

胶北太古宙早期锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素研究： 华北克拉通古老陆壳增生及再循环的证据*

刘建辉¹ 刘福来¹ 丁正江^{2,3} 刘平华¹ 王舫¹

LIU JianHui¹, LIU FuLai¹, DING ZhengJiang^{2,3}, LIU PingHua¹ and WANG Fang¹

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

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

2014-01-02 收稿, 2014-03-20 改回.

Liu JH, Liu FL, Ding ZJ, Liu PH and Wang F. 2014. U-Pb dating and Hf isotope study of Early Archean zircons from the Jiaobei Terrane, North China Craton: Evidence for growth and recycling of ancient continental crust. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10):2941–2950

Abstract Identification and discovery of ancient continental crust is an important part of exploring the crustal evolutionary history of the early Earth, and zircon U-Pb age combined with zircon Hf isotope analysis is the major method of the research. In this study, we have conducted in situ U-Pb dating, rare earth element concentrations and Hf isotope analyses on detrital zircons from one felsic paragneiss sample collected from the Jiaobei Terrane, and many Early Archean detrital zircons have been identified. They are igneous origin on the base of analyses of their CL images, Th/U ratios and chondrite normalized REE patterns. The result of the U-Pb analyses indicates that two zircons yield $\sim 3.40\text{Ga}$ (3413Ma and 3400Ma), and other seven zircons yield a weighted mean $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of $3547 \pm 19\text{Ma}$ (MSWD = 1.16), suggesting that two magmatic events took place at $\sim 3.40\text{Ga}$ and 3.55Ga , respectively, combined with similar reports of other places in the North China Craton, implying that the Early Archean continental crust is much larger than present exposure of ancient continental crust. Most of these ancient detrital zircons have generally negative $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values from -6.19 ~ 0.95 (average = -2.54), two-stage Hf model ages of $3737 \sim 4353\text{Ma}$ (average = $\sim 4.1\text{Ga}$) which are much older than their U-Pb ages, implying the recycling of ancient continental crust ($>3.55\text{Ga}$) and crustal growth prior to 4.1Ga in the North China Craton.

Key words Ancient continental crust recycling; Detrital zircon U-Pb dating; Jiaobei Terrane; North China Craton

摘要 古老陆壳物质的发现与鉴别是探索地球早期陆壳形成与演化历史的重要内容之一, 锆石 U-Pb 年龄结合 Hf 同位素研究是该研究的重要手段。本文通过对胶北地体内一个长英质副片麻岩中的锆石开展系统的原位 U-Pb 定年和微量、稀土元素分析, 获得了多个太古宙早期的锆石。根据这些锆石的阴极发光图像、Th/U 比值及稀土元素球粒陨石标准化配分模式, 它们具有典型岩浆锆石的特征, 其中 2 个分析点给出了 3413Ma 和 3400Ma ($\sim 3.4\text{Ga}$) 的锆石 U-Pb 年龄, 7 个分析点给出 $3547 \pm 19\text{Ma}$ (MSWD = 1.16) 的锆石 U-Pb 年龄, 指示太古宙早期的陆壳岩浆事件; 结合华北克拉通其它地区的类似研究结果, 暗示华北克拉通可能曾经存在比现今出露面积更大的太古宙早期的古老陆壳。这些古老锆石的 Hf 同位素分析显示, 它们的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-6.19 \sim 0.95$ 之间, 平均为 -2.54 , 两阶段 Hf 模式年龄在 $3737 \sim 4353\text{Ma}$ 之间, 平均值为 $\sim 4.1\text{Ga}$, 远大于锆石的 U-Pb 年龄, 指示华北克拉通存在 $\sim 4.1\text{Ga}$ 的地壳增生作用及古老陆壳 ($>3.55\text{Ga}$) 的再循环。

关键词 古老陆壳再循环; 锆石 Hf 同位素; 碎屑锆石 U-Pb 定年; 胶北地体; 华北克拉通

中图法分类号 P597.3

* 本文受科技部 973 项目(2012CB416603)、中国地质科学院地质研究所基本科研业务经费(J1214、J1005)和中国地质调查局地质大调查项目(1212011120150)联合资助。

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

1 引言

华北克拉通是全球几个保留有老于 ~3.8Ga 地壳物质的克拉通之一,其早期大陆地壳的形成与演化是地球科学研究中最重要的科学问题之一。目前华北克拉通出露的太古宙岩石主要是 ~2.5Ga 的花岗质 (TTG) 岩石,其次是 ~2.7Ga 的花岗质 (TTG) 岩石 (Jahn *et al.*, 1988, 2008; Guan *et al.*, 2002; Kröner *et al.*, 2005; Wan *et al.*, 2010; 董晓杰等, 2012; 马铭株等, 2013; Yang *et al.*, 2013), 另外在胶北出露有大面积的 ~2.9Ga 的 TTG 岩石 (Jahn *et al.*, 2008; 刘建辉等, 2011; Liu *et al.*, 2013a)。然而,华北克拉通太古宙早期的地壳岩石出露非常有限,主要在辽宁鞍山及冀东地区少量出露 (Liu *et al.*, 1992, 2008; Song *et al.*, 1996; Zhou *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2008), 这归因于两种可能,一是在太古宙早期,陆壳增生就非常有限;另一种可能是

由于后期强烈的岩浆活动及构造运动,使地球最初形成的大陆地壳很难保存下来,其中保留下来的古老地壳岩石为华北克拉通早期大陆地壳的形成及演化历史提供了有限而重要的信息。此外,变质表壳岩中古老的碎屑锆石及晚期侵入岩中捕虏的继承性锆石记录了早期大陆地壳形成及演化历史,是研究地球早期大陆地壳形成及演化的重要途径 (Wu *et al.*, 2005, 2008; 多吉等, 2007; Diwu *et al.*, 2013), 因此,通过对这些锆石的 U-Pb 年代学分析及 Hf 同位素分析,能为地球早期大陆地壳形成与演化提供重要的证据和信息。

本文应用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年技术首次在胶北一个长英质副片麻岩样品中测定出大量太古宙早期碎屑锆石,结合锆石阴极发光图像及锆石微区原位微量、稀土元素分析,对胶北太古宙早期锆石开展了系统的年代学分析;同时应用锆石原位 Hf 同位素分析技术对这些太古宙早期锆石开展了原位 Hf 同位素研究,研究结果为华北克拉通古老陆壳的存在、增生与再循环提供了重要的证据。

