

# 胶北 ~ 2.5Ga 岩浆热事件的锆石 Hf 同位素特征及其对地壳演化的指示意义\*

刘建辉<sup>1</sup> 刘福来<sup>1</sup> 丁正江<sup>2,3</sup> 刘平华<sup>1</sup> 王舫<sup>1</sup> 游君君<sup>4</sup>

LIU JianHui<sup>1</sup>, LIU FuLai<sup>1</sup>, DING ZhengJiang<sup>2,3</sup>, LIU PingHua<sup>1</sup>, WANG Fang<sup>1</sup> and YOU JunJun<sup>4</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

3. 山东省第三地质矿产勘查院, 烟台 264000

4. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司研究院, 湛江 524057

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

3. Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai 264000, China

4. Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation, Zhanjiang 524057, China

2011-12-02 收稿, 2012-02-01 改回.

**Liu JH, Liu FL, Ding ZJ, Liu PH and Wang F. 2012. The zircon Hf isotope characteristics of ~2.5Ga magmatic event, and implication for the crustal evolution in the Jiaobei terrane, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9):2697–2704**

**Abstract** The Jiaobei terrane located in the eastern margin of the North China Craton (NCC), is commonly regarded as the southwestern segment of the Jiao-Liao-Jiao belt, and underwent polyphase magmatic and metamorphic events during Early Precambrian. In order to confirm the nature of the ~2.5Ga magmatic event which is the most significant magmatic event in the Jiaobei terrane, as well as in the NCC, in this study, two representative tonalitic and granitic gneiss samples with zircon U-Pb ages of ~2.5Ga are performed in zircon Hf isotopic analysis. The results of total 69 zircon Hf isotopic analyses show that they have positive  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values ranging from 10.71 to 3.0 with an average of 6.02; Their two-stage Hf model ages ( $t_{\text{DM2}}$ ) mainly range from 2.6Ga to 2.9Ga (an average of 2747Ma), and older than their zircon  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ages of ~2.5Ga, suggest that the ~2.5Ga TTG and granitic rocks were mainly derived from remelting or reworking of juvenile crusts forming during 2.6~2.9Ga. In addition, a few zircons from the gneisses have strongly positive  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of 7.03 to 10.71, and their zircon Hf model ages are close to zircon U-Pb ages representing the timing of zircon growth, indicative of new addition of coeval depleted mantle material to crust. Based on the results of zircon Hf isotopic analyses presented in this study and available Nd isotopic data published in previous studies, we suggest that the ~2.5Ga magmatic event in the Jiaobei terrane represents the remelting or reworking of juvenile crust, which is linked to the underplating of large amounts of mantle-derived magmas, and ~2.9Ga and 2.7~2.8Ga are two periods of crustal growth, especially, 2.7~2.8Ga is the most significant period of crustal growth in the Jiaobei terrane, as well as other areas in the NCC.

**Key words** Zircon Hf isotope; ~2.5Ga magmatic event; Crustal evolution; The Jiaobei terrane; The North China Craton

**摘要** 位于华北克拉通东缘的胶北地体, 被普遍认为是胶-辽-吉带的西南组成部分, 经历了多期岩浆-变质热事件, 而晚太古宙末期约 2.5Ga 的岩浆事件是该区最强的岩浆事件; 为了确定该期岩浆热事件的性质, 本文选取 2 件形成于约 2.5Ga 的英云闪长质片麻岩及花岗质片麻岩开展锆石 Hf 同位素测试分析; 总计 69 个锆石 Hf 同位素分析点的结果显示, 它们均具有正的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 在 10.71 到 3.0 之间, 平均为 6.02, 两阶段锆石 Hf 模式年龄主要分布于 2.6~2.9Ga 之间, 平均为 2747Ma, 明显大于锆石的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄, 表明约 2.5Ga 的 TTG 及花岗质片麻岩主要源于 2.6~2.9Ga 新生地壳的重熔或再造; 另外, 一些

\* 本文受国家杰出青年科学基金(40725007)、中国地质科学院地质研究所基本科研业务经费(J1005)和中国地质调查局地质大调查项目(1212010811065)联合资助。

第一作者简介: 刘建辉, 男, 1978 年生, 助理研究员, 主要从事构造地质学 and 同位素年代学研究, E-mail: liujianhui1999@163.com

石具有极正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,它们的锆石 Hf 模式年龄与 U-Pb 年龄相近,这暗示在约 2.5Ga 有亏损地幔物质加入地壳,并发生了即时重熔;根据本次研究获得的锆石 Hf 同位素数据,结合前人的 Nd 同位素结果,我们认为胶北地体内约 2.5Ga 的岩浆活动可能主要表现为与地幔岩浆低侵作用有关的新生地壳的重熔或再造,约 2.9Ga 和 2.7~2.8Ga 是胶北地体地壳生长的两个时期,并且与华北克拉通大部分地区一样,2.7~2.8Ga 是胶北地体新生地壳形成最重要的时期。

**关键词** 锆石 Hf 同位素;~2.5Ga 岩浆热事件;地壳演化;胶北地体;华北克拉通

**中图法分类号** P597.3

## 1 引言

华北克拉通早前寒武主要岩浆事件的性质是理解其早期地壳形成与演化的关键科学问题之一。锆石 U-Pb 年龄数据显示,约 2.5Ga 是华北克拉通最主要的峰期年龄,被认为是华北克拉通最强岩浆事件发生的时间(沈其韩和钱祥麟,1995;Zhao *et al.*, 2001; 沈其韩等,2005;Zhai *et al.*, 2005; Jahn *et al.*, 2008; 耿元生等,2010),然而,Nd 同位素及 Hf 同位素研究表明,2.7~2.8Ga 是华北克拉通地壳生长的主要阶段(Wu *et al.*, 2005;Yang *et al.*, 2009; Wan *et al.*, 2011a; Geng *et al.*, 2012),而约 2.5Ga 的岩浆活动主要表现为地壳的重熔或再造(耿元生等,2010)。值得注意的是,最近的一些研究揭示了华北克拉通约 2.5Ga 的地壳生长(Liu F *et al.*, 2009; Diwu *et al.*, 2011),进一步丰富了对华北克拉通地壳形成与演化的理解与认识,同时也说明针对典型地区有必要开展相关具体研究。位于华北克拉通东缘的胶北地体,在早前寒武期间经历了多期岩浆-变质热事件(Tang *et al.*, 2007; Jahn *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2008; 刘建辉等,2011),其内部的 TTG 片麻岩、花岗质片麻岩及变质表壳岩的锆石 U-Pb 年龄研究结果显示,与华北克拉通相似,该区最强的岩浆事件可能也发生于约 2.5Ga。但需要指出的是,岩浆锆石的年龄只能代表岩石形成的时间,而非地壳生长的时间;已有的研究资料显示,对于胶北地体内约 2.5Ga 的岩浆活动是一次地壳生长事件,还是代表该区地壳的重熔或再造并没有得到很好地确定,仍需进一步深入研究。

