO₂ versus K₂O diagram



0.8GPa或1.0GPa),可能是地壳伸展变形减薄达正常地壳厚度(30km左右)或低于正常地壳厚度的造山后阶段形成的^[43]。在大洋中脊标准化图解(图10)上,样品与典型的后碰撞花岗岩显示出类似的趋势,说明马山花岗岩为典型的后碰撞花岗岩。

6 马山花岗岩体形成的构造背景及其成因

北山地区西邻东天山,东接阿拉善,以阿尔金 和星星峡两大走滑断裂为界,位于一个巨大的构 造楔形区内,构造过程复杂。其大地构造的归属 一直存在争议,一是将北山地区划分为北部的哈





萨克斯坦板块和南部的塔里木板块,左国朝等^[8]以 明水-石板井-小黄山缝合带(早古生代末)为界; 龚全胜等^[29]、何世平等^[30]则以红石山-黑鹰山-六陀 山蛇绿混杂岩带(晚古生代)为界;部分学者^[31-32]以 柳园-大奇山(晚古生代末)和红石山-黑鹰山-六 陀山2条深大断裂为界,将北山从南向北依次划分 为塔里木板块、哈萨克斯坦板块和西伯利亚板块; 李锦轶等^[44]则以星星峡—白玉山—牛圈子—小黄山 作为北山地区西伯利亚与中朝2个古板块之间二叠 系的分界线,认为北山南部柳园一带可能代表了二 叠纪弧后盆地环境,柳园与白玉山—小黄山之间的 区域为早古生代岛弧带。

对区域地质演化,前人有不同的观点,分歧的



Fig. 10 Ocean ridge granite (ORG) normalized geochemical patterns for samples of Mashan granite

关键点在于洋盆的最终闭合时间。左国朝等四认 为,在志留纪末一早泥盆世,北山地区的塔里木-中 朝与哈萨克斯坦两大古板块最终拼合,并导致洋盆 消失和碰撞造山;刘雪亚等四认为,在早二叠世之 前,随着北山南带及南天山古洋盆的封闭,敦煌地 块北缘的安北-旧寺墩构造带与北山造山带前缘的 柳园-大奇山地体碰撞,导致塔里木板块、哈萨克斯 坦板块和西伯利亚板块最终拼接;龚全胜等15认为, 北山地区自泥盆纪开始转化为古亚洲洋构造域演 化体系,晚石炭世末实现塔里木板块、哈萨克斯坦 板块的最终碰撞对接;何世平等140认为,石炭纪 末,哈萨克斯坦板块和塔里木板块之间的洋盆最 终闭合,形成新的统一大陆,认为在早二叠世研究 区洋盆已经闭合,经历了碰撞造山。而朱江[24则认 为,北山南带洋壳俯冲作用可能持续到早二叠世, 并在早一中二叠世洋盆最终闭合,认为北山南带石 炭纪一二叠纪的岩浆作用形成于俯冲环境,与毛启 贵[47]、肖文交[48-49]、郭谦谦[50]等观点一致。

很多学者^[3,51-52]认为,北山地区在二叠纪是一种 伸展拉伸的构造背景。左国朝等^[3]认为,早二叠世 北山南带在拉张背景下形成了峡东-俞井子裂陷 槽,但并没有形成真正的大洋;刘明强等^[53]指出,音 凹峡晚古生代陆内裂谷带为一多旋回裂谷,主要 裂谷作用发生于奥陶纪、志留纪、石炭纪和二叠 纪,反映了多期次、多旋回性、继承性"开"、"合"演 化的特征;龚全胜等^[45]认为,北山地区晚石炭世— 二叠纪为大陆板块碰撞时期;何世平等^[46]认为,早 石炭世沿石板山—大奇山—神螺山—带在前震旦 纪古老基底上形成北山南部陆内裂谷带,该裂谷带 一直发展演化到二叠纪末,并在早二叠世发展到鼎 盛时期。

