

华北吕梁地区 2.4Ga A 型花岗岩的确定及地质意义*

赵娇¹ 张成立^{1**} 郭晓俊¹ 刘欣雨¹ 王权²

ZHAO Jiao¹, ZHANG ChengLi^{1**}, GUO XiaoJun¹, LIU XinYu¹ and WANG Quan²

1. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质系, 西安 710069

2. 山西省地质研究所, 太原 030006

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2. Institute of Shanxi Geological Survey, Taiyuan 030006, China

2014-10-13 收稿, 2015-01-16 改回.

Zhao J, Zhang CL, Guo XJ, Liu XY and Wang Q. 2015. Determination of the 2.4Ga A-type granite in Lvliang area of the North China Craton and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (6):1606–1620

Abstract The understanding the tectonic transformation of the North China Craton (NCC) from Late Neoproterozoic to Early Paleoproterozoic is significant for discussing early crustal evolution in NCC. The Gaijiazhuang granitic pluton is outcropped in Lvliang area of the Trans-North China Orogen (TNCO) in NCC. The ages of 2398 ~ 2408Ma was obtained using LA-ICPMS zircon U-Pb dating. Thus its petrogenesis and forming tectonic setting can provide us important information for Early Paleoproterozoic evolution of TNCO. The Gaijiazhuang granite was mainly composed of syenogranite, and geochemically characterized by the high Si, K, alkaline and FeO^T/MgO , low Ca, Mg, enrichment of LILE such as Rb, Th, U and HFSE as well as depletion of Sr, Ba, P, Ti, with a “seagull-type” pattern of slight REE fractionation between LREE and HREE and strong negative Eu anomaly, showing the features of typical A₂-type granite formed in a post orogenic setting. They have positive $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ of 2.0 ~ 2.3 and narrow ranging of t_{DM2} (2606 ~ 2629Ma). Their zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ also show positive values varying from +2.2 to +7.1, and the two-stage model ages is from 2494Ma to 2791Ma, slightly higher or close to its formation age. All demonstrate that Gaijiazhuang syenogranite was mainly derived from the Mid-late Neoproterozoic lower crustal materials, and involved minor mantle-derived component. Combined with regional geology and the widespread coeval K-rich granitoids in TNCO, the Gaijiazhuang syenogranite together with the K-rich granitoids represent a tectonothermal event occurred at 2.4Ga due to the partial melting of juvenile lower crustal materials triggered by the mantle upwelling, which resulted from the crustal extension after the ~2.5Ga blocks amalgamation of NCC, suggesting that the NCC has been entered into the extensional tectonic environment during the Early Paleoproterozoic of ~2.4Ga.

Key words Zircon U-Pb age; A₂-type granite; Gaijiazhuang syenogranite; The Trans-North China Orogen in North China Craton

摘要 华北克拉通新太古代末与古元古代早期的构造转化对认识华北克拉通早期地壳演化具有重要意义。该克拉通中部带吕梁地区盖家庄正长花岗岩获得 2398 ~ 2408Ma 的形成年龄, 其成因研究将为探讨华北克拉通新太古代晚期与古元古代早期构造演化提供重要信息。该岩体富 K, 高硅、碱、 FeO^T/MgO , 低 Ca、Mg, 富集 Rb、Th、U 等 LILE、较高的 HFSE, 明显亏损 Sr、Ba、P、Ti, 具弱轻重稀土分异和强负 Eu 异常的“燕式”稀土分配模式, 并具有高的 Ga/Al 比值和高锆石饱和温度, 显示了碰撞造山后 A₂ 型花岗岩的特征。岩体全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 2.0 \sim 2.3$, 两阶段 Nd 模式年龄 $t_{\text{DM2}} = 2606 \sim 2629\text{Ma}$, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +2.2 \sim +7.1$, t_{DM2} (2494 ~ 2791Ma) 略高或接近其形成年龄, 一致证明主要源自新太古代中晚期新生下部陆壳物质的部分熔融, 并有少量幔源物质的添加。结合区域地质及同期钾质花岗岩类的广泛出现, 盖家庄正长花岗岩与同期钾质花岗岩一同代表了华北克拉通 ~2.5Ga 形成后, 中部构造带于古元古代早期 ~2.4Ga 发生的一次陆壳伸展拉张作用引发的地幔物质上涌基性岩浆上侵导致下部新生陆壳物质增温发生部分熔融构造岩浆事件, 证明陆壳已转入伸展拉张构造环境。

* 本文受国家重点基础研究发展计划 973 项目(2012CB416606)和西北大学大陆动力学实验室自主研究课题联合资助。

第一作者简介: 赵娇, 女, 1989 年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: zj7118@163.com

** 通讯作者: 张成立, 男, 博士生导师, 从事岩石大地构造研究, E-mail: clzhang@nwu.edu.cn

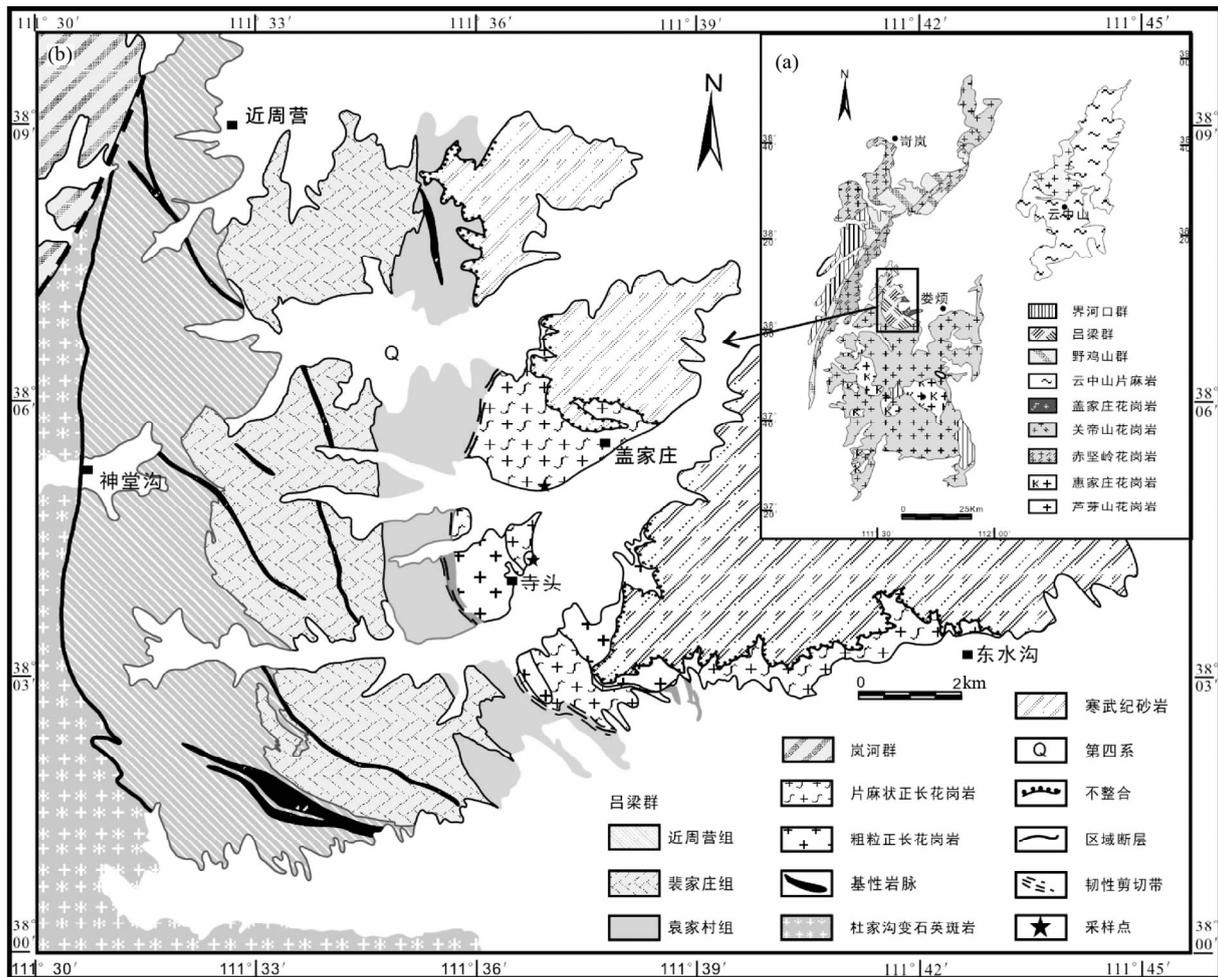


图1 吕梁-岚县地区地质简图(据山西省地质矿床局区域地质调查队,1992^①修编;a据 Trap *et al.*, 2009)

Fig. 1 Geological sketch map of the Lvliang-Lanxian area (a, after Trap *et al.*, 2009)

状产出(图2d)。

本次研究在盖家庄西南和寺头村北两地分别采集2件花岗岩年龄样品(12LL-13, 14)和4件配套的地化样品(12LL-13a, 14a-c),地理坐标分别为N38°4'16.9", E111°36'49.2"和N38°3'42.7", E111°36'29"。其中,前者(12LL-13)岩石呈灰砖红色,具中粒似斑状结构和片麻状构造,斑晶为微斜长石(15%),受糜棱岩化改造多为他形-半自形晶,不同程度粘土化(图2b),基质由钾长石(40%)、斜长石(10%)、石英(25%)和少量黑云母(5%)组成。石英颗粒受变形改造多呈他形粒状,部分颗粒边界呈锯齿状,局部出现亚颗粒,黑云母呈深褐色,呈磷片状延片麻理定向分布(图2b, c),副矿物为锆石、磷灰石和少量不透明磁铁矿等。寺头村北的岩石为砖红色,变形明显较弱(图2d),具中粗粒花岗岩结构(图2e, f),块状构造,主要矿物为微斜长石(60%)、斜长石(10%)、石英(23%)和黑云母(7%),副矿物为锆石、磷灰石和少量磁铁矿等。因此,该岩体属于一正长花岗岩体。

2 分析方法

所有样品的分析测试均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素分析采用XRF(Rikagu RIX 2100)玻璃熔饼法完成,经BCR-2和GBW07105标样监控,元素分析精度优于5%。微量元素在美国Perkin Elmer公司Elan 6100DRC ICP-MS上分析完成,样品溶解在Teflon高压溶样弹中进行。测试过程中每测10个分析样品加测一个QC标准,并在一批溶液分析中加测2个BHVO-2、AGV-2和1个BCR-2标准物质,Co、Ni、Zn、Ga、Rb、Y、Zr、Nb、Hf、Ta和REE(除Hf和Lu)等元素分析精度优于5%,其它低浓度元素的分析精度介于5%~10%之间。全岩Sm-Nd同位素利用动态离子交换原理,将样品通过AG50W-X8(200~400目)阳离子交换树脂、HDEHP提取色谱柱,将Nd和Sm分离。测试在

