

甘肃北山大豁落南地区晚二叠世花岗闪长岩成因 ——锆石U-Pb年龄和岩石地球化学制约

卜 涛^{1,2},余吉远^{1,2},过 磊^{1,2},王 国 强^{1,2},郭 琳^{1,2},计 波^{1,2}
BU Tao^{1,2}, YU Jiyuan^{1,2}, GUO Lei^{1,2}, WANG Guoqiang^{1,2}, GUO Lin^{1,2}, JI Bo^{1,2}

1. 中国地质调查局造山带地质研究中心/西安地质调查中心,陕西 西安 710054;
 2. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室/西安地质调查中心,陕西 西安 710054
1. Research Center for Orogenic Geology/Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. MNR Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits / Xi'an Center of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:对甘肃北山大豁落南地区花岗闪长岩进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb测年及主量和微量元素地球化学分析。结果表明,花岗闪长岩的结晶年龄为 259.7 ± 1.5 Ma。花岗闪长岩SiO₂含量介于63.10%~69.69%之间,Al₂O₃介于14.86%~15.48%之间,平均15.21%,MgO含量为0.96%~3.59%,平均2.69%,岩石强烈富集轻稀土元素,(La/Yb)_N为18.60~50.91,具弱Eu异常(δ Eu=0.83~1.06),高Sr(454×10^{-6} ~ 862×10^{-6})、高Sr/Y值(Sr/Y=44.95~60.35),具有埃达克岩的地球化学特征。花岗闪长岩富钾、贫钠,具有较高的Cr、Ni含量和Mg[#](50.31~66.75)值,结合区域地质背景,认为花岗闪长岩是碰撞后板内热隆伸展环境壳幔交互作用的产物,暗示晚古生代北山地区地壳为垂向增生,与以天山为主的中亚造山带大范围存在的二叠纪与慢源岩浆有关的花岗岩是同期构造岩浆事件的产物。

关键词: LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄; 地球化学; 埃达克岩; 后碰撞; 北山; 甘肃

中图分类号:P534.46; P588.12¹ 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2019)02/03-0254-12

Bu T, Yu J Y, Guo L, Wang G Q, Guo L, Ji B. Petrogenesis of the Late Permian granodiorite in southern Dahuoluo area, Beishan, Gansu: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry. Geological Bulletin of China, 2019,38(2/3):254-265

Abstract: This paper reports LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and whole rock major and trace elements from granodiorite in southern Dahuoluo area of the Beishan region. Magma zircons from granodiorite yielded a weighted $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ mean age of 259.7 ± 1.5 Ma. Granodiorite is characterized by SiO₂ ranging from 63.10% to 69.69%, Al₂O₃ ranging from 14.86% to 15.48%, 15.21% on average, MgO ranging from 0.96%~3.59%, 2.69% on average, strong enrichment of LREE, and (La/Yb)_N values ranging from 18.60 to 50.91. In addition, Eu anomaly is not obvious, with Eu/Eu^{*} values ranging from 0.83 to 1.06, Sr content is high (454×10^{-6} ~ 862×10^{-6}) and Sr/Y ratio is 44.95~60.35, rocks show geochemical characteristics of adakite. Granodiorite is enriched in K and depleted in Na, and has high Cr, Ni and Mg[#](50.31~66.75). Combined with regional geological background, the authors hold that granodiorite was formed after the collision, as a product of both intraplate thermal upwelling extension and crust-mantle interaction. It is suggested that, in Late Paleozoic, the crust in Beishan area was in vertical increment, and the granites associated with the Permian and mantle-derived magmas were in the form of synchronous tectonic magmatic events.

Key words: LA-ICP-MS zircon U-Pb age; geochemistry; adakite; post-collision; Beishan; Gansu

收稿日期:2017-10-11;修订日期:2017-12-12

资助项目:中国地质调查局项目《甘肃北山牛圈子地区1:5万K47E014003等6幅区域地质矿产调查》(编号:12120113046400)、《北山图拉尔根—辉铜山地区区域地质调查》(编号:DD20190812)和国家自然科学基金项目《甘肃北山泥盆纪高镁安山岩岩石成因及其地球动力学意义》(批准号:41703038)

作者简介:卜涛(1986-),男,硕士,工程师,从事岩浆岩岩石学、岩石地球化学研究工作。E-mail: cugbutao@163.com

北山地区花岗岩类岩石分布广泛,约占该区侵入岩的95%以上^[1]。尽管前人对本区花岗岩进行了大量的研究^[2~19],但北山地区有精确年龄的花岗岩在时限上多集中在早古生代,对晚古生代,特别是晚古生代晚期的花岗岩少有报道。近年的研究表明,以天山为主的中亚造山带发育大量晚古生代晚期的花岗岩^[20~24],该期花岗岩被认为是造山期后陆壳垂向增生的产物^[20~24]。北山造山带作为中亚造山带南缘增生造山作用和岩浆活动的关键地区之一,其发育的晚二叠世花岗岩是否具有与中亚造山带晚古生代晚期花岗岩相似的成因机制,有待进一步对比研究。岩浆岩作为了解地球深部的“探针”和“窗口”,记录了丰富的大地构造演化信息,笔者通过LA-ICP-MS锆石U-Pb定年和地球化学分析,对北山大豁落南地区晚二叠世花岗闪长岩体的形成年代、成因机制及构造意义进行探讨,为北山地区的构造演化研究提供新的资料和依据。

1 区域地质背景

北山造山带具有多旋回复合造山的特点,发生过多个期次、多个阶段的板块裂解-俯冲-碰撞-拼合的地质演化史^[25]。北山地区构造属性一直是研究的热点,目前并没有统一的划分方案,争论的焦点主要是西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块及塔里木板块在北山地区的界线位置,目前主要有以下几种划分方案。赵茹石等^[26]最早提出以红石山断裂作为西伯利亚板块和塔里木板块的主要界线或对接消减带,刘雪亚等^[27]、聂凤军等^[28]认为,北山的主体是哈萨克斯坦古板块的东延部分,其北界位于骆驼峰—红石山—黑鹰山一线,南界位于北山南麓的白山—红柳园—帐房山一带。骆驼峰—红石山—黑鹰山一线以北的中蒙边界地区在古生代属于西伯利亚古板块的南缘;白山—红柳园—帐房山一线以南的北山南缘、敦煌等地则属于塔里木古板块的东延部分。龚全胜等^[29]、何世平等^[30~31]认为,北山造山带总体构成塔里木板块东北缘的主动大陆边缘,北以红石山蛇绿岩构造混杂岩带与哈萨克斯坦板块为界,南以红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿岩构造混杂岩带为界与塔里木东北缘前路褶皱冲断带毗邻。左国朝等^[3~4]以碱泉子—明水—小黄山一线为哈萨克斯坦板块和塔里木板块的重要缝合线,将其以北地区归属于哈萨克斯坦板块,以南归属于塔里木板块。

杨合群等^[32~33]认为,喀拉麦里蛇绿岩为标志的缝合带北侧为西伯利亚板块,红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿岩为标志的缝合带南侧为塔里木—华北板块,两缝合带之间为哈萨克斯坦板块。王成文等^[34~35]通过古生物的证据也证明了西伯利亚和哈萨克斯坦板块边界在蒙古境内。在南北向上,北山地区横跨塔里木—华北板块和哈萨克斯坦板块。杨建国等^[36]认为,多数被作为板块缝合带重要标志的蛇绿岩或基性超基性岩(含火山岩),并不是可代表古代大洋岩石圈残片的造山带或SSZ型蛇绿岩,他认为北山主体系由东天山和塔里木两大古陆系统构成。两陆间的界线或拼合带大致位于方山口—黑山—碱泉子一线,并以庙庙井—碱泉子断裂为界,以北隶属东天山古陆构造系统,以南为塔里木古陆系统。尽管对于该区构造格局存在不同认识,但北山造山带是由不同的构造单元、微陆块、岛弧、洋壳残余体、沉积变质块体等通过漫长而复杂的地质过程拼贴而成,这在以上学者的研究中得到了一致体现。

