

北山造山带东段芨芨泉岩体地球化学特征、 锆石 U-Pb 年代学及其构造意义

高峰^{1,2}, 管坤坤¹, 李宁¹, 杜彪¹, 赵端昌¹, 易鹏飞¹

(1. 陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710068; 2. 长安大学, 陕西 西安 710054)

摘要:北山造山带东段芨芨泉岩体岩性为辉长岩和辉绿岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得 (274.1 ± 5.3) Ma 的锆石结晶年龄, 表明该岩体形成于早二叠世。岩体地球化学数据显示: 岩石具有较低 SiO_2 、较高的 Al_2O_3 和 CaO 及较高的 $\text{Mg}^\#$, 稀土元素总量较低, 轻重稀土分异不明显, 弱正 Eu 异常, 岩石富集大离子亲石元素(Rb、Ba、K), 亏损高场强元素(Nb、Ta、P、Zr)。岩石地球化学特征表明, 岩浆起源于亏损地幔的部分熔融、上升过程中受到地壳物质的混染, 结合区域地质背景, 认为芨芨泉岩体形成于板内伸展构造背景。

关键词:北山造山带; 芨芨泉岩体; 伸展构造; 地球化学特征; 早二叠世

中图分类号: P597.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2018)03-0026-12

U-Zircon U-Pb Dating and Geochemistry of Jijiquan Pluton in the Eastern Section of Beishan Orogenic Belt and their Tectonic Implications

GAO Feng^{1,2}, JIAN Kunkun¹, LI Ning¹, DU Biao¹, ZHAO Duanchang¹, YI Pengfei¹

(1. Shaanxi Geological Survey Center, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 2. Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The Jijiquan pluton in the eastern section of Beishan Orogenic Belt consists of gabbro and diabase. The zircon LA-ICP-MS dating has obtained an age of (274.1 ± 5.3) Ma, which reveals that this pluton was formed in Early Permian. The geochemical data shows that these rocks have low SiO_2 content, relatively high Al_2O_3 and CaO content as well as $\text{Mg}^\#$ value, low total REE contents, no obvious fraction of LREE and HREE, weak positive Eu anomaly, enrichment of LILE and depletion of HFSE. The geochemical features indicate that the magma was formed by the partial melting of depleted mantle, which was suffered the crust contamination in the magma rising process. After analyzing the regional geological background, it is considered that the Jijiquan pluton was formed at an intraplate extensional tectonic setting.

Keywords: Beishan Orogenic Belt; Jijiquan pluton; extensional structure; geochemical characteristics; Early Permian

北山造山带位于华北板块、塔里木板块和哈萨克斯坦板块汇聚部位(刘雪亚等, 1995; 左国朝等, 2003; 李锦轶等, 2009; 王国强等, 2014), 构造背景复

杂, 岩浆活动频繁。长期以来, 众多学者主要集中对蛇绿岩带的研究, 对北山地区构造格局、构造演化及板块缝合线的位置提出了诸多认识(左国朝等,

收稿日期: 2017-11-07; 修回日期: 2018-03-23

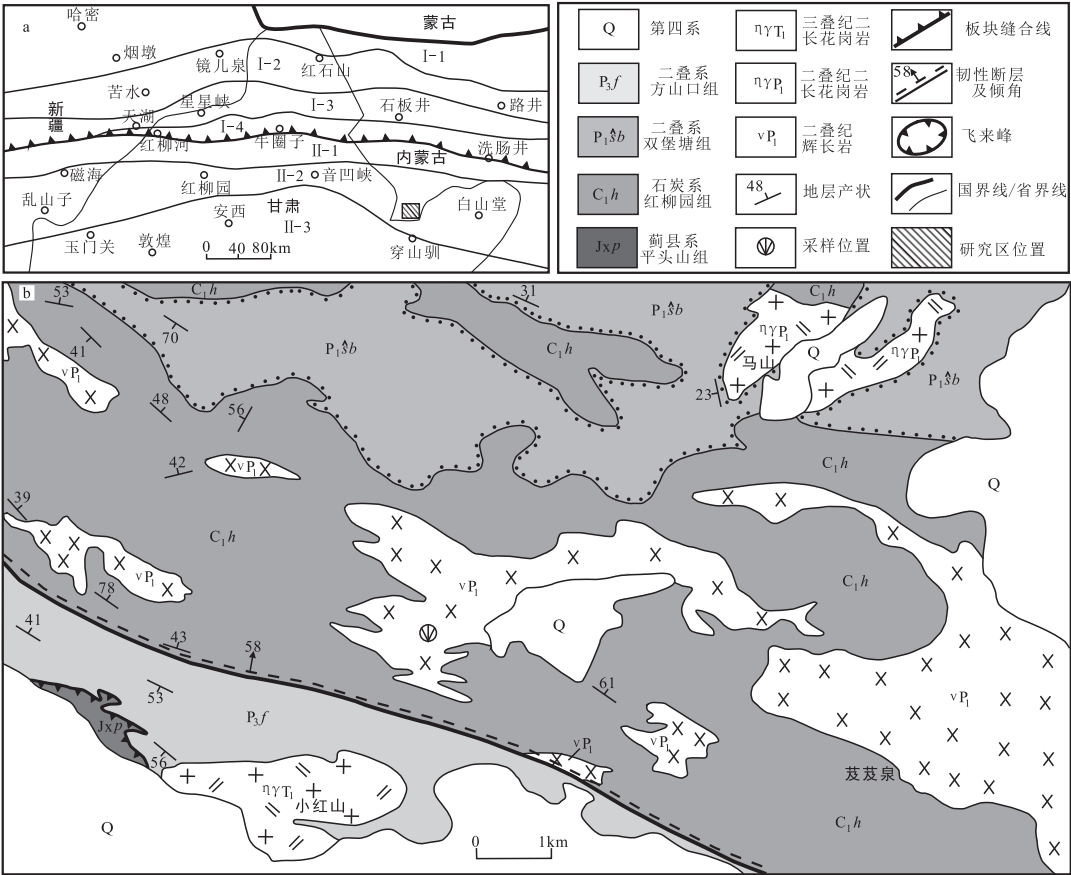
基金项目: 内蒙古自治区地质勘查基金“内蒙古自治区阿拉善盟梧桐沟等五幅 1:5 万区域矿产地质调查”(NMKD2013-31), 中国地质调查局“新疆河尾滩—河西岗地区 1:5 万矿产调查”(DD20160004-5)联合资助

