

甘肃北山双峰山花岗闪长岩锆石 LA-ICP-MS 定年及其构造意义

孙新春, 王怀涛, 李通国, 魏海峰, 徐磊, 王晓伟

(甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了确定双峰山花岗闪长岩的形成时代、岩体成因及形成环境, 对其开展了锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学以及 Sr-Nd 同位素的研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明双峰山花岗闪长岩的形成时代为 334.8 ± 2.1 Ma (MSWD=1.2)。岩石具较高的 SiO_2 (55.42%~65.53%)、 Al_2O_3 (14.84%~17.53%) 和 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (7.42%~8.32%) 含量, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.16~0.29, 为钙碱性、准铝质 I 型花岗岩。岩石富集 Rb、K、Nd、Zr、Hf 元素, 相对亏损 Nb、Ta、P、Sm、Ti 元素。Nb/La 值 (0.41~1.01)、Hf/Th 值 (0.80~1.15) 接近典型岛弧岩浆岩。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值 (0.706 0~0.709 5) 和 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值 (-0.22~+0.52) 显示出壳幔相互作用的特点。结合区域地质研究表明, 双峰山花岗闪长岩源于中元古代晚期形成的玄武质地壳, 是早石炭世玄武岩浆底侵作用下发生部分熔融的产物, 形成于活动大陆边缘, 是辉铜山-帐房山蛇绿岩所代表的弧后盆地北向俯冲的响应。

关键词: 花岗闪长岩; 地球化学; 俯冲作用; 弧后盆地; 北山

中图分类号: P588.12⁺2; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)02-0171-14

LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the granodiorites from Shuangfengshan in Beishan Mountain, Gansu Province, and its tectonic significance

SUN Xin-chun, WANG Huai-tao, LI Tong-guo, WEI Hai-feng, XU Lei and WANG Xiao-wei

(Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Zircon U-Pb chronology, rock geochemistry and Sr-Nd isotope have been investigated in this paper to determine the formation time, genesis of rock and formation environment of the granodiorite in Shuangfengshan. The results show that the formation age of Shuangfengshan granodiorite is 334.8 ± 2.1 Ma (MSWD = 1.2). The rocks have relatively high SiO_2 (55.42%~65.53%), $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (7.42%~8.32%) and Al_2O_3 values (14.84%~17.53%), as well as $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios (0.16~0.29), which indicates that they are calc-alkaline, quasi-aluminum I-type granite. The rocks are rich in Rb, K, Nd, Zr and Hf, and relatively deficient in Nb, Ta, P, Sm and Ti. Nb/La (0.41~1.01) and Hf/Th (0.80~1.15) ratios are close to the data of typical island arc magmatic rocks. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.706 0~0.709 5) and $\varepsilon\text{Nd}(t)$ (-0.22~+0.52) show characteristics of crust-mantle interaction. Combined with regional geological research, the authors hold that Shuangfengshan granodiorite originated from the basaltic lower crust formed in the late Mesoproterozoic on the active continental margin under the underplating of Early Carboniferous basaltic magma, which was the response of the northward subduction of the back-arc basin represented by the Huitongshan-Zhangfangshan ophiolite.

Key words: granodiorites; geochemistry; subduction; back-arc basin; Beishan

收稿日期: 2020-05-26; 接受日期: 2021-01-06; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 2020年陇原青年创新创业人才项目(甘组通字[2020]9号); 中国地质调查局项目(12120114014501)

作者简介: 孙新春(1978-), 男, 高级工程师, 从事区域地质、矿产地质及技术管理工作, E-mail: 470483811@qq.com。

Fund support: Project of Longyuan Youth Innovation and Entrepreneurship Talent in 2020 ([2020] No. 9); Project of China Geological Survey(12120114014501)

位于中亚造山带南段的北山地区岩浆岩分布广泛且期次多,记录了古亚洲洋构造域形成演化的重要信息。从目前获得的同位素年龄来看,主要有前寒武纪、早古生代、晚古生代、早中生代4期的构造岩浆事件(梅华林等,1999;李伍平等,2001;刘明强等,2005;江思宏等,2006;赵泽辉等,2006,2007;李舳等,2009;毛启贵等,2010;张文等,2011;Wan *et al.*, 2013)。前寒武纪花岗岩类在北山地区出露不多,且遭受了后期构造热事件的改造,发生一定程度的变形和变质作用。早古生代花岗岩类以I型花岗岩为主,其形成主要与早古生代古亚洲大洋岩石圈俯冲作用有关,对洋盆俯冲、俯冲方向及陆缘弧演化过程的研究具有重要的科学意义(毛启贵等,2010;冯继承等,2012;Song *et al.*, 2015)。晚古生代花岗岩类在北山地区广泛分布,在不同地区分布有I、S、A型岩石类型,因而北山地区晚古生代岩浆岩成因及其形成的构造动力学背景存在很大的争议,有人认为北山花岗岩类的形成主要与板块俯冲作用有关(左国朝等,1990;龚全胜等,2003;何世平等,2005;Xiao *et al.*, 2010;郭谦谦等,2013),有人则认为其形成于板内环境(李伍平等,2001;赵泽辉等,2007;李舳等,2011;杨建国等,2012;王磊等,2017)。纵观前人研究成果,北山地区泥盆纪花岗岩类的研究程度较高,而石炭纪花岗岩类的研究比较薄弱,从而对北山地区晚古生代构造岩浆演化缺乏完整的认识。本文选择北山南带具有代表性的双峰山花岗闪长岩,通过岩石LA-ICP-MS锆石U-Pb定年和岩石地球化学分析,揭示了该岩体的形成年代、成因及形成的构造背景,探讨北山地区晚古生代构造岩浆演化过程,以期对中亚造山带中段南带的构造演化研究提供资料。

1 区域地质背景

北山地区位于中亚造山带中段南带,经历了新元古代-早古生代大陆裂解、古亚洲大洋俯冲、增生拼贴造山及后造山的演化过程,大地构造位置十分重要。由于其复杂的构造岩浆演化历史,前人基于不同的研究对象、研究方法及测试技术,使得该地区

的大地构造属性及演化过程一直存在诸多不同的认识(左国朝等,1990,2003;何世平等,2002,2005;龚全胜等,2003;李锦轶等,2006;杨合群等,2009),特别是区内蛇绿岩的类型、性质、形成时代、古亚洲大洋闭合时限以及板块汇聚过程形成相应的增生杂岩体、火山弧及残留陆块的属性等。北山造山带发育前寒武系结晶基底,被古生代地层不整合覆盖,地层主要出露寒武系-志留系浅海碎屑岩和火山岩、泥盆系-石炭系海相碎屑岩-碳酸盐岩和岛弧火山岩(安山岩、流纹岩和少量玄武岩)、二叠系浅海相碎屑岩和枕状玄武岩(颧炜等,2013)。北山地区构造岩浆活动十分强烈,侵入岩以花岗岩类最为发育,早古生代中酸性侵入岩多呈近东西向长条状岩基、岩株分布,岩性主要为石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩等,代表性岩体有五峰山花岗岩、尖泉子西花岗闪长岩等。晚古生代中酸性侵入岩岩石类型较多,多以岩基产出,岩性主要有花岗闪长斑岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、英云闪长岩、二长花岗岩和正长花岗岩等,在马鬃山地区以西呈北东向展布,以东呈北西向展布,代表性的岩体有双峰山钾长花岗岩-花岗闪长岩岩体、大山头石英闪长岩岩体、黑石山二长花岗岩岩体、双峰山花岗岩体、拾金坡似斑状花岗岩岩体、小泉东花岗闪长斑岩岩体、黄草滩英云闪长岩岩体等,这一时期的花岗岩类多为I型和A型花岗岩(李伍平等,2001;赵泽辉等,2007;李舳等,2009,2011;王磊等,2017)。基性-超基性岩次之,不同规模和走向的断裂构造极为发育,主干断裂带呈近EW向和NEE展布。

双峰山花岗闪长岩位于红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带南侧,出露面积约300 km²,东西长约40 km,南北宽5~10 km。岩体主要侵入于蓟县纪平头山组、南华-震旦纪洗肠井群及早泥盆世正长花岗岩中,侵入界线呈港湾状、不规则状,局部接触带附近的地层具角岩化、矽卡岩化等。双峰山花岗闪长岩被印支期的钾长花岗岩、花岗斑岩等侵入破坏,同时花岗闪长岩中分布有呈近东西向展布的花岗岩脉和近南北向的辉绿岩脉,花岗岩脉切穿辉绿岩脉(图1)。