锆石 Lu-Hf 同位素体系是近年来应用越来越广的一种同位素体系,由于锆石具有极度抗风化、高的 Hf 含量及 Hf 同位素体系封闭温度、低的 Lu 含量和 Lu/Hf 比值,锆石形成后没有明显的放射成因 Hf 的积累,所测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本代表了其形成时体系的 Hf 同位素组成等一系列优势(Kinny and Maas, 2003; 吴福元等,2007),使其在示踪岩浆成因、演化、岩浆源区以及早期地壳演化等方面得到广泛的应用(Wu *et al.*, 2007, 2008; Amelin *et al.*, 1999, 2000; Bizzarro *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2007; Liu FL *et al.*, 2009; Zheng *et al.*, 2006; Diwu *et al.*, 2011)。本文首次在胶北地体应用锆石原位 Hf 同位素分析技术对约 2.5Ga 岩浆热事件的锆石 U-Pb 定年原位开展 Hf 同位素研究,试图为约 2.5Ga 岩浆热事件的性质提供约束。研究结果不仅有助于正确理解胶北地体早期地壳的形成与演化,而且将为华北克拉通的

形成、演化及构造单元的划分提供重要的资料。

## 2 地质背景

胶北地体是指位于郯庐断裂以东,五莲-烟台断裂以北的地区,在大地构造上位于华北克拉通的东缘,胶-辽-吉构造带的西南端,紧邻苏鲁超高压带(图 1)。太古宙 TTG 片麻岩及花岗质片麻岩主要在栖霞附近呈穹窿状大面积出露,主要包括~2.9Ga, ~2.7Ga 及~2.5Ga 三期岩浆事件,并经历了~1.86Ga 和~2.5Ga 两期变质热事件(唐俊等,2004; Zhou *et al.*, 2008; Jahn *et al.*, 2008; 刘建辉等,2011); 这些片麻岩普遍遭受强烈剪切变形作用,定向构造发育,常形成条纹和条带状构造,内部流柔褶皱发育(刘建辉等,2011)。在 TTG 片麻岩内部,斜长角闪片麻岩、黑云母变粒岩、黑云斜长片麻岩及基性高压麻粒岩呈大小不等的透镜体或不规则脉状体产出,同样显示遭受强烈剪切变形,其长轴方位与 TTG 片麻岩的剪切方位一致,深熔混合岩化作用显著(刘建辉等,2011; 刘平华等,2011a, b)。古元古宙花岗片麻岩出露面积较小,呈零星分布,其侵位的具体时间及期次仍没有得到精确的测定。古元古宙孔兹岩系(包括粉子山群、荆山群)不整合于 TTG 片麻岩之上,围绕 TTG 片麻岩分布(图 1),其具有 2.9~2.2Ga 的碎屑锆石 U-Pb SHRIMP 年龄分布(Wan *et al.*, 2006)。这些组成胶北地体早前寒武变质结晶基底的岩石组合,经历了顺时针变质演化  $P$ - $T$  轨迹的高角闪岩相-麻粒岩相变质作用(刘文军等,1998; 周喜文等,2004; 刘平华等,2010; 王舫等,2010),并伴随普遍的深熔作用。变质锆石年代学研究表明,它们发生变质作用的时间约为 1.85~1.95Ga (Zhou *et al.*, 2008; Tam *et al.*, 2011),其中高压麻粒岩相峰期变质时间约在 1.85~1.9Ga 之间(刘平华等,2011a, b)。新元古宙蓬莱群是一套绿片岩相-低角闪岩相的浅变质岩系(山东地质矿产局,1991; Zhou *et al.*, 2008),目前,对于其形成的构造背景、沉积时间及属性仍有争议(Zhai, 2002; Li *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2008; 初航等,2011)。

## 3 样品选择及锆石 Hf 同位素测试

根据刘建辉等(2011)对胶北地体代表性 TTG 片麻岩及花岗质片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果及其测定的多期岩浆-变质热事件,本次研究我们选取 2 件形成于约 2.5Ga

