

doi: 10.12029/gc20180305

谢燮, 赵国斌, 杨合群, 杨生飞, 任华宁, 贾健, 孙新春, 黄增保. 2018. 甘肃北山孙家岭含钪岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义[J]. 中国地质, 45(3): 483-492.

Xie Xie, Zhao Guobin, Yang Hequn, Yang Shengfei, Ren Huaning, Jia Jian, Sun Xinchun, Huang Zengbao. 2018. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geological significance of the Sunjialing scandium mineralized intrusion in the Beishan region, Gansu Province[J]. *Geology in China*, 45(3): 483-492(in Chinese with English abstract).

甘肃北山孙家岭含钪岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义

谢燮¹ 赵国斌¹ 杨合群¹ 杨生飞¹ 任华宁¹ 贾健² 孙新春³ 黄增保³

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 新疆维吾尔自治区地质调查院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 孙家岭含钪岩体位于哈萨克斯坦板块中星星峡—明水—旱山微板块的雅满苏—红石山—黑鹰山晚古生代裂谷带。岩体侵入于下石炭统白山组, 由含斜长石角闪石岩和角闪石岩组成, 钪主要赋存于角闪石矿物中。含钪岩体属富铁质超基性岩, 全岩成分以高碱、高铝为特征; 稀土含量较高, 轻稀土略富集, 具有明显的负 Eu 异常; 大离子亲石元素 (LILE) K、Rb、Ba、Sr、U 富集, 相对亏损高场强元素 (HFSE) Nb、Zr、Hf、Th 及 P。通过 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 首次获得孙家岭含钪岩体中角闪石岩形成于 (339.5±2.6) Ma, 表明该含矿岩体侵位及矿化作用发生于早石炭世, 为裂谷拉张环境下伸展作用的产物。

关键词: 早石炭世; 锆石 U-Pb 年龄; 角闪石岩; 孙家岭

中图分类号: P588.1; P597.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)03-0483-10

LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geological significance of the Sunjialing scandium mineralized intrusion in the Beishan region, Gansu Province

XIE Xie¹, ZHAO Guobin¹, YANG Hequn¹, YANG Shengfei¹, REN Huaning¹, JIA Jian²,
SUN Xinchun³, HUANG Zengbao³

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, MLR key Laboratory for the study of Focused Magmatism and Giant ore Deposits Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Xinjiang Geological Survey Academy, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3. Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 735000, Gansu, China)

Abstract: Located in the Yamansu-Hongshishan-Heiyingshan Late Paleozoic rift of Xingxingxia-Mingshui-Hanshan microplate in Kazakhstan plate, the Sunjialing scandium mineralized intrusion emplaced in the Early Carboniferous Baishan Formation and consists of plagioclase amphiboles and amphiboles, with scandium mainly occurring in the amphibole. Scandium mineralized intrusion belongs to iron-rich ultrabasic intrusion, whose components are characterized by high alkali and alumina. The content of rare earth is high, and the light rare earth is slightly enriched, with obvious negative δ (Eu) anomaly. LILE elements Rb, Ba, Sr and

收稿日期: 2016-07-01; 改回日期: 2017-11-17

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查专项 (12120113047300, 12120113046700) 资助。

作者简介: 谢燮, 男, 1982 年生, 硕士, 工程师, 从事于地质找矿与矿床学研究; E-mail: 77867876@qq.com。

U are enriched whereas HFSE elements Nb, Zr, Hf, Th, and P, Ti are depleted. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of the hornblende yielded an age of (339.5 ± 2.6) Ma, which suggests that both the intrusion of the ore-bearing complex and the mineralization occurred in early Carboniferous in a rift environment.

Key words: Early Carboniferous; U-Pb zircon ages; hornblendite; Sunjialing

About the first author: XIE Xie, male, born in 1982, master candidate, engages in the study of geological prospecting and ore deposits; E-mail: 77867876@qq.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 12120113047300, 12120113046700).

1 引 言

北山地区经历了多期次、多阶段的板块裂解、俯冲、碰撞、拼合的复杂地质演化过程,区内前寒武纪和古生代地层广泛出露,构造形迹较为复杂,岩浆活动频繁,矿产资源丰富,已发现许多重要的黑色、有色、稀有、贵金属及非金属矿产(左国朝等, 1990;徐学义等, 2008;杨合群等, 2008;杨建国等, 2012)。近年来随着地质大调查的深入,该地区在稀有金属找矿方面取得了重大突破,陆续发现了一批稀有金属矿。孙家岭含铀岩体是甘肃省地质调查院2012年发现,位于甘肃省肃北县马鬃山镇北西约60 km的狼娃山一带。本文从年代学及地球化学方面进行该含铀岩体的研究,其对丰富北山地区稀有金属矿床成矿理论,指导区内稀有金属找矿具有重要意义。

2 地质背景

甘肃北山地区以红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿岩带为缝合带,其北侧属哈萨克斯坦板块的星星峡—明水—旱山微板块,南侧属塔里木板块的敦煌微板块。孙家岭含铀岩体位于星星峡—明水—旱山微板块中的雅满苏—红石山—黑鹰山晚古生代裂谷带(图1b)。该裂谷带在晚古生代形成于北山北部,既有古生代陆缘火山岩,也有前寒武纪陆壳。带内出露的地层主要为大面积石炭系火山—沉积岩系,部分为二叠系火山—沉积岩系。镜儿泉一带古陆壳基底裂开明显,中元古界卡瓦布拉克群和星星峡群分布于南北两侧,红石山南侧局部分布有北山杂岩。带内发育的早石炭世双峰式火山岩地层,主要为安山岩—英安岩—流纹岩组合,以中酸性、酸性岩为主,其与下伏泥盆纪地层呈角度不整合接触。强烈的火山喷溢活动形成下石炭统白山组巨厚的火山—沉积岩系,岩性主要为流纹岩、英安岩、

安山岩等中酸性熔岩,局部见太古宙—古元古代敦煌岩群,均呈捕虏体残留产出。晚古生代侵入岩也广泛分布,主要呈大岩基和小岩株形式产出。

3 含矿岩体特征

孙家岭矿区出露地层除第四系外,均为石炭系白山组,岩性主要为安山质火山角砾熔岩、凝灰岩、凝灰质熔岩、英安流纹岩及碳酸盐岩等,地层受海西期中酸性侵入岩吞噬,呈残留体产出。矿区岩浆岩十分发育,主要为角闪石岩和同期侵入的英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩等,其大都呈岩基状、岩株状或岩枝状产出,各岩石单元呈脉动式侵入接触,近东西向分布,明显受区域构造控制,区内构造不发育。

