

河南登封地区嵩山石英岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义

第五春荣, 孙勇, 袁洪林, 王洪亮, 钟兴平, 柳小明

大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069

2008-03-18 收稿, 2008-05-28 接受

国家自然科学基金项目(批准号: 40773044)、大陆动力学国家重点实验室研究课题和西北大学研究生创新教育项目(批准号: 07YZZ28)资助

摘要 对河南登封地区广泛分布的古元古代嵩山石英岩中碎屑锆石进行了 U-Pb 定年和 Hf 同位素研究. 研究结果对华北克拉通太古宙地壳的形成和演化提供了进一步的制约. 嵩山石英岩碎屑锆石具有 4 组峰值年龄, 其中以~2.50 Ga 的年龄峰值最为显著. 此外尚有 3.40, 2.34 Ga, 2.75~2.80 Ga 等 3 组峰值年龄. 嵩山石英岩中 3.40 Ga 碎屑锆石的 Hf 同位素组成与华北克拉通东部发现的古老岩石中的锆石(如冀东和鞍山地区)具有较强的相似性. 但是, 根据最新的一些报道, 华北克拉通南缘、华南地区、北秦岭构造带及其邻区均发现存在 3.6 Ga, 甚至更为古老的地壳物质线索. 因此很难明确地推测嵩山石英岩中发现的这些 3.40 Ga 碎屑锆石的物源区. 但综合迄今的研究成果, 可以推测, 3.4~3.6 Ga 的地壳物质曾经广泛地存在于古华北克拉通及其邻区. 2.77~2.80 Ga 的碎屑锆石所占份额较小, 样品中 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值最高可达 6.1 ± 1.6 , 接近于当时亏损地幔的 Hf 同位素值组成, 且锆石的 Hf 单阶段模式年龄与形成年龄相近, 表明其来于亏损地幔分异出的未经演化的物质. ~2.50 Ga 的年龄数据约占所测数据的 85%, 锆石的 Hf 同位素组成显示其岩浆成因以新太古代地壳再造为主, 伴有少量古老地壳物质的再循环. 本次研究中获得最年轻的锆石年龄为($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)为(2337 ± 23) Ma, 可以作为嵩山群的下限年龄考虑(古元古代早期).

关键词
碎屑锆石
华北克拉通
Hf 同位素
嵩山石英岩

锆石具有较强的抗风化性和抗干扰性, 不仅可以获得单颗粒锆石的形成年龄, 而且可以提供寄主岩石源区 Hf 同位素组成信息. 因此利用碎屑锆石 U-Pb-Hf 同位素测定技术, 在研究沉积岩物源, 沉积时代以及区域岩浆事件等方面具有其他同位素体系所不可比拟的优势, 已成为目前国内外研究的热点之一^[1~8].

由于上述技术路线需要大量测试数据进行统计研究, 因此需求一种快速、低成本、高精度, 可提供多种原位信息的分析方法. 激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)和多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)分析技术有机地结合解决了这一难题^[9], 这一分析方法对于研究不同成因的碎屑锆石或同一锆石中不同成分域的成因提供了有力的方法支持.

石英岩是元古宙沉积岩中重要的岩石类型, 其碎屑物质来源及成因是其研究的关键^[10]. 本文报道了华北克拉通南缘登封地区古元古代嵩山石英岩中碎屑锆石的定年结果及 Hf 同位素组成, 并探讨碎屑沉积物的形成及华北克拉通太古宙地壳演化历史.

1 地质背景及样品概况

张伯声根据在登封县东北发现太古宙登封群与元古宙嵩山群, 元古宙五指岭片岩与震旦系之间呈角度不整合(图 1), 分别将两个不整合命名为“嵩阳运动(五台运动)”和“中条运动”^[11,12]. 嵩山群西起鞍坡山, 东至密县助泉寺, 构成嵩山主体群峰. 嵩山群主要由下部的嵩山石英岩和上部的五指岭片岩组成^[11,13], 为一套浅海-滨海相的陆源碎屑-碳酸盐岩沉积岩系. 变

沉积岩中广泛地保留原始的沉积构造, 如交错层和斜层理等. 岩石经历了较强的褶皱变形, 形成一系列倒转褶皱, 变质程度较低, 属绿片岩相^[11,13,14]. 马杏垣等人^[13]认为嵩山群是在一个动荡的环境中沉积的, 其特征是沉积旋迴和沉积韵律极为发育, 反映在沉积过程中地壳相对活动与相对稳定不断地交替. 后期经历了多期的变质变形, 且多次构造形变迭加^[13,14].

样品 DF07-06 采自登封市君召县挡阳山地区, GPS 位置为: N34°27'05.9", E112°53'34.5". 挡阳山山体由石英岩组成, 山峰巍峨高耸. 嵩山石英岩不整合地覆盖在登封群片麻岩之上(图 1). 石英岩呈灰白色, 细粒, 致密厚层状, 常为次生石英脉贯穿. 有些层位含有铁质斑点, 风化后呈褐黄色. 从 6 kg 的石英岩样品中分离出约 500 粒锆石, 锆石大小不等, 多呈浑圆状, 说明遭受强烈的磨蚀; 但也有少量晶形较好的碎屑锆石存在, 表明部分碎屑物质源区较近. 大部分锆石颗粒以无色, 淡棕色为主, 粒径可达 200 μm . 阴极发光(CL)图像显示(图 2), 大部分锆石具有明显的密集振荡环带, 表明锆石为岩浆成因; 少部分锆石没有明显

的振荡环带, 极少数锆石具有核幔边结构, 可见窄的变质增生边, 但是由于宽度太窄, 难以进行分析.

2 仪器设备和分析方法

本文涉及的所有测试分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成. 将人工重砂分离出的锆石颗粒用环氧树脂固定并抛光, 使颗粒露出核部. 样品在测定之前用体积百分比为 3% 的 HNO_3 清洗样品表面, 以除去样品表面的污染. 然后进行透射光和反射光照相, 并在英国 Gatan 公司生产的 Mono CL3+ 阴极发光装置系统上进行阴极发光(CL)照相. 锆石定年工作所用的 ICP-MS 为 Agilent 公司最新一代带有 Shield Torch 的 Agilent 7500a. 锆石原位 Lu-Hf 同位素测定采用 Nu Plasma HR(Wrexham, UK)多接收电感耦合等离子体质谱仪完成(MC-ICP-MS). 采用的激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M, 该系统由德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 Excimer 激光器(工作物质 ArF, 波长 193 nm)与 MicroLas 公司的光学系统组成.

