

·专题研究·

秦皇岛柳江地区长龙山组石英砂岩物质源区组成 ——来自碎屑锆石 U-Pb-Hf 同位素的证据

第五春荣 孙 勇 刘养杰 韩 伟 戴梦宁 李永项

(大陆动力学国家重点实验室, 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069)

摘 要: 在秦皇岛市柳江地区出露最古老的沉积岩为青白口系长龙山组石英砂岩, 该石英砂岩与下伏的新太古代钾质花岗岩呈不整合接触。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年显示该区长龙山组石英砂岩中碎屑锆石年龄分布在 2 635 ~ 2 487 Ma 之间, 其物质源区较单一。与北京—蓟县标准剖面相比, 本研究区在较长的一段地质时期为古陆壳的剥蚀区, 直至新元古代早期, 又沉积了长龙山组滨海相碎屑岩。碎屑锆石 Hf 同位素组成显示, 它们的源区物质虽然有不同的壳幔混合, 但主要来自于古老的地壳物质再循环, 暗示在 ~2.5 Ga 其碎屑物质源区的地壳已经达到一定的规模和厚度。

关键词: 华北克拉通, 青白口系, 长龙山组, 石英砂岩, 碎屑锆石

中图分类号: P597 P588.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)01-0001-12

The protolith nature of quartz sandstone from Changlongshan Formation in Liujiang area, Qinhuangdao City: evidence of U-Pb and Hf-isotope from detrital zircons

DIWU Chun-rong, SUN Yong, LIU Yang-jie, HAN Wei, DAI Meng-ning and LI Yong-xiang
(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: With the development of the in situ zircon SHRIMP U-Pb dating method and laser ablation ICP-MS, the study of the age distribution of detrital zircons from sedimentary rocks has become an effective way to find the source area of clastic material and also become an important topic all over the world. However, during zircon laser ablation (LA)-ICPMS dating, the U-Pb isotopic fractionation remains one of the principal obstacles for precise zircon dating. The experiments performed by the authors demonstrate that a low laser frequency (5 Hz or 6 Hz) would reduce element fractionation during laser ablation. The U-Pb ages of international zircon standards GJ-1 and the laboratory zircon standard SK10-2 were measured by LA-ICP-MS in 20 μm spot size at 5 Hz laser frequency. The reduce mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages obtained in our analysis are in good agreement with the published values. Quartz sandstone from Changlongshan Formation of Qingbaikou System, the oldest metasedimentary rock in Liujiang area of Qinhuangdao City, was deposited unconformably on the Neoproterozoic potassic granite. Detrital zircons from the quartz sandstone have $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of 2 635 Ma to 2 487 Ma. A comparison with the Beijing-Jixian stratigraphic section, from Early Proterozoic, the study area experienced a long period of weathering and erosion, and then began to deposit on the surface and become the source area of clastic sediments

收稿日期: 2010-03-26; 修订日期: 2010-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(40902056), 西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项

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

of the Changlongshan Formation until the early Neoproterozoic. Hf isotopic compositions of the detrital zircons indicate that the clasts were mainly derived from the reworked ancient crust, suggesting that the mass of the continental crust was largely established at ~ 2.5 Ga in its source area.

Key words: North China Craton; Qingbaikou System; Changlongshan Formation; quartz sandstone; detrital zircons

锆石具有较强的抗风化性和抗干扰性,在漫长的地质演化、沉积循环过程中仍能保持其原生特征,故近年来,利用古老(变)沉积岩中碎屑锆石的 U-Pb-Hf 同位素组成不仅可以获得地层年代学方面的信息,还可以探讨沉积岩源区的物质特征,因此,这方面的研究已成为目前国内外地学界研究的热点之一(DeCelles and Currie, 1996; Wan *et al.*, 2003; Diwu *et al.*, 2008)。

激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICPMS)锆石 U-Pb 测年方法具有快速、成本低,以及准确度和精度较高等特点,因此该技术是近年来发展最快、最有潜力的锆石定年和矿物微区分析技术之一(Simon *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2007; Yuan *et al.*, 2008)。秦皇岛地区大地构造位置属于华北克拉通东部,长龙山组是该区出露最老的沉积岩,与景儿峪组一同划归为青白口系。本文利用 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年方法对秦皇岛柳江地区张崖子一带出露的长龙山组石英砂岩中的碎屑锆石开展了年代学研究,并结合碎屑锆石的 Hf 同位素组成,追踪该石英砂岩的源区,探讨该区新太古代末期地壳的形成和演化特征。

1 地质背景和样品概述

自新元古代以来,秦皇岛柳江盆地区内除缺失中、上奥陶系,志留系,泥盆系,下石炭统,下、中三叠统及白垩系外,其余华北型沉积地层发育齐全,且各地层界限清楚,岩石类型齐全。该地区的青白口系包括长龙山组(又称之为“骆驼岭组”)和景儿峪组(也有称之为“井儿峪组”)。原长春地质学院(1984)将秦皇岛柳江盆地青白口系划分为下部下马岭组和上部景儿峪组,而后的 1:5 万^①和 1:25 万^②区调工作均认为,该地区缺失下马岭组,由下至上划分为长龙山组和景儿峪组(刘振峰等,1994)。

长龙山组是研究区内最古老的沉积地层单位,主要分布在东部的张崖子和南部的鸡冠山,其中以张崖子一带出露最全,厚度为 91 m。主要由两个沉积韵律组成,下部韵律层底部为含砾的石英砂岩,向上过渡为紫色、黄绿色杂色页岩;上部韵律层底部砂岩稳定成分增加,顶部出现泥灰岩(孙世超,1992;滕志宏等,1999)。下部的砂岩中可见海成波痕和交错层理,含海绿石等矿物,属滨海沉积环境。与下伏的新太古代绥中花岗岩之间呈不整合接触(图 1, 2a),在二者接触的界面可见到不连续分布的薄层红色褐铁矿和高岭土层,呈古风化壳特征(图 2b)。此外,在长龙山组的底部可见到含砾石英砂岩,砾石为石英,分选、磨圆度较好。本文所研究的石英砂岩样品 LS 采自于张崖子村北, GPS 点位为:北纬 40° 08.495', 东经 119° 39.990'。

2 测试方法及激光频率的优化

2.1 仪器设备及分析方法

将人工重砂分离出的锆石颗粒随机地固定在环氧树脂表面并抛光,抛光后对待测锆石进行透射光、反射光和阴极发光(CL)照相,以帮助选定最佳的锆石测定部位及数据解释。锆石的 U-Pb-Hf 同位素以及微量元素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。将德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M 型 193 nm ArF 准分子激光器与 ICP-MS 仪器连接。ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a,该仪器采用 Omega II 离轴透镜系统,特有的 Shield Torch 技术可明显提高溶液分析的灵敏度。在标准模式下,采用 100 $\mu\text{L}/\text{min}$ PFA 微量雾化器及同心双筒雾室,优化仪器至 ^{89}Y 的灵敏度 > 60 Mcps/ 10^{-6} , $^{205}\text{Tl} > 30$ Mcps/ 10^{-6} ,并具有最小的氧化物产率($\text{CeO}^+/\text{Ce}^+ < 1\%$)和最低的背景值(220 和 5 质量峰 < 5 cps)。改在激光剥蚀固体进样条件下,采