孙家岭岩体侵位于石炭系白山组,呈北东东向展布,主要由含斜长石角闪石岩和角闪石岩组成。据甘肃省地质调查院资料,铀矿化主要赋存于角闪石岩中,与围岩呈渐变过渡关系,在地表不连续,多呈平行脉状成群展布(图1a),矿脉走向变化范围为 $30^{\circ} \sim 140^{\circ}$,多数在 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围内变化,脉体延伸40~381m,最长可达870 m,宽2~35 m,最宽89.7 m,厚42 m。国内外尚未有铀矿的工业指标,受甘肃省地质调查院委托,中国地质科学院矿产综合利用研究所对孙家岭铀矿进行了选矿试验,结合云南有色楚雄勘察院对二台坡铀矿、凹溪河、碗厂铀矿等矿床圈矿工业指标($> 50 \times 10^{-6}$),对其工业指标进行了确定(边界品位: $Sc \geq 50 \times 10^{-6}$,最低工业品位: $Sc \geq 58 \times 10^{-6}$)。孙家岭共圈定铀矿体18条,控制矿体长约3000 m,宽400 m,目前仅对K3主矿体进行了资源量估算,共估算出铀金属资源量162.04 t(334类),铀平均品位 68.92×10^{-6} 。含矿岩性为角闪石岩(图2c),次为含斜长石角闪石岩(图2d),矿石多呈灰黑色、暗灰色,块状构造,少量呈脉状构造、条带状构造,见有碎裂结构、纤状放射状结构、反应边结

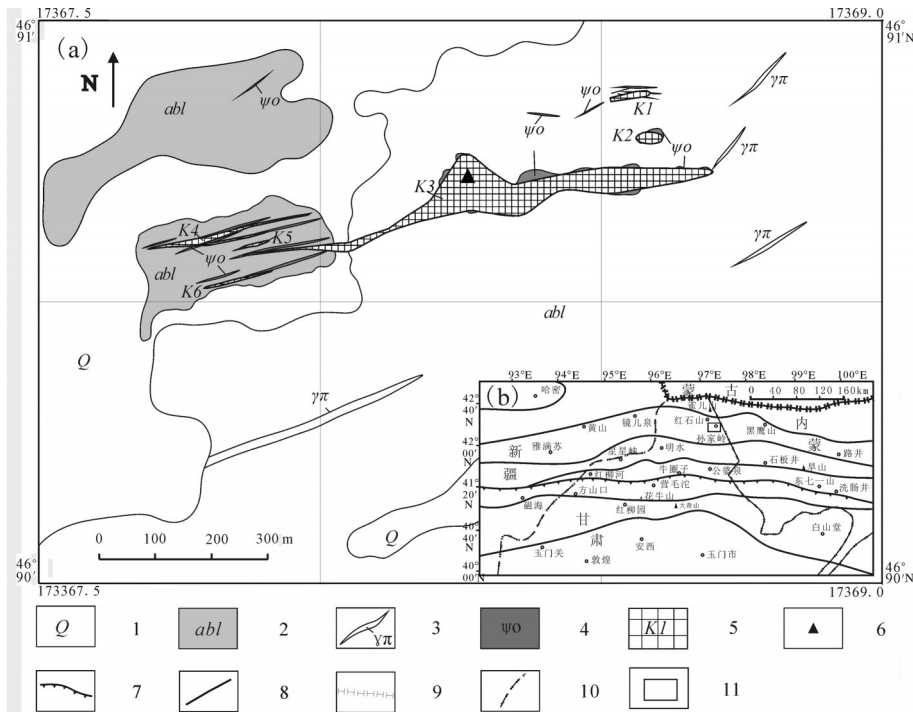


图1 孙家岭主含钽岩体地质略图(a)(据甘肃省地质调查院修改)和大地构造位置(b)
 1—第四系;2—含斜长石角闪岩;3—花岗斑岩脉;4—角闪岩;5—矿(化)体;6—同位素测年采样位置;7—缝合线;8—地质界限(a)及构造分区界限(b);9—国界;10—省界;11—研究区
 Fig.1 Geological sketch map of the Sunjialing main scandium-bearing intrusion (a) (modified after Geological Survey of Gansu Province) and schematic geological map (b)
 1—Quaternary; 2—I-sites; 3— Granite porphyry; 4— Hornblendite; 5— Mineralized bodies; 6— Sampling position for isotopic dating; 7— Suture; 8—Geological boundaries (a) and structural boundaries (b); 9— National boundaries; 10— Provincial boundary; 11— Research area

构及包含结构等。主要矿物有角闪石、斜长石, 次为楣石、石英、绿泥石、绿帘石等(图 2c), 少量钛铁矿、黄铜矿和黄铁矿, 金属矿物多呈星散浸染状分布。其中角闪石常被楣石交代, 少量被绿帘石、绿泥石交代; 斜长石次生蚀变较强, 多被绿帘石、黝帘石、云母等矿物交代。经偏光显微镜分析, 人工重砂分析和电子探针分析, 矿石中未见钽的独立矿物, 钽呈类质同象赋存于其他矿物之中, 其在各种矿物均有分布, 且含量变化较大, 矿石中的钽主要分布于角闪石中(表 1)。

4 岩石地球化学特征

本次共采集岩石样品 6 件。全岩主量元素分析方法为 X 荧光光谱分析(XRF), 使用的仪器是荷兰帕纳科公司 Axios 4.0kW 波长色散 X 射线荧光光谱仪, 精密度: $RSD \leq 0.134$, 稳定性: $RMS\ Rel(\%) \leq 0.050$; 稀土、微量元素分析采用 Thermo Fisher 公司生产的 X-SeriesII 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%。测试单位为西安地质矿产研究所实验测试中心。

4.1 主量元素

孙家岭含矿岩体 SiO_2 含量为 42.17% ~ 46.11%, MgO 含量为 10.41% ~ 12.22%, $TFeO$ 含量为 12.33% ~ 13.62%, Al_2O_3 含量为 12.84% ~ 15.07%, m/f 值为 1.35 ~ 1.64, 属富铁质超基性岩(表 2); $Na_2O + K_2O$ 含量为 1.79% ~ 2.32%, 高于角闪岩的平均值(0.49); $TFeO/MgO$ 值为 1.08 ~ 1.31, 小于角闪岩的平均值(1.78)(王玉往等, 2000), $Mg^\#$ 值为 0.58 ~ 0.62, 略小于原始岩浆的 $Mg^\#$ 值(0.68 ~ 0.73)。