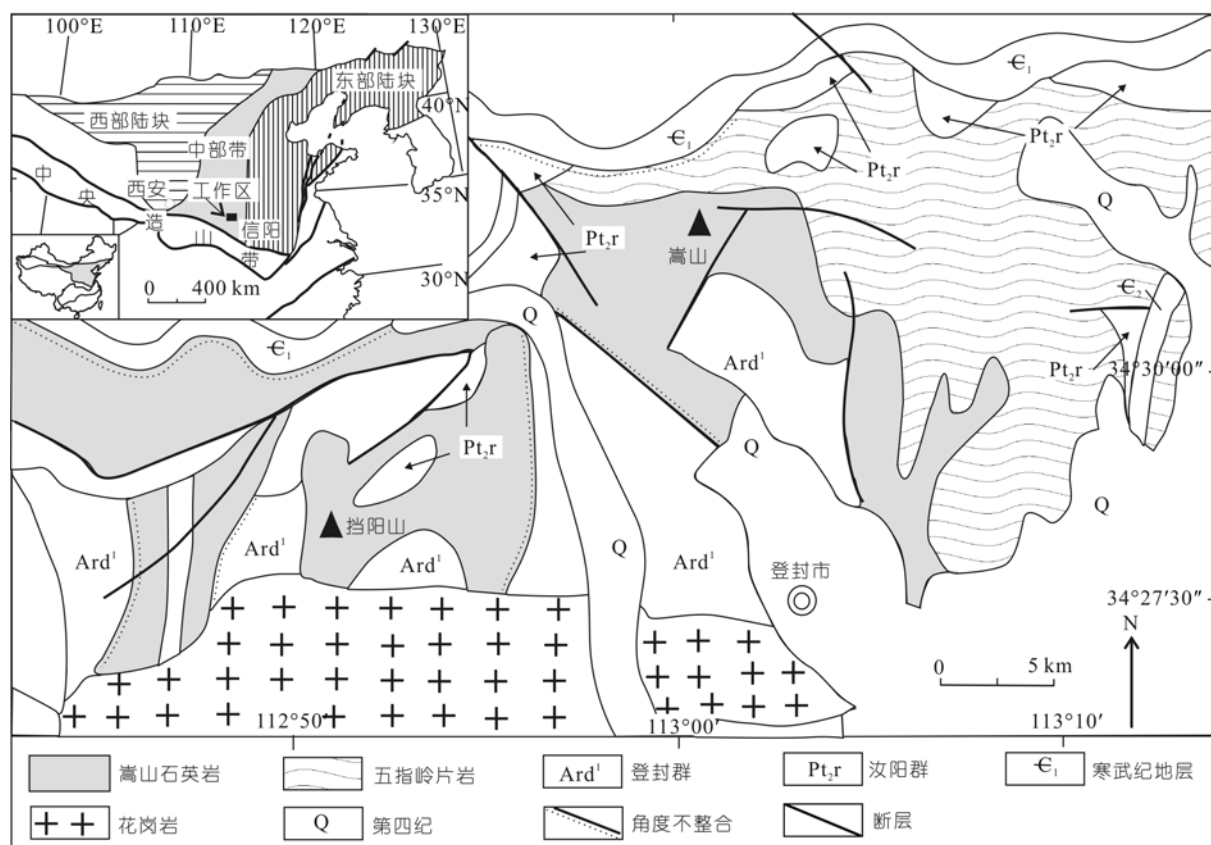


图 1 嵩山地区地质简图(据河南省地质图, 1981)

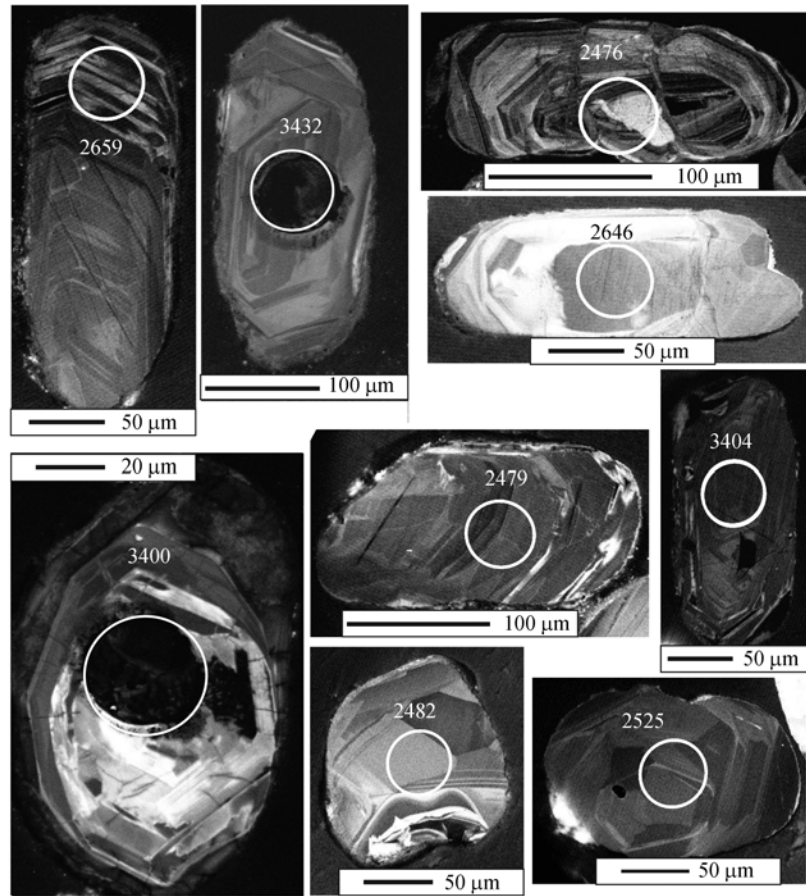


图 2 石英岩中锆石的 CL 图像

白色圈为激光定年位置, 所标数字为在该位置获得锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 单位为 Ma

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析与锆石 U-Pb 定年及微量元素分析的 ICP-MS 使用同一台激光剥蚀系统, 对样品进行一次性剥蚀完成, 分别由 ICP-MS 与 MC-ICP-MS 两台仪器同时采集各自的信号, 详见参考文献[9]. 激光剥蚀以氦气作为剥蚀物质的载气, 斑束直径为 $44\text{ }\mu\text{m}$, 频率为 10 Hz , 激光能量为 90 mJ , 每个分析点的气体背景采集时间为 30 s , 信号采集时间为 40 s .

LA-ICP-MS 激光剥蚀采样方式为单点剥蚀. 数据分析前用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器的最佳化, 使仪器达到最大的灵敏度、最小的氧化物产率 ($\text{ThO}^+/\text{Th}^+ < 2\%$) 和最低的背景值. ICP-MS 数据采集选用一个质量峰采集一点的跳峰方式. 每测定 5 个样品点, 测定一个锆石 91500 和一个 NIST610. 数据处理采用 GLITTER (ver 4.0) 程序, 年龄计算以标准锆石

91500 为外标进行同位素比值分馏校正; 元素浓度计算采用 NIST610 作外标, Si 作内标. 锆石谐和图用 Isoplot 程序(ver 3.0)获得^[15]. 样品分析过程中, 91500 标样的分析结果为 $(1064.1 \pm 3.2)\text{ Ma}$ ($n = 16, 2\sigma$), GJ-1 标样的分析结果为 $(603.1 \pm 3.0)\text{ Ma}$ ($n = 14, 2\sigma$), 与对应的年龄推荐值 $((1062.4 \pm 0.6)\text{ Ma}$ (2σ), $(608.53 \pm 0.37)\text{ Ma}$ (2σ)) 在误差范围内完全一致^[16,17].

锆石原位 Lu-Hf 同位素测定用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02669$ ^[18] 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5886$ ^[19] 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. 在样品测定期间, 对标准参考物质 91500 和 GJ-1 进行分析, 一方面进行仪器状态监控, 另一方面以此来对样品进行校正. 分析获得标准锆石 91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282295 \pm 0.000027$ ($n = 14, 2\sigma$), GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282734 \pm 0.000015$ ($n = 16, 2\sigma$), 分别与推荐值 $0.2823075 \pm 58(2\sigma)$ ^[20] 和 0.282015 ± 0.000019

(2σ)^[21]吻合的很好. ϵ_{Hf} 的计算采用 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.865\times 10^{-11} \text{ a}^{[22]}$, 球粒陨石现今的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$ ^[23], 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 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$ ^[24]. Hf同位素单阶段模式年龄 T_{DM} 以亏损地幔为参考计算.

被测锆石的数量优选是利用碎屑锆石研究地质事件的关键^[25~27], 按照Dodson等人^[25]的建议, 如果某一类锆石占锆石总量的 5%, 那么随机地分析 60 粒锆石, 找到它们的几率应有 95%. 但是, Vermeesch^[26]提出Dodson的计算可能有误, 从而提出至少需要分析 117 粒锆石才能满足统计学的要求. Anderson^[27]认为Vermeesch计算的假设前提可能过于理想化, 在实际工作中, 可以将碎屑锆石的分析分为随机分析和非随机分析, 对于随机分析需要 35~70 粒或更多的锆石, 然后选择性地对感兴趣的锆石进行微量元素以及U-Pb-Hf分析. 此次测试研究以Anderson的建议为基本准则.

古老锆石(>1000 Ma)多存在着一定程度的铅丢失. 而且 ^{207}Pb 和 ^{206}Pb 在相同的初始条件和共同的地质构造环境中具有同步变化的特征, 两者保持相对稳定的比值. 因此采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄来代表岩石的成岩年龄更为可靠^[28]. 同时, 结合 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 来计算碎屑锆石的谐和性, 剔除 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 相对于 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 偏差大于(小于)10%的锆石颗粒. 另外, 研究表

明, 如果普通铅的含量占锆石铅含量的 1%, 会带来很大的误差, 导致 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄与真实年龄值相差数百个Ma^[29]. 即使进行普通Pb的校正, 校正又往往具有很大的不确定性和条件限制^[29], 因此也剔除了普通铅较高的锆石年龄数据.