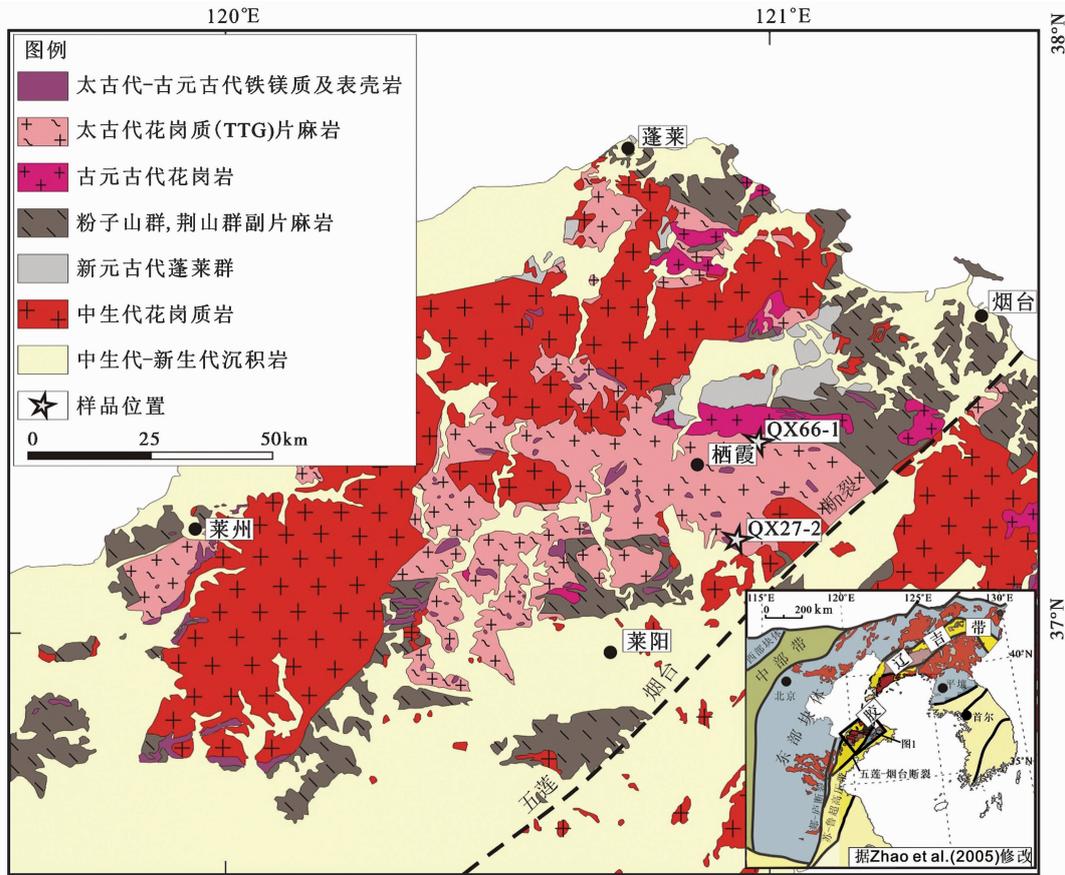


图1 胶北地区地质简图及采样位置

Fig. 1 Simplified geological map of Jiaobei area and sampling locations

的英云闪长质片麻岩和花岗质片麻岩开展锆石 Hf 同位素测试分析,样品编号及分布位置如图 1 所示。

锆石 Hf 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统 (LA-MC-ICP-MS) 上进行,锆石 Hf 同位素分析在 U-Pb 年龄分析原位进行,实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,激光剥蚀束直径采用 55 $\mu\text{m}$ ,激光剥蚀时间约为 27s。测定时选用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质。相关仪器运行条件及详细分析流程与侯可军等(2007)同。分析过程中锆石标准 GJ1 的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  测试加权平均值为  $0.282012 \pm 17$  (2SD,  $n = 24$ ),与文献报道值 (Elhoul *et al.*, 2006; 侯可军等,2007) 在误差范围内完全一致。在  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  计算时,球粒陨石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282772,  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.0332 (Blichert-Toft and Albarede, 1997)。在单阶段 Hf 模式年龄 ( $t_{\text{DM1}}$ ) 计算时,亏损地幔的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值和  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值分别为 0.28325 和 0.0384 (Griffin *et al.*, 2000); 在两阶段 Hf 模式年龄 ( $t_{\text{DM2}}$ ) 计算时,下地壳与亏损地幔的  $f_{\text{Lu/Hf}}$  比值分别为 -0.34 和 0.1566 (Amelin *et al.*, 1999; Griffin *et al.*, 2000)。  $^{176}\text{Lu}$  的衰变常量选用  $1.867 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$  (Soderlund *et al.*, 2004;

Amelin, 2005); 相关计算中锆石的 U-Pb 年龄选择单点  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄,相关计算公式请见吴福元等(2007)。

## 4 锆石的 Hf 同位素特征

### 4.1 英云闪长质片麻岩 (QX66-1)

样品 QX66-1 为条带状英云闪长质片麻岩,采自栖霞东亭口镇南圈里村河边,其岩浆锆石的加权平均年龄为  $2564 \pm 12\text{Ma}$ ,代表该类岩石形成的岩浆事件时间 (刘建辉等, 2011)。本次测试对该样品的 40 粒锆石进行了 Hf 同位素分析,锆石的 Hf 同位素分析结果如表 1 和图 2 所示。所有锆石分析点的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值小 (绝大部分小于 0.002),表明锆石在形成以后具有较低的放射性成因 Hf 的积累;锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值分布于 0.281538 ~ 0.281288 之间,与  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值具正相关性 (图 2a)。以锆石单点  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄计算的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值在 10.71 ~ 3 之间,平均值为 6.02 (表 1 及图 2b)。由于锆石的 Lu/Hf 比值显著小于大陆地壳,因此,二阶段 Hf 模式年龄能更真实地反映其源区物质从亏损地幔抽取的时间,该样品的二阶段 Hf 模式年龄 ( $t_{\text{DM2}}$ ) 分布于 3004 ~ 2330Ma 之间 (图 2c),平均值为 2727Ma,除了 4 个点

表1 胶北~2.5Ga 英云闪长质片麻岩及花岗质片麻岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石原位 Lu-Hf 同位素数据

Table 1 The LA-MC-ICP-MS zircon in-situ Lu-Hf isotopic data of ~2.5Ga tonalitic and granitic gneisses from the Jiaobei area