4.2 稀土和微量元素

孙家岭岩体稀土总量 ΣREE 为 26.64~38.23 $\times 10^{-6}$, LREE 为 18.61~25.95, HREE 为 7.75~12.28, LREE/HREE 为 1.68~2.44, La_N/Yb_N 为 0.94~1.71, δEu 为 0.71~0.91, δCe 为 0.93 ~ 0.95(表 3), 稀土元素分析数据显示孙家岭岩体 ΣREE 高于上地幔(17.79 \times

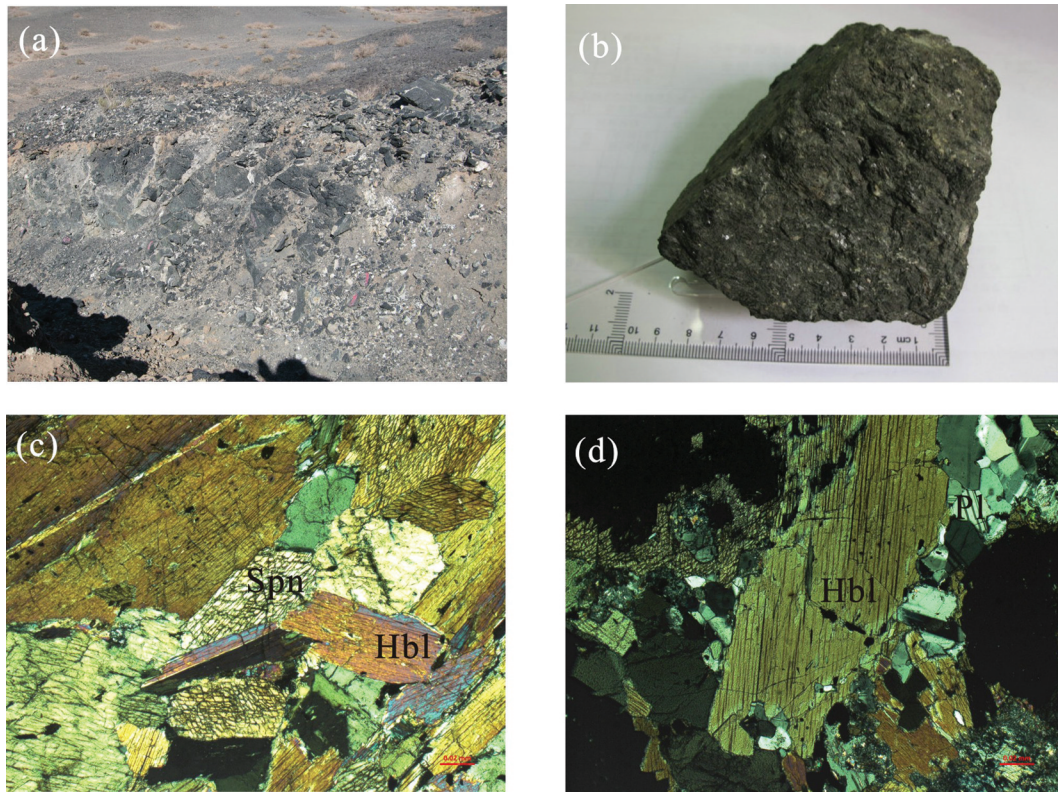


图2 孙家岭岩体矿物特征

a—52线探槽中钪矿(化)脉体;b—钪矿石;c—角闪石岩;d—含斜长石角闪石岩;Hbl—角闪石;Spn—榍石;Pl—斜长石

Fig.2 Mineral characteristics of Sunjialing intrusion

a—Scandium veins of trenches; b—Scandium ore; c—Hornblendite; d—Plagioclase-bearing hornblendite; Hbl—Hornblende; Spn—Spene; Pl—Plagioclase

表1 单矿物含钪量

Table 1 Scandium-bearing single minerals

单矿物类型	磁性特征	钪品位/(g/t)
长石单矿物	非磁性矿物	30.7
角闪石单矿物	弱磁性矿物	92.3
磁铁矿	强磁性矿物	29.0

注:数据来源于甘肃省地质调查院。

10^{-6}) (黎彤, 1976), LREE 略富集。球粒陨石标准化 REE 配分曲线图(图 3a)显示, 各样品曲线较为一致, 轻重稀土分异较小, 显示其来自相同的母岩浆, 轻稀土配分曲线略微右倾, 重稀土配分相对平坦, 样品表现出明显的负 $\delta(\text{Eu})$ 异常暗示曾分离结晶过大量的斜长石。

岩石微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 3b)显示, 强不相容元素配分曲线整体呈不规则波动,

大离子亲石元素(LILE) K、Rb、Ba、Sr、U 富集, 但富集程度明显不同, 相对亏损高场强元素(HFSE) Nb、Zr、Hf、Th 及 P。

5 锆石 U-Pb 测年

5.1 样品采集及特征

锆石同位素测年样品采集位置见图 1a, 岩性为角闪石岩, 岩石呈黑色, 块状构造, 半自形柱粒结构, 矿物成分主要由角闪石组成, 含量在 95% 以上, 副矿物有少量钛铁矿及榍石。角闪石矿物种属为普通角闪石, 晶体形态多呈半自形柱状, 粒径大小一般在 0.5~6 mm, 为不等粒结构; 钛铁矿多呈不规则粒状, 少数呈小板状, 粒径大小在 0.05~0.4 mm, 矿物晶体常部分被榍石交代, 星散分布于岩石之中; 榍石晶体呈细小楔状或柱状, 粒径一般小于 0.15 mm, 零星分布(图 2c)。样品新鲜干净, 未见明

表2 孙家岭岩体主量元素分析结果(%)
Table 2 Major element content of Sunjialing intrusion (%)