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄和微量元素

实验前测得 Ar 气中 ^{202}Hg 的计数很低(<50 cps), 与背景相当, 所以 Ar 气中 ^{204}Hg 对 ^{204}Pb 没有干扰, 实验所测得的 ^{204}Pb 代表了锆石中普通铅的含量. 在样品 DF07-06 中, 去除 ^{204}Pb 过高以及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄谐和性大于 10%的锆石颗粒外, 共在 99 粒锆石上进行了测定, 分析数据见表 1. 分析结果显示: 锆石中普通铅的含量除了个别占一定量的比例(0.1%)外, 其他锆石普通铅含量均小于仪器的检出限(<0.039 $\mu\text{g/g}$). 大多数锆石位于 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图的谐和线上, 或在其附近分布, 少数点沿不一致线分布(图 3). 锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 2.34~3.40 Ga 之间, 对所有碎屑锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测定年龄作频率分布图(图 4). 从图中可以看出, 有 4 个年龄峰值, 其中 2.46~2.70 Ga 的数据构成主体, 约占所测数据的 85%左右, 2.50 Ga 年龄构成峰值; ~3.40 Ga ($n = 9$), 2.77~2.80 Ga ($n = 3$), 2.34 Ga ($n = 1$)所占的份额较小.

表 1 嵩山石英岩锆石 U-Pb 同位素数据

分析点号	组成/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$			Th/U	同位素比值								年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
DF07-06-01	156	99	220	0.45	0.1676	0.0022	11.0370	0.1191	0.4767	0.0036	2534	22	2526	10	2513	16		
DF07-06-02	50	37	72	0.51	0.1808	0.0031	11.5320	0.1785	0.4620	0.0046	2660	28	2567	14	2448	20		
DF07-06-03	201	220	297	0.74	0.1685	0.0022	9.9847	0.1047	0.4291	0.0032	2543	22	2433	10	2302	14		
DF07-06-04	112	160	148	1.08	0.1675	0.0025	10.3974	0.1289	0.4494	0.0037	2533	24	2471	11	2393	16		
DF07-06-05	133	192	179	1.07	0.1688	0.0024	10.3420	0.1250	0.4437	0.0036	2546	24	2466	11	2367	16		
DF07-06-06	73	50	108	0.46	0.1649	0.0027	10.4374	0.1535	0.4583	0.0043	2507	28	2474	14	2432	19		
DF07-06-09	57	51	81	0.63	0.1656	0.0031	10.7587	0.1849	0.4706	0.0050	2514	31	2503	16	2486	22		
DF07-06-10	55	42	80	0.53	0.1761	0.0031	11.4231	0.1847	0.4699	0.0048	2616	29	2558	15	2483	21		
DF07-06-11	54	41	76	0.54	0.1776	0.0031	11.6530	0.1853	0.4752	0.0049	2631	29	2577	15	2506	21		
DF07-06-12	62	44	100	0.44	0.1662	0.0030	9.9827	0.1634	0.4352	0.0044	2519	30	2433	15	2329	20		
DF07-06-13	116	78	106	0.73	0.2841	0.0039	26.0857	0.3076	0.6652	0.0062	3386	21	3350	12	3287	24		
DF07-06-14	38	51	51	1.00	0.1860	0.0037	11.9443	0.2215	0.4653	0.0055	2707	32	2600	17	2463	24		
DF07-06-15	42	38	55	0.70	0.1814	0.0037	12.6602	0.2470	0.5058	0.0062	2665	34	2655	18	2639	27		
DF07-06-16	41	63	50	1.27	0.1723	0.0034	11.6382	0.2125	0.4893	0.0056	2581	32	2576	17	2568	24		
DF07-06-17	104	141	136	1.04	0.1640	0.0025	10.8674	0.1409	0.4802	0.0041	2497	25	2512	12	2528	18		
DF07-06-18	65	49	99	0.49	0.1598	0.0029	10.2949	0.1702	0.4668	0.0048	2454	30	2462	15	2469	21		
DF07-06-19	19	18	27	0.65	0.1802	0.0054	11.6687	0.3409	0.4693	0.0082	2655	49	2578	27	2481	36		

表 1(续)

分析点号	组成/mg·g ⁻¹			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
DF07-06-20	94	44	130	0.34	0.1847	0.0029	13.3241	0.1844	0.5228	0.0049	2696	26	2703	13	2711	21
DF07-06-21	52	58	70	0.83	0.1659	0.0028	11.2579	0.1688	0.4919	0.0047	2516	28	2545	14	2579	20
DF07-06-22	75	69	105	0.66	0.1720	0.0030	11.7035	0.1898	0.4934	0.0051	2577	29	2581	15	2585	22
DF07-06-25	75	89	116	0.77	0.1638	0.0028	10.0328	0.1538	0.4440	0.0043	2496	28	2438	14	2369	19
DF07-06-26	70	50	101	0.50	0.1652	0.0027	11.4049	0.1644	0.5007	0.0047	2509	27	2557	13	2617	20
DF07-06-27	68	80	96	0.83	0.1710	0.0027	11.2259	0.1554	0.4761	0.0043	2567	26	2542	13	2510	19
DF07-06-28	72	79	94	0.85	0.1798	0.0027	12.7525	0.1716	0.5144	0.0047	2651	25	2662	13	2675	20
DF07-06-29	61	53	88	0.60	0.1657	0.0029	11.2485	0.1837	0.4924	0.0051	2514	30	2544	15	2581	22
DF07-06-30	71	47	102	0.46	0.1756	0.0029	12.3412	0.1818	0.5097	0.0049	2612	27	2631	14	2655	21
DF07-06-31	66	76	105	0.73	0.1613	0.0028	9.8689	0.1554	0.4437	0.0043	2469	29	2423	15	2367	19
DF07-06-32	31	39	43	0.90	0.1737	0.0038	11.6834	0.2453	0.4881	0.0063	2593	36	2579	20	2562	27
DF07-06-33	27	33	40	0.84	0.1762	0.0038	11.2661	0.2288	0.4638	0.0058	2618	35	2545	19	2456	25
DF07-06-35	95	77	142	0.54	0.1670	0.0024	11.3777	0.1460	0.4944	0.0042	2528	24	2555	12	2589	18
DF07-06-36	27	19	41	0.46	0.1829	0.0039	12.3154	0.2513	0.4887	0.0062	2679	35	2629	19	2565	27
DF07-06-37	71	81	105	0.78	0.1657	0.0026	10.9277	0.1529	0.4786	0.0044	2515	26	2517	13	2521	19
DF07-06-38	24	22	36	0.61	0.1746	0.0034	12.1869	0.2186	0.5062	0.0057	2602	32	2619	17	2640	25
DF07-06-39	94	57	97	0.59	0.2838	0.0035	27.4784	0.2735	0.7022	0.0059	3384	19	3401	10	3429	22
DF07-06-40	115	90	115	0.79	0.2898	0.0035	28.1226	0.2744	0.7038	0.0059	3416	19	3423	10	3435	22
DF07-06-41	62	57	112	0.51	0.1492	0.0020	8.9934	0.1008	0.4371	0.0035	2337	23	2337	10	2338	16
DF07-06-43	63	40	101	0.40	0.1739	0.0028	12.2078	0.1743	0.5090	0.0049	2596	26	2621	13	2652	21
DF07-06-44	55	86	77	1.11	0.1663	0.0028	11.0556	0.1668	0.4819	0.0047	2521	28	2528	14	2536	21
DF07-06-45	18	16	26	0.63	0.1808	0.0043	12.3458	0.2779	0.4950	0.0068	2661	39	2631	21	2592	29
DF07-06-47	38	39	52	0.76	0.1838	0.0033	13.2952	0.2193	0.5246	0.0057	2687	29	2701	16	2719	24
DF07-06-48	96	134	134	1.00	0.1896	0.0030	13.0365	0.1830	0.4986	0.0048	2739	26	2682	13	2608	21
DF07-06-49	88	78	145	0.54	0.1657	0.0024	11.3089	0.1415	0.4950	0.0043	2514	24	2549	12	2592	19
DF07-06-50	60	62	92	0.67	0.1651	0.0026	10.6949	0.1465	0.4697	0.0043	2509	26	2497	13	2482	19
DF07-06-51	34	37	53	0.70	0.1664	0.0030	10.7570	0.1771	0.4689	0.0049	2521	30	2502	15	2479	21
DF07-06-52	34	20	50	0.40	0.1780	0.0035	12.4225	0.2260	0.5061	0.0059	2634	32	2637	17	2640	25
DF07-06-54	8	11	12	0.90	0.1718	0.0065	11.3834	0.4217	0.4806	0.0100	2575	61	2555	35	2530	43
DF07-06-55	124	58	255	0.23	0.1652	0.0022	9.9727	0.1091	0.4377	0.0035	2510	22	2432	10	2340	16
DF07-06-56	73	52	111	0.47	0.1726	0.0024	11.6680	0.1372	0.4901	0.0042	2583	23	2578	11	2571	18
DF07-06-61	107	181	163	1.11	0.1677	0.0020	10.0792	0.0937	0.4358	0.0033	2535	20	2442	9	2332	15
DF07-06-62	118	156	181	0.86	0.1684	0.0020	10.3746	0.0943	0.4466	0.0034	2542	19	2469	8	2380	15
DF07-06-63	108	239	120	1.99	0.1857	0.0023	12.9600	0.1264	0.5060	0.0040	2704	20	2677	9	2640	17
DF07-06-64	89	145	126	1.15	0.1656	0.0020	10.6309	0.1047	0.4653	0.0037	2514	20	2491	9	2463	16
DF07-06-65	17	29	24	1.18	0.1749	0.0032	11.0520	0.1876	0.4583	0.0050	2605	30	2528	16	2432	22
DF07-06-67	99	119	149	0.80	0.1674	0.0019	10.5479	0.0924	0.4569	0.0034	2532	19	2484	8	2426	15
DF07-06-68	35	30	56	0.54	0.1640	0.0024	10.6493	0.1324	0.4710	0.0042	2497	24	2493	12	2488	18
DF07-06-71	122	95	129	0.73	0.2868	0.0033	24.3563	0.2221	0.6158	0.0049	3401	18	3283	9	3093	20
DF07-06-74	99	66	92	0.72	0.2927	0.0034	28.6967	0.2646	0.7111	0.0058	3432	18	3443	9	3463	22
DF07-06-77	36	30	54	0.56	0.1714	0.0022	11.5992	0.1262	0.4909	0.0041	2572	22	2573	10	2575	18
DF07-06-78	41	45	59	0.76	0.1766	0.0028	11.5197	0.1588	0.4733	0.0045	2621	26	2566	13	2498	20
DF07-06-79	30	35	50	0.70	0.1707	0.0024	10.5847	0.1295	0.4498	0.0039	2565	24	2487	11	2395	18
DF07-06-80	50	49	69	0.70	0.1956	0.0023	13.4495	0.1280	0.4987	0.0039	2790	19	2712	9	2608	17
DF07-06-81	47	49	77	0.64	0.1745	0.0021	10.6879	0.1010	0.4445	0.0034	2601	20	2496	9	2371	15
DF07-06-82	86	85	134	0.63	0.1931	0.0024	14.2666	0.1478	0.5359	0.0044	2769	21	2768	10	2766	19
DF07-06-84	59	46	99	0.46	0.1768	0.0022	11.0417	0.1100	0.4530	0.0036	2624	20	2527	9	2409	16
DF07-06-91	32	25	52	0.49	0.1682	0.0024	10.8282	0.1331	0.4671	0.0041	2540	24	2509	11	2471	18
DF07-06-93	34	29	52	0.55	0.1701	0.0024	10.5817	0.1253	0.4515	0.0039	2558	23	2487	11	2402	17
DF07-06-95	104	73	152	0.48	0.1956	0.0023	14.3908	0.1322	0.5339	0.0041	2790	19	2776	9	2758	17
DF07-06-96	116	74	118	0.62	0.2957	0.0033	27.7324	0.2321	0.6805	0.0052	3448	17	3410	8	3346	20