① 山西省地质矿床局区域地质调查队. 1992. 1:5万盖家庄幅地质图

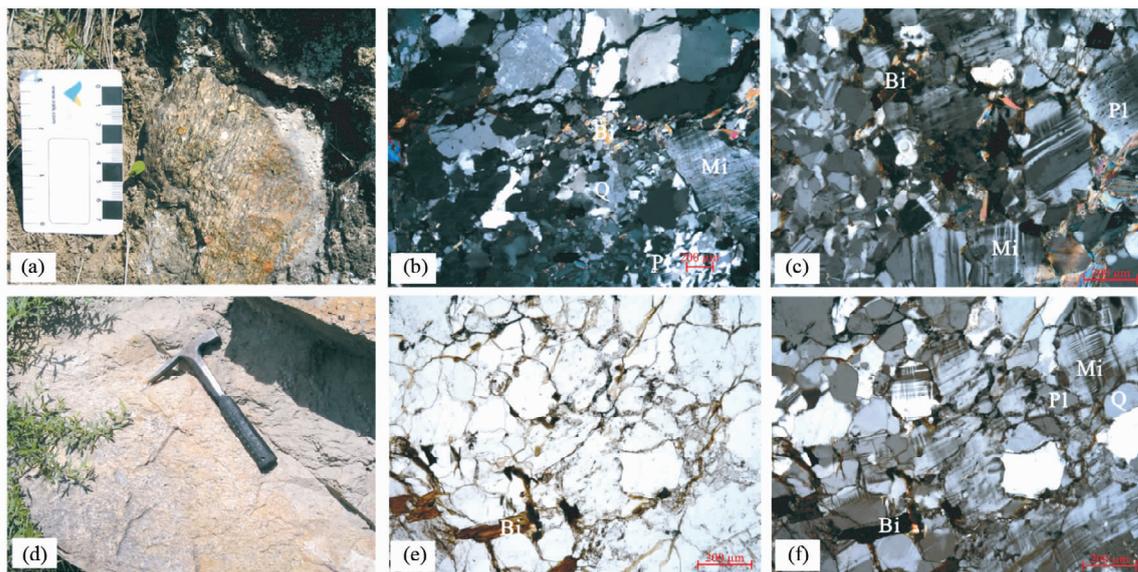


图2 盖家庄正长花岗岩的野外和显微照片

(a-c)片麻状正长花岗岩；(d-f)粗粒正长花岗岩。Q-石英；Pl-斜长石；Mi-微斜长石；Bi-黑云母

Fig.2 Photographs of the outcrops and photomicrographs of the samples from the Gaijiazhuang syenogranite

(a-c) gneissic syenogranite; (d-f) coarse-grained syenogranite. Q-quartz; Pl-plagioclase; Mi-microcline; Bi-biotite

多接受电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS Nu Plasma HR) 上采用静态模式进行, 测试过程中, 分别用 NBS981、NBS987、LaJolla 和 JMC475 作为外标, 对 Nd 进行质量监控。

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年采用常规法分离出的锆石在双目镜下挑选结晶好、透明、无或少裂隙的颗粒, 置于环氧树脂内固结后打磨、抛光。此后在同一实验室美国 FEI 公司生产的场发射扫描电镜附属的英国 Gatan 公司的 Mono CL3 + 系统上进行 CL 图像分析, 根据锆石内部结构特征确定目标点位待测。锆石 U-Pb 同位素测试在 193nm 的 ArF 准分子激光与 Agilent 7500a 型 ICP-MS 连接的仪器上分析, He 作为剥蚀物质的载气, 激光束斑直径为 33 μ m, 激光脉冲宽度为 15ns, 详细测试过程参见 Yuan *et al.* (2004) 的描述。样品同位素比值及含量用定年获得的²⁹Si、²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th 和 ²³⁸U; U、Th 和 Pb 的含量用²⁹Si 作为中间校准, NIST610 做参考物计算获得。²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb、²⁰⁶Pb/²³⁸U、²⁰⁷Pb/²³⁵U 和 ²⁰⁸Pb/²³²Th 比值用 GLITTER4.0 程序计算, 并用锆石 91500 进行校正。所得数据用 GLITTER (ver4.0, Macquarie University) 软件计算获得, 并采用 ISOPLOT 3.0 (Ludwig, 2003) 获得年龄和协和图。锆石原位 Lu-Hf 同位素分析是参照锆石阴极发光 (CL) 图像, 采用配有受激准分子 ArF 的 193nm 激光取样系统的 Nu Plasma HR 多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 在已进行了定年的同点或同域锆石上进行。分析中使用的激光束斑直径为 44 μ m, 激光频率为 10Hz, 脉冲能量为 80mJ, 剥蚀时间为 50s, 用锆石 91500、MON-1 和 GJ-1 作外标。仪器运行条件和详细的分析流程及数据精度 Yuan *et al.* (2008) 已有详述。

3 分析结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

对盖家庄片麻状正长花岗岩和粗粒正长花岗岩两件锆石的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析列于表 1。其中, 片麻状正长花岗岩 (12LL-13) 的锆石多呈无色透明半自形-自形柱状, 长宽比介于 2:1 ~ 4:1 之间。阴极发光 (CL) 图像显示, 锆石内部具弱的韵律环带 (图 3a), 它们的 Th、U 含量高, Th/U = 0.30 ~ 1.50, 属于岩浆成因锆石 (Belousova *et al.*, 2002)。对 30 粒锆石 LA-ICP-MS 分析点数据显示, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄变化范围大, 除一个分析点获得谐和年龄外, 大多数锆石由于受后期构造热事件的干扰, 明显发生铅丢失而偏离谐和线, 构成一条不一致线, 获得 2398 ± 26Ma 的上交点年龄 (图 3a), 与 12LL-13-6 测点获得 2380 ± 30Ma 的谐和年龄 (表 1、图 3a) 在误差范围一致, 代表岩体形成年龄。

来自粗粒正长花岗岩样品 (12LL-14) 中的锆石为无色透明自形柱状, 长宽比为 3:1 ~ 5:1, 阴极发光 (CL) 图像发光较弱, 但岩浆韵律环带仍然可辨 (图 3b), 它们的 Th、U 含量变化较大 (Th = 27.6 × 10⁻⁶ ~ 1557 × 10⁻⁶ 和 U = 74.8 × 10⁻⁶ ~ 1822 × 10⁻⁶), Th/U 比值 > 0.3, 变化于 0.37 ~ 1.31 之间, 稀土元素具明显 Ce 正异常、Eu 负异常及重稀土富集、轻稀土亏损的稀土谱型 (图略), 属于典型岩浆成因锆石 (Belousova *et al.*, 2002)。25 个分析点中 6 个锆石颗粒的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄变化较大 (2593 ~ 1880Ma), 它们的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 与 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄偏差较大, 对应的 CL 图像没有显示存在继承锆石或捕获锆石, 因而不能代表存在更为

表1 盖家庄正长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of the Gaijiazhuang syenogranite

测点号	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	Th	U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
12LL-13															
12LL-13-01	593	1150	0.52	0.1192	0.0021	2.3799	0.0353	0.1448	0.0012	1944	31	1237	11	872	6
12LL-13-02	1970	1245	1.58	0.1143	0.0019	2.2720	0.0322	0.1442	0.0011	1869	30	1204	10	868	6
12LL-13-03	408	719	0.57	0.1214	0.0022	3.7790	0.0609	0.2257	0.0019	1977	32	1588	13	1312	10
12LL-13-04	103	106	0.97	0.1480	0.0029	7.6656	0.1341	0.3756	0.0036	2323	33	2193	16	2056	17
12LL-13-05	170	336	0.51	0.1478	0.0036	5.4572	0.1218	0.2678	0.0030	2321	41	1894	19	1529	15
12LL-13-06	102	235	0.43	0.1531	0.0027	9.2297	0.1456	0.4374	0.0041	2380	30	2361	14	2339	18
12LL-13-07	479	1018	0.47	0.1119	0.0022	2.4231	0.0417	0.1571	0.0013	1830	35	1250	12	941	7
12LL-13-08	488	906	0.54	0.1305	0.0026	3.3394	0.0589	0.1856	0.0017	2105	35	1490	14	1098	9
12LL-13-09	159	305	0.52	0.1356	0.0052	3.6897	0.1322	0.1974	0.0031	2171	65	1569	29	1161	17
12LL-13-10	1317	2043	0.64	0.0922	0.0016	1.2395	0.0188	0.0975	0.0007	1471	33	819	9	600	4
12LL-13-11	28	83	0.34	0.1494	0.0040	8.3547	0.2097	0.4057	0.0053	2338	45	2270	23	2195	24
12LL-13-12	777	1256	0.62	0.0932	0.0023	1.6103	0.0358	0.1253	0.0011	1492	45	974	14	761	7
12LL-13-13	575	1111	0.52	0.1108	0.0022	2.1566	0.0371	0.1411	0.0012	1813	35	1167	12	851	7
12LL-13-14	568	751	0.76	0.1157	0.0034	2.6788	0.0727	0.1680	0.0020	1890	52	1323	20	1001	11
12LL-13-15	1154	1300	0.89	0.1131	0.0021	2.2006	0.0351	0.1411	0.0011	1850	33	1181	11	851	6
12LL-13-16	969	1420	0.68	0.1132	0.0020	1.9647	0.0306	0.1259	0.0010	1851	32	1104	10	765	6
12LL-13-17	754	1055	0.72	0.1101	0.0025	1.9318	0.0390	0.1273	0.0012	1800	40	1092	13	772	7
12LL-13-18	808	1057	0.76	0.1161	0.0020	2.6177	0.0391	0.1636	0.0013	1897	31	1306	11	977	7
12LL-13-19	671	900	0.75	0.1315	0.0030	3.6375	0.0759	0.2006	0.0020	2118	40	1558	17	1178	11
12LL-13-20	862	1805	0.48	0.1176	0.0024	1.7096	0.0314	0.1055	0.0009	1920	37	1012	12	646	5
12LL-13-21	628	1677	0.37	0.1110	0.0020	2.0101	0.0322	0.1313	0.0011	1816	33	1119	11	796	6
12LL-13-22	256	619	0.41	0.1511	0.0020	7.1468	0.0765	0.3431	0.0025	2358	23	2130	10	1902	12
12LL-13-23	1747	1799	0.97	0.1010	0.0015	1.5495	0.0194	0.1112	0.0008	1643	28	950	8	680	5
12LL-13-24	202	470	0.43	0.1483	0.0024	5.7530	0.0778	0.2814	0.0023	2326	27	1939	12	1598	11
12LL-13-25	369	551	0.67	0.1519	0.0026	6.4392	0.0957	0.3074	0.0026	2368	29	2038	13	1728	13
12LL-13-26	211	394	0.54	0.1492	0.0037	3.7427	0.0853	0.1819	0.0020	2337	42	1581	18	1078	11
12LL-13-27	694	2344	0.30	0.1000	0.0015	1.5689	0.0200	0.1138	0.0008	1624	28	958	8	695	5
12LL-13-28	432	1479	0.29	0.1038	0.0015	2.3223	0.0274	0.1623	0.0011	1693	26	1219	8	969	6
12LL-13-29	520	1733	0.30	0.1146	0.0020	1.9385	0.0292	0.1227	0.0010	1874	31	1095	10	746	5
12LL-13-30	2197	1465	1.50	0.1170	0.0025	1.8414	0.0353	0.1142	0.0010	1911	38	1060	13	697	6
12LL-14															
12LL-14-01	123	199	0.62	0.1543	0.0019	7.9213	0.0677	0.3724	0.0023	2394	21	2222	8	2040	11
12LL-14-02	50	89	0.56	0.1733	0.0028	10.8604	0.1504	0.4546	0.0039	2589	27	2511	13	2410	17
12LL-14-03	55	129	0.43	0.1540	0.0019	9.1208	0.0804	0.4294	0.0027	2391	21	2350	8	2303	12
12LL-14-04	133	262	0.51	0.1544	0.0021	7.9329	0.0819	0.3726	0.0025	2395	23	2223	9	2042	12
12LL-14-05	52	114	0.45	0.1546	0.0024	8.5834	0.1100	0.4025	0.0031	2398	26	2295	12	2181	14
12LL-14-06	28	75	0.37	0.1541	0.0020	9.2028	0.0909	0.4330	0.0029	2392	22	2358	9	2319	13
12LL-14-07	280	391	0.72	0.1731	0.0027	6.3670	0.0802	0.2668	0.0021	2588	26	2028	11	1524	10
12LL-14-08	162	255	0.64	0.1734	0.0025	10.4223	0.1162	0.4360	0.0032	2590	23	2473	10	2333	14
12LL-14-09	97	183	0.53	0.1542	0.0018	9.1150	0.0744	0.4288	0.0026	2393	20	2350	7	2300	12
12LL-14-10	91	202	0.45	0.1540	0.0019	8.4509	0.0711	0.3979	0.0025	2391	20	2281	8	2159	11
12LL-14-11	37	84	0.44	0.1546	0.0024	9.1795	0.1144	0.4306	0.0033	2397	26	2356	11	2309	15
12LL-14-12	67	139	0.48	0.1539	0.0026	8.4612	0.1180	0.3986	0.0033	2390	28	2282	13	2163	15
12LL-14-13	193	330	0.59	0.1592	0.0019	9.9765	0.0778	0.4546	0.0027	2447	20	2433	7	2416	12
12LL-14-14	77	144	0.54	0.1552	0.0020	9.6880	0.0933	0.4528	0.0030	2404	22	2406	9	2408	13
12LL-14-15	39	99	0.39	0.1589	0.0022	10.0331	0.1077	0.4578	0.0032	2444	23	2438	10	2430	14
12LL-14-16	76	164	0.46	0.1541	0.0019	9.3518	0.0846	0.4401	0.0028	2392	21	2373	8	2351	13
12LL-14-17	70	144	0.49	0.1591	0.0022	10.0096	0.1041	0.4562	0.0032	2446	23	2436	10	2423	14
12LL-14-18	295	471	0.63	0.1599	0.0021	5.2547	0.0521	0.2383	0.0016	2455	22	1862	8	1378	8
12LL-14-19	60	102	0.58	0.1542	0.0027	8.3092	0.1243	0.3907	0.0034	2394	29	2265	14	2126	16
12LL-14-20	323	246	1.31	0.1737	0.0027	9.7341	0.1218	0.4065	0.0032	2593	25	2410	12	2199	15
12LL-14-21	120	221	0.54	0.1538	0.0020	8.9275	0.0846	0.4210	0.0028	2388	22	2331	9	2265	13
12LL-14-22	1557	1821	0.85	0.1150	0.0014	1.9535	0.0162	0.1232	0.0007	1880	22	1100	6	749	4
12LL-14-23	365	638	0.57	0.1497	0.0016	13.4852	0.0921	0.6534	0.0038	2342	19	2714	6	3241	15
12LL-14-24	29	78	0.37	0.1541	0.0022	8.4499	0.0930	0.3977	0.0028	2392	24	2281	10	2158	13
12LL-14-25	352	273	1.29	0.1543	0.0020	6.9228	0.0687	0.3254	0.0022	2394	22	2102	9	1816	10

