宁夏泾源石咀子古元古代 A 型花岗岩的形成时代及其地质意义*

高山林[1] 林晋炎[2] 陆彦俊[3]
GAO ShanLin[1], LIN JinYan[2] and LU YanJun[3]

1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083
2. 西北大学地质系,西安 710069
3. 宁夏地质调查院,银川 750021
1. *The Petroleum Exploration and Production Research Institute of SINOPEC*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Geology Department of Northwest University*, *Xi'an* 710069, *China*
3. *Ningxia Geological Survey Institute*, *Yinchuan* 750021, *China*
2012-10-06 收稿, 2013-04-01 改回.

Gao SL, Lin JY and Lu YJ. 2013. Formation epoch and its geological implications of Paleoprotozoic A-ype granite in Shizuizi of Jingyuan County, Ningxia Province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8):2676－2684

Abstract The Shizuizi A-type granite is found in the southern part of Helan aulacogen, western margin of the North China Craton and mainly consist of K-feldspar granite porphyry. The granite is characterized by high silicon and rich potassium, including $Na_2O + K_2O$ average 7.61%, $K_2O/Na_2O = 2.17 \sim 7.39$, $Al_2O_3 = 10.59\% \sim 11.84\%$, and its A/CNK = 0.86 ~ 1.11 (1.01 on average), and thus is belong to subalkaline metaluminous to weakly prealuminous series, identified as A-type granite. The abundance of $\sum$REE is high, ranging from 340.4×10^{-6} to 468.9×10^{-6}. The granite show a LREE enrichment pattern and obviously intermediate negative Eu anomalies. The trace element geochemistry is characterized evidently by negative anomaly of high strength field elements Ta, Nb, Ti, etc. and positively Rb, Ba, Th, etc., and shows the characteristics of post-orogenic granite. The LA-ICP-MS zircon U-Pb age is 1803 ± 15Ma, which indicates that the Helan aulacogen is formed during Late Paleoprotozoic, and is related to the break-up of the North China Craton from the Columbia supercontinent during the end of Late Paleoprotozoic period.
Key words Helan aulacogen; Paleoprotozoic; A-type granite; Break-up of continent

摘 要 对华北克拉通西缘贺兰坳拉谷南段泾源县石咀子花岗斑岩进行了岩石地球化学和年代学研究结果表明,石咀子花岗岩体具有高硅($SiO_2 = 72.28\% \sim 76.69\%$)、富钾特征,$Na_2O + K_2O$ 平均值 7.61%,K_2O/Na_2O 为 2.17 ~ 7.39,$Al_2O_3 = 10.59\% \sim 11.84\%$,A/CNK 为 0.86 ~ 1.11(平均为 1.01),低钙镁,岩石为高硅准铝质-弱过铝质 A 型花岗岩;稀土元素总量较高,为 $340.4 \times 10^{-6} \sim 468.9 \times 10^{-6}$,轻稀土富集,具有中等的负 Eu 异常,配分曲线呈典型的右倾"海鸥型";高场强元素 Ta、Nb、Ti 具有明显的负异常,大离子亲石元素 Rb、Ba、Th 等相对富集,花岗岩具有造山后岩石地球化学特征。锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 1803 ± 15Ma,为古元古代晚期,表明贺兰坳拉谷形成于古元古代晚期,其形成与华北克拉通古元古代晚期大陆裂解过程有关。
关键词 贺兰坳拉谷;古元古代;A 型花岗岩;大陆裂解
中图法分类号 P588.121; P597.3

---

* 本文受国家重大专项(2011ZX05005-004)资助.
第一作者简介:高山林,男,1968 年生,高级工程师,主要从事油气盆地分析,E-mail: gaosl.syky@sinopec.com

1 引言

尽管对华北克拉通前寒武纪结晶基底的构造格局划分及演化有不同认识，但大多数学者都承认在古元古晚期-中元古代早期华北克拉通广泛发育拉张裂解事件，该事件是对Columbia超大陆裂解的强烈反映（翟明国和彭澎，2007；Zhao and Zhou，2009；陆松年等，2010）。华北克拉通在中元古代形成了至少5个拗拉谷（或裂谷），包括燕辽-太行拗拉谷、白云鄂博裂谷-渣尔泰裂谷、贺兰山拗拉谷、晋陕拗拉谷和熊耳-中条拗拉谷（李江海等，2000），其中发育有大量不同类型、年龄峰值为1.8～1.6Ga的火山岩组合，如华北克拉通南缘熊耳-中条拗拉谷发育了以熊耳群为主的火山岩系（赵太平等，2004，2007；徐勇航等，2007），还发育有同期花岗闪长岩和斑岩（崔敏利等，2010）及基性岩墙群（侯贵廷等，2010；胡国辉等，2010；胡俊良等，2007），北部燕辽-太行拗拉谷发育大规模基性岩墙群和碱性侵入岩（彭澎等，2004；任康绪等，2006；阎国翰等，2007；杨进辉等，2007；董春艳等，2010）。对贺兰山拗拉谷、晋陕拗拉谷的存在主要依据石油勘探地震资料和少量露头沉积学证据：一是这两个裂谷地区发育巨厚的中元古界地层，其中贺兰拗拉谷南段地层厚度可达4000～5000m，且其沉积相序和岩性组合与燕辽拗拉谷的具有很强的相似性（华洪和邱树玉，2001；高林志等，2010）；二是在地震剖面上可以看到元古界内发育众多的伸展断层，中元古代地层厚度展布明显受同沉积期断裂控制，这与燕辽拗拉谷形态类似（王同和，1995）。但是关于贺兰拗拉谷发育的确切岩石学和年代学证据目前还未见报道。我们在泾源县新民乡石咀子村附近发现了一处元古宙的花岗斑岩，并对其进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb定年和地球化学特征分析，从中获得与古元古代构造热事件相当的年龄值，从而为进一步认识华北克拉通西部贺兰拗拉谷的成因等地质问题提供了新的证据。

2 岩体地质概况

研究区处于中宁-海原-关山-宝鸡断裂以东的鄂尔多斯地块边缘区，为元古宙贺兰坳拉谷的南段。对元古宙贺兰坳拉谷的研究主要体现在两个方面，其一是古元古代变质岩的研究，贺兰山北段的孔兹岩系，形成时间是1.9～2.1Ga（周喜文等，2010；耿元生等，2010；校培喜等，2011），与鄂尔多斯地块北缘的集宁岩群和乌拉山岩群十分相似，与吕梁构造运动的时限一致，为古元古代华北克拉通成熟陆壳演化阶段的产物；元古宙的侵入岩报道主要见于贺兰山坳拉谷北段地区，年龄均大于1.85Ga（耿元生等，2010），为古元古代，而南段未见有元古宙侵入岩报导。宁夏地矿局在进行泾源县幅1：5万填图中，在泾源县新民乡石咀子附近发现了一处花岗斑岩，未变质，坐标35°21′04.5″，106°26′22″，采样点花岗岩体目估长约300m，宽50m，顶部具有清晰的风化面，上被古近系的清水营组或第四系马兰黄土不整合覆盖（图1），现场初步定为喜山期侵入岩。岩石具有斑状结构，基质为细粒结构，