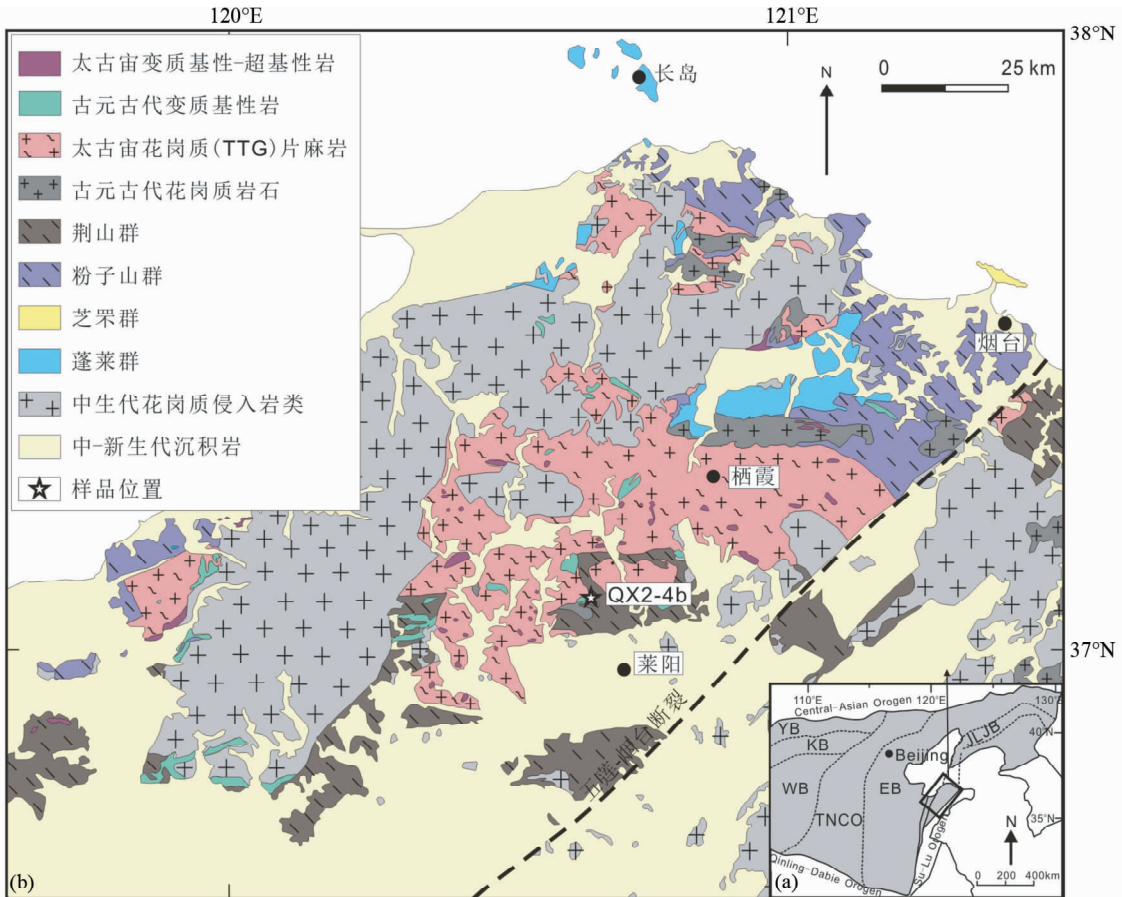


图1 华北克拉通构造单元划分(a, 据 Zhao *et al.*, 2005 修改)及胶北地区地质简图与采样位置(b, 据山东省地质矿产局, 1991; Zhou *et al.*, 2008a, Liu *et al.*, 2013a 修改)

YB-阴山地块;KB-孔兹岩带;WB-西部块体;TNCO-中部造山带;EB-东部块体;JLJB-胶-辽-吉带

Fig. 1 Tectonic subdivisions of the North China Craton (a, modified after Zhao *et al.*, 2005) and simplified geological map of the Jiaobei Terrane (b, modified after BGMRS, 1991; Zhou *et al.*, 2008a; Liu *et al.*, 2013a)

YB-Yinshan Block; KB-Khondalite Belt; WB-Western Block; TNCO-Trans-North China Orogen; EB-Eastern Block; JLJB-Jiao-Liao-Jiao Belt

2 地质背景及样品

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 1a)。该地体主要由太古宙花岗质(TTG)片麻岩、变质基性-超基性岩及表壳岩,古元古代花岗岩类及变质基性岩,古元古代高级变质的粉子山群及荆山群,低级变质的芝罘群,以及新元古代低级变质的蓬莱群等寒武纪变质-变形基底,中生代花岗岩类及中-新生代沉积地层组成(图 1b)(山东省地质矿产局, 1991; 卢良兆, 1996; 唐俊等, 2004; 周喜文等, 2004; Jahn *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2008a, b; 李旭平等, 2011; Liu *et al.*, 2013a, b)。

太古宙花岗质(TTG)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~2.5Ga和~1.86Ga两期变质热事件(Jahn *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2008a; 刘建辉等, 2011; Liu *et al.*, 2013a);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、黑云斜长片麻岩及变质基性-超基性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,深熔混合岩化作用强烈(刘建辉等, 2011; 刘平华等, 2011a, b, 2012)。古元古代花岗岩类出露面积较小,呈零星分布,根据其侵位时间及变形作用,可划分为构造前变形花岗质片麻岩类及构造后未变形的花岗岩类,它们可与辽-吉地区的古元古代花岗岩类对比(Liu *et al.*, 2014)。胶北地体内古元古代孔兹岩系(包括粉子山群、荆山群)不整合于TTG片麻岩之上,其具有3.34~2.20Ga的碎屑锆石U-Pb年龄(Wan *et al.*, 2006)。这些组成胶北地体早前寒武变质基底的岩石,经历了高角闪岩相-麻粒岩相变质作用,具有顺时针P-T演化路径(刘文军等, 1998; 周喜文等, 2004; 刘平华等, 2010, 2013; 王舫等, 2010; Tam *et al.*, 2011, 2012a, b, c; Liu *et al.*, 2013c),并伴随普遍的深熔作用。变质锆石U-Pb年代学研究表明,其变质作用的时间约为1.85~1.95Ga(Zhou *et al.*, 2008b; Tam *et al.*, 2011, 2012a, b; 刘福来等, 2012; Liu *et al.*, 2013c),其中高压麻粒岩相峰期变质时间约在1.85~1.90Ga之间(刘平华等, 2011a, b; Liu *et al.*, 2013c)。芝罘群主要分布在芝罘岛,碎屑锆石U-Pb年代学分析结果显示其沉积时代应晚于约1.8Ga(Liu *et al.*, 2013b)。新元古代蓬莱群是一套绿片岩相-低角闪岩相的浅变质岩系(山东省地质矿产局, 1991; Zhou *et al.*, 2008a),目前,对于其形成的构造背景、沉积时间及属性仍有争议(Li *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2008a; 初航等, 2011)。