① 河北省地质矿产局, 1987. 中华人民共和国区域地质调查报告 1:5 万秦皇岛幅。

② 河北省地质矿产局, 2005. 中华人民共和国区域地质调查报告 1:25 万秦皇岛幅。

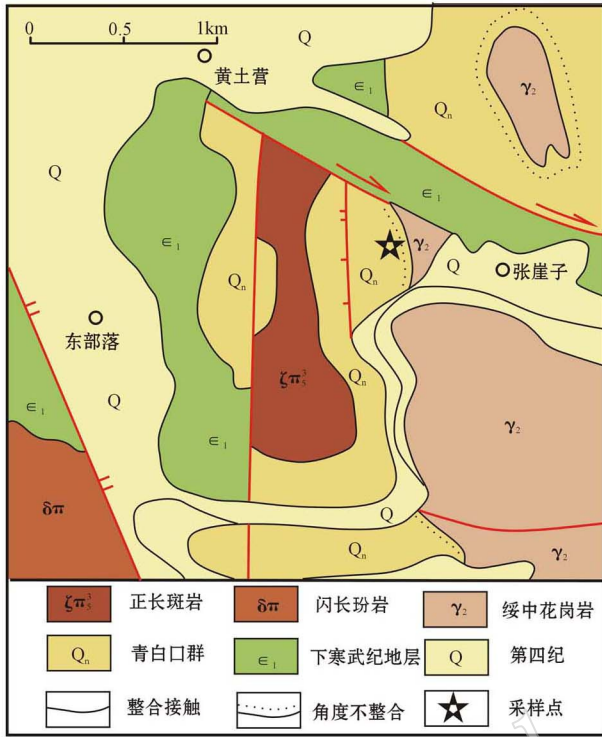


图 1 张崖子地区地质简图
Fig. 1 Geological sketch map of Zhangyazi area

用 He 作为剥蚀物质的载气, 当激光束斑直径为 20 μm , 频率为 6 Hz 时, 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 NIST SRM610 进行仪器最佳化, 使仪器达到最大的灵敏度 (^{238}U 灵敏度 $>460 \text{ cps}/10^{-6}$)、最小的氧化物产率 ($\text{ThO}/\text{Th} < 1\%$) 以及最低的背景值 (U 、 Th 、 Pb 计数均 < 100) 和稳定的信号。

激光采样方式为单点剥蚀。ICP-MS 数据采集模式为 Time-resolved Analysis, 采用每个质量峰采集一点的跳峰方式, 单点滞留时间分别设定为 6 ms (Si , Ti , Nb , Ta 及 REE)、15 ms (^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 及 ^{208}Pb) 和 10 ms (^{232}Th 、 ^{238}U)。每测定 6 个样品点测定两个 91500 和一个 NIST610, 间隔 12 个样品点测定一个 GJ-1 和 SK10-2, 对测试结果进行监控。每个分析点的气体背景采集时间为 20 s, 信号采集时间为 40 s。数据处理采用 GLITTER (ver 4.0) 程序, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{U}/^{235}\text{U}$ ($^{235}\text{U} = ^{238}\text{U}/137.88$)、 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 的比值则采用标准锆石 91500 为外部标准进行校正。元素浓度计算以 Si 作内标, 采用 NIST610 作外标。锆石谐和图用 Isoplot 程序 (ver 3.0) 获得 (Ludwig, 2003)。

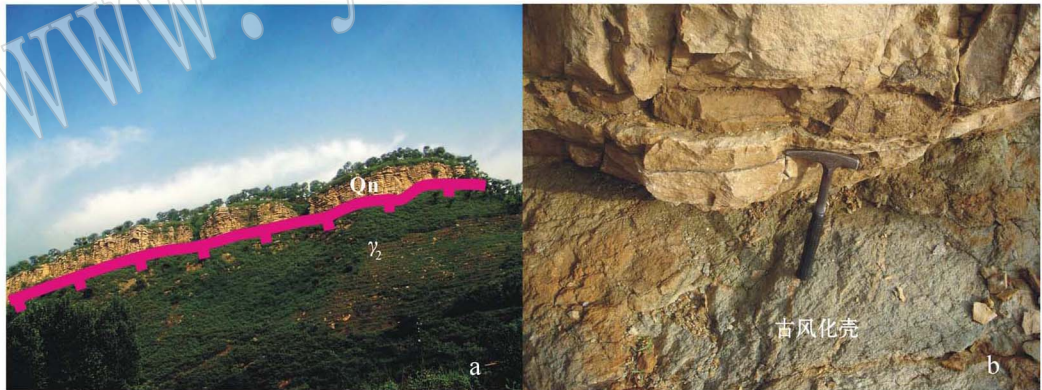


图 2 野外照片

Fig. 2 Field photograph

a—长龙山组石英砂岩与下伏新太古代花岗岩呈不整合接触; b—二者接触界面上可见古风化壳

a—quartz sandstone from Changlongshan Formation deposited unconformably on the Neoproterozoic potassium-rich granite;

b—ancient weathering crust

2.2 激光频率的优化

激光剥蚀过程中的 U-Pb 元素分馏效应是目前 LA-ICPMS 在锆石 U-Pb 定年中仍需克服的两大技术难题之一 (Longerich *et al.*, 1996; Günther *et al.*, 1999; Horn *et al.*, 2000; Košler *et al.*, 2002)。诱导

元素分馏因素是多方面的, 如激光器的类型, 样品剥蚀池的设计, 样品在剥蚀、传输、离子化过程等诸多方面的因素 (Guillong *et al.*, 2003)。而且分析信号强度和 U/Pb 比值在同一激光器的不同参数下, 如激光波长、功率、光束直径、频率等也有明显的变化。

限于篇幅,本文仅探讨激光频率对元素灵敏度以及元素分馏的影响。实验选用 20 μm 剥蚀斑径,对应 50 mJ 的能量进行实验,仪器工作参数见表 1。从图 3a 可以看出,随着激光频率的增加,硅酸盐玻璃国际标样 NIST610 中的 ^{238}U 和 ^{206}Pb 的灵敏度,起初增加较快;当激光频率改为 8 Hz 后,元素的灵敏度增加较缓慢。为考察激光频率所引起的分馏,这里采用绝对分馏因子的概念,如果分馏因子接近于 1,说明该被测元素分馏行为可忽略不计。从图 3b 可以看出,随着激光频率的增大,标准锆石样品 91500 和 GJ-1 中 ^{238}U 和 ^{206}Pb 元素的绝对分馏因子总体呈增大的趋势,但是当激光频率改为 16 Hz 时, ^{238}U 的绝对分馏因子呈下降趋势,而 ^{206}Pb 仍然呈上升趋势,二者分馏行为表现出明显不同。综合考虑,为获得较高的灵敏度和较小的元素分馏效应,将激光频率设定为 5~6 Hz 应是一个合理的选择。

表 1 LA-ICPMS 工作参数

Table 1 LA-ICPMS operating parameters

ICP-MS 分析参数	
RF 功率	1 320 W
采样深度	6.0 mm
混合气流速	0.94 L/min
提取透镜 1	-163.5 V
提取透镜 2	-93 V
Einzel 透镜 1,3	-90 V
Einzel 透镜 2	7 V
Omega Bias	-40 V
Omega 透镜(+)	4.4 V
Omega 透镜(-)	4.2 V
QP 聚焦	3.9 V
Plate 偏压	-8 V
Laser 工作参数	
波长	193 nm
能量	50 mJ
斑束	20 μm
频率	5 Hz
载气流速	0.67 L/min

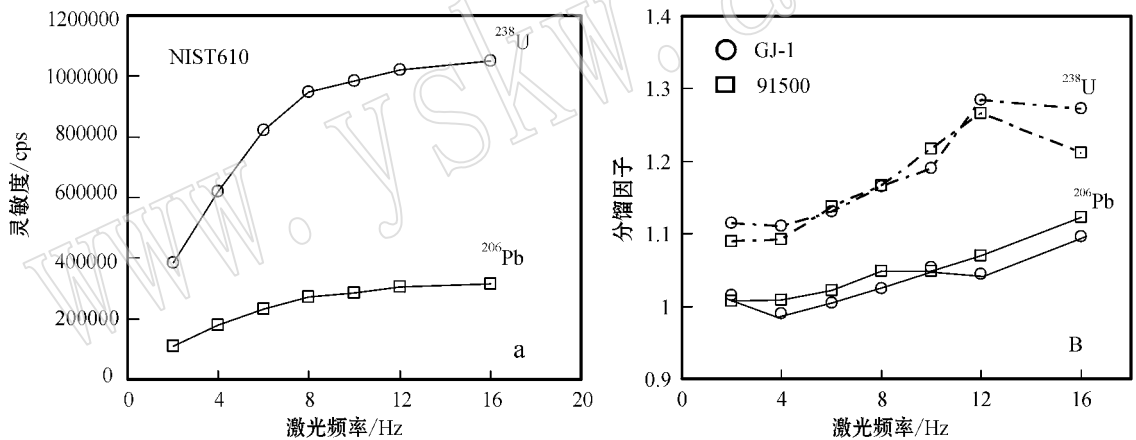


图 3 激光频率的变化对硅酸盐玻璃国际标样 NIST610 中的 ^{238}U 和 ^{206}Pb 的灵敏度(a)和对锆石标样 91500 和 GJ-1 中 ^{238}U 和 ^{206}Pb 的绝对分馏因子(b)的影响