作者简介: 高峰(1985-), 男, 陕西乾县人, 工程师, 长期从事区域矿产地质调查及矿产勘查工作。E-mail: 408535246@qq.com

2003; 聂凤军等, 2002; 龚全胜等, 2003; 何世平等, 2005; 黄增保等, 2006; 杨合群等, 2010, 2012; 杨建国等, 2012)。然而, 对于北山地区除蛇绿岩带之外分布的基性侵入岩的研究报导甚少。近年来, 北山地区发现了一系列与基性岩密切相关的金属矿床。例如, 红石山南锑金矿(彭海练等, 2011)、新金厂金矿(张道忠, 2010)、老金厂金矿、鹿咀子锑矿等, 对基性侵入体的认识在一定程度上制约了区域找矿工作。因此, 对北山地区辉长岩的形成时代、岩石成因的研究具有重要的意义。笔者在 1:5 万区域矿产地质调查的基础上, 通过对北山造山带东段芨芨泉辉长岩体进行锆石 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、岩石成因及构造背景, 以期为北山地区的大地构造演化及岩浆岩研究提供重要的参考依据, 用以指导区域找矿。

1 区域地质背景

研究区位于北山造山带东段, 内蒙古西南侧与甘肃省接壤位置。地质背景较复杂, 构造单元划分存在争议。部分学者认为其属于塔里木板块增生带北缘(左国朝等, 1990; 龚全胜等, 2002; 何世平等, 2002); 另一部分则认为其属于哈萨克斯坦板块的南缘(刘雪亚等, 1995; 聂凤军等, 2002)。笔者沿用杨合群等(2012)的划分方案, 以红柳河-牛圈子-洗肠井缝合带为界线, 其北侧为哈萨克斯坦板块, 南侧为塔里木板块, 并将塔里木板块进一步划分为 3 个三级构造单元, 分别为白玉山-方山口-鹰嘴红山早古生代被动边缘带、磁海-红柳园-白山堂晚古生代陆内裂谷带和敦煌地块(图 1)。芨芨泉岩体位于磁海-红柳园-白山堂晚古生代陆内裂谷带内。



I-1. 大南湖-雀儿山-狐狸山早古生代活动边缘带; I-2. 雅满苏-红石山-黑鹰山晚古生代陆内裂谷带; I-3. 星峡-明水-旱山地块; I-4. 公婆泉-东七一山早古生代活动边缘带; II-1. 白玉山-方山口-鹰嘴红山早古生代被动边缘带; II-2. 磁海-红柳园-白山堂晚古生代陆内裂谷带; II-3. 敦煌地块

图 1 (a) 芨芨泉辉长岩体大地构造位置图及 (b) 地质简图 (据杨合群等, 2012)

Fig. 1 (a) Simplified geological map and (b) tectonic location map of Jijiwan gabbro

研究区出露地层主要为蓟县系平头山组(J_{xp})、下石炭统红柳园组(C_1h)、下二叠统双堡塘组(P_1sh)、中二叠统金塔组(P_2j)和上二叠统方山口组(P_3f)。平头山组为一套浅海相碳酸盐建造,呈飞来峰压覆于方山口组之上;红柳园组为火山-碎屑岩建造;双堡塘组整体为一套粗碎屑岩,与红柳园组为角度不整合或断层接触;金塔组为火山-碎屑岩建造,与双堡塘组为整合接触;方山口组为碎屑岩建造,夹少量中酸性火山岩。区域上沿磁海-红柳园-白山堂晚古生代陆内裂谷带广泛分布华力西期侵入岩,走向北西—南东向,与区域构造线方向一致,岩石类型基性-中性-酸性均有产出,基性侵入岩呈岩株、岩瘤、岩枝和岩瘤沿音凹峡—金庙井—茈茈泉—白山堂一线分布。茈茈泉岩体位于该岩浆岩带中部,为带内规模最大的基性侵入岩体。区内断裂构造发育,主要为早期北西向逆冲推覆构造和晚期北东向压扭性断裂组。

2 茈茈泉岩体地质及岩相学特征

茈茈泉岩体研究区内出露面积 52.43km^2 ,呈岩株、岩枝、岩脉状产出,呈北西—南东向展布,与下石炭统红柳园组为侵入接触关系,界线清晰,平面及剖面均呈不规则弯曲状,产状多直立或向外陡倾,岩体内部见椭圆状、长条状或不规则状围岩捕虏体。捕虏体未见明显的叶理构造,具有被动就位特征。茈茈泉岩体岩性较单一,主要为中细粒辉长岩及少量辉绿岩,岩体中心到边部粒度由粗变细,辉绿岩呈岩脉产出,脉宽 $2\sim 20\text{m}$,延伸大于 100m ,走向北西—南东向。

辉长岩:辉长结构,主要由辉石($30\%\sim 50\%$)和斜长石($40\%\sim 60\%$)组成;副矿物为榍石、磷灰石、锆石及不透明矿物(约 5%)。斜长石呈自形-半自形板状为主,发育聚片双晶,大部分表面绢云母化,粒径 $0.5\sim 4\text{mm}$;辉石,半自形-他形状产出,粒径及自形程度与斜长石相近,局部发生纤闪石化和绿帘石化。

辉绿岩:岩石整体蚀变较强,辉绿结构,主要矿物组成为辉石(约 35%)和斜长石(约 60%);副矿物主要为榍石、锆石及不透明矿物(约 5%)。斜长石为半自形板状,双晶纹较宽,多为拉、倍长石,表面分布次生黏土矿物或细小绢云母矿物,整体表面“较脏”,粒径 $0.3\sim 3\text{mm}$,常搭成三角形的格架,颗粒状辉石及不透明金属矿物充填其中;辉石呈半自形-他形颗粒状产出,多发生纤闪石化和绿帘石化。

3 分析测试方法

对采集的样品进行主量元素及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定。在进行化学分析前,先在镜下观察薄片以确定样品的适应性。主量由中国冶金地质总局西北地质勘查院测试中心测定,采用 XRF 荧光光谱样分析方法,分析精度优于 5% 。

用常规方法分选出锆石单矿物,然后在双目镜下根据锆石颜色、自形程度、形态、透明度等进行初步分类,挑选出具有代表性的锆石。将锆石样品用双面胶粘在载玻片上,放上 PVC 杯,然后将环氧树脂和固化剂进行充分混合后注入 PVC 杯中,待树脂充分固化后将其从载玻片上剥离,打磨和抛光至锆石中心部位暴露,然后拍摄透射光、反射光和阴极发光(CL)图像。最后用体积百分比为 3% 的 HNO_3 清洗样品制成样品靶备用。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定在西安地质矿产研究所实验测试中心完成。测定时根据可见光、CL 和 BSE(背散射电子成像)图像选择合适的测点位置,如避免包裹体、裂隙位置等。详细的分析步骤和数据处理方法见 HORN et al. (2000), YUAN et al. (2004), 用 Glitter(4.0 版)程序处理原始数据。年龄加权平均计算及 U-Pb 谐和图的绘制采用 Isoplot (3.0 版) (LUDWIG, 2003) 完成。