本文用于锆石U-Pb定年及Hf同位素分析的样品QX2-4b为浅色中细粒长英质副片麻岩,采自莱阳北西留镇东采

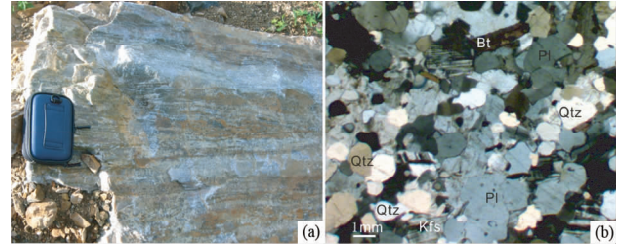


图2 样品QX2-4b的野外照片及显微照片

Pl-斜长石; Kfs-钾长石; Qtz-石英; Bt-黑云母

Fig. 2 Photographs of outcrops and photomicrographs of the sample QX2-4b

Pl-plagioclase; Kfs-K-feldspar; Qtz-quartz; Bt-biotite

矿坑(图 1b)。岩石呈灰白色,弱片麻状、条带状构造(图 2a),不等粒变晶结构,主要矿物组合为:石英(45%) + 斜长石(30%) + 钾长石(20%),以及少量黑云母,石英及长石呈他形,弱定向排列,可见斜长石残斑(图 2b)。周边有古元古代~2.1Ga变质辉长岩(刘平华等, 2013),太古宙花岗质片麻岩及古元古代荆山群,由于出露不好,其与其它岩体的产出关系不清。

3 分析方法

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年及锆石微区微量、稀土元素分析在中国地质大学(北京)地学实验中心元素地球化学实验室进行。分析仪器采用由美国 New Wave Research 公司生产的激光剥蚀进样系统(UP193SS)和美国 AGLENT 科技有限公司生产的 Agilent 7500 型四级杆等离子体质谱仪联合构成的激光等离子质谱仪。分析时采用 10Hz 的激光频率, 193nm 的激光波长, 36 μ m 的激光束斑直径, 激光预剥蚀时间和剥蚀时间分别为 5s 和 45s, U、Th、Pb 元素积分时间为 20ms, 其它元素积分时间为 15ms。年龄计算时以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值校正,以 TEM 为监控盲样;元素含量以国际标样 NIST612 为外标, Si 为内标计算;普通铅校正与 Andersen (2002) 方法相同,数据采用 Glitter 4 程序进行处理。

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 New Wave 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 μ m,激光剥蚀时间约为 27s。测定时选用锆石国际标样 GJ-1 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)相同。分析过程中锆石标样 GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 0.282012 ± 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 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算时,球粒陨石的

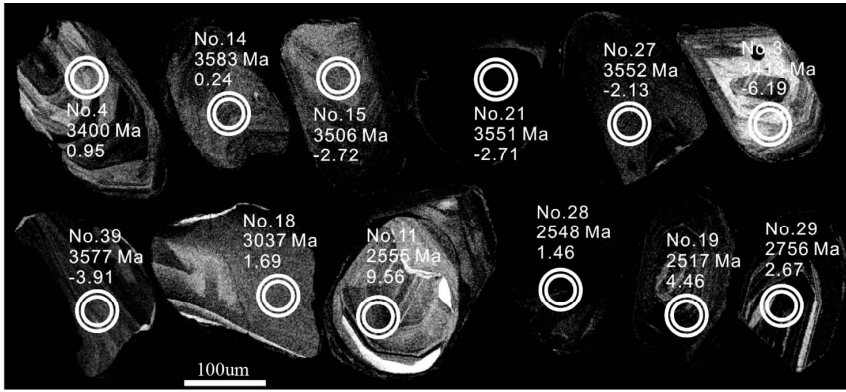


图3 样品 QX2-4b 代表性太古宙早期锆石及其它锆石阴极发光图像、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄及 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

Fig. 3 Representative cathodoluminescence (CL) images of Early Archean and others zircons from the sample QX2-4b with $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values

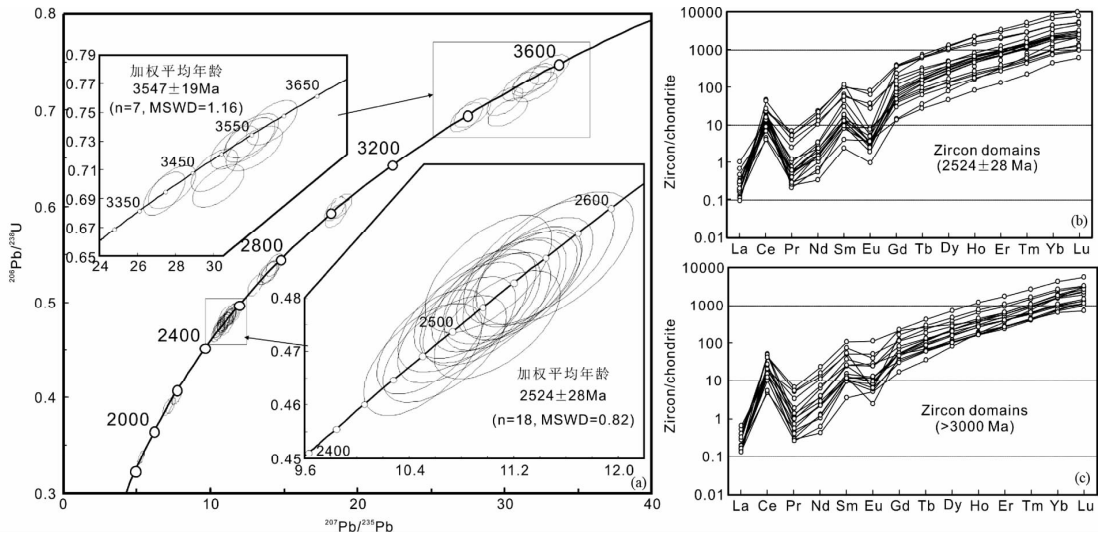


图4 样品 QX2-4b 的锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)及锆石分析微区球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(b, c)

Fig. 4 U-Pb concordia diagram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b, c) of different zircons from the sample QX2-4b

$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 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_{DM}) 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 ($t_{\text{DM}}(\text{Hf2})$) 计算时, 下地壳、平均地壳与亏损地幔的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 比值分别为 -0.32、-0.5482 及 0.1566 (Amelin *et al.*, 1999; Griffin *et al.*, 2000, 2002)。 ^{176}Lu 的衰变常量选用 $1.867 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$ (Söderlund *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, 相关计算公式参考吴福元等 (2007)