Fig. 3 The effect of ^{238}U and ^{206}Pb sensitivity on NIST SRM 610 glass(a) and the fractionation factors of ^{238}U and ^{206}Pb on standard zircon 91500 and GJ-1(b) for a given laser frequency

2.3 锆石原位 Hf 同位素分析

锆石原位 Lu-Hf 同位素测定在英国 Nu 公司生产的 Nu Plasma HR 多接收器等离子体质谱仪上完成,激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M,锆石原位 Lu-Hf 同位素测定用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02669$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5886$ 进行同量异位干扰校正计算测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值。在样品测定期间,分析获得锆石 91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282295 \pm 0.000027$ ($n = 14, 2\sigma$),

标样 GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282734 \pm 0.000015$ ($n = 16, 2\sigma$),分别与推荐值 $0.2823075 \pm 58(2\sigma)$ (Wu *et al.*, 2006)和 $0.282015 \pm 0.000019(2\sigma)$ (Elhlou *et al.*, 2006)相吻合。 ϵHf 的计算采用 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11}\text{a}$ (Scherer *et al.*, 2001),球粒陨石现今的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$ 、 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997);Hf 亏损地幔模式年龄(t_{DM})的计算采用现今的亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$ (Ver-voot and Blichert-Toft, 1999)。Hf 同位素单阶段模

式年龄 t_{DMI} 以亏损地幔为参考计算。两阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 计算时, 下地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.022 (Amelin *et al.*, 2000)。

3 测试结果

3.1 标准锆石

在上述仪器和仪器参数条件下, 本文对澳大利亚 Macquarie 大学标准锆石 GJ-1 和实验室内部参考标准锆石 SK10-2 (分选自辉长岩) 进行了年龄测定,

具体测定结果图 4。在 $20\ \mu\text{m}$ 束斑直径和 $5\ \text{Hz}$ 激光剥蚀条件下获得 GJ-1 10 个 U-Pb 数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $602.8 \pm 6.8\ \text{Ma}$ (2σ , 图 4), 该标准锆石之前 Wiedenbeck 等(1995)利用 TIMS 方法测得其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $608.53 \pm 0.37\ \text{Ma}$ (2σ), 二者在误差范围内完全一致。测得实验室内部标准 SK10-2 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $31.31 \pm 0.48\ \text{Ma}$ (2σ), 前人利用 SHRIMP 法和 LA-ICPMS 法获得此锆石的年龄结果分别为 $31.6 \pm 1.3\ \text{Ma}$ (2σ) 和 $31.9 \pm 0.4\ \text{Ma}$ (2σ) 测试结果在误差范围

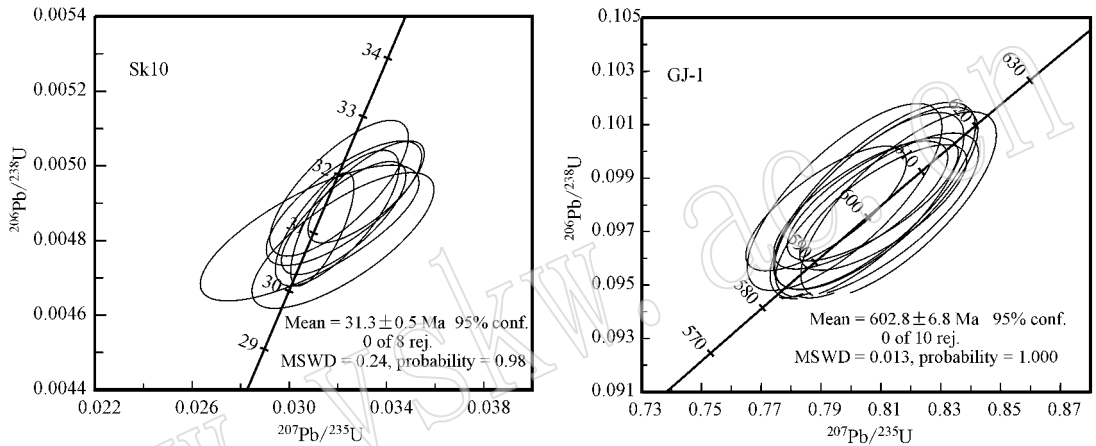


图 4 标准锆石 SK10 和 GJ-1 的 U-Pb 同位素年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagram of standard zircon SK10 and GJ-1

内完全一致 (Wu *et al.*, 2001)。

3.2 石英砂岩

3.2.1 锆石 U-Pb 年龄和微量元素

从石英砂岩样品中分离出约 1 000 粒锆石, 锆石大小不等, 粒径多为 $50\sim 100\ \mu\text{m}$, 大都呈浑圆状, 表明遭受过强烈的磨蚀。阴极发光 (CL) 图像 (图 5) 显示, 大部分锆石 CL 发光性较差, 具有明显的核边结构, 边部具有明显的密成分振荡环带。对 84 粒碎屑锆石进行了 U-Pb 年龄和微量元素测定, 分析数据见表 2。结果显示大多数锆石的 U、Th 含量分别为 $24 \times 10^{-6} \sim 1\ 625 \times 10^{-6}$ 、 $19 \times 10^{-6} \sim 512 \times 10^{-6}$, Th/U 比值变化范围为 $0.3\sim 2.3$, 上述特征表明, 这些锆石主要来自岩浆岩物源区。个别碎屑锆石 (如分析点 LS-86) 无明显密集的成分振荡环带, 并具有较低的 U (56×10^{-6})、Th (7×10^{-6}) 含量以及较低的 Th/U 值 (0.1), 因此这类碎屑锆石可能为变质成因的。

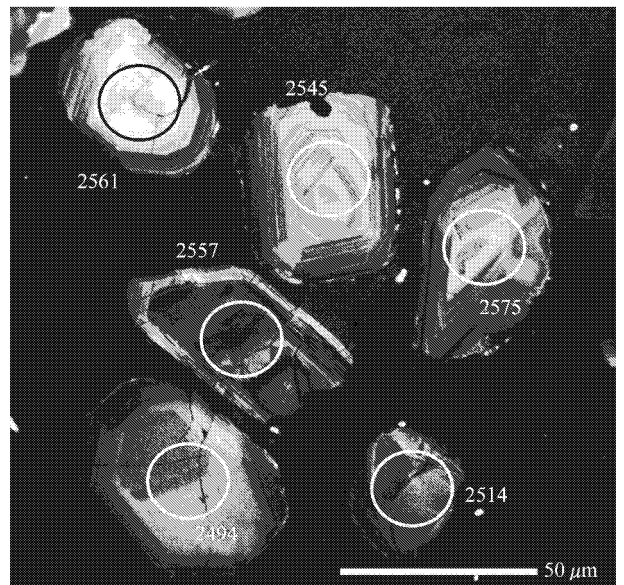


图 5 长龙山组石英砂岩中锆石的 CL 图像

Fig. 5 CL images of zircons in quartz sandstone from Changlongshan Formation

表 2 长龙山组石英英砂岩中碎屑锆石年龄的测试结果

Table 2 Isotope ratios and U-Pb ages of quartz sandstone from Changlongshan Formation

