

华北克拉通地壳生长和演化:来自现代河流碎屑锆石 Hf 同位素组成的启示*

第五春荣 孙勇 王倩

DIWU ChunRong, SUN Yong and WANG Qian

大陆动力学国家重点实验室,西北大学地质学系,西安 710069

State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwestern University, Xi'an 710069, China

2012-06-28 收稿, 2012-08-11 改回.

Diwu CR, Sun Y and Wang Q. 2012. The crustal growth and evolution of North China Craton: Revealed by Hf isotopes in detrital zircons from modern rivers. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11):3520–3530

Abstract The outstanding questions is how to quantitatively estimate the rate of growth of the continental crust and the proportion of juvenile material added to the crust at any given time during its evolution. In recent years, the U-Pb and Hf isotopic composition of detrital zircons provide an effective and simple approach to constrain the periods and rate of continental growth. In order to characterize the crustal growth history of North China Craton, 187 detrital zircons in two sand samples from the lower reach of Jing River and the Luo River were measured for Lu-Hf isotopic compositions by LA-MC-ICPMS. Compared with the global continental crust, the North China Craton shows a characteristic of episodic continental growth rate. For instance, about 60% of the present crustal volume of the North China Craton was generated in the between Mesoarchean and Late Neoproterozoic (3.0 to 2.5 Ga). Since then, the continental crust keeps a stable rate of growth and completely formed at the end of the Neoproterozoic (600 Ma). It indicates that the present crustal of the North China Craton was mainly growth during Archean and Proterozoic, and the juvenile additions to the continental crust are almost negligible during Phanerozoic. Combined with the available studies and the early Precambrian crust growth curves of based on U-Pb ages, two-stage Hf crust formation ages (t_{DM2}^C and t_{NC2}^C) and $\varepsilon_{Hf}(t)$, our results also reveal that ~ 2.7 Ga and ~ 2.5 Ga are the most prominent time of magmatism and the period of continental rapidly growth, respectively. Indicating that the North China Craton has been experienced obviously twice crustal growth.

Key words The crustal growth; North China Craton; Detrital zircons; Hf isotopes

摘要 定量地给出大陆地壳生长速率以及生长量随时间的演化是研究大陆地壳形成与演化的核心问题之一。近年来,利用沉积岩和沉积物中碎屑锆石的 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成已成为目前研究大陆地壳生长和演化最为简捷、有效的工具。本文对来自华北克拉通西部泾河和洛河河沙中的 187 颗碎屑锆石进行 Hf 同位素组成分析,并结合已有的资料来探讨华北克拉通地壳的生长和演化规律。结果显示:随着地质历史变化,华北克拉通地壳生长呈阶段性特点。如在中太古代中期-新太古代末期(3.0~2.5 Ga)地壳生长速率较快,大约已有 60% 现今大陆地壳形成。此后,陆壳呈较稳定速率增长,到新元古代晚期(600 Ma)基本已形成现存大陆地壳。表明现今的大陆主要生长于太古宙和元古宙,而显生宙陆壳的增生量可以忽略不计。根据河流碎屑锆石和前寒武纪岩石中锆石的 U-Pb 年龄、两阶段模式年龄 (t_{DM2}^C 和 t_{NC2}^C) 和 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 所获得华北克拉通早前寒武纪地壳演化曲线,本文提出 ~ 2.7 Ga 和 ~ 2.5 Ga 分别曾经为华北克拉通太古宙岩浆作用最活跃时期,也是地壳快速生长时期,表明华北克拉通在新太古代曾发生过两期明显的地壳生长。

关键词 地壳生长;华北克拉通;碎屑锆石;Hf 同位素

中图分类号 P597.3

* 本文受国家 973 项目(2012CB416606)、国家自然科学基金项目(41272004)和西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项联合资助。

第一作者简介:第五春荣,男,1977 年生,讲师,从事前寒武纪地质和同位素年代学研究,E-mail: diwuchunrong@163.com

1 引言

众所周知, 定量地给出大陆地壳生长速率以及生长量随时间的演化是研究大陆地壳形成与演化的核心问题之一 (Kemp *et al.*, 2006; Condie *et al.*, 2011; Hawkesworth *et al.*, 2010)。由于地壳早期岩石经历了漫长多期的地质演化和改造, 并遭受了长期风化剥蚀, 使得许多古老岩石现今已不复存在。比如研究表明, 虽然现今约有大于 60% 的大陆地壳形成于太古宙 (Hawkesworth and Kemp, 2006a, b; Belousova *et al.*, 2010), 可是目前太古宙克拉通所占全球大陆面积还不足 10% (Rudnick and Fountain, 1995), 表明先前的太古宙克拉通可能已被大量改造。而细粒碎屑沉积岩和河流/黄土等沉积物是地壳物质的天然混合样品, 同时它们可以记录地壳演化过程中没有得以保存或者很少出露岩石的信息。

由于碎屑锆石作为沉积岩和沉积物中最稳定的副矿物, 且具有较强的抗风化性和抗干扰性, 我们不仅可以从中获得单颗粒锆石的 U-Pb 形成年龄, 由此直接指示沉积岩源区地壳物质的年龄及其分布; 而且由于锆石具有极低的 Lu 含量, 极强的稳定性使其 Hf 同位素组成较少受到后期地质事件的影响, 借此可以获得可靠的碎屑锆石寄主岩石初始的 Hf 同位素组成, 从而获知碎屑锆石寄主岩石的岩浆源区从亏损地幔提取出来的时间 (t_{DM}), 定量地获得地壳生长演化历史。因此, 分析碎屑锆石的 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成已成为目前研究大陆地壳生长和演化最为简捷、有效的工具 (Hawkesworth and Kemp, 2006a, b; Wang *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2009; Hawkesworth *et al.*, 2010; Condie *et al.*, 2011)。

华北克拉通作为全球著名的克拉通之一, 与其它克拉通相比, 经历了约 38 亿年更为复杂的多阶段演化历史 (翟明国, 2011)。本文对采自华北克拉通西部泾河和洛河河沙中的碎屑锆石进行 Hf 同位素组成分析, 并结合已有的资料来探讨华北克拉通的地壳生长和演化规律。

2 地质背景

华北是我国最大和最古老的克拉通, 在鞍山地区至今保存着世界上为数不多的 ~3.8Ga 岩石 (Liu *et al.*, 1992; Song *et al.*, 1996; Wan *et al.*, 2005)。多数学者认为, 华北克拉通在始太古代已开始形成陆核, 然后由多个独立块体拼贴而成, 虽然对于其拼合时间以及拼合过程一直都存在很大的争议 (Zhai *et al.*, 2001, 2005; Zhao *et al.*, 2001, 2005; Kusky and Li, 2003; Kusky, 2011; Zhai and Santosh, 2011)。

根据华北克拉通古老沉积岩或河流沉积物中碎屑锆石的年龄统计, 华北克拉通早前寒武纪时期 (>1.6Ga) 最突出的锆石 U-Pb 峰值年龄为 ~2.50Ga 和 ~1.8Ga (Wan *et al.*, 2011a)。其中 ~2.50Ga 的岩石记录在华北克拉通广泛存

在, 这些岩石占整个太古代出露基底的 85%, 主要为 TTG 质片麻岩、壳源花岗岩以及少量的表壳岩石 (Zhai *et al.*, 2001, 2005; Zhao *et al.*, 2001, 2005; Kusky and Li, 2003; Kusky, 2011; Zhai and Santosh, 2011)。对于 ~2.50Ga 事件的性质, Zhai *et al.* (2001, 2005) 认为该事件代表一些微古陆块聚合成为统一的华北克拉通。Kusky and Li (2003) 也认为华北陆块东、西部块体约于 2.5Ga 左右碰撞拼合。而对于 ~1.8Ga 事件的性质, Zhao *et al.* (2001, 2005) 则认为在 ~1.85Ga, 西部陆块与东部陆块沿中部带发生碰撞拼合, 形成现今的华北克拉通统一结晶基底。而 Kusky and Li (2003) 则认为 1.85Ga 左右的吕梁运动为一陆内裂解事件, 其动力学机制可能与地幔柱关系密切。