表 1(续)

分析点号	组成/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
DF07-06-97	91	154	125	1.23	0.1865	0.0022	12.0204	0.1085	0.4671	0.0036	2712	19	2606	8	2471	16
DF07-06-98	44	41	66	0.61	0.1680	0.0021	11.2337	0.1149	0.4846	0.0039	2538	21	2543	10	2547	17
DF07-06-99	111	80	112	0.72	0.2792	0.0031	25.0365	0.2149	0.6499	0.0050	3358	17	3310	8	3228	20
DF07-06-101	49	62	73	0.85	0.1667	0.0031	11.3136	0.1944	0.4921	0.0054	2525	31	2549	16	2580	23
DF07-06-102	19	22	31	0.71	0.1660	0.0035	10.8929	0.2164	0.4758	0.0058	2518	35	2514	18	2509	25
DF07-06-103	73	131	108	1.21	0.1625	0.0023	10.4800	0.1282	0.4676	0.0041	2482	24	2478	11	2473	18
DF07-06-104	96	116	152	0.76	0.1626	0.0021	10.6124	0.1168	0.4733	0.0040	2483	22	2490	10	2498	17
DF07-06-106	56	66	88	0.74	0.1624	0.0025	10.7321	0.1481	0.4793	0.0045	2481	26	2500	13	2524	20
DF07-06-107	13	9	22	0.39	0.1631	0.0040	10.5007	0.2466	0.4669	0.0065	2488	41	2480	22	2470	28
DF07-06-109	173	168	290	0.58	0.1621	0.0019	10.4252	0.1010	0.4663	0.0037	2478	20	2473	9	2467	16
DF07-06-110	156	103	289	0.36	0.1609	0.0020	9.8541	0.0986	0.4441	0.0036	2465	20	2421	9	2369	16
DF07-06-111	80	55	82	0.67	0.2876	0.0040	27.1088	0.3356	0.6836	0.0069	3405	21	3387	12	3358	26
DF07-06-112	93	58	94	0.62	0.2869	0.0038	27.7270	0.3238	0.7008	0.0068	3401	20	3410	11	3424	26
DF07-06-114	50	43	70	0.61	0.1793	0.0028	13.4846	0.1943	0.5453	0.0055	2647	26	2714	14	2806	23
DF07-06-115	119	84	205	0.41	0.1627	0.0020	10.5857	0.1078	0.4718	0.0038	2484	21	2488	9	2492	17
DF07-06-117	106	129	152	0.85	0.1725	0.0022	12.2513	0.1322	0.5150	0.0043	2582	21	2624	10	2678	18
DF07-06-118	57	61	82	0.75	0.1783	0.0026	12.7921	0.1632	0.5203	0.0048	2637	24	2665	12	2700	20
DF07-06-119	48	28	89	0.31	0.1620	0.0024	10.1311	0.1337	0.4535	0.0042	2477	25	2447	12	2411	19
DF07-06-120	111	79	192	0.41	0.1623	0.0020	10.4651	0.1098	0.4676	0.0038	2480	21	2477	10	2473	17
DF07-06-121	60	61	92	0.66	0.1688	0.0024	11.5495	0.1468	0.4962	0.0045	2546	24	2569	12	2597	20
DF07-06-122	68	59	101	0.58	0.1766	0.0025	12.6271	0.1538	0.5184	0.0047	2621	23	2652	11	2693	20
DF07-06-123	53	72	85	0.85	0.1709	0.0026	10.8623	0.1459	0.4609	0.0043	2566	25	2511	12	2444	19
DF07-06-124	46	43	77	0.55	0.1649	0.0026	10.6288	0.1525	0.4674	0.0046	2506	26	2491	13	2472	20
DF07-06-125	64	89	96	0.92	0.1657	0.0024	11.0128	0.1416	0.4818	0.0044	2515	24	2524	12	2535	19
DF07-06-126	81	103	143	0.72	0.1626	0.0022	9.7455	0.1146	0.4346	0.0038	2483	23	2411	11	2326	17
DF07-06-127	83	141	116	1.21	0.1642	0.0023	11.1626	0.1336	0.4930	0.0043	2499	23	2537	11	2584	19
DF07-06-128	80	89	123	0.72	0.1646	0.0023	11.2416	0.1341	0.4951	0.0044	2504	23	2543	11	2593	19
DF07-06-129	133	170	184	0.92	0.1815	0.0022	13.1665	0.1346	0.5259	0.0043	2667	20	2692	10	2724	18
DF07-06-130	142	100	227	0.44	0.1616	0.0020	11.2477	0.1139	0.5046	0.0041	2473	20	2544	9	2634	18
DF07-06-131	79	108	116	0.93	0.1627	0.0023	11.1150	0.1358	0.4954	0.0044	2484	23	2533	11	2594	19
DF07-06-132	68	84	95	0.88	0.1819	0.0026	13.1333	0.1646	0.5235	0.0048	2670	23	2689	12	2714	20