编号	样品号	$w_{\text{Pb}}/10^{-6}$		Th/U	Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
		Pb	Th			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$I\sigma$					
1	LS-02	57	102	71	1.4	0.166 88	0.004 44	10.994 87	0.246 77	0.477 71	0.010 05	2.527	44	2 523	21	2 517	44
2	LS-03	58	97	95	1.0	0.178 07	0.004 75	12.061 99	0.271 35	0.491 14	0.010 37	2.635	44	2 609	21	2 576	45
3	LS-06	20	31	27	1.2	0.172 83	0.005 03	11.932 56	0.300 90	0.500 61	0.010 91	2.585	48	2 599	24	2 616	47
4	LS-08	38	50	53	0.9	0.168 71	0.004 52	11.209 93	0.253 88	0.481 77	0.010 16	2.545	44	2 541	21	2 535	44
5	LS-09	74	61	115	0.5	0.164 63	0.004 31	11.413 98	0.250 92	0.502 69	0.010 52	2.504	43	2 558	21	2 625	45
6	LS-10	28	43	38	1.1	0.175 36	0.004 93	12.284 76	0.296 13	0.507 95	0.010 93	2.609	46	2 626	23	2 648	47
7	LS-11	42	34	62	0.5	0.166 73	0.004 43	11.261 22	0.252 16	0.489 72	0.010 28	2.525	44	2 545	21	2 570	44
8	LS-13	66	93	101	0.9	0.172 53	0.005 36	10.599 70	0.288 46	0.445 47	0.009 97	2.582	51	2 489	25	2 375	44
9	LS-14	30	33	46	0.7	0.168 02	0.005 01	11.486 13	0.297 88	0.495 67	0.010 90	2.538	49	2 564	24	2 595	47
10	LS-15	165	204	1 256	0.2	0.167 65	0.004 43	12.079 40	0.268 18	0.522 30	0.010 96	2.534	44	2 610	21	2 709	46
11	LS-17	40	55	55	1.0	0.174 03	0.004 64	11.676 40	0.262 18	0.486 60	0.010 24	2.597	44	2 579	21	2 556	44
12	LS-18	36	44	52	0.9	0.167 46	0.004 50	11.212 85	0.254 84	0.485 50	0.010 24	2.532	44	2 541	21	2 551	44
13	LS-19	36	41	51	0.8	0.172 32	0.004 64	11.678 02	0.265 40	0.491 38	0.010 38	2.580	44	2 579	21	2 577	45
14	LS-21	24	28	35	0.8	0.168 22	0.004 72	11.015 81	0.264 67	0.474 81	0.010 18	2.540	46	2 525	22	2 505	44
15	LS-25	31	46	43	1.1	0.172 52	0.004 74	11.371 38	0.265 60	0.477 95	0.010 16	2.582	45	2 554	22	2 518	44
16	LS-26	47	45	70	0.6	0.164 97	0.004 35	11.185 60	0.247 34	0.491 66	0.010 28	2.507	44	2 539	21	2 578	44
17	LS-27	69	77	103	0.8	0.168 73	0.004 35	11.066 50	0.237 47	0.475 57	0.009 87	2.545	43	2 529	20	2 508	43
18	LS-28	41	54	58	0.9	0.169 22	0.004 50	11.062 71	0.247 73	0.474 03	0.009 95	2.550	44	2 528	21	2 501	44
19	LS-30	43	58	61	0.9	0.163 65	0.004 37	10.805 32	0.243 18	0.478 78	0.010 06	2.494	44	2 507	21	2 522	44
20	LS-32	29	36	42	0.9	0.165 67	0.004 59	11.013 17	0.260 25	0.482 04	0.010 26	2.513	46	2 524	22	2 536	45
21	LS-33	99	115	285	0.4	0.166 52	0.004 52	10.923 52	0.250 57	0.475 67	0.010 05	2.524	45	2 517	21	2 508	44
22	LS-34	41	50	61	0.8	0.171 15	0.004 56	11.021 91	0.247 26	0.466 96	0.009 80	2.569	44	2 525	21	2 470	43
23	LS-35	33	49	103	0.5	0.170 32	0.004 98	10.742 33	0.270 96	0.457 33	0.009 95	2.561	48	2 501	23	2 428	44
24	LS-37	76	83	131	0.6	0.166 41	0.004 39	10.148 19	0.224 21	0.442 20	0.009 20	2.522	44	2 448	20	2 361	41
25	LS-38	63	61	106	0.6	0.169 95	0.004 56	11.249 92	0.254 61	0.479 99	0.010 09	2.557	44	2 544	21	2 527	44
26	LS-39	29	54	41	1.3	0.166 11	0.004 68	10.654 16	0.256 59	0.465 09	0.009 91	2.545	43	2 483	20	2 408	42
27	LS-41	51	50	76	0.7	0.165 99	0.004 33	10.930 22	0.238 29	0.477 49	0.009 94	2.518	43	2 517	20	2 516	43
28	LS-42	38	95	54	1.8	0.164 84	0.004 48	10.658 15	0.245 12	0.468 86	0.009 87	2.506	45	2 494	21	2 479	43
29	LS-43	56	58	89	0.7	0.168 76	0.004 42	10.538 02	0.231 06	0.452 79	0.009 41	2.545	43	2 483	20	2 408	42
30	LS-45	77	122	181	0.7	0.163 19	0.004 57	10.547 27	0.252 25	0.468 66	0.010 00	2.489	46	2 484	22	2 478	44
31	LS-46	22	56	25	2.2	0.168 56	0.004 91	10.753 27	0.269 96	0.462 59	0.010 02	2.543	48	2 502	23	2 451	44
32	LS-47	46	44	68	0.6	0.171 09	0.004 55	11.399 72	0.254 34	0.483 15	0.010 09	2.568	44	2 556	21	2 541	44
33	LS-48	20	54	23	2.3	0.166 72	0.004 98	11.029 74	0.286 35	0.479 73	0.010 48	2.525	49	2 526	24	2 526	46
34	LS-49	50	82	75	1.1	0.164 26	0.004 42	10.366 14	0.235 00	0.457 61	0.009 61	2.500	45	2 468	21	2 429	42
35	LS-50	24	37	34	1.1	0.169 80	0.004 76	11.165 63	0.267 02	0.476 85	0.010 18	2.556	46	2 537	22	2 514	44
36	LS-52	17	19	24	0.8	0.172 03	0.005 01	11.833 74	0.297 29	0.498 83	0.010 82	2.578	48	2 591	24	2 609	47
37	LS-53	85	77	129	0.6	0.167 10	0.004 27	11.015 03	0.232 63	0.478 01	0.009 86	2.529	42	2 524	20	2 519	43
38	LS-54	19	42	25	1.7	0.172 44	0.005 00	10.894 20	0.272 04	0.458 14	0.009 92	2.581	48	2 514	23	2 431	44
39	LS-55	38	79	47	1.7	0.171 08	0.004 77	11.131 09	0.263 86	0.471 80	0.010 04	2.568	46	2 534	22	2 492	44
40	LS-57	40	41	61	0.7	0.165 60	0.004 50	10.938 52	0.251 10	0.479 01	0.010 08	2.514	45	2 518	21	2 523	44
41	LS-61	68	52	100	0.5	0.167 34	0.004 37	11.011 80	0.208 08	0.478 99	0.008 53	2.531	43	2 524	18	2 523	37
42	LS-62	30	58	36	1.6	0.163 76	0.004 70	10.418 76	0.231 83	0.463 06	0.008 65	2.495	48	2 473	21	2 453	38