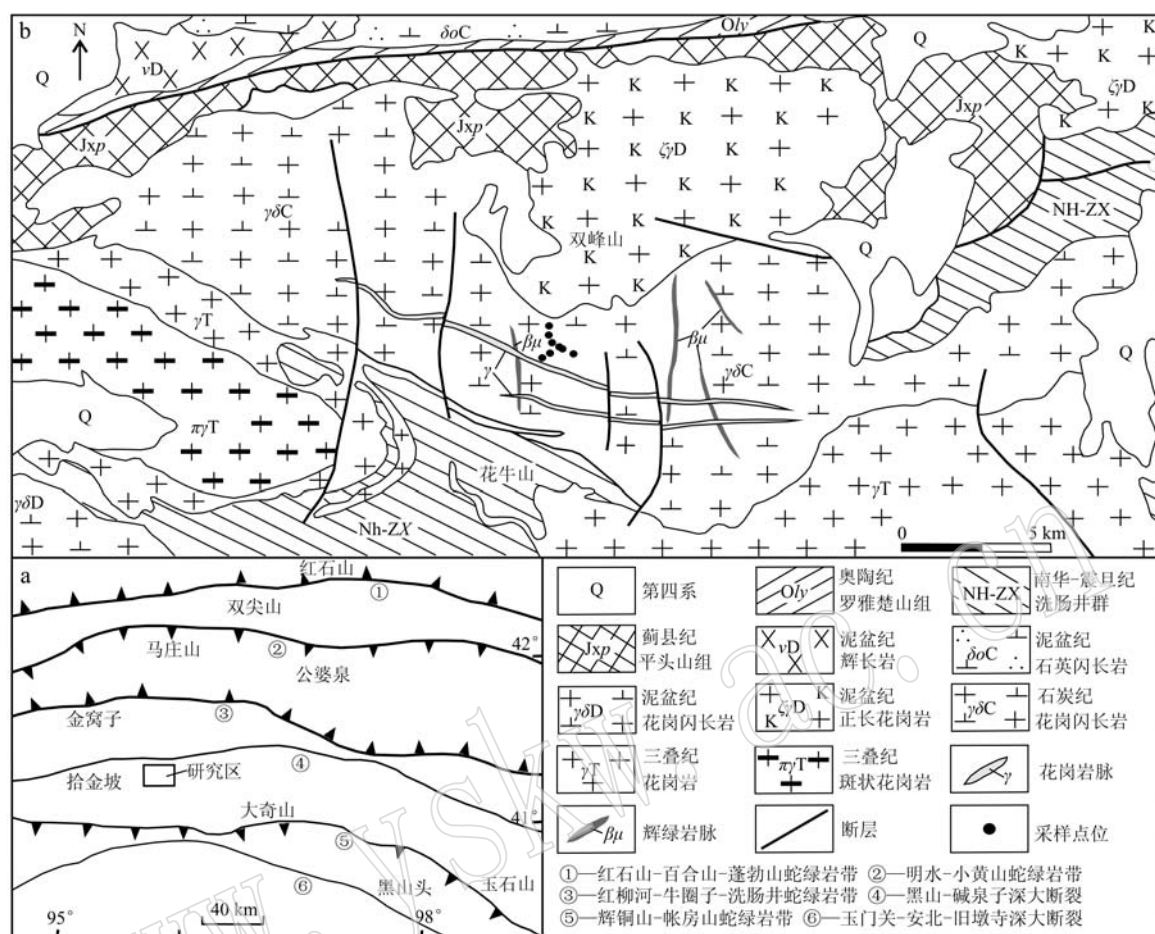


图1 研究区大地构造位置图(a, 据聂凤军等, 2002 修改)及双峰山花岗闪长岩地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic setting of granodiorites (a, modified after Nie Fengjun *et al.*, 2002) from Shuangfengshan and its geologic sketch map (b)

2 岩石学特征

花岗闪长岩具细粒花岗结构,块状构造,岩石主要由角闪石、斜长石、条纹长石、黑云母和石英等组成。斜长石(50%, 体积分数)呈宽板状,个别呈板状,见残缺聚片双晶,成分以更长石为主,粒度大多为(0.3~0.6)mm×1.8 mm;条纹长石(12%)呈它形局部具直边,具高岭土化,隐约可见滴状条纹结构,粒度大多为0.5~1.6 mm;石英(23%)呈它形粒状,透明洁净,分布不均匀,大多数不规则镶嵌聚集状分布,粒度多为0.3~1.0 mm;角闪石(10%)呈短柱状、柱状假像,个别残留见灰绿色-淡黄绿色弱多色性,具绿泥石化、绿帘石化、阳起石化、透闪石化,粒度约为0.5~1.4 mm,均匀分布;黑云母(5%)呈近片状,已变形,呈半透明蚀变物混杂集合体状,粒度大多为

0.4~1.0 mm(图2)。

3 分析方法

样品取自双峰山花岗闪长岩岩体,采集1件锆石 U-Pb 测年样和8件岩石地球化学分析样,岩性均为花岗闪长岩,具体采样位置见图1。

3.1 LA-ICP-MS 测年

锆石的分选由河北省廊坊地质调查研究所实验室完成。样品经常规粉碎至100目左右,采用重液法和电磁法进行分选,再通过双目镜手工精选无包裹体、无裂纹和透明度高的晶形完好的单颗粒锆石作为测定对象。锆石 CL(阴极发光)研究及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测定在西北大学大陆动力学重点实验室完成。实验采用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent7500a)和激光剥蚀系统(GeoLas 2005)联

机进行,激光束斑直径为 32 μm ,剥蚀深度为 20~40 μm ,采用 He 作为剥蚀物质的载气。锆石年龄测定采用国际标准锆石 91500($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $1\,065.4 \pm 0.6\text{ Ma}$) 作为校正外标,元素含量采用 NIST SRM 612 作为外标, ^{29}Si 作为内标进行校正。采样方式为

单点剥蚀,每完成 5 个测点的样品测定,加测标样一次。对分析数据的离线处理运用 ICPMS-DataCal (V8.0) 软件计算得出,采用 Anderson (2002) 的方法进行普通铅校正,并利用 Isoplot-ver3 进行锆石年龄谐和图绘制和年龄权重计算。

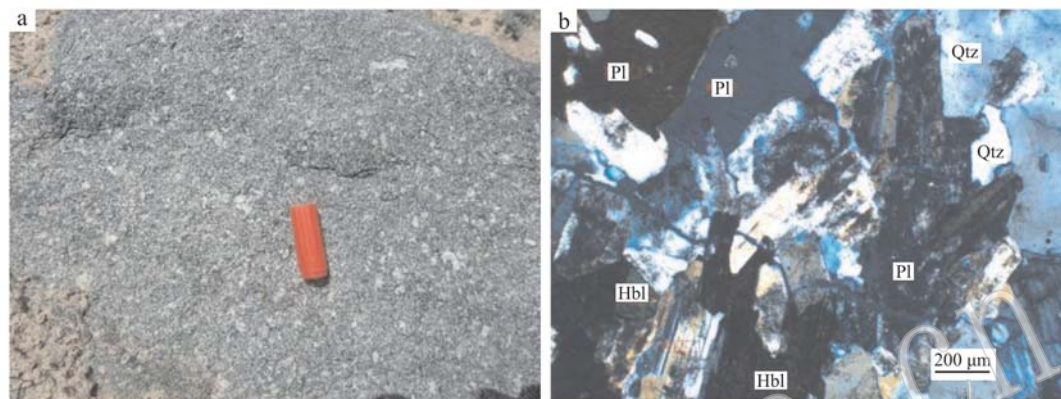


图 2 双峰山花岗闪长岩野外照片(a)及正交偏光显微照片(b)

Fig. 2 Outcrop (a) and microphotographs under crossed nicols (b) of granodiorites from Shuangfengshan

Hbl—普通角闪石; Pl—斜长石; Qtz—石英

Hbl—hornblende; Pl—plagioclase; Qtz—quartz

3.2 主量、微量元素分析

样品的主量元素分析测试在广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。主量元素采用帕拉科生产的 Axios 型 X 荧光光谱仪,分析精度 0.1%~1% (RSD%),准确度优于 1%,元素检出下限为 0.01%。微量元素和稀土元素分析测试在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室采用 ICP-MS (Agilent 7700x) 完成,元素测试精度下限为 0.01×10^{-6} 。