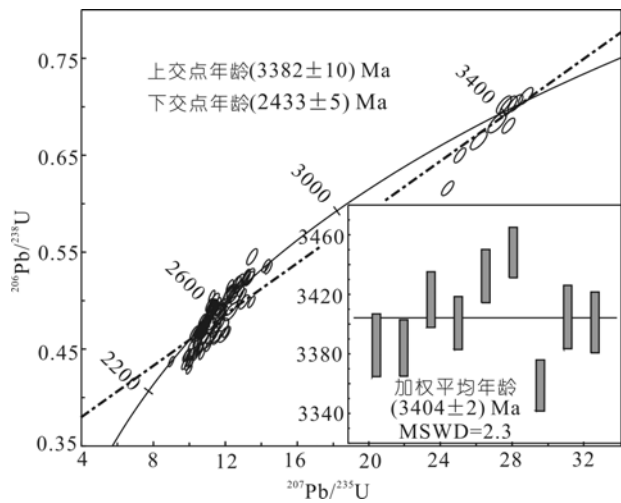


图 3 锆石的 U-Pb 谐和图及~3.4 Ga 锆石的加权平均图

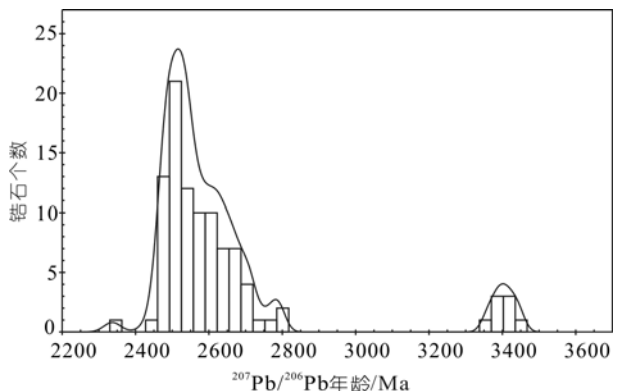


图 4 锆石年龄频率分布直方图

大多数碎屑锆石的CL图像大都显示岩浆结构(图2), U和Th含量分别为 24~575, 18~647 $\mu\text{g/g}$, Th/U比值变化范围为 0.2~2.0, 上述特征表明, 这些锆石主要来自岩浆岩物源区. 而个别碎屑锆石(如 DF-06-54, DF-06-107)无明显的环带结构, 并具有较低的U(12~22 $\mu\text{g/g}$), Th(9~11 $\mu\text{g/g}$)含量, 由于石英岩为流体沉淀后的变质产物, 其较低的Th, U含量与变质流体有关, 这可能是由于在碱性环境, 羟基出溶, 增强了U, Th的活动性, 虽然其具有较大的Th/U值(0.4~0.9), 这可能与锆石结晶介质含量低有关^[30], 因此, 这些Th, U含量较低的碎屑锆石可能为变质成因的.

3.2 锆石 Hf 同位素组成

85 粒锆石 Hf 同位素分析结果见表 2. 显示所有锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, 其值平均为 0.0007, 表明锆石在形成后具有极低量的放射成因 Hf 积累. 碎屑锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值明显分为两组, 对于 3.40 Ga 的锆石, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值较低, 变化范围为 0.28050~0.28078, 反映其可能形成较为古老的物质源区, 其对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化较大, 最高可达 3.8 ± 1.9 , 与 3400 Ma 时的亏损地幔的同位素值相近, 其单阶段模式年龄为 3441 Ma; 最小值至 -4.6 ± 1.9 , 其 T_{DM} 值相对略高一些(3765 Ma); 除了这 3 粒锆石

具有变化较大的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 外, 其余的五粒锆石的 Hf 同位素组成与球粒陨石相似, 其对应的模式年龄基本一致, 在 3.60 Ga 左右. 而对于较年轻的锆石而言, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值相对较高, 变化范围为 0.28103~0.28144, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值除了个别点为负值外, 大多数都为正值, 最高的可达 8.3 ± 2.0 (图 5), 对应的 T_{DM} 值变化范围为 2559~3091 Ma, 与相对应的碎屑锆石形成年龄相近.

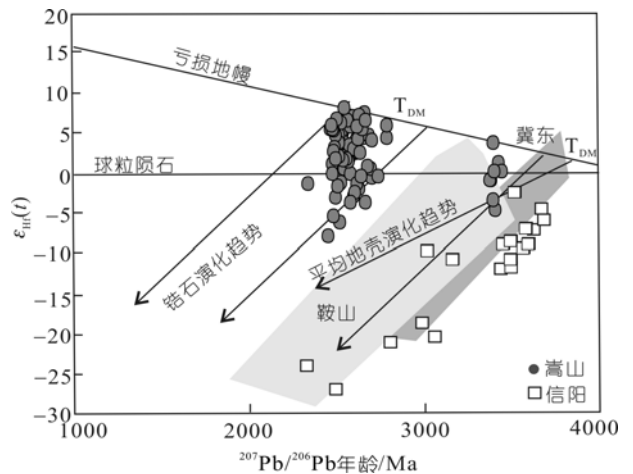


图5 锆石 Hf 同位素特征

冀东、鞍山古老岩石 Hf 同位素数据分别引自参考文献[24]和[31];
信阳捕虏体麻粒岩中锆石 Hf 同位素数据引自参考文献[32]

表 2 嵩山石英岩锆石 Hf 同位素数据

分析点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
DF07-06-01	2534	0.011493	0.000463	0.281331	0.000031	-51.0	5.1	1.6	2643	-0.99
DF07-06-02	2660	0.019937	0.000846	0.281240	0.000043	-47.1	4.1	1.9	2522	-0.97
DF07-06-03	2543	0.018502	0.000659	0.281298	0.000033	-52.1	3.8	1.6	2701	-0.98
DF07-06-04	2533	0.014650	0.000587	0.281230	0.000031	-54.5	1.3	1.5	2788	-0.98
DF07-06-05	2546	0.017600	0.000707	0.281206	0.000034	-55.4	0.6	1.6	2828	-0.98
DF07-06-09	2514	0.017827	0.000703	0.281177	0.000040	-56.4	-1.2	1.8	2867	-0.98
DF07-06-10	2616	0.011259	0.000564	0.281213	0.000043	-55.1	2.6	1.9	2809	-0.98
DF07-06-11	2631	0.041234	0.001656	0.281127	0.000044	-58.2	-2.0	1.9	3008	-0.95
DF07-06-12	2519	0.014473	0.000581	0.281165	0.000046	-56.8	-1.3	2.0	2875	-0.98
DF07-06-13	3386	0.027710	0.000860	0.280636	0.000028	-75.5	-0.9	1.5	3606	-0.97
DF07-06-14	2707	0.007304	0.000316	0.281053	0.000034	-60.8	-0.5	1.6	3004	-0.99
DF07-06-15	2665	0.014643	0.000595	0.281004	0.000034	-62.5	-3.7	1.6	3091	-0.98
DF07-06-16	2581	0.006500	0.000276	0.281143	0.000032	-57.6	-0.1	1.6	2881	-0.99
DF07-06-17	2497	0.012590	0.000485	0.281125	0.000033	-58.2	-3.0	1.6	2921	-0.99
DF07-06-18	2454	0.009889	0.000395	0.281014	0.000045	-62.2	-7.8	1.9	3062	-0.99
DF07-06-19	2655	0.017428	0.000807	0.281251	0.000037	-53.8	4.5	1.7	2775	-0.98
DF07-06-20	2696	0.014272	0.000584	0.281105	0.000043	-58.9	0.6	1.9	2954	-0.98
DF07-06-22	2577	0.030643	0.001237	0.281253	0.000042	-53.7	2.0	1.9	2803	-0.96
DF07-06-25	2496	0.018228	0.000807	0.281415	0.000047	-44.4	6.7	2.0	2416	-0.98
DF07-06-26	2509	0.014528	0.000545	0.281390	0.000035	-48.9	6.6	1.7	2569	-0.98
DF07-06-28	2651	0.012534	0.000570	0.281266	0.000046	-53.3	5.3	2.0	2738	-0.98