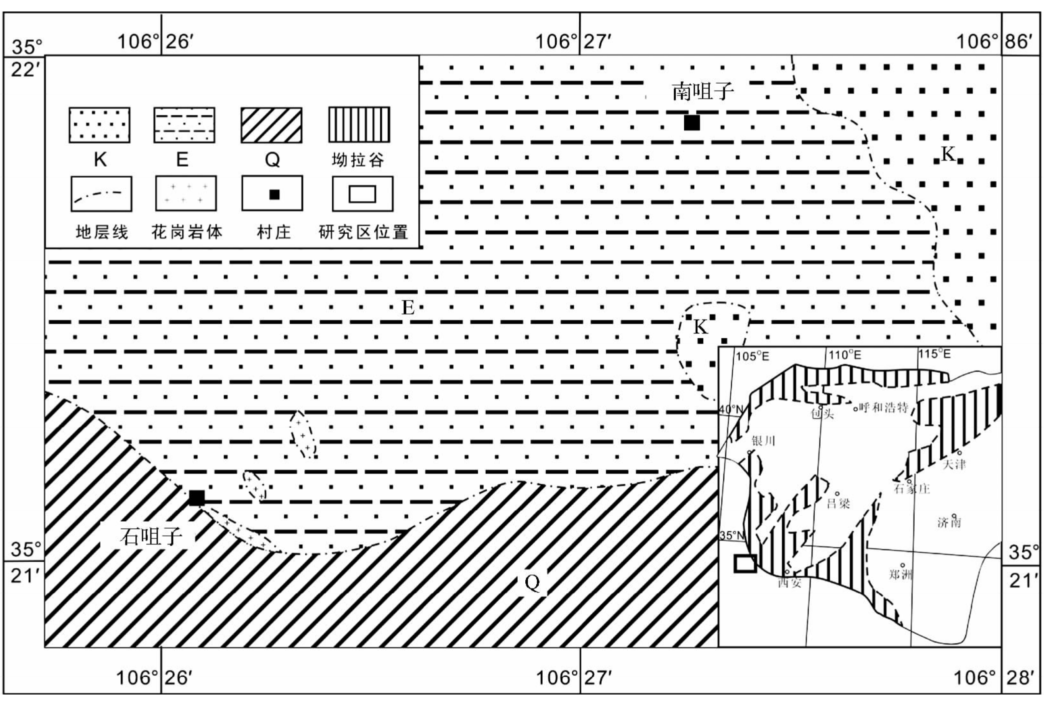

图1 古元古代泾源花岗岩分布区地质略图（拗拉谷分布据侯贵廷等，2010改编）

Fig. 1 Simplified geological map of the Jingyuan granite outcrop (aulacogen distribution map modified after Hou *et al.*, 2010)

表 1 泾源花岗岩的主量元素(wt%)和微量元素($\times10^{-6}$)分析结果

Table 1 Major element (wt%) and trace element ($\times10^{-6}$) compositions of the Shizuizi granites

Sample	jy-01	jy-02	jy-03	jy-04	jy-06	jy-07	jy-08	jy-12
SiO_2	74.49	73.42	72.83	73.83	72.72	72.28	76.65	76.69
TiO_2	0.44	0.44	0.51	0.41	0.48	0.46	0.37	0.35
Al_2O_3	11.22	11.15	11.84	11.29	10.96	10.78	10.59	10.59
Fe_2O_3	4.08	4.67	4.54	4.26	4.77	4.84	3.56	2.55
MnO	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03
MgO	0.59	0.59	0.57	0.56	0.41	0.42	0.19	0.16
CaO	0.50	1.33	0.93	0.56	1.75	1.53	0.17	0.84
Na_2O	1.89	1.84	1.90	2.19	2.38	1.87	0.95	1.14
K_2O	5.68	5.06	5.90	5.38	5.17	5.77	7.02	6.77
P_2O_5	0.08	0.07	0.09	0.07	0.08	0.08	0.06	0.05
LOI	1.02	0.87	0.92	0.92	1.37	1.47	0.38	0.77
La	95.4	73.3	91.7	103.5	76.3	71.5	79.5	76.3
Ce	193.0	139.9	202.5	182.8	150.3	134.3	151.3	148.2
Pr	22.3	16.62	20.77	22.13	17.60	15.52	17.57	16.94
Nd	90.6	68.6	84.0	89.3	71.4	64.8	70.6	68.6
Sm	14.94	12.72	14.63	15.96	12.95	11.73	13.07	12.31
Eu	1.93	1.43	1.78	1.89	1.58	1.48	1.27	1.21
Gd	14.6	11.81	13.89	13.99	12.68	11.05	12.32	11.68
Tb	2.140	1.93	2.08	2.13	2.03	1.82	1.89	1.87
Dy	13.5	12.14	13.27	12.38	13.10	11.33	12.18	11.23
Ho	2.66	2.34	2.56	2.35	2.47	2.17	2.25	2.21
Er	7.44	6.78	8.03	6.62	6.98	6.35	6.84	6.22
Tm	1.26	1.17	1.39	1.09	1.23	1.08	1.16	1.03
Yb	7.63	7.07	8.59	6.56	7.30	6.39	7.19	5.96
Lu	1.08	0.98	1.21	0.95	1.07	0.91	0.93	0.82
Ba	1297	1272	1447	1293	1023	1037	1744	1558
Sr	54.30	125.4	75.99	53.87	98.96	96.96	50.26	61.13
Ga	17.4	18.88	21.99	19.20	16.40	14.38	16.97	14.94
Pb	5.63	4.34	5.45	4.14	5.37	4.98	9.15	12.05
Rb	124.0	119.7	132.4	124.9	100.4	97.61	176.5	162.8
Th	15.0	13.9	16.3	13.4	14.4	13.3	15.4	14.2
U	2.31	2.37	2.66	2.21	2.36	2.39	1.93	2.09
Zr	463	420	4940	409	426	380	407	382
Nb	17.6	16.26	19.57	15.66	17.41	15.44	14.98	14.50
Hf	12.9	11.79	13.65	11.52	12.33	11.48	12.41	11.78
Ta	0.99	0.97	1.09	0.95	0.99	0.85	0.91	0.86
Y	59.0	51.7	51.1	49.4	55.1	49.8	54.3	48.9

斑晶成分主要为石英、钾长石、酸性斜长石,大小 1~15mm 不等,石英具有港湾状熔蚀,约占 10%,长石呈板状或柱状,以钾长石为主,占 8%,长石斑晶具有少量的高岭石、绢云母化现象,基质由细粒的钾长石、酸性斜长石、石英等矿物的集合体组成,蚀变中等到强,微观定名为花岗斑岩。

3 岩石化学特征

主微量元素分析均在中国科学院地质与地球物理研究所进行,测试流程见陈志广等(2010)。从表 1 可以看出,样品具有高硅(SiO_2 = 72.28% ~76.69%)特征,相对富铝,Al_2O_3 = 10.59% ~11.84%,岩石的 Na_2O 和 K_2O 含量高,Na_2O+K_2O 平均值 7.61%,且 K_2O/Na_2O 为 2.17~7.39,富钾是其最显著的特点之一,在 SiO_2-K_2O 图解中落入钾玄岩系列,在 TAS 图解中落入亚碱性花岗岩区域;样品的 MgO、TiO_2 和 P_2O_5 含量相对低(MgO = 0.16% ~0.59%,TiO_2 = 0.35% ~0.51%,P_2O_5 = 0.05% ~0.09%)。样品的 MgO、TiO_2、P_2O_5、Sr、Zr 等均与 SiO_2 呈负相关关系,表明随着岩浆演化可能存在斜长石、Fe-Ti 氧化物和磷灰石等的分离结晶。岩石铝饱和指数 A/CNK 值(0.86~1.11),多数小于 1.1,岩石的碱铝指数 AKI 介于 0.76~0.87,在 A/CNK-A/NK 关系图上,样品投点在亚碱性准铝质-弱过铝质区(图 2),CIPW 标准矿物中多有刚玉(C)分子出现,属铝质花岗岩;碱度率指数(AR)为 3.47~6.71,平均 4.65,在 AR-SiO_2 碱度关系图中样品投点全部落在碱性区,但标准矿物中未见霞石(Ne)、白榴石(Lc)、霓石(Ac)等碱性标准矿物,反映出该岩体岩石的碱质并不过剩,总体显示了富硅钾低钙镁弱碱性花岗岩特征。