样品号	岩石类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	灼失量	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	Mg [#]	m/f
SJ1-Q1	角闪石岩	43.80	12.84	4.11	9.90	11.06	12.22	0.57	1.38	1.79	0.04	0.17	2.11	0.64	0.020	0.62	1.58
SJ1-Q2	角闪石岩	43.54	14.41	4.11	8.63	11.37	11.46	0.76	1.30	1.62	0.03	0.16	2.58	1.00	0.040	0.62	1.64
SJ1-Q3	角闪石岩	46.11	13.06	3.07	9.90	10.42	11.28	0.55	1.70	1.62	0.04	0.16	2.06	0.59	0.020	0.61	1.57
SJ2-Q1	含斜长石角闪石岩	42.17	15.07	4.57	9.51	12.09	10.41	0.55	1.24	1.69	0.05	0.16	2.47	0.95	0.050	0.58	1.35
SJ2-Q2	含斜长石角闪石岩	44.05	14.66	4.42	8.83	11.21	10.60	0.72	1.38	1.61	0.04	0.16	2.28	0.89	0.060	0.60	1.46
SJ2-Q3	含斜长石角闪石岩	45.48	13.48	3.98	9.29	10.73	10.87	0.50	1.82	1.67	0.04	0.18	1.93	0.61	0.030	0.60	1.48

注:测试单位为西安地质矿产研究所,仪器型号为Axios型X射线荧光光谱仪。

表3 孙家岭岩体微量及稀土元素分析结果(10⁻⁶)
Table 3 Trace elements content and REE element content of Sunjialing intrusion (10⁻⁶)

分析项目	SJ1-Q1 角闪石岩	SJ1-Q2 角闪石岩	SJ1-Q3 角闪石岩	SJ2-Q1 含斜长石角闪石岩	SJ2-Q2 含斜长石角闪石岩	SJ2-Q3 含斜长石角闪石岩
Cr	155	169	140	119	126	65.0
Ni	59.8	65.0	54.8	55.0	55.4	30.8
Co	74.0	64.8	65.0	66.0	60.6	34.2
Cd	0.36	0.35	0.50	0.47	0.34	0.82
Li	11.3	10.7	10.3	9.24	12.9	4.82
Rb	11.4	19.6	13.6	9.68	14.1	4.10
Cs	0.89	1.08	1.80	0.50	0.86	0.24
W	1.57	5.45	1.06	0.64	0.85	1.83
Sr	112	206	123	344	236	98.1
Ba	56.3	135	60.7	72.0	80.4	33.8
Sc	98.9	99.9	92.1	84.2	83.4	43.9
Nb	3.18	2.67	2.60	2.07	2.41	1.72
Ta	0.60	0.35	0.31	0.28	0.28	0.18
Zr	17.4	14.7	26.5	17.2	21.2	12.1
Hf	0.90	0.80	1.15	0.90	1.06	0.57
Be	0.38	1.06	3.42	0.58	0.50	0.46
Ga	17.8	17.9	18.1	19.5	18.7	11.1
Sn	1.52	1.95	2.92	2.03	1.85	1.63
Ge	1.27	1.60	1.39	2.16	1.19	2.42
U	0.52	0.63	0.47	0.37	0.77	0.74
Th	0.51	0.24	0.65	0.25	0.59	0.28
La	2.16	2.17	2.96	3.01	3.42	2.65
Ce	6.11	6.13	7.97	8.52	9.21	6.98
Pr	1.08	1.08	1.29	1.45	1.50	1.11
Nd	6.30	6.19	7.00	8.02	8.28	5.75
Sm	2.46	2.37	2.56	2.71	2.81	1.82
Eu	0.64	0.67	0.68	0.67	0.73	0.58
Gd	2.76	2.66	2.87	3.02	3.06	2.09
Tb	0.50	0.47	0.52	0.55	0.55	0.34
Dy	3.38	3.15	3.38	3.65	3.72	2.27
Ho	0.68	0.66	0.68	0.72	0.75	0.46
Er	1.82	1.66	1.84	1.99	1.98	1.21
Tm	0.26	0.24	0.26	0.28	0.28	0.18
Yb	1.55	1.50	1.55	1.63	1.70	1.05
Lu	0.21	0.20	0.21	0.23	0.24	0.15
Y	20.00	18.50	19.10	20.50	20.80	13.40

注:测试单位为西安地质矿产研究所,仪器型号为SX-50型ICP-MS等离子体质谱仪。

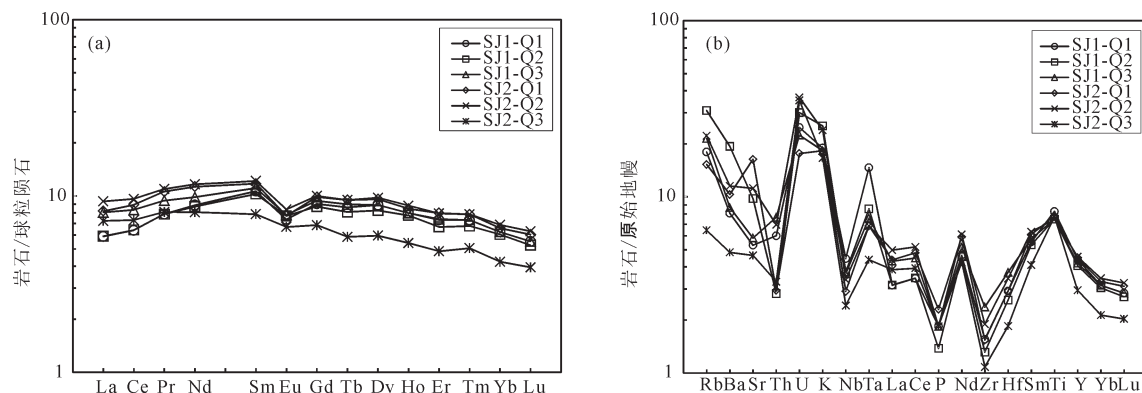


图3 孙家岭岩体稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)
(球粒陨石和原始地幔标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized spider diagram of trace elements (b) in Sunjialing intrusion

显蚀变,重约30 kg。

5.2 样品处理及分析方法

锆石的分选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室进行。对样品进行清洗后,粉碎至80~100目,采用重液法和电磁法进行分选,在双目镜下精选、剔除杂质,尽量挑选无包裹体、无裂纹和透明度高的晶形完好的锆石颗粒作为测定对象。然后将其与标准锆石一起制成环氧树脂样品靶,打磨抛光并使其露出中心部位,通过扫描电镜进行阴极荧光(CL)成像观察和照相,以确定单颗粒锆石晶体的形态、结构特征以及标定测年点。