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年

该样品锆石主要呈紫红色或黄褐色; 晶形以半自形或他

形为主, 少量为自形晶, 锆石形态多样, 以短柱状及椭圆状锆石为主, 显示了一定的磨圆作用及机械破碎。CL 图像显示它们既有具岩浆韵律环带的岩浆锆石, 也有无明显内部结构的变质增生边或变质锆石 (图 3)。在锆石形态及内部结构分析基础上, 采用 LA-ICP-MS 法对该样品的 40 个锆石进行原位 U-Pb 年龄测试及微量、稀土元素分析。分析结果显示, 锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在 1861 ~ 3583 Ma 之间 (表 1), 包括 1 个 1861 Ma (点 1) 的古元古代变质年龄; 3 个约 2.1 ~ 2.2 Ga (点 12, 30 及 37) 岩浆锆石年龄, 它们与胶北古元古代花岗质岩石的侵位年龄一致 (Liu *et al.*, 2014); 另外 18 个分析点给出了 $2524 \pm 28 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.82) 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 (图 4a), 这些分析点具有较高的 Th/U 比值 (表 1), 重稀土相对富集, 轻稀土相对亏损, 具有明显的负 Eu 异常和明显的正 Ce 异常 (图 4b), 显示出典型岩浆锆石的稀土配分曲线模式 (Hoskin and Schaltegger, 2003; Liu *et al.*, 2010), 结合锆石的内部结构, 其应代表胶北约 2.5 Ga 的岩浆事件年龄; 除

表 1 胶北样品 QX2-4b 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 数据表

Table 1 The LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of the sample QX2-4b from the Jiaobei Terrane

测点号	含量 ($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	Th	U	Pb		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ
QX24B-01	316	878	329	0.36	5.28331	0.13377	0.33659	0.0046	0.11382	0.00278	1870	22	1866	22	1861	26
QX24B-02	66	41	28	1.58	10.50443	0.29871	0.46857	0.00697	0.16256	0.00454	2477	31	2480	26	2482	28
QX24B-03	183	223	175	0.82	18.48131	0.47188	0.5972	0.00824	0.22441	0.00554	3019	33	3015	25	3013	24
QX24B-04	29	86	75	0.34	27.39653	0.72115	0.6928	0.00992	0.28676	0.00734	3393	38	3398	26	3400	24
QX24B-05	324	362	286	0.89	18.52219	0.47511	0.5904	0.00814	0.22749	0.00564	2991	33	3017	25	3034	24
QX24B-06	151	193	118	0.78	11.26428	0.29959	0.48248	0.00678	0.16929	0.00438	2538	29	2545	25	2551	26
QX24B-07	15	25	15	0.61	11.51618	0.39712	0.48746	0.00818	0.17131	0.00591	2560	35	2566	32	2570	35
QX24B-08	276	379	222	0.73	10.57062	0.27623	0.47186	0.00651	0.16245	0.00411	2492	29	2486	24	2481	26
QX24B-09	40	56	34	0.70	11.00643	0.32013	0.48454	0.00725	0.16472	0.00471	2547	31	2524	27	2505	29
QX24B-10	68	83	51	0.81	11.13548	0.30914	0.48075	0.00693	0.16796	0.00456	2531	30	2535	26	2537	28
QX24B-11	251	320	195	0.78	11.34899	0.30345	0.48489	0.00676	0.16972	0.00441	2549	29	2552	25	2555	26
QX24B-12	279	333	163	0.84	7.30014	0.19781	0.39069	0.00546	0.13549	0.00357	2126	25	2149	24	2170	28
QX24B-13	374	391	400	0.96	31.09207	0.82467	0.72519	0.01005	0.3109	0.008	3515	38	3522	26	3525	24
QX24B-14	121	248	242	0.49	33.04355	0.87984	0.74265	0.01031	0.32265	0.00833	3580	38	3582	26	3583	24
QX24B-15	85	187	172	0.45	30.03508	0.80599	0.7094	0.00991	0.30702	0.008	3456	37	3488	26	3506	25
QX24B-16	112	117	83	0.96	14.35584	0.39739	0.53863	0.00764	0.19327	0.00522	2778	32	2774	26	2770	27
QX24B-17	61	136	83	0.45	13.07075	0.36357	0.5177	0.00735	0.18308	0.00497	2689	31	2685	26	2681	28
QX24B-18	63	119	89	0.53	18.85134	0.52306	0.60013	0.00852	0.22778	0.00616	3030	34	3034	27	3037	27
QX24B-19	58	178	97	0.32	10.94286	0.30467	0.47813	0.00674	0.16596	0.0045	2519	29	2518	26	2517	28
QX24B-20	375	459	312	0.82	14.02088	0.38555	0.53137	0.0074	0.19134	0.00512	2747	31	2751	26	2754	27
QX24B-21	61	136	129	0.45	31.85416	0.89004	0.73057	0.01039	0.31617	0.00861	3536	39	3546	28	3551	26
QX24B-22	87	771	398	0.11	10.76332	0.29818	0.47407	0.00659	0.16464	0.00444	2501	29	2503	26	2504	28
QX24B-23	20	83	45	0.24	10.99544	0.32326	0.47796	0.00697	0.16682	0.00481	2518	30	2523	27	2526	30
QX24B-24	256	275	171	0.93	11.24323	0.31775	0.48309	0.0068	0.16877	0.00465	2541	30	2544	26	2545	29
QX24B-25	207	338	196	0.61	10.90427	0.3082	0.47895	0.00672	0.16509	0.00455	2523	29	2515	26	2508	29
QX24B-26	68	130	74	0.52	11.06418	0.32392	0.48043	0.0069	0.167	0.00479	2529	30	2529	27	2528	30
QX24B-27	113	278	263	0.41	32.00062	0.91136	0.7334	0.01031	0.3164	0.00878	3546	38	3550	28	3552	27
QX24B-28	438	367	235	1.20	11.07487	0.31873	0.47504	0.00669	0.16906	0.00475	2506	29	2529	27	2548	30
QX24B-29	41	87	55	0.47	14.05343	0.41481	0.53191	0.00768	0.19159	0.00554	2749	32	2753	28	2756	30
QX24B-30	91	135	66	0.68	7.6981	0.23513	0.40054	0.00583	0.13937	0.00418	2172	27	2196	27	2219	33
QX24B-32	47	615	312	0.08	10.67255	0.31197	0.47053	0.00663	0.16448	0.0047	2486	29	2495	27	2502	30
QX24B-33	89	179	161	0.50	27.81943	0.81902	0.69746	0.00994	0.28923	0.00832	3411	38	3413	29	3413	28
QX24B-34	39	38	25	1.01	11.39377	0.38121	0.48673	0.00774	0.16974	0.00564	2557	34	2556	31	2555	35
QX24B-35	133	405	359	0.33	30.23671	0.89082	0.69836	0.00986	0.31396	0.00904	3414	37	3495	29	3540	28
QX24B-36	272	220	144	1.23	11.17428	0.33888	0.48191	0.00691	0.16814	0.005	2536	30	2538	28	2539	32
QX24B-37	368	246	134	1.50	7.1095	0.21873	0.3894	0.00561	0.13239	0.004	2120	26	2125	27	2130	34
QX24B-38	241	649	355	0.37	10.8104	0.3275	0.47647	0.00678	0.16452	0.00488	2512	30	2507	28	2503	32
QX24B-39	84	175	166	0.48	32.1165	0.9755	0.7245	0.01041	0.32144	0.00956	3513	39	3554	30	3577	29
QX24B-40	167	118	89	1.41	13.84536	0.42815	0.52952	0.00767	0.1896	0.00575	2739	32	2739	29	2739	32