表 2(续)

分析点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
DF07-06-29	2514	0.011579	0.000547	0.281339	0.000042	-50.7	4.8	1.9	2639	-0.98
DF07-06-30	2612	0.014334	0.000598	0.281259	0.000030	-53.5	4.1	1.5	2750	-0.98
DF07-06-32	2593	0.016597	0.000681	0.281238	0.000040	-54.2	2.8	1.8	2783	-0.98
DF07-06-33	2618	0.017531	0.000712	0.281107	0.000044	-58.9	-1.3	1.9	2962	-0.98
DF07-06-35	2528	0.012573	0.000603	0.281166	0.000044	-56.8	-1.1	1.9	2875	-0.98
DF07-06-36	2679	0.010161	0.000430	0.281116	0.000036	-58.6	0.9	1.7	2929	-0.99
DF07-06-37	2515	0.027820	0.001205	0.281344	0.000042	-50.5	3.9	1.8	2677	-0.96
DF07-06-38	2602	0.014232	0.000591	0.281067	0.000051	-60.3	-2.9	2.1	3006	-0.98
DF07-06-39	3384	0.018900	0.000600	0.280621	0.000048	-76.1	-0.9	2.1	3601	-0.98
DF07-06-40	3416	0.017360	0.000640	0.280500	0.000042	-80.3	-4.6	1.9	3765	-0.98
DF07-06-41	2337	0.043890	0.000930	0.281298	0.000021	-52.1	-1.2	1.3	2720	-0.97
DF07-06-43	2596	0.021749	0.000966	0.281372	0.000029	-49.5	7.1	1.5	2622	-0.97
DF07-06-44	2521	0.026672	0.001065	0.281325	0.000043	-51.2	3.6	1.9	2693	-0.97
DF07-06-45	2661	0.023056	0.000948	0.281341	0.000044	-50.6	7.5	1.9	2662	-0.97
DF07-06-47	2687	0.016827	0.000682	0.281234	0.000035	-54.4	4.8	1.7	2789	-0.98
DF07-06-48	2739	0.012513	0.000573	0.281049	0.000038	-60.9	-0.4	1.7	3029	-0.98
DF07-06-50	2509	0.017342	0.000659	0.281300	0.000032	-52.1	3.1	1.6	2698	-0.98
DF07-06-51	2521	0.015892	0.000660	0.281032	0.000044	-61.5	-6.1	1.9	3058	-0.98
DF07-06-52	2634	0.022404	0.000967	0.281351	0.000041	-50.2	7.3	1.8	2650	-0.97
DF07-06-54	2575	0.011366	0.000485	0.281261	0.000041	-53.4	3.6	1.8	2738	-0.99
DF07-06-55	2510	0.019483	0.000692	0.281167	0.000038	-56.8	-1.6	1.7	2881	-0.98
DF07-06-56	2583	0.007970	0.000365	0.281315	0.000028	-51.5	5.9	1.5	2658	-0.99
DF07-06-61	2535	0.014860	0.000510	0.281378	0.000048	-49.3	6.8	2.0	2583	-0.98
DF07-06-62	2542	0.025720	0.000900	0.281258	0.000030	-53.5	2.0	1.5	2772	-0.97
DF07-06-63	2704	0.017850	0.000590	0.281199	0.000046	-55.6	4.1	2.0	2829	-0.98
DF07-06-64	2514	0.017330	0.000590	0.281312	0.000042	-51.6	3.8	1.8	2677	-0.98
DF07-06-65	2605	0.016110	0.000550	0.281078	0.000040	-59.9	-2.4	1.8	2989	-0.98
DF07-06-67	2532	0.021640	0.000730	0.281262	0.000036	-53.4	2.2	1.7	2755	-0.98
DF07-06-68	2497	0.012230	0.000410	0.281341	0.000048	-50.6	4.8	2.0	2626	-0.99
DF07-06-71	3401	0.034840	0.001110	0.280776	0.000042	-70.6	3.8	1.9	3441	-0.97
DF07-06-74	3432	0.027850	0.000890	0.280672	0.000044	-74.3	1.4	1.9	3560	-0.97
DF07-06-77	2572	0.023730	0.000770	0.281218	0.000040	-55.0	1.5	1.8	2817	-0.98
DF07-06-78	2621	0.019660	0.000710	0.281226	0.000050	-54.7	3.0	2.1	2802	-0.98
DF07-06-79	2565	0.021340	0.000720	0.281368	0.000044	-49.7	6.7	1.9	2611	-0.98
DF07-06-80	2790	0.022570	0.000790	0.281167	0.000036	-56.8	4.6	1.7	2887	-0.98
DF07-06-81	2601	0.012340	0.000440	0.281229	0.000042	-54.6	3.1	1.8	2778	-0.99
DF07-06-84	2624	0.012900	0.000450	0.281248	0.000052	-53.9	4.3	2.1	2754	-0.99
DF07-06-88	2642	0.026700	0.000960	0.281133	0.000042	-58.0	-0.3	1.9	2946	-0.97
DF07-06-91	2540	0.010820	0.000360	0.281230	0.000048	-54.5	1.9	2.0	2771	-0.99
DF07-06-93	2558	0.013620	0.000450	0.281219	0.000052	-54.9	1.7	2.1	2792	-0.99
DF07-06-95	2790	0.011880	0.000440	0.281191	0.000032	-55.9	6.1	1.6	2829	-0.99
DF07-06-96	3448	0.027320	0.000870	0.280629	0.000046	-75.8	0.2	2.0	3616	-0.97
DF07-06-98	2538	0.018280	0.000650	0.281238	0.000042	-54.2	1.6	1.8	2781	-0.98
DF07-06-101	2525	0.008490	0.000340	0.281366	0.000050	-49.7	6.4	2.1	2588	-0.99
DF07-06-104	2483	0.014450	0.000570	0.281070	0.000046	-60.2	-5.5	2.0	3001	-0.98
DF07-06-106	2481	0.020200	0.000750	0.281269	0.000054	-53.2	1.3	2.2	2747	-0.98
DF07-06-107	2488	0.011900	0.000460	0.281308	0.000048	-51.8	3.3	2.0	2674	-0.99
DF07-06-110	2465	0.012010	0.000460	0.281387	0.000048	-49.0	5.6	2.0	2568	-0.99
DF07-06-111	3405	0.013760	0.000520	0.280632	0.000048	-75.7	0.2	2.1	3580	-0.98
DF07-06-112	3401	0.016410	0.000610	0.280540	0.000052	-78.9	-3.4	2.2	3710	-0.98
DF07-06-114	2647	0.013590	0.000550	0.281274	0.000044	-53.0	5.6	1.9	2726	-0.98
DF07-06-115	2484	0.016730	0.000660	0.281382	0.000050	-49.2	5.5	2.1	2588	-0.98

表 2(续)

分析点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
DF07-06-117	2582	0.030410	0.001180	0.281086	0.000042	-59.6	-3.7	1.8	3027	-0.96
DF07-06-118	2637	0.012450	0.000590	0.281200	0.000110	-55.6	2.6	4.1	2828	-0.98
DF07-06-119	2477	0.006980	0.000310	0.281373	0.000058	-49.5	5.6	2.3	2576	-0.99
DF07-06-120	2480	0.010320	0.000390	0.281214	0.000046	-55.1	-0.1	2.0	2795	-0.99
DF07-06-121	2546	0.026100	0.001000	0.281438	0.000048	-47.2	8.3	2.0	2534	-0.97
DF07-06-122	2621	0.026800	0.001070	0.281328	0.000066	-51.1	6.0	2.6	2689	-0.97
DF07-06-124	2506	0.034290	0.001430	0.281441	0.000050	-47.1	6.8	2.1	2559	-0.96
DF07-06-125	2515	0.008690	0.000340	0.281251	0.000042	-53.8	2.1	1.8	2742	-0.99
DF07-06-126	2483	0.018350	0.000730	0.281310	0.000052	-51.7	2.8	2.1	2690	-0.98
DF07-06-127	2499	0.034070	0.001320	0.281300	0.000052	-52.1	1.8	2.1	2745	-0.96
DF07-06-130	2473	0.012960	0.000490	0.281395	0.000046	-48.7	6.0	2.0	2559	-0.99
DF07-06-132	2670	0.009290	0.000370	0.281280	0.000046	-52.8	6.6	2.0	2705	-0.99

4 讨论与结论

4.1 碎屑锆石的物质源区及特征

(i) 3.40 Ga的碎屑锆石. 有关华北克拉通的划分一直存在很大的争议, 目前存在几种不同的划分方案^[33~37]. 近年来, Zhao等人^[37]提出一种新的划分方案受到广泛关注. 其依据之一就是华北克拉通Nd同位素的差异性. Nd模式年龄分析表明, 东部克拉通Nd模式年龄有两个明显的峰值, 分别为 3.6~3.2 和 3.0~2.6 Ga, 而西部陆块和中部带的Nd模式年龄峰值分别为 3.2~2.4 和 2.8~2.4 Ga^[38]. 据此, 似乎华北克拉通>3.4 Ga的古老地壳物质仅在东部陆块发育^[31,39,40]. Wu等人^[41]根据对冀东铬云母石英岩的锆石U-Pb定年和Lu-Hf同位素研究, 推测华北克拉通最早期的地壳可能形成于 4.0 Ga年左右, 在华北地区找到更古老的地壳可能性很小.