综上所述,结合野外地质特征,下石炭统红柳 园组为火山-碎屑岩,火山岩组合为安山岩-英安 岩-流纹岩组合;与红柳园组平行不整合接触的下 二叠统双堡塘组为一套粗碎屑岩和细碎屑岩组 合,中二叠统金塔组以出露海相枕状玄武岩为特 征,并伴随大量的辉长岩、辉绿岩等幔源岩浆活动, 其与双堡塘组为整合接触关系。多数学者^[3,46,53]对区 内北山南带存在晚古生代洋盆有异议,认为晚古生代 为陆内裂谷环境,区内晚石炭世可能存在裂谷回返碰 撞,导致石炭系与下二叠统之间的平行不整合接触, 早二叠世裂谷进一步拉开,并在中二叠世达到鼎盛。 结合地球化学特征,可进一步确定281.8±3.2Ma的马 山花岗岩形成于后碰撞伸展环境。

吴泰然鬥将这类花岗岩归为拉张型过渡壳花岗 岩(ECG),认为其形成是由于地壳的拉伸减薄,上 地幔热物质上涌,使地壳形成一种高温低压的环 境,并使地壳发生部分重熔,同时上地幔上涌的热 物质沿拉张的裂隙与地壳的热物质发生混染作 用,对陆壳的物质进行改造,使之向过渡类型转 化,形成拉张型过渡壳的花岗岩。冯继承^[2]、张文 等四研究认为,北山南带音凹峡花岗岩也是该类型 的花岗岩体。区域上,前人对北山南带不同地段 的石炭纪—二叠纪代表性的中酸性侵入岩体进行了 Sr、Nd、Hf同位素研究,桥湾北花岗岩体^[22,24]的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值在-0.40~-0.06之间, ε_H(t)值在-1.2~5.8之间,是 典型的壳幔混合型花岗岩,代表了兴蒙造山带广泛出 现的晚古生代—中生代大陆地壳生长现象;音凹峡南 花岗岩体也位于北山南带,张文四报道的该岩体的 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 值在+4.4~+7.8之间;石板泉花岗岩体的 $\varepsilon_{\rm Nd}(t)$ 值在-0.1~-1.6之间^[24]。一般认为,具有正 ε_{Nd}(t)和 $\varepsilon_{\rm H}(t)$ 值的花岗质岩石来自于亏损地幔,或由亏损地幔 中新增生的年轻地壳物质的部分熔融形成。结合研究 区二叠纪大量基性岩浆活动(枕状玄武岩和辉长、辉绿 岩的发现),认为北山南带石炭纪一二叠纪(305~ 280Ma)的花岗岩具有普遍的壳幔混合成因特征。

7 结 论

(1)马山花岗岩体的LA-ICP-MS 锆石 U-Pb

年龄为281.8±3.2Ma,为后碰撞花岗岩。

(2)马山花岗岩体具有典型的壳幔混合特征, 其机制可能是幔源基性岩浆底侵后遭受地壳物质 混合或混染。北山南带 305~280Ma之间的花岗岩 普遍具有壳幔混合成因的特征。