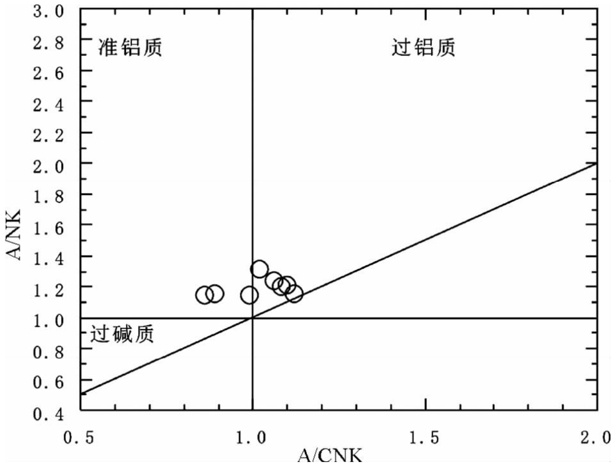

图 2 泾源花岗岩 A/NK-A/CNK 图解

Fig. 2 A/NK-A/CNK diagram of the Jingyuan granites

4 稀土元素和微量元素特征

花岗岩样品稀土元素总量(∑REE)较高(表 1),为 340.4×10^{-6} ~ 468.9×10^{-6},远高于 I 型和 S 型的稀土总量 114.7×10^{-6} 和 173.1×10^{-6}(吴锁平等,2007),轻重稀土元素比值(LREE/HREE)为 7.04~9.02,$(La/Yb)_N$ 为 7.44~11.32,相对富集轻稀土。δEu 为 0.11~0.51,Eu 亏损显著;Ce 含量较高,均值达 163×10^{-6}。$(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 值分别为 3.72~4.19 和 1.34~1.62,轻重稀土元素分馏明显,所有样品均表现出轻稀土比重稀土分馏更显著,稀土元素球粒陨石标准化分布型式呈典型的 A 型花岗岩"海鸥型"样式(图 3)。

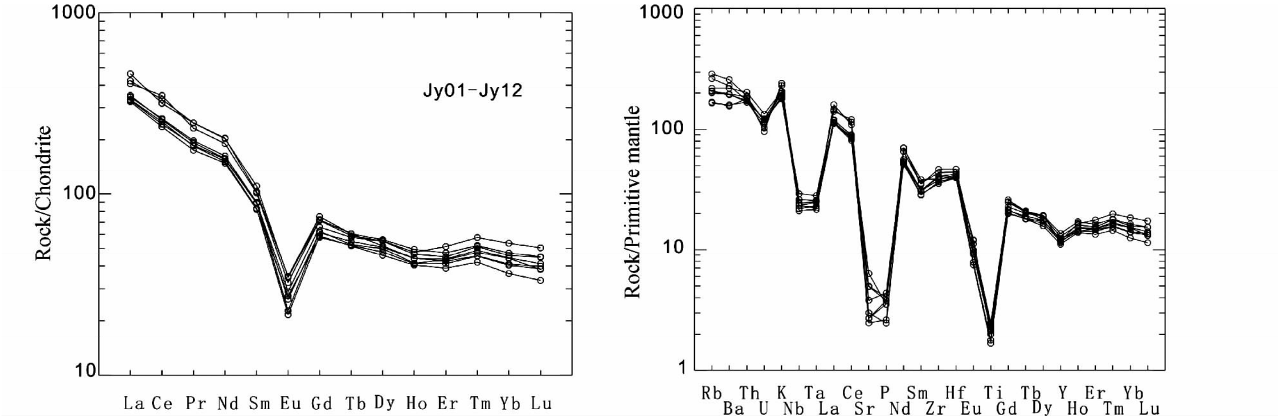

图 3　泾源花岗岩稀土元素配分曲线和微量元素配蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3　Chondrite-normalized REE distribution patterns and primitive mantle-normalized spidergrams of Jingyuan granite samples (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

微量元素中大离子亲石元素 Rb($97.6\times10^{-6}\sim176.5\times10^{-6}$)、Ba($1022\times10^{-6}\sim1743\times10^{-6}$)、Th($13.32\times10^{-6}\sim16.33\times10^{-6}$)、U($1.93\times10^{-6}\sim2.66\times10^{-6}$)等含量高(表1),明显富集 Rb、Ba、Th、K 等大离子亲石元素(LILE),在原始地幔的标准化蛛网图中(图 3)亏损高场强元素,Nb、Ta、Ti (HFSE)、P、Sr、Eu 十分明显负异常,相对富集 Zr、Hf,Zr 达 380×10^{-6}以上,这些特征与扬子地块北缘华山观元古代环斑花岗岩(张丽娟等,2011)、吕梁地区晚元古代晚期造山后花岗岩(耿元生等,2004)、柴北缘元古界环斑花岗岩(胡能高等,2007)的特征接近。Sr 、Eu 强烈负异常表明岩浆发生了明显的长石分离结晶,P 和 Ti 亏损说明岩浆经历了磷灰石以及钛铁矿等矿物的分离结晶作用, Nb、Ta 的亏损可能与岩浆源区岩石中陆壳组分的参与有关(Kalsbeek at al. ,2001)。$(Rb/Nb)_N$ 比值为 6.5 ~13.2,明显高于大陆壳的$(Rb/Nb)_N$ 比值(2.2 ~4.7),暗示着陆壳物质的贡献较大,导致 Rb 的含量相对增大。相容组分 Cr、Co、Ni 含量较低,分别为 $2.97\times10^{-6}\sim14.69\times10^{-6}$、$1.78\times10^{-6}\sim3.66\times10^{-6}$、$2.54\times10^{-6}\sim4.06\times10^{-6}$,$Mg^{\#}$相对也低(9.64 ~22.44,平均 16.72),这显示出岩浆地壳来源而非地幔源的特征。

5　锆石 U-Pb 同位素年龄

锆石原位 U-Pb 同位素年龄分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序进行,详细的实验原理和流程及仪器参数见袁洪林等(2003)。岩石锆石 U-Pb 年龄测试结果见(表2),用 LAM-ICPMS Common Lead Correction (ver3. 15)对其进行了普通铅校正,年龄计算及谐和图采用 Isoplot (ver3. 0)完成。

泾源花岗岩体中锆石为无色透明或浅黄色,结晶较好,呈典型的长柱状晶形。锆石的阴极发光图像均具有清晰的震荡环带结构,显示岩浆成因锆石特征。锆石的 Th/U 比值

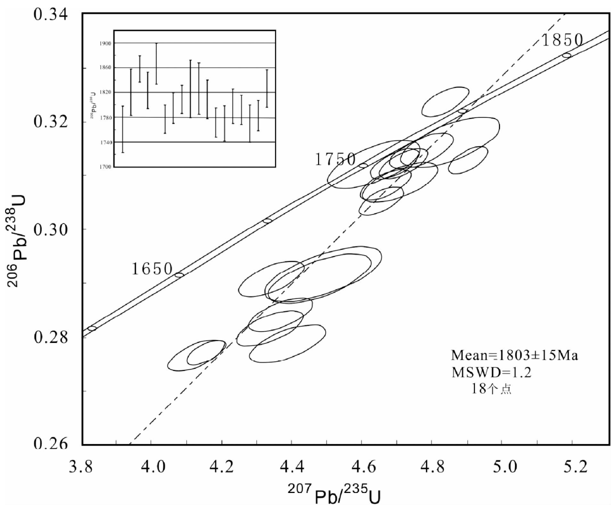

图 4　泾源花岗岩的锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4　U-Pb concordia diagram of zircons from Jingyuan granite