3.3 Sr-Nd 同位素分析

Sr-Nd 同位素在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。采用仪器为 Micromass IsoProbeTM 型 MC-ICP-MS,所有样品的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值统一采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\,9$ 和 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.119\,4$ 分别进行标准化,具体的实验流程参见韦刚健等 (2002) 和梁细荣等 (2003)。

4 锆石 U-Pb 年代学

挑选出的锆石颗粒大小约为 90~250 μm ,自形程度较好,呈灰白色-灰色,阴极发光影像图显示良好的岩浆振荡环带结构(图 3),绝大多数锆石的

Th/U 值大于 0.4 (表 1),是典型的岩浆锆石(吴元保等, 2004)。

共选取 24 颗锆石,共有 24 个测点,所测得年龄数据见表 1。所有锆石颗粒样品均投影在谐和曲线附近(图 4),表明这些颗粒形成后 U-Pb 同位素体系是封闭的,基本没有 U 或 Pb 同位素的丢失或加入。24 个花岗闪长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄都集中在 $344 \pm 6 \sim 326 \pm 4\text{ Ma}$ 之间, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 $334.8 \pm 2.1\text{ Ma}$ (MSWD = 1.2),可信度高,可解释为岩体结晶的年龄,属早石炭世。

5 岩石地球化学特征

5.1 主量元素

双峰山花岗闪长岩主量元素分析结果见表 2。岩石 SiO_2 含量为 55.42%~65.53%,平均值为 61.29%; Na_2O 含量为 6.33%~6.58%, K_2O 含量为 1.05%~1.87%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量变化范围为 7.42%~8.32%,平均值为 7.88%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.16~0.29,具富钠贫钾特征; Al_2O_3 含量较高,为 14.84%~17.53%, A/CNK 介于 0.85~0.91 之间,具准铝质花岗岩特征; MgO (1.51%~3.13%)、 TiO_2

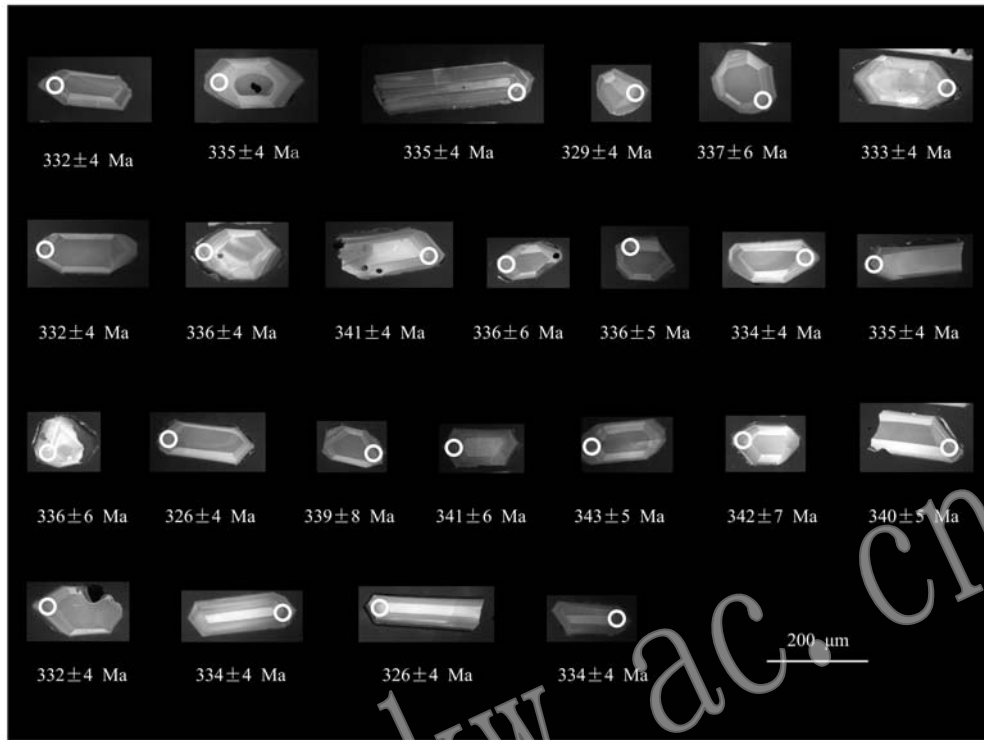


图 3 双峰山花岗闪长岩体锆石特征和 LA-ICP-MS 测点位置

Fig. 3 Characteristics and dating spots of zircons from granodiorites in Shuangfengshan

表 1 双峰山花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of granodiorites from Shuangfengshan

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
SF-TW-01	7.73	84.56	110.04	0.77	0.390 91	0.014 88	0.052 83	0.000 72	335	11	332	4
SF-TW-02	20.65	176.02	304.25	0.58	0.401 32	0.009 61	0.053 36	0.000 64	343	7	335	4
SF-TW-03	31.93	205.67	480.84	0.43	0.387 01	0.013 10	0.053 31	0.000 64	332	10	335	4
SF-TW-04	17.06	210.89	238.19	0.89	0.394 91	0.010 62	0.052 35	0.000 65	338	8	329	4
SF-TW-05	4.14	39.28	58.78	0.67	0.393 17	0.025 18	0.053 71	0.000 95	337	18	337	6
SF-TW-06	41.16	259.95	626.22	0.42	0.424 47	0.007 35	0.052 96	0.000 60	359	5	333	4
SF-TW-07	64.44	382.96	983.42	0.39	0.429 24	0.007 98	0.052 87	0.000 61	363	6	332	4
SF-TW-08	12.32	176.78	160.42	1.10	0.409 06	0.012 20	0.053 45	0.000 68	348	9	336	4
SF-TW-09	25.13	234.21	351.15	0.67	0.440 64	0.016 88	0.054 26	0.000 68	371	12	341	4
SF-TW-10	5.56	52.48	79.76	0.66	0.428 50	0.025 09	0.053 52	0.000 95	362	18	336	6
SF-TW-11	12.21	149.98	165.36	0.91	0.404 90	0.016 46	0.053 56	0.000 77	345	12	336	5
SF-TW-12	39.88	299.07	577.08	0.52	0.410 09	0.008 26	0.054 86	0.000 63	349	6	344	4
SF-TW-13	38.96	286.13	580.79	0.49	0.411 13	0.007 80	0.053 30	0.000 61	350	6	335	4
SF-TW-14	4.84	41.84	71.13	0.59	0.378 41	0.023 88	0.053 49	0.000 96	326	18	336	6
SF-TW-15	40.39	359.34	600.11	0.60	0.399 95	0.007 11	0.051 91	0.000 59	342	5	326	4
SF-TW-16	6.69	66.92	93.00	0.72	0.413 45	0.035 25	0.054 00	0.001 25	351	25	339	8
SF-TW-17	6.87	75.60	94.16	0.80	0.370 58	0.022 78	0.054 40	0.000 95	320	17	341	6
SF-TW-18	7.80	85.01	105.30	0.81	0.432 31	0.019 88	0.054 68	0.000 85	365	14	343	5
SF-TW-19	6.60	76.24	86.68	0.88	0.430 88	0.029 38	0.054 55	0.001 07	364	21	342	7
SF-TW-20	5.15	67.66	64.92	1.04	0.399 97	0.031 86	0.054 14	0.000 90	342	23	340	5
SF-TW-21	11.93	133.98	163.31	0.82	0.402 04	0.020 42	0.052 88	0.000 72	343	15	332	4
SF-TW-22	18.14	201.02	252.95	0.79	0.407 19	0.010 88	0.053 15	0.000 66	347	8	334	4
SF-TW-23	11.32	148.97	156.25	0.95	0.396 70	0.013 38	0.051 91	0.000 69	339	10	326	4
SF-TW-24	9.73	118.41	133.51	0.89	0.395 59	0.013 30	0.053 11	0.000 70	338	10	334	4