4 锆石 U-Pb 年代学

辉长岩(样品编号为 TW02)采样点坐标为 N: $40^\circ 35' 01''$, E: $98^\circ 31' 47''$ 。用于测试分析的锆石颗粒颜色主要为淡黄色,透明状、金刚光泽,粒径 $40\sim 160\mu\text{m}$,长宽比为 $2:1\sim 4:1$ 。根据锆石阴极发光图像,可以将锆石划分为 2 类:一类是不具有继承核的岩浆锆石,另一类是继承锆石或含古老核的锆石(图 2)。第一类锆石棱角分明,具有明显的岩浆震荡环带,该类锆石具有较高的 Th、U 含量,除 3 个测点 Th/U 值为 $0.3\sim 0.36$,其余的均介于 $0.41\sim 0.82$, Th/U 平均值为 0.55 ,这类锆石的年龄能够代表该期岩浆的结晶年龄(VAVRA et al., 1999; HOSKIN et al., 2003; 吴元保等, 2004)。第二类锆石核部具有不规则的继承锆石,如测点 4、测点 9 和测点 19,代表了岩浆源区或者围岩的年龄,能够为



图 2 辉长岩锆石 CL 图像及 U-Pb 年龄分析点图

Fig. 2 CL images of zircons from gabbro, and the points for U-Pb analysis

北山地区古老构造岩浆事件提供重要信息。

通过对 24 颗锆石进行同位素分析,获得了 24 个年龄数据,分析结果见表 1。结合阴极发光图像,将 24 个年龄值归为 2 类,即岩浆锆石年龄和继承锆石年龄。根据锆石 U-Pb 年龄的特点,大于 1 000 Ma 时采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值,小于 1 000 Ma 时采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值,继承锆石包括 3 个测点,其年龄值为 (454±10) Ma、(2420±35) Ma 和 (2521±36) Ma。

岩浆锆石共 21 个测点,其中 7 个测点谐和度很低,明显偏离谐和曲线,考虑给予剔除,其余 14 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值集中在 261~291 Ma,测点均投影在谐和曲线下方及其附近区域(图 3a),表明锆石虽有极少量的铅丢失,但基本处于封闭体系之中,能够代表辉长岩的形成时代, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (274.1±5.3) Ma(图 3b),解释为辉长岩的结晶年龄,说明芨芨泉岩体形成于早二叠世。

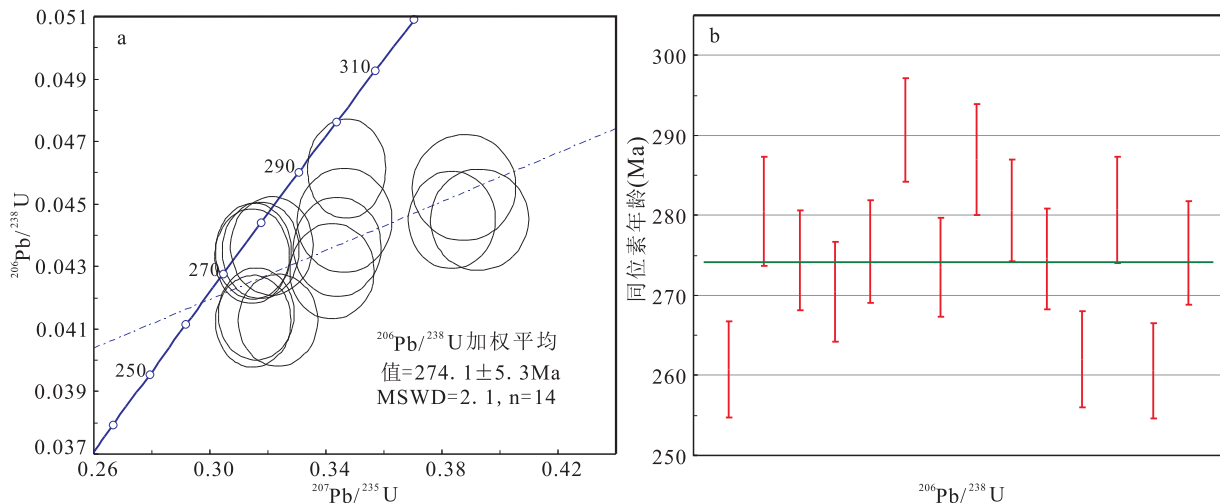


图 3 (a)辉长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图和(b)加权平均年龄图

Fig. 3 (a)Zircon U-Pb concordia diagram and (b)weighted average age for gabbro

5 岩石地球化学特征

5.1 主量元素特征

芨芨泉岩体地球化学分析结果见表 2。岩石 SiO_2 含量为 44.36%~46.76%,平均为 46.17%,

MgO 含量为 6.47%~6.98%,平均为 6.75%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量为 3.3%~4.9%,平均为 3.95%,所有样品 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, Al_2O_3 和 CaO 含量较高,分别为 16.36%~18.33%和 7.9%~10.23%,平均分别为 17.6% 和 9.34%, TiO_2 含量为 0.86%~1.18%,平均为 1.0%,与大陆溢流相拉斑玄武岩

表 1 辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果表
Tab. 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the Jijiquan gabbro

