

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.022

北山造山带南缘一条山北闪长岩地球化学、 年代学特征及其构造意义

俞胜¹, 赵斌斌¹, 贾轩¹, 翟新伟², 任杰东¹

(1. 甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730020;

2. 兰州大学地球科学与矿产资源学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要:一条山北闪长岩地处北山造山带与敦煌地块的接触部位, 对其研究可以更深入地了解北山造山带南缘古生代的构造演化及其地球动力学意义。笔者对一条山北闪长岩系统开展了锆石 U-Pb 同位素和全岩主量、微量元素分析。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析显示, 一条山北闪长岩侵位时代为早二叠世(274.6 ± 1.6)Ma。全岩地球化学分析显示, 其为准铝质钙碱性系列岩石, 富集大离子亲石元素 Rb、Pb、Th、U 等元素, 尤其是强不相容元素 Rb、Th、K 富集程度较高, 强烈亏损 Ba、Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 富集 Zr、Hf。岩石成因分析表明, 一条山北早二叠世闪长岩岩浆源区为岩石圈地幔岩浆作用导致下地壳岩石部分熔融, 并与少量幔源玄武质岩浆混合。根据相关判别图解并结合区域地质资料分析, 一条山北早二叠世闪长岩形成于后碰撞伸展拉张环境, 指示北山南带在早二叠世进入了后碰撞演化阶段或者局部进入后碰撞演化阶段。

关键词:北山造山带; 闪长岩; 地球化学; 早二叠世; 后碰撞环境

中图分类号: P595

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2022)04-0267-13

Geochemistry, Geochronology Characteristics and Tectonic Significance of Yitiaoshan Diorite in the Southern Margin of Beishan Orogenic Belt

YU Sheng¹, ZHAO Binbin¹, JIA Xuan¹, ZHAI Xinwei², REN Jiedong¹

(1. The Second Institute of Geology and Minerals Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Minerals Exploration and Development, Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The Yitiaoshanbei diorites are located between the Beishan orogenic belt and Dunhuang terrane. The study of these diorites has important geological implications for the Paleozoic tectonic evolution and geodynamic processes of the Beishan orogenic belt. In this study, we present zircon U-Pb ages, and whole-rock major and trace element compositions for diorites from the Yitiaoshanbei area. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating suggests that Yitiaoshanbei diorites were emplaced at the Early Permian (ca. 274.6 Ma). Geochemical characteristics imply that these diorites belong to the metaluminous and calc-alkaline series rocks. These diorites are enriched in

收稿日期: 2022-04-20; 修回日期: 2022-06-17; 网络发表日期: 2022-11-15; 责任编辑: 李辉

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目“甘肃北山成宜镁铁质-超镁铁质杂岩体成因与找矿潜力研究”(21JR7RA787)资助。

作者简介: 俞胜(1984-), 男, 高级工程师, 长期从事区域地质矿产调查与矿产勘查研究相关工作。E-mail: 78181205@qq.com。

large ion lithophile elements (LILEs; e. g., Rb, Th, K, U and Pb), and depleted high field strength elements (HFSEs; e. g., Ba, Nb, Ta, Ti, P, Zr and Hf). The Early Permian Yitiaoshanbei diorites were derived by partial melting of lower crustal materials, induced by lithospheric mantle magmatism and mixed with a small amount of mantle derived basaltic magma. Along with related discriminant diagrams and regional geological data, we suggest that the Yitiaoshanbei diorites were generated in a post-collisional extensional setting. These results also indicate that the southern belt of the Beishan has been underwent post-collisional stage or partially entered the post collisional evolution stage during the Early Permian.

Keywords: Beishan orogenic belt; diorite; geochemistry; Early Permian; post-collisional tectonic setting

北山造山带位于中亚造山带中段南缘,是由多个微陆块、岛弧、洋壳残留体及陆缘岩石经过复杂的拼贴而形成的复杂造山带,也是世界上最大、最复杂的显生宙增生造山带(马骊等,2018)。甘肃北山地区地处塔里木板块、哈萨克斯坦板块、西伯利亚板块的衔接处,为天山造山带的东支,是中亚造山带的重要组成部分(杨经绥等,2010;何彦彬等,2015;马骊等,2018)。

北山造山带作为古亚洲洋构造域一个重要的构造活动带,其构造记录较完整,自中元古代以来有大量的岩浆活动,尤其进入古生代以来岩浆活动尤为强烈,除了大规模裂谷火山活动之外(牛亚卓等,2013),还广泛发育同时代的花岗质岩浆和层状基性-超基性岩浆侵入活动(王玉往等,1997)。

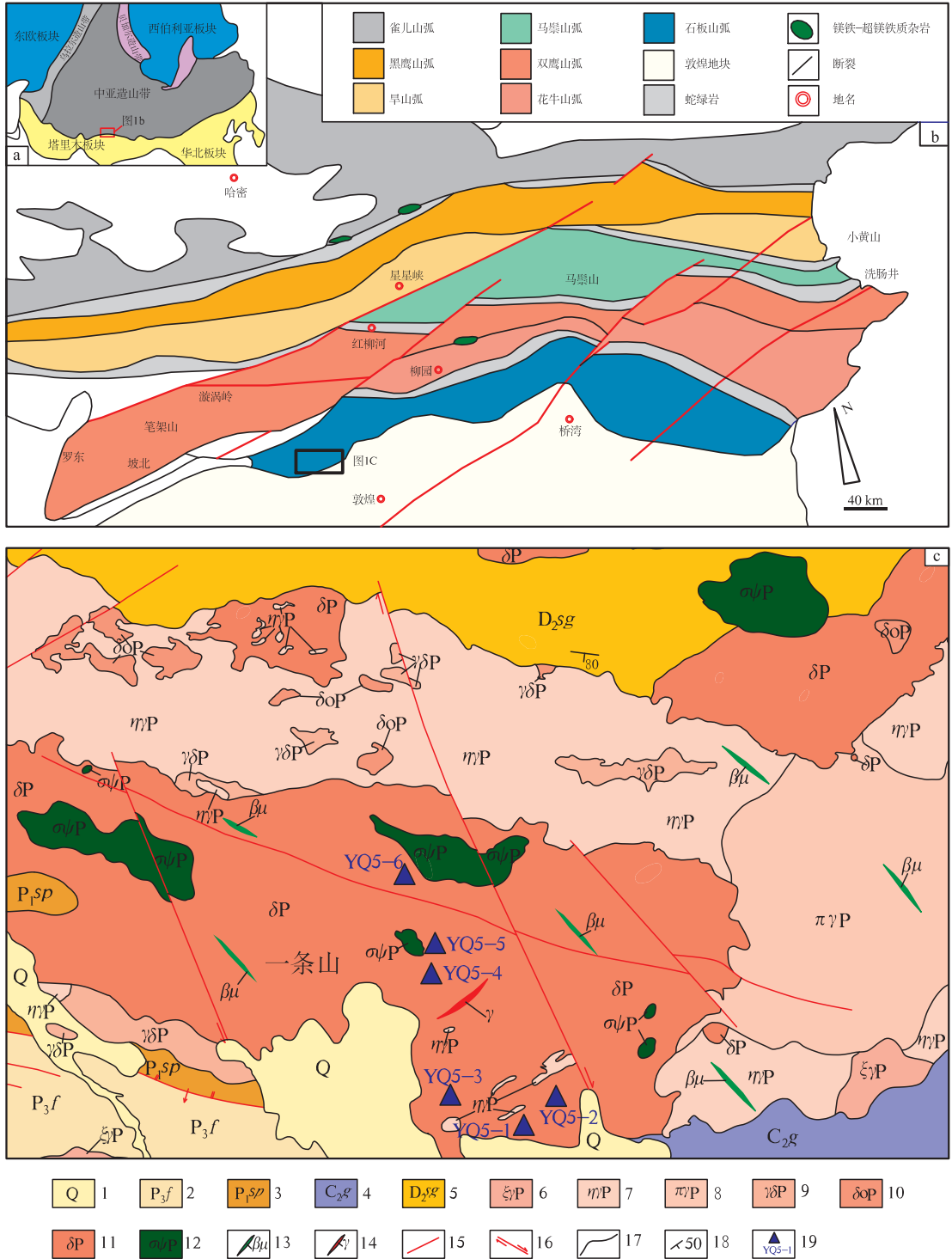
对于北山南带晚古生代构造背景一直是众多研究学者争论的焦点。前人针对其所属的火成岩等不同地质体进行了大量年代学及地球化学研究(左国朝等,2003;张文等,2011;郑荣国等,2016;易鹏飞等,2017;宋东方等,2018;孙海瑞等,2020;赵宏刚等,2020)。张元元等(2008)获得侵入红柳河蛇绿岩中未变形的花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $(405 \pm 5) \text{ Ma}$,表明北山南带的大洋在此前已经关闭;左国朝等(2003)通过梳理北山地区大陆岩石圈、深大断裂、古地磁等成果资料,认为北山地区古亚洲洋盆志留纪末-泥盆纪初闭合;许伟等(2019)认为北山南带野马井流纹岩(392 Ma)和二长花岗岩(402.7 Ma)为后碰撞构造环境的产物;宋东方等(2018)通过对北山中部变质杂岩及相关侵入岩开展构造变形和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学研究,认为北山最晚的增生造山事件可能延续到三叠纪;王国强(2015)认为墩墩山英安岩(367 Ma)是洋盆碰撞造山后拉伸作用形成;孙新春等(2021)认为双峰山花岗闪