表 2 盖家庄正长花岗岩的主量 (wt%) 和微量 ($\times 10^{-6}$) 元素分析结果Table 2 Major (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) analyses of the Gaijiazhuang syenogranite

样品号 岩性	12LL	SX-1	SX-2	SX-3	12LL	12LL	12LL	样品号 岩性	12LL	SX-1	SX-2	SX-3	12LL	12LL	12LL
	-13a				-14a	-14b	-14c		-13a				-14a	-14b	-14c
	片麻状正长花岗岩							粗粒正长花岗岩							
SiO ₂	77.38	76.53	75.16	74.66	75.20	76.24	75.57	Zr	296	276	255	287	176	308	209
TiO ₂	0.09	0.08	0.20	0.20	0.15	0.25	0.18	Nb	22.3	21.8	20.2	19.2	13.5	21.0	17.8
Al ₂ O ₃	11.80	11.76	12.48	12.00	12.44	12.20	12.17	Cs	1.24	1.55	1.37	1.88	2.27	1.09	2.44
FeO ^T	1.14	1.11	1.34	1.74	1.42	1.90	1.83	Ba	136	222	287	321	395	338	332
MnO	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	Hf	11.1	10.1	9.65	8.99	5.76	9.35	6.81
MgO	0.20	0.22	0.20	0.32	0.11	0.17	0.12	Ta	2.44	2.32	1.89	1.82	1.46	1.78	1.67
CaO	0.21	0.38	0.77	0.55	0.39	0.40	0.97	Pb	11.4	19.8	17.9	23.8	22.7	16.0	28.6
Na ₂ O	3.00	2.86	2.50	2.75	2.70	2.90	3.00	Th	38.5	30.8	33.6	27.9	23.1	29.6	26.7
K ₂ O	5.04	5.26	4.93	5.27	5.85	5.08	5.04	U	5.63	3.77	4.23	3.32	3.06	3.66	4.12
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.08	0.03	0.03	0.04	0.03	La	68.5	72.6	87.9	99.5	62.1	118	74.6
LOI	0.65	0.65	0.95	1.18	1.57	0.63	0.88	Ce	118	123	132	143	129	145	140
Total	99.53	99.89	99.50	99.68	99.87	99.82	99.81	Pr	14.7	15.6	19.2	13.8	13.5	25.6	17.0
K ₂ O/Na ₂ O	1.68	1.84	1.97	1.92	2.17	1.75	1.68	Nd	51.5	47.8	52.3	66.6	46.3	92.0	60.2
σ	1.88	1.97	1.72	2.03	2.27	1.92	1.98	Sm	9.70	9.32	11.2	13.7	8.1	16.7	10.9
A/CNK	1.10	1.06	1.15	1.07	1.08	1.11	1.00	Eu	0.35	0.54	0.68	0.42	0.61	1.13	0.77
ANK	1.14	1.13	1.32	1.17	1.16	1.19	1.17	Gd	9.18	9.88	12.4	8.96	7.06	14.4	9.60
V	1.28	1.44	1.35	1.65	2.17	2.74	2.05	Tb	1.59	1.77	1.98	1.62	1.10	2.19	1.50
Cr	16.5	4.50	7.20	5.30	3.64	3.79	6.20	Dy	10.3	10.6	9.65	8.79	6.83	12.7	9.11
Co	124	133	145	129	150	162	145	Ho	2.21	2.10	1.98	2.34	1.41	2.53	1.83
Ni	9.70	5.60	4.33	3.87	2.56	2.14	3.39	Er	6.93	5.76	6.52	5.69	4.34	7.45	5.52
Cu	16.9	12.4	10.9	6.98	2.07	3.06	1.30	Tm	1.11	0.76	0.87	0.99	0.66	1.10	0.85
Zn	9.19	12.3	14.8	11.6	24.3	18.1	38.8	Yb	7.29	6.53	5.98	4.23	4.31	6.89	5.51
Ga	19.2	19.3	19.5	20.8	19.1	20.6	21.0	Lu	1.03	0.88	0.97	0.69	0.61	0.96	0.78
Ge	1.39	1.22	1.53	1.32	1.29	1.47	1.40	Σ REE	302	307	344	370	286	447	338
Rb	236	256	276	254	311	248	293	(La/Yb) _N	6.34	7.50	9.91	15.9	9.71	11.54	9.12
Sr	19.4	32.6	42.3	39.8	48.6	49.0	54.8	(Gd/Yb) _N	1.02	1.22	1.67	1.71	1.32	1.68	1.41
Y	69.2	75.6	62.4	55.3	42.5	78.5	56.1	δ Eu	0.11	0.17	0.18	0.11	0.24	0.22	0.23

注： $\sigma = 2 \times (K_2O + Na_2O) / (SiO_2 - 43)$, $\delta Eu = 2 \times Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)$. SX-1、SX-2、SX-3 数据据山西省地质调查院(2013^①)