测点编号	元素含量(10^{-6})			同位素比值				同位素年龄(Ma)				谐和度 (%)				
	^{232}Th	^{238}U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
TW02-1	20.55	56.47	0.36	0.079 27	0.003 81	0.486 09	0.021 38	0.044 47	0.001 41	1 179	92	402	15	281	9	70
TW02-2	304.78	542.05	0.56	0.056 85	0.001 57	0.323 51	0.009 03	0.041 28	0.000 97	485	61	285	7	261	6	92
TW02-3	133.35	218.07	0.61	0.056 48	0.001 79	0.346 34	0.010 82	0.044 48	0.001 1	470	69	302	8	281	7	93
TW02-4	91.83	304.97	0.30	0.059 47	0.001 62	0.597 57	0.016 49	0.072 88	0.001 72	584	58	476	10	454	10	95
TW02-5	200.38	457.05	0.44	0.052 54	0.001 41	0.315 03	0.008 61	0.043 49	0.001 01	309	60	278	7	274	6	99
TW02-6	153.19	374.25	0.41	0.057 91	0.001 61	0.342 13	0.009 58	0.042 85	0.001 01	526	60	299	7	271	6	91
TW02-7	1 261.76	1540.82	0.82	0.149 88	0.003 45	0.520 37	0.012 43	0.025 18	0.000 58	2 345	39	425	8	160	4	38
TW02-8	491.13	600.46	0.82	0.057 65	0.001 53	0.301 1	0.008 14	0.037 88	0.000 88	516	58	267	6	240	5	90
TW02-9	384.3	630	0.61	0.156 67	0.003 27	10.046 55	0.228 68	0.465 1	0.010 24	2 420	35	2 439	21	2 462	45	101
TW02-10	187.11	324.79	0.58	0.053 39	0.001 55	0.321 36	0.009 37	0.043 66	0.001 04	345	64	283	7	276	6	97
TW02-11	409.13	661.99	0.62	0.054 58	0.001 34	0.347 12	0.008 89	0.046 13	0.001 05	395	54	303	7	291	6	96
TW02-12	432.81	547.37	0.79	0.052 65	0.001 39	0.314 52	0.008 48	0.043 33	0.001	314	59	278	7	274	6	98
TW02-13	370.24	727.18	0.51	0.056 54	0.001 47	0.302 22	0.008 04	0.038 77	0.000 9	473	57	268	6	245	6	91
TW02-14	139.98	215.58	0.65	0.061 75	0.001 9	0.387 63	0.011 78	0.045 53	0.001 12	665	65	333	9	287	7	86
TW02-15	275.11	547.52	0.50	0.062 52	0.001 56	0.383 47	0.009 91	0.044 49	0.001 03	692	52	330	7	281	6	85
TW02-16	274.24	592.99	0.46	0.228 25	0.005 05	1.774 95	0.041 43	0.056 4	0.001 28	3 040	35	1 036	15	354	8	34
TW02-17	647.95	877.05	0.74	0.088 69	0.002 12	0.534 19	0.013 25	0.043 69	0.001	1 398	45	435	9	276	6	63
TW02-18	183.33	448.19	0.41	0.052 91	0.001 43	0.317 47	0.008 74	0.043 52	0.001 02	325	60	280	7	275	6	98
TW02-19	82.77	137.6	0.60	0.166 33	0.003 57	11.156 01	0.260 93	0.486 5	0.011 03	2 521	36	2 536	22	2 556	48	101
TW02-20	208.8	510.29	0.41	0.055 25	0.001 48	0.315 96	0.008 66	0.041 48	0.000 97	422	58	279	7	262	6	94
TW02-21	212.34	352.37	0.60	0.064 05	0.001 81	0.392 94	0.011 17	0.044 5	0.001 07	743	59	337	8	281	7	83
TW02-22	121.11	226.9	0.53	0.067 02	0.002 03	0.358 97	0.010 75	0.038 85	0.000 96	839	62	311	8	246	6	79
TW02-23	363.4	711.76	0.51	0.055 38	0.001 47	0.314 94	0.008 57	0.041 25	0.000 97	427	58	278	7	261	6	94
TW02-24	99.35	288.1	0.34	0.057 17	0.001 66	0.343 89	0.01	0.043 63	0.001 05	498	63	300	8	275	7	92

表 2 辉长岩地球化学分析结果表
Tab. 2 Element compositions of the Jijiquan gabbro

样品号	1110 /4	1110/5	1110/6	1110/7	1110/8	1110/9
岩性	辉长岩			辉绿岩		辉长岩
SiO ₂	46.25	46.68	44.36	46.76	46.21	46.76
Al ₂ O ₃	17.28	17.87	16.36	18.18	17.60	18.33
Fe ₂ O ₃	8.21	8.06	8.78	7.76	7.09	7.13
FeO	4.05	3.25	4.25	3.72	3.59	3.45
CaO	7.90	9.71	8.41	9.87	9.92	10.23
MgO	6.60	6.47	6.95	6.61	6.92	6.98
K ₂ O	0.33	0.50	0.25	0.40	0.33	0.33
Na ₂ O	4.52	4.02	3.73	3.25	3.12	2.97
TiO ₂	1.09	1.12	1.18	1.06	0.86	0.89
P ₂ O ₅	0.13	0.15	0.13	0.13	0.08	0.08
MnO	0.12	0.13	0.13	0.12	0.11	0.11
LOST	2.89	2.62	2.80	2.15	2.55	1.99
TOTAL	99.38	100.57	97.33	100.00	98.37	99.26
Mg #	50.70	52.33	50.49	52.43	55.29	55.78
Rb	12.20	19.60	8.50	15.30	15.10	14.30
Ba	102.45	110.30	96.38	101.50	89.50	99.53
Th	1.60	1.70	1.20	0.90	0.90	0.80
U	0.50	0.60	0.40	0.30	0.30	0.30
Ta	0.30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Nb	2.60	2.50	2.00	1.90	1.70	1.60
Pb	2.60	4.00	4.50	1.30	2.50	1.40
Sr	285.80	198.80	271.50	304.70	287.60	283.00
Zr	89.50	85.00	86.30	68.50	64.40	62.50
Hf	2.70	2.60	2.70	2.20	2.10	2.00
La	6.91	6.70	5.63	4.32	3.96	3.94
Ce	17.94	17.06	15.32	11.87	10.66	10.84
Pr	2.54	2.40	2.29	1.80	1.63	1.62
Nd	12.28	11.78	11.71	9.38	8.48	8.31
Sm	3.61	3.52	3.66	2.98	2.75	2.68
Eu	1.19	1.17	1.22	1.06	0.97	1.00
Gd	3.20	3.22	3.26	2.78	2.52	2.45
Tb	0.68	0.69	0.71	0.60	0.54	0.55
Dy	4.32	4.41	4.61	3.93	3.59	3.55
Ho	0.90	0.91	0.96	0.82	0.77	0.76
Er	2.73	2.74	2.92	2.47	2.29	2.27
Tm	0.41	0.41	0.44	0.36	0.34	0.33
Yb	2.65	2.60	2.79	2.32	2.14	2.17
Lu	0.38	0.39	0.40	0.35	0.32	0.31
Y	24.48	24.37	25.89	21.94	20.22	19.81
ΣREE	59.74	58.00	55.92	45.04	40.96	40.78

注:主量元素含量为%;微量元素含量为 10⁻⁶。

TiO₂的平均含量(TiO₂ = 1.0%, WILSON, 1989)相同。Mg[#] = 50.49~55.78, 平均为 52.84, 明显低于原生岩浆范围(68~75, WILSON, 1989), TFe₂O₃的含量为 9.87%~12.15%, 平均为 10.77%。由于所研究的样品遭受了不同程度的蚀变作用, 样品烧失量较大, 因此, 只采用不活动的元素来讨论地球化学特征和岩石成因。利用蚀变过程中不活跃元素(Zr、Ti、Nb、Y)进行岩石分类判别, 在 Zr/TiO₂-Nb/Y 分类图解上(图 4a), 所有样品落入安山玄武岩区域, 在 Ta/Yb-Th/Yb 图解中, 所有样品落在钙碱性系列区域(图 4b)。