长岩 $[(334.8 \pm 2.1) \text{ Ma}]$ 是早石炭世玄武岩浆底侵作用下发生部分熔融的产物,指示辉铜山-帐房山弧后盆地于晚泥盆世一早石炭世开始北向俯冲,该区在早石炭世仍处于洋壳俯冲演化阶段;孙海瑞等(2020)对北山南带柳园正长花岗斑岩脉(288.5 Ma)研究,指出该区在早二叠世仍处于洋壳俯冲构造环境;Xiao等(2010)认为与敦煌地块相连的北山杂岩是古亚洲洋在中二叠世南向俯冲形成的大陆弧和弧前增生杂岩的组合,古亚洲洋闭合应晚于中二叠世;郑荣国等(2016)通过对柳园-音凹峡地区二叠系流纹岩 $[(273 \pm 1) \text{ Ma}]$ 研究,认为北山南带在早二叠世应处于大陆裂谷的构造背景。综上所述,关于古亚洲洋的闭合时限一直没有统一的认识,争议较大,限制了对于北山造山带的宏观认识。

笔者在1:5万区域地质矿产调查的基础上,选取北山造山带南缘一条山北闪长岩为研究对象,通过LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素年代学、岩石学和岩石地球化学特征研究,探讨其形成时代及其形成的构造动力学过程,以丰富北山地区构造演化历史的研究内容,以期为北山地区的大地构造演化及地球动力学机制研究提供重要的参考依据。

1 地质背景

一条山北闪长岩分布于北山造山带南缘红柳园裂谷带内,地处北山造山带与敦煌地块的接触部位(图1a)。区域上侵入岩发育,从超基性岩至酸性岩皆有,其中以酸性岩为主;岩浆侵入活动以二叠纪、石炭纪为主,三叠纪次之,石炭纪-二叠纪从中基性岩浆侵入活动开始,到偏碱性的酸性岩浆侵入活动为止,构成较完整的岩浆侵入旋回(图1b)。



1. 第四系; 2. 上二叠统方山口组; 3. 下二叠统双堡塘组; 4. 中石炭统干泉组; 5. 中泥盆统三个井组; 6. 二叠世正长花岗岩; 7. 二叠世二长花岗岩; 8. 二叠世斑状花岗岩; 9. 二叠世花岗闪长岩; 10. 二叠世石英闪长岩; 11. 二叠世闪长岩; 12. 二叠世基性超基性杂岩; 13. 辉绿岩脉; 14. 花岗岩脉; 15. 性质不明断层; 16. 平移断层; 17. 地质界线; 18. 产状; 19. 采样位置及样品编号

图 1 (a)中亚造山带构造简图、(b)北山造山带构造简图和(c)研究区地质简图
(图 1a、图 1b 据孙海瑞等, 2020)

Fig. 1 (a)Simplified tectonic map of the Central Asian Orogenic Belt, (b)Tectonic unit map of Beishan area and (c)Geological sketch map of the study area (Fig. 1a, Fig. 1b after Su Hairui et al. , 2020)

一条山北闪长岩体平面上呈不规则状(图 1c), 被后期花岗岩穿切分为 2 个部分, 总面积约 40 km², 侵位于下二叠统双堡塘组和中泥盆统 3 个井组中, 岩体与围岩的接触带有混染现象, 岩体内有较多的围岩残留体; 围岩接触部位可见绿泥石化、绿帘石化等蚀变; 有同岩体的岩枝、岩脉贯入围岩中。岩体以中细粒结构为主, 局部出现中粗粒或粗粒结构, 岩石类型复杂。岩体西部暗色矿物较多, 颜色较深, 岩性偏向基性。区域上广泛发育北西向辉绿岩脉体。

2 样品采集及岩石学特征

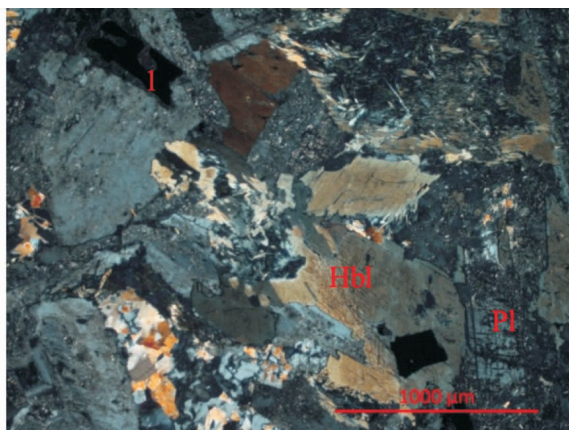
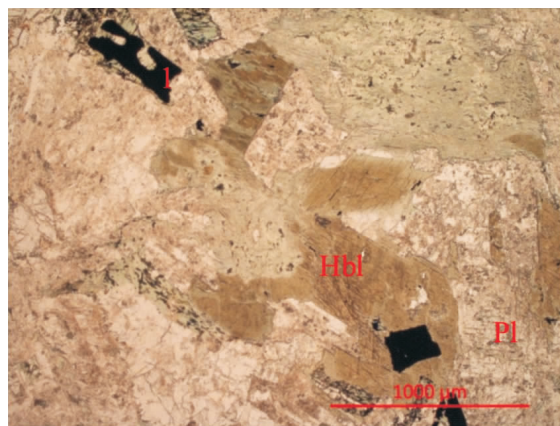
2.1 样品采集

本次测试样品采自一条山北闪长岩岩体, 为了提高测试的质量和准确度, 在采集时, 对每个样品都系统采集代表性的岩石样品, 主要选择岩体中心部

位、出露良好, 无蚀变的基岩作为同位素年龄及主、微量元素的测试样品。采集 1 件锆石 U-Pb 测年样和 6 件岩石地球化学分析样, 岩性均为闪长岩, 采样位置见图 1c。

2.2 岩石学特征

闪长岩具细粒半自形粒状结构, 块状构造。岩石主要由斜长石、角闪石、少量黑云母、石英和金属矿物等组成; 副矿物见微量磷灰石(图 2)。斜长石(63%±)呈半自形板条状, 长约 0.60~1.60 mm, 具弱绢云母化、泥化, 晶体表面略显浑浊, 聚片双晶可见, 少量发育环带构造。角闪石(33%±)呈半自形-自形柱状, 横截面呈近六边形, 粒径为 0.55~1.60 mm, 横截面见角闪石式解理, 部分蚀变为绿泥石。黑云母(±2%)呈片状, 长约 0.35~1.30 mm, 分布在斜长石粒间, 部分具绿泥石化等。石英(±2%)呈他形粒状, 粒径为 0.10~1.20 mm, 晶体表面较干净, 分布于其他矿物粒间。