(3)马山花岗岩体及北山南带众多壳幔混合成 因的花岗岩体说明,北山南带在早二叠世总体为后 碰撞伸展环境。

致谢:西安地质矿产研究所实验测试中心的李 艳广和汪双双工程师在LA-ICP-MS实验操作及数 据处理和解释方面给予了热情的帮助,审稿专家为 本文提出了十分有益的修改意见和建议,在此一并 表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 聂凤军,江思宏,白大明,等.北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向[M].北京:地质出版社,2002:1-408.
- [2]刘雪亚.甘肃北山区的钙碱系列岩浆活动及其与板块构造的关系[J].中国地质科学院院报,1984,10:151-163.
- [3]左国朝,何国琦.北山板块构造及成矿规律[M].北京:北京大学出版 社, 1990:1-226
- [4]穆志国,刘驰,黄宝玲,等.甘肃北山地区同位素定年与构造岩浆热 事件[J].北京大学学报(自然科学版),1992,28(4):486-497.
- [5]穆志国,左国朝.甘肃北山古生代造山带地壳演化的同位素和稀土 元素地球化学特征[J].北京大学学报(自然科学版), 1994,30(2): 202-214.
- [6]孙桂英,张德全,徐洪林.格尔木-额济纳旗地学断面走廊域花岗岩 类的地球化学特征与构造环境的判别[J].地球物理学报, 1995,38 (s2):145-158.
- [7]于海峰,陆松年,梅华林,等.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[J].岩石学报, 1999,15(4):532-328.
- [8]修勤业.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, 1999,22(1):31-39.
- [9]梅华林,李惠民.甘肃柳园地区花岗质岩石时代及成因[J].岩石矿物 学杂志,1999,18(1):14-17.
- [10]徐保良,阎国翰, 陆凤香,等.北山一阿拉善地区二叠一三叠纪富 碱侵入岩的岩石学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2001,20(3):263-272.
- [11]聂凤军,江思宏,刘妍,等.甘肃花牛山东钾长花岗岩**Ar/3*Ar同位 素年龄及其地质意义[J].地质科学, 2002,37(4):415-422.
- [12]聂凤军,江思宏,白大明,等.北山中南带海西一印支期岩浆活动与 金的成矿作用[J].地球学报, 2003,24(5):415-422.
- [13]江思宏,聂凤军,陈文,等.北山明水地区花岗岩时代的确定及其地 质意义[J].岩石矿物学杂志, 2003,22(2):107-111.
- [14]江思宏,聂凤军,陈文,等.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[J].矿床地质, 2003,22(2):185-190.

- [15]江思宏,聂凤军.北山地区花岗岩类成因的Nd同位素制约[J].地 质学报,2006,80(6):826-842.
- [16]江思宏,聂凤军.北山地区花岗岩类的**Ar/**Ar同位素年代学研究[]].岩石学报,2006,22(11):2719-2732.
- [17]戴霜,方小敏,张翔,等.北山中部地区闪长岩-花岗岩类成因及构造背景[]].兰州大学学报(自然科学版),2003,39(1):86-92.
- [18]赵泽辉,郭召杰,王毅.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,2007,23(8):1847-1860.
- [19]王立社,杨建国,谢春林,等.甘肃北山火石山哈儿根头口布花岗岩 年代学、地球化学及其地质意义[J].地质学报,2009,83(3):377-387.
- [20]江思宏.北山地区岩浆活动与金的成矿作用[D]. 中国地质科学院 博士学位论文, 2004:1-175.
- [21]童英,王涛,洪大卫,等.北疆及邻区石炭一二叠纪花岗岩时空分布 特征及其构造意义[]].岩石矿物学杂志,2010,29(6):619-641.
- [22]冯继承,张文,吴泰然,等.甘肃北山桥湾北花岗岩体的年代学、地 球化学及其地质意义[J].北京大学学报(自然科学版),2012,48(1): 61-70.
- [23]张文,冯继承,郑荣国,等.甘肃北山音凹峡南花岗岩体的LA-ICP MS定年及其构造意义[J].岩石学报,2011,27(6):1649-1661.
- [24]朱江.北山造山带南带构造-岩浆建造与金多金属成矿[D]. 中国 地质大学博士学位论文,2013:1-197.
- [25]陕亮,许荣科,郑有业,等.北山地区白山堂铜多金属矿区岩浆岩锆 石 LA-ICP MS U-Pb 年代学及其地质意义[J].中国地质,2013,40 (5):1600-1612.
- [26]张新虎,苏犁,崔学军,等.甘肃北山造山带玉山钨矿成岩成矿时代 及成矿机制[J].科学通报,2008,53(9):1077-1084.
- [27]王银茹,黄满湘,赵亮,等.玉山钨矿岩石学特征及成矿关系[J].新疆 地质,2011,29(2):217-221.
- [28]赵亮.甘肃金塔县玉山钨矿成矿规律及成矿预测研究[D]. 中南大 学硕士学位论文,2010: 1-65.
- [29]龚全胜,刘明强,梁明宏,等.甘肃北山造山类型及基本特征[J]. 西 北地质,2002,35(3):28-34.
- [30]何世平,任秉琛,姚文光,等.甘肃内蒙古北山地区构造单元划分[J]. 西北地质,2002,35(4):30-40.
- [31]刘雪亚,王荃.中国西部北山造山带的大地构造及其演化[J].地学 研究, 1995,28:37-48.
- [32]张新虎.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,1993,2(1): 80-86.
- [33]Horn L, Rudnick R L, Mcdonough W F. Precise elemental and isotope ratio determination by simultaneous solution nebulization and laser ablation- ICPMS: Application to U- Pb geochronology[J]. Chemical Geology, 2000, 167:405-425.
- [34]Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U–Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28(3):353–370.
- [35]Stacey J S, Kraners J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model[J]. Earth and Planetary Science Letters.1975, 26(2):207–221.