续表 2

Continued Table 2

编号	样品号	$w_{\text{wt}}/10^{-6}$				Th/U	同位素比值				年龄/Ma						
		Pb	Th	U	Th/U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\text{I}\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\text{I}\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\text{I}\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\text{I}\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\text{I}\sigma$	
43	LS-63	51	31	78	0.4	0.00444	0.16794	10.94287	0.21167	0.47423	0.00851	2.537	44	2.518	18	2.502	37
44	LS-65	20	18	28	0.7	0.00504	0.17198	11.21849	0.25776	0.47470	0.00900	2.577	48	2.542	21	2.504	39
45	LS-66	44	50	63	0.8	0.00437	0.16578	10.36272	0.19986	0.45483	0.00816	2.516	44	2.468	18	2.417	36
46	LS-67	47	59	65	0.9	0.00440	0.16638	10.61429	0.20640	0.46415	0.00837	2.522	44	2.490	18	2.458	37
47	LS-68	38	44	53	0.8	0.00449	0.16758	11.09820	0.22131	0.48181	0.00876	2.534	44	2.531	19	2.535	38
48	LS-74	29	28	42	0.7	0.00453	0.16787	11.12706	0.22622	0.48196	0.00886	2.537	45	2.534	19	2.536	39
49	LS-76	24	32	32	1.0	0.00461	0.16763	11.06769	0.23250	0.48002	0.00892	2.534	45	2.529	20	2.527	39
50	LS-78	81	152	94	1.6	0.00430	0.16691	11.06008	0.20778	0.48171	0.00869	2.527	43	2.528	17	2.535	38
51	LS-79	96	99	253	0.4	0.00446	0.16868	10.96485	0.21667	0.47245	0.00866	2.545	44	2.520	18	2.494	38
52	LS-84	94	87	110	0.8	0.00438	0.17026	11.36420	0.21500	0.48499	0.00881	2.560	42	2.554	18	2.549	38
53	LS-86	36	7	56	0.1	0.00441	0.17175	11.40120	0.21596	0.48220	0.00879	2.575	42	2.557	18	2.537	38
54	LS-87	46	84	59	1.4	0.00441	0.16958	11.02689	0.21358	0.47232	0.00866	2.554	43	2.525	18	2.494	38
55	LS-89	19	31	24	1.3	0.00461	0.16395	10.96329	0.24134	0.48566	0.00925	2.497	47	2.520	20	2.552	40
56	LS-90	40	52	56	0.9	0.00437	0.16658	10.97678	0.21633	0.47854	0.00884	2.524	43	2.521	18	2.521	39
57	LS-91	34	42	50	0.9	0.00442	0.16735	10.76754	0.21475	0.46720	0.00867	2.531	44	2.503	19	2.471	38
58	LS-92	78	70	116	0.6	0.00427	0.16799	11.16350	0.20887	0.48251	0.00881	2.538	42	2.537	17	2.538	38
59	LS-94	21	27	30	0.9	0.00458	0.16583	10.76377	0.23151	0.47123	0.00895	2.516	46	2.503	20	2.489	39
60	LS-95	22	33	28	1.2	0.00447	0.16611	11.27822	0.23320	0.49289	0.00926	2.519	45	2.546	19	2.583	40
61	LS-99	21	31	27	1.1	0.00454	0.16386	11.29832	0.24592	0.50036	0.00958	2.496	46	2.548	20	2.615	41
62	LS-101	23	24	33	0.7	0.00439	0.16295	11.03094	0.23022	0.49119	0.00931	2.487	45	2.526	19	2.576	40
63	LS-104	22	27	31	0.9	0.00450	0.16634	11.36834	0.23915	0.49574	0.00945	2.521	45	2.554	20	2.596	41
64	LS-105	58	39	88	0.4	0.00430	0.16843	11.59731	0.22239	0.49942	0.00929	2.542	42	2.573	18	2.611	40
65	LS-109	59	104	72	1.4	0.00427	0.16620	11.51788	0.22427	0.50247	0.00943	2.520	42	2.566	18	2.624	40
66	LS-110	46	76	112	0.7	0.00427	0.16444	10.88899	0.21640	0.48009	0.00906	2.502	43	2.514	18	2.528	39
67	LS-112	24	42	29	1.4	0.00457	0.16718	11.36271	0.24517	0.49270	0.00953	2.530	45	2.553	20	2.582	41
68	LS-113	62	46	96	0.5	0.00417	0.16368	11.04811	0.21328	0.48930	0.00918	2.494	42	2.527	18	2.568	40
69	LS-114	24	27	35	0.8	0.00451	0.16796	11.17387	0.23437	0.48222	0.00926	2.537	44	2.538	20	2.537	40
70	LS-115	28	51	34	1.5	0.00447	0.16645	11.49616	0.24191	0.50056	0.00964	2.522	44	2.564	20	2.616	41
71	LS-116	133	512	1625	0.3	0.00418	0.16339	10.69642	0.20885	0.47443	0.00896	2.491	42	2.497	18	2.503	39
72	LS-117	1	38	63	0.6	0.00431	0.16671	11.21491	0.22317	0.48749	0.00926	2.525	43	2.541	19	2.560	40
73	LS-118	94	75	158	0.5	0.00416	0.16556	10.41909	0.19807	0.45601	0.00856	2.513	42	2.473	18	2.422	38
74	LS-119	51	36	81	0.4	0.00423	0.16528	11.15436	0.21855	0.48901	0.00926	2.510	42	2.536	18	2.566	40
75	LS-121	19	45	26	1.7	0.00502	0.16469	11.30493	0.28788	0.49725	0.01023	2.504	50	2.549	24	2.602	44
76	LS-122	32	32	47	0.7	0.00445	0.16969	11.63242	0.23849	0.49655	0.00956	2.555	43	2.575	19	2.599	41
77	LS-123	32	40	46	0.9	0.00438	0.16662	11.29210	0.23218	0.49087	0.00946	2.524	43	2.548	19	2.574	41
78	LS-125	30	35	43	0.8	0.00436	0.16536	11.16315	0.23097	0.48892	0.00945	2.511	44	2.537	19	2.566	41
79	LS-126	18	27	25	1.1	0.00467	0.17012	11.26092	0.24744	0.47936	0.00944	2.559	45	2.545	20	2.525	41
80	LS-127	56	40	89	0.5	0.00428	0.16820	11.43158	0.22429	0.49212	0.00941	2.540	42	2.559	18	2.580	41
81	LS-128	21	55	25	2.2	0.00461	0.16640	10.87036	0.24290	0.47299	0.00937	2.522	46	2.512	21	2.497	41
82	LS-129	39	65	56	1.2	0.00434	0.16700	10.75965	0.21888	0.46646	0.00901	2.528	43	2.503	19	2.468	40
83	LS-131	24	25	37	0.7	0.00435	0.16301	10.99056	0.23284	0.48809	0.00954	2.487	44	2.522	20	2.562	41
84	LS-132	49	40	79	0.5	0.00425	0.16627	11.12855	0.22107	0.48449	0.00932	2.520	42	2.534	19	2.547	40

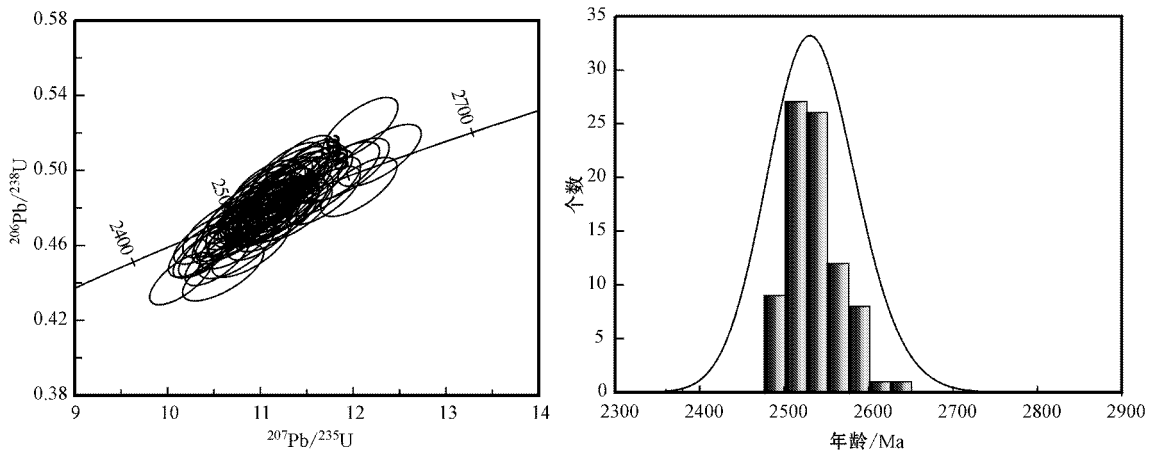


图 6 长龙山组石英砂岩中锆石的 U-Pb 谐和图 (a) 及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄频率分布直方图 (b)