Pl. 斜长石; Hbl. 角闪石, 见角闪石式解理; 1. 金属矿物; 左为单偏光, 右为正交偏光

图 2 闪长岩显微镜下特征照片

Fig. 2 Microscopic feature of diorite

3 分析测试方法

3.1 LA-ICP-MS 测年

锆石 U-Pb 法(LA-ICP-MS)同位素测年样品前期挑选、制靶等工作在河北廊坊市宇能(宇恒)岩矿技术服务公司实验室完成。样品通过粉碎、重选、磁选等常规程序分选、提纯, 使用双目镜检查后, 手工挑选出晶形完好、透明度好、无裂隙、无包裹、有代表性的锆石颗粒粘贴在环氧树脂靶上制靶。锆石

经过打磨抛光等程序使其内部结构充分暴露, 进行阴极发光(CL)显微图像、显微照相和 LA-ICP-MS U-Pb 分析, 该项工作在兰州大学甘肃省西部矿产资源重点实验室完成。激光剥蚀系统 Geolas 200M, ICP-MS 仪为 Agilent7500a, 激光剥蚀束斑直径 30 μm, 激光脉冲 10 Hz, 激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm。锆石年龄计算采用标准锆石 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 SRM610 作为外标,²⁹ Si 作为内标元素进行了校正。样品的同位素比值和

元素含量数据处理使用 GLITTER 软件,采用 Andersen 对测试数据进行普通铅校正,年龄计算谐和图采用 Isoplot 软件完成(Anderson T, 2002)。

碎屑锆石 U-Pb 分析数据见表 1,典型的锆石阴极发光图像见图 3,U-Pb 年龄谐和图和年龄谱图见图 4a、图 4b。

表 1 闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄表

Tab. 1 Dating of the Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of rocks

样品号及 分析点号	Pb	Th	U	Th/U	同 位 素 比 值				表 面 年 龄			
					²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1
TW5-01	8.36	115.68	158.64	0.73	0.308 8	0.005 0	0.308 8	0.005 0	273	4	275	4
TW5-02	14.74	286.54	248.60	1.15	0.293 1	0.005 0	0.293 1	0.005 0	261	4	261	3
TW5-03	14.11	292.08	239.39	1.22	0.320 0	0.004 8	0.320 0	0.004 8	282	4	280	4
TW5-04	15.40	231.70	253.46	0.91	0.314 7	0.005 1	0.314 7	0.005 1	278	4	276	4
TW5-05	7.39	103.43	139.25	0.74	0.290 3	0.005 6	0.290 3	0.005 6	259	4	264	3
TW5-06	8.76	12.16	45.58	0.27	0.328 7	0.004 7	0.328 7	0.004 7	289	4	283	4
TW5-07	24.60	414.09	433.31	0.96	0.365 3	0.006 8	0.365 3	0.006 8	316	5	300	4
TW5-08	19.57	304.64	377.76	0.81	0.315 2	0.004 6	0.315 2	0.004 6	278	4	265	3
TW5-09	6.18	69.38	101.37	0.68	0.301 0	0.008 3	0.301 0	0.008 3	267	6	260	3
TW5-10	6.25	93.10	115.04	0.81	0.322 6	0.006 7	0.322 6	0.006 7	284	5	276	4
TW5-11	21.37	448.30	362.38	1.24	0.338 0	0.005 9	0.338 0	0.005 9	296	4	294	4
TW5-12	6.58	86.04	124.67	0.69	0.350 9	0.010 5	0.350 9	0.010 5	305	8	298	4
TW5-13	8.25	136.54	148.05	0.92	0.338 0	0.008 1	0.338 0	0.008 1	296	6	292	4
TW5-14	9.88	186.51	176.24	1.06	0.301 3	0.005 8	0.301 3	0.005 8	267	5	261	3
TW5-15	10.29	148.00	202.45	0.73	0.348 3	0.007 4	0.348 3	0.007 4	303	6	298	4
TW5-16	54.89	1 360.78	891.33	1.53	0.319 7	0.005 9	0.319 7	0.005 9	282	5	277	3
TW5-17	16.59	319.37	282.55	1.13	0.312 2	0.007 8	0.312 2	0.007 8	276	6	271	3
TW5-18	6.06	81.78	120.36	0.68	0.287 7	0.007 4	0.287 7	0.007 4	257	6	256	3

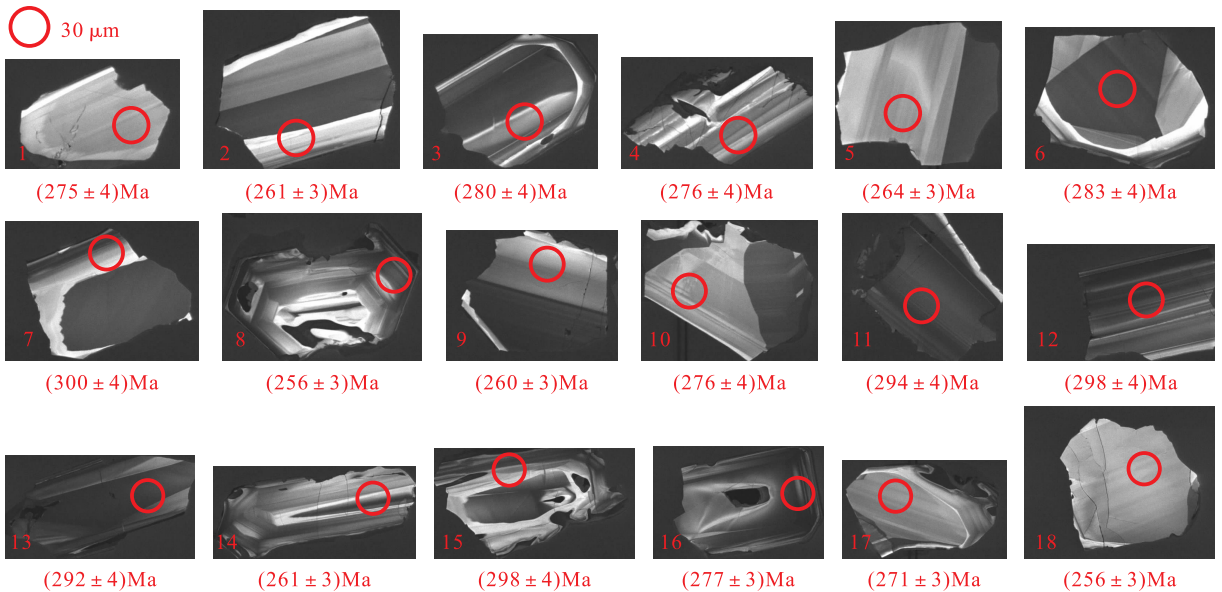


图 3 岩石锆石发光影像图

Fig. 3 Zircon cathode luminescence images

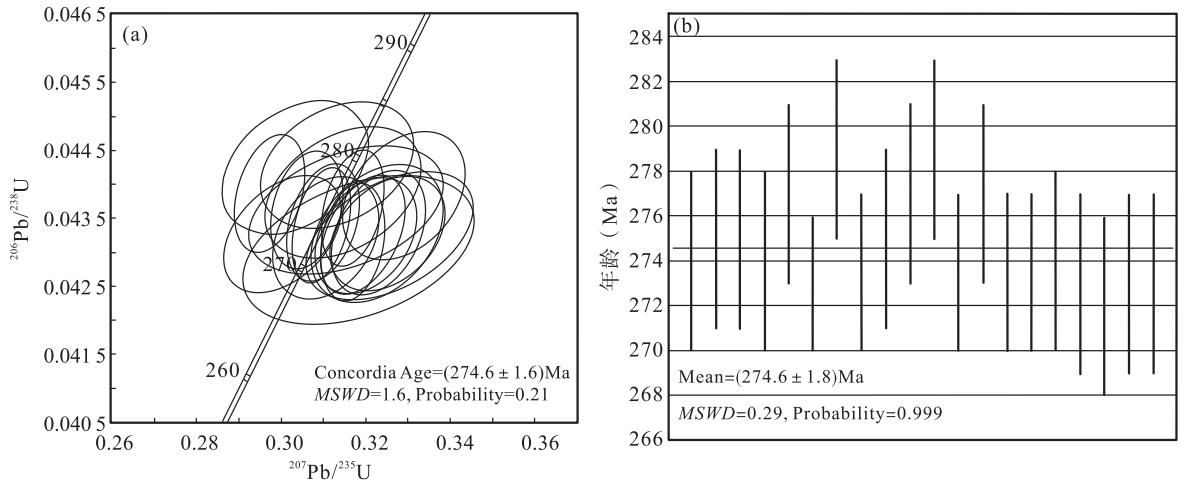


图4 (a) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图和 (b) 加权平均年龄图

Fig. 4 (a) U-Pb concordia diagram and (b) the weighted mean age diagram

3.2 主量、微量元素分析

全岩主量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司使用日本理学(Rigaku)生产的 ZSX Primus II 型波长色散 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成,分析精度为 0.1~1%(RSD%)。全岩微量、稀土元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成,元素测试精度下限为 0.01×10^{-6} 。