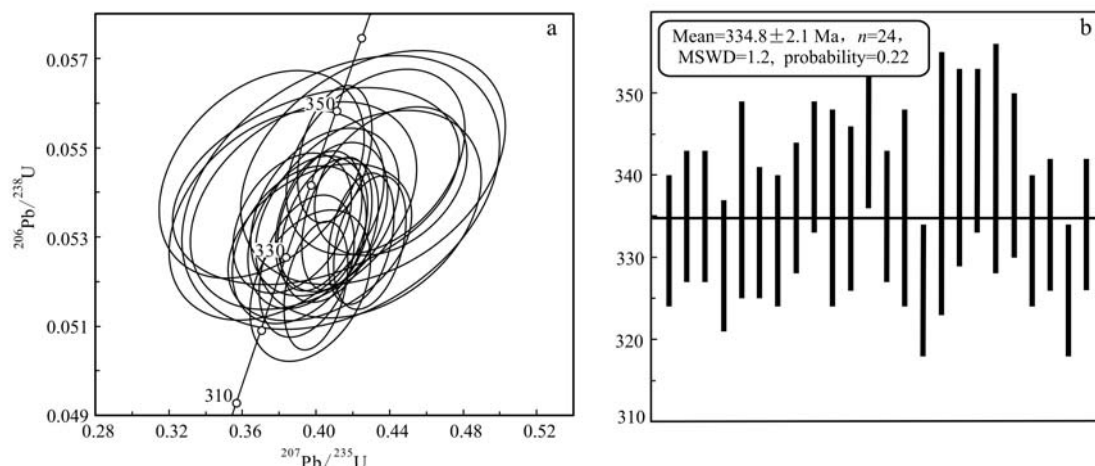
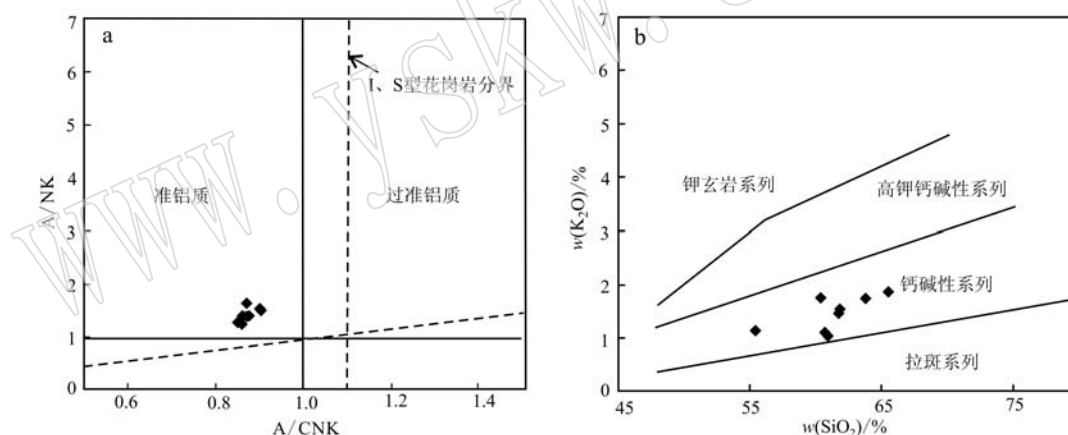


图4 双峰山花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄图

Fig. 4 Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic concordia diagrams for zircons of granodiorites from Shuangfengshan

(0.51%~0.87%, 平均值为 0.66%)、CaO (3.91%~6.96%, 平均值为 5.22%) 和 Fe_2O_3^T (4.15%~6.43%) 含量低。

样品 K/Na 值为 0.18~0.32, 平均值为 0.25, 小于 1, 在 A/NK - A/CNK 图解中落入准铝质区域(图 5a), 在 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解中落入钙碱性系列区域(图 5b)。

图5 A/NK - A/CNK 图解(a, 据 Shand, 1944) 和 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 判别图解(b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)Fig. 5 A/NK - A/CNK diagram (a, after Shand, 1944) and $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ diagram (b, after Peccerillo and Taylor, 1976)

5.2 微量元素

双峰山花岗闪长岩微量元素分析结果见表 2。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6a)显示, 双峰山花岗闪长岩强烈富集 Pb, 富集 Rb、K、Nd、Zr、Hf, 亏损 Nb、Ta、P、Sm、Ti 元素。岩石 Th、U 含量变化较大, 较为富集; Sr ($232.00 \times 10^{-6} \sim 370.00 \times 10^{-6}$)、Y ($18.30 \times 10^{-6} \sim 20.50 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($1.87 \times 10^{-6} \sim 2.19 \times 10^{-6}$) 含量较低, 具低 Sr/Y (11.61~18.32) 和 La/Yb (5.66~9.33) 值, Rb/Sr 值为 0.10~0.31, La/Ce 值为 0.42~0.53, Nb/U 值为 7.00~18.48。

双峰山花岗闪长岩 ΣREE 含量为 $74.30 \times 10^{-6} \sim$

114.58×10^{-6} 。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上(图 6b), 中等富集轻稀土元素(LREE), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 4.06~8.76 之间, 重稀土元素(HREE)相对亏损且分馏不明显, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 介于 1.27~1.63 之间, 无 Eu 异常, δEu 介于 1.01~1.07 之间。

5.3 Sr-Nd 同位素

双峰山花岗闪长岩的 Sr-Nd 同位素数据见表 3。样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 在 0.708 2~0.710 7 之间, 具相对较高的初始锶($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$) 值(0.706 0~0.706 7); $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值介于 0.121 6~0.138 8 之间, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.512 5,

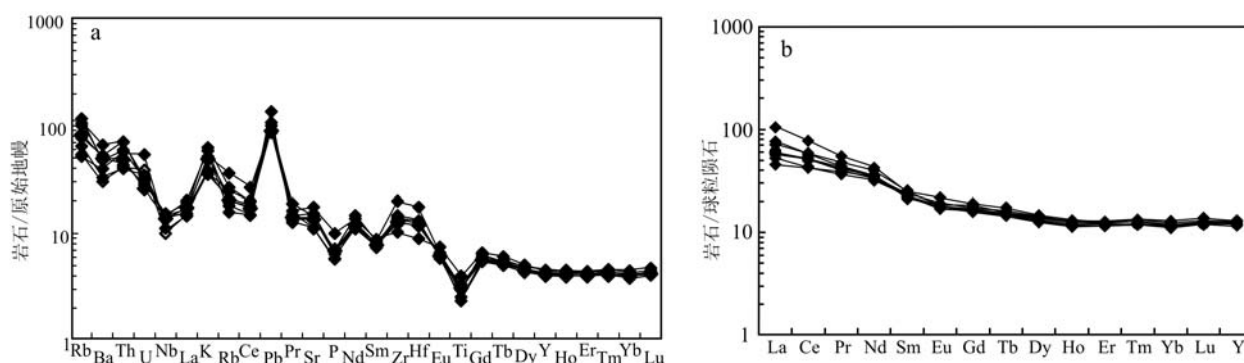


图6 微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Trace element spider diagram (a) and chondrite-normalized REE patterns(b) (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

$\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为 $-0.22 \sim +0.52$, 二阶段法计算获得 Nd 模式年龄 t_{DM2} 为 $1334 \sim 1091$ Ma, 平均为 1197 Ma。

6 岩石成因及形成环境

在 I、S、A 型花岗岩判别图上(图 7), 样品均落入未分异的 I 和 S 型花岗岩区域。样品的 P_2O_5 含量较低($0.12\% \sim 0.22\%$, 仅 1 个样品值为 0.22%), 且与 SiO_2 呈负相关关系(图略), 与 S 型花岗岩明显不同($\text{P}_2\text{O}_5 > 0.20\%$; Chappell, 1999), A/CNK 为 $0.72 \sim 0.76$, 结合岩石含 I 型花岗岩的特征矿物角闪石, 因此其应为 I 型花岗岩。

双峰山花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图显示, 轻稀土元素分馏中等, 富集 LREE、无明显的铕异常; 微量元素原始地幔标准化蛛网图显示, LILE 相对富集, HFSE (Nb、Ta、P 和 Ti) 亏损, 总体显示与活动陆缘有关的 I 型花岗岩的地球化学特征(Pearce *et al.*, 1984)。花岗闪长岩的 Nb/La 值为 $0.41 \sim 1.01$, 平均 0.65 , 接近典型岛弧岩浆岩的 Nb/La 值(约 0.3), 低于 OIB 的 Nb/La 值(1.30); Hf/Th 值为 $0.80 \sim 1.15$, 平均 0.88 , 与岛弧玄武岩($\text{Hf/Th} < 8$)相类似(Condie, 1989)。在 Pearce 等(1984)花岗岩构造环境判别图上(图 8), 全部样品均落入火山弧花岗岩区域, 指示花岗闪长岩可能为板块俯冲阶段火山弧岩浆作用的产物。