变化范围在 0.26 ~0.96 之间,均大于 0.1,也指示其岩浆成因。锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果见表 2。在 24 次分析结果中,有 18 个测点构成条不一致曲线,与谐和线的上交点为 1804 ± 26Ma,其$^{207}Pb/^{206}Pb$ 加权平均年龄为 1803 ± 15Ma (2σ,MSWD = 1.2)(图 4),两个年龄在误差范围内一致,以加权平均年龄 1803 ± 15Ma 代表泾源花岗岩体的结晶年龄,为古元古代晚期岩浆活动之产物。

6　岩石成因与构造环境探讨

6.1　岩石成因

岩石的 Ga 含量较高,平均 17.5×10^{-6},10000 × Ga/Al 值为 2.52 ~3.51,除一个数据外其余均大于 A 型花岗岩的下限值 2.6,明显高于 I 型和 S 型花岗岩的平均值(分别为 2.1 和 2.28)(Whalen *et al.* ,1987),在 10000Ga/Al-Ce 和 10000Ga/

表 2 泾源花岗岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年数据

Table 2 The LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of the Shizuizi granite

测点号	元素含量($\times10^{-6}$)		U/Th	同位素比值			视年龄(Ma)		
	U	Th		$^{207}Pb/^{206}Pb$ $\pm1\sigma$	$^{207}Pb/^{235}U$ $\pm1\sigma$	$^{206}Pb/^{238}U$ $\pm1\sigma$	$^{207}Pb/^{206}Pb$ $\pm1\sigma$	$^{207}Pb/^{235}U$ $\pm1\sigma$	$^{206}Pb/^{238}U$ $\pm1\sigma$
01	53.8	40.6	1.32	0.1161 ±0.0024	4.5836 ±0.0882	0.2864 ±0.0027	1897 ±37	1746 ±16	1623 ±14
02	61.6	53.8	1.15	0.1077 ±0.0022	4.6343 ±0.0874	0.3122 ±0.0029	1760 ±37	1756 ±16	1751 ±14
04	145.6	125.1	1.16	0.1146 ±0.0025	4.8177 ±0.0977	0.3050 ±0.0031	1873 ±39	1788 ±17	1716 ±16
05	58.8	45.6	1.29	0.1246 ±0.0032	4.8457 ±0.1199	0.2821 ±0.0035	2023 ±45	1793 ±21	1602 ±17
06	70.9	59.3	1.20	0.1113 ±0.0023	4.8523 ±0.0931	0.3163 ±0.0031	1820 ±37	1794 ±16	1772 ±15
07	203.0	183.8	1.10	0.1136 ±0.0013	4.9024 ±0.0369	0.3130 ±0.0016	1858 ±21	1803 ±6	1755 ±8
08	91.2	85.6	1.07	0.1114 ±0.0018	4.3677 ±0.0599	0.2842 ±0.0021	1823 ±29	1706 ±11	1613 ±10
09	75.7	62.1	1.22	0.1141 ±0.0021	4.3879 ±0.0717	0.2788 ±0.0023	1866 ±33	1710 ±14	1585 ±12
10	398.7	371.4	1.07	0.1087 ±0.0014	4.1541 ±0.0357	0.2772 ±0.0015	1778 ±23	1665 ±7	1577 ±8
11	131.2	117.9	1.11	0.1098 ±0.0015	4.6674 ±0.0480	0.3084 ±0.0019	1795 ±25	1761 ±9	1733 ±9
12	227.2	218.1	1.04	0.1106 ±0.0014	4.6548 ±0.0414	0.3053 ±0.0017	1809 ±23	1759 ±7	1718 ±9
13	42.0	24.5	1.71	0.1116 ±0.0029	4.4898 ±0.1103	0.2918 ±0.0034	1826 ±46	1729 ±20	1651 ±17
14	57.5	42.4	1.36	0.1116 ±0.0026	4.4790 ±0.0964	0.2910 ±0.0030	1826 ±41	1727 ±18	1647 ±15
15	78.7	58.0	1.36	0.1106 ±0.0019	4.7091 ±0.0706	0.3089 ±0.0024	1809 ±31	1769 ±13	1735 ±12
16	128.8	107.1	1.20	0.1083 ±0.0014	4.8374 ±0.0443	0.3239 ±0.0018	1772 ±23	1791 ±8	1809 ±9
17	154.4	142.7	1.08	0.1082 ±0.0017	4.1294 ±0.0533	0.2767 ±0.0019	1770 ±28	1660 ±11	1575 ±10
18	88.0	70.6	1.25	0.1099 ±0.0017	4.7691 ±0.0600	0.3147 ±0.0022	1798 ±28	1780 ±11	1764 ±11
19	345.2	89.0	3.88	0.1214 ±0.0015	5.2297 ±0.0459	0.3125 ±0.0018	1977 ±22	1858 ±7	1753 ±9
20	453.0	162.8	2.78	0.1218 ±0.0016	5.6406 ±0.0568	0.3360 ±0.0021	1982 ±24	1922 ±9	1867 ±10
21	194.7	178.6	1.09	0.1096 ±0.0014	4.7178 ±0.0450	0.3123 ±0.0018	1792 ±24	1770 ±8	1752 ±9
22	73.6	59.6	1.23	0.1207 ±0.0035	4.0854 ±0.1131	0.2455 ±0.0032	1967 ±51	1651 ±23	1415 ±17
23	131.3	106.9	1.23	0.1082 ±0.0018	4.3418 ±0.0609	0.2910 ±0.0022	1770 ±30	1701 ±12	1646 ±11
24	122.5	91.3	1.34	0.1090 ±0.0014	4.6932 ±0.0457	0.3123 ±0.0019	1783 ±24	1766 ±8	1752 ±9
25	117.7	108.3	1.09	0.1116 ±0.0019	4.3368 ±0.0625	0.2818 ±0.0021	1826 ±30	1700 ±12	1600 ±11

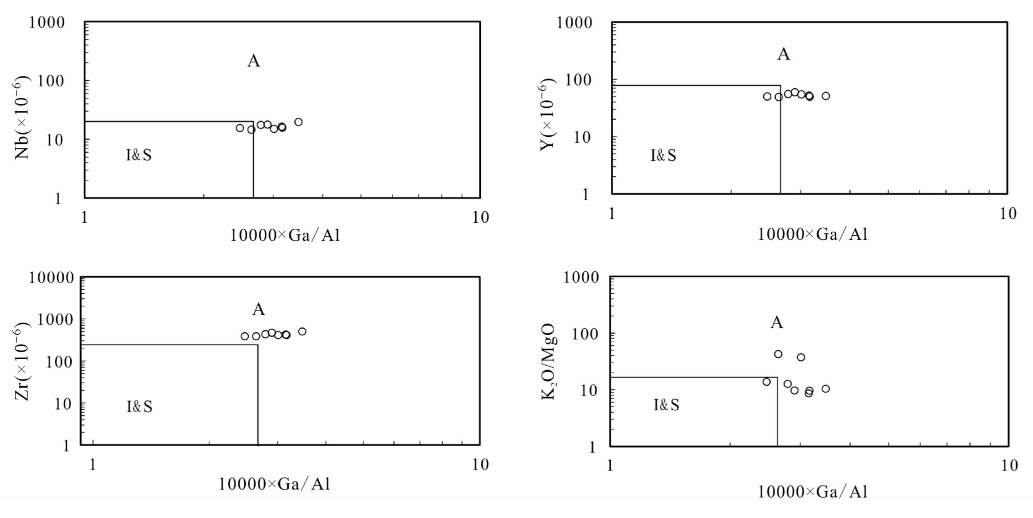

图 5 A 型花岗岩判别图解(据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 5 Discriminant diagram of A-type granitoid (after Whalen *et al.*, 1987)