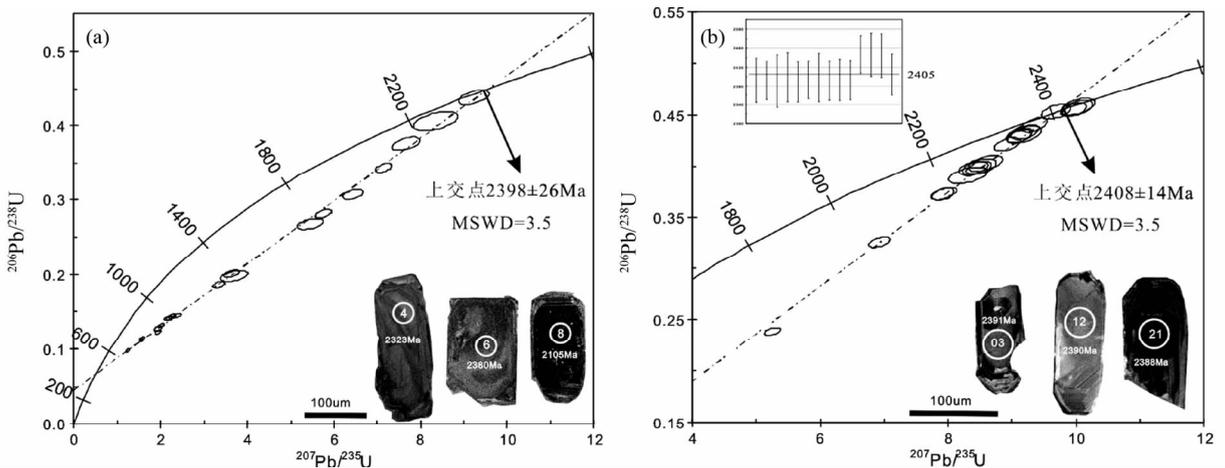


图 3 盖家庄正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

(a) 片麻状正长花岗岩 12LL-13; (b) 粗粒正长花岗岩 12LL-14

Fig. 3 U-Pb concordia diagrams of zircons from the Gaijiazhuang syenogranite

(a) gneissic syenogranite 12LL-13; (b) coarse-grained syenogranite 12LL-14

古老锆石 Pb 的丢失,很可能是测试误差较大所致,故不采用其年龄点。其他测点中的 14 个点位于谐和线或其附近,得

到 2405 ± 12 Ma 的加权平均年龄,另外 5 个分析点也因不同程度放射成因铅丢失导致远离协和线,但这些分析点与 14

① 山西省地质调查院. 2013. 山西省成矿地质背景研究报告

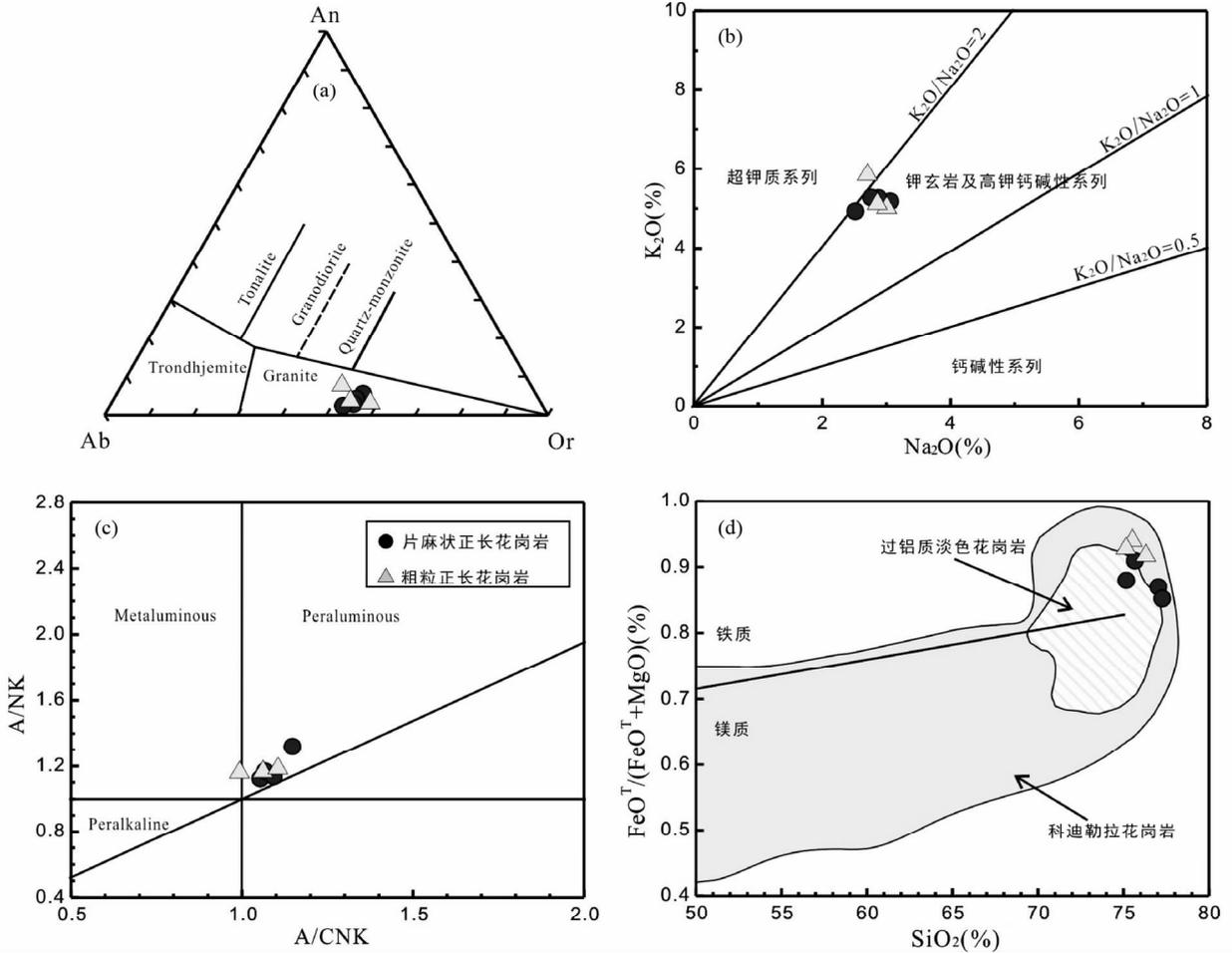


图4 盖家庄正长花岗岩岩石地球化学图解

(a) An-Ab-Or 图解(据 O'Connor, 1965); (b) $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解(据 Whalen *et al.*, 1987); (c) A/NK-A/CNK 图解(据 Shand, 1927); (d) $\text{SiO}_2-\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$ 图解(据 Frost *et al.*, 2001). 图5、图7、图8、图9 中图例同此图

Fig. 4 Granitoids discrimination diagrams of the Gaijiazhuang syenogranite

个协和年龄测点构成一良好不一致线(图3b),并给出 $2408 \pm 14\text{Ma}$ 的上交点年龄,与14个测点获得的协和年龄十分一致。因此,将 $2408 \pm 14\text{Ma}$ 的上交点年龄解释为岩体形成年龄(图3b)。

3.2 全岩主、微量元素

所有样品的主微量元素分析结果见表2。结果显示,盖家庄正长花岗岩成分十分均一,具高度一致的地球化学特征,它们均显示了高 SiO_2 (74.66% ~ 77.38% 和 75.20% ~ 76.24%)、 K_2O ($\text{K}_2\text{O} = 4.93\% \sim 5.27\%$ 和 $5.04\% \sim 5.85\%$) 和高碱度 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.43\% \sim 8.12\%$ 和 $7.98\% \sim 8.55\%$); 明显富 K_2O ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.68 \sim 1.92$ 和 $1.68 \sim 2.17$)、低 TiO_2 ($\text{TiO}_2 = 0.08\% \sim 0.20\%$ 和 $0.15\% \sim 0.25\%$)、 CaO ($0.21\% \sim 0.77\%$ 和 $0.39\% \sim 0.97\%$)、 P_2O_5 ($0.01\% \sim 0.08\%$ 和 $0.03\% \sim 0.04\%$)、 MgO ($0.20\% \sim 0.32\%$ 和 $0.11\% \sim 0.17\%$) 和 FeO^{T} ($1.11\% \sim 1.74\%$ 和 $1.42\% \sim 1.90\%$), 但

高 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 值 ($5.05 \sim 6.70$ 和 $11.18 \sim 15.25$) (图4d), Al_2O_3 偏低 ($11.76\% \sim 12.48\%$ 和 $12.17\% \sim 12.44\%$)。它们的 A/NK 为 $1.13 \sim 1.32$ 和 $1.16 \sim 1.19$, A/CNK 为 $1.06 \sim 1.15$ 和 $1.00 \sim 1.11$, σ 为 $1.72 \sim 2.03$ 和 $1.92 \sim 2.27$ 。在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图中,落入富钾的高钾钙碱-橄辉玄粗岩性系列(图4a, b); 在 A/CNK-A/NK 图解里,大多落入弱过铝质区(图4c)。因此,盖家庄正长花岗岩属于铁质、弱过铝高钾钙碱-橄辉玄粗岩系列花岗岩类。

所有岩石的稀土元素总量高,片麻状正长花岗岩的 $\Sigma\text{REE} = 302.3 \times 10^{-6} \sim 370.3 \times 10^{-6}$,粗粒花岗岩的 $\Sigma\text{REE} = 285.9 \times 10^{-6} \sim 446.9 \times 10^{-6}$,它们的轻重稀土分馏较弱,前者的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 6.34 \sim 15.86$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 4.44 \sim 4.94$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.02 \sim 1.71$; 后者的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 9.12 \sim 11.54$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 4.29 \sim 4.82$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.32 \sim 1.68$, 并均具强铕负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.11 \sim 0.18$ 和 $0.22 \sim 0.24$), 呈现了与 A 型花岗岩类似的铕明显负异常的略微右倾的稀土模式

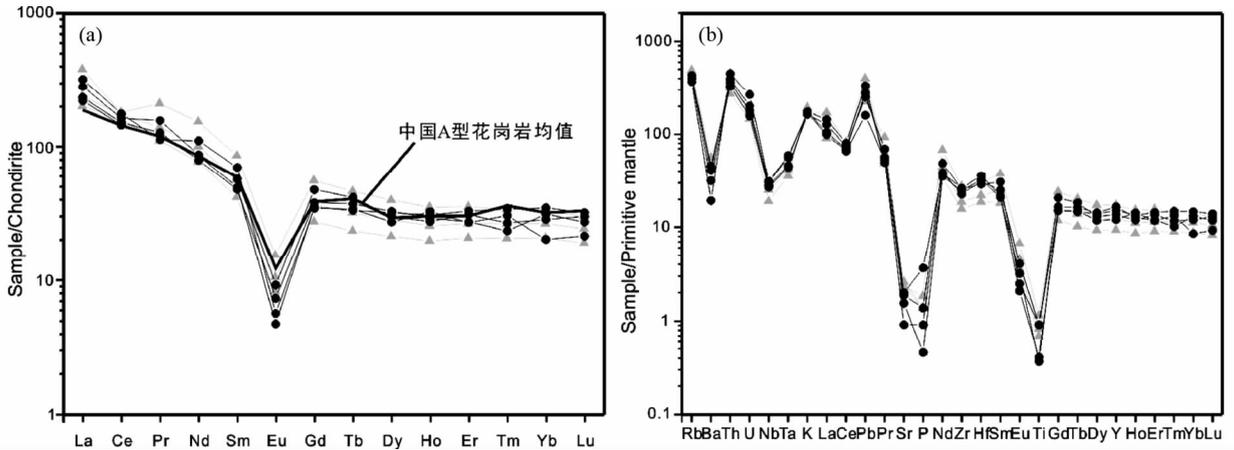


图 5 盖家庄正长花岗岩的球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

中国 A 型花岗岩均值引自吴锁平等, 2007

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element diagrams (b) for the Gaijiazhuang syenogranite (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

Average content of Chinese A-type granitoids after Wu *et al.*, 2007

表 3 盖家庄正长花岗岩的 Sm-Nd 同位素组成

Table 3 Sm-Nd isotopic composition of the Gaijiazhuang syenogranite

样品号	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)
12LL-13a	51.5	9.70	0.1139	0.511453	0.000005	2.2	2602	2609
12LL-14a	46.3	8.11	0.1058	0.511311	0.000005	2.0	2606	2629
12LL-14c	60.2	10.9	0.1098	0.511390	0.000005	2.3	2592	2606

(图 5a)。微量元素表现为相对富集大离子亲石元素、贫高场强元素, 亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 等, 富集 Pb, 在微量元素原始地幔标准化图上, 显示了明显的 Ba、Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 谷和 Pb 的峰(图 5b)。

3.3 同位素组成

3.3.1 全岩 Sm-Nd 同位素

在测试了主微量元素的样品中选择 3 件代表性样品(12LL-13a、12LL-14a、12LL-14c)进行了 Nd 同位素分析(表 3), 全岩的 Nd 的模式年龄根据 DePaolo (1981) 的计算方法计算获得。结果显示盖家庄正长花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为正值, 变化于 2.0 ~ 2.3 之间, 在 $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解中均落在球粒陨石演化线以上的区域(图 6a), 二阶段模式年龄 $t_{\text{DM2}} = 2606 \sim 2629\text{Ma}$ (平均为 2615Ma)。