样品具高 SiO_2 、低 MgO 、低 Yb 和 Y 以及 Th ($3.37 \times 10^{-6} \sim 6.02 \times 10^{-6}$)、Ba ($209 \times 10^{-6} \sim 458 \times 10^{-6}$)、Rb ($32.7 \times 10^{-6} \sim 73.4 \times 10^{-6}$) 含量接近大陆地壳平均含量(5.6×10^{-6} 、 390×10^{-6} 、 58×10^{-6} , Sun and

McDonough, 1989) 特征。Zr/Nb 值为 $11.88 \sim 23.31$, 平均值 16.73 , 接近大陆地壳 (16.2) (Saunders *et al.*, 1988; Weaver, 1991), La/Nb 值为 $0.99 \sim 1.88$, 平均 1.67 , 低于大陆地壳和上地壳 (分别为 2.2 和 2.8 , Saunder *et al.*, 1988; Weaver, 1991), 大于岛弧玄武岩与洋岛玄武岩的界线 (> 1.4 为火山弧型, < 1.4 为洋岛型, Condie, 1989), 以及低的 Nb/U 值 ($7 \sim 18$) 和高的 Rb/Sr 值 ($0.1 \sim 0.31$) 等地球化学特征排除了源区为地幔楔或俯冲洋壳的可能性, 暗示其可能源于新生地壳。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上相对亏损 Nb、Ta、P、Ti, 略富集 Zr、Hf, 也反映了该花岗岩具有典型的大陆地壳的特点 (Davies and Macdonald, 1987), 指示该区花岗岩可能是下地壳部分熔融的产物, 在底侵玄武岩浆加热过程中可能有一定量的地幔物质混合作用。

花岗闪长岩具有较高且变化范围较大的 $\text{Mg}^\#$ 值 ($41.89 \sim 51.23$), 指示有幔源组分的加入 (Rapp and Waston, 1995)。在 $\varepsilon\text{Nd}(t)-t$ 图解中(图 9a), 花岗闪长岩的投点均位于古-中元古代地壳的上方, 在 Sr-Nd 同位素演化图解上(图 9b), 样品落入上地幔、上地壳和下地壳组成的三角区域内, 表明岩浆作用过程中有一定量的幔源组分的参与, 通过二阶段法计算获得的 Nd 平均模式年龄为 1197 Ma, 指示其源岩可能为形成于中元古代晚期的下地壳。岩石 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 为 $-0.22 \sim +0.52$, 亦表明岩浆作用过程中有一定量的幔源组分的参与。强烈的 Nb、Ta 负异常及 Ta/Yb 值 ($0.30 \sim 0.38$) 小于 0.5 , 指示岩浆源区组分或新生地壳有关。双峰山花岗闪长岩较低的 Yb、Y 及 Y/Nb 值, 暗示源区有少量的石榴子石残留, 部分

表 2 双峰山花岗闪长岩主量 ($w_B/\%$)、微量和稀土元素 ($w_B/10^{-6}$) 地球化学分析结果Table 2 Analytical result of major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) data of granodiorites from Shuangfengshan

样品编号	SF-1	SF-2	SF-3	SF-4	SF-5	SF-6	SF-7	SF-8
SiO ₂	63.79	61.72	60.37	65.53	55.42	60.71	61.85	60.93
TiO ₂	0.55	0.66	0.72	0.51	0.87	0.64	0.66	0.66
Al ₂ O ₃	15.34	15.87	16.34	14.84	17.53	16.37	15.89	16.31
Fe ₂ O ₃ ^T	4.39	5.12	5.27	4.15	6.43	4.81	4.91	4.92
MnO	0.09	0.08	0.09	0.07	0.12	0.08	0.08	0.09
MgO	1.81	2.34	2.33	1.51	3.13	2.55	2.36	2.47
CaO	4.47	5.06	5.40	3.91	6.96	5.36	5.04	5.55
Na ₂ O	6.58	6.46	6.35	6.43	6.34	6.49	6.33	6.37
K ₂ O	1.74	1.46	1.76	1.87	1.15	1.11	1.54	1.05
P ₂ O ₅	0.12	0.15	0.16	0.13	0.22	0.14	0.15	0.15
LOI	0.84	0.79	1.17	0.73	1.45	1.72	1.23	1.41
Total	99.73	99.72	99.96	99.67	99.61	100.00	100.03	99.91
Mg [#]	44.96	47.52	46.69	41.89	49.09	51.23	48.78	49.86
K ₂ O/Na ₂ O	0.27	0.23	0.28	0.29	0.18	0.17	0.24	0.16
K/Na	0.30	0.25	0.31	0.32	0.20	0.19	0.27	0.18
A/CNK	0.85	0.87	0.86	0.86	0.87	0.91	0.88	0.90
Ga	17.60	18.10	18.70	17.40	19.70	17.80	18.20	18.60
Rb	73.40	52.00	63.50	67.40	41.00	33.90	48.50	32.70
Sr	238.00	285.00	283.00	232.00	370.00	291.00	308.00	320.00
Y	20.50	18.50	20.20	18.40	20.20	18.30	19.40	19.10
Zr	156.00	143.00	151.00	135.00	114.00	165.00	222.00	157.00
Nb	10.20	9.72	10.90	10.40	9.60	7.08	10.10	7.91
Cs	1.95	1.41	1.26	1.31	0.88	0.74	1.17	0.96
Ba	331.00	346.00	347.00	458.00	227.00	209.00	367.00	275.00
La	12.40	14.00	10.80	18.10	16.70	13.30	24.80	14.20
Ce	26.40	30.30	25.90	34.60	35.70	30.80	46.90	32.00
Pr	3.45	3.87	3.62	4.12	4.47	3.71	5.20	3.96
Nd	14.80	16.20	16.00	16.10	18.60	15.40	19.70	16.10
Sm	3.40	3.47	3.60	3.24	3.88	3.29	3.73	3.41
Eu	0.98	1.03	1.10	1.03	1.26	0.99	1.07	1.05
Gd	3.37	3.39	3.54	3.24	3.92	3.28	3.75	3.48
Tb	0.59	0.56	0.60	0.54	0.65	0.55	0.59	0.57
Dy	3.54	3.28	3.58	3.17	3.72	3.23	3.43	3.37
Ho	0.72	0.66	0.71	0.64	0.74	0.66	0.70	0.68
Er	2.11	1.93	2.09	1.90	2.09	1.90	2.04	2.00
Tm	0.34	0.30	0.34	0.31	0.32	0.30	0.32	0.31
Yb	2.19	1.94	2.09	1.94	1.99	1.87	2.03	1.99
Lu	0.35	0.31	0.33	0.31	0.30	0.30	0.32	0.31
Hf	4.00	3.69	3.67	3.61	2.76	4.05	5.41	3.96
Ta	0.83	0.71	0.79	0.68	0.63	0.59	0.63	0.60
Pb	9.56	6.30	7.12	7.64	6.40	6.11	6.53	6.19
Th	5.00	4.06	3.67	6.02	3.37	3.51	5.93	4.79
U	0.66	0.54	0.59	0.62	0.72	0.81	0.68	1.13
ΣREE	74.64	81.24	74.30	89.24	94.34	79.58	114.58	83.43
δEu	1.02	1.04	1.05	1.06	1.07	1.03	1.01	1.03
(La/Yb) _N	4.06	5.18	3.71	6.69	6.02	5.10	8.76	5.12
(La/Sm) _N	2.35	2.60	1.94	3.61	2.78	2.61	4.29	2.69
(Gd/Yb) _N	1.27	1.45	1.40	1.38	1.63	1.45	1.53	1.45
10 000 Ga/Al	2.17	2.15	2.16	2.21	2.12	2.05	2.16	2.15