5.2 稀土和微量元素特征

辉长岩样品稀土元素总量较低, 变化不大,

$\Sigma\text{REE} = 40.78 \times 10^{-6} \sim 59.74 \times 10^{-6}$, 平均为 50.07×10^{-6} , 高于 N - MORB 的 39.11×10^{-6} (SUN et al., 1989), (La/Yb)_N 值范围为 1.3~1.87, 平均为 1.52, LREE/HREE = 2.27~2.91, 平均为 2.51, 轻重稀土元素分异较弱, 略富集轻稀土元素。δEu = 1.04~1.17, 平均为 1.09, 弱正 Eu 异常。球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 5a)呈近似平坦型。原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 5b), 所有样品具有相似的特征, 暗示样品具有同源性。岩石相对富集大离子亲石元素(Rb、Ba、K)和不相容元素(Th、U、Sr), 相对亏损高场强元素(Nb、Ta、P、Zr), 岩石 Pb 正异常明显, 表明岩石可能受地壳物质的混染(SUN et al., 1989)。

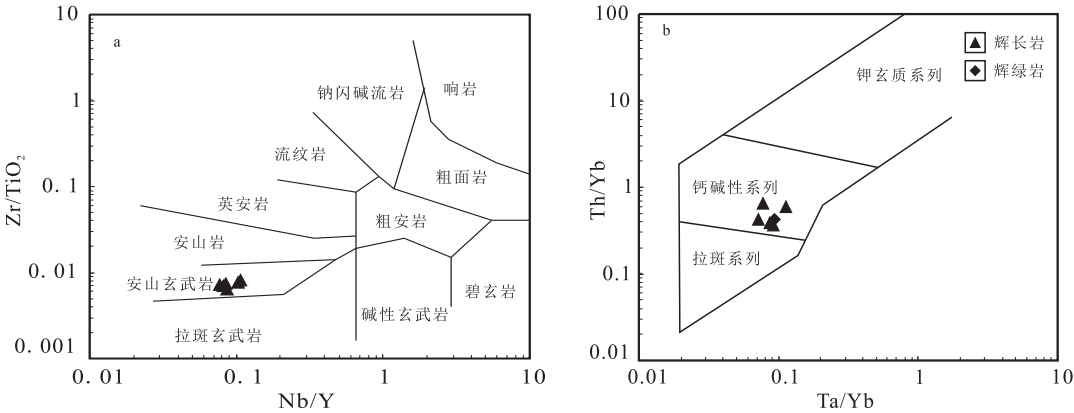


图 4 (a)辉长岩 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解(底图据 WINCHESTER et al., 1977)和(b)Th/Yb-Ta/Yb 图解
Fig. 4 (a)Zr/TiO₂-Nb/Y and (b) Th/Yb-Ta/Yb diagrams of the Jijiquan gabbro
(After WINCHESTER et al., 1977)

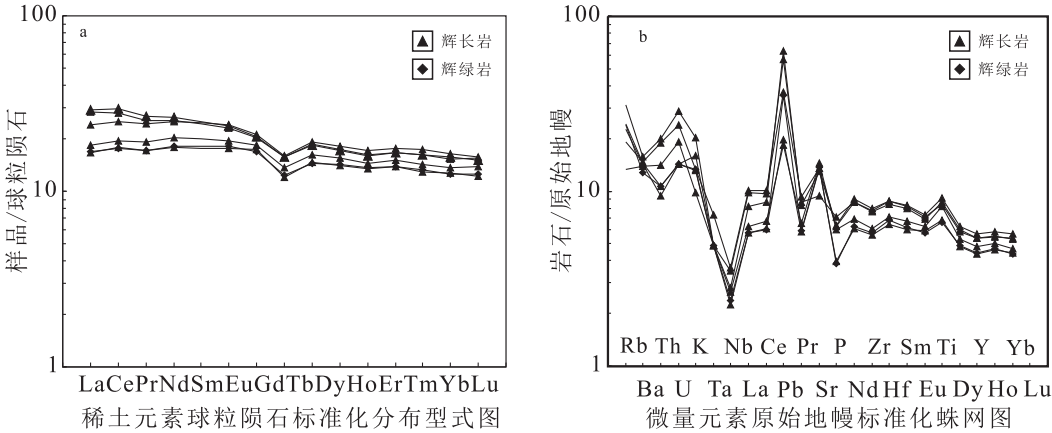


图 5 (a)辉长岩球粒陨石标准化稀土配分图和(b)原始地幔标准化微量元素蛛网图
(标准化值据 SUN et al., 1989)
Fig. 5 (a)Chondrite-normalized REE abundances and (b)primitive mantle normalized trace element abundances of the Jijiquan gabbro (Normalizing values after SUN et al., 1989)

6 讨论

6.1 源区性质及岩石成因

RAPP et al. (1995)指出,由玄武质下地壳部分熔融而来的熔体的 $Mg^\#$ 一般较低(<40),而 $Mg^\#$ 大于 40 表明源区有地幔组分的参与或者直接来源于地幔。一般而言,由地幔二辉橄榄岩经 20%~30%的部分熔融后形成原生玄武质岩浆的 $Mg^\#$ 约为 70(PERFIT et al., 1980; HERGT et al., 1989),茱萸泉辉长岩 $Mg^\#$ 为 50.49~55.78,平均为 52.84,均大于 40,这表明其源区有幔源组分的参与。岩浆岩岩石的化学

成分中的高场强元素,如 Nb、Ta、Zr、Hf、Th 以及 HREE 不易受后期热液蚀变和低于角闪石相的变质作用的影响(WINCHESTER et al., 1997; PEARCE et al., 1973; LEI Wanshan et al., 2016),因此可用这些元素对岩浆源区进行判别。研究表明,源于软流圈地幔的玄武岩其 La/Nb 值约 <1.5 ,La/Ta 值约 <22 ,岩石圈地幔来源的玄武岩则与之相反(HUANG et al., 2000)。茱萸泉辉长岩 La/Nb 值为 2.27~2.82,平均为 2.54,La/Ta 值为 19.7~33.5,平均为 24.3,指示该辉长岩源区为岩石圈地幔,在 Nb-Zr 图解上(图 6a),所有样品落在亏损型地幔区域,表明岩浆起源于亏损地幔。