4 岩石年代学

挑选出的锆石呈半自形-自形,粒度约为 100~200 μm ,呈无色透明状,大多数锆石具明显的岩浆振荡环带结构特征(图 3),具典型的岩浆锆石特征(吴元保等,2004)。

本次共选取 18 颗锆石进行 U-Pb 同位素测试,共有 18 个测点,测试年龄结果见表 1。

18 个锆石测试点的 U 含量介于 45.58×10^{-6} ~ 891.33×10^{-6} , Th 含量介于 12.16×10^{-6} ~ 1360.78×10^{-6} , Th/U 值介于 0.27~1.53,除 TW5-06 外,其他测点 Th/U 值均大于 0.4,显示岩浆锆石的特征。

谐和年龄介于 267~286Ma,均落在谐和线上,线性关系较好(图 4a), $^{238}\text{Pb}/^{206}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(274.6 \pm 1.6)\text{Ma}$ ($MSWD=0.29$)(图 4b),可信度高,可代表岩体的侵位时代,为早二叠世。

5 地球化学特征

5.1 主量元素

岩石主量元素分析结果见表 2。岩石 SiO_2 含量介于 55.98%~59.41%,相对富 Al($\text{Al}_2\text{O}_3=16.13\% \sim 17.33\%$),相对富 Na 贫 K($\text{Na}_2\text{O}=3.25\% \sim 3.77\%$, $\text{K}_2\text{O}=1.55\% \sim 2.13\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.48 \sim 0.65$)、富 Ca($\text{CaO}=6.24\% \sim 6.92\%$),较低的 Mg($\text{MgO}=3.7\% \sim 4.39\%$)、Ti($\text{TiO}_2=0.68\% \sim 0.77\%$), $\text{Mg}^\#$ 的变化范围较窄($\text{Mg}^\#=52.43 \sim 54.41$);在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解上落入高钾钙碱性系列和钙碱性系列的过渡区域(图 5),A/CNK 值介于 0.81~0.88,A/NK 值介于 2.05~2.44,具准铝质岩石特征(图 6);在 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 判别图上,样品落入闪长岩区域(图 7)。

5.2 微量元素

岩石微量元素分析结果列见表 2。原始地幔微量元素标准蛛网图显示(图 8a),闪长岩显示出富集大离子亲石元素 Rb、Pb、Th、U 等元素,尤其是强不相容元素 Rb、Th、K 富集程度较高,强烈亏损 Ba、Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素,富集 Zr、Hf。闪长岩稀土元素($\sum\text{REE}$ 介于 103.82×10^{-6} ~ 128.64×10^{-6} ,平均值为 115.91×10^{-6})含量较低,在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上(图 8b),表现为轻重稀土分馏明显, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于 5.57~6.64,平均值为 6.02,LREE/HREE 值介于 9.46~10.06,平均值为 9.68,弱负 Eu 异常(δEu 介于 0.75~0.97,平均值为 0.86)。

表 2 岩石主量元素(wt%)、微量元素(10^{-6})含量及特征参数表

Tab. 2 Major(wt%), REE(10^{-6}) and trace element(10^{-6}) contents and parameters of rocks

样号	YQ5-1	YQ5-2	YQ5-3	YQ5-4	YQ5-5	YQ5-6
SiO ₂	59.35	58.06	55.98	56.95	58.36	59.41
TiO ₂	0.75	0.74	0.76	0.77	0.68	0.72
Al ₂ O ₃	16.13	16.22	17.33	17.3	16.71	16.53
Fe ₂ O ₃	6.57	7.08	7.4	7.46	6.79	6.3
MnO	0.1	0.11	0.13	0.14	0.12	0.1
MgO	3.9	3.97	4.39	4.15	4.09	3.7
CaO	6.48	6.73	6.67	6.92	6.79	6.24
Na ₂ O	3.27	3.25	3.77	3.26	3.29	3.36
K ₂ O	2.13	2.08	2.02	1.55	1.8	1.82
P ₂ O ₅	0.16	0.18	0.16	0.15	0.15	0.15
LOI	1.15	1.34	1.64	1.31	1.38	1.51
合计	99.98	99.77	100.24	99.95	100.15	99.84
K ₂ O/Na ₂ O	0.65	0.64	0.54	0.48	0.55	0.54
A/CNK	0.83	0.81	0.84	0.88	0.84	0.87
A/NK	2.08	2.12	2.05	2.44	2.26	2.19
Mg#	54.04	52.63	54.03	52.43	54.41	53.78
Ba	208	182	195	205	205	222
Rb	54.8	55.1	67.2	43.8	50.6	52.6
Sr	490	517	501	518	521	513
Zr	168	179	105	115	136	158
Nb	4.03	3.47	2.68	3	3.18	4.22
Ni	28.5	23	23.8	23.3	24.6	27.4
Co	20.8	21.3	22.5	23.3	22	19.7
Zn	67	76.9	63.8	59.8	58.9	64.9
Cr	57.1	32.8	40.6	22.1	35.2	39.5
La	15.8	14.1	11.2	11.6	12.6	15.2
Ce	36.2	32.5	25.7	26.8	29.4	34.5
Pr	4.73	4.34	3.41	3.61	3.95	4.57
Nd	18.9	16.9	14	14.2	16	17.9
Sm	4.07	3.88	3.1	3.32	3.26	4.09
Eu	0.96	0.9	0.96	0.93	0.95	1.04
Gd	3.49	3.46	2.91	2.83	3.15	3.6
Tb	0.56	0.5	0.44	0.46	0.49	0.58
Dy	2.97	2.98	2.68	2.63	2.69	3.06
Ho	0.58	0.53	0.5	0.52	0.56	0.57
Er	1.8	1.71	1.45	1.52	1.61	1.79
Tm	0.27	0.25	0.21	0.23	0.24	0.27
Yb	1.7	1.69	1.34	1.47	1.62	1.74
Lu	0.25	0.24	0.2	0.23	0.26	0.25
Y	17.8	16.9	14.7	15.3	16.2	17.4
Cs	1.24	1.55	1.51	1.47	2.37	2.88
Ta	0.31	0.27	0.21	0.23	0.27	0.31
Hf	4.82	4.42	2.94	3.2	3.79	4.33
Ga	19.1	18.7	19.5	19.2	19.3	19.2
Zn	67	76.9	63.8	59.8	58.9	64.9
Pb	10.4	11.9	5.32	6.86	7.18	10.1

续表 2

样号	YQ5-1	YQ5-2	YQ5-3	YQ5-4	YQ5-5	YQ5-6
Th	8.03	6.06	4.69	5.86	7.13	7.75
U	1.58	1.65	1.13	1.78	1.32	1.51
∑REE	128.64	119.97	103.82	106.17	112.84	124.02
LREE	117.01	108.61	94.09	96.28	102.22	112.16
HREE	11.63	11.36	9.73	9.89	10.62	11.86
LREE/HREE	10.06	9.56	9.67	9.74	9.63	9.46
δEu	0.78	0.75	0.97	0.93	0.91	0.83
(La/Yb) _N	6.64	5.99	6.03	5.65	5.57	6.26
(Th/Nb) _N	16.9	14.83	14.87	16.55	19.03	15.59
(Gd/Yb) _N	1.7	1.69	1.8	1.59	1.61	1.71
10 ⁴ × Ga/Al	2.24	2.17	2.12	2.10	2.18	2.19