研究区位于红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿岩带南侧马鬃山地体之上,区内侵入岩分布广泛,从基性到酸性均有出露,中酸性侵入岩以岩基、岩株、岩脉等形式近东西向产出,以古生代花岗岩为主,该地区还出露EW向、NW向、NE向的中基性岩脉。区域内主要断裂走向为NW向和近EW向,以逆冲推覆和走滑断裂为主,区内地层从前长城系北山岩群到侏罗系水西沟组均有出露(图1)。

2 岩相学特征

花岗闪长岩体出露面积约12km²,近NW向产出,与晚泥盆世中粗粒二长花岗岩体和蓟县系平头山组大理岩呈侵入接触关系,岩体与围岩边界平直或成锯齿状,岩体中发育围岩的残留顶盖和捕虏体,多见NW向的基性岩脉,岩体的岩性较单一,主要为花岗闪长岩和石英二长岩,岩石有轻微的糜棱岩化和变质蚀变现象。岩石呈灰白色、浅肉红色(南边),中细粒花岗结构,块状构造,主要由石英、斜长石、钾长石、角闪石、黑云母等组成,其中,石英白色,他形粒状,大小0.2~3mm,含量20%~25%;长石主要为钾长石和斜长石,其中,斜长石为自形-半自形结构,弱环带构造,个别见聚片双晶,粒度0.5~5mm,含量30%~35%,钾长石可见格子双晶,粒度1~

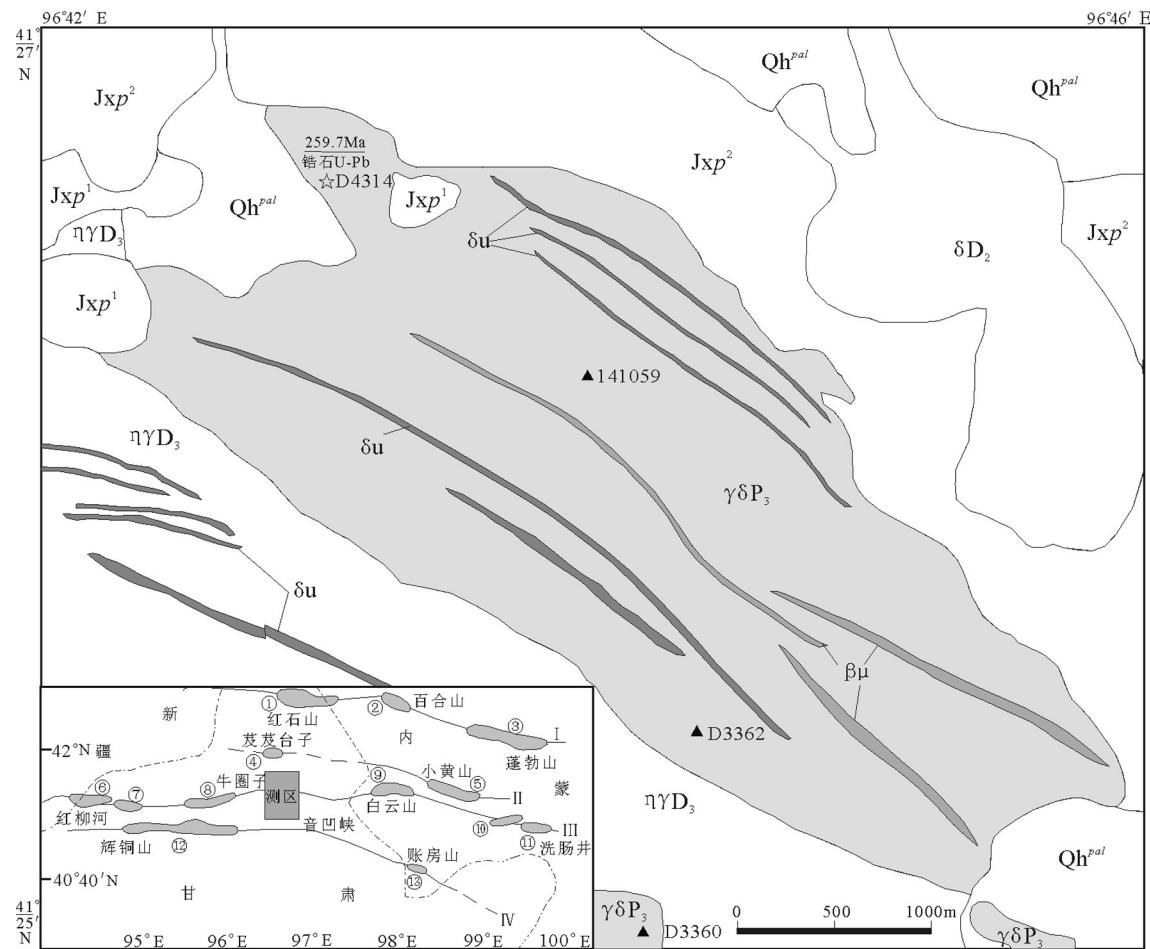


图1 研究区大地构造位置^[33]及甘肃大豁落南地区花岗闪长岩分布

Fig. 1 Tectonic subdivisions and granodiorite in southern Dahuoluo area, Gansu

I—红石山—百合山—蓬勃山带;①—红石山段;②—百合山段;③—蓬勃山段;II—芨芨台子—小黄山带;④—芨芨台子段;⑤—小黄山段;III—红柳河—牛圈子—洗肠井带;⑥—红柳河段;⑦—玉石山段;⑧—牛圈子段;⑨—白云山段;⑩—月牙山段;⑪—洗肠井段;IV—辉铜山—账房山带;⑫—辉铜山—花南沟与花西滩段;⑬—账房山段;Jxp¹—蔚县系平头山组下段;Jxp²—蔚县系平头山组上段;δD₂—中泥盆世闪长岩;γγD₃—晚泥盆世二长花岗岩;γδP₃—晚二叠世花岗闪长岩;βμ—辉绿岩脉;δμ—闪长玢岩脉;Qh⁰¹—第四系;▲—采样位置;☆—年龄样

5mm, 含量 15%~20%; 角闪石呈黑色, 短柱状, 长 0.2~3mm, 含量 5%~8%; 黑云母呈褐红色, 鳞片状, 片状大小 3~6mm, 含量 10%~12%, 具多色吸收性, 部分沿 {001} 解理绿泥石化(图2)。

3 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析

3.1 分析方法

为了确定花岗闪长岩的形成时代, 用 LA-ICP-MS 同位素测定技术对采集的 1 个样品(D4314)中的锆石进行 U-Pb 同位素测定。样品靶制备、锆石阴极发光(CL)图像拍摄及 U-Pb 同位素测定均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。在双