了约 2.5Ga 的岩浆锆石年龄外,同时也获得了约 2.5Ga 的变质事件年龄(如点 32);另外 4 个锆石分析点(点 16、20、29 及 40)分别给出了 2770Ma、2754Ma、2756Ma 及 2739Ma 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,它们应代表胶北约 2.7Ga 的岩浆事件年龄。

除了以上胶北地区主要的早前寒武纪岩浆-变质事件锆石年龄外,本次测试获得了大量太古宙早期的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(表 1),其中 9 个分析点(点 4、13、14、15、21、27、

33、35 及 39)的锆石年龄 $> 3.4\text{Ga}$,为古太古代年龄(表 1),这些锆石呈柱状或椭圆形,以半自形或他形为主,CL 图像呈暗色调,有的显示了韵律环带或梳状环带,有的则无明显的韵律环带(图 3)。锆石 U-Pb 及稀土、微量元素分析显示它们具有较高的 Th/U 比值(表 1),重稀土相对富集,轻稀土相对亏损,具有明显的负 Eu 异常和明显的正 Ce 异常(图 4c),显示出典型岩浆锆石的特征;这些分析点中 7 个给出 $3547 \pm 19\text{Ma}$ (MSWD = 1.16) 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄(图 4a),

表 2 胶北样品 QX2-4b 的 LA-MC-ICP-MS 锆石原位 Hf 同位素数据

Table 2 The LA-MC-ICP-MS zircon in situ Hf isotopic data of the sample QX2-4b from the Jiaobei Terrane

Spot No.	Age (Ma)	$\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM}}(\text{Hf}2)$ (Ma)	2σ	$t_{\text{DM}}(\text{Hf})^{\text{c}}$ (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
QX2-4b 01	2482	0.046014	0.000756	0.281168	0.000020	-56.72	-2.32	0.72	2883	3398	27	3128	-0.98
QX2-4b 02	3013	0.212873	0.003797	0.281217	0.000032	-55.00	5.20	1.13	3058	3108	47	3080	-0.89
QX2-4b 03	3400	0.027144	0.000496	0.280655	0.000025	-74.85	0.95	0.88	3546	3737	33	3637	-0.99
QX2-4b 04	3034	0.076776	0.001435	0.280879	0.000019	-66.94	-1.48	0.69	3330	3697	26	3501	-0.96
QX2-4b 05	2551	0.098590	0.001683	0.281271	0.000024	-53.07	1.30	0.84	2811	3131	33	2960	-0.95
QX2-4b 06	2570	0.005416	0.000109	0.281244	0.000015	-54.02	3.52	0.54	2734	2952	20	2839	-1.00
QX2-4b 07	2481	0.109993	0.002273	0.281345	0.000031	-50.47	1.39	1.09	2753	3076	43	2900	-0.93
QX2-4b 08	2505	0.034688	0.000620	0.281079	0.000026	-59.86	-4.72	0.92	2992	3621	35	3291	-0.98
QX2-4b 09	2537	0.039414	0.000734	0.281356	0.000025	-50.06	5.66	0.89	2627	2743	34	2682	-0.98
QX2-4b 10	2555	0.030629	0.000520	0.281444	0.000024	-46.96	9.56	0.86	2495	2416	33	2457	-0.98
QX2-4b 11	3525	0.095941	0.001500	0.280580	0.000019	-77.52	-1.27	0.69	3742	4010	26	3867	-0.95
QX2-4b 12	3583	0.062383	0.001130	0.280560	0.000021	-78.22	0.24	0.77	3733	3921	29	3821	-0.97
QX2-4b 13	3506	0.046181	0.000783	0.280503	0.000023	-80.25	-2.72	0.81	3776	4121	30	3939	-0.98
QX2-4b 14	2770	0.018978	0.000392	0.281132	0.000023	-57.98	3.62	0.83	2904	3079	31	2988	-0.99
QX2-4b 15	2681	0.043985	0.000866	0.281274	0.000024	-52.97	5.76	0.87	2748	2833	33	2788	-0.97
QX2-4b 16	3037	0.020603	0.000384	0.280905	0.000024	-66.02	1.69	0.85	3206	3427	32	3312	-0.99
QX2-4b 17	2517	0.043410	0.001098	0.281353	0.000020	-50.18	4.46	0.73	2657	2834	28	2740	-0.97
QX2-4b 18	2754	0.032033	0.000631	0.281140	0.000022	-57.72	3.07	0.78	2912	3115	29	3009	-0.98
QX2-4b 19	3551	0.052472	0.000918	0.280483	0.000019	-80.94	-2.71	0.66	3815	4150	25	3973	-0.97
QX2-4b 20	2504	0.032783	0.000711	0.281059	0.000018	-60.58	-5.62	0.64	3027	3699	24	3346	-0.98
QX2-4b 21	2526	0.032085	0.000614	0.281385	0.000020	-49.04	6.65	0.73	2580	2650	28	2613	-0.98
QX2-4b 22	2545	0.062081	0.001227	0.281112	0.000022	-58.69	-3.69	0.80	2995	3559	31	3259	-0.96
QX2-4b 23	2508	0.044979	0.000777	0.281152	0.000018	-57.31	-2.35	0.65	2907	3419	25	3150	-0.98
QX2-4b 24	2528	0.015091	0.000349	0.281116	0.000021	-58.58	-2.45	0.74	2923	3440	28	3171	-0.99
QX2-4b 25	3552	0.048965	0.000890	0.280497	0.000020	-80.46	-2.13	0.70	3794	4102	26	3939	-0.97
QX2-4b 26	2548	0.097092	0.001766	0.281282	0.000023	-52.71	1.46	0.81	2803	3115	32	2948	-0.95
QX2-4b 27	2756	0.027532	0.000610	0.281126	0.000022	-58.20	2.67	0.77	2929	3151	29	3035	-0.98
QX2-4b 28	2502	0.019956	0.000383	0.281291	0.000017	-52.36	3.15	0.61	2691	2937	23	2809	-0.99
QX2-4b 29	3413	0.048672	0.000820	0.280468	0.000019	-81.48	-6.19	0.66	3825	4353	25	4075	-0.98
QX2-4b 30	2555	0.037493	0.000628	0.281108	0.000022	-58.86	-2.60	0.80	2955	3471	30	3201	-0.98
QX2-4b 31	3540	0.047264	0.000788	0.280451	0.000018	-82.07	-3.79	0.66	3844	4234	24	4029	-0.98
QX2-4b 32	3373	0.064142	0.001011	0.280577	0.000022	-77.63	-3.67	0.78	3699	4112	29	3894	-0.97
QX2-4b 33	2539	0.146929	0.002380	0.281418	0.000029	-47.87	5.07	1.02	2657	2796	40	2720	-0.93
QX2-4b 34	2503	0.133667	0.002088	0.280939	0.000024	-64.81	-12.25	0.84	3304	4268	33	3747	-0.94
QX2-4b 35	3577	0.053194	0.000919	0.280433	0.000020	-82.72	-3.91	0.72	3882	4269	27	4065	-0.97
QX2-4b 36	2739	0.025806	0.000478	0.280950	0.000018	-64.44	-3.74	0.65	3154	3693	24	3411	-0.99