Fig. 6 U-Pb concordia diagram (a) and probability diagram of zircon $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages (b) for quartz sandstone from Changlongshan Formation

在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图上, 大多数锆石在谐和线附近分布, 少数点沿不一致线分布 (图 6)。锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄较一致, 介于 2 487~2 635 Ma 之间, 对所有碎屑锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测定年龄结果作频率分布图 (图 6)。从图中可以看出, 其中 2 500~2 600 Ma 的数据构成主体, 约占所测数据的 90% 左右。

3.2.2 锆石 Hf 同位素组成

对 51 粒碎屑锆石的 Hf 同位素分析结果 (表 3) 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 0.000 7, 表明锆石在形成后具有极低量的放射成因 Hf 积累。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围为 0.281 01~0.281 25, 以每个锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄计算对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围较大, 为 -8.0~2.2 (图 7), 并计算得到其 t_{DM} 范围为 2 761~3 308 Ma。

4 讨论

4.1 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年存在的问题

如前所述, 激光剥蚀过程中的 U-Pb 元素分馏效应是目前 LA-ICPMS 在锆石 U-Pb 定年中仍需克服的两大技术难题之一 (Longerich *et al.*, 1996; Günther *et al.*, 1999; Horn *et al.*, 2000; Košler *et al.*, 2002)。元素分馏效应的表现是多方面的, 最严重的是某些元素由于分析条件的改变或样品基体的不同而引起信号相应的变化 (Eggins *et al.*, 1998; Guillong *et al.*, 2003), 如在锆石 U-Pb 定年

中, Pb、U 的剥蚀信号随着时间漂移, 导致 Pb/U 比值的变化, 相应地有时会使得所获得的年龄值偏差较大。激光的剥蚀斑径与元素分馏之间存在着一定的函数关系, 大的剥蚀斑径产生的 U/Pb 分馏明显小于小的剥蚀斑径 (Horn *et al.*, 2000)。可是, 激光剥蚀斑径太大, 会导致无法得到具有地质意义的年龄数据, 因此, 在锆石 U-Pb 定年中, 可尽量选择较小的剥蚀斑径来进行年代学研究。本文通过实验发现, 采用较小的剥蚀半径 (20 μm), 较低的激光频率可以明显地降低激光剥蚀过程中所带来的元素分馏效应。同时需要提出的是, 锆石中 Pb 的量取决于 U 的含量和样品的年龄, Pb 和 U 的含龄不仅制约着分析信号强度, 同时也决定了测量年龄的不确定度以及仪器分析所能够测定的最年轻年龄。比如说本实验室的内部标准 SK10-2, 尽管该样品中锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄只有 31 Ma, 可是该锆石具有较高的 U、Pb 含量, 分别为 417×10^{-6} ~ $1\ 636 \times 10^{-6}$ 和 3×10^{-6} ~ 28×10^{-6} 。对于许多锆石而言, 如果锆石中富含 U, 那么 U 就会放射形成较多的 Pb, 较富集 U 和 Th 等放射性元素会产生 α 衰变和受放射衰变产物核反冲能的影响, 会有裂变径迹出现, 裂变径迹四周的晶格结构破坏, 产生晶格缺陷, 致使锆石遭受高放射破坏, 导致锆石 Pb 丢失以及年龄不和谐 (Mezger and Krogstad, 1997)。

4.2 沉积构造环境

燕山地区是我国新元古界青白口系出露最好、层序较为完整的地区, 典型剖面位于天津蓟县。最

表 3 长龙山组石英砂岩中碎屑锆石 Hf 同位素组成

Table 3 Lu-Hf isotopic composition of detrital zircons from Changlongshan Formation

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	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	2σ	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
LS-02	2 527	0.015 102	0.000 595	0.281 152	0.000 054	-57.3	-1.6	1.5	2 893	3 002	-0.98
LS-11	2 525	0.014 010	0.000 545	0.281 217	0.000 028	-55.0	0.8	1.2	2 802	2 885	-0.98
LS-17	2 597	0.015 585	0.000 618	0.281 165	0.000 040	-56.8	0.4	1.3	2 877	2 960	-0.98
LS-25	2 582	0.021 528	0.000 784	0.281 074	0.000 056	-60.0	-3.5	1.5	3 012	3 137	-0.98
LS-27	2 545	0.020 569	0.000 782	0.281 175	0.000 026	-56.5	-0.7	1.2	2 876	2 972	-0.98
LS-32	2 514	0.020 564	0.000 819	0.281 187	0.000 030	-56.1	-1.0	1.2	2 862	2 963	-0.98
LS-38	2 557	0.018 677	0.000 691	0.281 169	0.000 030	-56.7	-0.5	1.2	2 877	2 971	-0.98
LS-39	2 519	0.019 277	0.000 692	0.281 182	0.000 040	-56.2	-0.9	1.3	2 860	2 960	-0.98
LS-42	2 506	0.021 247	0.000 771	0.281 187	0.000 038	-56.1	-1.1	1.3	2 859	2 962	-0.98
LS-43	2 545	0.017 412	0.000 611	0.281 141	0.000 028	-57.7	-1.6	1.2	2 909	3 017	-0.98
LS-45	2 489	0.021 213	0.000 758	0.281 215	0.000 036	-55.1	-0.5	1.3	2 820	2 917	-0.98
LS-61	2 531	0.021 340	0.000 766	0.281 197	0.000 032	-55.7	-0.2	1.2	2 845	2 937	-0.98
LS-63	2 537	0.030 022	0.001 108	0.281 153	0.000 034	-57.3	-2.2	1.2	2 930	3 040	-0.97
LS-65	2 577	0.015 030	0.000 543	0.281 202	0.000 020	-55.5	1.4	1.1	2 822	2 895	-0.98
LS-66	2 578	0.017 714	0.000 641	0.281 127	0.000 026	-58.2	-1.4	1.2	2 930	3 034	-0.98
LS-66	2 516	0.017 722	0.000 641	0.281 117	0.000 024	-58.5	-3.2	1.2	2 943	3 070	-0.98
LS-67	2 522	0.012 197	0.000 430	0.281 176	0.000 024	-56.4	-0.6	1.2	2 849	2 948	-0.99
LS-74	2 537	0.013 482	0.000 479	0.281 216	0.000 026	-55.0	1.1	1.2	2 799	2 877	-0.99
LS-76	2 534	0.037 044	0.001 275	0.281 096	0.000 030	-59.3	-4.6	1.2	3 021	3 155	-0.96
LS-78	2 527	0.021 483	0.000 723	0.281 155	0.000 026	-57.2	-1.7	1.2	2 898	3 007	-0.98
LS-79	2 545	0.013 041	0.000 446	0.281 192	0.000 036	-55.9	0.5	1.3	2 828	2 914	-0.99
LS-84	2 560	0.022 629	0.000 748	0.281 189	0.000 034	-56.0	0.2	1.2	2 854	2 941	-0.98
LS-86	2 575	0.011 914	0.000 381	0.281 217	0.000 030	-55.0	2.2	1.2	2 790	2 856	-0.99
LS-87	2 554	0.019 943	0.000 700	0.281 162	0.000 036	-56.9	-0.8	1.3	2 887	2 985	-0.98
LS-89	2 497	0.019 736	0.000 708	0.281 149	0.000 026	-57.4	-2.6	1.2	2 905	3 025	-0.98
LS-91	2 531	0.024 200	0.000 863	0.281 248	0.000 044	-53.9	1.4	1.3	2 783	2 856	-0.97
LS-90	2 524	0.016 757	0.000 591	0.281 128	0.000 036	-58.1	-2.5	1.3	2 925	3 044	-0.98
LS-92	2 538	0.018 392	0.000 663	0.281 152	0.000 024	-57.3	-1.5	1.2	2 898	3 004	-0.98
LS-94	2 516	0.017 712	0.000 672	0.281 164	0.000 036	-56.9	-1.5	1.3	2 882	2 991	-0.98
LS-95	2 519	0.020 840	0.000 736	0.281 125	0.000 042	-58.2	-3.0	1.3	2 940	3 063	-0.98
LS-99	2 496	0.023 135	0.000 805	0.281 180	0.000 050	-56.3	-1.7	1.4	2 871	2 980	-0.98
LS-101	2 487	0.030 363	0.001 036	0.281 065	0.000 028	-60.4	-6.3	1.2	3 044	3 202	-0.97
LS-104	2 521	0.042 023	0.001 321	0.281 012	0.000 038	-62.2	-8.0	1.3	3 139	3 308	-0.96
LS-105	2 542	0.016 812	0.000 564	0.281 168	0.000 034	-56.7	-0.6	1.2	2 869	2 967	-0.98
LS-109	2 520	0.023 902	0.000 803	0.281 169	0.000 026	-56.7	-1.5	1.2	2 886	2 992	-0.98
LS-110	2 502	0.025 283	0.000 825	0.281 124	0.000 034	-58.3	-3.6	1.2	2 948	3 077	-0.98
LS-112	2 530	0.027 302	0.000 992	0.281 078	0.000 050	-59.9	-4.8	1.4	3 023	3 163	-0.97
LS-113	2 494	0.026 503	0.000 884	0.281 083	0.000 036	-59.7	-5.3	1.3	3 008	3 156	-0.97
LS-114	2 537	0.012 790	0.000 442	0.281 182	0.000 034	-56.2	0.0	1.2	2 841	2 934	-0.99
LS-115	2 522	0.018 055	0.000 622	0.281 127	0.000 038	-58.2	-2.6	1.3	2 928	3 049	-0.98
LS-119	2 510	0.017 664	0.000 578	0.281 192	0.000 028	-55.9	-0.5	1.2	2 838	2 936	-0.98
LS-121	2 504	0.020 036	0.000 703	0.281 183	0.000 032	-56.2	-1.2	1.2	2 859	2 964	-0.98
LS-122	2 555	0.021 626	0.000 733	0.281 192	0.000 062	-55.9	0.2	1.5	2 849	2 936	-0.98
LS-123	2 524	0.014 740	0.000 539	0.281 247	0.000 028	-53.9	1.8	1.2	2 761	2 832	-0.98
LS-125	2 511	0.017 587	0.000 621	0.281 171	0.000 034	-56.6	-1.3	1.2	2 869	2 976	-0.98
LS-126	2 559	0.015 125	0.000 520	0.281 191	0.000 030	-55.9	0.6	1.2	2 835	2 918	-0.98
LS-127	2 540	0.017 541	0.000 573	0.281 219	0.000 026	-54.9	1.1	1.2	2 801	2 879	-0.98
LS-128	2 522	0.017 470	0.000 630	0.281 204	0.000 030	-55.5	0.1	1.2	2 826	2 916	-0.98
LS-129	2 528	0.015 882	0.000 597	0.281 182	0.000 028	-56.2	-0.5	1.2	2 853	2 949	-0.98
LS-131	2 487	0.017 179	0.000 639	0.281 161	0.000 042	-57.0	-2.3	1.3	2 884	3 002	-0.98
LS-132	2 520	0.016 653	0.000 634	0.281 205	0.000 042	-55.4	0.1	1.3	2 825	2 915	-0.98