Al-Zr 等图解上,都位于 A 型花岗岩区域(图 5)。HFSE 元素含量高,元素组合 Zr + Nb + Ce + Y = 580×10^{-6} ~ 767×10^{-6} 高于 A 型花岗岩下限值(350×10^{-6})花岗岩。泾源花岗岩的 Y/Nb 比值为 2.61 ~ 3.62,大于 1.2,具 A_2 型花岗岩特征(贾小辉等,2009),Y-Nb-Ce 和 Y-Nb-3Ga 花岗岩类型判别图解上(图 6),都表现为 A_2 型花岗岩的特征。泾源花岗岩 Rb/Sr 比值范围在 0.95 ~ 2.66,平均为 1.94,远高于原始地幔平均值(0.03),说明岩浆的演化程度高。La/Nb 为 4.38 ~ 6.61,远远大于 1,与地幔来源的岩浆差异明显(DePaolo and Daley, 2000),Th/U 比值(6.56 ~ 7.95)平均 6.37,接近下地壳值

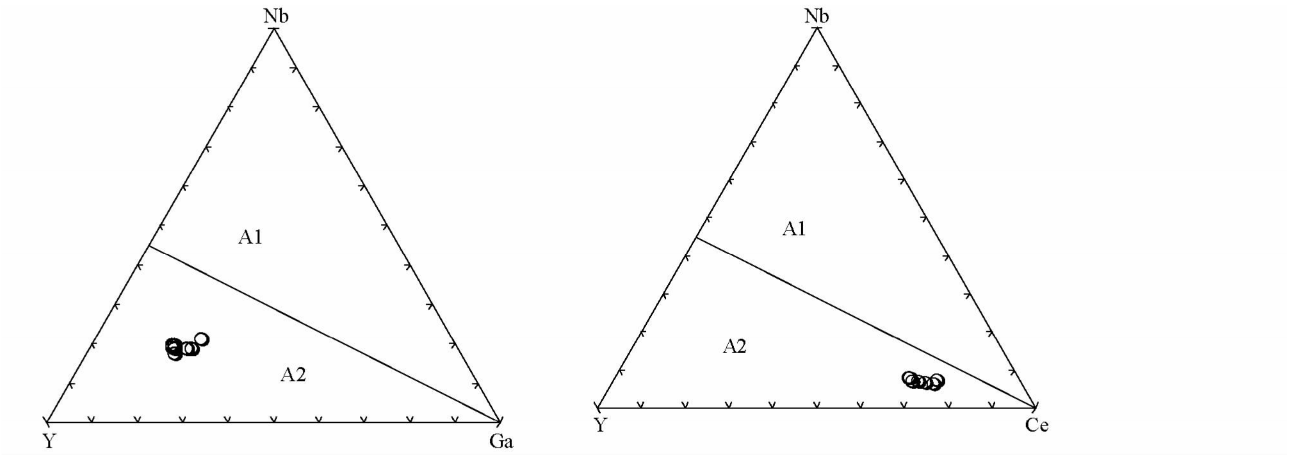

图 6 A_1 和 A_2 型花岗岩亚类的三角形判别图解(据 Eby, 1992)

Fig. 6 Discrimination diagrams of the Jingyuan A-type granitoid (after Eby, 1992)

(≈6)(Rudnick and Gao,2003),在 Nb/Y-Rb/Y 图解中样品点集中于下地壳平均线附近,La/Sm-La 图解显示泾源花岗岩由原岩的部分熔融形成,没有经历明显的分离结晶作用,暗示着该花岗岩可能主要由陆壳的部分熔融所形成。由于还缺乏详细的 Sr-Nd 同位素资料,我们目前还不能对泾源花岗岩体的源区以及成因模式进行进一步的限定。

6.2 构造动力学背景及其对贺兰坳拉谷的制约

目前为止学者对 A 型花岗岩的成因的观点还不很一致,但大多数学者认为 A 型花岗岩形成于造山后或非造山的岩石圈伸展构造环境(Eby,1992;Whalen *et al.*,1996;Forster *et al.*,1999;Kusky and Li,2003;Kalsbeek F,2001 ;靳松等,2010;杨崇辉等,2011),A 型花岗岩的形成与地壳的拉张作用有关,岩浆可能起源于经历了陆-陆碰撞或岛弧岩浆作用的陆壳或板下地壳,为造山作用结束后不久即开始的拉张。在 SiO_2 与 Al_2O_3 构造环境判别图上投点到 RRG + CEUG 范围内,表明与伸展有关的环境;在 Rb-Y 和 Nb-Y 环境判别图上,样品点都落入板内或后碰撞范围内,在 R_1-R_2 构造环境图解上上投点全部位于造山后区域(图略),这个与河北赞皇地区许亭元古代型花岗岩(杨崇辉等,2011)、嵩山古元古代 A 型花岗岩(Zhao and Zhou,2009)、宜昌圈椅埫古元古代 A 型花岗岩(熊庆等,2008)以及吕梁云中山古元古代花岗岩(耿元生等,2004)特征非常相似,总体表现了造山期后花岗岩特点。

在华北克拉通的北缘以麻粒岩相、孔兹岩系及造山型花岗岩为标志的造山带也形成近于同一时期(郭敬辉等,2002,Zhao *et al.*,2005;赵国春等,2009;钟长汀等,2007),华北南部同样也发育该时期的造山事件,北秦岭西段陇山杂岩、胡店和太白山片麻状花岗岩(何艳红等,2005;王洪亮等,2007;何世平等,2007;第五春荣等,2010;时毓等,2011)等 1.9 ~ 1.8Ga 的透入性变质事件同样指示了古元古代晚期的造山事件;华北克拉通西部贺兰山、阿拉善地区广泛发育的孔兹岩系与伴生花岗岩(耿元生等,2009;周喜文等,2010;校培喜等,2011),指示了鄂尔多斯地块与阴山地块、阿拉善地块古元古代经历了强烈的造山过程,充分表明了华北克拉通周缘古元古代造山事件具有大面积区域性特征(翟明国等,2007)。对于华北克拉通古元古代晚期造山后伸展事件与坳拉谷的形成前人已有大量的论述,华北克拉通北缘的斜长岩环斑花岗岩非造山岩浆组合(杨进辉等,2005)、京晋冀辽地区古元古代晚期花岗岩组合(耿元生等,2004;杨进辉等,2007)、华北克拉通中部镁铁质岩墙群(胡俊良等,2007)、华北克拉通南缘偏碱性的熊耳群火山岩系以及碱性花岗岩组合(王团华等,2008;包志伟等,2009;崔敏利等,2010)都表明古元古代晚期地球动力学背景为区域性伸展环境,形成了华北克拉通的多个坳拉谷,并认为是与哥伦比亚超大陆裂解有关的全球构造在中国的集中体现。目前华北克拉通该期事件的岩石学证据与论述多集中于中部与南北两侧,但贺兰坳拉谷前人没有提出相应的岩石学证据。前已论述,贺兰坳拉谷发育区无论南北均已发现古元古代造山之岩石证据,在古元古代晚期在整个克拉通地壳-岩石圈减薄及软流圈地幔上涌有关的背景下,贺兰-六盘山地区也难以独善其身,应该发育有伸展构造背景下可以区域性对比的沉积序列和相应的岩浆岩组合,泾源地区古元古代晚期 A 型花岗岩的发现为贺兰坳拉谷的形成提供了有力的岩石学和年代学证据。