测点号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
样品 QX66-1 英云闪长质片麻岩											
1	2549	0.077139	0.001320	0.281425	0.000025	-47.65	7.34	0.90	2574	2605	-0.96
2	2552	0.134683	0.002258	0.281461	0.000025	-46.36	7.08	0.89	2588	2630	-0.93
3	2548	0.101516	0.001753	0.281446	0.000019	-46.90	7.33	0.69	2574	2606	-0.95
4	2565	0.069467	0.001278	0.281405	0.000024	-48.35	7.07	0.84	2598	2640	-0.96
5	2551	0.074818	0.001515	0.281332	0.000019	-50.94	3.74	0.69	2716	2919	-0.95
6	2562	0.102466	0.001804	0.281436	0.000024	-47.24	7.20	0.84	2591	2626	-0.95
7	2563	0.048100	0.000996	0.281324	0.000018	-51.21	4.64	0.65	2690	2850	-0.97
8	2513	0.064221	0.001170	0.281339	0.000023	-50.69	3.74	0.83	2682	2894	-0.96
9	2525	0.030080	0.000605	0.281296	0.000015	-52.19	3.47	0.54	2700	2925	-0.98
10	2560	0.088985	0.001514	0.281403	0.000023	-48.41	6.48	0.83	2617	2688	-0.95
11	2563	0.122596	0.002030	0.281444	0.000027	-46.98	7.09	0.95	2596	2636	-0.94
12	2509	0.022830	0.000423	0.281309	0.000020	-51.74	3.88	0.70	2670	2879	-0.99
13	2566	0.073943	0.001329	0.281349	0.000023	-50.32	5.02	0.81	2679	2819	-0.96
14	2445	0.050110	0.001003	0.281374	0.000019	-49.43	3.77	0.66	2621	2845	-0.97
15	2561	0.070023	0.001334	0.281339	0.000022	-50.69	4.53	0.79	2693	2858	-0.96
16	2585	0.092493	0.001630	0.281361	0.000022	-49.90	5.33	0.78	2683	2804	-0.95
17	2557	0.069733	0.001261	0.281372	0.000022	-49.52	5.74	0.77	2642	2750	-0.96
18	2572	0.103615	0.001754	0.281430	0.000021	-47.45	7.29	0.75	2596	2625	-0.95
19	2575	0.120150	0.002030	0.281538	0.000025	-43.64	10.71	0.91	2464	2330	-0.94
20	2567	0.104736	0.001833	0.281423	0.000024	-47.69	6.80	0.87	2611	2664	-0.94
21	2558	0.070509	0.001206	0.281369	0.000023	-49.60	5.78	0.82	2642	2747	-0.96
22	2587	0.081076	0.001488	0.281379	0.000024	-49.25	6.28	0.85	2648	2723	-0.96
23	2576	0.077104	0.001295	0.281365	0.000026	-49.76	5.87	0.91	2654	2752	-0.96
24	2541	0.125033	0.002145	0.281432	0.000023	-47.40	5.99	0.82	2621	2717	-0.94
25	2558	0.032059	0.000646	0.281304	0.000017	-51.91	4.43	0.62	2692	2864	-0.98
26	2529	0.068752	0.001349	0.281357	0.000024	-50.04	4.45	0.84	2669	2843	-0.96
27	2597	0.108582	0.002035	0.281312	0.000023	-51.64	3.13	0.82	2781	3004	-0.94
28	2581	0.073835	0.001310	0.281398	0.000026	-48.58	7.14	0.92	2609	2645	-0.96
30	2587	0.086902	0.001568	0.281364	0.000031	-49.78	5.61	1.10	2674	2782	-0.95
31	2571	0.068307	0.001168	0.281434	0.000022	-47.32	8.43	0.80	2551	2525	-0.96
32	2537	0.048230	0.000863	0.281288	0.000019	-52.48	3.00	0.69	2729	2974	-0.97
33	2601	0.085178	0.001470	0.281432	0.000022	-47.39	8.50	0.78	2574	2540	-0.96
34	2609	0.077836	0.001368	0.281381	0.000022	-49.20	7.03	0.80	2638	2673	-0.96
35	2582	0.052562	0.001003	0.281353	0.000020	-50.19	6.08	0.72	2651	2738	-0.97
36	2559	0.126291	0.002214	0.281493	0.000027	-45.23	8.44	0.96	2539	2516	-0.93
37	2530	0.048318	0.000985	0.281349	0.000018	-50.33	4.80	0.65	2655	2813	-0.97
38	2588	0.074894	0.001302	0.281401	0.000023	-48.47	7.42	0.81	2605	2625	-0.96
39	2546	0.084516	0.001482	0.281442	0.000022	-47.05	7.60	0.78	2562	2581	-0.96
40	2589	0.079230	0.001469	0.281385	0.000024	-49.05	6.56	0.85	2639	2701	-0.96
样品 QX27-2 黑云角闪花岗质片麻岩											
1	2550	0.035068	0.000623	0.281356	0.000018	-50.07	6.13	0.65	2620	2711	-0.98
2	2571	0.034943	0.000661	0.281387	0.000018	-48.98	7.65	0.66	2581	2594	-0.98
3	2578	0.039018	0.000752	0.281326	0.000026	-51.15	5.46	0.92	2670	2789	-0.98
4	2554	0.021602	0.000468	0.281315	0.000021	-51.53	5.03	0.76	2665	2810	-0.99
5	2561	0.037516	0.000735	0.281334	0.000024	-50.87	5.39	0.86	2658	2783	-0.98
6	2546	0.034997	0.000648	0.281324	0.000020	-51.21	4.86	0.71	2665	2819	-0.98
7	2547	0.046296	0.000841	0.281349	0.000020	-50.32	5.45	0.70	2644	2769	-0.97
8	2532	0.047206	0.000867	0.281353	0.000021	-50.18	5.20	0.75	2641	2780	-0.97
9	2550	0.036908	0.000728	0.281338	0.000023	-50.73	5.29	0.82	2652	2784	-0.98
10	2554	0.028293	0.000529	0.281344	0.000019	-50.51	5.95	0.68	2630	2729	-0.98
11	2534	0.042548	0.000819	0.281316	0.000025	-51.49	4.01	0.88	2688	2884	-0.98
12	2557	0.045296	0.000792	0.281386	0.000022	-49.03	7.05	0.77	2592	2636	-0.98
13	2559	0.041617	0.000760	0.281356	0.000020	-50.06	6.12	0.71	2629	2719	-0.98
14	2522	0.029715	0.000559	0.281334	0.000021	-50.85	4.83	0.73	2645	2805	-0.98
15	2531	0.037521	0.000767	0.281332	0.000019	-50.94	4.59	0.67	2663	2833	-0.98