激光剥蚀等离子体质谱LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年测试在中国地质科学院矿产资源研究所MC-ICP-MS实验室完成,所用仪器为Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及与之配套的New wave UP 213激光剥蚀系统。锆石定年激光剥蚀所用斑束直径为25 μm ,频率为10 Hz,能量密度约为2.5 J/cm²,以He为载气。激光剥蚀采用单点方式,锆石U-Pb定年以锆石GJ-1为外标,U、Th含量以锆石M127(U=923 $\times 10^{-6}$; Th=439 $\times 10^{-6}$; Th/U=0.475)为外标进行校正(Nasdala et al.,2008),测试过程中在每测定5个样品前后重复测定2个锆石GJ1对样品进行校正,并测量一个锆石Plesovice,观察仪器的状态和测试的重现性,锆石标准的重现性在1% (2 σ)左右,详细实验测试参数及过程可参见侯可军等(2009)。数据处理采用ICPMSDataCal程序(Liu et al.,2008),锆石年龄谐和图用Isoplot3.0程序获得,表达式中所列单个数据点的误差均为1 σ ,加权

平均年龄具95%的置信度。

5.3 分析结果

孙家岭角闪石岩中锆石颗粒粒径100~250 μm ,多呈自形粒状或短柱状,大多数锆石具有岩浆韵律环带特征。根据阴极发光图像(图4)和锆石镜下特征,选取晶形完整,自形程度较好,颗粒较大的20颗锆石进行测试,这些锆石韵律环带清晰,有较宽的结晶环带,各锆石的内部结构相似,Th/U比值为0.33~1.67,除个别样品外,均大于0.4,具有典型的岩浆成因锆石的特征(赵希林等,2008;王彦斌等,2010;卢仁等,2014;谢燮等,2015)。个别分析点由于U含量或普通Pb含量较高,未能获得理想年龄,在计算时剔除,17个数据给出的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄介于(335.1 \pm 6.9)Ma~(345.4 \pm 7.7)Ma(表4),加权平均值为(339.5 \pm 2.6)Ma。17个分析点都分布于谐和线上或其附近,表明这些锆石几乎没有U或Pb的丢失和加入,年龄数据能够代表锆石的结晶年龄(图5,图6)。因此孙家岭角闪石岩的形成时间为(339.5 \pm 2.6)Ma,鉴于所测锆石具典型的岩浆成因特征,其年龄代表了岩体形成的时代。

6 讨论

北山地区经历了南华纪前大陆地壳基底演化,超大陆裂解和洋陆演化,碰撞期后板内伸展和陆内叠覆造山4个演化阶段(徐学义等,2008)。古生代北山及其邻区主要经历了3个构造演化阶段,震旦纪—奥陶纪古陆裂解及洋盆扩张阶段;志留—泥盆纪板块俯冲及碰撞造山阶段;石炭—二叠纪陆内裂谷阶段

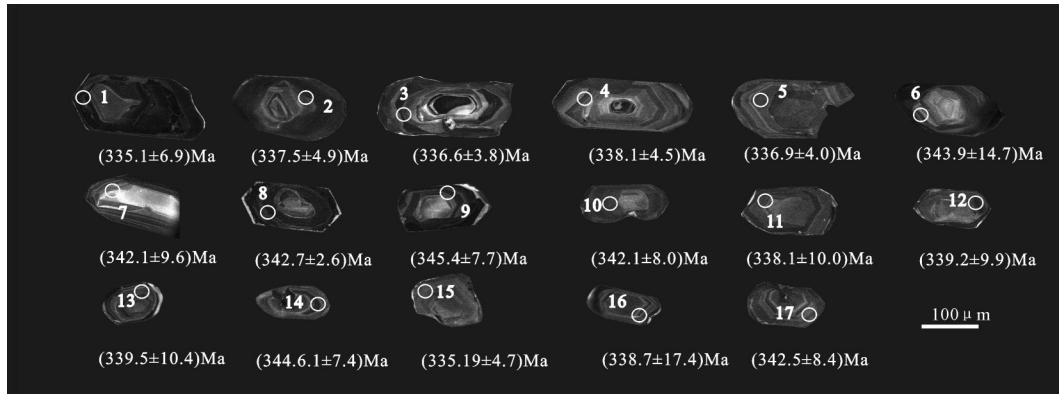


图4 孙家岭角闪石岩锆石阴极发光(CL)图像
Fig.4 CL images of zircon from hornblende of Sunjialing intrusion

(杨合群等,2008)。晚志留世北山古生代洋盆已经俯冲消亡,并开始碰撞造山,晚古生代北山及相邻地区已进入板内伸展阶段(李向民等,2011)。

孙家岭含铀岩体位于雅满苏—红石山—黑鹰山晚古生代裂谷带,岩体侵位于石炭纪白山组,带内发育石炭纪双峰山式火山岩地层,与下伏泥盆纪

地层普遍角度不整合。小热泉子组、雅满苏组、干墩组、绿条山组及白山组被认为形成于碰撞造山后再伸展的裂陷盆地环境(徐学义等,2008)。左国朝等(1990,1996)认为北山石炭纪双峰山式火山岩指示了裂谷环境。夏林圻等(2005,2006)研究认为相邻的东天山石炭纪火山岩产于裂谷环境,并认为蛇

表4 孙家岭角闪石岩LA-ICP-MS U-Pb 锆石年龄分析结果
Table 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of hornblende from Sunjialing intrusion