传统观点认为华北克拉通的主体是在吕梁期 (1.90 ~ 1.70Ga) 固结形成一个整体 (赵宗溥, 1993), 之后直至早中生代一直保持相对稳定, 期间无大规模的岩浆活动, 沉积了巨厚的浅海相碎屑岩与碳酸盐岩 (朱日祥等, 2011)。虽然部分沉积岩曾遭受了不同程度的变质作用 (翟明国, 2009), 但克拉通依然保持其稳定性。但是自早中生代以来, 华北克拉通, 尤其是克拉通东部发生了大规模的岩浆活动和构造变形, 岩浆活动最活跃时期为晚白垩世 (132 ~ 120Ma) (Wu *et al.*, 2005), 与之相伴形成多种类型的沉积盆地, 使得华北克拉通应该具有的稳定性遭到破坏 (朱日祥等, 2011)。根据地球物理资料显示: 华北克拉通的显生宙破坏在空间上是高度不均匀的, 体现为克拉通现今地壳和岩石圈厚度存在明显的区域差异, 东部普遍分布较薄的地壳 (<35km) 和岩石圈 (60 ~ 100km), 而克拉通西部、尤其是鄂尔多斯地块仍然保留着约的厚度约为 200km 岩石圈 (Chen *et al.*, 2009)。依据此而言, 今日所谓的华北克拉通并非名符其实, 大概只有其西部, 即鄂尔多斯地块才真正地具有克拉通性质。

3 样品采集

泾河是渭河的最大支流, 发源于六盘山东麓, 向东流经甘肃省平凉市及泾川县, 经陕西省彬县及泾阳县, 于高陵县汇入渭河, 长 451km, 流域面积约 45,400km²。洛河, 又称北洛河或洛水, 发源于陕西省定边县, 流经吴旗、志丹、甘泉、富县、洛川、黄陵等县, 在大荔县东南汇入渭河, 总长 680km, 流域面积 26,900km²。由此可见, 泾河和洛河广泛流经华北克拉通西南部的广大地区, 最终都注入渭河。本文从泾河和洛河的下流各采集了一个河沙样品, 分别记作 JH 和 LH (图 1)。

4 锆石原位 Hf 同位素分析

锆石原位 Lu-Hf 同位素测定在英国 Nu 公司生产的 Nu Plasma HR 多接收器等离子体质谱仪上完成, 激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M。激光剥蚀的脉冲

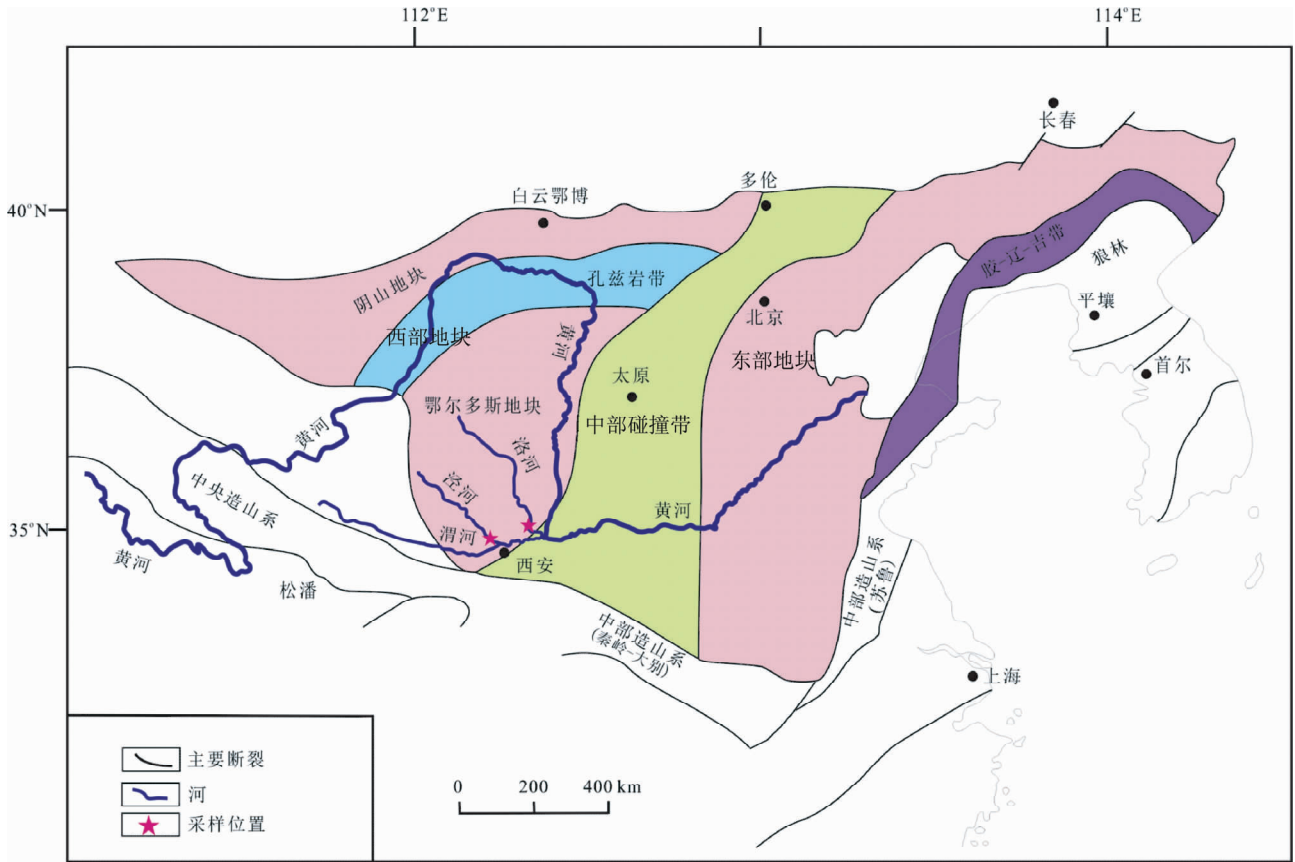


图1 华北克拉通地质简图(据 Zhao *et al.*, 2005 修改)

Fig.1 Simplified map of the North China Craton (modified after Zhao *et al.*, 2005)

频率为 10Hz, 激光束直径为 $44\mu\text{m}$, 能量密度为 $10\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$, 剥蚀时间约为 50s。锆石原位 Lu-Hf 同位素测定用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02669$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5886$ 进行同量异位干扰校正计算测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 (Chu *et al.*, 2002)。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的计算采用 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11}\text{a}$ (Albarède *et al.*, 2006), 球粒陨石现今的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282785$ 、 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0336$ (Bouvier *et al.*, 2008); Hf 亏损地幔模式年龄 (t_{DM1}) 的计算采用现今的亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$ (Vervoort *et al.*, 1999)。Hf 同位素单阶段模式年龄 t_{DM1} 以亏损地幔为参考计算。两阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 计算时, 平均地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.015 (Rudnick and Gao, 2003)。

5 分析结果

根据之前对泾河和洛河河沙中碎屑锆石 U-Pb 年龄分析结果显示 (图 2a, b): 有 4 个明显年龄峰值, 分别为 2.50 ~ 2.40Ga、1.90 ~ 1.80Ga、0.50 ~ 0.40Ga 和 0.35 ~ 0.25Ga (Diwu *et al.*, 2012)。显示华北克拉通西部记录了与其中部和东部年龄特征类似的早前寒武纪构造-热事件期次, 表明它们曾经历了相仿的地质演化过程。

此次利用 LA-MC-ICPMS 方法共分析了 187 颗碎屑锆石 Hf 同位素。结果显示 (表 1): 样品中除个别锆石外, 绝大多数碎屑锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值小于 0.002, 表明因 Lu 衰变形成的放射性成因 Hf 同位素的积累是很小的, 可代表锆石形成时的初始 Hf 同位素比值。样品 JH 和 LH 具有明显类似的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (图 3)。对于年龄为 2.50 ~ 2.40Ga 的一组锆石, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大多数为正值, 并接近于同时代亏损地幔的演化线, 且对应的两阶段模式年龄峰值为 ~2.7Ga, 指示源区以新生地壳为主。其余各组碎屑锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值绝大多数为负值, 只有少量锆石具有较正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$, 指示物质源区以再循环地壳为主。

6 讨论

6.1 地壳生长与锆石 Hf 同位素使用

所谓地壳生长是指从地幔中直接派生出的岩浆形成地壳的过程; 或由地幔中派生出的岩浆结晶形成岩石, 在很短的时间内 (<200Ma) 重熔而形成地壳物质的过程 (Belousova *et al.*, 2010; Hawkesworth *et al.*, 2010)。对于利用锆石来判断地壳的生长来说, 后一种定义应该更合适, 更具有实际指导意义。因为在壳幔分离过程中, 锆石的形成必然经历了至

表 1 泾河和洛河河沙中碎屑锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 1 Lu-Hf isotopic compositions of detrital zircons from the Jing River and Luo River