由于锆石具有极强的稳定性使其Hf同位素组成较少受到后期地质事件的影响, 而极低的Lu含量可以获得形成时准确的Hf同位素组成. 因此锆石的 ε_{Hf} 值可以代表锆石形成时的Hf同位素组成. 碎屑锆石的Hf同位素组成代表沉积岩源区物质形成时Hf同位素的特征, 这使得锆石成为探讨地球早期地壳演化的重要工具^[1,2]. 此外, 由于地幔物质亏损Zr和Hf, 且为Si不饱和, 如果没有地壳物质的加入, 幔源岩浆一般难以结晶出锆石^[42]. 因此锆石出现一般伴随有地壳物质的加入, 因此锆石的Hf模式年龄 T_{DM} 代表了锆石寄主岩石源区从亏损地幔分离进入地壳的事件^[42,43].

样品测试点DF07-06-71 具有最高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 可达 3.8 ± 1.9 , Hf单阶段模式年龄为 3441 Ma, 与其形成年

龄一致, 与当时亏损地幔的Hf同位素值组成相似, 表明其物质源区来自于中太古代的亏损地幔. 样品测试点DF07-06-40 和DF07-06-112 分别具有较低的负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-4.6 ± 1.9 ; -3.4 ± 2.2), 且位于 3.8 Ga地壳平均演化线上, 说明其母岩浆很可能是古老地壳物质的衍生物. 其余的碎屑锆石(DF07-06-39, DF07-06-13, DF07-06-111, DF07-06-96)具有与球粒陨石类似的Hf同位素组成, 其Hf单阶段模式年龄为 3.6 Ga, 推测这些锆石的母岩浆可能是古太古代壳幔物质共同作用的产物. 我们注意到嵩山石英岩中碎屑锆石的Hf同位素与冀东和鞍山地区古老岩石中的锆石具有较强的相似性(图 5). 但是, 鉴于华北克拉通南缘^[32,44], 华南地区^[3,45~47]、北秦岭构造带及其邻区均发现存在 3.6 Ga, 甚至更为古老的地壳物质线索^[48], 暂时很难推测嵩山石英岩中发现的 3.42 Ga碎屑锆石的物质来源. 但或许可以说明, 华北克拉通甚至更大的区域、可能曾经广泛发育过大于 3.42 Ga的地质体.

(ii) 2.75~2.80 Ga的碎屑锆石. 由嵩山石英岩锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄频率分布图(图 4)可以看出, 2.75~2.80 Ga的碎屑锆石所占份额较小, 这与华北克拉通所出露岩石的U-Pb年龄统计结果一致^[49,50]. 2.75~2.80 Ga地质体在华北克拉通出现虽然相对比较有限, 但在诸如阜平, 五台^[51,52], 鲁西^[53], 河南鲁山^[54~56]等地区广泛发育, 主要为TTG质片麻岩, 基性火山岩以及少量表壳岩石^[34,57], 因此 2.75~2.80 Ga也是华北克拉通重要的生长时期^[32,38,56]. 样品中点DF07-06-80 和DF07-06-95 具有正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 最高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值可达 6.1 ± 1.6 , 接近当时亏损地幔的Hf同位素组成, 其Hf单阶段模式年龄为 2.83 Ga, 与形成年龄相近, 表明来自从亏损地幔分异出来而未经演化的物质.

(iii) ~2.50 Ga的碎屑锆石. 2.50 Ga的年龄约占所测数据的85%左右, 这与整个华北克拉通的年龄数据统计结果一致^[34,38,49,50,58]. ~2.50 Ga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^[32,34,37,57]. 因此可以认为, ~2.50 Ga是华北克拉通重要的陆壳增生及克拉通化时期, 或许也是对更为古老的地质体的一期强烈的破坏和再循环事件, 而且2.50 Ga不仅是华北克拉通, 也是全球克拉通的一期重大地质事件^[57].

锆石的Hf同位素资料显示(图5), 嵩山石英岩中~2.50 Ga的碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 表现出随时间变化的特征, 其斜率与锆石的演化线一致, 表明这些锆石在后期地质历史中基本保持封闭. ~2.50 Ga锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 大都为正值, 最高可达 8.3 ± 2.0 , 类似于当时亏损地幔Hf同位素组成, 且其Hf单阶段模式年龄变化范围为2.52~2.93 Ga(图5), 与对应的碎屑锆石形成年龄相近, 说明这些锆石的母岩大约是由2.52~2.93 Ga的亏损地幔分异而成, 对应于新生地壳生长时间. 另外, 样品中有少量碎屑锆石(如分析点DF-06-18, DF-06-51, DF-06-104)具有较大的负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 变化范

围为-7.8~-0.01, 对应的Hf单阶段模式年龄明显大于锆石的结晶年龄, 表明它们形成于古老的陆壳物质部分熔融, 源区物质具有相对较长(>0.4 Ga)的地壳滞留时间. 上述结果说明华北克拉通~2.50 Ga的岩浆事件以新太古代新生地壳再造为主, 伴有少量古老地壳物质的再造.

4.2 嵩山群的形成年龄及其意义

关于嵩山石英岩的沉积时代, 张伯声^[11]根据构造对比认为嵩山群与五台群可以对比. 赵宗溥^[59]根据岩性与构造关系分析, 认为嵩山群可能与溱沱群相当. 本次研究中获得在2.34~3.40 Ga之间有地质意义的碎屑锆石年龄数据共计99个. 最年轻的锆石(DF07-06-41) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 (2337 ± 23) Ma. 该数据具有较好的谐和性, 高的U(112 $\mu\text{g/g}$), Th(57 $\mu\text{g/g}$)含量及相对较高的Th/U(0.51)比值, 因此 (2337 ± 23) Ma可以作为嵩山群的最大沉积年龄(古元古代早期), 这与万渝生等的研究结果基本一致(未发表资料). 该锆石具有较低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-1.2 ± 1.3) , 对应的Hf模式年龄(2720 Ma)明显大于锆石的结晶年龄(2337 Ma), 表明它们形成于新生地壳的部分熔融, 源区物质具有相对较长的地壳滞留时间(~0.4 Ga).

致谢 衷心地感谢郑永飞、万渝生教授及评审专家的宝贵意见和建议. 感谢高山、陈道公、吴元保和郑建平教授在写作过程中给予的帮助. 样品分析过程中得到西北大学大陆动力学国家重点实验室弓虎军、戴梦宁、宗春蕾和郭波的大力帮助, 在此深表谢意.