测点号	成分/10 ⁻⁶			Th/U	比值						年龄/Ma					
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	Pb	Th	U		1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ
1	65	238	557	0.43	0.0550	0.0042	0.4062	0.0319	0.0534	0.0011	413.0	172.2	346.2	23.0	335.1	6.9
2	59	172	522	0.33	0.0530	0.0032	0.3950	0.0253	0.0537	0.0008	331.5	137.0	338.0	18.4	337.5	4.9
3	81	256	679	0.38	0.0548	0.0021	0.4005	0.0145	0.0536	0.0006	405.6	88.9	342.0	10.5	336.6	3.8
4	83	299	609	0.49	0.0513	0.0024	0.3768	0.0163	0.0539	0.0007	253.8	110.2	324.7	12.0	338.1	4.5
5	72	240	532	0.45	0.0532	0.0021	0.3911	0.0155	0.0537	0.0007	344.5	95.4	335.2	11.3	336.9	4.0
6	36	159	185	0.86	0.0577	0.0064	0.4281	0.0500	0.0548	0.0024	520.4	246.3	361.8	35.6	343.9	14.7
7	42	227	189	1.20	0.0585	0.0058	0.4264	0.0401	0.0545	0.0016	550.0	218.5	360.6	28.5	342.1	9.6
8	523	1923	2961	0.65	0.0519	0.0009	0.3902	0.0061	0.0546	0.0004	283.4	38.9	334.5	4.5	342.7	2.6
9	160	453	931	0.49	0.0564	0.0035	0.4271	0.0269	0.0550	0.0013	477.8	137.0	361.1	19.1	345.4	7.7
10	99	564	338	1.67	0.0513	0.0051	0.3786	0.0356	0.0545	0.0013	253.8	236.1	326.0	26.2	342.1	8.0
11	150	441	900	0.49	0.0506	0.0049	0.3757	0.0365	0.0539	0.0016	233.4	201.8	323.8	26.9	338.1	10.0
12	169	655	713	0.92	0.0586	0.0035	0.4294	0.0252	0.0540	0.0016	553.7	131.5	362.7	17.9	339.2	9.9
13	197	712	1245	0.57	0.0499	0.0034	0.3686	0.0263	0.0541	0.0017	190.8	154.6	318.6	19.5	339.5	10.4
14	203	513	1262	0.41	0.0567	0.0022	0.4234	0.0155	0.0549	0.0012	479.7	87.0	358.5	11.1	344.6	7.4
15	169	557	843	0.66	0.0539	0.0024	0.3933	0.0169	0.0535	0.0008	364.9	100.0	336.8	12.3	335.9	4.7
16	147	420	829	0.51	0.0522	0.0067	0.3759	0.0390	0.0539	0.0029	294.5	270.3	324.0	28.8	338.7	17.4
17	203	586	951	0.62	0.0573	0.0038	0.4258	0.0270	0.0546	0.0014	505.6	146.3	360.2	19.2	342.5	8.4

注:测试单位为 中国地质科学院矿产资源研究所,仪器型号为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS。

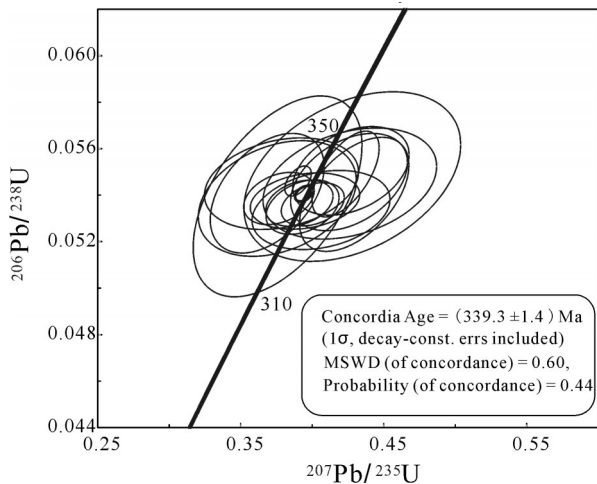
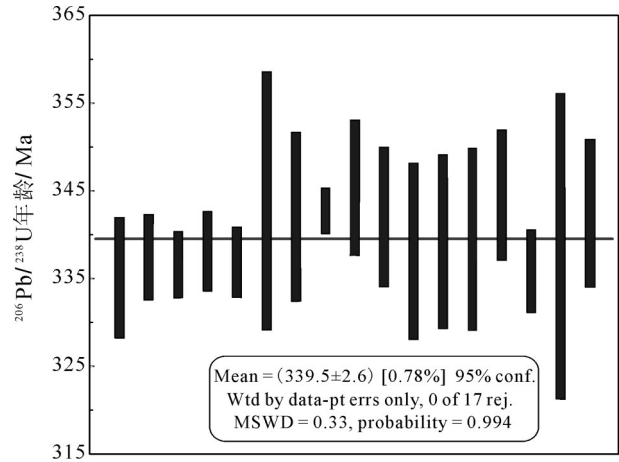


图5 孙家岭角闪石岩锆石U-Pb谐和图

Fig. 5 U-Pb concordia diagram of zircon from hornblende of Sunjialing intrusion

图6 孙家岭角闪石岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权图Fig. 6 Weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of zircon from hornblende of Sunjialing intrusion

绿岩的出现说明裂谷发育程度相当于“红海型”海槽。近年来甘蒙北山地区各基性—超基性岩带中众多铜镍矿(化)点和钒钛磁铁矿床(点)的陆续发现,尤其是小红山钒钛磁铁矿床(424±6)Ma成矿年龄的获得(杨建国等,2015),揭示出甘蒙北山地区古生代可能一直处于裂谷环境。

孙家岭含钨岩体属富铁质超基性岩,全岩成分以高碱、高铝为特征;岩体稀土含量较高,轻重稀土分异较小,样品表现为轻稀土弱富集型,轻、重稀土分馏程度一致性较强,具有板内环境岩浆岩稀土配分特征;微量元素呈现出大离子亲石元素(LILE)K、Rb、Ba、Sr、U富集,高强场元素(HFSE)Nb、Zr、Hf、Th及P显著亏损的板内拉斑玄武岩的特征。在Th/Zr-Nb/Zr构造判别图中,样品大部分落入陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区域内(图7a),在Hf-Th-Ta图解中,样品大部分落在板内碱性玄武岩与E-MORB+板内拉板玄武岩交界区域(图7b)。

本次测试获得孙家岭岩体角闪石中锆石U-Pb同位素年龄为(339.5±2.6)Ma,相当于早石炭世,因此,在结合前人研究成果基础上,综合分析认为,孙家岭含钨岩体为裂谷拉张环境下伸展作用的产物。

在北山地区,海西期是构造-岩浆活动和金属成矿作用的鼎盛时期,矿种和成因类型多种多样,不但在各古大陆板块边缘形成一系列与碱性-偏碱性侵入体有关的铁、钼、金、钨、锡和铜矿床(点),而且在古板块内部及陆缘区域性深大断裂带形成钨、