样品号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	t_{DM1}	$t_{\text{DM2}}^{\text{C}}$	$t_{\text{NC2}}^{\text{C}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
泾河											
JH-004	570	0.051013	0.001707	0.282078	0.000080	-13.0	2.8	1684	2311	2147	-0.95
JH-005	2305	0.018408	0.000577	0.281479	0.000050	5.2	1.8	2451	2539	2398	-0.98
JH-010	314	0.041994	0.001291	0.282840	0.000036	8.7	1.3	589	748	552	-0.96
JH-011	2126	0.015622	0.000559	0.281598	0.000032	5.4	1.1	2289	2388	2242	-0.98
JH-012	1998	0.037212	0.001064	0.281741	0.000038	6.9	1.3	2122	2195	2044	-0.97
JH-013	325	0.095767	0.002793	0.282559	0.000036	-1.4	1.3	1029	1393	1210	-0.92
JH-014	1871	0.015990	0.000451	0.281532	0.000036	-2.7	1.3	2372	2680	2536	-0.99
JH-015	486	0.018598	0.000630	0.282585	0.000034	3.6	1.2	934	1206	1021	-0.98
JH-017	2285	0.038465	0.001088	0.281374	0.000056	0.2	2.0	2627	2828	2692	-0.97
JH-021	453	0.017927	0.000552	0.282688	0.000038	6.5	1.3	790	996	806	-0.98
JH-024	480	0.039765	0.001199	0.282196	0.000040	-10.5	1.4	1496	2089	1920	-0.96
JH-025	2328	0.005594	0.000194	0.281259	0.000048	-1.5	1.7	2721	2967	2833	-0.99
JH-026	296	0.070735	0.002034	0.282227	0.000028	-13.6	1.0	1486	2139	1970	-0.94
JH-027	1960	0.020776	0.000600	0.281680	0.000030	4.5	1.1	2179	2312	2163	-0.98
JH-029	1911	0.041007	0.001240	0.281680	0.000034	2.5	1.2	2217	2395	2246	-0.96
JH-030	276	0.016530	0.000504	0.282278	0.000066	-11.9	2.3	1356	2017	1844	-0.98
JH-031	487	0.030748	0.000942	0.282548	0.000032	2.2	1.1	995	1297	1113	-0.97
JH-032	462	0.030868	0.001006	0.282639	0.000034	4.8	1.2	869	1109	922	-0.97
JH-033	1589	0.024648	0.000725	0.282041	0.000030	8.7	1.1	1692	1754	1590	-0.98
JH-034	504	0.022543	0.000631	0.282426	0.000040	-1.7	1.4	1156	1552	1373	-0.98
JH-035	291	0.046861	0.001457	0.282717	0.000050	3.8	1.8	767	1039	849	-0.96
JH-036	1374	0.030397	0.000966	0.282191	0.000042	9.0	1.5	1494	1566	1396	-0.97
JH-037	476	0.034723	0.001186	0.282401	0.000280	-3.4	9.9	1209	1637	1459	-0.96
JH-038	324	0.050077	0.001573	0.282494	0.000038	-3.4	1.3	1089	1523	1342	-0.95
JH-039	1849	0.000933	0.000022	0.281814	0.000032	7.4	1.1	1967	2042	1887	-1.00
JH-040	2382	0.014244	0.000495	0.281476	0.000036	7.0	1.3	2450	2491	2350	-0.99
JH-041	276	0.063353	0.001771	0.282689	0.000090	2.4	3.2	814	1115	926	-0.95
JH-043	1825	0.019720	0.000584	0.281491	0.000032	-5.3	1.1	2435	2806	2664	-0.98
JH-044	432	0.014343	0.000454	0.282722	0.000032	7.3	1.1	741	930	739	-0.99
JH-045	1579	0.026595	0.000819	0.282065	0.000042	9.3	1.5	1662	1712	1548	-0.98
JH-046	425	0.023718	0.000666	0.282245	0.000042	-9.8	1.5	1408	2004	1832	-0.98
JH-050	273	0.034854	0.001092	0.282725	0.000050	3.7	1.8	749	1029	838	-0.97
JH-052	257	0.044502	0.001295	0.282709	0.000044	2.8	1.6	775	1076	885	-0.96
JH-054	1584	0.021004	0.000659	0.281743	0.000030	-1.9	1.1	2097	2408	2256	-0.98
JH-055	1305	0.060805	0.001766	0.282214	0.000034	7.6	1.2	1494	1600	1431	-0.95
JH-056	508	0.030593	0.000904	0.282231	0.000034	-8.6	1.2	1436	1988	1817	-0.97
JH-057	2422	0.025000	0.000723	0.281388	0.000038	4.4	1.4	2583	2681	2543	-0.98
JH-058	2391	0.066913	0.001958	0.281375	0.000050	1.2	1.8	2687	2850	2715	-0.94
JH-059	2288	0.028207	0.000901	0.281465	0.000034	3.8	1.2	2490	2611	2470	-0.97
JH-060	1871	0.041672	0.001240	0.281676	0.000038	1.5	1.3	2222	2427	2279	-0.96
JH-061	292	0.081532	0.002400	0.282587	0.000050	-1.0	1.8	977	1343	1158	-0.93
JH-063	305	0.026962	0.000889	0.282801	0.000044	7.2	1.6	637	835	641	-0.97
JH-065	426	0.022443	0.000883	0.283036	0.000090	18.1	3.2	304	231	27	-0.97
JH-068	2385	0.025504	0.000876	0.281433	0.000032	4.9	1.1	2533	2621	2482	-0.97
JH-069	1805	0.039042	0.001088	0.281489	0.000032	-6.4	1.1	2469	2860	2719	-0.97
JH-070	2215	0.032561	0.001001	0.281232	0.000042	-6.3	1.5	2814	3169	3038	-0.97
JH-071	1152	0.013030	0.000384	0.282055	0.000050	-0.3	1.8	1658	1971	1807	-0.99
JH-072	365	0.029524	0.001021	0.282296	0.000038	-9.4	1.3	1350	1932	1758	-0.97
JH-073	743	0.062416	0.001872	0.282321	0.000034	-0.7	1.2	1345	1680	1506	-0.94
JH-074	495	0.014190	0.000417	0.282485	0.000042	0.3	1.5	1068	1421	1239	-0.99
JH-075	2127	0.046186	0.001370	0.281348	0.000032	-4.7	1.1	2683	3003	2868	-0.96
JH-076	474	0.052345	0.001626	0.282457	0.000044	-1.6	1.6	1143	1522	1342	-0.95
JH-077	1568	0.034422	0.001182	0.281660	0.000062	-5.8	2.2	2241	2635	2487	-0.96
JH-078	750	0.046580	0.001537	0.282430	0.000040	3.5	1.4	1178	1421	1243	-0.95
JH-082	2602	0.028874	0.000875	0.281357	0.000032	7.2	1.1	2636	2656	2520	-0.97
JH-083	1734	0.016045	0.000520	0.281340	0.000030	-12.6	1.1	2634	3185	3049	-0.98