续表 1

Continued Table 1

测点号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM1}}$ (Ma)	$t_{\text{DM2}}$ (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
16	2522	0.052725	0.000948	0.281388	0.000019	-48.93	6.10	0.67	2598	2695	-0.97
17	2528	0.047623	0.000862	0.281352	0.000021	-50.23	5.07	0.75	2643	2789	-0.97
18	2524	0.019395	0.000335	0.281298	0.000019	-52.13	3.98	0.66	2679	2881	-0.99
19	2556	0.037332	0.000683	0.281306	0.000023	-51.84	4.40	0.80	2692	2866	-0.98
20	2518	0.048568	0.000861	0.281411	0.000023	-48.13	6.96	0.82	2562	2617	-0.97
21	2557	0.046416	0.000842	0.281322	0.000022	-51.27	4.71	0.80	2681	2840	-0.97
22	2550	0.041000	0.000747	0.281373	0.000021	-49.47	6.53	0.76	2605	2677	-0.98
23	2493	0.043634	0.000796	0.281386	0.000025	-49.00	5.63	0.88	2591	2716	-0.98
24	2500	0.050927	0.000934	0.281392	0.000023	-48.81	5.74	0.82	2593	2711	-0.97
25	2481	0.033872	0.000594	0.281390	0.000026	-48.88	5.82	0.94	2573	2691	-0.98
26	2503	0.034121	0.000633	0.281318	0.000020	-51.41	3.71	0.71	2672	2890	-0.98
27	2500	0.041298	0.000750	0.281416	0.000021	-47.95	6.92	0.76	2547	2608	-0.98
28	2493	0.005019	0.000108	0.281325	0.000021	-51.19	4.59	0.73	2628	2806	-1.00
29	2496	0.033196	0.000623	0.281339	0.000018	-50.68	4.30	0.63	2643	2834	-0.98
30	2503	0.044357	0.000786	0.281384	0.000019	-49.09	5.78	0.68	2594	2710	-0.98

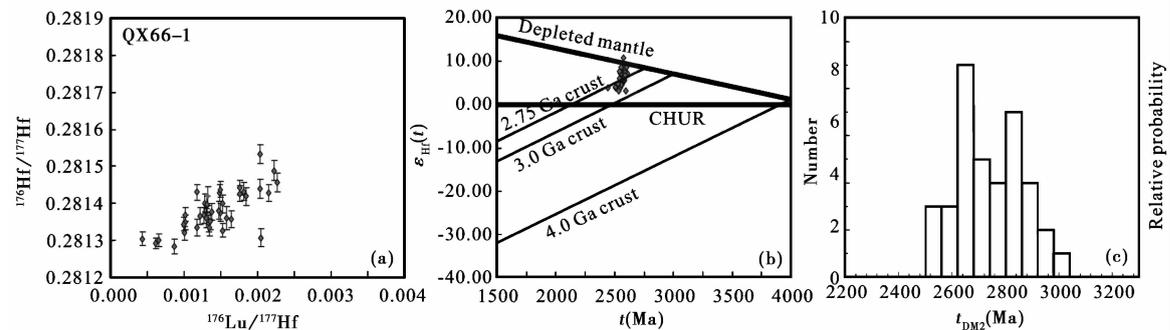


图 2 胶北 ~2.5Ga 英云闪长质片麻岩 (QX66-1) 锆石 Lu-Hf 同位素成分

(a)  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值对  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值及变化; (b) 锆石  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄对  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值及变化; (c) 两阶段 Hf 模式年龄直方柱状图

Fig. 2 Zircon Lu-Hf isotopic composition of ~2.5Ga tonalitic gneiss (QX66-1) from the Jiaobei area

(a)  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ - $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  variations; (b) zircon  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  variations; (c) histograms of the two-stage Hf model ages

(点 39, 36, 33 及点 31) 的二阶段 Hf 模式年龄与锆石单点  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄相近外, 其它点的二阶段 Hf 模式年龄均大于锆石单点  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄 (表 1); 在  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$  图解上所有点均位于球粒陨石演化线之上, 大部分点位于亏损地幔演化线之下的 2.75Ga 地壳演化线或附近, 少数几个分布在亏损地幔演化线之上 (图 2b)。

#### 4.2 花岗质片麻岩 (QX27-2)

样品 QX27-2 为黑云角闪花岗质片麻岩, 采自栖霞南面蛇窝泊镇以东的孙家咽喉公路旁, 具有加权平均为  $2544 \pm 15\text{Ma}$  的岩浆锆石年龄, 代表该类岩石形成的岩浆事件时间 (刘建辉等, 2011)。本次测试对该样品的 30 粒锆石进行了 Hf 同位素分析, 锆石的 Hf 同位素分析结果如表 1 和图 3 所示。所有锆石分析点的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值均小于 0.002, 且分布集中 (表 1 及图 3a), 表明根样品 QX66-1 一样, 锆石在形成以后具有较低的放射性成因 Hf 的积累。锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值分布于 0.281416 ~ 0.281298 之间, 比较均一 (表 1 及图 3

a)。以锆石单点  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄计算的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值在 7.65 ~ 3.71 之间, 平均值为 5.44 (表 1)。该样品的二阶段 Hf 模式年龄 ( $t_{\text{DM2}}$ ) 分布于 2890 ~ 2594Ma 之间, 平均值为 2758, 大部分大于 2700Ma (图 3c); 除了少数几个分析点的二阶段 Hf 模式年龄与该点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄相近外, 其它锆石分析点的二阶段 Hf 模式年龄均大于锆石单点  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄 (表 1); 在  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$  图解上所有点均位于球粒陨石演化线之上, 集中分布于亏损地幔演化线之下的 2.75Ga 地壳演化线或附近 (图 3b)。

## 5 讨论与结论

### 5.1 胶北约 2.5Ga 岩浆事件的岩浆源区及成因

锆石 Hf 同位素被证明是一种示踪岩浆源区, 岩石成因及约束地壳演化极佳的方法 (Kinny and Maas, 2003; 吴福元等, 2007)。本次对胶北地体内形成于约 2.5Ga 的英云闪长质片麻岩及花岗质片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石原位 Hf 同位素