目镜下挑选出透明、无裂纹、粒径较大的锆石置于双面胶纸上, 灌注环氧树脂, 固化后打磨并抛光, 使锆石中心暴露, 然后拍摄阴极发光图像, 用于测定时选取锆石颗粒及其部位。锆石阴极发光检测在电子探针实验室 MonoCL3 系统上完成, 检测时其电子束加速电压为 10kV。锆石 U-Pb 同位素测定在电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7500a)与准分子激光剥蚀系统(GeoLas 2005)联机上完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定时激光束斑直径为 30 μm, 激光剥蚀深度为 20~40 μm, 试验中采用氦气作为剥蚀物质的载气, 用 NISTSRM610 进行仪器最佳化, 锆石年龄采用标准锆石 91500 为外标, 用

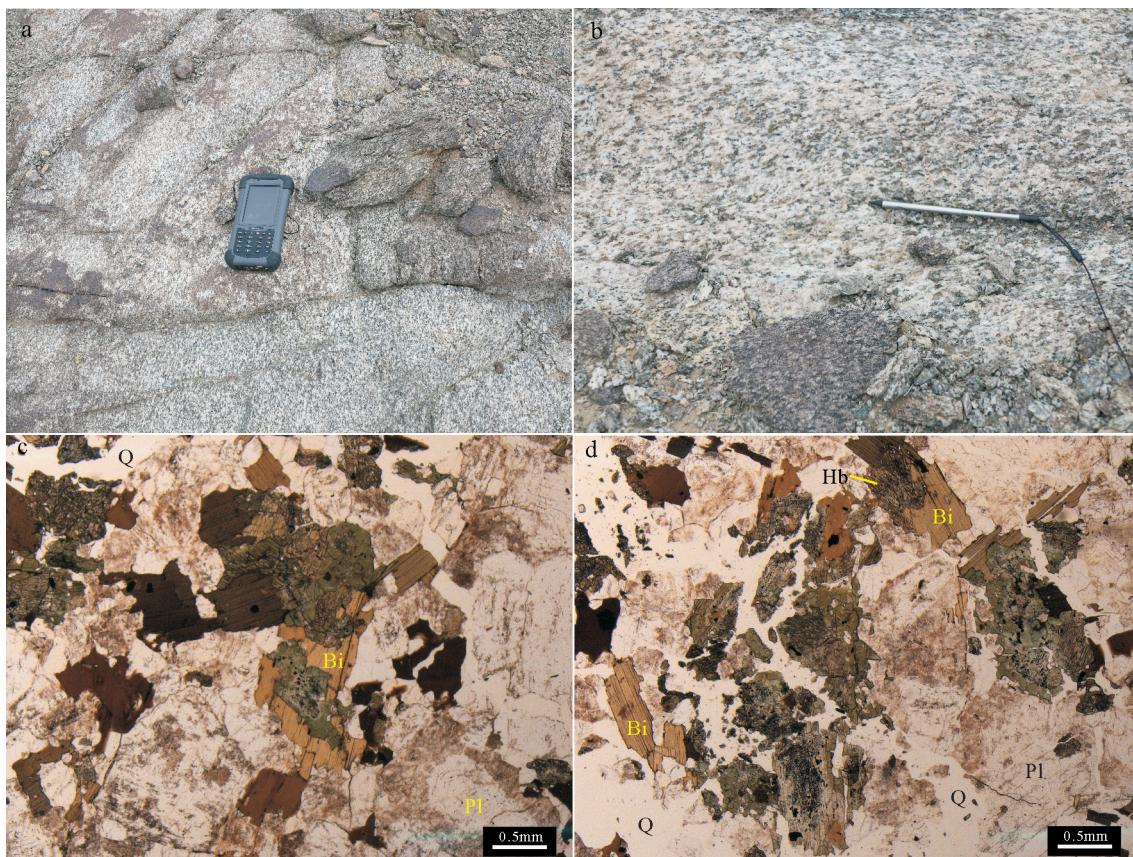


图2 甘肃北山大豁落南地区花岗闪长岩野外(a、b)和镜下(c、d,正交偏光)照片

Fig. 2 Field photographs (a,b) and microphotographs (c,d) of granodiorite in southern Dahuoluo area, Gansu
Q—石英;Pl—斜长石;Hb—角闪石;Bi—黑云母

NISTSRM610 为外标, ^{29}Si 为内标来校正微量元素含量,数据处理采用 ICP-MSDataCal8.0 完成^[37]。采用 Common Pb Correction (ver3.15) 方法对普通铅进行校正,并采用 Isoplot3.0 程序^[38]进行锆石年龄加权平均值计算及 U-Pb 谐和图的绘制。

3.2 分析结果

镜下观测表明,样品中锆石大部分较自形,无色透明,呈长柱状和柱状,长度一般为 50~150 μm,长宽比为 2:1~3:1,阴极发光图像(图3)显示清晰的岩浆型锆石的振荡环带。样品 D4314-1-1TW 共测定了 30 颗锆石,测定结果见表 1。测点中 Th 的含量变化范围为 $70.21 \times 10^{-6} \sim 1254.29 \times 10^{-6}$,U 的含量变化范围为 $75.74 \times 10^{-6} \sim 624.20 \times 10^{-6}$,锆石的 Th/U 值为 0.92~2.01,均大于 0.4,说明锆石为岩浆成因^[39]。其中,01、15、27、30 号 4 个点因不具谐和年龄被剔除,5、12、23 号点的年龄明显偏离锆石的主体年龄,不参与平均值计算,12、23 号点具有较小的年龄,可能

代表了后期热事件的时间。剩余 23 个测点在谐和线上呈集中的锆石群, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $254 \pm 2 \sim 267 \pm 2$ Ma, 年龄加权平均值为 259.7 ± 1.5 Ma(置信度 95%, MSWD=1.7)(图 4)。这一年龄解释为花岗闪长岩的结晶年龄,对应地质历史时期的晚二叠世。

4 地球化学特征

花岗闪长岩的主量、微量元素分析测试均在西安地质矿产研究所测试中心完成。主量元素分析采用 Panalytical 公司 PW440 型 X 荧光光谱仪(XRF) 测定,分析误差低于 5%,微量元素和稀土元素采用 Thermo Fisher 公司 X-Series II 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS) 测定,检测限优于 5×10^{-9} , 相对标准偏差优于 5%。