7 结论

(1)精确的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄表明华北克拉通西缘贺兰坳拉谷南段泾源花岗岩体年龄为 1803 ± 15Ma,属古元古代而非喜山期。

(2)地球化学特征研究表明泾源花岗岩为 A_2 型花岗岩,为华北克拉通古元古代区域性伸展背景下地壳部分熔融之

产物,为元古宙贺兰坳拉谷的成因提供了充分的岩石学证据。

致谢 成文过程中得到中国地质科学院闫全人博士、西北大学陈丹玲博士的大力协助;审稿人提出了宝贵的修改意见;在此一并感谢。

References

Bao ZW, Wang Q, Zi F, Tang GJ, Du FJ and Bai GD. 2009. Geochemistry of the Paleoproterozoic Longwangzhuang A-type granites on the southern margin of North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications. Geochimica, 38(6): 509 – 522 (in Chinese with English abstract)

Chen ZG, Zhang LC, Lu BZ, Li ZL, Wu HY, Xiang P and Huang SW. 2010. Geochronology and geochemistry of the Taipingchuan copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia, and its geological significances. Acta Petrologica Sinica, 26(5): 1437 – 1449 (in Chinese with English abstract)

Cui ML, Zhang BL, Peng P, Zhang LC, Shen XL, Guo ZH and Huang XF. 2010. Zircon/baddeleyite U-Pb dating for the Paleo-proterozoic intermediate-acid intrusive rocks in Xiaoshan mountains, west of Henan Province and their constraints on the age of the Xiong'er volcanic province. Acta Petrologica Sinica, 26(5): 1541 – 1549(in Chinese with English abstract)

DePaolo DJ and Daley EE. 2000. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension. Chemical Geology, 169(1 – 2): 157 – 185

Diwu CR, Sun Y, Lin CL and Wang HL. 2010. LA-(MC)-ICPMS U-Pb zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions of the Taihua Complex on the southern margin of the North China Craton. Chinese Science Bulletin, 55(21): 2112 – 2123(in Chinese)

Dong CY, Wang SJ, Liu DY, Wang JG, Xie HQ, Wang W, Song ZY and Wan YS. 2010. Late Palaeoproterozoic crustal evolution of the North China Craton and formation time of the Jingshan Group: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon dating of meta-intermediate-basic intrusive rocks in eastern Shandong Province. Acta Petrologica Sinica, 27(6): 1699 – 1706(in Chinese with English abstract)

Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. Geology, 20(7): 641 – 644

Forster HJ, Tischendorf G, Gottesmann B and Trumbull RB. 1999. Late-collisional granites in the Variscan Erzgebirge, Germany. Journal of Petrology, 40(11): 1613 – 1645

Gao LZ, Ding XZ, Gao Q, Zhang CH. 2010. New geological time scale of late Precambrian in China and geochronology. Geology in China, 37(4): 1014 – 1020(in Chinese with English abstract)

Geng YS, Yang CH, Song B and Wan YS. 2004. Post-orogenic granites with an age of 1800Ma in Luliang area, North China Craton: Constraints from isotopic geochronology and geochemistry. Geological Journal of China Universities, 10(4): 477 – 487(in Chinese with English abstract)

Geng YS, Zhou XW, Wang XS and Ren LD. 2009. Late-Paleoproterozoic granite events and their geological significance in Helanshan area, Inner Mongolia: Evidence from geochronology. Acta Petrologica Sinica, 25(8): 1830 – 1842(in Chinese with English abstract)

Geng YS, Wang XS, Wu CM and Zhou XW. 2010. Late-Paleoproterozoic tectono-thermal events of the metamorphic basement in Alxa area: Evidence from geochronology. Acta Petrologica Sinica, 26(4): 1159 – 1170(in Chinese with English abstract)

Guo JH, Zhai MG and Xu RH. 2002. Timing of the granulite facies metamorphism in the Sanggan area, North China Craton: Zircon U-Pb geochronology. Science in China (Series D), 44(11): 1010 – 1018

He SP, Wang HL, Chen JL, Xu XY, Zhang HF, Ren GM and Yu JY. 2007. Zircon U-Pb chronology of Kuanping rock group by LA-ICP-MS and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 81(1): 79 – 87(in Chinese with English abstract)

He YH, Sun Y, Chen L, Li HP, Yuan HL and Liu XM. 2005. Zircon U-Pb chronology of Longshan complex by LA-ICP-MS and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 127 – 136 (in Chinese with English abstract)

Hou GT, Wang CC and Li L. 2010. Magnetic fabric evidences for the Late Paleoproterozoic mafic dyke swarm emplacement, southern margin of the North China craton. Acta Petrologica Sinica, 26(1): 318 – 324(in Chinese with English abstract)

Hu GH, Hu JL, Chen W and Zhao TP. 2010. Geochemistry and tectonic setting of the 1.78 Ga mafic dyke swarms in the Mt. Zhongtiao and Mt. Song areas, the southern margin of the North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 26(5): 1563 – 1576(in Chinese with English abstract)

Hu JL, Zhao TP, Chen W and Peng P. 2007. Characteristics and research progress of the 1.75Ga mafic dyke swarms in the North China Craton: A review. Geotectonica et Metallogenia, 31(4): 457 – 470 (in Chinese with English abstract)

Hu NG, Wang XX, Sun YG, Shen WH, Cai HH and Chen YJ. 2007. The geochemistry features, origin of the Yingfeng rapakivi granite and its associated rocks in north Qaidam basin and the geological significance. Geological Review, 53(4): 460 – 472 (in Chinese with English abstract)

Hua H and Qiu SY. 2001. Three mesoproterozoic stromatolite assemblages in the Helan Mt., Ningxia and their biostratigraphic siginificance. Journal of Stratigraphy, 25(4): 307 – 311 (in Chinese with English abstract)

Jia XH, Wang Q and Tang GJ. 2009. A-type granites: Research progress and implications. Geotectonica et Metallogenia, 33(3): 465 – 480 (in Chinese with English abstract)

Jin S, Zhang ZW, Chen ZB, Yang HB, Yang JJ and Kang GJ. 2010. Geochemical characteristics, geochronology and tectonic implications of A-type granite from Qiaqihai intrusion in Jeminay County, Xinjiang. Acta Geoscientica Sinica, 31(6): 803 – 812(in Chinese with English abstract)

Kalsbeek F, Jepsen H and Nutman A. 2001. From source migmatites to plutons: Tracking the origin of ca. 435Ma S-type granites in the East Greenland Caledonian orogen. Lithos, 57(1): 1 – 21

Kusky TM and Li JH. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. Journal of Asian Earth Science, 22(4): 383 – 397