我们将其解释为太古宙早期的岩浆事件年龄。

4.2 锆石 Hf 同位素分析

本次测试对样品 QX2-4b 的 36 个锆石进行了 Hf 同位素分析, 锆石的 Hf 同位素分析结果如表 2 和图 5 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), 表明锆石形成以后具有较低的放射成因 Hf 的积累。具有古太古代锆石 U-Pb 年龄 (> 3.3Ga) 的分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 0.280433 ~ 0.280655 之间, 其它锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 0.280879 ~ 0.281444 之间(表 2 及图 5a)。以锆石单点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄计算的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 -12.25 ~ 9.56 之

间, 其中 10 个古太古代锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 -6.19 ~ 0.95 之间, 平均值为 -2.54(表 2 及图 5b)。两阶段 Hf 模式年龄 ($t_{\text{DM}}(\text{Hf}2)$) 在 2416 ~ 4353Ma 之间, 其中古太古代锆石的两阶段 Hf 模式年龄在 3737 ~ 4353Ma 之间, 平均值为 4101Ma, 两阶段 Hf 模式年龄均大于锆石单点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(表 2 及图 5c)。

5 讨论与结论

古老陆壳物质的发现与鉴别是探索地球早期地壳形成与演化历史的重要内容之一, 锆石 U-Pb 年龄结合 Hf 同位素

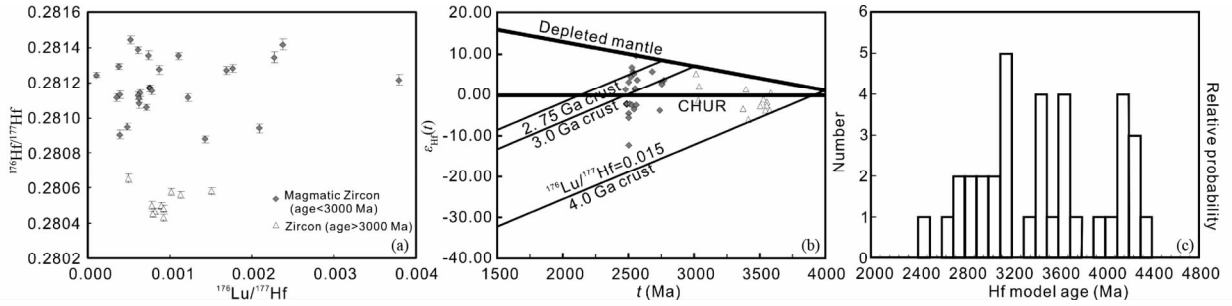


图5 样品 QX2-4b 锆石 Hf 同位素分析

(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. 5 Zircon Hf isotopic composition of the sample QX2-4b

(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

研究是该研究的重要手段。本次对胶北地体内一个长英质副片麻岩样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, $\sim 2.5\text{Ga}$ 岩浆锆石是该样品最主要的锆石组份, 同时也有 $\sim 2.7\text{Ga}$ 岩浆锆石, $\sim 1.85\text{Ga}$ 及 $\sim 2.5\text{Ga}$ 两期变质锆石, 除了以上胶北地区常见的岩浆-变质热事件年龄外, 还包含有大量太古宙早期的锆石 U-Pb 年龄(图 4a 及表 1)。根据锆石阴极发光图像、Th/U 比值及稀土元素球粒陨石标准化配分模式(图 3、图 4c 及表 1), 这些太古宙早期的锆石大部分具有典型岩浆锆石的特征, 表明它们的锆石 U-Pb 年龄代表岩浆事件年龄, 它们分别是 $\sim 3.4\text{Ga}$ (3413Ma 及 3400Ma 两个数据) 及 3.55Ga (7 个 U-Pb 分析点给出 $3547 \pm 19\text{Ma}$, $\text{MSWD} = 1.16$) 两期岩浆事件(图 4a 及表 1), 此外, 胶北中生代花岗岩中捕掳有大量类似年龄的继承锆石(Wang *et al.*, 1998), 这表明在胶北地体中可能存在太古宙早期的古老地壳。此外, 除了在辽宁鞍山地区发现 $\sim 3.8\text{Ga}$ 的大陆地壳岩石外, 还在冀东、胶北、蚌埠、河南焦作及信阳、秦岭、内蒙固阳等地发现大量太古宙早期 ($> 3.2\text{Ga}$) 的古老碎屑锆石或继承/残余锆石(Liu *et al.*, 1992, 2008; Song *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 1998, 2007; 靳克等, 2003; Zheng *et al.*, 2004; 简平等, 2005; Wu *et al.*, 2005, 2008; Gao *et al.*, 2006; Wan *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2007; Diwu *et al.*, 2013), 这些研究结果表明, 华北克拉通可能曾经存在比现今出露面积更大的太古宙早期的古老陆壳。

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增生演化极佳的方法(Kinny and Maas, 2003; 吴福元等, 2007)。岩浆锆石的结晶年龄通常被理解为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); 正的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值指示来自新生地壳的重熔, 而负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值则表明来自老地壳的部分熔融(Kinny and Maas, 2003); 锆石 U-Pb 测年揭示了胶北可能存在 $\sim 3.4\text{Ga}$ 及 $\sim 3.55\text{Ga}$ 太古宙早期的古老陆壳岩石。这些太古宙早期锆石的 Hf 同位素分析显示, 它们的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-6.19 \sim 0.95$ 之间, 除两个分析点具较小的正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

(0.95 及 0.24) 外, 其它分析点均具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值; 两阶段 Hf 模式年龄在 $3737 \sim 4353\text{Ma}$ 之间, 平均值为 4101Ma , 远大于锆石结晶年龄(表 2), 表明胶北太古宙早期 ($\sim 3.4\text{Ga}$ 和 $\sim 3.55\text{Ga}$) 碎屑锆石的源区岩石形成于古老陆壳物质的再循环; 也暗示华北克拉通在 $\sim 4.1\text{Ga}$ 之前就存地壳增生作用。