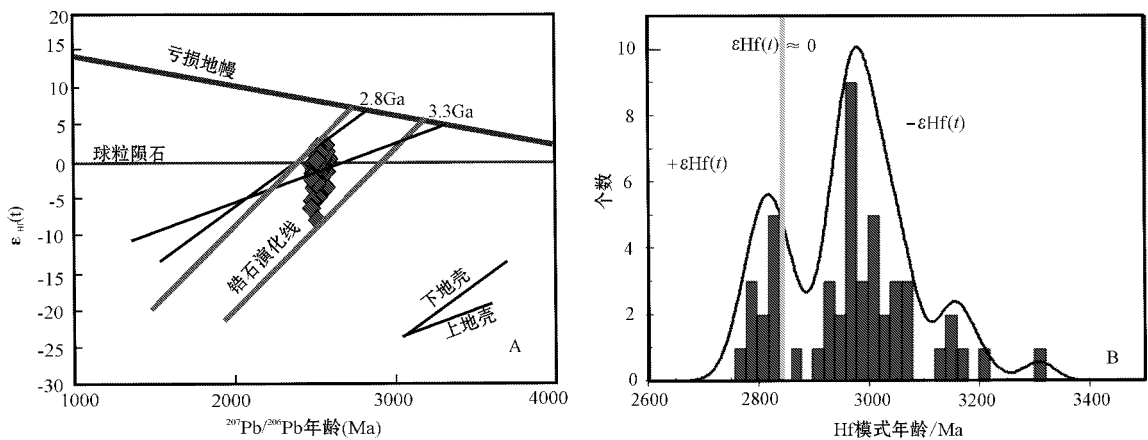


图 7 长龙山组石英砂岩中碎屑锆石 Hf 同位素组成

Fig. 7 Zircon Hf isotopes for quartz sandstone from Changlongshan Formation

初叶良辅(1920)创建“下马岭页岩”,高振西等(1934)建立“景儿峪灰岩”,后郝诒纯(1953)在二者之间建立的“龙山砂岩”(转引自孙世超,1992),其下与下马岭组呈平行不整合、其上与景儿峪组呈整合接触。传统上,将下马岭组归入新元古界,最近,Gao等(2008)测得北京西山下马岭组建组剖面中凝灰岩的岩浆锆石年龄为 1368 ± 12 Ma,据此下马岭组应属中元古代,而不是所谓的新元古代。那么与下马岭组为不整合的上伏长龙山组的年龄肯定小于 1368 Ma,如果按照传统将长龙山组归于新元古代(1000 Ma),那么二者之间的沉积间断至少持续了 3 亿年(全国地层委员会,2009)。在秦皇岛地区新元古界青白口系的长龙山组与新太古代钾质花岗岩呈不整合沉积接触,根据本文对长龙山组碎屑锆石的测年结果可以看出最小的年龄峰值集中在 2484 Ma ($n=9$),未发现较年轻的碎屑锆石存在,因此与北京-蓟县的标准剖面相对比,东部地区沉积间断持续的时间更长。虽然自中元古代长城纪开始,在华北克拉通陆内燕山裂陷槽的发育,导致了燕山地区相对于周围的裂陷沉降,在沉积中心河北蓟县堆积了长城系、蓟县系,可是在本研究区地壳仍然总体抬升,为古陆剥蚀区。直至新元古代早期的青白口期,地壳开始下降,陆表海不断地扩大,发生海侵作用,才沉积了长龙山组滨海相碎屑岩。

4.3 石英砂岩物质源区组成及其地质意义

根据石英砂岩中碎屑锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,可将碎屑锆石分为两类(图 7),一类碎屑锆石具有大于零的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,其单阶段 Hf 模式年龄(2849~2761 Ma)与其形成年龄(2575~2520 Ma)较接近,这类锆石

明显不具有新生地壳性质,虽然其寄主岩浆源区来自于壳幔相互作用的混合源区或富集性地幔源区,但是亏损地幔的 Hf 同位素储库还是应该占主导(Zheng *et al.*, 2006; 郑永飞等, 2007)。另一类碎屑锆石具有小于零的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,其两阶段 Hf 模式年龄(3308~2916 Ma)明显大于锆石形成年龄(2578~2519 Ma),表明它们形成于古老的陆壳物质再造,源区物质在地壳滞留时间相对较长(0.4~0.8 Ga),且后一种碎屑锆石所占的比例较大(>60%)。上述特征表明,该区 2.5 Ga 的事件主要是以古老地壳物质的再造为主。