Li JH, Qian XL, Hou GT, Liu SW and Chen J. 2000. Late Palaeoproterozoic to Early Mesoproterozoic tectonic framework and major tectono-thermal episodes of North China: New interpretation of "Luliang Orogeny". Earth Science, 25(1): 15 – 20 (in Chinese with English abstract)

Lu SN, Li HK and Xiang ZQ. 2010. Advances in the study of Mesoproterozoic geochronology in China: A review. Geology in Chinese, 37(4): 1002 – 1013 (in Chinese with English abstract)

Peng P, Zhai MG, Zhang HF, Zhao TP and Ni ZY. 2004. Geochemistry and geological significance of the 1.8Ga mafic dyke swarms in the North China Craton: An example from the juncture of Shanxi, Hebei and Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 20(3): 439 – 456 (in Chinese with English abstract)

Ren KX, Yan GH, Cai JH, Mu BL, Li FT, Wang YB and Chu ZY. 2006. Chronology and geological implication of the Paleo-Mesoproterozoic alkaline-rich intrusions belt from the northern part in the North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 22(2): 377 – 386 (in Chinese with English abstract)

Rudnick RL and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Rudnick RL (ed.). Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier, 1 – 64

Shi Y, Yu JH, Xu XS, Tang HF, Qiu JS and Chen LH. 2011. U-Pb ages and Hf isotope compositions of zircons of Taihua Group in

Xiaoqinling area, Shaanxi Province. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 3095 - 3108 (in Chinese with English abstract)
Wang HL, He SP, Chen JL, Xu XY, Sun Y, Diwu CR and Li HP. 2007. LA-ICPMS zircon U-Pb dating of the Hudian gneissic monzogranite in the western segment of the North Qinling and its geological significance. Geology in China, 34(1): 17 - 25 (in Chinese with English abstract)
Wang TH. 1995. Evolutionary characteristics of geological structure and oil-gas accumulation in Shanxi-Shaanxi area. J. Geo. & Min. Res. North China, 10(3): 283 - 304 (in Chinese with English abstract)
Wang TH, Mao JW and Wang YB. 2008. Research on SHRIMP U-Pb chronology in Xiaoqinling-Xionger' shan area: The evidence of delamination of lithosphere in Qinling orogenic belt. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1273 - 1287 (in Chinese with English abstract)
Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407 - 419
Whalen JB, Jenner GA, Longstaffe FJ, Robert F and Gariepy C. 1996. Geochemical and isotopic (O, Nd, Pb and Sr) constraints on A-type granite petrogenesis based on the Topsails igneous suite, New foundland Appalachians. Journal of Petrology, 37(6): 1463 - 1489
Wu SP, Wang MY and Qi KJ. 2007. Present situation of researches on A-type granites: A review. Acta Petrologica et Mineralogica, 26(1): 57 - 66 (in Chinese with English abstract)
Xiao PX, You WF, Xie CR, Li P and Bai SM. 2011. LA-ICP-MS U-Pb detrital zircon geochronology of alumina-rich gneiss of the Helanshan complex-group in the northern segment of Helanshan Mountains and regional comparison. Geological Bulletin of China, 30(1): 26 - 36 (in Chinese with English abstract)
Xiong Q, Zheng JP, Yu CM, Su YP, Tang HY and Zhang ZH. 2009. Zircon U-Pb age and Hf isotope of Quanyishang A-type granite in Yichang: Signification for the Yangtze continental cratonization in Paleoproterozoic. Chinese Science Bulletin, (3): 436 - 446
Xu YH, Zhao TP, Peng P, Zhai MG, Qi L and Luo Y. 2007. Geochemical characteristics and geological significance of the Paleoproterozoic rocks from the Xiaoliangling Formation in the Luliang area, Shanxi Province. Acta Petrologica Sinica, 23(5): 1123 - 1132 (in Chinese with English abstract)
Yan GH, Cai JH, Ren KX, He GQ, Mu BL, Xu BL, Li FT and Yang B. 2007. Intraplate extensional magmatism of North China Craton and break-up of three supercontinents and their deep dynamics. Geological Journal of China Universities, 13(2): 161 - 174 (in Chinese with English abstract)
Yang CH, Du LL, Ren LD, Song HX, Wan YS, Xie HQ and Liu ZX. 2011. The age and petrogenesis of the Xuting granite in the Zanhuang Complex, Hebei Province: Constraints on the structural evolution of the Trans-North China Orogen, North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 27(4): 1003 - 1016 (in Chinese with English abstract)
Yang JH, Wu FY, Liu XM and Xie LW. 2005. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of the Miyun rapakivi granites from Beijing, China. Acta Petrologica Sinica, 21(6): 1633 - 1644 (in Chinese with English abstract)
Yang JH, Wu FY, Xie LW and Liu XM. 2007. Petrogenesis and tectonic implications of Kuangdonggou syenites in the Liaodong Peninsula, east North China Craton: Constraints in-situ zircon U-Pb ages and Hf isotopes. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 263 - 276 (in Chinese with English abstract)
Yuan HL, Wu FY, Gao S, Liu XM, Xu P and Sun DY. 2003. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS. Chinese Science Bulletin, 48(22): 2411 - 2421
Zhai MG and Peng P. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 23(11): 2665 - 2682 (in Chinese with English abstract)
Zhang LJ, Ma CQ, Wang LX, Shen ZB and Wang SM. 2011. Discovery of Paleoproterozoic rapakivi granite on the northern margin of the Yangtze block and its geological significance. Chinese Science Bulletin, 56(1): 306 - 318
Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. Precambrian Research, 136(2): 177 - 202
Zhao GC. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion. Acta Petrologica Sinica, 25(8): 1772 - 1792 (in Chinese with English abstract)
Zhao TP, Zhai MG, Xia B, Li HM, Zhang YX and Wan YS. 2004. Zircon U-Pb SHRIMP dating for the volcanic rocks of the Xiong'er Group: Constraints on the initial formation age of the cover of the North China Craton. Chinese Science Bulletin, 49(23): 2495 - 2502
Zhao TP, Xu YH and Zhai MG. 2007. Petrogenesis and tectonic setting of the Paleoproterozoic Xiong'er Group in the southern part of the North China Craton: A review. Geological Journal of China Universities, 13(2): 191 - 206 (in Chinese with English abstract)
Zhao TP and Zhou MF. 2009. Geochemical constraints on the tectonic setting of Paleoproterozoic A-type granites in the southern margin of the North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 36(2 - 3): 183 - 195
Zhong CT, Deng JF, Wan YS, Mao DM and Li HM. 2007. Magma recording of Paleoproterozoic orogeny in central segment of northern margin of North China Craton: Geochemical characteristics and zircon SHRIMP dating of S-type granitoids. Geochimica, 36(6): 633 - 637 (in Chinese with English abstract)
Zhou XW, Zhao GC and Geng YS. 2010. Helanshan high pressure pelitic granulite Petrologic evidence for collision event in the western block of the North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 26(7): 2113 - 2121 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