3.3.2 锆石原位 Lu-Hf 同位素

在盖家庄粗粒正长花岗岩获得协和年龄的 14 粒锆石测点之上或邻近同域上开展了 Hf 同位素分析。分析结果显示, 所有测点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值小于 0.002 (表 4), 指示锆石形成后无明显的放射性成因 Hf 的积累, 因此测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值可代表它们形成时体系的 Hf 同位素组成(吴福元等, 2007)。锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.281338 \sim 0.281480$, 以

2408Ma 的岩体形成年龄计算所得的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值, 变化于 +2.2 ~ +7.1 之间, 所有数据点均位于球粒陨石和亏损地幔 Hf 同位素演化线之间的区域(图 6b)。Hf 同位素单阶段模式年龄 $t_{\text{DM1}}(\text{Hf}) = 2461 \sim 2647\text{Ma}$, 二阶段模式年龄 $t_{\text{DM2}}(\text{Hf}) = 2494 \sim 2791\text{Ma}$ 。

4 讨论

4.1 岩体成因

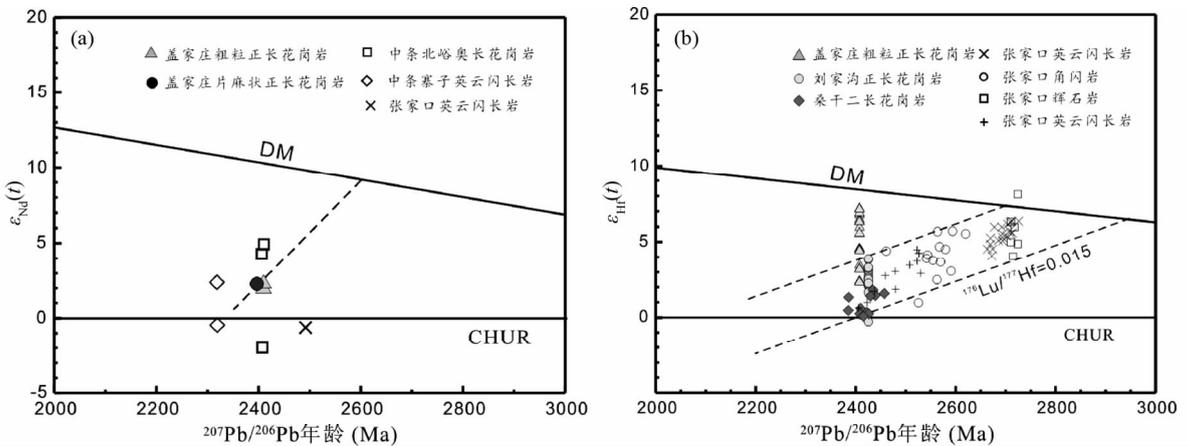
盖家庄正长花岗岩均表现了富硅和碱、高钾、贫钙、镁和高的 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 比值, 并具有很高的稀土总量, 轻重稀土分异弱, 强销负异常的“燕式”稀土谱型(图 5a)。微量元素相对富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素和 Zr、Hf 等高场强元素, 亏损 Sr、Ba、Ti、P 等元素(图 5b), 它们的 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 比值均大于 2.6 (2.91 ~ 3.26), 与 A 型花岗岩的地球化学特征相一致(Bonin, 2007; 张旗等, 2012), 在 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}-\text{Zr}$ (图 7a)、 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}-\text{Y}$ (图 7b) 和 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}-\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ (图 7c) 图解上均落入 A 型花岗岩区。通常, 高度分异的 I 型和 S 型花岗岩 ($\text{SiO}_2 > 74\%$) 与 A 型花岗岩在化学成分上有很大的相似性, 但它们之间的 $\text{Zr} + \text{Ce} + \text{Y}$ 与 Rb/Ba 比值关系却明显不同。与高度分异的 I 型和 S 型花岗岩 $\text{Zr} + \text{Ce}$

表4 盖家庄正长花岗岩的锆石 Hf 同位素数据

Table 4 Lu-Hf isotopic compositions of zircons from the Gaijiazhuang syenogranite

测点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
12LL-14-01	0.035631	0.001113	0.281452	0.000025	5.5	0.9	2525	2594	-0.97
12LL-14-02	0.016017	0.000547	0.281461	0.000019	6.7	0.7	2476	2518	-0.98
12LL-14-03	0.015243	0.000557	0.281338	0.000019	2.3	0.7	2642	2785	-0.98
12LL-14-04	0.026325	0.000866	0.281414	0.000029	4.5	1.0	2561	2652	-0.97
12LL-14-05	0.013533	0.000486	0.281469	0.000026	7.1	0.9	2461	2494	-0.99
12LL-14-06	0.012347	0.000439	0.281447	0.000017	6.4	0.6	2488	2537	-0.99
12LL-14-07	0.039709	0.001214	0.281676	0.000028	13.3	1.0	2222	2114	-0.96
12LL-14-09	0.026087	0.000868	0.281412	0.000020	4.4	0.7	2564	2656	-0.97
12LL-14-10	0.019768	0.000685	0.281374	0.000028	3.4	1.0	2603	2722	-0.98
12LL-14-11	0.013825	0.000501	0.281395	0.000024	4.4	0.8	2562	2657	-0.98
12LL-14-12	0.027291	0.000892	0.281480	0.000030	6.8	1.1	2472	2510	-0.97
12LL-14-13	0.036940	0.001153	0.281465	0.000024	5.9	0.8	2509	2569	-0.97
12LL-14-14	0.028049	0.000944	0.281467	0.000016	6.3	0.6	2494	2545	-0.97
12LL-14-15	0.014541	0.000504	0.281446	0.000021	6.2	0.8	2494	2546	-0.98
12LL-14-16	0.020971	0.000712	0.281343	0.000021	2.2	0.7	2647	2791	-0.98
12LL-14-17	0.016603	0.000573	0.281362	0.000020	3.2	0.7	2611	2736	-0.98
12LL-14-19	0.018137	0.000634	0.281475	0.000024	7.1	0.9	2463	2496	-0.98
12LL-14-21	0.044637	0.001392	0.281466	0.000028	5.5	1.0	2525	2592	-0.96
12LL-14-24	0.009727	0.000361	0.281386	0.000022	4.4	0.8	2565	2662	-0.99
12LL-14-25	0.040209	0.001326	0.281395	0.000026	3.1	0.9	2617	2738	-0.96

注: 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和模式年龄计算中采用的 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}$ (Scherer *et al.*, 2001), 球粒陨石现今的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu} = 0.0332$ (Blichert-Toft and Albarède, 1997), 单阶段 Hf 模式年龄采用现今亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Lu} = 0.2832$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu} = 0.0384$ (Griffin *et al.*, 2000), 二阶段模式年龄分别采用平均地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}} = -0.55$ 、 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu} = 0.015$ (Griffin *et al.*, 2002) 计算

图6 盖家庄正长花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 对年龄图解

资料来源: 赵凤清, 2006; Jiang *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2011; 李创举等, 2012

Fig. 6 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ and $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. U-Pb age diagram of zircons from Gaijiazhuang syenogranite

Data from Zhao, 2006; Jiang *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2012

+ Y 与 Rb/Ba 比值具负相关性不同, 盖家庄正长花岗岩的 Zr + Ce + Y 与 Rb/Ba 无任何相关关系, 在 Zr + Ce + Y 与 Rb/Ba 图解 (图 7d) 中也显示 A 型花岗岩分散的特征 (Whalen *et al.*, 1987), 这也与研究区未发现同期与其有成因演化关系的花岗岩类的出现相一致, 证明盖家庄岩体属 A 型花岗岩。

大陆地壳岩石部分熔融实验结果揭示, A 型花岗岩岩浆

更易产出于地壳浅部。当压力为 0.8 GPa 时, 残留相出现单斜辉石, 脱水熔融形成的花岗岩显示类似 A 型花岗岩的特征; 而当压力小于 0.4 GPa 时, 残留相出现斜长石 + 斜方辉石, 形成的花岗岩更具 A 型花岗岩的典型特征 (Douce, 1997)。盖家庄正长花岗岩的 Al_2O_3 、Eu 与 SiO_2 无明显的负相关性, 指示岩浆演化过程并无发生斜长石分离结晶作用。

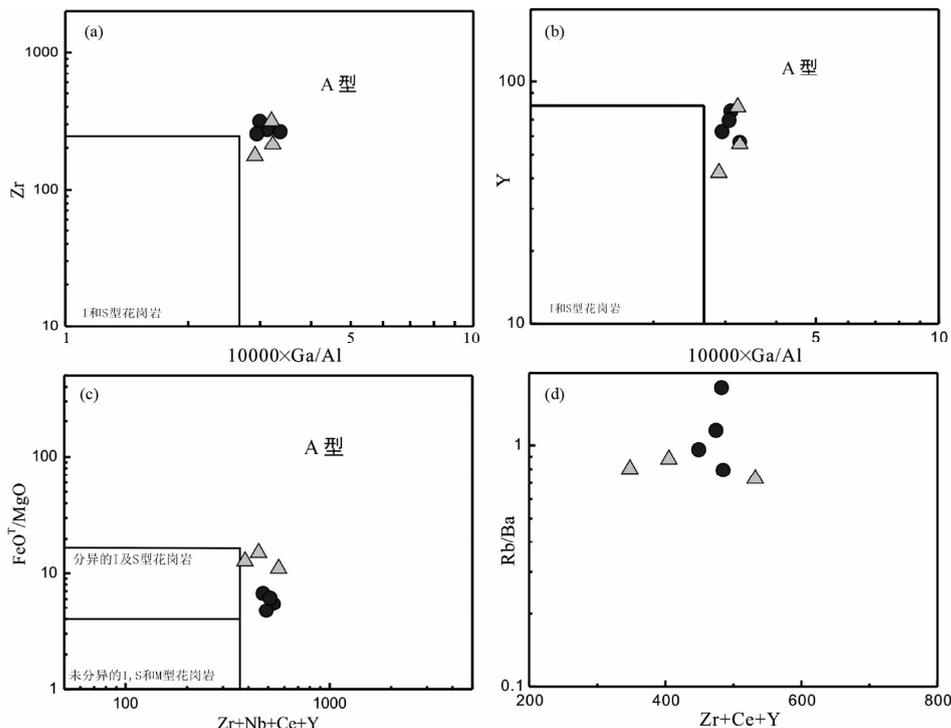


图7 盖家庄正长花岗岩的 A 型花岗岩判别图解(据 Whalen *et al.*, 1987)

(a) $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 对 Zr 图解; (b) $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ -Y 图解; (c) $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ - $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 图解; (d) $\text{Zr} + \text{Ce} + \text{Y}$ -Rb/Ba 图解

Fig.7 A-type granitoids discrimination diagrams of the Gaijiazhuang syenogranite (after Whalen *et al.*, 1987)