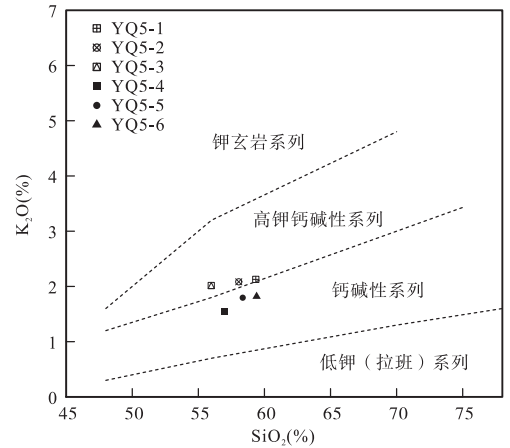


图 5 岩石 $w(K_2O)$ - $w(SiO_2)$ 图解 (据 Peccerillo et al., 1976)

Fig. 5 $w(K_2O)$ vs. $w(SiO_2)$ variation diagram for the rocks (After Peccerillo et al., 1976)

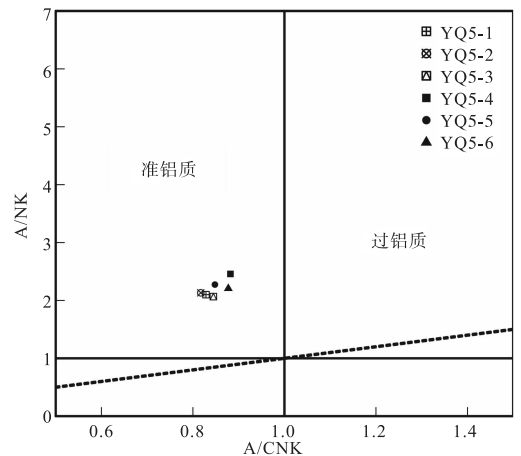
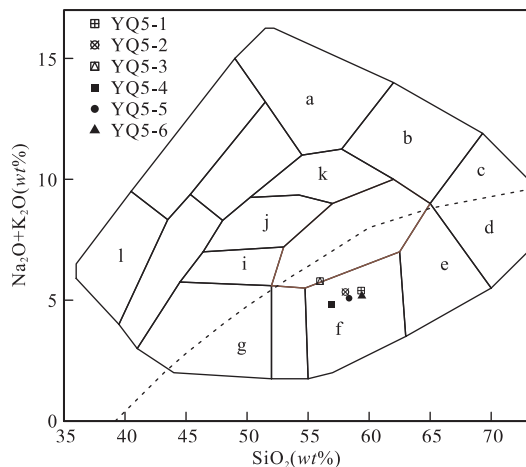


图 6 岩石 A/NK - A/CNK 图解 (据 Shand, 1943)

Fig. 6 A/CNK vs. A/NK diagram of the rocks (After Shand, 1943)



A. 霞石正长岩; b. 正长岩; c. 碱性花岗岩; d. 花岗岩; e. 石英闪长岩、花岗闪长岩; f. 闪长岩; g. 辉长岩; h. 辉长岩; i. 辉长岩; j. 正长闪长岩; k. 正长岩; l. 霓霞岩

图7 岩石 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 分类图解(据 Wilson, 1989)

Fig. 7 SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ classification diagram for rocks (After Wilson, 1989)

6 讨论

6.1 岩石成因

原始地幔微量元素标准化蛛网图上 Nb、Ta、P、Ti 相对负异常和 Zr、Hf 相对正异常的地球化学特征,反映了闪长岩具有典型的大陆地壳的特点 (Condie, 1986; Davies et al., 1987)。Nd/Th 值 (2.23~2.98, 平均为 2.51) 与壳源岩石平均值 (Nd/Th \approx 3) 接近, 远低于幔源岩石平均值 (Nd/Th $>$ 15) (Bea et al., 2001); Th/U 值 (3.3~5.4, 平均为 5.19) 接近于下地壳的 Th/U 值 (4.46) (张竞嘉等, 2021), 也指示岩石可能源于新生地壳或地壳物质混染。较低的 Al_2O_3 、MgO、Cr、Ni 含量和较高的 K_2O 含量通常为下地壳部分熔融形成岩浆的共同特征, 闪长岩亦具有较低含量的 MgO (3.7%~4.39%)、 $\text{Mg}^\#$ (52.43~54.41)、Cr (22.1×10^{-6} ~ 57.1×10^{-6})

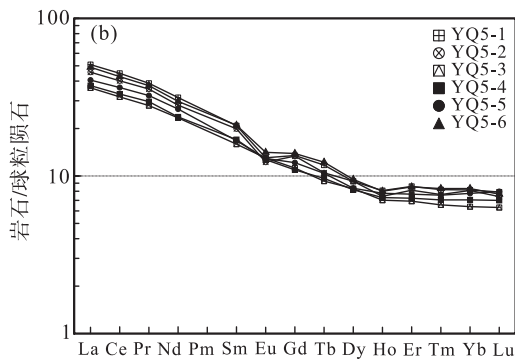
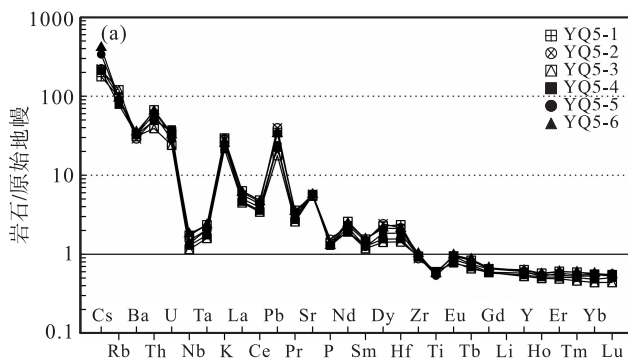


图8 (a)原始地幔标准化微量元素蛛网图(据 Sun and Mc Donough, 1989)和(b)球粒陨石标准化稀土配分图(据 Sun S S 等, 1989)

Fig. 8 (a) Chondrite-normalized REE patterns and (b) primitive-mantle normalized spiderdiagrams for rocks

和 Ni (23.0×10^{-6} ~ 27.4×10^{-6}), 表明岩浆可能为下地壳岩石的部分熔融 (Atherton, et al., 1993)。如果熔体将具有倾斜的 HREE 配分特征, 同时 Y/Yb 值远大于 10, 认为岩浆源区存在以石榴子石为主的残留相; 而当熔体具有轻微向上凹的 HREE 配分特征, 且其 Y/Yb 值接近 10, 指示源区存在以角闪石为主的残留相 (Rollinson, 1993; 高永丰等, 2003; 张竞嘉等, 2021), 而闪长岩也具有具有轻微向上凹的 HREE 配分特征, 且 Y/Yb 值接近 10 (9.98~10.45, 平均值为 10.29)。因此, 一条山北早二叠世闪长岩的岩浆源区可能为下地壳的角闪石残留相。

在 La-La/Sm 和 La-La/Yb 判别图解中(图

9), 样品均落在部分熔融的区域内, 表明一条山北早二叠世闪长岩的形成主要与部分熔融作用有关。闪长岩 Nb、Ta 的负异常(图 8a) 指示岩浆来源较深 (冯继承等, 2012; 熊小林等 2012); Rb/Sr 值 (0.085~0.134) 介于上地幔值 (0.034) 与地壳值 (0.35) 之间 (Taylor and McLennan, 1995); Nb/Ta 值 (11.78~13.61) 总体低于地幔平均值 17.5 (Sun and McDonough, 1989), 显示壳幔混合的特点。同时在 $\sum \text{REE} - \text{Y} / \sum \text{REE}$ 图解(图 10a) 和 $\delta \text{Eu} - (\text{La}/\text{Yb})_N$ (图 10b) 图解中, 一条山北早二叠世闪长岩样品落入壳型花岗岩和壳幔混合型花岗岩的过渡区域; 岩石弱的负 Eu 异常 ($\delta \text{Eu} = 0.75 \sim$