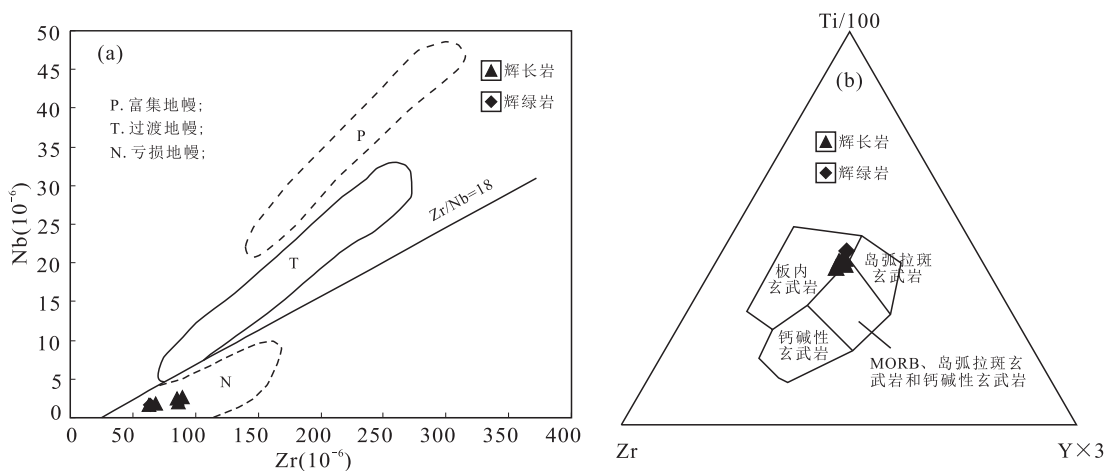


图 6 (a)辉长岩 Zr-Nb 图解和(b)Ti/100-Zr-Y×3 图解

(a. 底图据 LE Roex et al., 1983; b. 底图据 PEARCE et al., 1973)

Fig. 6 (a)Zr-Nb and (b)Ti/100-Zr-Y×3 diagram of the Jijiquan gabbro

通常,幔源岩浆侵入地壳过程中会不同程度受到地壳物质的影响,而地壳物质的加入使岩石富集 LREE 和 LILE,亏损 Ti、Nb 和 Ta(RUDNICK et al., 2003),同时会使 La/Nb、Zr/Nb 值升高,Ce/Pb 值降低。因此,元素之间含量比值及元素比值之间相关关系(Ce/Pb、Nb/U)可以准确验证同化混染作用是否存在(姜常义等,2015)。地壳中 Ce/Pb <15 ,而典型地幔 Ce/Pb = 25 ± 5 (HOFMANN, 1986),茱萸泉辉长岩 Ce/Pb 为 3.4~9.13,显示岩体受到同化混染作用。Nb/U 值可作为判别地壳混染的标志之一(TAYLOR et al., 1985; 邓晋福等, 2015),洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩 Nb/U 值为 47 ± 10 ,而大陆地壳和原始地幔 Nb/U 平均值分别为 8.93 和 33.59,茱萸泉辉长岩 Nb/U 为 4.17~

6.33,平均为 5.28,与大陆地壳较为相近,远离原始地幔平均值,反映岩浆上升过程中有地壳物质的混入。茱萸泉辉长岩 Nb/Ta 值为 8.0~12.5,平均为 9.53,Zr/Hf 值为 30.67~33.15,平均为 31.81,分别与大陆地壳值(Nb/Ta=11,Zr/Hf=33;据 TAYLOR et al., 1985)接近,而低于洋中脊玄武岩值(Nb/Ta=17.7,Zr/Hf=36.1)(据 SUN et al., 1989),表明岩浆在上升过程中可能受到地壳物质的混染。综合主量、微量元素特征,表明茱萸泉辉长岩源于亏损地幔的部分熔融,在上升过程中明显受到地壳物质的混染。

6.2 构造地质背景探讨

尽管前人对北山地区古洋盆的位置有不同的观点(左国朝等,1990;徐学义等,2008,2009),但对洋

盆开始裂解时限的认识基本一致。大量研究表明,北山地区古大陆自震旦纪开始有裂解前兆,至少到晚奥陶世洋盆已经形成(左国朝等,2003;龚全胜等,2002;杨合群等,2008,2012;陈超等,2017)。

北山南带洋盆闭合的时限存在泥盆纪、石炭纪、二叠纪3种不同的认识:左国朝等(1990)认为,不整合在早古生代地层之上的泥盆系海陆相粗碎屑岩磨拉石建造标志着碰撞造山和洋盆闭合;何世平等(2005)认为,石炭纪末洋盆闭合,哈萨克斯坦板块和塔里木板块相互靠拢,形成新的统一大陆,北山地区自此进入板内演化阶段;刘雪亚等(1995)认为,在早二叠世之前,随着北山南带及南天山古洋盆的封闭,敦煌地块北缘的安北-旧寺墩构造带与北山造山带前缘的柳园-大奇山地体碰撞,导致塔里木板块、哈萨克斯坦板块和西伯利亚板块最终拼接。结合北山南带发育大量后碰撞阶段花岗岩类,时代集中在304~266 Ma(冯继承等,2012;张文等,2011;易鹏飞等,2017)。综上所述,早二叠世北山南带洋盆已经闭合,区内转入板内演化阶段。

大量研究表明,北山南带晚古生代为板内裂谷环境,区内晚石炭世可能存在裂谷回返碰撞,导致石炭系与下二叠统之间的角度不整合接触,早二叠世裂谷再次拉开,并在中二叠世达到鼎盛(赵泽辉等,2006;姜常义等,2006;何世平等,2005;左国朝等,1990),产生大量伸展背景的幔源岩浆活动,如区内出露的二叠纪双峰式火山岩,以及大量的辉长岩和辉绿岩,表明北山南带二叠纪整体处于伸展拉伸的构造背景,芨芨泉辉长岩的被动就位特征也支持这一观点。在 $\text{TiO}_2\text{-Zr-}3\times\text{Y}$ 构造环境判别图解中(图6b),所有样品落在板内区域。综合岩体主、微量元素特征及区域构造演化,表明芨芨泉辉长岩形成于早二叠世板内伸展构造背景。

7 结论

(1)北山地区芨芨泉辉长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (274.1 ± 5.3) Ma,代表了辉长岩的形成年龄,时代为早二叠世。