- [36]Ludwig K R. User's manual for Isoplot/Ex, version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003,4:1–70.
- [37]Eric A K, Middelmost.Naming materials in the magma/igneous rock system[J].Earth–Science Reviews,1994,37:215–224.
- [38]Maniar P D, Piccoli P M. Tectionic discrimination in of granitoids[]]. Geological Society, Am. Bull., 1989, 1: 635–643.
- [39]Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides for major and minor element[J]. Lithos, 1989,22: 246 – 263.
- [40]路远发.Geokit:一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J].地球 化学,2004,33(5):459-464.
- [41]Sun S S, Macdonough W F.Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: Implations for mantle composition and processes[C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society,London,Special Publications, 1989,42(1):313–345.
- [42]Pearce J A, Harris N B L, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of the granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984,25: 956–983.
- [43]张旗,王焰,李承东,等.花岗岩按照压力的分类[J],地质通报,2006, 25(11):1274-1278.
- [44]李锦轶,张进,杨天南,等.北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造 分区与构造演化[J].吉林大学学报, 2009,39(4):584-605.
- [45]龚全胜,刘明强,梁明宏,等.北山造山带大地构造相及构造演化[]. 西北地质,2003,36(1):11-17.
- [46]何世平,周会武,任秉琛,等.甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演 化[J].西北地质, 2005,38(3):6-15.
- [47]毛启贵.北山及邻区古生代一早古生代增生与碰撞大地构造格架[D].中国科学院地质与地球物理研究所博士学位论文,2008.
- [48]肖文交,舒良树,高俊,等.中亚造山带大陆动力学过程与成矿作 用[J].新疆地质,2008,23:599-603.
- [49]Xiao W J, Windley B F, Huang B C, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage[J]. American Journal of Science, 2010, 310:1553–1594.
- [50]Guo Q Q, Xiao W J, Brian F, et al. Provenance and tectonic settings of Permian turbidites from the Beishan mountains, NW China: Implications for the Late Paleozoic accretionary tectonics of the southern Altaids[J]. Journal of the Asian Earth Sciences, 2012, 49:54– 68.
- [51]姜常义,程松林,叶书锋,等.新疆北山地区中坡山北镁铁质岩体岩 石地球化学与岩石成因[J].岩石学报,2006,22(1):115-126
- [52]赵泽辉,郭召杰,韩宝福,等.新疆东部一甘肃北山地区二叠纪玄武 岩对比研究及其构造意义[J].岩石学报, 2006,22(5):1279-1293.
- [53]刘明强,龚全胜,梁明宏.甘肃北山地区音凹峡多旋回裂谷带[J].甘 肃地质学报, 1999,8(2):15-22.
- [54]吴泰然.花岗岩及其形成的大地构造环境[J].北京大学学报(自然 科学版), 1995,31(3):358-365.
- ①甘肃省地质局第二区域地质测量队. 红柳大泉幅1:200000区域地 质测量报告. 1971.