续表 1

Continued Table 1

样品号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	t_{DM1}	$t_{\text{DM2}}^{\text{C}}$	$t_{\text{NC2}}^{\text{C}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
JH-085	468	0.016612	0.000632	0.282620	0.000030	4.4	1.1	887	1141	954	-0.98
JH-086	449	0.019426	0.000603	0.282558	0.000032	1.8	1.1	972	1290	1105	-0.98
JH-088	497	0.028313	0.000888	0.282209	0.000050	-9.6	1.8	1466	2045	1875	-0.97
JH-091	455	0.007268	0.000257	0.282649	0.000030	5.3	1.1	837	1075	887	-0.99
JH-092	499	0.018497	0.000606	0.282583	0.000034	3.8	1.2	938	1205	1019	-0.98
JH-093	1724	0.017358	0.000514	0.281422	0.000038	-10.0	1.3	2524	3014	2875	-0.98
JH-094	451	0.018108	0.000539	0.282512	0.000044	0.2	1.6	1035	1391	1209	-0.98
JH-095	1811	0.032821	0.001012	0.281729	0.000068	2.3	2.4	2136	2328	2177	-0.97
JH-096	468	0.032372	0.000970	0.282557	0.000044	2.1	1.6	983	1289	1104	-0.97
JH-097	2446	0.006670	0.000163	0.281421	0.000048	7.1	1.7	2503	2538	2398	-1.00
JH-098	456	0.024545	0.000851	0.282551	0.000040	1.6	1.4	988	1306	1122	-0.97
JH-099	2890	0.018905	0.000622	0.281323	0.000040	13.0	1.4	2665	2528	2392	-0.98
JH-100	451	0.024447	0.000787	0.282605	0.000046	3.4	1.6	911	1188	1002	-0.98
JH-101	2169	0.067837	0.001914	0.281391	0.000056	-3.0	2.0	2662	2936	2800	-0.94
JH-102	1947	0.017542	0.000602	0.281682	0.000038	4.2	1.3	2176	2316	2167	-0.98
JH-103	2251	0.035954	0.001089	0.281485	0.000040	3.4	1.4	2476	2608	2467	-0.97
JH-104	2371	0.023518	0.000704	0.281402	0.000048	3.8	1.7	2564	2680	2542	-0.98
JH-106	263	0.047234	0.001427	0.282574	0.000038	-1.9	1.3	970	1376	1191	-0.96
JH-107	464	0.017931	0.000557	0.282696	0.000060	7.0	2.1	778	969	779	-0.98
JH-109	264	0.033925	0.001145	0.282861	0.000034	8.4	1.2	557	728	531	-0.97
JH-110	2380	0.020653	0.000590	0.281407	0.000032	4.3	1.1	2549	2653	2514	-0.98
JH-111	1655	0.039026	0.001141	0.281769	0.000038	0.1	1.3	2088	2341	2189	-0.97
JH-112	526	0.045429	0.001179	0.282568	0.000030	3.6	1.1	973	1234	1050	-0.96
JH-113	2444	0.017172	0.000504	0.281192	0.000034	-1.7	1.2	2832	3070	2940	-0.99
JH-115	2516	0.011990	0.000388	0.281461	0.000032	9.7	1.1	2463	2431	2290	-0.99
JH-116	277	0.018099	0.000568	0.282744	0.000052	4.6	1.8	711	976	784	-0.98
JH-117	2508	0.014597	0.000538	0.281417	0.000040	7.7	1.4	2532	2547	2408	-0.98
JH-118	547	0.014912	0.000421	0.282274	0.000040	-6.0	1.4	1359	1860	1687	-0.99
JH-120	1683	0.029372	0.000843	0.281896	0.000038	5.6	1.3	1897	2025	1868	-0.97
JH-121	466	0.045496	0.001351	0.282580	0.000034	2.7	1.2	959	1244	1059	-0.96
JH-122	292	0.033711	0.000972	0.282819	0.000032	7.5	1.1	613	804	609	-0.97
JH-123	473	0.023494	0.000711	0.282585	0.000038	3.2	1.3	937	1217	1032	-0.98
JH-124	288	0.028751	0.000883	0.282567	0.000030	-1.5	1.1	966	1370	1185	-0.97
JH-125	2590	0.013396	0.000473	0.281414	0.000044	9.6	1.6	2532	2496	2357	-0.99
JH-126	1882	0.019895	0.000628	0.281605	0.000042	0.0	1.5	2283	2526	2380	-0.98
JH-127	899	0.000479	0.000008	0.282386	0.000032	6.0	1.1	1192	1378	1200	-1.00
JH-128	1892	0.003498	0.000091	0.281649	0.000034	2.5	1.2	2192	2381	2233	-1.00
JH-129	330	0.050116	0.001500	0.282634	0.000046	1.7	1.6	887	1205	1018	-0.96
JH-130	2505	0.031682	0.000859	0.281331	0.000034	4.1	1.2	2670	2768	2633	-0.97
JH-131	416	0.014963	0.000475	0.282473	0.000044	-1.9	1.6	1086	1497	1316	-0.99
JH-135	483	0.009504	0.000347	0.282702	0.000044	7.7	1.6	766	941	750	-0.99
JH-136	483	0.011543	0.000420	0.282665	0.000042	6.4	1.5	818	1025	836	-0.99
JH-137	852	0.019948	0.000582	0.281023	0.000042	-43.7	1.5	3065	4413	4289	-0.98
洛河											
LH-001	2451	0.011894	0.000421	0.281340	0.000038	3.9	1.4	2628	2738	2601	-0.99
LH-003	2225	0.033010	0.001099	0.281299	0.000066	-3.8	2.3	2730	3027	2894	-0.97
LH-005	1880	0.014199	0.000474	0.281632	0.000044	1.1	1.6	2238	2457	2309	-0.99
LH-008	2441	0.001473	0.000041	0.281364	0.000042	5.1	1.5	2571	2653	2515	-1.00
LH-011	1773	0.015341	0.000469	0.281492	0.000050	-6.3	1.8	2426	2828	2685	-0.99
LH-015	2498	0.036975	0.001280	0.281377	0.000038	4.8	1.4	2637	2718	2582	-0.96
LH-017	1915	0.039497	0.001101	0.281388	0.000056	-7.6	2.0	2609	3017	2880	-0.97
LH-020	1778	0.020757	0.000680	0.281589	0.000038	-3.0	1.3	2308	2629	2483	-0.98
LH-021	1786	0.011741	0.000372	0.281590	0.000052	-2.4	1.8	2288	2598	2452	-0.99
LH-022	280	0.035879	0.001231	0.282824	0.000034	7.4	1.2	611	804	609	-0.96
LH-024	371	0.033278	0.001156	0.282263	0.000054	-10.5	1.9	1401	2004	1832	-0.97
LH-025	1717	0.017693	0.000714	0.281477	0.000060	-8.4	2.1	2463	2913	2772	-0.98
LH-026	2435	0.011270	0.000390	0.281396	0.000044	5.5	1.6	2550	2621	2483	-0.99