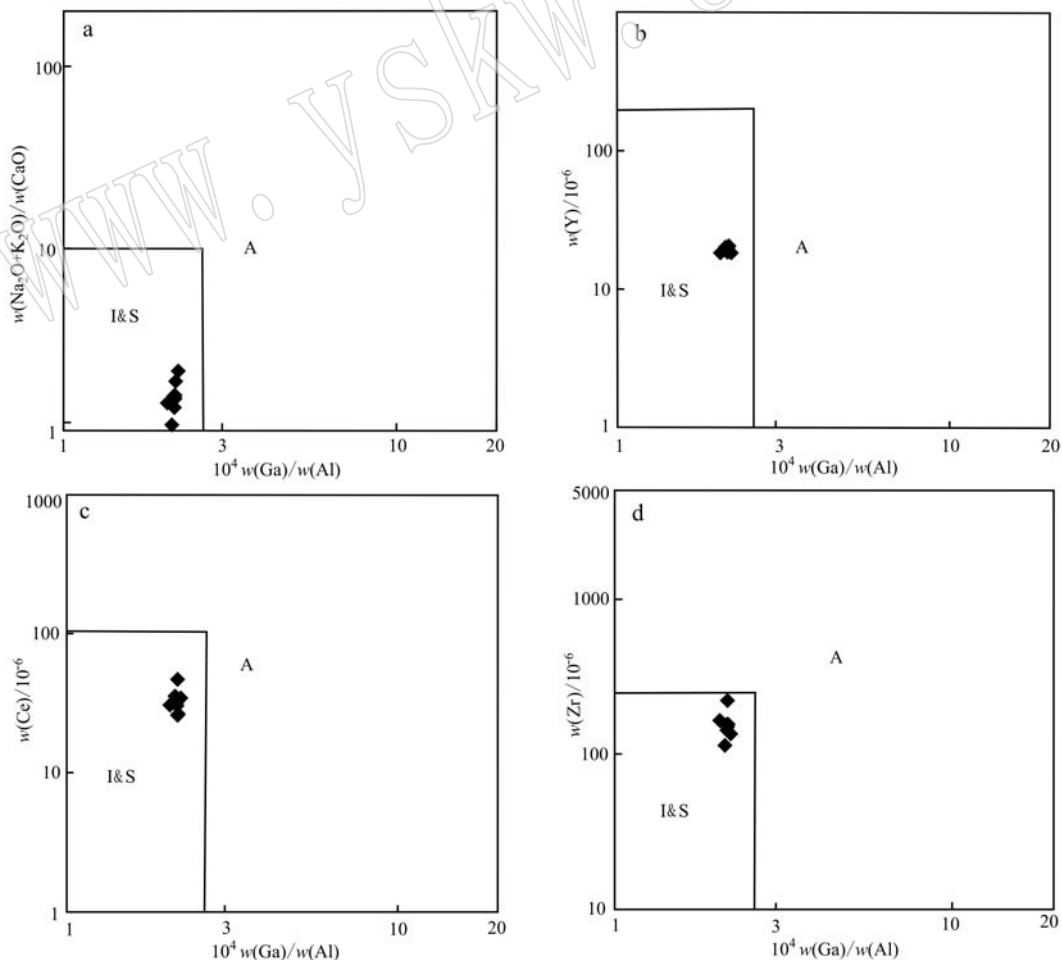
表 3 双峰山花岗闪长岩 Sr-Nd 同位素分析结果

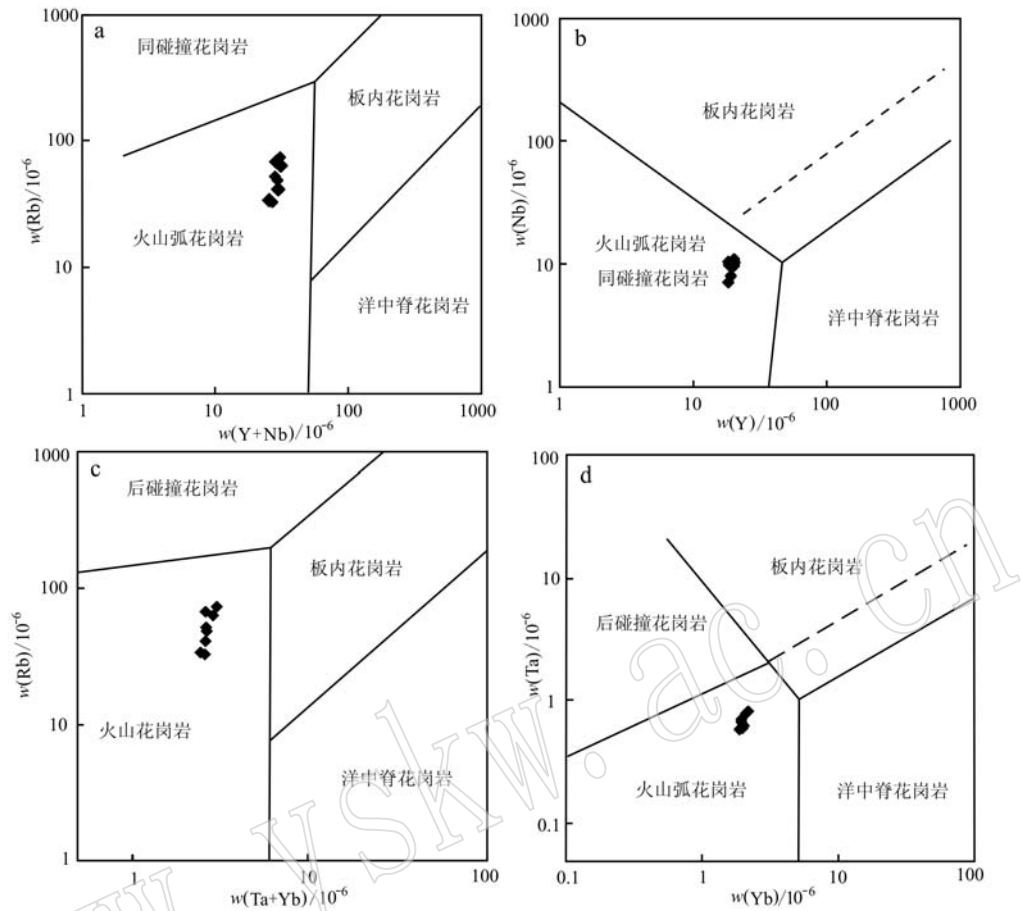
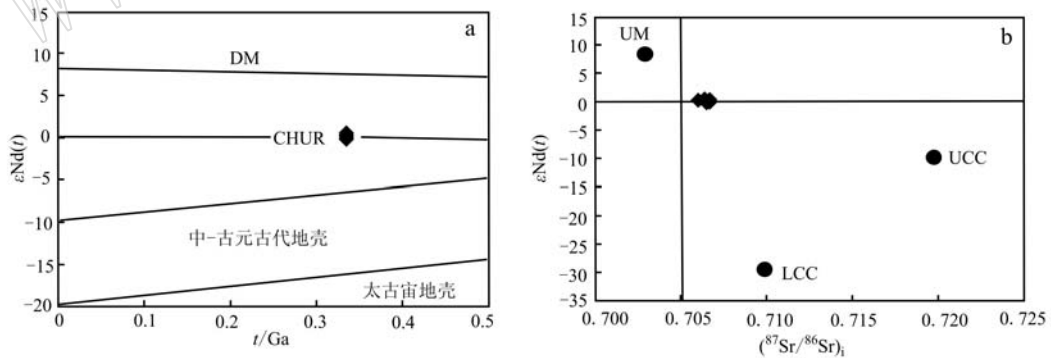
Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of granodiorites from Shuangfengshan

样号	SF-1	SF-2	SF-3	SF-4	SF-5
年龄/Ma	334.8	334.8	334.8	334.8	334.8
Rb	73.40	52.00	63.50	67.40	41.00
Sr	238.00	285.00	283.00	232.00	370.00
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.891 6	0.527 5	0.648 7	0.839 9	0.320 4
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.710 7	0.708 5	0.709 8	0.710 4	0.708 2
$\pm 2\sigma$	0.000 007	0.000 008	0.000 007	0.000 011	0.000 008
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.706 5	0.706 0	0.706 7	0.706 4	0.706 7
Sm	3.40	3.47	3.60	3.24	3.88
Nd	14.80	16.20	16.00	16.10	18.60
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.138 8	0.129 4	0.135 9	0.121 6	0.126 0
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 5	0.512 5	0.512 5	0.512 5	0.512 5
$\pm 2\sigma$	0.000 004	0.000 006	0.000 008	0.000 006	0.000 004
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.512 2	0.512 2	0.512 2	0.512 2	0.512 2
$\varepsilon\text{Nd}(t)$	-0.22	0.19	-0.09	0.52	0.33
t_{DM2}/Ma	1 334	1 175	1 254	1 091	1 131