4.1 主量元素

花岗闪长岩的主量元素分析结果见表 2。花岗闪长岩的化学成分较稳定, SiO_2 含量为 63.10%~

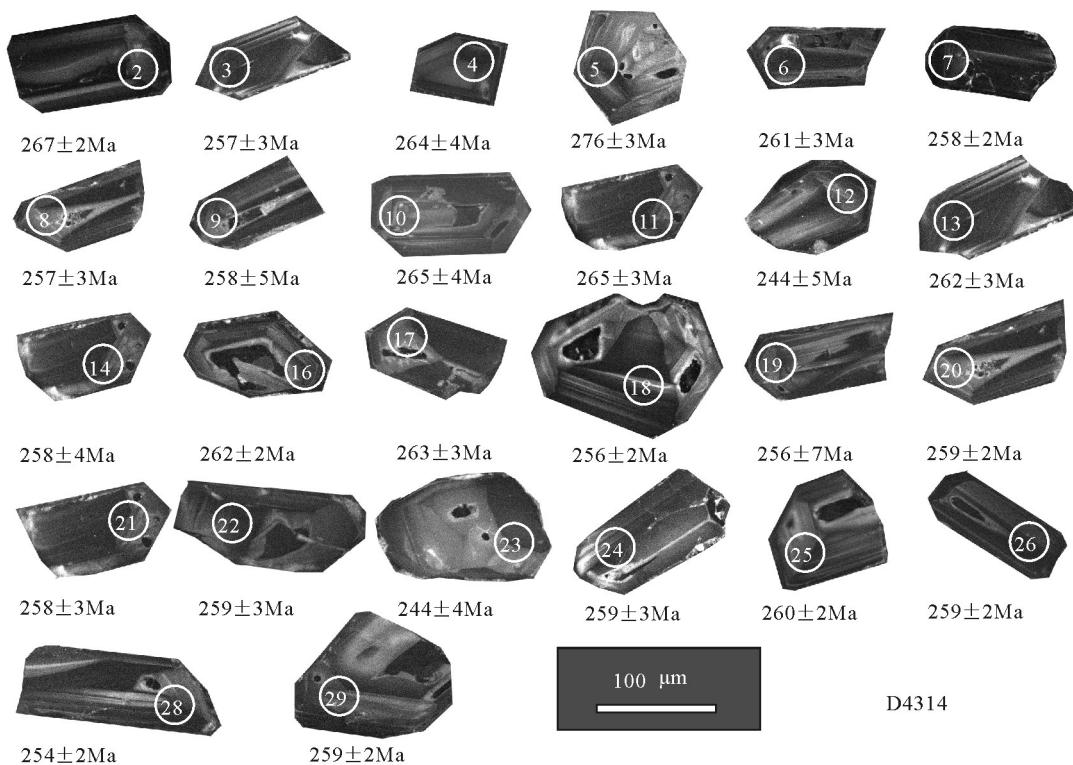


图3 甘肃北山大豁落南地区花岗闪长岩锆石阴极发光(CL)图像、测试位置及分析结果

Fig. 3 CL images, test position and results of zircon grains from granodiorite in southern Dahuoluo area, Beishan, Gansu

69.69%, 平均 65.01%。 TiO_2 含量为 0.41%~0.92%, 平均 0.73%。 Al_2O_3 含量为 14.86%~15.48%, 平均 15.21%。TFe 含量为 2.21%~4.21%, 平均 3.47%。全碱(ALK)含量在 6.81%~7.79% 之间, 平均 7.36%。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值介于 0.66~0.90 之间, MgO 介于 0.96%~3.59% 之间, 平均 2.69%。 CaO 介于 2.07%~4.19% 之间, 平均 3.41%。岩石里特曼指数在 2.17~2.77 之间, 平均 2.45, 小于 3.3; 分异指数(DI)为 67.57~82.71, 平均 72.27, 分异较强; 铝饱和指数 A/CNK 为 0.85~1.05, 小于 1.1, 碱度率(AR)为 2.12~2.63。在 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 图解(图5)上, 花岗闪长岩均属于亚碱性系列; 在 SiO_2 - K_2O 图解(图6-a)上, 花岗闪长岩属于高钾钙碱性系列区域; 在 A/CNK-A/NK 图解(图6-b)上, 除样品 D3360YQ 为偏铝质外, 其他样品点均落入准铝质花岗岩区域。显然, 花岗闪长岩属于高钾钙碱性准铝质岩石。

4.2 稀土元素

据表2可知, 花岗闪长岩稀土元素总量(ΣREE)为 88.10×10^{-6} ~ 243.02×10^{-6} , 其中, 轻稀土元素

(LREE) 总量为 84.32×10^{-6} ~ 227.65×10^{-6} , 重稀土元素(HREE) 总量为 3.78×10^{-6} ~ 15.37×10^{-6} , 轻、重稀土元素发生了不同程度的分馏, $(\text{La/Yb})_N$ 值为 18.60~50.91。轻、重稀土元素内部分馏比较明显, 其 $(\text{La/Sm})_N$ 值为 3.70~5.82, $(\text{Gd/Yb})_N$ 值为 2.85~4.45, 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上, 表现为轻稀土元素强烈富集的右倾型(图7-a), 有轻微的负 Eu 异常, δEu 值介于 0.83~1.06 之间, 暗示源区可能存在斜长石的残留。样品基本没有 Ce 异常, δCe 值介于 0.94~1.00 之间, 平均 0.97。

4.3 微量元素

据表2可知, 花岗闪长岩大离子亲石元素(LILE) Rb, Sr, Ba 含量分别为 91.80×10^{-6} ~ 162.00×10^{-6} 、 454.00×10^{-6} ~ 862.00×10^{-6} 、 692.00×10^{-6} ~ 1070.00×10^{-6} , 放射性生热元素(RPHE) U, Th 含量分别为 1.93×10^{-6} ~ 4.86×10^{-6} 、 9.20×10^{-6} ~ 21.40×10^{-6} , 高场强元素(HFSE) Nb, Ta, Zr, Hf 含量分别为 7.42×10^{-6} ~ 14.60×10^{-6} 、 0.55×10^{-6} ~ 1.11×10^{-6} 、 195.00×10^{-6} ~ 305.00×10^{-6} 、 4.12×10^{-6} ~ 7.60×10^{-6} (表2)。在原始地

表1 北山大豁落南地区花岗闪长岩(D4314)LA-ICP-MS锆石U-Th-Pb同位素数据

Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic composition of the zircon from granodiorite in southern Dahuoluo area, Beishan

分析点号	^{232}Th		^{238}U		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	10^{-6}	比值	$\pm 1\sigma$	比值	$\pm 1\sigma$	比值	$\pm 1\sigma$	年龄/Ma	$\pm 1\sigma$	年龄/Ma	$\pm 1\sigma$	年龄/Ma	$\pm 1\sigma$	年龄/Ma	$\pm 1\sigma$		
01	113	113	1.01	0.0461	0.0040	0.3207	0.0273	0.0505	0.0009	-	-	282	21	318	6		
02	497	520	0.96	0.0514	0.0013	0.2992	0.0070	0.0422	0.0003	259	41	266	5	267	2		
03	1254	624	2.01	0.0511	0.0021	0.2866	0.0112	0.0407	0.0004	244	71	256	9	257	3		
04	311	243	1.28	0.0550	0.0032	0.3167	0.0175	0.0417	0.0006	414	98	279	14	264	4		
05	469	307	1.53	0.0538	0.0027	0.3251	0.0158	0.0438	0.0006	363	87	286	12	276	3		
06	168	161	1.04	0.0517	0.0024	0.2946	0.0129	0.0413	0.0005	272	80	262	10	261	3		
07	1130	591	1.91	0.0522	0.0015	0.2942	0.0081	0.0409	0.0003	295	48	262	6	258	2		
08	562	412	1.36	0.0521	0.0028	0.2923	0.0150	0.0407	0.0005	288	93	260	12	257	3		
09	208	187	1.11	0.0516	0.0038	0.2905	0.0210	0.0408	0.0007	267	132	259	17	258	5		
10	279	206	1.35	0.0517	0.0029	0.2988	0.0161	0.0419	0.0006	273	99	265	13	265	4		
11	422	280	1.51	0.0473	0.0019	0.2739	0.0106	0.0420	0.0004	64	67	246	8	265	3		
12	591	388	1.52	0.0518	0.0043	0.2755	0.0224	0.0386	0.0008	277	148	247	18	244	5		
13	457	298	1.53	0.0518	0.0029	0.2960	0.0158	0.0414	0.0006	278	98	263	12	262	3		
14	415	284	1.46	0.0526	0.0036	0.2955	0.0197	0.0408	0.0007	311	122	263	15	258	4		
15	611	410	1.49	0.0749	0.0017	0.4465	0.0089	0.0432	0.0003	1067	29	375	6	273	2		
16	239	221	1.08	0.0515	0.0017	0.2942	0.0093	0.0415	0.0004	261	57	262	7	262	2		
17	242	191	1.27	0.0569	0.0030	0.3264	0.0165	0.0416	0.0006	487	88	287	13	263	3		
18	932	540	1.72	0.0537	0.0019	0.2998	0.0097	0.0405	0.0004	359	57	266	8	256	2		
19	70	76	0.93	0.0520	0.0062	0.2898	0.0337	0.0405	0.0011	283	212	258	27	256	7		
20	238	256	0.93	0.0516	0.0016	0.2916	0.0087	0.0410	0.0003	266	53	260	7	259	2		
21	530	349	1.52	0.0524	0.0022	0.2954	0.0120	0.0409	0.0004	302	73	263	9	258	3		
22	269	214	1.26	0.0531	0.0023	0.3004	0.0127	0.0411	0.0005	331	76	267	10	259	3		
23	301	241	1.25	0.0519	0.0038	0.2756	0.0194	0.0386	0.0007	279	129	247	15	244	4		
24	726	458	1.59	0.0523	0.0023	0.2953	0.0127	0.0410	0.0005	299	77	263	10	259	3		
25	302	217	1.39	0.0520	0.0018	0.2953	0.0097	0.0412	0.0004	287	59	263	8	260	2		
26	460	312	1.48	0.0510	0.0015	0.2890	0.0078	0.0411	0.0003	242	48	258	6	259	2		
27	279	254	1.10	0.0809	0.0021	0.4892	0.0117	0.0439	0.0004	1218	34	404	8	277	2		
28	423	309	1.37	0.0512	0.0016	0.2837	0.0084	0.040	0.0003	250	53	254	7	254	2		
29	704	427	1.65	0.0531	0.0014	0.3000	0.0070	0.0410	0.0003	332	40	266	5	259	2		
30	375	286	1.31	0.0599	0.0019	0.3368	0.0100	0.0408	0.0004	599	49	295	8	258	2		