(2)岩石地球化学特征表明辉长岩源于亏损地幔的部分熔融,在上升侵位过程中发生明显的地壳混染。

(3)结合区域构造背景及岩体主、微量元素特征

综合分析,芨芨泉辉长岩形成于板内伸展的构造背景。

致谢:本文在撰写过程中得到了崔继岗高级工程师的精心指导,审稿专家提出了诸多宝贵且中肯的意见,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- 陈超,修迪,潘志龙,等. 北山造山带中部早古生代伸展构造体制:来自石板井辉长岩的年代学及地球化学证据[J]. 地质学报,2017,91(8):1661-1673.
- CHEN Chao, XIU Di, PAN Zhilong, et al. Early Paleozoic Crustal Extensional Tectonic Regime in the Central Part of Beishan Orogenic Belt: New Evidence from Geochronology and Geochemistry of Gabbro in Shibanjing[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(8):1661-1673.
- 邓晋福,冯艳芳,狄永军,等. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换[J]. 地质论评,2015,61(3):473-484.
- DENG Jinfu, FENG Yanfang, DI Yongjun, et al. Magmatic Arc and Ocean-Continent Transition: Discussion[J]. Geological Review, 2015, 61(3):473-484.
- 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.
- 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,2002,35(3):28-34.
- GONG Quansheng, LIU Mingqiang, LI Hailin, et al. The type and basic characteristics of Beishan orogenic Belt, Gansu[J]. Northwestern Geology, 2002, 35(3):28-34.
- 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.
- GONG Quansheng, LIU Mingqiang, LIANG Minghong, et al. The tectonic facies and tectonic evolution of Beishan orogenic belt, Gansu[J]. Northwestern Geology, 2003, 36(1):11-17.
- 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 Bingchen, YAO Wenguang, et al. The division of tectonic units of Beishan area, Gansu-Inner

- Mogolia[J]. *Northwestern Geology*, 2002, 35(4): 30-40.
- 何世平, 周会武, 任秉琛, 等. 甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化[J]. *西北地质*, 2005, 38(3):6-15.
- HE Shiping, ZHOU Huiwu, REN Bingchen, et al. Crustal evolution of Palaeozoic in Beishan area, Gansu and Inner Mongolia, China[J]. *Northwestern Geology*, 2005, 38(3):6-15.
- 黄增保, 金霞. 甘肃北山红石山蛇绿混杂岩带中基性火山岩构造环境分析[J]. *中国地质*, 2006, 33(5):1031-1037.
- HUANG Zengbao, JIN Xia. Tectonic environment of basic volcanic rocks in the Hongshishan ophiolite mélange zone, Beishan Mountains, Gansu[J]. *Geology in China*, 2006, 33(5):1031-1037.
- 姜常义, 程松林, 叶书锋, 等. 新疆北山地区中坡山北镁铁质岩体岩石地球化学与岩石成因[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 115-126.
- JIANG Changyi, CHENG Songlin, YE Shufeng, et al. Lithogeochemistry and petrogenesis of Zhongposhanbei mafic rock body, at Beishan region, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 115-126.
- 姜常义, 王子玺, 杜玮, 等. 柴达木地块北缘南北沟岩体地球化学特征及成矿前景[J]. *地球科学与环境学报*, 2015, 37(1): 12-23.
- JIANG Changyi, WANG Zixi, DU Wei, et al. Geochemical Characteristics of Nanbeigou Intrusion in the Northern Margin of Qaidam Massif and Its Prospecting Potential [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, 37(1):12-23.
- 李锦铁, 张进, 杨天南, 等. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39(4):584-605.
- LI Jinyi, ZHANG Jin, YANG Tiannan, et al. Crustal Tectonic Division and Evolution of the Southern Part of the North Asian Orogenic Region and Its Adjacent Areas [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2009, 39(4):584-605.
- 刘雪亚, 王荃. 中国西部北山造山带的大地构造及演化[J]. *地学研究*, 1995, 28:37-48.
- LIU Xueya, WANG Quan. Tectonics of the orogenic belts in Beishan Mt., Western China and their evolution[J]. *Geological Research*, 1995, 28:37-48.
- 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.
- NIE Fengjun, JIANG Sihong, BAI Daming, et al. Metallogenic Studies and Ore Prospecting in the Conjunction Area of Inner Mongolia Autonomous Region, Gansu Province and Xinjiang Uygur Autonomous Region(Beishan Mt.), Northwest China [M]. Beijing: Geological Publication, 2002.
- 彭海练, 杨克俭, 李宁, 等. 内蒙古红石山南金矿地质特征及找矿方向[J]. *西北地质*, 2011, 44(4):44-49.
- PENG Hailian, YANG Kejian, LI Ning, et al. Geochemical Characteristics and Prospecting Direction of Gold Deposit in Southern Belt of Hongshishan, Inner Mongolia [J]. *Northwestern Geology*, 2011, 44(4):44-49.
- 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. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16):1589-1604.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 甘肃北山红石山蛇绿岩锆石 U-Pb 年代学研究及构造意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(6):1685-1693.
- WANG Guoqiang, LI Xiangmin, XU Xueyi, et al. Zircon U-Pb chronological study of the Hongshishan ophiolite in the Beishan area and their tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(6):1685-1693.
- 徐学义, 何世平, 王洪亮, 等. 中国西北部地质概论[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- XU Xueyi, HE Shiping, WANG Hongliang, et al. Geological Survey in Northwest China[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- 徐学义, 陈隽璐, 王洪亮, 等. 东天山—北山地区成矿地质背景图(1:100 万)[M]. 北京:地质出版社, 2009.
- XU Xueyi, CHEN Junlu, WANG Hongliang, et al. Metallogenic geological background map of the East Tianshan to Beishan area[M]. Beijing: Geological Publication, 2009.
- 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.
- YANG Hequn, LI Ying, LI Wenming, et al. Discussion on Metallogenic Tectonic Setting of Beishan Mountain, Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2008, 41(1):22-28.
- 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):26-36.
- YANG Hequn, LI Ying, ZHAO Guobin, et al. Character and Structural Attribute of the Beishan Ophiolite [J]. *Northwestern Geology*, 2010, 43(1):26-36.
- 杨合群, 赵国斌, 李英, 等. 新疆—甘肃—内蒙古衔接区古生代构造背景与成矿的关系[J]. *地质通报*, 2012, 31(2/3):413-421.