包志伟，王强，资锋，唐功建，杜凤军，白国典. 2009. 龙王疃 A 型花岗岩地球化学特征及其地球动力学意义. 地球化学，38(6): 509 - 522
崔敏利，张宝林，彭澎，张连昌，沈晓丽，郭志华，黄雪飞. 2010. 豫西崤山早元古代中酸性侵入岩锆石/斜锆石 U-Pb 测年及其对熊耳火山岩系时限的约束. 岩石学报，26(5): 1541 - 1549
陈志广，张连昌，卢百志，李占龙，吴华英，相鹏，黄世武. 2010. 内蒙古太平川铜钼矿成矿斑岩时代、地球化学及地质意义. 岩石学报，26(7): 2113 - 2121
第五春荣，孙勇，林慈銮，王洪亮. 2010. 河南鲁山地区太华杂岩 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成. 科学通报，55(21): 2112 - 2123
董春艳，王世进，刘敦一，王金光，颉颃强，王伟，宋志勇，万渝生. 2010. 华北克拉通古元古代晚期地壳演化和荆山群形成时代制约——胶东地区变质中-基性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 岩石学报，26(6): 1699 - 1706
高林志，丁孝忠，曹茜，张传恒. 2010. 中国晚前寒武纪年表和年代地层序列. 中国地质，37(4): 1014 - 1020
耿元生，杨崇辉，宋彪，万渝生. 2004. 吕梁地区 18 亿年的后造山花岗岩：同位素年代和地球化学制约. 高校地质学报，10(4): 477 - 487
耿元生，周喜文，王新社，任留东. 2009. 内蒙古贺兰山地区古元古代晚期的花岗岩浆事件及地质意义：同位素年代学的证据. 岩石学报，25(8): 1830 - 1842
耿元生，王新社，吴春明，周喜文. 2010. 阿拉善变质基底古元古代晚期的构造热事件. 岩石学报，26(4): 1159 - 1170

郭敬辉，翟明国，徐荣华. 2002. 华北桑干地区大规模麻粒岩相变质作用的时代：锆石 U-Pb 年代学. 中国科学(D 辑)，32(1)：10 -18

何世平，王洪亮，陈隽路，徐学义，张宏飞，任光明，余吉远. 2007. 北秦岭西段宽坪岩群斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS 测年及其地质意义. 地质学报，81(1)：79 -87

何艳红，孙勇，陈亮，李海平，袁洪林，柳小明. 2005. 陇山杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报，21(1)：127 -136

侯贵廷，王传成，李乐. 2010. 华北南缘古元古代末岩墙群侵位的磁组构证据. 岩石学报，26(1)：318 -324

胡国辉，胡俊良，陈伟，赵太平. 2010. 华北克拉通南缘中条山-嵩山地区 1.78Ga 基性岩墙群的地球化学特征及构造环境. 岩石学报，26(5)：1563 -1576

胡俊良，赵太平，陈伟，彭澎. 2007. 华北克拉通 1.75Ga 基性岩墙群特征及其研究进展. 大地构造与成矿学，31(4)：457 -470

胡能高，王晓霞，孙廷贵，申文环，蔡欢欢，陈云杰. 2007. 柴北缘元古宙鹰峰环斑花岗岩及其共生岩石的地球化学特征、成因及地质意义. 地质论评，53(4)：460 -472

华洪，邱树玉. 2001. 贺兰山中元古代三个叠层石组合及其地层意义. 地层学杂志，25(4)：307 -311

贾小辉，王强，唐功建. 2009. A 型花岗岩的研究进展及意义. 大地构造与成矿学，33(3)：465 -480

靳松，张兆祎，陈志彬，杨红宾，杨进京，康贵军. 2010. 新疆吉木乃县恰其海 A 型花岗岩的地球化学特征、年代学及构造意义. 地球学报，31(6)：803 -812

李江海，钱祥麟，侯贵廷，刘树文，陈晶. 2000. “吕梁运动”新认识. 地球科学，25(1)：15 -20

陆松年，李怀坤，相振群. 2010. 中国中元古代同位素地质年代学研究进展述评. 中国地质，37(4)：1002 -1013

彭澎，翟明国，张华锋，赵太平，倪志耀. 2004. 华北克拉通 1.8Ga 镁铁质岩墙群的地球化学特征及其地质意义：以晋冀蒙交界地区为例. 岩石学报，20(3)：439 -456

任康绪，阎国翰，蔡剑辉，牟保磊，李凤棠，王彦斌，储著银. 2006. 华北克拉通北部地区古-中元古代富碱侵入岩年代学及意义. 岩石学报，22(2)：377 -386

时毓，于津海，徐夕生，唐红峰，邱检生，陈立辉. 2011. 陕西小秦岭地区太华群的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成. 岩石学报，27(10)：3095 -3108

王洪亮，何世平，陈隽璐，徐学义，孙勇，第五春荣，李海平. 2007. 北秦岭西段胡店片麻状二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. 中国地质，34(1)：17 -25

王同和. 1995. 晋陕地区地质构造演化与油气聚集. 华北地质矿产杂志，10(3)：283 -304

王团华，毛景文，王彦斌. 2008. 小秦岭熊耳山地区岩墙锆石 SHRIMP 年代学研究——秦岭造山带岩石圈拆沉的证据. 岩石学报，24(6)：1273 -1287

吴锁平，王梅英，戚开静. 2007. A 型花岗岩研究现状及其述评. 岩石矿物学杂志，26(1)：57 -66

校培喜，由伟丰，谢从瑞，李平，白生明. 2011. 贺兰山北段贺兰山岩群富铝片麻岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及区域对比. 地质通报，30(1)：26 -36

熊庆，郑建平，余淳梅，苏玉平，汤华云，张志海. 2008. 宜昌圈椅埫 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素与扬子大陆古元古代克拉通化作用. 科学通报，53(22)：2782 -2792

徐勇航，赵太平，彭澎，翟明国，漆亮，罗彦. 2007. 山西吕梁地区古元古界小两岭组火山岩地球化学特征及其地质意义. 岩石学报，23(5)：1123 -1132

阎国翰，蔡剑辉，任康绪，何国琦，牟保磊，许保良，李凤棠，杨斌. 2007. 华北克拉通板内拉张性岩浆作用与三个超大陆裂解及深部地球动力学. 高校地质学报，13(2)：161 -174

杨崇辉，杜利林，任留东，宋会侠，万渝生，颉颃强，刘增校. 2011. 河北赞皇地区许亭花岗岩的时代及成因：对华北克拉通中部带构造演化的制约. 岩石学报，27(4)：1003 -1016

杨进辉，吴福元，柳小明，谢烈文. 2005. 北京密云环斑花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义. 岩石学报，21(6)：1633 -1644

杨进辉，吴福元，谢烈文，柳小明. 2007. 辽东矿洞沟正长岩成因及其构造意义：锆石原位微区 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. 岩石学报，23(2)：263 -276

袁洪林，吴福元，高山，柳小明，徐平，孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报，48(14)：1511 -1520

翟明国，彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. 岩石学报，23(11)：2665 -2682

张丽娟，马昌前，王连训，佘振兵，王世明. 2011. 扬子地块北缘古元古代环斑花岗岩的发现及其意义. 科学通报，56(1)：44 -57

赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论. 岩石学报，25(8)：1772 -1792

赵太平，翟明国，夏斌，李惠民，张毅星，万渝生. 2004. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究：对华北克拉通盖层发育初始时间的制约. 科学通报，49(22)：2342 -2349

赵太平，徐勇航，翟明国. 2007. 华北陆块南部元古宙熊耳群火山岩的成因与构造环境：事实与争议. 高校地质学报，13(2)：191 -206

钟长汀，邓晋福，万渝生，毛德宝，李惠民. 2007. 华北克拉通北缘中段古元古代造山作用的岩浆记录：S 型花岗岩地球化学特征及锆石 SHRIMP 年龄. 地球化学，36(6)：633 -637

周喜文，赵国春，耿元生. 2010. 贺兰山高压泥质麻粒岩——华北克拉通西部陆块拼合的岩石学证据. 岩石学报，26(7)：2113 -2121