幔标准化微量元素蛛网图(图7-b)上,普遍表现出Ba、Nb、Ti、P的亏损和Rb、K、U元素的富集,Nb元素的强烈亏损可能反映伸展构造环境^[44],Ti的强烈亏损暗示花岗岩源区可能存在富钛矿物的残留。

5 岩石成因

5.1 源区性质

埃达克岩(Adakite)是1990年由Defant等^[45]在研究阿留申群岛火山岩时提出来的一种地球化学

特征和成因特殊的中酸性火山岩或侵入岩。其地球化学标志是: $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$, $\text{MgO} < 3\%$, $\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$, $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$, $\text{Sr/Y} = 20 \sim 40$, $\text{La/Yb} > 20$,LREE富集,无Eu异常或轻微负Eu异常^[45-46]。

花岗闪长岩体具有较高的 SiO_2 含量, SiO_2 含量在63.10%~69.69%之间,平均65.01%,相对富集 Al_2O_3 和Sr元素, Al_2O_3 含量为14.86%~15.48%,平均15.21%,Sr含量为 $454 \times 10^{-6} \sim 862 \times 10^{-6}$, MgO 含量为

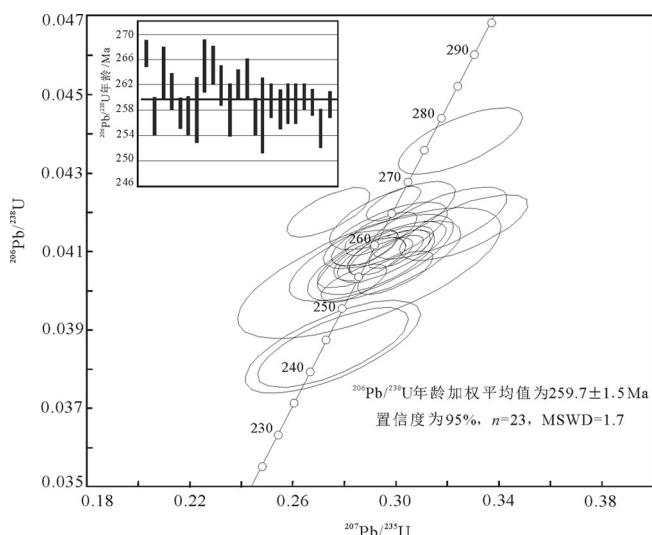


图4 甘肃北山大豁落南地区花岗闪长岩锆石U-Pb谐和图
Fig. 4 U-Pb concordia diagram of zircon from granodiorite in southern Dahuoluo area, Beishan, Gansu

0.96%~3.59%，平均2.69%，亏损Y、Yb，Y含量为 10.10×10^{-6} ~ 18.40×10^{-6} ，平均 14.55×10^{-6} ，Yb含量为 0.32×10^{-6} ~ 1.66×10^{-6} ，Sr/Y值为44.95~60.35，La/Yb值为25.93~70.94，岩石LREE值较高(88.10×10^{-6} ~ 243.02×10^{-6})，亏损Ta、Nb等元素，没有明显的负Eu异常，与典型的埃达克岩地球化学特征一致。在Y-Sr/Y图(图8-a)上，有2个样品位于经典岛弧区域，2个样品位于埃达克岩区域，在Yb_N-(La/Yb)_N(图8-b)图中，样品均位于埃达克岩区域内。

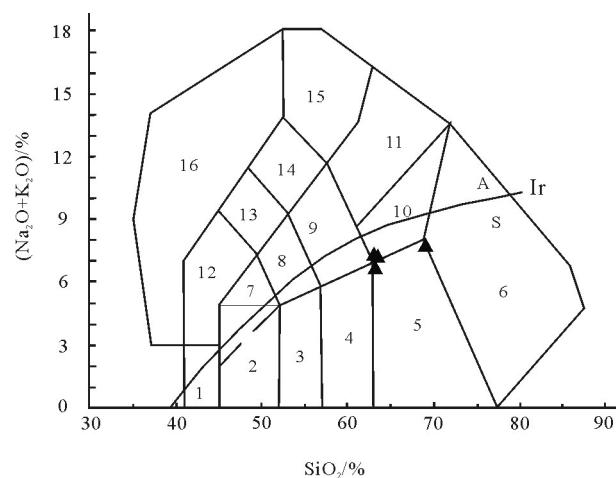


图5 甘肃北山大豁落南地区花岗闪长岩SiO₂-(Na₂O + K₂O)图解(底图据参考文献[40])

Fig. 5 SiO₂-(Na₂O + K₂O) diagram of granodiorite in southern Dahuoluo area, Beishan, Gansu

1—橄榄辉长岩；2—辉长岩；3—辉长闪长岩；4—闪长岩；5—花岗闪长岩；6—花岗岩；7—二长辉长岩；8—二长闪长岩；9—二长岩；10—石英二长岩；11—正长岩；12—似长辉长岩；13—似长二长闪长岩；14—似长正长闪长岩；15—似长正长岩；16—似长岩；A—碱性系列；S—亚碱性系列；Ir曲线上方为碱性系列，下方为亚碱性系列

一般认为，埃达克岩有两种可能的成因，一是与俯冲洋壳熔融相关^[48~52]，另一种与下地壳熔融相关^[53~66]。源于俯冲板片熔融的埃达克岩，平均K₂O含量为1.72%^[67]，其原岩大洋中脊玄武岩(MORB)平均K₂O含量为0.18%，明显低于大陆下地壳的K₂O含