- YANG Hequn, ZHAO Guobin, LI Ying, et al. The relationship between Paleozoic tectonic setting and mineralization in Xinjiang-Gansu-Inner Mongolia juncture area [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31 (2/3): 413-421.
- 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.
- YANG Jianguo, XIE Chunlin, WANG Xiaohong, et al. Basic tectonic framework and features of metallagenic series in Beishan area, Gansu Province [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(2/3):422-438.
- 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.
- 左国朝, 何国琦, 李红诚, 等. 北山板块构造及成矿规律 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1990.
- ZUO Guochao, HE Guoqi, LI Hongcheng, et al. Plate tectonics and metallogenetic regulaties in Beishan region [M]. Beijing: Peking University Publication, 1990.
- 左国朝, 刘义科, 刘春燕. 甘新蒙北山地区构造格局及演化 [J]. 甘肃地质学报, 2003, 12(1):1-15.
- ZUO Guochao, LIU Yike, LIU Chunyan. Famework and evolution of the tectonic structure in Beishan area across Gansu province, Xinjiang autonomous region and inner Mongolia autonomous region [J]. Acta Geologica Gansu, 2003, 12(1):1-15.
- 张道忠. 甘肃新金厂金矿床地质特征及成矿条件分析 [J]. 矿产与地质, 2010, 24(3):204-209.
- ZHANG Daozhong. Analysis on geological Characteristics and ore-forming conditions of Xinjinchang gold deposit in Gansu [J]. Mineral Resources and Geology, 2010, 24 (3):204-209.
- 张文, 冯继承, 郑荣国, 等. 甘肃北山音凹峡南花岗岩体的 LA-ICPMS 定年及其构造意义 [J]. 岩石学报, 2011, 27 (6):1649-1661.
- ZHANG Wen, FENG Jicheng, ZHENG Rongguo, et al. LA-ICP MS zircon U-Pb ages of the granites from the south of Yin'aoxia and their tectonic significances [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6):1649-1661.
- 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.
- ZHAO Zehui, GUO Shaojie, HAN Baofu, et al. Comparative study on Permian basalts from eastern Xinjiang-Beishan area of Gansu province and its tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22 (5): 1279-1293.
- HERGT JM, CHAPPELL BW, MCCULLOCH MT, et al. Geochemical and Isotopic Constraint of the Jurassic Diorites of Tasmania [J]. Journal of Petrology, 1989, 30 (4):841-883.
- HORN L, RUDNICK RL, MCDONOUGH WF. Precise elemental and isotope ratio determination by simultaneous solution nebulization and laser ablation-ICPMS: Application to U-Pb geochronology [J]. Chemical Geology, 2000, 167:405-425.
- HOSKIN PWO, SCHALTEGGER U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53 (1):27-62.
- HUANG YM, HAWKESWORTH C, SMITH I, et al. Geochemistry of Late Cenozoic basaltic volcanism in Northland and Coromandel New Zealand: Implications for mantle enrichment processes [J]. Chemical Geology, 2000, 164(3-4):219-238.
- HOFMANN AW. Siderophile Element in ozeanischen Basalten, Ihre verarmung imprimitiven mutel und Ihre bedeutung bei der Entwicklung [J]. Fortschritte der Mineralogie (Beiheft), 1986, 64(1):79.
- LUDWIG KR. User's manual for Isoplot/Ex, version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4:1-70.
- LEI Wanshan, XU Peng, GUO Junfeng, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating, Geological and Geochemical Features of Sujishan Gabbro Pluton, Eastern Bogda Mountains, and their Tectonic Significances [J]. Geological Review, 2016, 62(2):317-330.
- LE ROEX AP, DICK HJ, REID AM, et al. Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of lavas erupted along the southwest Indian Ridge between the Bouvet triple junction and 11 degrees east [J]. Petrol, 1983, 24:267-318.
- RAPP RP, WATSON EB. Dehydration Melting of Metabasalt at 8—32kpar: Implications for Continental Growth and Crust—Mantle Recycling [J]. Journal of Petrology, 1995, 36(4):891-931.
- PERFIT MR, GUST DA, BENCH AE et al. Chemical

Characteristics of Island—Arc Basalts: Implications for Mantle Sources [J]. Chemical Geology, 1980, 30: 227-256.

PEARCE JA, CANN JR. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace elements analysis [J]. Earth and Planet Science Letters, 1973, 19:290-300.

RUDNICK RL, GAO S. Composition of the continental crust[J]. Treatise on Geochemistry, 2003, 3:1-64.

SUN SS, MACDONOUGH WF. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: Implations for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 1989,42(1):313-345.

TAYLOR SR, MCLENNAN SM. The continental crust: its compositionand evolution [M]. London: Blackwell, 1985,57-72.

VAVRAG, SCHMID R, GEBAUER D. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons:geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps)[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 134(4):380-404.

WILSON M. Igneous Petrogenesis [M]. London: Unwin Hyman, 1989, 1-466.

WINCHESTER JA, FLOYD PA. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products usiong immobile elements [J]. Chemical Geology, 1997, 20:325-343.

YUAN HL, GAO S, LIU XM, et al. Accurate U - Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28 (3):353-370.



超基性岩后生镍矿典型:陕西煎茶岭矿床

成矿区带:龙门山-大巴山成矿带(Ⅲ-73)。

建造构造:勉略宁三角地带,新元古代镁质超基性岩体由于后期强烈的构造、花岗斑岩侵入及热液活动,岩体发生强烈蚀变,主要由蛇纹岩、滑镁岩、菱镁岩和透闪岩组成,原岩可能为纯橄岩、斜方辉橄岩、辉石岩。岩石 m/f 值为 8.45~11.96。纤胶蛇纹岩的 Sm - Nd 等时线年龄为(927.4±49.0)Ma(庞春勇等,1993)。闫臻等测得花岗斑岩锆石 U - Pb 年龄为(216±4) Ma(姜修道等,2012)。

成矿时代:印支期。

成矿组分:Ni(Co)。

矿床(点)实例:(陕)略阳县煎茶岭镍矿床。

简要特征:镍矿(化)体呈透镜状产于强蚀变的超基性岩体中,并且成群、成带聚集在花岗斑岩体周围(西侧、北侧、东侧),此外东侧还有含镍磁铁矿体,说明受到花岗斑岩体控制。含矿岩石有滑镁岩、叶蛇纹岩、菱镁岩、透闪岩;矿石硫化物分布主要呈稀疏-中等浸染状浸染状、斑杂状,局部呈稠密浸染状、细脉状、块状。矿石金属矿物有磁黄铁矿、黄铁矿、镍黄铁矿、针镍矿、辉镍矿、紫硫镍铁矿、辉砷镍矿、磁铁矿等;非金属矿物有蛇纹石、绿泥石、透闪石、滑石、菱镁矿、铬云母等。矿床平均品位 Ni 为 0.626%,Co 为 0.025%。

成因认识:新元古代镁质超基性岩为镍钴矿源岩,受到印支期花岗斑岩侵入再造成矿。矿石硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值 9.9‰~13.3‰,明显偏离幔源硫,而与花岗斑岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值 10.0(‰)接近,指示该花岗斑岩提供了镁质超基性岩再造成矿的热动力及矿化剂硫(姜修道,2010)。