熔融深度较深。岩石无明显 Eu 异常, 指示斜长石没有经历结晶分离或源区没有残留。岩石具高稀土总量和轻稀土富集的特征, 说明花岗岩浆分异程度较低; 微量元素原始地幔标准化蛛网图上富集 Zr、Hf 及亏损 P, 亦为新生地壳部分熔融的特点。结合区域地质背景研究认为, 双峰山花岗闪长岩可能是中元古代晚期受俯冲流体交代的亏损地幔部分熔融形成的新生地壳发生部分熔融的产物, 在源区新生地壳部分熔融过程中有一定量的幔源物质加入。

综上所述, 研究区在早石炭世晚期处于洋壳俯冲阶段, 由于俯冲板片的脱水作用使其上覆的地幔楔发生部分熔融形成玄武质岩浆, 玄武质岩浆上涌底侵并加热下地壳中的中元古代晚期的玄武质岩石, 使其发生部分熔融形成花岗质岩浆, 并与幔源玄武质岩浆发生混合, 然后侵位到一定深度形成早石炭世双峰山花岗闪长岩。

图 7 双峰山花岗闪长岩 I、S、A 型花岗岩判别图 (据 Whalen *et al.*, 1987)Fig. 7 I-S-A discrimination diagrams of granodiorites from Shuangfengshan (after Whalen *et al.*, 1987)

图 8 双峰山花岗闪长岩构造环境判别图解 (据 Pearce *et al.*, 1984)Fig. 8 Discrimination diagrams for tectonic settings of granodiorites from Shuangfengshan (after Pearce *et al.*, 1984)图 9 双峰山花岗闪长岩 $\epsilon Nd(t)-t$ 图解和 Sr-Nd 同位素演化图解 (据 Jahn *et al.*, 2000)Fig. 9 $\epsilon Nd(t)-t$ and Sr-Nd diagrams of granodiorites from Shuangfengshan (after Jahn *et al.*, 2000)

DM—亏损地幔; CHUR—球粒陨石均一源区; UM—上地幔; LCC—下地壳; UCC—上地壳

DM—depleted mantle; CHUR—chondritic uniform reservoir; UM—upper mantle; LCC—lower crust; UCC—upper crust

7 构造意义

北山地区石炭纪构造属性存在有多种不同的观点:一种观点认为北山地区古洋盆在志留期末至早泥盆世闭合,石炭纪-二叠纪进入陆内裂谷演化阶段

(左国朝等, 1990, 2003; 杨合群等, 2008);另一种观点认为古洋盆于石炭纪末期闭合,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(龚全胜等, 2003; 何世平等, 2005);还有一种观点则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,塔里木板块、哈萨克斯坦板块和

西伯利亚板块最终拼接(刘雪亚等, 1995);此外,还有学者认为古北山地区古洋盆的消亡时间为二叠纪,石炭纪-二叠纪为洋陆演化阶段(黄增宝等, 2006; Xiao *et al.*, 2010)。形成于活动大陆边缘弧早石炭世双峰山花岗闪长岩(334.8 ± 2.1 Ma)指示在早石炭世,北山地区南部具有洋盆俯冲作用的动力学过程。但从区域地质研究来看,位于双峰山之北的红柳河-牛圈子蛇绿岩带所代表的古洋盆已于早泥盆世之前闭合(张元元等, 2008),因此其不可能是红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩所代表的洋盆向南俯冲的产物。然而,双峰山南侧的辉铜山和帐房山蛇绿岩获得的年龄为 446.1 ± 3.0 Ma、 362.1 ± 4.0 Ma,且具 SSZ 性质,为弧后盆地的残留体(余吉远等, 2012)。因此,初步研究认为,早石炭世双峰山花岗闪长岩可能与辉铜山-帐房山蛇绿岩所代表的洋盆向北俯冲有关,即其形成环境为辉铜山-帐房山蛇绿岩所代表的弧后盆地北向俯冲消减过程中形成的活动大陆边缘弧。

区域上的下、中泥盆统与下石炭统均呈角度不整合接触,代表区域性的一次重大事件,推测北山南带在早石炭世末期古洋盆发生了闭合造山事件。晚石炭世北山及邻区,主要洋盆都已闭合,塔里木板块、哈萨克斯坦板块以及西伯利亚板块拼合在一起(Coleman, 1989; Dobrestsov *et al.*, 1995; Xiao *et al.*, 2004; 赵泽辉等, 2006),北山地区进入后碰撞构造演化阶段。

8 结论

(1) 双峰山花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 334.8 ± 2.1 Ma,为准铝质、钙碱性 I 型花岗岩,是中元古代晚期形成的新生地壳在玄武岩浆底侵作用下发生部分熔融的产物,且在源区岩浆作用过程中有一定量的幔源物质的参与,形成于活动大陆边缘。

(2) 形成于活动大陆边缘弧环境的早石炭世双峰山花岗闪长岩,为辉铜山-帐房山蛇绿岩所代表的弧后盆地北向俯冲提供了岩石学和年代学证据。

References

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59~79.

- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I-and S-type granites and the characterization of fractionated Hapio granites [J]. *Lithos*, 46: 535~551.
- Coleman R G. 1989. Continental growth of Northwest China [J]. *Tectonics*, 8(3): 621~635.
- Condie K C. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance [J]. *Lithos*, 23(1): 1~18.
- Davies G R and Macdonald R. 1987. Crustal influences in the petrogenesis of the Naivasha basalt-comendite complex: Combined trace element and Sr-Nd-Pb isotope constraints [J]. *J. Petrol.*, 28(6): 1 009~1 031.
- Dobrestsov N L, Berzin N A and Buslov M M. 1995. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian [J]. *International Geology Review*, 37: 335~360.
- Feng Jicheng, Zhang Wen, Wu Tairan, *et al.* 2012. 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*, 48(1): 61~70 (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).
- Guo Qianqian, Xiao Wenjiao, Hou Quanlin, *et al.* 2013. Tectonic settings of Paleozoic turbidites in the Beishan orogen and its implications for regional accretionary tectonics [J]. *Chinese Journal of Geology*, 48(1): 50~70 (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]. *Northwestern 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).
- Huang Zengbao and Jin Xia. 2006. Geochemistry features and tectonic setting of the Hongshishan ophiolite in Gansu Province [J]. *Chinese Journal of Geology*, 41(4): 601~611 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Wu F and Hong D. 2000. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from East-Central Asia [J]. *Journal of Earth System Science*, 109(1): 5~20.