续表 1

Continued Table 1

样品号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	t_{DM1}	$t_{\text{DM2}}^{\text{C}}$	$t_{\text{NC2}}^{\text{C}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
LH-027	254	0.024439	0.000852	0.282340	0.000050	-10.2	1.8	1283	1898	1723	-0.97
LH-028	2482	0.013056	0.000449	0.281423	0.000034	7.5	1.2	2518	2540	2400	-0.99
LH-029	269	0.031660	0.001067	0.282061	0.000050	-19.8	1.8	1680	2511	2347	-0.97
LH-030	1865	0.006511	0.000200	0.281556	0.000038	-1.6	1.3	2324	2611	2466	-0.99
LH-032	2100	0.016860	0.000573	0.281308	0.000048	-5.6	1.7	2681	3036	2901	-0.98
LH-033	2522	0.010024	0.000322	0.281351	0.000036	6.1	1.3	2607	2659	2522	-0.99
LH-034	2615	0.008734	0.000305	0.281357	0.000044	8.5	1.6	2597	2586	2449	-0.99
LH-037	1805	0.024804	0.000758	0.281511	0.000036	-5.3	1.3	2419	2789	2646	-0.98
LH-038	324	0.033622	0.001164	0.282443	0.000044	-5.1	1.6	1148	1631	1451	-0.97
LH-043	2008	0.037814	0.001172	0.281179	0.000060	-13.0	2.1	2899	3421	3292	-0.97
LH-044	2495	0.015018	0.000561	0.281396	0.000046	6.6	1.6	2562	2603	2465	-0.98
LH-046	1556	0.017001	0.000547	0.281568	0.000054	-8.6	1.9	2329	2801	2656	-0.98
LH-047	290	0.050412	0.001745	0.282785	0.000074	6.1	2.6	676	892	699	-0.95
LH-049	1897	0.034750	0.001140	0.281477	0.000036	-4.9	1.3	2490	2838	2697	-0.97
LH-052	2453	0.011648	0.000423	0.281388	0.000064	5.6	2.3	2564	2632	2494	-0.99
LH-053	2320	0.010117	0.000393	0.281306	0.000030	-0.3	1.1	2672	2890	2755	-0.99
LH-054	2446	0.012440	0.000436	0.281351	0.000034	4.1	1.2	2614	2717	2581	-0.99
LH-055	515	0.022208	0.000797	0.282411	0.000028	-2.0	1.0	1182	1582	1403	-0.98
LH-056	1730	0.011647	0.000401	0.281530	0.000046	-5.9	1.6	2371	2767	2623	-0.99
LH-057	259	0.043824	0.001496	0.282250	0.000050	-13.4	1.8	1432	2103	1931	-0.96
LH-058	274	0.051775	0.001745	0.282321	0.000046	-10.6	1.6	1340	1938	1765	-0.95
LH-061	2433	0.017698	0.000616	0.281401	0.000062	5.3	2.2	2559	2635	2497	-0.98
LH-064	443	0.028294	0.000925	0.282116	0.000042	-14.1	1.5	1596	2283	2116	-0.97
LH-066	2603	0.023134	0.000713	0.281017	0.000060	-4.6	2.1	3083	3373	3250	-0.98
LH-067	1803	0.026085	0.000791	0.281514	0.000038	-5.2	1.3	2417	2786	2643	-0.98
LH-068	2380	0.006589	0.000236	0.281253	0.000038	-0.6	1.4	2731	2951	2817	-0.99
LH-069	2087	0.014692	0.000487	0.281438	0.000044	-1.1	1.6	2501	2755	2615	-0.99
LH-070	2487	0.013258	0.000490	0.281402	0.000050	6.8	1.8	2549	2587	2448	-0.99
LH-071	309	0.057906	0.001736	0.282587	0.000056	-0.5	2.0	960	1325	1140	-0.95
LH-072	2263	0.022664	0.000774	0.281377	0.000030	0.3	1.1	2603	2807	2670	-0.98
LH-073	1806	0.012810	0.000434	0.281420	0.000038	-8.1	1.3	2521	2962	2822	-0.99
LH-075	398	0.030095	0.000994	0.282457	0.000050	-3.0	1.8	1124	1554	1374	-0.97
LH-076	426	0.026598	0.000925	0.282460	0.000040	-2.3	1.4	1118	1530	1349	-0.97
LH-077	277	0.013712	0.000471	0.282125	0.000042	-17.3	1.5	1566	2358	2191	-0.99
LH-078	1882	0.074435	0.002098	0.281445	0.000040	-7.6	1.4	2599	2991	2853	-0.94
LH-079	278	0.039524	0.001363	0.282474	0.000048	-5.1	1.7	1111	1591	1410	-0.96
LH-080	1990	0.019695	0.000761	0.281633	0.000032	3.2	1.1	2253	2411	2264	-0.98
LH-081	2478	0.018697	0.000656	0.281399	0.000046	6.2	1.6	2565	2618	2479	-0.98
LH-084	1697	0.011187	0.000384	0.281491	0.000028	-8.0	1.0	2423	2872	2729	-0.99
LH-085	1906	0.023450	0.000744	0.281505	0.000050	-3.2	1.8	2426	2740	2598	-0.98
LH-088	292	0.036994	0.001380	0.282117	0.000046	-17.4	1.6	1614	2375	2210	-0.96
LH-089	257	0.071435	0.002300	0.282538	0.000042	-3.4	1.5	1046	1470	1288	-0.93
LH-100	2519	0.009326	0.000335	0.281411	0.000052	8.1	1.8	2528	2533	2394	-0.99
LH-101	2285	0.017301	0.000587	0.281415	0.000034	2.5	1.2	2538	2692	2552	-0.98
LH-102	2511	0.023568	0.000843	0.281157	0.000050	-2.0	1.8	2905	3140	3012	-0.97
LH-103	424	0.012240	0.000394	0.282321	0.000040	-7.1	1.4	1294	1831	1656	-0.99
LH-104	227	0.067255	0.002041	0.282319	0.000054	-11.7	1.9	1354	1971	1798	-0.94
LH-105	2082	0.022338	0.000719	0.281482	0.000038	0.0	1.4	2455	2681	2539	-0.98
LH-106	1748	0.002228	0.000058	0.281560	0.000034	-4.0	1.2	2310	2665	2520	-1.00
LH-107	570	0.010855	0.000356	0.282073	0.000050	-12.6	1.8	1632	2289	2124	-0.99
LH-108	253	0.006461	0.000253	0.282323	0.000038	-10.8	1.3	1286	1930	1755	-0.99
LH-112	486	0.015697	0.000461	0.281574	0.000032	-32.2	1.1	2316	3440	3295	-0.99
LH-114	1763	0.020773	0.000660	0.281470	0.000040	-7.6	1.4	2469	2896	2755	-0.98
LH-116	2499	0.015677	0.000500	0.281417	0.000054	7.6	1.9	2530	2549	2410	-0.99
LH-117	1875	0.009066	0.000307	0.281342	0.000096	-9.1	3.4	2618	3079	2942	-0.99
LH-118	267	0.046015	0.001509	0.282405	0.000042	-7.8	1.5	1212	1752	1574	-0.96
LH-120	325	0.055648	0.001690	0.282444	0.000060	-5.2	2.1	1164	1636	1457	-0.95

续表 1

Continued Table 1

样品号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	t_{DM1}	$t_{\text{DM2}}^{\text{C}}$	$t_{\text{NC2}}^{\text{C}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
LH-121	1657	0.043469	0.001315	0.281588	0.000060	-6.5	2.1	2349	2749	2604	-0.96
LH-122	458	0.021372	0.000726	0.282579	0.000048	2.7	1.7	946	1240	1055	-0.98
LH-123	1856	0.012843	0.000410	0.281556	0.000042	-2.1	1.5	2337	2634	2489	-0.99
LH-124	2394	0.017270	0.000612	0.281196	0.000042	-2.9	1.5	2835	3103	2973	-0.98
LH-126	263	0.018034	0.000595	0.282445	0.000048	-6.3	1.7	1128	1655	1476	-0.98
LH-129	256	0.047089	0.001562	0.282220	0.000058	-14.6	2.1	1478	2172	2002	-0.95
LH-130	2425	0.004710	0.000157	0.281413	0.000030	6.3	1.1	2512	2567	2428	-1.00
LH-132	431	0.077058	0.002658	0.282655	0.000054	4.2	1.9	885	1122	935	-0.92
LH-134	415	0.059238	0.001921	0.282601	0.000032	2.2	1.1	944	1237	1052	-0.94
LH-135	2432	0.019870	0.000637	0.281411	0.000050	5.6	1.8	2547	2616	2478	-0.98
LH-91	347	0.055023	0.001846	0.282294	0.000064	-10.1	2.3	1383	1959	1787	-0.95
LH-92	1878	0.018867	0.000574	0.281491	0.000048	-4.1	1.7	2435	2775	2633	-0.98
LH-93	2574	0.043674	0.001506	0.281041	0.000030	-5.8	1.1	3114	3422	3300	-0.96
LH-94	471	0.035591	0.001222	0.282438	0.000042	-2.2	1.5	1157	1557	1377	-0.96
LH-95	424	0.038622	0.001227	0.282349	0.000036	-6.3	1.3	1282	1782	1607	-0.96
LH-96	2434	0.017994	0.000569	0.281355	0.000052	3.8	1.8	2618	2730	2593	-0.98
LH-98	294	0.040310	0.001606	0.282563	0.000044	-1.6	1.6	991	1385	1201	-0.95
LH-99	1906	0.022083	0.000678	0.281568	0.000050	-0.9	1.8	2336	2596	2452	-0.98

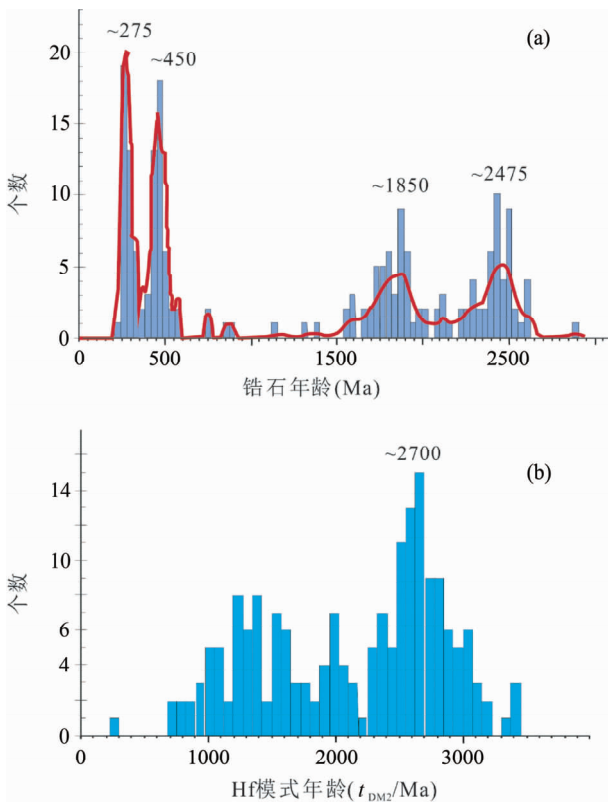


图2 泾河和洛河河沙中碎屑锆石 U-Pb 年龄 (a, 引自 Diwu *et al.*, 2012) 以及对应的两阶段模式年龄频率分布图 (b)

Fig. 2 U-Pb concordia plots of concordant detrital zircons from the Jing River and Luo River (a, after Diwu *et al.*, 2012) and corresponding Relative probability plots of two-stage Hf model ages

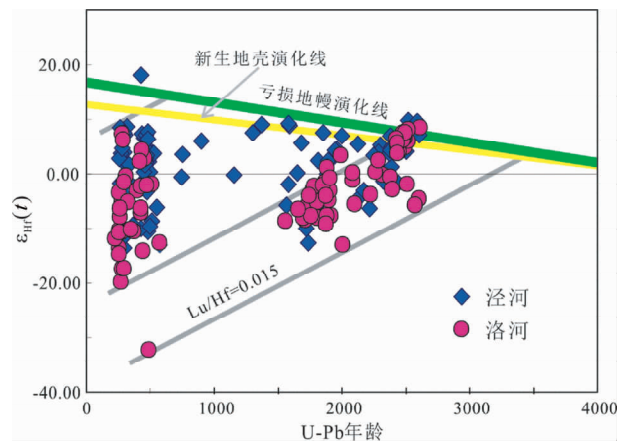


图3 泾河和洛河河沙中碎屑锆石 Hf 同位素组成 其中亏损地幔演化线和新生地壳演化线分别引自 Griffin *et al.*, 2000; Dhuime *et al.*, 2011