然而,在微量元素蛛网图中却具明显的 Sr、Ba 和 Eu 负异常,显然表明岩石部分熔融时其残留相中斜长石是一个主要的矿物相。另一方面,盖家庄岩体低 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 和 Sr/Y 值,高 Yb、Y 含量,又反映其源自一无石榴石残留相存在的熔融源区。由于斜长石消失的最小压力约在 1.2GPa,石榴石出现的最小压力在 0.8 ~ 1.0GPa (Defant and Dmmmond, 1990; Douce, 1997),因此,盖家庄正长花岗岩形成压力可能至少小于 0.8GPa,对应的岩浆形成深度应 < 30km (张旗等, 2010)。一般认为锆石饱和温度可近似代表花岗质岩石近液相线的温度 (Watson and Harrison, 1983), Möller *et al.* (2003) 依据岩石全岩化学组分计算获得的锆饱和温度,将花岗岩分为热和冷花岗岩。温度高于 800°C 为热花岗岩,常由于缺少残留继承锆石而锆不饱和;温度低于 800°C 的冷花岗岩,由于温度较低,常出现残留继承锆石而处于锆饱和状态。依据锆饱和温度计公式 $T_{\text{Zr}} = 129000/[2.95 + 0.85M + \ln(496000/\text{Zr熔体})]$ 计算获得的盖家庄正长花岗岩的形成温度变化于 803 ~ 860°C 之间,均高于 800°C,同时该岩体中未发现任何继承锆石或捕获锆石,而锆不饱和岩浆的结晶温度往往代表岩浆结晶最低温度,因此盖家庄正长花岗岩为高温浅源的 A 型花岗岩。

4.2 岩体物质来源

岩石全岩 Sm-Nd 同位素可较好揭示其岩石源区、地壳形

成及其演化 (DePaolo, 1981)。花岗岩类的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 正值是地壳滞留时间短的新生地壳物质源区部分熔融的结果,而负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值则为古老陆壳物质再造的产物。同时,他们的两阶段 Nd 模式年龄 (t_{DM2}) 能有效限定陆壳物质形成后在陆壳中滞留的平均年龄 (Kröner *et al.*, 2012)。盖家庄正长花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为正值,变化于 2.0 ~ 2.3 之间,在 t - $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解中均落在球粒陨石演化线以上的区域 (图 6a), 它们的二阶段模式年龄 $t_{\text{DM2}} = 2606 \sim 2629\text{Ma}$ (平均为 2615Ma), 略高于岩体形成年龄,暗示该岩体可能来源于一新生地壳岩石的部分熔融。与花岗岩全岩 Sm-Nd 同位素相比,花岗岩锆石原位 (in situ) Hf 同位素组成,由于锆石极高的稳定性和封闭温度高,使得其 Lu-Hf 同位素体系较少受后期构造热事件的影响,即便在麻粒岩相等高级变质条件下,所测锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值仍能很好反映其形成时体系的 Hf 同位素组成,甚至可记录岩浆源区不同源岩类型的特征 (Scherer *et al.*, 2000; Griffin *et al.*, 2002; 吴福元等, 2007)。因此,正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值代表来自亏损幔源物质或新生地壳的部分熔融,负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值指示来自于古老陆壳岩石源区外,如果存在较大变化范围的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 还可揭示其源区不同性质源岩物质存在的信息 (Kröner *et al.*, 2014)。盖家庄正长花岗岩锆石具较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 (0.281338 ~ 0.281676), 依形成年龄 (2408Ma) 计算获得的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值 (+2.2 ~ +7.1), 在 t - $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解上所有成分点落在球粒陨石演化线以上靠近亏损地幔演化线的区域 (图 6b), 其二阶段模式年龄 $t_{\text{DM2}} = 2494$

~2791Ma(峰值为2656Ma),与Nd同位素一致也指示它们主要来自一新太古代末期新生地壳物质的部分熔融。然而,部分锆石还出现了接近于亏损地幔演化线高的正值(图6),暗示有新生幔源岩浆活动的参与。

另一方面,盖家庄岩体高SiO₂、富集Rb、Th、U、K和LREE等大离子亲石元素,亏损Nb、Ta、P、Ti等元素,Mg[#]、Cr、Ni、Th/U值(Th/U=6.5~8.4),Nb/Ta(9.13~11.82)值低,接近于下地壳岩石的Th/U(≈6.0)和Nb/Ta(≈8.3)比值,明显低于幔源岩石的Th/U(>15)和Nb/Ta(≈22)比值(Bea *et al.*, 2001; Rudnick and Gao, 2003),同时FeO^T/(FeO^T+MgO)比值较高,这些均支持它们主要来自新生大陆下地壳物质的部分熔融。近年来,华北克拉通的锆石年代学及Lu-Hf同位素资料证明,~2.7Ga为一次重要的地壳增生期,并不断有一些该期的岩浆侵入体被识别出来(Liu *et al.*, 2009; Diwu *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2010; Wan *et al.*, 2011; Geng *et al.*, 2012)。此外,在吕梁地区混合岩中形成于2535Ma的浅色体中发现了2783Ma的继承锆石(Trap *et al.*, 2009),也暗示吕梁地区深部存在~2.7Ga的地壳物质。因此,吕梁地区深部很可能存在相当的新太古代新生陆壳,并成为盖家庄岩体的重要源区。对A型花岗岩的实验岩石学研究表明,英云闪长岩及花岗闪长岩等岩石组分低压下的部分熔融可产生A型花岗岩浆,并随熔融深度不同形成不同组分的A型花岗岩(Creaser *et al.*, 1991; Skjerlie and Johnston, 1992, 1993; Douce, 1997)。这些A型花岗岩的形成,在成因上均直接(如原始岩浆)或间接(提供热源)与地幔物质的贡献密切相关(Frost *et al.*, 2001)。相对于中部带其它地区同期钾质花岗岩类以及2.7Ga的陆壳物质相比,盖家庄正长花岗岩出现了更为偏正的ε_{Hf}(t)(图6b),显然表明其形成过程还应有新生幔源物质的加入。由此推断,盖家庄正长花岗岩除主要源自新太古代新生陆壳物质部分熔融外,很可能在其形成过程还有一定地幔岩浆物质的加入(图6),这些幔源岩浆的活动不仅影响了该岩体的组成,同时也为该岩体的形成提供了重要的热源。

4.3 岩体形成环境

与地壳挤压增厚生热模式不同,伸展拉张大地构造环境下陆壳物质的部分熔融需要外来热量的供给。地壳发生高温部分熔融形成A型花岗岩则指示深部存在热异常,这在大多数情况下是发生在大陆地壳拉张背景下。因而,尽管大陆地壳中的花岗岩类极少直接源自地幔物质,但地幔所提供的热量则是多数花岗岩得以形成的重要因素。地壳减薄导致的幔源物质上涌带来的热导致的下地壳部分熔融,往往能满足形成A型花岗岩所必须的低压、相对贫水和高温的物理化学条件。由于大陆地壳拉张减薄持续时间有限,多数情况下形成的A型花岗岩是以规模不大的小岩体而侵位于地壳浅部。这也可能是吕梁地区、甚至整个中部带未发育大量A型花岗岩体,仅出现盖家庄正长花岗岩这样的小岩株的重要原因。Eby(1992)将A型花岗岩划分为非造山与裂谷环境有关的A1型花岗岩和造山后构造环境形成的A2型花岗岩。盖家庄正长花岗岩低Nb,高Y(Y/Nb>1.2),在Nb-Y-3×Ga和Y/Nb-Rb/Nb图解上,均落于后造山的A2型花岗岩区域(图8),在Pearce(1984)构筑的花岗岩判别图解中落在与后碰撞花岗岩环境有关的区域(图9)。盖家庄岩体形成于高温下地壳物质部分熔融,并具有少量幔源物质添加的特征,显然表明该岩体可能是于~2.5Ga不同陆块碰撞拼合后由于幔源物质上涌致使陆壳伸展减薄发生下部陆壳物质部分熔融所形成。

新的研究不断揭示,华北地块在古元古代早期存在广泛的花岗岩浆活动,并在华北克拉通中部构造带内中条、吕梁、赞皇、承德等地区广泛发育(李永刚等, 1995; 耿元生等, 2000, 2006; 赵凤清等, 2006; Zhao *et al.*, 2008; 杨崇辉等, 2011; Zhou *et al.*, 2011; 初航等, 2012; 李创举等, 2012; 罗志波等, 2012; 曲军峰等, 2012; 张瑞英等, 2012; 魏颖等, 2013)。其中,Zhou *et al.* (2011)在中部带南部的华北克拉通南缘获得刘家沟岩体2424Ma的形成年龄,并认为是2.4Ga左右该区由挤压向伸展转化构造背景下形成的高分异I型

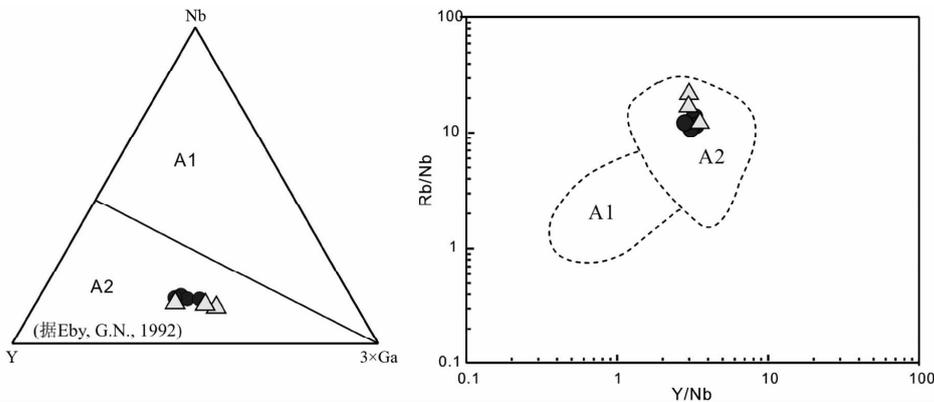


图8 盖家庄正长花岗岩的3×Ga-Nb-Y和Y/Nb-Rb/Nb图解(据Eby, 1992)

Fig. 8 Discrimination diagrams of 3×Ga-Nb-Y and Y/Nb vs. Rb/Nb of the Gaijiashuang syenogranite (after Eby, 1992)

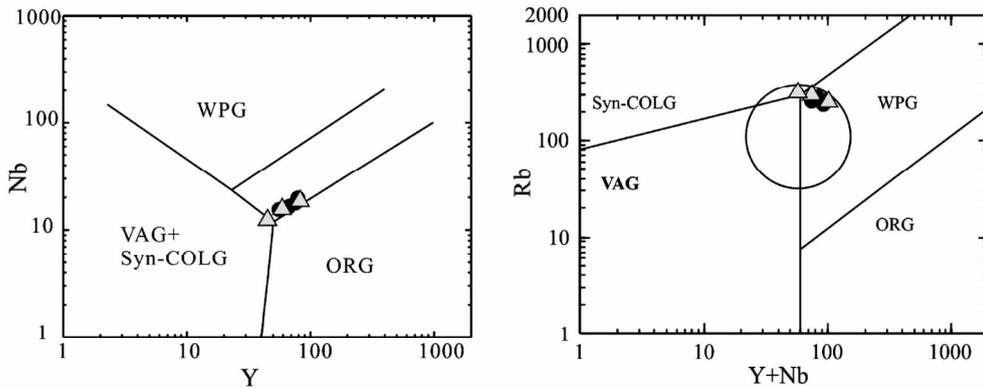


图9 盖家庄正长花岗岩的 Nb 对 Y 和 Y + Nb 对 Rb 微量元素构造判别图解 (据 Pearce *et al.*, 1984)