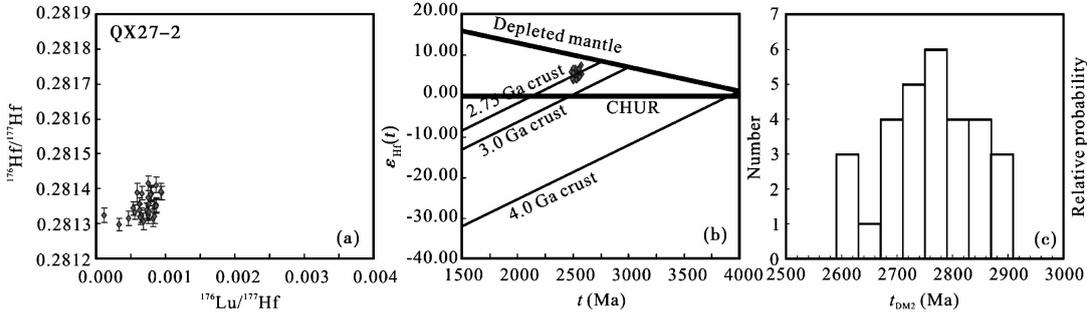


图3 胶北~2.5 Ga 花岗质片麻岩(QX27-2)锆石 Lu-Hf 同位素成分

(a)- $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值对  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值及变化; (b)-锆石  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄对  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值及变化; (c)-两阶段 Hf 模式年龄直方柱状图

Fig. 3 Zircon Lu-Hf isotopic composition of ~2.5 Ga granitic gneiss (QX27-2) from the Jiaobei area

(a)- $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ - $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  variations; (b)-zircon  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  variation; (c)-histograms of the two-stage Hf model ages

分析结果显示,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  的比值变化范围小(0.281493 ~ 0.281288), 表明所测样品锆石中的 Hf 同位素分布很均一, 指示单一岩浆源区; 所有分析点具有正的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(10.71 ~ 3.0) (图 2b 及 3b), 表明这些岩石可能主要来源于亏损地幔分异形成的新生地壳。两个样品的锆石加权平均  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄分别为  $2564 \pm 12\text{Ma}$  和  $2544 \pm 15\text{Ma}$  (刘建辉等, 2011), 代表锆石结晶或寄主岩石形成的时间; 而锆石 Hf 同位素模式年龄则代表原岩物质从亏损地幔抽取的时间 (Amelin *et al.*, 2000; Griffin *et al.*, 2000; 吴福元等, 2007), 本次测试的两个样品的锆石二阶段 Hf 同位素模式年龄绝大多数分布于约 2.6 ~ 2.9 Ga 之间 (图 2c 及 3c), 平均值为 2747 Ma, 明显大于锆石的结晶年龄 (2445 ~ 2609 Ma), 考虑到花岗质岩石主要源自地壳物质, TTG 岩石主要产生于含水变玄武质岩石的部分熔融 (Martin *et al.*, 2005; Condie, 2005), 正的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值表明来自新生地壳的部分熔融, 而负的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值则表明来自老地壳的部分熔融 (Kinny and Maas, 2003); 来自两个样品的锆石均具有正的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 表明这些岩石的原岩为从亏损地幔分异出来的新生地壳, 指示胶北 ~ 2.5 Ga TTG 及花岗质岩石主要源于 2.6 ~ 2.9 Ga 新生地壳的重熔或再造; 此外, 一些锆石具有极正的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 在 10.71 与 7.03 之间, 以及相近的 Hf 模式年龄与 U-Pb 年龄 (表 1), 这暗示在 ~ 2.5 Ga 有亏损地幔物质加入地壳, 并发生即时重熔。值得注意的是, 在胶北及华北克拉通其它地区该期岩浆事件伴随一期准同时的变质事件, 它们应是地幔柱导致的地幔岩浆底侵作用有关的同一构造热事件的产物 (赵国春, 2009)。因此, 根据本次研究获得的锆石 Hf 同位素分析结果及前人的 Nb 同位素数据 (Jahn *et al.*, 2008), 我们认为胶北 ~ 2.5 Ga 岩浆事件主要表现为与大量地幔岩浆底侵作用导致的新生地壳的重熔或再造, 显示出与华北克拉通大部分地区相似的特点 (耿元生等, 2010)。

## 5.2 胶北地体早期地壳的主要生长阶段

Nd 同位素及 Hf 同位素研究表明, 2.7 ~ 2.8 Ga 是华北克拉通地壳生长的主要阶段 (Jahn *et al.*, 1988; Wu *et al.*,

2005; Yang *et al.*, 2009; Jiang *et al.*, 2010; Wan *et al.*, 2011a, b; Geng *et al.*, 2012), 华北克拉通 2.7 ~ 2.8 Ga 岩石也被广泛报道 (Jahn *et al.*, 1988, 2008; Kroner *et al.*, 2005a, b; Diwu *et al.*, 2010; Liu F *et al.*, 2009; 刘建辉等, 2011; Jiang *et al.*, 2010; Wan *et al.*, 2011b), 表明 2.7 ~ 2.8 Ga 是华北克拉通与地壳生长有关的主要构造岩浆活动阶段; 最近的一些研究也揭示了华北克拉通约 2.5 Ga 的地壳生长作用 (Liu F *et al.*, 2009; Diwu *et al.*, 2011), 但约 2.5 Ga 岩浆事件可能主要表现为新生地壳的重熔或再造 (耿元生等, 2010; Geng *et al.*, 2012)。

已有的年代学结果显示, 胶北地体主要包括中太古代约 2.9 Ga, 新太古代约 2.7 Ga 和约 2.5 Ga 共 3 期构造岩浆活动 (Jahn *et al.*, 2008; 刘建辉等, 2011)。Nd 同位素研究表明, 约 2.9 Ga 及约 2.7 Ga 两期 TTG 片麻岩均具有正的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值, 且其 Nd 同位素模式年龄与锆石的 U-Pb 年龄相近, 表明约 2.9 Ga 及约 2.7 Ga 是胶北地壳生长的两个阶段 (Jahn *et al.*, 2008)。本次对两个约 2.5 Ga 形成的英云闪长岩及黑云角闪花岗质片麻岩的 Hf 同位素研究结果显示, 他们具有较正的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 大部分锆石的 Hf 模式年龄分布在 2.6 ~ 2.9 Ga 之间, 集中分布在 2.7 ~ 2.8 Ga 范围内, 大于锆石的结晶年龄 (表 1、图 2c 及图 3c); 在  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$  图解上, 大部分集中分布于亏损地幔演化线之下的 2.7 ~ 2.8 Ga 地壳演化线区域附近 (图 2b 及 3b), 这表明 2.7 ~ 2.8 Ga 可能是胶北地体最主要的地壳生长阶段, 显示出与华北克拉通及世界各主要早前寒武大陆地壳增生一样, 具有事件增生的特点 (Condie, 1998; Condie *et al.*, 2009)。另外, 两个样品的锆石 Hf 同位素模式年龄分布于 2516 ~ 3004 Ma 之间, 少数几个点的 Hf 同位素模式年龄与锆石的结晶年龄相近, 其  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值与同时期的亏损地幔值相近 (图 2b), 这表明尽管 2.5 ~ 2.6 Ga 不是地壳生长的主要阶段, 但可能指示了地壳生长的持续性。