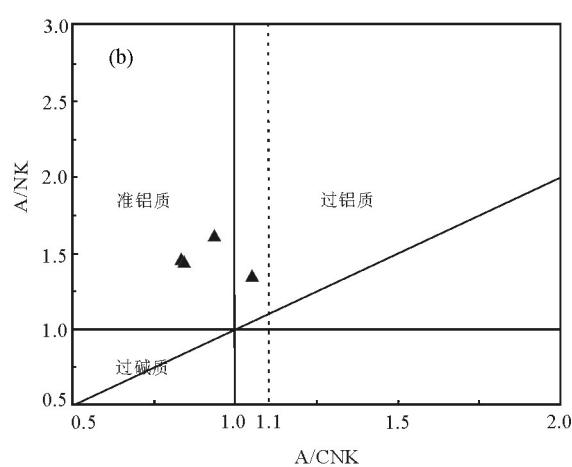
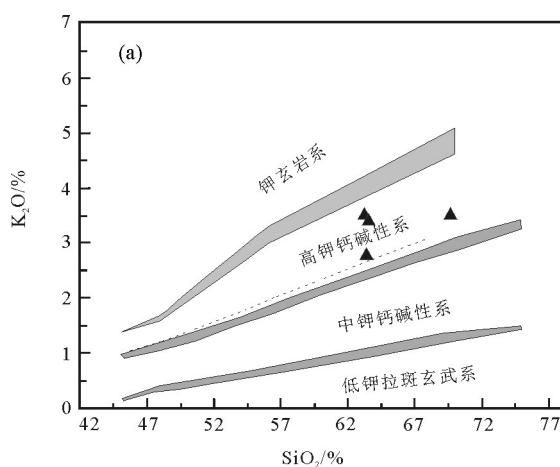


图6 甘肃北山大豁落南地区花岗闪长岩SiO₂-K₂O(a)和A/CNK-A/NK(b)^[42]图解

(a) 中虚线边界和阴影边界据参考文献[41])

Fig. 6 SiO₂ versus K₂O (a) and A/CNK versus A/NK (b) diagrams of granodiorite in southern Dahuoluo area, Beishan, Gansu

表2 甘肃北山大豁落南地区花岗闪长岩主量、微量元素和稀土元素数据

Table 2 Major, trace and rare earth elements of granodiorite in southern Dahuoluo area, Beishan, Gansu

样品号	D3360	D3362	D4314	141059	样品号	D3360	D3362	D4314	141059
SiO ₂	69.69	63.7	63.1	63.56	Ho	0.42	0.16	0.35	0.72
Al ₂ O ₃	15.3	15.48	15.23	14.86	Er	1.08	0.37	0.92	1.9
Fe ₂ O ₃	0.3	0.62	1.17	1.12	Tm	0.16	0.05	0.13	0.27
FeO	1.94	2.81	3.16	3.1	Yb	0.95	0.32	0.81	1.66
CaO	2.07	3.52	4.19	3.84	Lu	0.15	0.05	0.12	0.25
MgO	0.96	2.66	3.59	3.54	Y	10.1	11.4	18.3	18.4
K ₂ O	3.5	2.71	3.54	3.47	ΣREE	172.21	88.1	99.14	243.02
Na ₂ O	4.29	4.1	3.95	3.89	La _N /Yb _N	31.86	50.88	18.6	22.69
TiO ₂	0.41	0.66	0.92	0.9	δEu	0.84	1.06	0.83	0.85
P ₂ O ₅	0.13	0.22	0.31	0.33	δCe	0.95	0.94	1	1
MnO	0.05	0.07	0.07	0.07	Pb	28.8	26.7	32	28.6
烧失量	1.36	3.45	0.74	0.83	Cr	21.6	81.8	177	111
总和	100	100	99.97	99.51	Ni	8.72	46	94.7	77
TFe	2.21	3.37	4.21	4.11	Co	5.25	13.4	18.6	16.8
ALK	7.79	6.81	7.49	7.36	Rb	155	91.8	162	145
A/CNK	1.05	0.96	0.85	0.87	Cs	3.49	3.31	6.79	6.15
La	42.2	22.7	21	52.5	Sr	454	688	862	849
Ce	77.7	40	43.1	108	Ba	692	897	1020	1070
Pr	8.48	4.14	4.96	12.5	Sc	4.12	8.85	10.5	11.2
Nd	27.9	14.2	18.2	44.8	Nb	7.42	7.45	14.6	13
Sm	4.94	2.52	3.66	7.87	Ta	0.76	0.55	1.11	0.97
Eu	1.26	0.76	0.9	1.98	Zr	224	220	305	304
Gd	3.94	1.72	2.79	5.85	Hf	4.63	4.36	6.32	7.6
Tb	0.52	0.22	0.37	0.81	U	4.57	1.93	2.75	2.45
Dy	2.51	0.89	1.83	3.91	Th	16.5	9.2	21.4	20

注: 主量元素含量单位为%,微量元素和稀土元素含量为 10^{-6}

量(平均0.6%),研究区埃达质克岩具有较高的K₂O含量(2.71%~3.50%),这种富K特征与下地壳来源的埃达克岩类似^[57,62],暗示其来源于俯冲板片的可能性较小,下地壳熔融形成的埃达克岩Mg[#]值一般小于40^[68],Cr、Ni含量较低,而研究区埃达克岩具有相对较高的Mg[#]值(50.31~66.75)和Cr、Ni含量,说明存在幔源物质的参与,可能与幔源物质的底侵作用或加厚的下地壳拆沉作用有关。花岗闪长岩体的La/Ta值介于18.92~55.53之间,平均42.46,大于25,显示出幔源岩浆岩的特点^[69],Zr/Hf值介于40.00~50.46之间,平均为46.77,明显高于幔源岩石(36.27 ± 2.0)^[70-71],Nb/Ta值介于9.76~13.55之间,平均为12.47,明显低于幔源岩石(17.5 ± 2),接近陆壳岩石(11左右)^[71-72],也显示出壳幔混合成因的特点。综上,花岗闪长岩体的地

球化学特征表明,该岩体源区物质具有壳幔混合成因特点。

5.2 动力学背景分析

花岗闪长岩体的锆石U-Pb年龄为259Ma,形成于晚二叠世,据目前的区域地质研究成果,认为北山地区在早二叠世之前洋壳已经闭合^[3, 27, 29-30],在二叠纪可能处于伸展拉伸的构造背景^[3,73-74]。区域上,在中亚造山带(CAOB),大范围存在二叠纪与幔源岩浆有关的花岗岩^[20-21, 75-81],多数学者认为其是在后碰撞伸展体制下形成的^[20,82-83];在北山西涧泉子和音凹峡南也有类似的花岗岩产出^[84-85],认为是后碰撞裂谷作用的产物;研究区也发育大量的二叠纪辉绿岩墙,进一步暗示了伸展的构造环境。综上认为,北山大豁落南地区的晚二叠世花岗闪长岩产出