Fig. 3 U-Pb age versus $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value plots of detrital zircons from the Jing River and Luo River

The depleted mantle evolution curve taken from Griffin *et al.*, 2000; the new crust evolution curve taken from Dhuime *et al.*, 2011

少两个阶段:最初岩浆从亏损地幔中抽取形成玄武质的原始地壳,而此时可能会有斜锆石结晶出来;然后原始地壳在熔融形成英质岩浆的过程中才可能结晶形成锆石 (Wang *et al.*, 2009)。当然,对后一种定义也有人将其称之为新生地壳的再造。

与全岩的 Sm-Nd 同位素类似,要揭示每一颗碎屑锆石所代表的岩石是否具有新生地壳性质必然涉及到两个关键的参数:初始的 ε_{Hf} 值和模式年龄。其中初始的 ε_{Hf} 值就是指所测得样品的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值与同时期球粒陨石 (CHUR)

$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值万倍偏差。简而言之, 如果锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) < 0$, 表明它来自于古老地壳、或者源区以古老地壳物质为主体; 如果锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$, 表明它来源于亏损地幔、或者源区以亏损地幔物质占主导。尤其是当锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值接近于同时期参考储库, 比如亏损地幔时, 表示该碎屑锆石所代表的寄主岩石具有新生地壳的特征 (Zheng *et al.*, 2006; 吴福元等, 2007; 郑永飞等, 2007)。而所谓的模式年龄是根据一定模式前提假设计算所获得的样品从其源区分离至今的时间, 因此模式年龄就是新生地壳生长较精确年龄。由于目前大多数研究者认为大陆地壳源自于亏损地幔, 因而常以亏损地幔为参考源区计算全岩 Nd 同位素或者锆石的 Hf 模式年龄。此外, 考虑到锆石的形成至少经历了两个阶段, 因此通常用碎屑锆石的 Hf 同位素两阶段模式 (t_{DM2}) 年龄来代表地壳的形成年龄。然而, 最近也有研究者提出应利用大陆岛弧火山岩作为新生地壳参考源区来计算锆石模式年龄, 并根据 13 个现代岛弧火山的 Hf 同位素组成获得其现今新生地壳 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 13.2 (Dhuime *et al.*, 2011)。

6.2 华北克拉通地壳生长

6.2.1 华北克拉通地壳生长速率以及与全球地壳演化对比

为讨论华北克拉通整体地壳生长速率和演化, 本文汇总泾河、洛河、滦河和永定河 4 个河沙样品中的 381 个碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素数据结果, 然后做各种地壳累积生长曲线。如图 4 所示, 根据碎屑锆石 U-Pb 年龄和模式年龄 (t_{DM2}) 绘制的地壳演化线存在较大差异, 这主要是由于碎屑锆石 U-Pb 年龄只是反映源区岩浆活动期次随时间的累积分布。由该曲线可知 (图 4), 华北克拉通大约 60% 的岩浆活动发生在 1.6Ga 之前; 而在古元古代至古生代早期 (1.6 ~ 0.5Ga) 这段时间内, 华北克拉通一直处于岩浆活动的沉寂期。但在早中生代, 华北克拉通又发生了大规模的岩浆活动, 这可能与华北克拉通原有的稳定性遭到破坏有关 (Wu *et al.*, 2005)。由于碎屑锆石的 U-Pb 年龄并不能判断源区寄主岩石的形成代表的是新生地壳的形成还是古老地壳的改造, 因此只有锆石 Hf 模式年龄可以近似代表新生地壳从亏损地幔提取的时间, 也就是地壳的生长时间。由图 4 所示, 随着地质历史变化, 华北克拉通地壳生长呈阶段性地增长。如在中太古代中期-新太古代末期 (3000 ~ 2500Ma), 华北克拉通的地壳生长速率较快。至新太古代末期大约已有 60% 现今大陆地壳形成。此后, 陆壳呈较稳定速率增长, 到新元古代末 (600Ma), 基本已形成华北克拉通现存大陆地壳。而显生宙陆壳的增生量几乎可以忽略。换言之, 显生宙华北克拉通基本没有显著的地壳生长, 而是以古老地壳再循环为主。

此外, 以泾河、洛河河沙中的碎屑锆石 U-Pb 年龄和对应的 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 作图, 如果河流中碎屑物质来自于新生地壳物质, 那么河流所携带的沉积物中锆石 U-Pb 年龄和对应的 Hf 模式年龄应大致基本相同, 会落在图 5 所示的一致

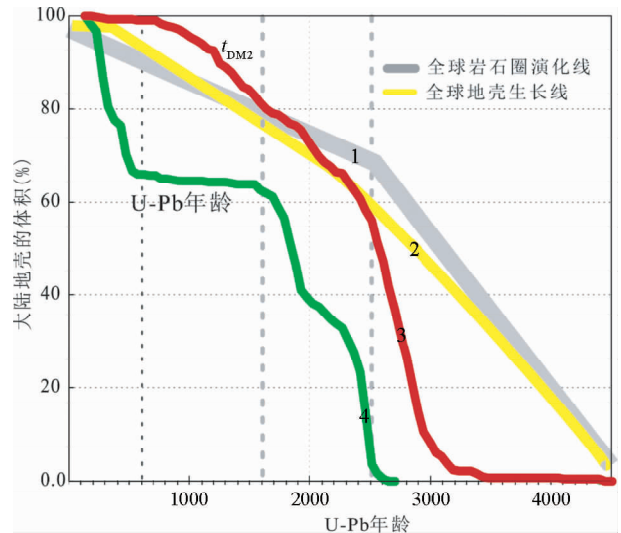


图 4 全球岩石圈演化线 (1-引自 Belousova *et al.*, 2010), 以及全球 (2-引自 Belousova *et al.*, 2010) 与华北克拉通大陆地壳生长曲线, 其中分别依据河流碎屑锆石的 U-Pb 年龄 (4) 和 Hf 同位素两阶段模式年龄 (3) 绘制其中滦河和永定河碎屑锆石 U-Pb-Hf 同位素数据引自 Yang *et al.*, 2009

Fig. 4 The global lithospheric architecture mapping curve (1-after Belousova *et al.*, 2010), the global integrated crustal growth curve (2-after Belousova *et al.*, 2010), and the crust growth curves based on U-Pb ages (4) and two-stage Hf crust formation ages (3) for detrital zircons from the rivers of North China Craton

The data of U-Pb-Hf compositions of detrital zircon from Luan River and Yongding River is cited from Yang *et al.*, 2009

线附近。由图 5 也可以看出, 随着地球演化, 显生宙沉积物中锆石的模式年龄越来越明显地偏离二者的一致线, 这也说明泾河和洛河中显生宙的碎屑物质主要来自于较老地壳再循环物质源区。

6.2.2 华北克拉通早前寒武纪地壳生长

由图 4 所示, 及至早前寒武纪, 华北克拉通与全球现今的地壳生长量基本相同, 已有近 80% 左右的地壳形成 (Belousova *et al.*, 2010; Hawkesworth *et al.*, 2010), 表明现今大陆的绝大部分生长于太古宙和古元古代。然而, 如前所述与全球地壳生长相比, 华北克拉通中太古中期-新太古代末期是地壳快速增长的时期。为进一步考察华北克拉通早前寒武纪地壳生长情况, 本文又将参考文献 Geng *et al.* (2012) 汇总的古老岩石中的 2553 个 (剔除数十个数据) 单颗锆石 Hf 同位素数据重新计算, 然后再利用锆石 U-Pb 年龄和相应的亏损地幔和新生地壳模式年龄 (t_{DM2} 和 t_{NC2}) 绘制华北克拉通早前寒武纪地壳演化线。由锆石 U-Pb 年龄的地壳演化线可知 (图 6), ~2.5Ga 锆石约占所有前寒武纪锆石数量的 40%, 这与华北克拉通西部泾河和洛河河沙 (Diwu