致谢 感谢中国地质科学院矿产资源研究所侯可军博士、郭春丽博士及地质所刘建峰博士在锆石原位 Hf 同位素测试分析中提供的帮助; 感谢中国科学院地质与地球物理所纪伟

强博士在锆石 Hf 同位素数据分析、计算及解释过程中提供的帮助; 感谢杨红博士及孟恩博士在成文过程中提供的帮助。

## References

- Amelin Y, LEE DC, Halliday AN and Pidgeon RT. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 399: 252–255
- Amelin Y, LEE DC and Halliday AN. 2000. Early-Middle Archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (24): 4205–4225
- Amelin Y. 2005. Meteorite phosphates show constant  $^{176}\text{Lu}$  decay rate since 4557 million years ago. *Science*, 310: 839–841
- Bizzarro M, Baker JA, Haack H, Ulfbeck D and Rosing M. 2003. Early history of Earth's crust-mantle system inferred from hafnium isotopes in chondrites. *Nature*, 421: 931–933
- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148: 243–258
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Shandong Province. 1991. *Regional Geology of Shandong Province*. Beijing: Geological Publishing House, 6–524 (in Chinese)
- Condie KC. 1998. Episodic continental growth and supercontinents: A mantle avalanche connection? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 163: 97–108
- Condie KC. 2005. TTGs and adakites: are they both slab melts? *Lithos*, 80: 33–44
- Condie KC, Belousova E, Griffin WL and Sircombe KN. 2009. Granitoid events in space and time: Constraints from igneous and detrital zircon age spectra. *Gondwana Res.*, 15: 228–242
- Chu H, Lu SN, Wang HC, Xiang ZQ and Liu H. 2011. U-Pb age spectrum of detrital zircons from the Fuzikuang Formation, Penglai Group in Changdao, Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (4): 1017–1028 (in Chinese with English abstract)
- 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 Sci. Bull.*, 55, doi: 10.1007/s11431-010-3273-6
- Diwu CR, Sun Y, Guo AL, Wang HL and Liu XM. 2011. Crustal growth in the North China Craton at ~2.5Ga; Evidence from in situ zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the Dengfeng complex. *Gondwana Research*, 20: 149–170
- Elhrou S, Belousova E and Griffin WL. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, (Suppl.), A158
- Geng YS, Shen QH and Ren LD. 2010. Late Neoproterozoic to Early Paleoproterozoic magmatic events and tectonothermal systems in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (7): 1945–1966 (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: 517–529
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Achterbergh E, Suzanne YO and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle; LA-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 133–147
- Hou KJ, Li YH, Zou TR, Qu XM, Shi YR and Xie GQ. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10): 2595–2604 (in Chinese with English abstract)
- 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 Res.*, 38: 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: 232–269
- Jiang N, Guo JH, Zhai MG and Zhang SQ. 2010. ~2.7Ga crust growth in the North China craton. *Precambrian Res.*, 179: 37–49
- Kinny PD and Maas R. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon. In: Hancher JM and Hoskin PWO (eds.). *Zircon. Rev. Mineral. Geochem.*, 53 (1): 327–341
- Kroner A, Wilde SA, Brien PJO and Li JH. 2005a. Field relationships, geochemistry, zircon ages and evolution of a Late Archaean to Palaeoproterozoic lower crustal section in the Hengshan Terrain of Northern China. *Acta Geologica Sinica*, 79 (5): 605–629
- Kroner A, Wilde SA, Li JH and Wang KY. 2005b. Age and evolution of a Late Archaean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 577–595
- Li XH, Chen FK, Guo JH, Li QL, Xie LW and Siebel W. 2007. South China provenance of the lower-grade Penglai Group north of the Sulu UHP orogenic belt, eastern China: Evidence from detrital zircon ages and Nd-Hf isotopic composition. *Geochim. J.*, 41: 29–45
- Liu DY, Wilde SA, Wan YS, Wang SY, Valley JW, Kita N, Dong CY, 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: 140–154
- Liu F, Guo JH, Lu XP and Diwu CR. 2009. Crustal growth at ~2.5Ga in the North China Craton: Evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huai'an gneiss terrane. *Chinese Sci. Bull.*, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0288-y
- Liu FL, Gerdes A, Liou JG and Liu PH. 2009. Unique coesite-bearing zircon from allanite-bearing gneisses: U-Pb, REE and Lu-Hf properties and implications for the evolution of the Sulu UHP terrane, China. *Eur. J. Mineral.*, 21: 1225–1250
- Liu JH, Liu FL, Liu PH, Wang F and Ding ZJ. 2011. Polyphase magmatic and metamorphic events from Early Precambrian metamorphic basement in Jiaobei area: Evidences from the zircon U-Pb dating of TTG and granitic gneisses. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (4): 943–960 (in Chinese with English abstract)
- Liu PH, Liu FL, Wang F and Liu JH. 2010. Genetic mineralogy and metamorphic evolution of mafic high-pressure (HP) granulites from the Shandong Peninsula, China. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (7): 2039–2056 (in Chinese with English abstract)
- Liu PH, Liu FL, Wang F and Liu JH. 2011a. Genetic characteristics of the ultramafic rocks from the Early Precambrian high-grade metamorphic basement in Shandong Peninsula, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (4): 922–942 (in Chinese with English abstract)
- Liu PH, Liu FL, Wang F and Liu JH. 2011b. Geological significance and in situ U-Pb dating of zircons from high-pressure (HP) granulites in the Shandong Peninsula, eastern China. *Earth Science Frontiers*, 18 (2): 33–54 (in Chinese with English abstract)
- Liu WJ, Zhai MG and Li YG. 1998. Metamorphism of the high-pressure basic granulite in Laixi, eastern Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 14 (4): 449–459 (in Chinese with English abstract)
- Martin H, Smithies RH, Rapp R, Moyen JF and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid; Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79: 1–24
- Shen QH and Qian XL. 1995. Archean rock assemblages, episodes and tectonic evolution of China. *Acta Geoscientia Sinica*, 2: 113–120 (in Chinese with English abstract)
- Shen QH, Geng YS, Song B and Wan YS. 2005. New information from the surface outcrops and deep crust of Archean rocks of the North China and Yangtze blocks, and Qinling-Dabie Orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*. 79 (5): 616–627 (in Chinese with English abstract)
- Soderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The