Syn-COLG-同碰撞花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; ORG-洋脊花岗岩; WPG-板内花岗岩

Fig. 9 Tectonic discrimination diagrams of Nb vs. Y and Rb vs. (Y + Nb) of the Gaijiazhuang syenogranite (after Pearce *et al.*, 1984)

syn-COLG-syn-collision granites; VAG-volcanic arc granites; ORG-oceanic ridge granites; WPG-within-plate granites

花岗岩;赵凤清等(2006)在中条地区确定了 2405Ma 的形成的北峪奥长花岗岩,认为是麻粒岩相变质基性岩分熔的产物;张瑞英等(2012)也在该区识别出形成于 2351Ma 的烟庄花岗岩,认为其是下地壳物质部分熔融的产物。杨崇辉等(2011)在赞皇地区识别出形成于 2490Ma 营等钾质花岗岩,为新生地壳在由挤压向伸展转换构造背景下部分熔融形成同碰撞和后碰撞 S 型花岗岩;李创举等(2012)在中部带北部的崇礼地区也发现 ~2.44Ga 的富钾质花岗岩,认为是早期 TTG 岩石部分熔融所形成,代表了碰撞后构造环境一期花岗岩浆活动。在中部带更为北部的承德北部单塔子群中也发育 2454Ma 的二长花岗岩体和同期基性岩墙,共同揭示了古元古代初期一期陆壳拉张伸展事件(曲军峰等, 2012)。此外,在华北克拉通东部的辽东地区古元古代早期的 2.5 ~ 2.4Ga 期间发生一次重要的基性岩浆底侵事件,并诱发区内下地壳活化再造形成了 2.47 ~ 2.33Ga 的造山后钾质花岗岩(李三忠等, 2001, 2003; 郝德峰等, 2004);西部乌拉山地区同样出现形成于 2407Ma 钾质花岗岩(吴昌华等, 2006)。因此,华北克拉通中部带盖家庄 A2 型花岗岩及 ~2.4Ga 的钾质花岗岩类代表了华北克拉通古元古代早期伸展拉张背景下一期重要的构造岩浆热事件。翟明国系统总结了华北克拉通新太古代晚期地质事件及岩浆和变质作用,提出华北克拉通太古宙未经历了 2.52 ~ 2.50Ga 的变质作用,2.5Ga 的基性和碱性-超镁铁质岩浆侵入及广泛的花岗岩浆活动,代表华北克拉通化过程重要地质作用(Zhai and Santosh, 2011, 2013; Zhai, 2014)。Geng *et al.* (2012)进一步总结对比了华北克拉通 2.5Ga 花岗岩类的 Hf 同位素组成特征,提出新太古代末期广泛的花岗岩浆活动主要为新生陆壳再造所形成,这次广泛的花岗岩浆活动导致了华北克拉通的最终形成。因此,华北克拉通中部带吕梁地区 ~2.4Ga 的盖家庄 A2 型花岗岩的确定不仅指示华北克拉通形成之后在早元古代早期 ~2.4Ga 存在一期重要的花岗岩浆活动,更重要的是揭示

了华北克拉通在 ~2.5Ga 形成之后于 ~2.4Ga 开始转入陆块碰撞拼合之后的伸展拉张构造环境。与此同时,在 2.45Ga 华北克拉通发生有一期幔源基性岩浆侵入活动(Wan *et al.*, 2013),指示了该期地壳伸展拉张与地幔物质上涌引发的幔源岩浆活动密切相关,它们与花岗岩浆作用一同指示 ~2.5Ga 华北克拉通形成后,由于区域构造应力松弛造成陆壳由挤压向伸展拉张转换过程中一次由于地幔上涌发生幔源岩浆侵入而引发的陆壳物质部分熔融作用。因此, ~2.4Ga 花岗岩浆活动代表了陆块碰撞聚合后伸展作用引起的地幔物质上涌增温导致下部陆壳熔融产生的一期重要花岗岩浆活动,并指示华北克拉通在新太古代末期 2.5Ga 不同陆块碰撞拼合发生克拉通化后,于 ~2.4Ga 左右开始转入陆壳伸展拉张构造环境,此后相继发生裂解、消减和最终碰撞拼合形成统一稳定的华北克拉通(翟明国, 2013)。

5 结论

(1) 吕梁地区盖家庄片麻状正长花岗岩和弱变形粗粒正长花岗岩分别获得 $2398 \pm 26\text{Ma}$ 和 $2408 \pm 14\text{Ma}$ 的形成年龄,代表了华北克拉通早元古代早期 ~2.4Ga 一期重要的花岗岩浆事件;

(2) 盖家庄正长花岗岩富硅、碱,高钾、贫钙、镁,高 FeO^T/MgO 比值和高稀土总量,弱轻重稀土分异、强铷负异常,富集 Rb、Th、U 元素,明显亏损 Ba、Sr、Nb、Ti 元素,高 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al} (> 2.6)$,属陆块碰撞后与伸展拉张环境下形成的 A2 型花岗岩;

(3) 盖家庄正长花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +2.0 \sim +2.3$,两阶段 Nd 模式年龄 $t_{\text{DM2}} = 2606 \sim 2629\text{Ma}$,锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +2.2 \sim +7.1$, $t_{\text{DM2}} = 2494 \sim 2791\text{Ma}$,一致指示其来源于新太古代晚期新生陆壳物质的部分熔融,同时有新生幔源物质的添加。结合区域地质和同期钾质花岗岩类的出现认为,盖家庄正长

花岗岩与钾质花岗岩一道记录了华北克拉通 2.5Ga 不同陆块聚合拼合后于古元古代早期 ~ 2.4Ga 一期陆壳伸展拉张作用引发的地幔物质上涌基性岩浆上侵导致下部新生陆壳物质增温发生部分熔融构造岩浆事件,证明陆壳已转入伸展拉张构造环境。

致谢 感谢牛贺才研究员、张华锋副教授及周艳艳博士三位审稿人员的精心评审和提出的建设性修改意见,对本文提高发挥了重要作用!

References

- Bea F, Arzamastsev A, Montero P and Arzamastseva L. 2001. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: Evidence of mantle-derived matasomatic fluids affecting crustal materials. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 140(5): 554–566
- Belousova E, Griffin WL, O'Reilly SY and Fisher NI. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1–2): 243–258
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 97(1–2): 1–29
- Chen B, Liu SW, Geng YS and Liu CQ. 2006. Zircon U-Pb ages, Hf isotopes and significance of the Late Archean-Paleo Proterozoic granitoids from the Wutai-Luliang terrain, North China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 296–304 (in Chinese with English abstract)
- Chu H, Wang HC, Wei CJ, Liu H and Zhang K. 2012. The metamorphic evolution history of high pressure granulites in Chengde area, northern margin of North China: Zircon chronology and geochemical evidence. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(6): 977–987 (in Chinese with English abstract)
- Condie KC. 1998. Episodic continental growth and supercontinents: A mantle avalanche connection? *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1–4): 97–108
- Creaser RA, Price RC and Wormald RJ. 1991. A-type granites revisited: Assessment of a residual source model. *Geology*, 19(2): 163–166
- Defant MJ and Dmmmond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665
- DePaolo DJ. 1981. Neodymium isotopes in the Colorado Front Range and crust-mantle evolution in the Proterozoic. *Nature*, 291(5812): 193–196
- 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(23): 2557–2571
- Douce AEP. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. *Geology*, 25(8): 743–746
- Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641–644
- Frost CD, Bell JM, Frost BR *et al.* 2001. Crustal growth by magmatic underplating: Isotopic evidence from the northern Sherman batholith. *Geology*, 29(6): 515–518
- Geng YS, Wan YS, Shen QH *et al.* 2000. Chronological framework of the Early Precambrian important events in the Lvliang area, Shanxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 74(3): 216–223 (in Chinese with English abstract)
- Geng YS, Yang CH and Wan YS. 2006. Paleoproterozoic granitic magmatism in the Lvliang area, North China Craton: Constraint from isotopic geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 305–314 (in Chinese with English abstract)
- Geng YS, Du LL and Ren LD. 2012. Growth and reworking of the Early Precambrian continental crust in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes. *Gondwana Research*, 21(2–3): 517–529
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147
- Griffin WL, Wang X, Jackson SE *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61(3): 237–269
- Hao DF, Li SZ, Zhao GC, Sun M, Han ZZ and Zhao GT. 2004. Origin and its constraint to tectonic evolution of Paleoproterozoic granitoids in the eastern Liaoning and Jilin Province, North China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1409–1416 (in Chinese with English abstract)
- Huang XL, Niu YL, Xu YG, Yang QJ and Zhong JW. 2010. Geochemistry of TTG and TTG-like gneisses from Lushan-Taihua complex in the southern North China Craton: Implications for Late Archean crustal accretion. *Precambrian Research*, 182(1–2): 43–56
- 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)
- Jiang N, Guo JH, Zhai MG *et al.* 2010. ~2.7Ga crust growth in the North China craton. *Precambrian Research*, 179(1–4): 37–49
- Kröner A, Alexeev DV, Hegner E *et al.* 2012. Zircon and muscovite ages, geochemistry, and Nd-Hf isotopes for the Aktuz metamorphic terrane: Evidence for an Early Ordovician collisional belt in the northern Tianshan of Kyrgyzstan. *Gondwana Research*, 21(4): 901–927
- Kröner A, Kovach V, Belousova E *et al.* 2014. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 25(1): 103–125
- Kusky TM and Li JH. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383–397
- Li CJ, Bao ZW, Zhao ZZ and Qiao YL. 2012. Zircon U-Pb age and Hf isotopic compositions of the granitic gneisses from the Sanggan complex in the Zhangjiakou area: Constraints on the early evolution of North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1057–1072 (in Chinese with English abstract)
- Li SZ, Han ZZ, Liu YJ *et al.* 2001. Constraints of geology and geochemistry on Paleoproterozoic pre-orogenic deep processes in Jiao-Liao massif. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 184–194 (in Chinese with English abstract)
- Li SZ, Hao DF, Han ZZ *et al.* 2003. Paleoproterozoic deep processes and tectono-thermal evolution in Jiao-Liao Massif. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 328–340 (in Chinese with English abstract)
- Li YG, Guo JY and Zhai MG. 1995. Geochemistry and tectonic significance of Early Precambrian potassic granite from Tianzhen-Huai'an area. *J. Geo. Min. Res. North China*, 10(2): 223–235 (in Chinese with English abstract)
- Liu CS, Chen XM, Chen PR, Wang RC and Hu H. 2003. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A-type rock Suites. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 573–591 (in Chinese with English abstract)
- Liu DY, Wilde SA, Wan YS *et al.* 2009. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton reveal multiple events in the Late Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic. *Chemical Geology*, 261(1–2): 140–154
- Liu SW, Zhang J, Li QG *et al.* 2012. Geochemistry and U-Pb zircon ages of metamorphic volcanic rocks of the Paleoproterozoic Liliang Complex and constraints on the evolution of the Trans-North China