0.97)指示斜长石没有经历明显的结晶分离或源区没有残留。

据此认为,一条山北闪长岩可能是早二叠世岩

石圈地幔岩浆作用导致增厚的敦煌地块北缘下地壳部分熔融的产物(毛启贵等,2010),在岩浆作用过程中有一定量的幔源物质加入。

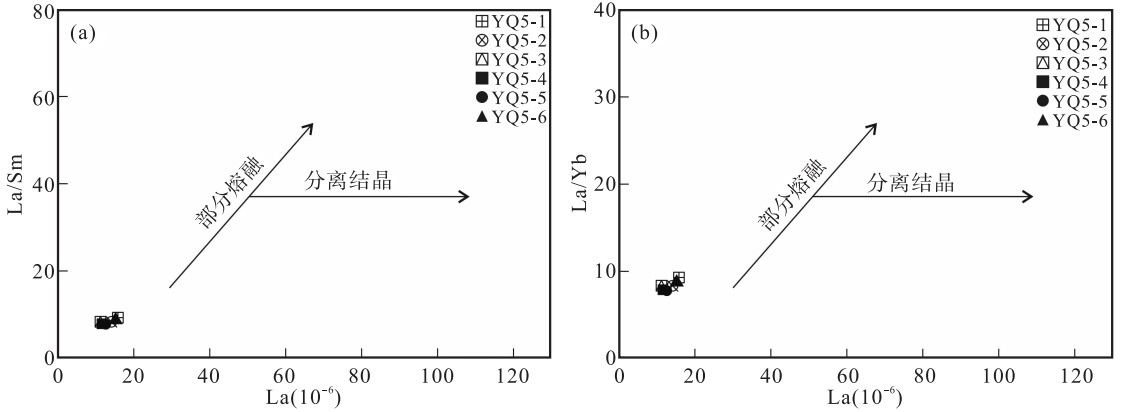


图 9 (a)岩石 La - La/Sm 图解与 (b)La - La/Yb 图解(据胡军等,2006)

Fig.9 (a)La - La/Sm diagram of pluton and (b)La - La/Yb diagram of pluton(After Hu Jun et al,2006)

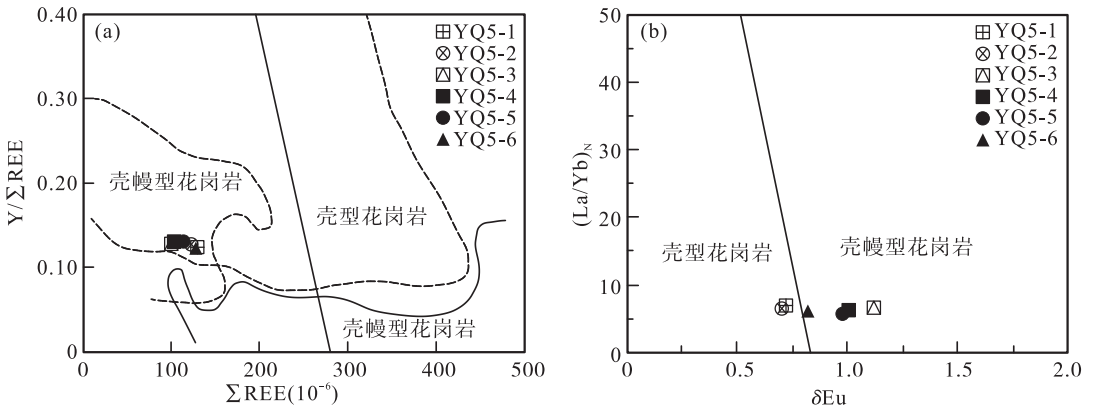


图 10 (a)岩石 Σ REE - Y/REE 图解和 (b)岩石 δ Eu - (La/Yb)_N 图解(据胡军等,2006)

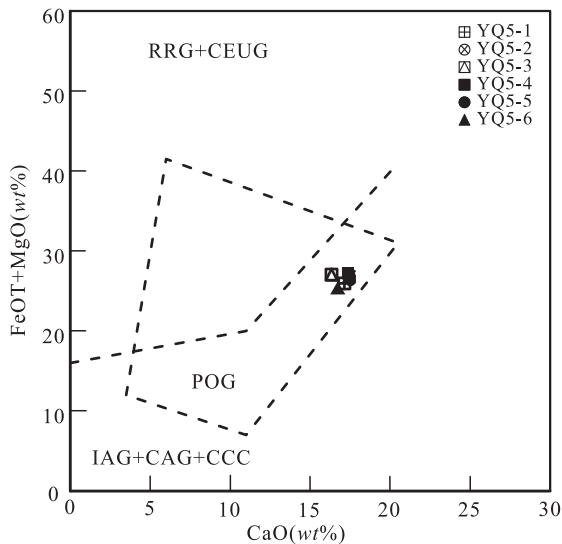
Fig.10 (a) Σ REE - Y/REE diagram of pluton and (b) δ Eu - (La/Yb)_N diagram of pluton(After Hu Jun et al,2006)

6.2 构造意义

北山南带古生代构造演化一直是古亚洲洋闭合时限研究的重点地段。区域上分布的以寒武系双鹰山组板岩、千枚岩和西双鹰山组硅质岩、硅质板岩及下奥陶统罗楚雅山组碎屑岩、碳酸盐岩为主的连续沉积,代表了稳定大陆边缘环境。在志留纪红柳河-牛圈子-洗肠井所代表的古亚洲洋发生了大规模俯冲作用(左国朝等,1996;戴霜等,2003;何世平等,2005),向北俯冲于马鬃山地块之下,北部形成白云山-斜山-东七一山火山弧带和窑洞努如-公婆泉火山弧带,向南俯冲至敦煌地块之下,形成花牛山岩浆弧,并形成相应的火山弧岩浆岩。例如,花牛山地区中志留世埃达克质花岗岩,三个井组中的火山岩,花牛山石英闪

长岩,同时弧后扩张形成辉铜山-帐房山弧后盆地(李向民等,2011;王怀涛,2019)。具有 A 型花岗岩特征的双峰山花岗岩(415Ma)、小泉东花岗斑岩(395Ma)、辉铜山钾长花岗岩(397Ma)等指示早泥盆世之前古亚洲洋盆已闭合。而形成于火山弧环境的双峰山花岗闪长岩和大石头石英闪长岩(362~334 Ma)指示辉铜山-帐房山弧后盆地于晚泥盆世一早石炭世持续向北俯冲(王怀涛,2019)。晚石炭世北山及邻区,乃至整个中亚地区,主要的洋盆都已闭合,西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块及塔里木板块拼合在一起(Cole Man, 1989; Dobrestsov et al., 1995; Xiao et al., 2004)。赵泽辉等(2006)认为北山地区晚石炭世一早二叠世由于持续的造山拼合作用,岩石圈不断增厚,

最终发生大规模的岩石圈拆沉作用;拆沉后的岩石圈块体向下运动,致使其周围的软流圈地幔上涌,减压发生部分熔融;熔融上涌的软流圈地幔岩浆底侵致使岩石圈主动伸展拉张(赵泽辉等,2006),伴有花岗岩和镁铁-超镁铁岩体侵入。北山西涧泉子、音凹峡南、桥湾、大豁落等地区早二叠世后碰撞花岗岩的发现(张文等,2010;张文等,2011;冯继承等,2012;卜涛等,2019)也指示北山地区在二叠纪已经处于伸展拉伸的构造背景。一条山北闪长岩在 Maniar 花岗岩构造环境判别图(图 11)中全部落入后碰撞花岗岩类区域,同时研究区内广泛发育辉绿玢岩脉体,进一步暗示了早二叠世的伸展构造环境。



IAG. 岛弧花岗岩类;CAG. 大陆弧花岗岩类;CCG. 大陆碰撞花岗岩类;RRG. 与裂谷有关的花岗岩;CEUG. 陆内造陆运动隆起花岗岩类;POG. 后碰撞花岗岩

图 11 岩石构造环境判别图(据 Maniar 等,1989)

Fig. 11 Discrimination of tectonic environment

(After Maniar et al,1989)

综上所述,研究区闪长岩是在早二叠世后碰撞伸展环境下,幔源玄武质岩浆底侵加热下地壳使其部分熔融形成岩浆,并与少量幔源玄武质岩浆发生混合、同化混染和均一化过程,之后岩浆侵位到一定深度形成一条山北闪长岩。