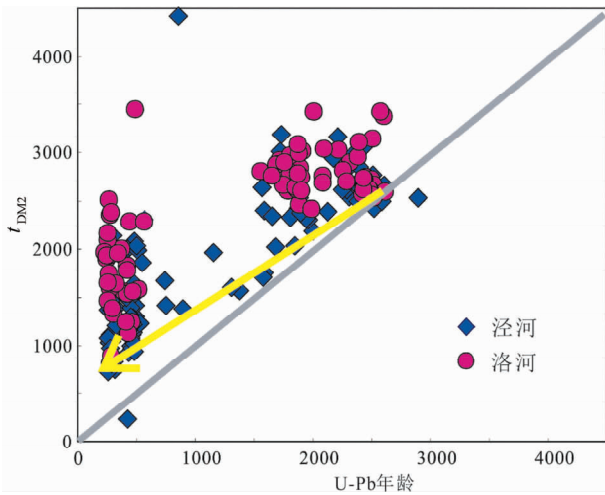


图5 泾河和洛河河沙中碎屑锆石 U-Pb 对 Hf 同位素两阶段模式年龄图

Fig. 5 Variation of U-Pb age versus Hf model ages (t_{DM2}) of detrital zircons from the Jing River and Luo River

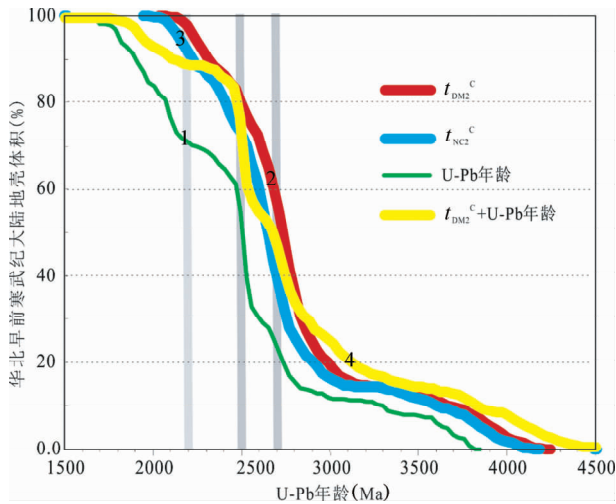


图6 华北克拉通早前寒武纪大陆地壳生长曲线, 分别依据早前寒武纪岩石中锆石的 U-Pb 年龄(1), Hf 同位素亏损地幔两阶段模式年龄(t_{DM2}^c) (2) 和大陆岛弧火山岩两阶段模式年龄(t_{NC2}^c) (Dhuime *et al.*, 2011) (3), 以及 $\varepsilon_{Hf}(t)$ (4) 绘制

Fig. 6 The early Precambrian crust growth curves of North China Craton based on U-Pb ages (1), Deplete mantle two-stage Hf crust formation ages (t_{DM2}^c) (2), island arc rocks two-stage Hf crust formation ages (t_{NC2}^c) (Dhuime *et al.*, 2011) (3) and $\varepsilon_{Hf}(t)$ (4)

et al., 2012) 以及东部滦河和永定河河沙 (Yang *et al.*, 2009) 中碎屑锆石所记录的年龄数据统计结果一致。

根据对怀安、登封等地 ~ 2.5 Ga 岩石中锆石 Hf 同位素分析获知, 这些岩石中大多数锆石具有接近于同时代的亏损

地幔 Hf 同位素组成 $\varepsilon_{Hf}(t)$, 且岩石的形成年龄和模式年龄接近 (< 200 Ma)。因此一些研究者提出在华北广泛出露的 ~ 2.5 Ga 岩石代表一期重要的地壳生长时期, 并强调正是 ~ 2.5 Ga 地壳生长使得华北克拉通与全球许多其他古老克拉通在太古宙的地壳生长表现出明显不同, 这或许正是华北克拉通特殊性之所在 (Diwu *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2009)。华北克拉通西部泾河和洛河河沙中碎屑锆石 Hf 同位素特征也支持上述认识。

可是, 一些研究者发现这些 2.5 Ga 岩石的模式年龄峰值为 ~ 2.7 Ga, 且在河南鲁山 (Diwu *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2009; Sun *et al.*, 1994)、山东西部 (Jahn *et al.*, 1988; Wan *et al.*, 2011b) 和胶东地区 (Jahn *et al.*, 2008), 山西中条等地区均有 ~ 2.7 Ga 岩石出露, 且这些岩石也具有接近于同时代的亏损地幔全岩的 Nd 同位素或者锆石的 Hf 同位素组成 (Jahn *et al.*, 2008; Diwu *et al.*, 2010; Wan *et al.*, 2011b), 因此一些研究者提出 ~ 2.7 Ga 才是华北克拉通真正的地壳生长时期, 这反映出华北克拉通与全球其他许多典型克拉通 2.7 Ga 的地壳增生, 以及造山带形成和超级大陆循环在此时间上具有较强的一致性 (Condie and Aster, 2010; Condie *et al.*, 2011)。

这里要特别强调: 基于模型假设的模式年龄 (Nd, Hf) 可以提供定性信息, 但并不能像 U-Pb 年龄那样提供精确的时间信息。因为 2.7 Ga 的模式年龄只是一种参考。因为将 Lu-Hf 分析过程的精度, 计算时的各种前提假设带来的误差考虑在内, 模式年龄的计算误差至少应该在 100 ~ 200 Ma。比如: 虽然我们常用 Griffin 提出的亏损地幔演化模式 (Griffin *et al.*, 2000), 认为在地球形成初期, 亏损地幔具有与球粒陨石类似的 Hf 同位素组成; 随着时间的推移, 它呈线性的演化, 及至现今其 Hf 同位素组成与 MORB 类似。可是, 就目前所知, 学者们根据 (1) 岩石的 Hf 同位素组成; (2) Nd 同位素与 Hf 同位素相关性; (3) 已有锆石 Hf 同位素数据提出的亏损地幔随着时间的演化模式应该至少还有 3 种 (Hawkesworth *et al.*, 2010)。不止如此, 如本文之前所提到的, 最近也有研究者提出应利用大陆岛弧火山岩的 Hf 同位素作为新生地壳计算时的参考源区来考虑 (Dhuime *et al.*, 2011)。此外, Hf 同位素的计算 (t_{DM2}) 还明显依赖于地壳源区 Lu/Hf 比值的选择, 因为, 相对于 Sm/Nd 而言, 由于地幔分异过程中, Lu/Hf 会发生明显改变。比如, 采用上地壳和下地壳的 Lu/Hf 比值分别计算一个年龄为 500 Ma 锆石的 Hf 模式年龄, 其获得模式年龄的结果相差可达 490 Ma (Wang *et al.*, 2009)。

此外, 本文分别又利用前寒武纪岩石中锆石的 Hf 亏损地幔和大陆岛弧火山岩两阶段模式年龄 (t_{DM2} 和 t_{NC2}) 绘制华北克拉通早前寒武纪地壳演化线, 如图 6 所示, 二者绘制出的生长曲线基本一致, 表明选择不同的参考源区对于绘制华北克拉通早前寒武纪大陆地壳的生长曲线影响不大, 均显示出 ~ 2.7 Ga 也是华北克拉通早前寒武纪地壳生长的一个重要时期。如前文所述, $\varepsilon_{Hf}(t)$ 也是判断碎屑锆石源区是来自

于新生地壳物质,还是来自于古老地壳物质改造或者再循环的一个重要参数,因此,本文再以 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为标准来绘制华北克拉通的地壳生长曲线。由于只要一个岩石具有接近于同时代的亏损地幔 Hf 同位素组成,且该岩石的形成年龄和模式年龄接近($<200\text{Ma}$),那么就可以判定这个岩石的年龄代表新生地壳形成的年龄,所以可利用该锆石的 U-Pb 年龄来代表地壳生长时间。虽然有部分锆石的投点位于球粒陨石线与 0.75 倍同时期亏损地幔线之间,其寄主岩浆源区可能来自于壳幔相互作用的混合源区或富集性地幔源区,考虑到亏损地幔的 Hf 同位素储库还是应该占主导(Zheng *et al.*, 2006; 吴福元等, 2007; 郑永飞等, 2007),所以本文还是利用该锆石的 U-Pb 年龄来代表地壳生长时间。而对于 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) < 0$ 的碎屑锆石,由于其来源于古老地壳物质的再循环,故用这些锆石的 Hf 同位素两阶段模式年龄(t_{DM2})来近似代表新生地壳从亏损地幔提取的时间。由图 6 可见,由此绘制的生长曲线与利用锆石两阶段模式年龄得到的图线形状基本一致。

总之,根据上述讨论以及华北克拉通已有的资料,本文认为 $\sim 2.7\text{Ga}$ 和 $\sim 2.5\text{Ga}$ 分别为太古宙华北克拉通岩浆最活动时期;在早前寒武纪华北克拉通发生过两期明显的地壳生长,一期发生在 $\sim 2.7\text{Ga}$,以河南鲁山、山东西部和胶东等地区较广泛出露 $\sim 2.7\text{Ga}$ 岩石为代表;另一期发生在 2.5Ga 左右,以怀安、登封等地区 $\sim 2.5\text{Ga}$ 岩石为代表。当然,也有研究者持有不同意见,认为后一期岩石为华北克拉通 $\sim 2.7\text{Ga}$ 岩石再造的产物。