致谢 中国地质大学(北京)苏犁教授和于红、张红雨、李弦博士在锆石 LA-ICP-MS 定年和微量、稀土元素分析中提供了帮助; 中国地质科学院矿产资源研究所侯可军博士、郭春丽副研究员在锆石原位 Hf 同位素测试分析中提供了帮助; 中国科学院地质与地球物理研究所纪伟强副研究员在锆石 Hf 同位素计算及解释过程中提供了帮助; 两位论文评审人审阅全文并提出宝贵的修改意见; 在此一致表示感谢。

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(6733): 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}Lu decay rate since 4557 million years ago. *Science*, 310(5749): 839-841
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem. Geol.*, 192(1-2): 59-79
- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243-258
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Shandong Province (BGMRS). 1991. Regional Geology of Shandong Province. Beijing: Geological Publishing House, 6-524 (in Chinese)
- 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, Wilde SA, Wang HL, Dong ZC, Zhang H and Wang Q. 2013. New evidence for $\sim 4.45\text{Ga}$ terrestrial crust from zircon

- xenocrysts in Ordovician ignimbrite in the North Qinling Orogenic Belt, China. *Gondwana Research*, 23: 1484 – 1490
- Dong XJ, Xu ZY, Liu ZH and Sha Q. 2012. 2.7Ga granitic gneiss in the northern foot of Daqingshan Mountain, Central Inner Mongolia, and its geological implications. *Earth Science*, 37(Suppl.): 45 – 52 (in Chinese with English abstract)
- Duo J, Wen CQ, Guo JC, Fan XP and Li XW. 2007. 4.1Ga old detrital zircon in western Tibet of China. *Chin. Sci. Bull.*, 52(1): 19 – 22 (in Chinese)
- Elhoul S, Belousova E, Griffin WL, Pearson NJ and O'Reilly SY. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158
- Gao LZ, Zhao T, Wan YS, Zhao X, Ma YS and Yang SZ. 2006. Report on 3.4Ga SHRIMP zircon age from the Yuntaishan Geopark in Jiaozuo, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 80(1): 52 – 57
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Achterbergh E, Suzanne YO 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
- Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson SE, O'Reilly SY, Xu XS and Zhou XM. 2002. Zircon Chemistry and magma mixing, SE China; In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complex. *Lithos*, 61(3–4): 237 – 269
- Guan H, Sun M, Wilde SA, Zhou X and Zhai MG. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping complex; Implications for formation and assembly of the North China craton. *Precambrian Research*, 113(1–2): 1 – 18
- Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27 – 62
- 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, 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. *Am. J. Sci.*, 308(3): 232 – 269
- Jian P, Zhang Q, Liu DY, Jin WJ, Jia XQ and Qian Q. 2005. SHRIMP dating and geological significance of Late Archean high-Mg diorite (sanukite) and hornblende-granite at Guyang of Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 151 – 157 (in Chinese with English abstract)
- Jin K, Xu WL, Wang QH, Gao S and Liu XC. 2003. Formation time and sources of the Huaiguang "migmatitic granodiorite" in Bengbu, Anhui Province; Evidence from SHRIMP zircon U-Pb geochronology. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(4): 331 – 335 (in Chinese with English abstract)
- Kinny PD and Maas R. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon. In: Hanchar JM and Hoskin PWO (eds.). *Zircon. Rev. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 327 – 341
- Kröner A, Wilde SA, Li JH and Wang KY. 2005. Age and evolution of a late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. *J. Asian Earth Sci.*, 24(5): 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. *Geochemical Journal*, 41(1): 29 – 45
- Li XP, Guo JH, Zhao GC, Li HK and Song ZJ. 2011. Formation of the Paleoproterozoic calc-silicate and high-pressure mafic granulite in the Jiaobei terrane, eastern Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 961 – 968 (in Chinese with English abstract)
- 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, Wu JS, Zhou HY, Dong CY and Yin XY. 2008. New U-Pb and Hf isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China Craton. *Am. J. Sci.*, 308(3): 200 – 231
- Liu FL, Robinson PT, Gerdes A, Xue HM, Liu PH and Liou JG. 2010. Zircon U-Pb ages, REE concentrations and Hf isotope composition of granitic leucosome and pegmatite from the north Sulu UHP terrane in China; Constraints on the timing and nature of partial melting. *Lithos*, 117(1–4): 247 – 268
- Liu FL, Liu PH, Ding ZJ, Liu JH, Yang H and Hu WH. 2012. Genetic mechanism of granitic leucosome within high-pressure granulite from the Early Precambrian metamorphic basement of Shandong Peninsula, SE North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2686 – 2696 (in Chinese with English abstract)
- 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 JH, Liu FL, Ding ZJ, Liu CH, Yang H, Liu PH, Wang F and Meng E. 2013a. The growth, reworking and metamorphism of early Precambrian crust in the Jiaobei terrane, the North China Craton; Constraints from U-Th-Pb and Lu-Hf isotopic systematics, and REE concentrations of zircon from Archean granitoid gneisses. *Precambrian Research*, 224: 287 – 303
- Liu JH, Liu FL, Ding ZJ, Yang H, Liu CH, Liu PH, Xiao LL, Zhao L and Geng JZ. 2013b. U-Pb dating and Hf isotope study of detrital zircons from the Zhifu Group, Jiaobei Terrane, North China Craton; Provenance and implications for Precambrian crustal growth and recycling. *Precambrian Research*, 235: 230 – 250
- Liu JH, Liu FL, Ding ZJ, Liu PH, Guo CL and Wang F. 2014. Geochronology, Petrogenesis and tectonic implications of the Paleoproterozoic granitoid rocks in the Jiaobei Terrane, North China Craton. *Precambrian Research*, in press
- 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. Geological significance and in situ U-Pb dating of zircons from High-Pressure (HP) Granulites in Shandong Peninsula, eastern China. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 33 – 54 (in Chinese with English abstract)
- Liu PH, Liu FL, Wang F and Liu JH. 2011b. Genetic characteristics of the ultramafic rocks from the Early Precambrian high-grade metamorphic basement in the Shandong Peninsula, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 922 – 942 (in Chinese with English abstract)
- Liu PH, Liu FL, Yang H, Wang F and Liu JH. 2012. Protolith, high-pressure (HP) and retrograde ages of HP Granulites in the Early Precambrian metamorphic basement of Shandong Peninsula, eastern China. *Geoscience Frontiers*, 3(6): 923 – 943
- Liu PH, Liu FL, Wang F, Liu JH, Yang H and Shi JR. 2012. Geochemical characteristics and genesis of the high-pressure mafic granulite in the Jiaobei high-grade metamorphic basement, eastern Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2705 – 2720 (in Chinese with English abstract)
- Liu PH, Liu FL, Wang F, Liu JH and Cai J. 2013. Petrological and geochronological preliminary study of the Xilixi ~2.1Ga meta-gabbro from the Jiaobei terrane, the southern segment of the Jiao-Liao-Ji Belt in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2371 – 2390 (in Chinese with English abstract)
- Liu PH, Liu FL, Liu CH, Wang F, Liu JH, Yang H, Cai J and Shi JR. 2013c. Petrogenesis, *P-T-t* path, and tectonic significance of high-