7 结论

(1)一条山北闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-

Pb 年龄为 (274.6 ± 1.6) Ma,代表其结晶年龄,为北山南带构造岩浆演化提供了可靠的年代学证据。

(2)全岩地球化学分析显示,其为准铝质钙碱性系列岩石,富集大离子亲石元素 Rb、Pb、Th、U 等元素,尤其是强不相容元素 Rb、Th、K 富集程度较高,强烈亏损 Ba、Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素,富集 Zr、Hf。

(3)一条山北早二叠世闪长岩是在后碰撞伸展拉张环境下,幔源玄武质岩浆底侵加热下地壳使其部分熔融形成岩浆,并与少量幔源玄武质岩浆发生混合、同化混染和均一化过程,之后侵位到一定深度形成的。

(4)综合区域地质资料和岩石构造环境判别,研究区广泛发育后碰撞花岗岩,指示北山南带在早二叠世进入了后碰撞演化阶段或者局部为后碰撞演化阶段。

参考文献(References):

- 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[J].兰州大学学报,2003,(01):86-92.
- DAI Shuang, FANG Xiaomin, ZHANG Xiang, et al. Genesis and tectonic setting of diorite granite in central Beishan area[J]. Journal of Lanzhou University, 2003, (01): 86-92.
- 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.
- FENG Jicheng, ZHANG Wen, WU Tairan, et al. Geochronology and geochemistry of granite pluton in the north of Qiaowan, Beishan mountain, Gansu province, China, and its geological significance[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(1): 61-70.
- 高永丰,侯增谦,魏瑞华.冈底斯晚第三纪斑岩的岩石学、地球化学及其地球动力学意义[J].岩石学报,2003,19(3):418-428.
- GAO Yongfeng, HOU Zengqian, WEI Ruihua. Neogene porphyries from gandise: petrological, geochemical characteristics and geodynamic significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(3): 418-428.
- 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.
- HE Shiping, REN Binchen, YAO Wenguang, et al. Division of tectonic units in Beishan area, Gansu and Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2002, 35(4): 30-40.
- 何彦彬,王金荣,侯克选,等.新疆西准噶尔库鲁木苏石英闪

- 长岩成因及地质意义[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2015, 51(3):303-312.
- HE Yanbin, WANG Jinrong, HOU Kexuan, et al. Origin and geological implications of Kulumusu quartz diorite in West Junggar, Xinjiang[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2015, 51(3):303-312.
- 洪大卫, 王世光, 谢锡林, 等. 兴蒙造山带正 $\epsilon(\text{Nd} ? \text{t})$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. 地质前缘(中国地质大学, 北京), 2000, 7(2):441-456.
- HONG Dawei, WANG Shiguang, XIE Xilin, et al. Genesis of positive $\epsilon(\text{Nd} ? \text{t})$ granitoids in the da hinggan MTS. Mongolia orogenic belt and growth continental crust [J]. Earth Science Frontiers(China University of Geosciences Beijing), 2000, 7(2):441-456.
- 胡军, 王核, 慕生禄, 等. 西昆仑甜水海地块南屏雪山早古生代花岗岩地球化学、Hf 同位素特征及其壳幔岩浆作用[J]. 地质学报, 2017, 91(6):1192-1207.
- HU Jun, WANG He, MU Shenglu, et al. Geochemistry and Hf isotopic compositions of Early Paleozoic granites Nanpingxueshan from the Tianshuihai Terrane, West Kunlun; Crust Mantle Magmatism[J]. Acta Geological Sinica, 2017, 91(6):1192-1207.
- 李雷. 新疆东准噶尔地区志留纪花岗岩浆作用及构造意义研究[D]. 西安:西北大学, 2012.
- LI Lei. Silurian granitic magmatism and dynamic significance in Eastern Junggar, Xinjiang[D]. Xi'an: Northwest University, 2012.
- 李向民, 余吉远, 王国强, 等. 甘肃北山红柳园地区泥盆系三个井组和墩墩山群 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 测年及其意义[J]. 地质通报, 2011, 30(10):1501-1507.
- LI Xiangmin, YU Jiyuan, WANG Guoqiang, et al. LA - ICP - MS zircon U - Pb dating of Devonian Sangejing Formation and Dundunshan Group in Hongliuyuan, Beishan area, Gansu province[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(10):1501-1507.
- 马骊, 魏海峰, 王怀涛, 等. 甘肃北山红柳沟辉长岩地球化学、年代学及构造意义[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2018, 54(1):59-67.
- MA Li, WEI Haifeng, WANG Huaitao, et al. Geochemistry, zircon U - Pb chronology and tectonic significance of gabbro in the Beishan Hongliugou area in Gansu province[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2018, 54(1):59-67.
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 等. 北山柳园地区中志留世埃达克质花岗岩类及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(2):584-596.
- MAO Qigui, XIAO Wenjiao, HAN Chunming, et al. Discovery of middle Silurian adakite granite and its tectonic significance in Liuyuan area, Beishan mountains, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(2):584-596.
- 牛亚卓, 魏建设, 史冀忠, 等. 甘肃北山地区北部上石炭统火山岩 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质通报, 2013, 32(11):1720-1727.
- NIU Yazhuo, WEI Jianshe, SHI Jizhong, et al. LA - ICP - MS zircon U - Pb dating of the Upper Carboniferous volcanic rocks from northern Beishan region in Gansu province and its tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(11):1720-1727.
- 秦江锋, 赖绍聪, 李永飞, 等. 扬子板块北缘阳坝岩体锆石饱和温度的计算及其意义[J]. 西北地质, 2005, 38(3):1-6.
- QIN Jiangfeng, LAI Shaocong, LI Yongfei, et al. Zircon saturation temperatures of Yangba granodiorite and mafic microgranular enclaves in northern margin of Yangtze block and its significance[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(3):1-6.
- 宋东方, 肖文交, 韩春明, 等. 北山中部增生造山过程:构造变形和 $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ 年代学制约[J]. 岩石学报, 2018, 34(7):2087-2098.
- SONG Dongfang, XIAO Wenjiao, HAN Chunming, et al. Accretionary processes of the central segment of Beishan: Constraints from structural deformation and $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ geochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(7):2087-2098.
- 孙海瑞, 吕志成, 于晓飞, 等. 甘肃柳园地区早二叠世正长花岗岩斑岩脉锆石 U - Pb 年代学、岩石地球化学特征——对北山造山带晚古生代构造背景的指示[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(05):1433-1449.
- SUN Hairui, LV Zhicheng, YU Xiaofei, et al. Zircon U - Pb geochronology and petrogeochemical characteristics of Early Permian syenite granite porphyry veins in Liuyuan area, Gansu province—an indication of the late Paleozoic tectonic setting of Beishan orogenic belt[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(05):1433-1449.
- 孙新春, 王怀涛, 李通国, 等. 甘肃北山双峰山花岗岩闪长岩锆石 LA - ICP - MS 定年及其构造意义[J]. 矿物岩石学杂志, 2021, 40(2):171-184.
- SUN Xinchun, WANG Huaitao, LI Tongguo, et al. LA - ICP - MS zircon U - Pb ages of the granodiorites from Shuangfengshan in Beishan mountain Gansu province and its tectonic significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2021, 40(2):171-184.
- 王国强. 北山古生代蛇绿岩、火山岩研究与构造演化(博士学位论文)[D]. 西安:长安大学, 139, 2015.
- WANG Guoqiang. Research and tectonic evolution of Paleozoic ophiolites and volcanic rocks in Beishan(Doctoral Dissertation) [D]. Xi'an:Chang'an University, 139, 2015.
- 王怀涛. 中亚造山带南段北山构造-岩浆作用及其地质意义的