7 结论

(1) 随着地质历史变化,华北克拉通地壳生长呈阶段性特点,如在中太古代中期-新太古代末期($3.0 \sim 2.5\text{Ga}$)地壳生长速率较快,大约已有 60% 现今大陆地壳形成。此后,陆壳呈较稳定速率增长,到新元古代晚期(600Ma)已基本形成现今的华北克拉通大陆地壳。表明现今的华北克拉通大陆主要生长于太古宙和元古宙,而显生宙陆壳的增生量几乎可以忽略。

(2) 根据已有的地质事实以及各种地壳演化曲线,本文提出 $\sim 2.7\text{Ga}$ 和 $\sim 2.5\text{Ga}$ 分别曾经为华北克拉通太古宙岩浆最活动的时期,也是地壳快速生长的时期,这表明华北克拉通在新太古代曾发生过两期明显的地壳生长。

致谢 衷心地感谢张连昌研究员和两位审稿专家给予的宝贵修改意见和建议。

References

Albarède F, Scherer EE, Blichert-Toft J, Rosing M, Simionovici A and Bizzarro M. 2006. γ -ray irradiation in the early Solar System and the

- conundrum of the ^{176}Lu decay constant. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(5): 1261–1270
- Belousova EA, Kostitsyn YA, Griffin WL, Begg GC, O'Reilly SY and Pearson NJ. 2010. The growth of the continental crust: Constraints from zircon Hf-isotope data. *Lithos*, 119(3–4): 457–466
- Bouvier A, Vervoort JD and Patchett PJ. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1–2): 48–57
- Chen L, Cheng C and Wei Z. 2009. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 286(1–2): 171–183
- Chu NC, Taylor RN, Chavagnac V, Nesbitt RW, Boella RM, Milton JA, German CR, Bayon G and Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567–1574
- Condie KC and Aster RC. 2010. Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids: The supercontinent connection and continental growth. *Precambrian Research*, 180(3–4): 227–236
- Condie KC, Bickford ME, Aster RC, Belousova E and Scholl DW. 2011. Episodic zircon ages, Hf isotopic composition, and the preservation rate of continental crust. *Geological Society of America Bulletin*, 123(5–6): 951–957
- Dhuime B, Hawkesworth C and Cawood P. 2011. When Continents Formed. *Science*, 331(6014): 154–155
- 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
- Diwu CR, Sun Y, Guo AL, Wang HL and Liu XM. 2011. Crustal growth in the North China Craton at $\sim 2.5\text{Ga}$: Evidence from in situ zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the Dengfeng complex. *Gondwana Research*, 20(1): 149–170
- Diwu CR, Sun Y, Zhang H, Wang Q, Guo AL and Fan LG. 2012. Episodic tectonothermal events of the western North China Craton and North Qinling Orogenic Belt in central China: Constraints from detrital zircon U-Pb ages. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 107–122
- 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, Jackson SE, van Achenbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 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
- Hawkesworth CJ and Kemp AIS. 2006a. The differentiation and rates of generation of the continental crust. *Chemical Geology*, 226(3–4): 134–143
- Hawkesworth CJ and Kemp AIS. 2006b. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution. *Chemical Geology*, 226(3–4): 144–162
- Hawkesworth CJ, Dhuime B, Pietranik AB, Cawood PA, Kemp AIS and Storey CD. 2010. The generation and evolution of the continental crust. *Journal of the Geological Society*, 167(2): 229–248
- Jahn BM, Auvray B, Shen QH, Liu DY, Zhang ZQ, Dong YJ, Ye XJ, Zhang QZ, Cornichet J and Mace J. 1988. Archean crustal evolution in China: The Taishan complex, and evidence for juvenile crustal addition from long-term depleted mantle. *Precambrian Research*, 38(4): 381–403
- Jahn BM, Liu DY, Wan YS, Song B and Wu JS. 2008. Archean crustal evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry. *American Journal of Science*, 308(3): 232–269
- Kemp AIS, Hawkesworth CJ, Paterson BA and Kinny PD. 2006. Episodic growth of the Gondwana supercontinent from hafnium and oxygen isotopes in zircon. *Nature*, 439(7076): 580–583

- Kusky TM and Li J. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383–397
- Kusky TM. 2011. Geophysical and geological tests of tectonic models of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 26–35
- Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4): 339–342
- Liu DY, Wilde SA, Wan YS, Wang S, Valley JW, Kita N, Dong C, Xie HQ, Yang CX, Zhang YX and Gao LZ. 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 F, Guo JH, Lu XP and Diwu CR. 2009. Crustal growth at < 2.5 Ga in the North China Craton: Evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huai an gneiss. *Chinese Science Bulletin*, 54(24): 4704–4713
- Rudnick RL and Fountain DM. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267–309
- Rudnick RL and Gao S. 2003. 3. 01: Composition of the continental crust. In: Heinrich DH and Karl KT (eds.). *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Pergamon
- Song B, Nutman AP, Liu DY and Wu JS. 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Research*, 78(1–3): 79–94
- Sun Y, Yu ZP and Kröner A. 1994. Geochemistry and single zircon geochronology of Archaean TTG gneisses in the Taihua high-grade terrain, Lushan area, central China. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 10(3–4): 227–233
- Vervoort JD, Patchett PJ, Blichert-Toft J and Albarède F. 1999. Relationships between Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systems in the global sedimentary system. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(1–2): 79–99
- Wan YS, Liu DY, Song B, Wu JS, Yang CH, Zhang ZQ and Geng YS. 2005. Geochemical and Nd isotopic compositions of 3.8 Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks from the Anshan area and their geological significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 563–575
- Wan YS, Liu DY, Wang W, Song TR, Kröner A, Dong CY, Zhou HY and Yin XY. 2011a. Provenance of Meso- to Neoproterozoic cover sediments at the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: An integrated study of U-Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons and whole-rock geochemistry. *Gondwana Research*, 20(1): 219–242
- Wan YS, Liu DY, Wang SJ, Yang EX, Wang W, Dong CY, Zhou HY, Du LL, Yang YH and Diwu CR. 2011b. ~ 2.7 Ga 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
- Wang CY, Campbell IH, Allen CM, Williams IS and Eggins SM. 2009. Rate of growth of the preserved North American continental crust: Evidence from Hf and O isotopes in Mississippi detrital zircons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(3): 712–728
- Wu FY, Lin JQ, Wilde SA, Zhang XO and Yang JH. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1–2): 103–119
- 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)
- Yang J, Gao S, Chen C, Tang YY, Yuan HL, Gong HJ, Xie SW and Wang JQ. 2009. Episodic crustal growth of North China as revealed by U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons from modern rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(9): 2660–2673
- Zhai MG, Bian AG and Zhao TP. 2001. 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(Suppl. 1): 219–232
- Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 547–561
- Zhai MG. 2009. Two kinds of granulites (HT-HP and HT-UHT) in North China Craton: Their genetic relation and geotectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1753–1771 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG. 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: A summary and review. *Scientia Sinica (Terrae)*, 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
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 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 and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177–202
- Zhao ZP. 1993. *Evolution of Precambrian Crust of Sino-Korean Platform*. Beijing: Science Press, 357–388 (in Chinese)
- Zheng YF, Zhao ZF, Wu YB, Zhang SB, Liu X and Wu FY. 2006. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen. *Chemical Geology*, 231(1–2): 135–158
- Zheng YF, Chen RX, Zhang SB, Tang J, Zhao ZF and Wu YB. 2007. Zircon Lu-Hf isotope study of ultrahigh-pressure eclogite and granitic gneiss in the Dabie orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 317–330 (in Chinese with English abstract)
- Zhu RX, Chen L, Wu FY and Liu JL. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton. *Scientia Sinica (Terrae)*, 54(6): 789–797

附中文参考文献

- 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
- 翟明国. 2009. 华北克拉通两类早前寒武纪麻粒岩 (HT-HP 和 HT-UHT) 及其相关问题. *岩石学报*, 25(8): 1753–1771
- 翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成. *中国科学(地球科学)*, 41(8): 1037–1046
- 赵宗溥. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化. 北京: 科学出版社, 357–388
- 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 唐俊, 赵子福, 吴元保. 2007. 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 Lu-Hf 同位素研究. *岩石学报*, 23(2): 317–330
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. *中国科学(地球科学)*, 41(5): 583–592