- Jiang Sihong and Nie Fengjun. 2006. Nd-Isotope constraints on origin of granitoids in Beishan Mountain Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 826~842 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, He Guoqi, Xu Xin, *et al.* 2006. Crustal tectonic framework of Northern Xinjiang and adjacent regions and its formation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148~168 (in Chinese with English abstract).
- Li Shan, Wang Tao, Tong Ying, *et al.* 2009. Identification of the Early Devonian Shuangfengshan A-type granites in Liuyuan Area of Beishan and its implications to tectonic evolution[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 407~422 (in Chinese with English abstract).
- Li Shan, Wang Tao, Tong Ying, *et al.* 2011. Zircon U-Pb age, origin and its tectonic significances of Huitongshan Devonian K-feldspar granites from Beishan Orogen, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 3 055~3 070 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuping, Wang Tao, Li Jinbao, *et al.* 2001. Petrology, geochemistry of Hercynian granites of Hongliuhe Area and its tectonic setting in Eastern Tianshan Mountains, West China[J]. *Geological Review*, 47(4): 368~376 (in Chinese with English abstract).
- Liang Xirong, Wei Gangjian, Li Xianhua, *et al.* 2003. Precise measurement of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd ratios using multiple-collectors inductively coupled plasma-mass spectrometer (MC-ICPMS) [J]. *Geochimica*, 32(1): 91~96 (in Chinese with English abstract).
- Liu Mingqiang, Wang Jianjun, Dai Wenjun, *et al.* 2005. Genesis and geological significance of positive $\varepsilon\text{Nd}(t)$ granitoids in the Hongshishan area in the Beishan orogenic belt, Gansu, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(9): 831~836 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xueya and Wang Quan. 1995. Tectonics of orogenic belts in Beishan Mts, Western China and their evolution[J]. *Geoscience Research*, 28: 37~48 (in Chinese with English abstract).
- Mao Qigui, Xiao Wenjiao, Han Chunming, *et al.* 2010. Discovery of middle Silurian adakite granite and its tectonic significance in Liuyuan Area, Beishan Mountains, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 584~596 (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): 16~19 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Bai Daming, *et al.* 2002. Metallogenic Studies and Ore Prospecting in the Conjunction Area of Inner Mongolia Autonomous Region, Gansu Province and Xinjiang Uygur Region (Beishan Mt.), Northwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~408 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Lippard S J, Lippard S J, *et al.* 1984. Characteristics and tectonic significance of super-subduction zone ophiolite[A]. Kokelaar B P and Howells M F. *Marginal Basin Geology*[C]. Geological Society, London, Special Publications, 16(1): 77~94.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63~81.
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36: 891~931.
- Saunders A D, Norry M J and Tarney J. 1988. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: Trace element constraints [J]. *Jour. Petrol.*, Special Volume(1): 415~445.
- Shand S J. 1944. Eruptive rocks. (Scientific Books: Eruptive rocks, their genesis, composition, and classification, with a chapter on meteorites) [J]. *Science*, 99: 101~102.
- Song D, Xiao W, Windley B F, *et al.* 2015. A Paleozoic Japan-type subduction-accretion system in the Beishan orogenic collage, Southern central Asian orogenic belt[J]. *Lithos*, 224~225: 195~213.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of Oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Wan B, Xiao W, Windley B F, *et al.* 2013. Permian hornblende gabbros in the Chinese Altai from a subduction-related hydrous parent magma, not from the Tarim mantle plume[J]. *Lithosphere*, 5(3): 290~299.
- Wang Lei, Yang Jianguo, Wang Xiaohong, *et al.* 2017. SHRIMP zircon U-Pb age of the Dashantou granodiorite from Beishan mountains in Gansu Province and its significance[J]. *Northwestern Geology*, 50(4): 41~50 (in Chinese with English abstract).
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 104(2~4): 381~397.
- Wei Gangjian, Liang Xirong, Li Xianhua, *et al.* 2002. Precise measurement of Sr isotopic composition of liquid and solid base using (LP) MC-ICPMS[J]. *Geochimica*, 31(3): 295~299 (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.
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Study on zircon in mineralogy and the constraints on the interpretation of U-Pb ages[J]. *Chinese*

- Sci. Bull., 49(16): 1 589~1 604 (in Chinese).
- Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, *et al.* 2010. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage [J]. American Journal of Science, 310(10): 1 553~1 594.
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, *et al.* 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia [J]. American Journal of Science, 304: 370~395.
- Xie Wei, Song Xieyan, Deng Yufeng, *et al.* 2013. Geology and olivine geochemistry of the Heishan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Gansu, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 29(10): 3 487~3 502 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Li Ying, Li Wenming, *et al.* 2008. General discussion on metallogenetic tectonic setting of Beishan Mountain, Northwestern China [J]. Northwestern Geology, 41(1): 22~28 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Li Ying, Li Wenming, *et al.* 2009. Spatial variation regularity and ore potential of S-type and I-type granites in the Beishan Mountain [J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(5): 627~633 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianguo, Xie Chunlin, Wang Xiaohong, *et al.* 2012. Basic tectonic framework and features of metallogenic series in Beishan Area, Gansu Province [J]. Geological Bulletin of China, 31(2~3): 422~438 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jiyuan, Li Xiangmin, Wang Guoqiang, *et al.* 2012. Zircon U-Pb ages of Huitongshan and Zhangfangshan ophiolite in Beishan of Gansu-Inner Mongolia border area and their significance [J]. Geological Bulletin of China, 31(12): 2 038~2 045 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wen, Feng Jicheng, Zheng Rongguo, *et al.* 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the granites from the South of Yin'aoxia and their tectonic significances [J]. Acta Petrologica Sinica, 27(6): 1 649~1 661 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuanyuan and Guo Zhaojie. 2008. Accurate constraint on formation and emplacement age of Hongliuhe ophiolite, boundary region between Xinjiang and Gansu Provinces and its tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 24(4): 803~809 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zehui, Guo Zhaojie, Han Baofu, *et al.* 2006. Comparative study on Permian basalts from eastern Xinjiang-Beishan area of Gansu Province and its tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1 279~1 293 (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, Liu Yike and Liu Chunyan. 2003. Framework and evolution of the tectonic structure in Beishan Area across Gansu Province, Xinjiang Autonomous Region and Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Acta Geologica Gansu, 12(1): 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Zhang Shuling, He Guoqi, *et al.* 1990. Early Paleozoic plate tectonics in Beishan area [J]. Scientia Geologica Sinica, (4): 305~314, 411 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 冯继承, 张文, 吴泰然, 等. 2012. 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), 48(1): 61~70.
- 龚全胜, 刘明强, 梁明宏, 等. 2003. 北山造山带大地构造相及构造演化 [J]. 西北地质, 36(1): 11~17.
- 郭谦谦, 肖文交, 侯泉林, 等. 2013. 北山造山带古生代浊积岩构造环境探讨及其大地构造意义 [J]. 地质科学, 48(1): 50~70.
- 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.
- 黄增宝, 金霞. 2006. 甘肃红石山蛇绿岩地球化学特征及构造环境 [J]. 地质科学, 41(4): 601~611.
- 江思宏, 聂凤军. 2006. 北山地区花岗岩类成因的 Nd 同位素制约 [J]. 地质学报, 80(6): 826~842.
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨 [J]. 地质学报, 80(1): 148~168.
- 李舳, 王涛, 童英, 等. 2009. 北山柳园地区双峰山早泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造演化意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 407~422.
- 李舳, 王涛, 童英, 等. 2011. 北山辉铜山泥盆纪钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、成因及构造意义 [J]. 岩石学报, 27(10): 3 055~3 070.
- 李伍平, 王涛, 李金宝, 等. 2001. 东天山红柳河地区海西期花岗岩的岩石学、地球化学及其构造环境 [J]. 地质论评, 47(4): 368~376.
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 等. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测

- 定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值[J]. 地球化学, 32(1): 91~96.
- 刘明强, 王建军, 代文军, 等. 2005. 甘肃北山造山带红石山地区正 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值花岗岩的成因及地质意义[J]. 地质通报, 24(9): 831~836.
- 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]. 地质研究, 28: 37~48.
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 等. 2010. 北山柳园地区中志留统埃达克质花岗岩类及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(2): 584~596.
- 梅华林, 李惠民, 陆松年, 等. 1999. 甘肃柳园地区花岗岩类时代及成因[J]. 岩石矿物学杂志, 18(1): 16~19.
- 聂凤军, 姜思宏, 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.
- 王 磊, 杨建国, 王小红, 等. 2017. 甘肃北山大山头南花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 西北地质, 50(4): 41~50.
- 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 等. 2002. (LP)MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成[J]. 地球化学, 31(3): 295~299.
- 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(16): 1 589~1 604.
- 颀 炜, 宋谢炎, 邓宇峰, 等. 2013. 甘肃黑山铜镍硫化物含矿岩体的地质特征及橄榄石成因探讨[J]. 岩石学报, 29(10): 3 487~3 502.
- 杨合群, 李 英, 李文明, 等. 2008. 北山成矿构造背景概论[J]. 西北地质, 41(1): 22~28.
- 杨合群, 李 英, 李文明, 等. 2009. 北山花岗岩 S 型/I 型空间变化规律及含矿性[J]. 地球学报, 30(5): 627~633.
- 杨建国, 谢春林, 王小红, 等. 2012. 甘肃北山地区基本构造格局和成矿系列特征[J]. 地质通报, 31(2~3): 422~438.
- 余吉远, 李向民, 王国强, 等. 2012. 甘肃北山地区辉铜山和帐房山蛇绿岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地质通报, 31(12): 2 038~2 045.
- 张 文, 冯继承, 郑荣国, 等. 2011. 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, 27(6): 1 649~1 661.
- 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.
- 赵泽辉, 郭召杰, 韩宝福, 等. 2006. 新疆东部-甘肃北山二叠纪玄武岩对比研究及其构造意义[J]. 岩石学报, 22(5): 1 279~1 293.
- 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): 1 847~1 860.
- 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.
- 左国朝, 张淑玲, 何国琦, 等. 1990. 北山地区早古生代板块构造特征[J]. 地质科学, (4): 305~314, 411.