- 研究(博士学位论文)[D].兰州:兰州大学,2019:1-140.
- WANG Huaitao. Tectono-magmatism and its geological significance in the beishan area of the southern part of the Central Asian Orogenic Belt (Doctoral Dissertation) [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 1-140.
- 王玉往,姜福芝. 北山地区各时代火山岩组合特征及分布[J]. 中国区域地质, 1997, 16(3): 298-304.
- WANG Yuwang, JIANG Fuzhi. Features and distribution of volcanic rock associations of various ages in the Beishan area [J]. Regional Geology of China, 1997, 16 (3): 298-304.
- 吴玉,陈正乐,陈柏林,等. 北阿尔金喀腊大湾南段二长花岗岩地球化学、SHRIMP 锆石 U - Pb 年代学、Hf 同位素特征及其对壳幔相互作用的指示[J]. 岩石学报, 2017, 91(6): 1227-1243.
- WU Yu, CHEN Zhengle, CHEN Bailin, et al. Geochemistry, zircon shrimp U - Pb dating and Hf isotopic compositions of the monzogranite from the southern Kaladawan of north Altyn and their implications for crust-mantle interaction[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 91 (6): 1227-1243.
- 吴元保,郑永飞. 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, 2004, 49(16): 1589-1604.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Genetic mineralogy of zircon and its constraints on U - Pb age interpretation[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589-1604.
- 熊小林, J. Adam, T. H. Green, 等. 变质玄武岩熔体微量元素特征及埃达克岩体产生条件[J]. 中国科学(D辑地球科学), 2012, 35(9): 837-846.
- XIONG Xiaolin, J. Adam, T. H. Green, et al. Characteristics of trace elements in metamorphic basalt melt and production conditions of Adak solution[J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 35(9): 837-846.
- 许伟,徐学义,卢进才,等. 北山野马井地区泥盆纪富钾酸性岩浆岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2775-2793.
- XU Wei, XU Xueyi, LU Jincai, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Devonian potassium-rich acidic magmatic rocks in yemajing area, Beishan [J]. Earth Sci, 2019, 44(8): 2775-2793.
- 杨经绥,许志琴,马昌前,等. 复合造山作用和中国中央造山带的科学问题[J]. 中国地质, 2010, 31(1): 1-11.
- YANG jingsui, XU Zhiqin, MA Changqian, et al. Compound orogeny and scientific problems concerning the Central Orogenic Belt of China[J]. Geology in China, 2010, 31 (1): 1-11.
- 易鹏飞,李宁,高峰,等. 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[J]. 地质通报, 2017, 36(2~3): 331-341.
- YI Pengfei, LI Ning, GAO Feng, et al. LA - ICP - MS zircon U - Pb ages of the granites from Mashan of Inner Mongolia and their geological significances [J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(2~3): 331-341.
- 袁亚平,刘向东,张振凯,等. 南阿尔金晚泥盆世构造体制转换: 来自索尔库里二长花岗岩年代学和地球化学的制约[J]. 现代地质, 2021, 35(3): 595-597.
- YUAN Yaping, LIU Xiangdong, ZHANG Zhenkai, et al. Late Devonian tectonic transition in South Altyn tagh: constraints from geochronology and geochemistry of the Suoerkuli Monzogranite [J]. Geoscience, 2021, 35 (3): 595-597.
- 袁禹. 北山造山带大陆地壳的形成与演化(博士学位论文)[D]. 北京:中国地质大学, 2019, 149.
- YUAN Yu. Doctoral dissertation on the formation of crust and the evolution of orogenic belt (Beishan) [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019, 149.
- 张克嘉,云龙,田霄,等. 北山南带新场岩体地球化学特征及构造意义[J]. 世界核地质科学, 2021, 38(2): 249-261.
- ZHANG Jingjia, YUN Long, TIAN Xiao, et al. Geochemical characteristics of Xinchang pluton in souther Beishan and its tectonic significanse [J]. World Nuclear Geoscience, 2021, 38(2): 249-261.
- 张文,冯继承,郑荣国,等. 甘肃北山音凹峡南花岗岩体的锆石 LA - ICP MS 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1649-1661.
- ZHANG Wen, FENG Jicheng, ZHEN Rongguo, et al. Zircon la-icp MS dating of the South yinaoxia granite in Beishan, Gansu province and its tectonic significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1649-1661.
- 张文,吴泰然,贺元凯,等. 甘肃北山西涧泉子富碱高钾花岗岩体的锆石 LA - ICP - MS 定年及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 719-731.
- ZHANG Wen, WU Tairan, HE Yuankai, et al. LA - ICP - MS zircon U - Pb ages of ijianquanzi alkali-irich potassium-high granites in Beishan, Gansu province and their tectonic significance [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, 29(6): 719-731.
- 张元元,郭召杰. 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, 2008, 24(4): 803-809.
- ZHANG Yuanyuan, GUO Zhaojie. Accurate constraint on formation and emplacement age of Hongliuhe ophiolite, boundary region between Xinjiang and Gansu province and its tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(4): 803-809.
- 赵宏刚,梁积伟,王驹,等. 甘肃北山南带沙枣园复式岩体年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报, 2020, 94(2): 396-425.
- ZHAO Honggang, LIANG Jiwei, WANG Ju, et al. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic signifi-

- cance of the Shazaoyuan composite pluton in the southern Beishan mountains, Gansu province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(2): 396-425.
- 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.
- ZHAO Zehui, GUO Zhaojie, WANG Yi. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic implications of the granitoids from Liuyuan area, Beishan, Gansu province, northwest China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8): 1847-1860.
- 赵振华. 微量元素地球化学研究进展[A]. 张本仁, 傅家谟编. *地球化学进展*[C]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 199-248.
- ZHAO Zhenhua. Advances in trace element geochemistry[A]. Zhang Benren, Fu Jiamo. *Advances in geochemistry*[C]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 199-248.
- 赵志雄, 熊煜, 贾元琴, 等. 北山独龙包地区晚石炭世陆缘弧岩浆作用: 花岗闪长岩锆石年龄及地球化学证据[J]. *地质论评*, 2018, 64(3): 597-609.
- ZHAO Zhixiong, XIONG Yu, JIA Yuanqin, et al. The continental arcs magmatic at the Dulongbao area in Beishan orogenic belt in late carboniferous: evidences from zircon U - Pb dating and geochemistry of the granodiorite[J]. *Geological Review*, 2018, 64(3): 597-609.
- 郑荣国, 王云佩, 张昭昱, 等. 北山南带音凹峡地区酸性火山岩年代学、地球化学研究: 二叠纪裂谷岩浆作用的新证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40(05): 1031-1048.
- ZHENG Rongguo, WANG Yunpei, ZHANG Zhaoyu, et al. Geochronology and geochemistry of acidic volcanic rocks in the yinaoxia area, southern Beishan: new evidence of Permian rift magmatism[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 40(05): 1031-1048.
- Anderson T. Correction of common Pb in U - Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192: 59-79.
- Atherton, M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 1993, 362: 144-146.
- Bea F, Arzamastsev A, Montero P, et al. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: Evidence of mantle derived metasomatic fluids affecting crustal materials[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 140(5): 554-566.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to south-eastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1982, 80(2): 189-200.
- Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance[J]. *Lithos*, 1989, 23(1): 1-18.
- Coleman R G. Continental growth of Northwest China[J]. *Tectonics*, 1989, 8(3): 621-635.
- Davies G R and Macdonald R. Crustal influences in the petrogenesis of the Naivasha basalt-comendite complex: Combined trace element and Sr - Nd - Pb isotope constraints[J]. *J Petrol*, 1987, 28(6): 1009-1031.
- Dobretsov N L; Berzin N A and Buslov M M. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian [J]. *International Geology Review*, 1995, 37: 335-360.
- Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 2003, 31(6): 529-532.
- Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1): 63-81.
- Rollinson H R. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*[M]. Longman Singapore Publishers (Pte)Ltd., Singapore, pp. 1993: 1-352.
- Rudnick R L, Gao Shan. Composition of the continental crust. In: Rudnick R L (ed.). *The crust Treatise on geochemistry*[M]. Oxford: Elsevier Pergamon, 2003, 3: 1-64.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for Mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64(2): 295-304.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discriminations and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407-419.
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, et al. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of eastern Tianshan (China): implications for the continental growth of central Asia[J]. *American Journal of Science*, 2004, 304: 370-395.
- Xiao W J, Mao Q, Windley B, et al. Paleozoic Multiple Accretionary and Collisional Processes of the Beishan Orogenic Collage[J]. *American Journal of Science*, 2010, 310: 1553-1594.