锡、钼和稀有金属矿床(点)(聂凤军等,2002;杨合群等,2008;杨建国等,2012;孙新春等,2011)。孙家岭含钨岩体所在雅满苏—红石山—黑鹰山晚古生代裂谷带,岩浆作用、构造活动和成矿作用极为明显和突出,过去已发现火山沉积铁矿、斑岩铜矿、基性—超基性岩有关岩浆型铜镍矿及钒钛磁铁矿等多种类型矿床,新近的调查表明还具有寻找钨矿的前景。孙家岭钨矿化主要赋存于海西期角闪石岩岩体中,属基性岩浆型钨矿床,其含矿专属性较为明显,矿(化)体主要受海西期斜长石角闪石岩控制,尤其是岩体中的角闪石岩。其所处地区海西期角闪石岩岩体分布较广,位于孙家岭以西,处于同一构造带的黑山梁角闪石岩岩体已发现具有钨矿化,因此,该地区成矿条件较好,其外围仍具有较大的找矿潜力。

7 结 论

孙家岭含钨岩体主要由含斜长石角闪石岩与角闪石岩组成,岩体几乎全岩矿化,主要钨矿化赋存于角闪石岩中,矿石中钨主要以类质同象形式分布于角闪石矿物中。通过LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb测年,首次获得孙家岭含钨岩体中角闪石岩形成于(339.5±2.6)Ma,相当于早石炭世,为裂谷拉张环境下伸展作用的产物,该时期碱性基性—超基性岩的发现,不仅进一步佐证了北山北部狼娃山一带晚古生代时期已处于裂谷环境,亦为北山地区寻

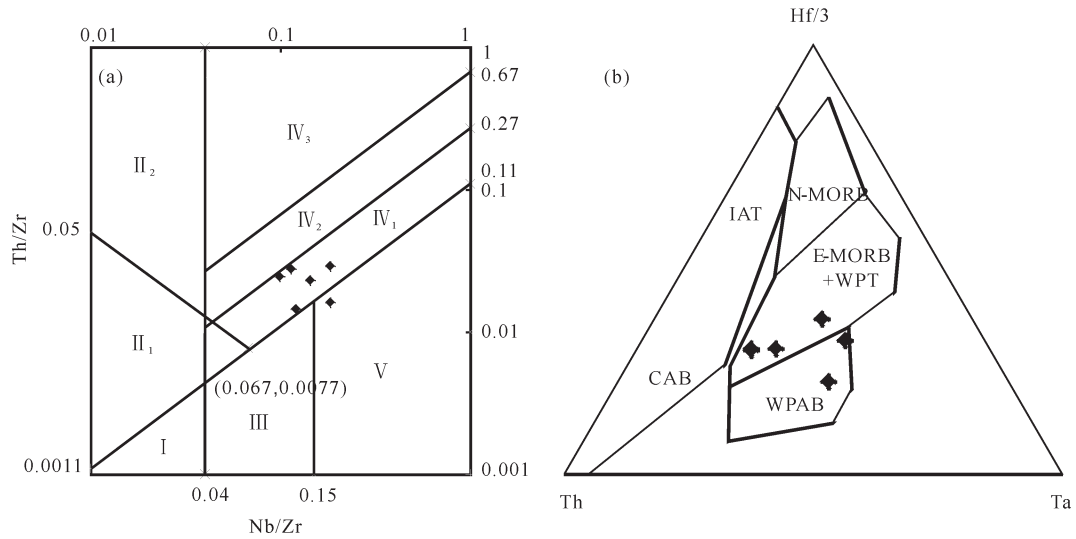


图7孙家岭岩体 Th/Zr- Nb/Zr 双对数判别图(a)(底图据孙书勤等,2007)和 Hf/3-Th-Ta 图解(b)

I—大洋板块发散边缘 N-MORB 区; II—板块汇聚边缘(II 1—大洋岛弧玄武岩区; II 2—陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区); III—大洋板内(洋岛、海山玄武岩区、T-MORB、E-MORB 区); IV—大陆板内(IV 1—陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区; IV 2—大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区; IV 3—陆-陆碰撞带玄武岩区); V—地幔热柱玄武岩区; N-MORB—N 型洋中脊玄武岩; E-MORB—E 型洋中脊玄武岩; WPT 板内拉斑玄武岩; WPAB—板内碱性玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; CAB—岛弧钙-碱性玄武岩

Fig. 7 Th/Zr and Nb/Zr double logarithmic plot (a) and Hf/3-Th-Ta diagram of Sunjialing intrusion (b)

I -The margin of divergent oceanic plate; II -The margin of convergent plate (II 1-Oceanic island arc; II 2-Island arc and volcanic arc of continental margin); III -The oceanic intraplate (the oceanic island and seamount, T-MORB, E-MORB); IV -Within continental plate (IV 1-Continental rift; IV 2-Continental tensional zone; IV 3-Collision zone of two continental plates); V -Mantle plume; N-MORB-Normal type mid-ocean ridge basalt; E-MORB-enriched MORB; WPT-Within plate tholeiite; WPAB-Within plate alkaline tholeiite; IAT- Island arc tholeiite; CAB-Calc-alkaline basalts

找稀有金属矿床开阔了视野。

致谢:衷心感谢审稿专家及编辑老师在论文撰写和修改的过程中给予的大力支持与帮助。

References

Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting ICP-MS[J]. Mineral Deposits, 28(4): 481-492(in Chinese with English abstract).
 Li Tong. 1976. Chemical element abundances in the earth and its major shells[J]. Geochimica, (3): 167-174(in Chinese with English abstract).
 Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Gunther D, Xu J, Gao C and Chen H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. Chem. Geol., 257: 34-43.
 Li Xiangmin, Yu Jiayuan, Wang Guoqiang, Wu Peng, Zhou Zhiqiang. 2011. 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, 30(10):1501-1507(in Chinese with English abstract).
 Lu Ren, Liang Tao, Lu Xinxiang, Bai Fengjun, Cheng Jingliang, Wen Jingjing. 2014. Geochronology and geochemical features of Longwogou granite in Xiaoshan Mountain, western Henan

Province, and their geological implications[J]. Geology in China, 41 (3): 756-772(in Chinese with English abstract).
 Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, Mattinson J M, Corfu F, Dorr W, Kamo S L, Kennedy A K, Kronz A, Reiners P W, Frei D, Kosler J, Wan Y S, Golze J, Hager T, Kroner A, Valley J W. 2008. Zircon M257 - a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 32: 247-265.
 Nie Fengjun, Jiang Siyuan, Bai Daming. 2002. 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 Publishing House, 1-408. (in Chinese with English abstract).
 Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313-345.
 Sun Shuqin, Zhang Chengjiang, Zhao Songjiang. 2007. Identification of the tectonic settings for continental intraplate by trace elements[J]. Geotectonica et Metallogenia, 31(1): 104-109 (in Chinese with English abstract).
 Sun Xinchun, Zhang Yulian, Gao Yongwei. 2011. Paleozoic crustal evolution and mineralization of the Northern Beishan in Gansu[J].