- pressure mafic granulites from the Jiaobei terrane, North China Craton. *Precambrian Research*, 233: 237–258
- Liu WJ, Zhai MG and Li YG. 1998. Metamorphism of the high-pressure basic granulites in Laixi, eastern Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 449–459 (in Chinese with English abstract)
- Lu LZ, Xu XC and Liu FL. 1996. Early Precambrian Khondalites in North China. Changchun Press, 219–230 (in Chinese with English abstract)
- Ma MZ, Xu ZY, Zhang LC, Dong XJ, Liu SJ, Liu DY and Wan YS. 2013. SHRIMP dating and Hf isotope analysis of zircons from the Early Precambrian basement in the Xi Ulanbulang area, Wuchuan, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 501–516 (in Chinese with English abstract)
- Song B, Nutman AP, Liu DY and Wu JS. 1996. 3800~2500Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Research*, 78: 79–94
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 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 Research*, 19(1): 150–162
- Tam PY, Zhao GC, Zhou XW, Sun M, Guo JH, Li SZ, Yin CQ, Wu ML and He YH. 2012a. Metamorphic *P-T* path and implications of high-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Gondwana Research*, 22(1): 104–117
- Tam PY, Zhao GC, Sun M, Li SZ, Iizuka YY, Ma GSK, Yin CQ, He YH and Wu ML. 2012b. Metamorphic *P-T* path and tectonic implications of medium-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 220–221: 177–191
- Tam PY, Zhao GC, Sun M, Li SZ, Wu ML and Yin CQ. 2012c. Petrology and metamorphic *PT* path of high-pressure mafic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Lithos*, 155: 94–109
- 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)
- Wan YS, Song B, Liu DY, Wilde SA, Wu JS, Shi YR, Yin XY and Zhou HY. 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event. *Precambrian Research*, 149(3–4): 249–271
- Wan YS, Dong CY, Wang W, Xie HQ and Liu DY. 2010. Archean basement and a Paleoproterozoic collision orogen in the Huoqiu area at the southeastern margin of North China Craton: Evidence from sensitive high resolution ion micro-probe U-Pb zircon geochronology. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 91–104
- 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)
- Wang HL, Chen L, Sun Y, Liu XM, Chen JL, Zhang H and Diwu CR. 2007. ~4.1Ga xenocrystal zircon from Ordovician volcanic rocks in western part of North Qinling orogenic belt. *Chin. Sci. Bull.*, 52(21): 3002–3010
- Wang LG, Qiu YM, McNaughton NJ, Groves DI, Luo ZK, Huang JZ, Miao LC and Liu YK. 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids. *Ore Geology Reviews*, 13(1–5): 275–291
- Wu FY, Yang JH, Liu XM, Li TS, Xie LW and Yang YH. 2005. Hf isotopes of the 3.8Ga zircons in eastern Hebei Province, China: Implications for early crustal evolution of the North China Craton. *Chin. Sci. Bull.*, 50(21): 2473–2480
- 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(3–4): 339–362
- Yang CH, Du LL, Ren LD, Song HX, Wan YS, Xie HQ and Geng YS. 2013. Delineation of the ca. 2.7Ga TTG gneisses in the Zanzhuang Complex, North China Craton and its geological implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 178–189
- 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
- Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Lu FX, Wang CY, Zhang M, Wang FZ and Li HM. 2004. 3.6Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the North China Craton. *Geology*, 32(3): 229–232
- Zhou HY, Liu DY, Wan YS, Wilde SA and Wu JS. 2007. 3.3Ga magmatic event in Anshan area: New SHRIMP age and geochemical constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 123–129
- Zhou JB, Wilde SA, Zhao GC, Zheng CQ, Jin W, Zhang XZ and Cheng H. 2008a. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Neoproterozoic Penglai Group and Archean gneisses from the Jiaobei Terrane, North China, and their tectonic implications. *Precambrian Research*, 160(3–4): 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. 2008b. 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(3): 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
- 董晓杰, 徐仲元, 刘正宏, 沙茜. 2012. 内蒙古大青山北麓 2.7Ga 花岗质片麻岩的发现及其地质意义. *地球科学*, 37(增刊): 45–52
- 多吉, 温春齐, 郭建慈, 范小平, 李小文. 2007. 西藏 4.1Ga 碎屑锆石年龄的发现. *科学通报*, 52(1): 19–22
- 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
- 简平, 张旗, 刘敦一, 金维浚, 贾秀勤, 钱青. 2005. 内蒙古固阳晚太古代赞岐岩 (sanukite)-角闪花岗岩的 SHRIMP 定年及其意义. *岩石学报*, 21(1): 151–157
- 靳克, 许文良, 王清海, 高山, 刘晓春. 2003. 蚌埠淮光“混合花岗闪长岩”的形成时代及源区: 锆石 SHRIMP U-Pb 地质年代学证据. *地球学报*, 24(4): 331–335
- 李旭平, 郭敬辉, 赵国春, 李洪奎, 宋召军. 2011. 胶北地块早元古代钙硅酸盐岩与高压基性麻粒岩成因及地质意义. *岩石学报*, 27(4): 961–968
- 刘福来, 刘平华, 丁正江, 刘建辉, 杨红, 胡伟华. 2012. 山东半岛高压麻粒岩中花岗质浅色脉体的成因. *岩石学报*, 28(9): 2686

- 2696

- 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. 山东半岛高压麻粒岩中锆石的 U-Pb 定年及其地质意义. 地学前缘, 18(2): 33-54
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 刘建辉. 2011b. 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, 杨红, 施建荣. 2012. 胶北高级变质基底中高压基性麻粒岩的地球化学特征及其成因. 岩石学报, 28(9): 2705-2720
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 刘建辉, 蔡佳. 2013. 胶北西留古元古代 ~ 2.1Ga 变辉长岩岩石学与年代学初步研究. 岩石学报, 29(7): 2371-2390
- 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
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 219-230
- 马铭株, 徐仲元, 张连昌, 董春艳, 董晓杰, 刘守偈, 刘敦一, 万渝生. 2013. 内蒙古武川西乌兰不浪地区早前寒武纪变质基底锆石 SHRIMP 定年及 Hf 同位素组成. 岩石学报, 29(2): 501-516
- 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
- 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
- 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