- Orogen, North China Craton. *Precambrian Research*, 222 – 223: 173 – 190
- Loiselle MC and Wones DR. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geological Society of America Abstract Progressing*, 11(7): 468
- Ludwig KR. 2003. *Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1 – 70
- Luo ZB, Zhang HF, Diwu CR and Zhang H. 2012. Zircon U-Pb, Lu-Hf isotope and trace element compositions of intermediate pyroxene granulite in the Huai' an area, Northwest Hebei Province: Constraints on the timing of retrograde metamorphism. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3721 – 3738 (in Chinese with English abstract)
- Möller A, O'Brien PJ, Kennedy A *et al.* 2003. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: An example from the ultrahigh-temperature granulites of Rogaland (SW Norway). *Geological Society of London Special Publications*, 220(1): 65 – 81
- O'Connor JT. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. *U. S. Geological Survey Professional Paper*, 525: 79 – 84
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956 – 983
- Qu JF, Li JY and Liu JF. 2012. Geochronological study on the Fenghuangzui complex of Dantazi Group at northern Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2879 – 2889 (in Chinese with English abstract)
- Rudnick RL and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*, 3: 1 – 64
- Scherer EE, Cameron KL and Blichert-Toft J. 2000. Lu-Hf garnet geochronology: Closure temperature relative to the Sm-Nd system and the effects of trace mineral inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(19): 3413 – 3432
- Shand SJ. 1927. *Eruptive Rocks*. London: Murby, 1 – 230
- Skjerlie KP and Johnston AD. 1992. Vapor-absent melting at 10kbar of a biotite-and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites. *Geology*, 20(3): 263 – 266
- Skjerlie KP and Johnston AD. 1993. Fluid-absent melting behavior of an F-rich tonalitic gneiss at mid-crustal pressures: Implications for the generation of anorogenic granites. *Journal of Petrology*, 34(4): 785 – 815
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 – 345
- Trap P, Faure M, Lin W *et al.* 2009. The Lüliang Massif: A key area for the understanding of the Palaeoproterozoic Trans-North China Belt, North China Craton. *Geological Society, London, Special Publications*, 323(1): 99 – 125
- Wan YS, Geng YS, Shen QH and Zhang RX. 2000. Khondalite series-geochronology and geochemistry of the Jiehekou Group in Lüliang area, Shanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 49 – 58 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Liu D, Wang S *et al.* 2011. ~2.7Ga juvenile crust formation in the North China Craton (Taishan-Xintai area, western Shandong Province): Further evidence of an understated event from U-Pb dating and Hf isotopic composition of zircon. *Precambrian Research*, 186(1 – 4): 169 – 180
- Wan YS, Xu ZY, Dong CY *et al.* 2013. Episodic Paleoproterozoic (~2.45, ~1.95 and ~1.85Ga) mafic magmatism and associated high temperature metamorphism in the Daqingshan area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry. *Precambrian Research*, 224: 71 – 93
- Wang DZ, Zhao GT and Qiu JS. 1995. The tectonic constraint on the Late Mesozoic A-type granitoids in eastern China. *Geological Journal of Universities*, 1(2): 13 – 21 (in Chinese with English abstract)
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295 – 304
- Wei Y, Zheng JP, Su YP and Ma Q. 2013. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of granulites from the Huai' an Complex: Implications for the accretion and reworking of the lower crust beneath the north margin of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2281 – 2294 (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
- Wu CH, Sun M, Li HM, Zhao GC and Xia XP. 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the khondalites from the Wulashan and Jining high-grade terrain in northern margin of the North China Craton: Constraints on sedimentary age of the khondalite. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2639 – 2654 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185 – 220 (in Chinese with English abstract)
- Wu SP, Wang MY and Qi KJ. 2007. Present situation of researches on A-type granite: A review. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 57 – 66 (in Chinese with English abstract)
- Yang CH, Du LL, Ren LD *et al.* 2011. Petrogenesis and geodynamic setting of Jiandeng potassic granite at the end of the Neoproterozoic in Zhanhuang Complex, North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 62 – 78 (in Chinese with English abstract)
- Yu JH, Wang DZ and Wang CY. 1997. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Early Proterozoic bimodal volcanic rocks from Lüliang Group, Shanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 13(1): 60 – 71 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Gao S, Liu XM *et al.* 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353 – 370
- Yuan HL, Gao S, Dai MN *et al.* 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247(1 – 2): 100 – 118
- Zhai MG, Bian AG and Zhao TP. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during Late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic. *Science in China (Series D)*, 43(1): 219 – 232
- Zhai MG and Liu WJ. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton: A review. *Precambrian Research*, 122(1 – 4): 183 – 199
- Zhai MG. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton. *Mineral Deposits*, 29(1): 24 – 36 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG. 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: A summary and review. *Science China (Earth Sciences)*, 54(8): 1110 – 1120
- Zhai MG and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6 – 25
- Zhai MG and Santosh M. 2013. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth. *Gondwana Research*, 24(1): 275 – 297
- Zhai MG. 2013. The main old lands in China and assembly of Chinese unified continent. *Scientia Sinica (Terrae)*, 43(10): 1583 – 1606 (in Chinese)
- Zhai MG. 2014. Multi-stage crustal growth and cratonization of the North China Craton. *Geoscience Frontiers*, 5(4): 457 – 469
- Zhang Q, Jin WJ, Li CD and Wang YL. 2010. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb contents; Index. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 985 – 1015 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Ran H and Li CD. 2012. A-type granite: What is the essence?

- Acta Petrologica et Mineralogica, 31(4): 621–626 (in Chinese with English abstract)
- Zhang RY, Zhang CL, Diwu CR and Sun Y. 2012. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and its geological implications for the Precambrian granitoids in Zhongtiao Mountain, Shanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3559–3573 (in Chinese with English abstract)
- Zhao FQ. 2006. Geochronologic and geochemical constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of Zhongtiao Mountains from Shanxi Province. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English summary)
- Zhao FQ, Li HM, Zuo YC and Xue KQ. 2006. Zircon U-Pb ages of Paleoproterozoic granitoids in the Zhongtiao Mountains, southern Shanxi, China. *Geological Bulletin of China*, 25(4): 442–447 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA *et al.* 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1–2): 45–73
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177–202
- Zhao GC, Wilde SA, Sun M *et al.* 2008. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Lüliang Complex; Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 160(3–4): 213–226
- Zhao GC and Zhai M. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications. *Gondwana Research*, 23(4): 1207–1240
- Zhou YY, Zhao T, Wang CY *et al.* 2011. Geochronology and geochemistry of 2.5 to 2.4 Ga granitic plutons from the southern margin of the North China Craton: Implications for a tectonic transition from arc to post-collisional setting. *Gondwana Research*, 20(1): 171–183
- 附中文参考文献**
- 陈斌, 刘树文, 耿元生, 刘超群. 2006. 吕梁-五台地区晚太古宙-古元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义. *岩石学报*, 22(2): 296–304
- 初航, 王惠初, 魏春景, 刘欢, 张阔. 2012. 华北北缘承德地区高压麻粒岩的变质演化历史——锆石年代学和地球化学证据. *地球学报*, 33(6): 977–987
- 耿元生, 万渝生, 沈其韩等. 2000. 吕梁地区早前寒武纪主要地质事件的年代框架. *地质学报*, 74(3): 216–223
- 耿元生, 杨崇辉, 万渝生. 2006. 吕梁地区古元古代花岗岩浆作用——来自同位素年代学的证据. *岩石学报*, 22(2): 305–314
- 郝德峰, 李三忠, 赵国春, 孙敏, 韩宗珠, 赵广涛. 2004. 辽吉地区古元古代花岗岩成因及对构造演化的制约. *岩石学报*, 20(6): 1409–1416
- 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
- 李创举, 包志伟, 赵振华, 乔玉楼. 2012. 张家口地区桑干杂岩中花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素特征及其对华北克拉通早期演化的制约. *岩石学报*, 28(4): 1057–1072
- 李三忠, 韩宗珠, 刘永江等. 2001. 胶辽地块古元古代前造山期深部过程的地质与地球化学制约. *地质科学*, 36(2): 184–194
- 李三忠, 郝德峰, 韩宗珠等. 2003. 胶辽地块古元古代构造-热演化与深部过程. *地质学报*, 77(3): 328–340
- 李永刚, 郭敬辉, 翟明国. 1995. 天镇-怀安地区早前寒武纪钾质花岗岩地球化学特征及构造环境. *华北地质矿产杂志*, 10(2): 223–235
- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 王汝成, 胡欢. 2003. A 型岩套的分类、判别标志和成因. *高校地质学报*, 9(4): 573–591
- 罗志波, 张华锋, 第五春荣, 张红. 2012. 冀西北怀安地区中性辉石麻粒岩的锆石 U-Pb、Lu-Hf 及微量元素组成对区域退变质时代的制约. *岩石学报*, 28(11): 3721–3738
- 曲军峰, 李锦轶, 刘建峰. 2012. 冀北单塔子群凤凰嘴杂岩的年代学研究. *岩石学报*, 28(9): 2879–2889
- 万渝生, 耿元生, 沈其韩, 张如心. 2000. 孔兹岩系-山西吕梁地区界河口群的年代学和地球化学. *岩石学报*, 16(1): 49–58
- 王德滋, 赵广涛, 邱检生. 1995. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约. *高校地质学报*, 1(2): 13–21
- 魏颖, 郑建平, 苏玉平, 马强. 2013. 怀安麻粒岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素: 华北北缘下地壳增生再造过程研究. *岩石学报*, 29(7): 2281–2294
- 吴昌华, 孙敏, 李惠民, 赵国春, 夏小平. 2006. 乌拉山-集宁孔兹岩锆石激光探针等离子质谱(LA-ICP-MS)年龄——孔兹岩沉积时限的年代学研究. *岩石学报*, 22(11): 2639–2654
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185–220
- 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
- 杨崇辉, 杜利林, 任留东等. 2011. 赞皇杂岩中太古宙末期岩等钾质花岗岩的成因及动力学背景. *地学前缘*, 18(2): 62–78
- 于津海, 王德滋, 王赐银. 1997. 山西吕梁群早元古代双峰式火山岩地球化学特征及成因. *岩石学报*, 13(1): 60–71
- 翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用. *矿床地质*, 29(1): 24–36
- 翟明国. 2013. 中国主要古陆与联合大陆的形成——综述与展望. *中国科学(地球科学)*, 43(10): 1583–1606
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 王元龙. 2010. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 标志. *岩石学报*, 26(4): 985–1015
- 张旗, 冉焱, 李承东. 2012. A 型花岗岩的实质是什么? *岩石矿物学杂志*, 31(4): 621–626
- 张瑞英, 张成立, 第五春荣, 孙勇. 2012. 中条山前寒武纪花岗岩地球化学、年代学及其地质意义. *岩石学报*, 28(11): 3559–3573
- 赵凤清. 2006. 山西中条山地区古元古代地壳演化的年代学和地球化学制约. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 赵凤清, 李惠民, 左义成, 薛克勤. 2006. 晋南中条山古元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄. *地质通报*, 25(4): 442–447