- Gansu Geology, 20(2):46–50(in Chinese with English abstract).
- Wang Yanbin, Wang Denghong, Han Juan, Chen Zhenghui, Wang Qingli. 2010. U–Pb dating and Hf isotopic characteristics of zircons from quartz–diorite in the Yijiang REE–Sc deposit, Rucheng County, Hunan: Constraints on the timing of Caledonian magmatic activity in South China[J]. Geology in China, 37(4): 1062–1070(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan. 2000. The Petrologic Characteristics of hornblende in Danailingou, Inner Mongolia[J]. Geological Review, 46(3): 301–306(in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Li Xiangmin, Xu Xueyi, Xia Zuchun, Ma Zhongping, Wang Lishe. 2005. Petrogenetic Evolution of the Bayan Gol Ophiolite–Geological Record of an Early Carboniferous "Red Sea Type" Ocean Basin in the Tianshan Mountains, Northwestern China[J]. Acta Geologica, 79(2): 174–192.
- Xia Linqi, Li Xiangmin, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Ma Zhongping, Wang Lishe. 2006. Carboniferous–Permian rift–related volcanism and mantle plume in the Tianshan, Northwestern China[J]. Northwestern Geology, 39(1): 2–49 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xie, Yang Jianguo, Wang Xiaohong, Wang Lei, Jiang Lei, Jiang Anding. 2015. Zircon SHRIMP U–Pb dating of Hongliugou mafic–ultramafic complex in the Beishan area of Gansu Province and its geological significance[J]. Geology in China, 42(2): 396–405(in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, He Shiping, Wang Hongliang, Chen Junlu, Zhang Erpeng, Feng Yimin. 2008. The geological survey of Northwest Chinese: Qinling, Qilian and Tianshan area[M]. Beijing: Science Publishing House, 1–347(in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Li Ying, Li Wenming, Yang Jianguo, Zhao Guobin, Sun Nanyi, Wang Xiaohong, Tan Wenjuan. 2008. General discussion on metallogenetic tectonic setting of Beishan mountain, Northwestern China[J]. Northwestern Geology, 41(1): 22–27(in Chinese with English abstract).
- Yang Jianguo, Xie Chunlin, Wang Xiaohong, Xie Xie, Wang Lei, Wang Jingping. 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).
- Yang Jianguo, Wang Lei, Wang Xiaohong, Xie Xie, Jiang Anding. 2015. SHRIMP zircon U–Pb dating of the Xiaohongshan vanadium–titanium magnetite deposit, Ejina Banner, Beishan, Inner Mongolia, and its geological implications[J]. Geological Bulletin of China, 34(9): 1699–1705 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, He Guoqi. 1990. Plate tectonics and metallogenic regularities in Beishan region[M]. Beijing: Peking University Publishing House, 1–209(in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Li Maosong. 1996. Formation and evolution of the early Paleozoic lithosphere in the Beishan area, Gansu–Inner Mongolia, China[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Publication, 1–120 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xilin, Mao Jianren, Chen Rong, Xu Naizheng. 2008. SHRIMP zircon dating of the Zijinshan pluton in southwestern Fujian and its implications[J]. Geology in China, 35(4): 590–597(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA–MC–ICP–MS 锆石微区原位 U–Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481–492.
- 黎彤. 1976. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, (3): 167–174.
- 李向民, 余吉远, 王国强, 武鹏, 周志强. 2011. 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, 30(10): 501–1507.
- 卢仁, 梁涛, 卢欣祥, 白凤军, 成静亮, 温静静. 2014. 豫西崤山龙卧沟岩体锆石 U–Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 中国地质, 41(3): 756–772.
- 聂凤军, 江思宏, 白天明. 2002. 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, 1–408.
- 孙书勤, 张成江, 赵松江. 2007. 大陆板内构造环境的微量元素判别[J]. 大地构造与成矿学, 31(1): 104–109.
- 孙新春, 张雨莲, 高永伟. 2011. 甘蒙北山北带古生代地壳演化与成矿作用[J]. 甘肃地质, 20(2): 46–50.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟. 2000. 内蒙古大乃林沟角闪石岩岩石学特征[J]. 地质论评, 46(3): 301–306.
- 王彦斌, 王登红, 韩娟, 陈郑辉, 王清利. 2010. 湖南益将稀土–铀矿的石英闪长岩锆石 U–Pb 定年和 Hf 同位素特征: 湘南加里东期岩浆活动的年代学证据[J]. 中国地质, 37(4): 1062–1070.
- 夏林圻, 李向民, 夏祖春, 徐学义, 马中平, 王立社. 2006. 天山石炭–二叠大火成岩省裂谷火山作用与地幔柱[J]. 西北地质, 39(1): 2–49.
- 徐学义, 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 张二朋, 冯益民. 2008. 中国西北部地质概论——秦岭、祁连、天山地区[M]. 北京: 科学出版社, 1–347.
- 谢燮, 杨建国, 王小红, 王磊, 江磊, 姜安定. 2015. 甘肃北山红柳园铜镍矿化基性–超基性岩体 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 42(2): 396–405.
- 杨合群, 李英, 李文明, 杨建国, 赵国斌, 孙南一, 王小红, 谭文娟. 2008. 北山成矿构造背景概论[J]. 西北地质, 41(1): 22–27.
- 杨建国, 谢春林, 王小红, 谢燮, 王磊, 王静平. 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.
- 杨建国, 王磊, 王小红, 谢燮, 姜安定. 2015. 内蒙古北山额济纳旗小红山钛磁铁矿床 SHRIMP 锆石 U–Pb 定年及其意义[J]. 地质通报, 34(9): 1699–1705.
- 左国朝, 何国琦. 1990. 北山板块构造及成矿规律[M]. 北京: 北京大学出版社, 1–209.
- 左国朝, 李茂松. 1996. 甘蒙北山地区早古生代岩石圈形成和演化[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1–120.
- 赵希林, 毛建仁, 陈荣, 徐乃政. 2008. 闽西南地区紫金山岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 35(4): 590–597.