- <sup>176</sup>Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 219: 311–324
- Tam PY, Zhao GC, Liu FL, Zhou XW, Sun M and Li SZ. 2011. Timing of metamorphism in the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt: New SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites, gneisses and marbles of the Jiaobei massif in the North China Craton. *Gondwana Res.*, 19: 150–162
- Tang J, Zheng YF, Wu YB, Zha XP and Zhou JB. 2004. Zircon U-Pb ages and oxygen isotopes of metamorphic rocks in the western part of the Shandong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1063–1086 (in Chinese with English abstract)
- Tang J, Zheng YF, Wu YB, Gong B and Liu XM. 2007. Geochronology and geochemistry of metamorphic rocks in the Jiaobei terrane: Constraints on its tectonic affinity in the Sulu orogen. *Precambrian Res.*, 152: 48–82
- Wan YS, Song B, Liu DY, Wilde SA, Wu JS, Shi YR, Yin XY and Zhou HY. 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Paleoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event. *Precambrian Res.*, 149: 249–271
- Wan YS, Liu DY, Wang W, Song TR, Kroner 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: 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 Res.*, 186: 169–180
- Wang F, Liu FL, Liu PH and Liu JH. 2010. Metamorphic evolution of Early Precambrian khondalite series in North Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2057–2072 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Zhao GC, Wilde SA and Sun DY. 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 523–545
- Wu FY, Clift PD and Yang JH. 2007. Zircon Hf isotopic constraints on the source of the Indus Molasse, Ladakh Himalaya, India. *Tectonics*, 26: TC2014
- 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 FY, Zhang YB, Yang JH, Xie LW and Yang YH. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China Craton. *Precambrian Research*, 167: 339–362
- 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: 2660–2673
- Yang JH, Wu FY, Wilde SA, Xie LW, Yang YH and Liu XM. 2007. Tracing magma mixing in granite genesis: In situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 153: 177–190
- Zhai MG. 2002. Where is the North China-South China block boundary in eastern China? *Comment. Geology*, 30: 667
- Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. *J. Asian Earth Sci.*, 24: 547–561
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2001. Archaean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural, and *P-T* path constrains and tectonic evolution. *Precambrian Res.*, 107: 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 Res.*, 136: 177–202
- Zhao GC. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1772–1792 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YF, Zhao ZF, Wu YB, Zhang SB, Liu XM 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: 135–158
- Zhou JB, Wilde SA, Zhao GC, Zheng CQ, Jin W, Zhang XZ and Cheng H. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Neoproterozoic Penglai Group and Archean gneisses from the Jiaobei Terrane, North China, and their tectonic implications. *Precambrian Res.*, 160: 323–340
- Zhou XW, Wei CJ, Geng YS and Zhang LF. 2004. Discovery and implications of the high-pressure pelitic granulite from the Jiaobei massif. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1942–1948
- Zhou XW, Zhao GC, Wei CJ, Geng YS and Sun M. 2008. EPMA U-Th-Pb monazite and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure pelitic granulites in the Jiaobei massif of the North China craton. *American Journal of Science*, 308: 328–350

#### 附中文参考文献

- 初航, 陆松年, 王惠初, 相振群, 刘欢. 2011. 山东长岛地区蓬莱群辅子介组碎屑锆石年龄谱研究. *岩石学报*, 27(4): 1017–1028
- 耿元生, 沈其韩, 任留东. 2010. 华北克拉通晚太古代末-古元古代初的岩浆事件及构造热体制. *岩石学报*, 26(7): 1945–1966
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. *岩石学报*, 23(10): 2595–2604
- 刘建辉, 刘福来, 刘平华, 王舫, 丁正江. 2011. 胶北早前寒武纪变质基底多期岩浆-变质热事件: 来自 TTG 片麻岩和花岗质片麻岩中锆石 U-Pb 定年的证据. *岩石学报*, 27(4): 943–960
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 刘建辉. 2010. 山东半岛基性高压麻粒岩的成因矿物学及变质演化. *岩石学报*, 26(7): 2039–2056
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 刘建辉. 2011a. 山东半岛早前寒武纪高级变质基底中超镁铁质岩的成因. *岩石学报*, 27(4): 922–942
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 刘建辉. 2011b. 山东半岛高压麻粒岩中锆石的 U-Pb 定年及其地质意义. *地质学前沿*, 18(2): 33–54
- 刘文军, 翟明国, 李永刚. 1998. 胶东莱西地区基性高压麻粒岩的变质作用. *岩石学报*, 14(4): 449–459
- 山东省地质矿产局. 1991. 山东省区域地质志. 北京:地质出版社, 6–524
- 沈其韩, 钱祥麟. 1995. 中国太古宙地体质体组成、阶段划分和演化. *地球学报*, 2: 113–120
- 沈其韩, 耿元生, 李彪, 万渝生. 2005. 华北和扬子陆块及秦岭-大别造山带地表和深部太古宙基底的新信息. *地质学报*, 79(5): 616–627
- 唐俊, 郑永飞, 吴元保, 查向平, 周建波. 2004. 胶东地块西部变质岩锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究. *岩石学报*, 20(5): 1063–1086
- 王舫, 刘福来, 刘平华, 刘建辉. 2010. 胶北地区早前寒武纪孔兹岩系的变质演化. *岩石学报*, 26(7): 2057–2072
- 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
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论. *岩石学报*, 25(8): 1772–1792
- 周喜文, 魏春景, 耿元生, 张立飞. 2004. 胶北栖霞地区泥质高压麻粒岩的发现及其地质意义. *科学通报*, 49(14): 1424–1430