参考文献

- Andersen T. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chem Geo*, 2005, 216: 249—270 [\[DOI\]](#)
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 133—147 [\[DOI\]](#)
- 万渝生, 张巧大, 宋天锐. 北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄: 华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限制. *科学通报*, 2003, 48(18): 1970—1975
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, et al. Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the crustal evolution of North Korea. *Precambrian Res*, 2007, 157: 155—177
- Yang J H, Wu F Y, Sao J A, et al. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 241: 336—352 [\[DOI\]](#)
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb and Hf isotope evidence for 3.8Ga Crustal remnant and episodic reworking of archaean crust in South China. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 252: 56—71 [\[DOI\]](#)
- Xia X P, Sun M, Zhao G C, et al. U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the Wulashan khondalites: Constraints on the evolution of Ordos Terrane, Western Block of the North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 241: 581—593 [\[DOI\]](#)
- 董春艳, 刘敦一, 李俊建, 等. 华北克拉通西部孔兹岩带形成时代新证据: 巴彦乌拉-贺兰山地区锆石 SHRIMP 定年和 Hf 同位素组成. *科学通报*, 2007, 52(16): 1913—1922

- 9 Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS. *Chem Geol*, 2008, 247: 100—117 [\[DOI\]](#)
- 10 Condie K C. *Archean Greenstone Belts*. Amsterdam: Elsevier, 1981
- 11 张伯声. 嵩阳运动和嵩山区的五台系. *地质论评*, 1951, 16(1): 79—81
- 12 孙勇, 魏晓立. 从嵩阳运动到登封绿岩带-嵩山前寒武纪地质研究简史. *西北大学学报*, 1986, 1(16): 99—106
- 13 马杏垣, 索书田, 游振东, 等. 嵩山构造变形重力构造、构造解析. 北京: 地质出版社, 1981
- 14 张国伟, 周鼎武, 郭安林. 嵩箕古构造分析. 北京: 冶金工业出版社, 1985
- 15 Ludwig K R. Isoplot 3.0-A geochronological toolkit for Micro-soft Excel. Berkeley Geochronology Center, Spec Pub, 2003, (4): 1—70
- 16 Wiedenbeck M, Alle P, Griffin W L, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geo-stand News*, 1995, 19: 1—23 [\[DOI\]](#)
- 17 Simon E J, Norman J P, William L G, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in-situ U-Pb zircon geochronology. *Chem Geol*, 2004, 211: 47—69 [\[DOI\]](#)
- 18 Bievre D P, Taylor P D. Table of the isotopic compositions of the elements. *Int J Mass Spectrom Ion Process*, 1993, 123(2): 149—166 [\[DOI\]](#)
- 19 Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, et al. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *J Anal At Spectrom*, 2002, 17: 1567—1574 [\[DOI\]](#)
- 20 Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chem Geol*, 2006, 234: 105—126 [\[DOI\]](#)
- 21 Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, et al. Trace element and isotopic composition of GJ red zircon standard by laser ablation. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70(Supp): A158, doi: 10.1016/j.gca.2006.06.1383 [\[DOI\]](#)
- 22 Scherer E, Muenker C, et al. Calibration of the lutetium-hafnium clock. Washington DC: American Association for the Advancement of Science, 2001, 293: 683—687
- 23 Blichert-Toft J, Albarede F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148: 243—258 [\[DOI\]](#)
- 24 Vervoort J D, Blichert-Toft J. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63: 533—556 [\[DOI\]](#)
- 25 Dodson M H, Compston W, Williams I S, et al. A search for ancient detrital zircons in Zimbabwean sediments. *Geol Soc Lond*, 1988, 145: 977—983 [\[DOI\]](#)
- 26 Vermeesch P. How many grains are needed for a provenance study? *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 224: 441—451 [\[DOI\]](#)
- 27 Andersen T. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chem Geol*, 2005, 216: 249—270 [\[DOI\]](#)
- 28 Blank L P, Kamo S L, Williams I S, et al. The application of SHEIMP to Phanerozoic geochronology: A critical appraisal of four zircon standards. *Chem Geol*, 2003, 200: 171—188 [\[DOI\]](#)
- 29 Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem Geol*, 2002, 192: 59—79 [\[DOI\]](#)
- 30 Zheng Y F, Gao T S, Wu Y B, et al. Fluid flow during exhumation of deeply subducted continental crust: Zircon U-Pb age and O-isotope studies of a quartz vein within ultrahigh-pressure eclogite. *J Metamor Geol*, 2007, 25: 267—283 [\[DOI\]](#)
- 31 Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 1992, 20: 339—342 [\[DOI\]](#)
- 32 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. 3.6 Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the NCC. *Geology*, 2004, 32: 229—232 [\[DOI\]](#)
- 33 Zhang F Q, Liu J Z, Ou Y. Tectonic framework of greenstones in the basement of the North China Craton. *Acta Geophys Sin*, 1998, 41: 99—107
- 34 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 1998. 1—104
- 35 Zhai M G, Bian A G, Zhao T P. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during late Palaeoproterozoic and Mesoproterozoic. *Sci China (Ser. D)*, 2000, 43(Supp): 219—232
- 36 Kusky T M, Li J H. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2003, 22: 383—397 [\[DOI\]](#)
- 37 Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the north China Craton: Key issues revisited. *Pre-cambrian Res*, 2005, 136: 177—202 [\[DOI\]](#)
- 38 Wu F Y, Zhao G C, Simon A. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *Asian Earth Sci*, 2005, 24: 523—545 [\[DOI\]](#)

- 39 Song B, Nutman A P, Liu D Y, et al. 3800~2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Res*, 1996, 78: 79—94[DOI]
- 40 Wan Y S, Liu D Y, Song B, et al. Geochemical and Nd isotopic compositions of 3.8 Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks from the Anshan area and their geological significance. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24(5): 563—575[DOI]
- 41 吴福元, 杨进辉, 柳小明, 等. 冀东 3.8 Ga 锆石 Hf 同位素特征与华北克拉通早期地壳时代. *科学通报*, 2005, 50(18): 1996—2003
- 42 Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in Dabie orogen. *Chem Geol*, 2006, 231: 135—158[DOI]
- 43 陈道公, 倪涛, 谢烈文. 大别地体超高压变质岩石锆石 Lu-Hf 同位素研究. *岩石学报*, 2007, 23(2): 331—342
- 44 高林志, 赵汀, 万渝生, 等. 河南焦作云台山早前寒武纪变质基底锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. *地质通报*, 2005, 24(12): 1089—1093
- 45 郑永飞, 张少兵. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化. *科学通报*, 2007, 52(1): 1—10
- 46 Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze craton of China. *Precambrian Res*, 2006, 146: 16—34 [DOI]
- 47 Liu X M, Gao S, Ling W L, et al. Identification of 3.5Ga detrital zircons from Yangtze craton in south China and the implication for Archean crust evolution. *Prog Nat Sci*, 2006, 16: 663—666[DOI]
- 48 Wang H L, Chen L, Sun Y, et al. ~ 4.1 Ga xenocrystal zircon from Ordovician volcanic rocks in western part of North Qinling Orogenic Belt. *Chin Sci Bull*, 2007, 52(21): 3002—3010
- 49 李江海, 牛向龙, 程素华, 等. 大陆克拉通早期构造演化历史探讨: 以华北为例. *地球科学*, 2006, 31(3): 286—293
- 50 彭澎, 翟明国. 华北陆块前寒武纪两次重大地质事件的特征和性质. *地球科学进展*, 2002, 17(6): 818—825
- 51 Guan H, Sun M, Wilde S A, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: Implications for formation and assembly of the North China Craton. *Precambrian Res*, 2002, 113: 1—18[DOI]
- 52 Kröner A, Wilde S A, Li J H, et al. Age and evolution of alate Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan / Hengshan / Fuping terrain of northern China. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 577—595[DOI]
- 53 Jahn B M, Zhou X H, Li J L. Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan: Isotopic and geochemical constraints. *Tectonophysics*, 1990, 183: 145—160[DOI]
- 54 Kröner A, Compston W, Zhang G W, et al. Age and tectonic setting of late Archaean greenstone-gneisses terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating. *Geology*, 1988, 16: 211—215[DOI]
- 55 Sun Y, Yu Z P, Kröner A. Geochemistry and single zircon geochronology of Archaean TTG gneisses in the Taihua high-grade terrain, Lushan area, central China. *J South Asian Earth Sci*, 1994, 10(3-4): 227—233[DOI]
- 56 Diwu C R, Sun Y, Lin C L, et al. Formation history of Archaean TTG gneisses in the Taihua complex, Lushan area, central China: In situ U-Pb age and Hf-isotope analysis of zircons. *Geochim Cosmochim Acta*, Goldschmidt Conference Abstracts, 2007, 71(15)
- 57 Zhai M G, Guo J H, Liu W J. Neoarchaean continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. *Asian Earth Sci*, 2005, 24: 547—561[DOI]
- 58 耿元生, 万渝生, 沈其韩. 华北克拉通早前寒武纪基性火山作用与地壳增生. *地质学报*, 2002. 199—208
- 59 赵宗溥. 关于中国蓟沱系与震旦系问题. *地质学报*, 1956, 36(1): 81—93