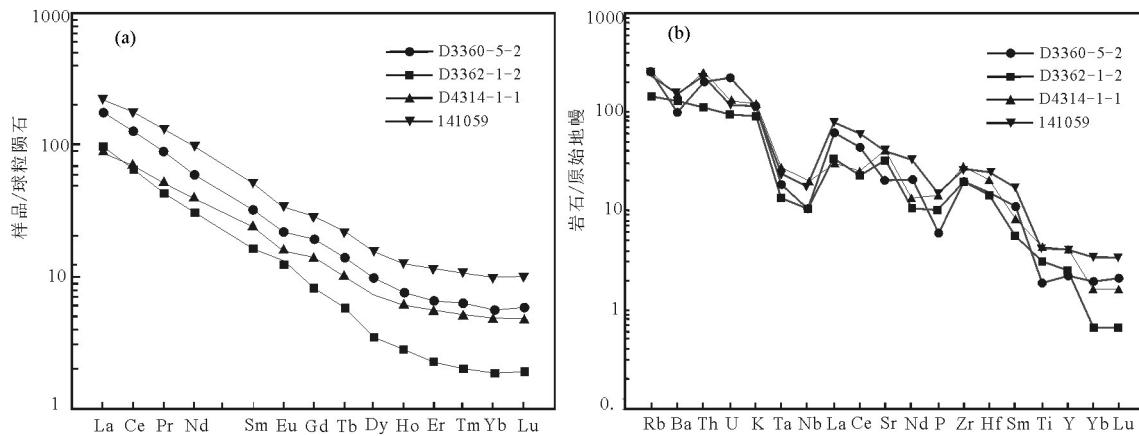


图7 甘肃北山大豁落南地区花岗闪长岩稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b)(球粒陨石标准化数据参考文献[43])

Fig. 7 REE patterns (a) and trace element spidergrams(b) of granodiorite in southern Dahuoluo area, Beishan, Gansu

于后碰撞伸展的大地构造环境,其可能与区域上二叠纪花岗岩有类似的成因机制,即碰撞后的板内伸展导致压力降低,诱发地幔部分熔融,产生的幔源玄武质岩浆上涌,发生底侵作用,加热下地壳使其发生部分熔融,同时,地幔上涌的热物质与地壳的热物质发生了混染作用,也说明晚古生代北山地区地壳为垂向增生,与以天山为主的中亚造山带大范围存在的二叠纪与幔源岩浆有关的花岗岩是同期构造岩浆事件的产物。

6 结 论

(1)花岗闪长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $259.7 \pm 1.5\text{ Ma}$ (MSWD=1.7),代表了其结晶年龄,为

北山造山带晚古生代后造山岩浆作用提供了可靠的年代学约束。

(2)花岗闪长岩富 Al_2O_3 ,高 Sr , Al_2O_3 含量为14.86%~15.48%,平均15.21%, Sr 含量在 454.00×10^{-6} ~ 862.00×10^{-6} 之间,低 MgO 含量(0.96%~3.59%),平均2.69%,亏损 Y 、 Yb , Sr/Y 值介于44.95~60.35之间, La/Yb 值介于25.93~70.94之间,强烈富集轻稀土元素,没有明显的Eu异常,显示埃达克岩的地球化学特征。

(3)花岗闪长岩体形成于碰撞后的板内伸展环境,伸展导致压力降低,诱发地幔部分熔融,产生的幔源岩浆上涌,发生底侵作用,加热下地壳使其发生部分熔融,同时,地幔上涌的热物质与地壳的热

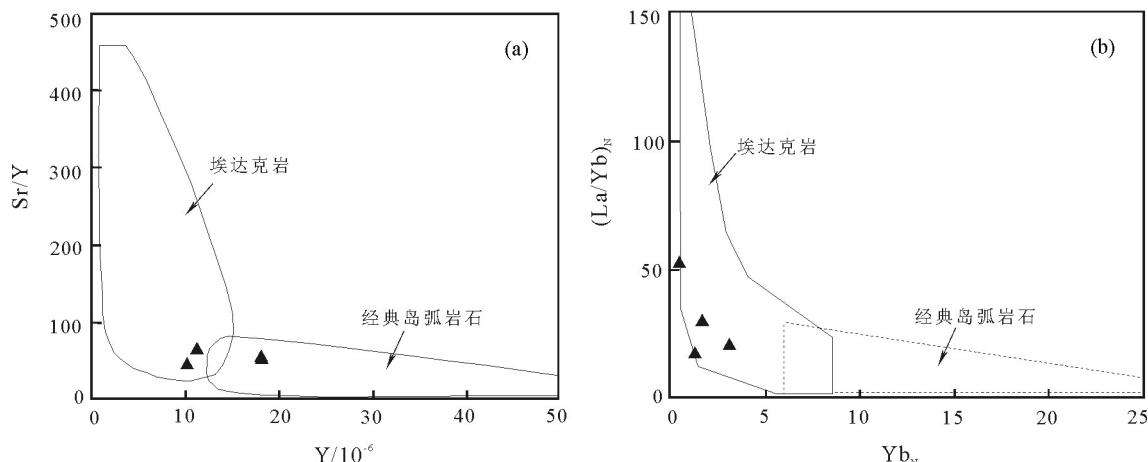


图8 甘肃北山大豁落南地区花岗闪长岩Y-Sr/Y(a)和Yb_N-(La/Yb)_N(b)图解(底图据参考文献[45,47])

Fig. 8 Y-Sr/Y(a) and Yb_N-(La/Yb)_N(b) diagrams granodiorite in southern Dahuoluo area, Beishan, Gansu

物质发生了混染作用,也同时说明晚古生代北山地区地壳为垂向增生。

致谢:感谢项目组成员在野外工作中的帮助和支持,以及西安地质调查中心实验测试中心和西北大学大陆动力学国家重点实验室在主微量元素分析、锆石U-Pb同位素测定中的帮助和审稿专家的宝贵修改意见。

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].北京大学出版社,1990:1~226.
- [4] 左国朝,张淑玲,何国琦,等.北山地区早古生代板块构造特征[J].地质科学,1990,(4):305~314.
- [5] 穆治国,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.
- [6] 穆治国,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.
- [7] 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岩石化学特征与构造环境的判别[J].地球物理学报,1995,38(S2):145~158.
- [8] 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):532~538.
- [9] 修群业.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.
- [10] 梅华林,李惠民.甘肃柳园地区花岗岩时代及成因[J].岩石矿物学杂志,1999,18(1):14~17.
- [11] 许保良,阎国翰,路凤香,等.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,2001,20(3):263~272.
- [12] 聂凤军,江思宏,刘妍,等.甘肃花牛山东钾长花岗岩⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素年龄及其地质意义[J].地质科学,2002,37(4):415~422.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 江思宏,聂凤军.北山地区花岗岩类的⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素年代学研究[J].岩石学报,2006,22(11):2719~2732.
- [16] 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.
- [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[J].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] Han B F, Wang S G, Jahn B M, et al. Depleted-mantle magma source for the Ulungur River A-type granites from north Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence and implication for Phanerozoic crustal growth[J]. Chemical Geology, 1997, 138:135~159.
- [21] 韩宝福,何国琦,王式洮,等.后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质[J].中国科学(D辑),1999,29(1):16~21.
- [22] Hu A Q, Jahn B M, Zhang G X, et al. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in Northern Xinjiang: Nd-Sr isotopic evidence. Part I: Isotopic characterization of basement rocks[J]. Tectonophysics, 2000, 328: 15~51.
- [23] Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic[J]. Journal of Earth Science, 2000, 91:181~193.
- [24] Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Massive granitoid generation in Central Asia:Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. Episodes, 2000, 23: 82~92.
- [25] 龚全胜,刘明强,李海林,等.甘肃北山造山带类型及基本特征[J].西北地质,2002,36(3):28~34.
- [26] 赵茹石,周振环,毛金海,等.甘肃省板块构造单元划分及其构造演化[J].中国区域地质,1994,(1):28~35.
- [27] 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,1995:37~48.
- [28] 聂凤军,江思宏,白大明,等.甘蒙新相邻(北山)地区金铜矿床时空分布特征及成矿作用[J].矿床地质,2003,22(3):234~243.
- [29] 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[J].西北地质,2003,36(1):11~17.
- [30] 何世平.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.
- [31] 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.
- [32] 杨合群,李英,赵国斌,等.北山蛇绿岩特征及构造属性[J].西北地质,2010,43(1):26~34.
- [33] 杨合群,李英,李文明,等.北山成矿构造背景概论[J].西北地质,2008,41(1):22~28.
- [34] Wang C W, Li N, Sun Y W, et al. Distribution of Tuvaella Brachiopod Fauna and Its Tectonic Significance[J]. Journal of Earth Science, 2011, 22(1):11~19.
- [35] Wang C W, Sun Y W, Li Ning, et al. Tectonic implications of Late Paleozoic stratigraphic distribution in Northeast China and adjacent region[J]. Science in China: Earth Sciences, 2009, 52(5): 619~626.
- [36] 杨建国,谢春林,王小红,等.甘肃北山地区基本构造格局和成矿系列特征[J].地质通报,2012,31(2/3):422~438.
- [37] Liu Y S, Hu Z C, Zong K, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J].

- Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15):1535–1546.
- [38]Luding K R.ISOPLT3.00:A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J].Berkeley Geochronology Center Special Publication. 2003, 4:1–70.
- [39]吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学及其对U-Pb年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16):1589–1604.
- [40]Cox K G, Bell J D, Pankhurst R J. The interpretation of igneous rocks[M]. George, Allen and Unwin, London, 1979: 115–120.
- [41]Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22:247–263.
- [42]Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoid[J]. Geological Society of America bulletin, 1989, 101: 635–643.
- [43]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the ocean basins. London, Geological Society Special Publication, 1989.
- [44]Brown P E, Dempster T J, Hutton D H W, et al. Extensional tectonics and mafic plutons in the Ketilidian rapakivi granite suite of South Greenland[J]. Lithos, 2003, 67:1–13.
- [45]Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 1990, 347: 662–665.
- [46]Defant M J, Drummond M S. Mount St. Helens: potential example of partial melting of subducted lithosphere in a volcanic arc[J]. Geology, 1993, 21:547–550.
- [47]Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An Overview of Adakite, Tonalite–Trondhjemite–Grondiorite(TTG) and Sanukitoid: Relationships and Some Implications for Crustal Evolution[J]. Lithos, 2005, 79:1–24.
- [48]Xu J F, Wang Q, Yu X Y. Geochemistry of high-Mg andesite and adakite andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lueophiolitic melange in the Qinling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust and its implication[J]. Geochemical Journal, 2000, 34:359–377.
- [49]王焰, 张旗, 钱青. 埃达克岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质科学, 2000, 35(2):251–256.
- [50]Wang Q, Zhao Z H, Bai Zh, et al. Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basaltic rocks association in the Altay Mountains, north Xinjiang: Interactions between slab melt and mantle peridotite and implications for crustal growth[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 8(19): 2108–2115.
- [51]Wang Q, Wyman D A, Zhao Z H, et al. Petrogenesis of Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basalts in the Altay area, northern Tianshan Range western China: Implication for Phanerozoic crustal growth of Central Asia Orogenic Belt[J]. Chemical Geology, 2006, 236:42–64.
- [52]Zhang H X, Niu H C, Sato H, et al. Late Paleozoic adakites and Nb-enriched basalts from northern Xinjiang, northwest China: Evidence for the southward subduction of the Paleo Asian Oceanic Plate[J]. The Island Arc, 2005, 14: 55–68.
- [53]张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(2):236–244.
- [54]Xiong X L, Zhao Z H, Bai Z H, et al. Adakite-type sodium-rich rocks in Awulale Mountain of west Tianshan: Significance for the vertical growth of continental crust[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(10):811–817.
- [55]Liu S, Hu R Z, Feng C X, et al. Cenozoic adakite-type volcanic rocks in Qiangtang, Tibet and its significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77:187–193.
- [56]Wang Q, Zhao Z H, Xu J F, et al. Petrogenesis and metallogenesis of the Yanshanian adakitelike rocks in the Eastern Yangtze Block[J]. Science in China(Series D), 2003, 46(Supp):164–176.
- [57]Wang Q, McDermott F, Xu J F, et al. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower-crustal melting in an intracontinental setting[J]. Geology, 2005, 33: 465–468.
- [58]Ma C Q, Yang K G, Ming H L. The timing of tectonic transition from compression to extension in Dabieshan: Evidence from Mesozoic granites[J]. Science in China(Series D), 2004, 47: 453–462.
- [59]刘红涛, 张旗, 刘建明, 等. 埃达克岩与斑岩铜矿—浅成热液金矿: 有待深入研究的岩浆成矿关系[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 205–218.
- [60]翟明国. 埃达克岩和大陆下地壳重熔的花岗岩类[J]. 岩石学报, 2004, 20(2):193–194.
- [61]肖龙, Rapp RP, 许继峰. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约[J]. 岩石学报, 2004, 20(2):219–228.
- [62]Xu J F, Shinjo R, Defant M J, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust[J]. Geology, 2002, 12:1111–1114.
- [63]Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. Nature, 2004, 432: 892–897.
- [64]Wang Q, Zhao Z H, Bao Z W, et al. Geochemistry and petrogenesis of the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks and the associated porphyry copper molybdenum mineralization in southeast Hubei, East China[J]. Resource Geology, 2004, 54:137–152.
- [65]Wang Q, Xu J F, Jian P, et al. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting in Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. Journal of Petrology, 2006, 46:119–144.
- [66]Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu–Au mineralization[J]. Lithos, 2006, 89: 424–446.
- [67]Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean

- granitoids[J]. *Lithos*, 1999, 46:411–429.
- [68]Rapp R P, Watson E B. Dehydration Melting of Metabasalt at 8~32kbar:Implications for Continental Growth and Crust Mantle Recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1999, 36(4): 891–931.
- [69]Lassiter J C, Depaolo D J. Plumes/Lithosphere Interaction in the Generation of Continental and Oceanic Flood Basalts: Chemical and Isotope Constraints[J]. *Geophysical Monograph* 100, American Geophysical Union, 1997, 26(5): 335–355.
- [70]Hofmann A W. Chemical differentiation of the earth:The relationship between large crust, and oceanic crust[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1988, 90: 297–314.
- [71]Green T H. Significance of Nb /Ta as an indicator of geochemical processes in the crust mantle system[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120: 347–359.
- [72]Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985:91–92.
- [73]姜常义, 程松林, 叶书峰, 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.
- [74]赵泽辉, 郭召杰, 韩宝福, 等. 新疆东部—甘肃北山地区二叠纪玄武岩对比研究及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1279–1293.
- [75]吴福元, 江博明, 林强. 中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长意义[J]. *科学通报*, 1997, 42(20): 2188–2192.
- [76]吴福元, 孙德有, 林强. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. *岩石学报*, 1999, 15(2): 181–189.
- [77]Wu F Y, Jahn B, Wilde S, et al. Phanerozoic crustal growth: U–Pb and Sr–Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. *Tectonophysics*, 2000, 328:89–113.
- [78]Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A-type granites in northeastern China:age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 2002, 187:143–173.
- [79]Hong D, Zhang J, Wang T, et al. Continental crustal growth and the supercontinental cycle:evidence from the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23:799–813.
- [80]Jahn B, Windley B, Natal'In B, et al. Phanerozoic continental growth in Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23:599–603.
- [81]Chen B, Jahn B. 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*, 2004, 23: 691–703.
- [82]韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1077–1086.
- [83]顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 等. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1103–1120.
- [84]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]. *岩石矿物杂志*, 2010, 29(6): 719–731.
- [85]张文, 冯继东, 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.