Liu 等(2009)根据对怀安地区 TTG 片麻岩和闪长质片麻岩全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素研究认为,该 2.5 Ga 的地质事件是以新生地壳形成为特征。古元古代嵩山石英岩中~2.50 Ga 的碎屑锆石的 Hf 同位素组成也表现出同样的特征(Diwu *et al.*, 2008)。Yang 等(2008)对河北东部的花岗质岩石的 Hf 研究表明,这些花岗质岩石中的岩浆锆石大多数锆石具有较正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,表明其为岩浆混合产物。但是秦皇岛地区长龙山组石英岩中的碎屑锆石的 Hf 同位素组成与上述地区有所不同,它们的源区物质虽然有不同程度的壳幔混合,但是古老地壳物质的再循环应该占据主导地位。这可能暗示着其物源区的地壳在新太古代末期已经具有一定的规模和厚度。

5 结论

(1) 通过实验发现采用较低的激光频率(5 Hz 或者 6 Hz)可以明显地降低激光剥蚀过程中所带来

的 U-Pb 元素分馏效应。

(2) LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年显示秦皇岛柳江地区长龙山组石英砂岩的物质源区较单一。与北京-蓟县标准剖面相比,本研究区在较长的一段地质时期为古陆壳的剥蚀区,新元古代早期,又沉积了长龙山组滨海相碎屑岩。

(3) 碎屑锆石 Hf 同位素组成显示,它们的源区物质主要来自于古老的地壳物质再循环,暗示在 ~2.5 Ga 其碎屑物质源区的地壳已经达到一定的规模和厚度。

致谢 衷心感谢杨崇辉研究员、杜利林副研究员提出的宝贵修改意见。

References

Amelin Y, Lee D C and Halliday A N. 2000. Early-middle archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64(24): 4 205~4 225.

Blichert-Toft J and Albaredo F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148(1~2): 243~258.

Changchun College of Geology. 1984. *Geology of Shimenzhai Area and Guide Book for Teaching Instructions*[M]. Jilin University Press, 1~178(in Chinese).

DeCelles P G and Currie B S. 1996. Long-term sediment accumulation in the Middle Jurassic-early Eocene Cordilleran retroarc foreland-basin system[J]. *Geology*, 24 : 591~594.

Diwu C R, Sun Y, Yuan H L, *et al.* 2008. U-Pb ages and Hf isotopes for detrital zircons from quartzite in the Paleoproterozoic Songshan Group on the southwestern margin of the North China Craton[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 53(16): 1 923~1 934.

Eggins S M, Kingsley S P J and Shelley J M G. 1998. Deposition and element fractionation processes during atmospheric pressure laser sampling for analysis by ICP-MS[J]. *Applied Surface Science*, 127~129 : 278~286.

Elhrou S, Belousova E, Griffin W L, *et al.* 2006. Trace Element and Isotopic Composition of GJ Red Zircon Standard by Laser Ablation [J]. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 70(Supp. 1), A158.

Gao L Z, Zhang C H, Shi X Y, *et al.* 2008. Mesoproterozoic age for Xiamaling Formation in North China Plate indicated by zircon SHRIMP dating[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 53(17): 2 665~2 671.

Gao Zhenxi, Xiong Yongxian and Gao Ping. 1934. Preliminary Notes on Sinian Stratigraphy of North China[M]. *Bull. Geol. Soc. Chin.*, 13 : 243~288(in Chinese).

Guillong M, Horn I and Günther D. 2003. A comparison of 266 nm, 213 nm and 193 nm produced from a single solid state Nd:YAG laser for laser ablation ICP-MS [J]. *J. Anal. At. Spectrom.*, 18 :

1 224~1 230.

Günther D, Jackson S E and Longrich H P. 1999. Laser ablation and arc/spark solid sample introduction into inductively coupled plasma mass spectrometers[J]. *Spectrochim. Acta, Part B*, 54 : 381~409.

Horn I, Rudnick R L and McDonough W F. 2000. Precise elemental and isotope ratio determination by simultaneous solution nebulization and laser ablation-ICP-MS: application to U-Pb geochronology[J]. *Chem. Geol.*, 167 : 405~425.

Košler J, Fonneland H, Sylvester P, *et al.* 2002. U-Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies - a comparison of laser ablation ICPMS and SIMS techniques[J]. *Chem. Geol.*, 182 : 605~618.

Liu F, Guo J H, Lu X P, *et al.* 2009. Crustal growth at 2.5 Ga in the North China Craton: evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huai'an gneiss terrane[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 24 : 4 704~4 713.

Liu Zhenfeng and Zheng Guisen. 1994. The preliminary research on the sequence stratigraphy of Jixian-Qingbaikou periods in Yanshan area [J]. *Geological Survey of Beijing*, 3 : 10~15(in Chinese).

Liu X M, Gao S, Diwu C R, *et al.* 2007. Simultaneous in-situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20 μm spot size[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 52(9): 7~163.

Longrich H P, Günther D and Jackson S E. 1996. Elemental fractionation in laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Fresenius J. Anal. Chem.*, 355 : 538~542.

Ludwig K R. 2003. *Isoplot 3.0-A geochronological toolkit for Microsoft Excel*[A]. Berkeley Geochronology Center, Spec. Pub[C]. (4): 1~70.

Mezger K and Krogstad E J. 1997. Interpretation of discordant U-Pb zircon ages: An evolution[M]. *J. Meta. Geol.*, 15 : 127~140.

National Commission on Stratigraphy. 2009. Third Eleventh Standing Committee of the National Commission on Stratigraphy, held in Guiyang enlarged[J]. *Journal of Stratigraphy*, 33(3): 333~336 (in Chinese).

Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock[J]. *Science*, 293 : 683~687.

Simon E J, Norman J P, William L G, *et al.* 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in-situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chem. Geol.*, 211 : 47~69.

Sun Shichao. 1992. *Shimenzhai Geology and Geological Teaching Practice Guidelines*[M]. Beijing: Earthquake Press, 188(in Chinese).

Teng Zhihong and Sun Yong. 1999. *Qinhuangdao City Geological Guide Book*[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1~58(in Chinese).

Vervoort J D and Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle; Hf isotope evidence from juvenile rocks through time[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63(3~4): 533~556.

Wan Y S, Zhang Q D and Song T R. 2003. SHRIMP ages of detrital zircons from the Changcheng System in the Ming Tombs area, Beijing: Constraints on the protolith nature and maximum depositional age of the Mesoproterozoic cover of the North China Craton[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 48(22): 2 500~2 506.

- Wiedenbeck M, Alle P, Griffin W L, *et al.*. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses [J]. *Geostandard Newslett*, 19: 1-23.
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, *et al.*. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. *Chem. Geol.*, 234: 105-126.
- Wu F Y, Wilde S A and Sun D Y. 2001. SHRIMP U-Pb zircon age of the youngest exposed pluton in eastern Chir [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 46(20): 1727-1731.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, *et al.*. 2008. Petrogenesis and geodynamics of Late Archean magmatism in eastern Hebei eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Hf isotopic evidence [J]. *Precambrian Res.*, 167: 125-149.
- Ye Liangfu. 1920. *Geology of West Hill of Beijing* [M]. *Geological Memoirs*, 1: 1-20 (in Chinese).
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, *et al.*. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS [J]. *Chem. Geol.*, 247: 100-118.
- Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B *et al.*. 2006. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in Dabie oroger [J]. *Chem. Geol.*, 231: 135-158.
- Zheng Yongfei, Chen Renxu, Zhang Shaobing, *et al.*. 2007. Zircon Lu-Hf isotope study of ultrahigh-pressure eclogite and granitic gneiss in

the Dabie oroger [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 317-330 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 长春地质学院. 1984. 石门寨地区地质及教学实习指导书 [M]. 吉林大学出版社, 1-178.
- 高振西, 熊永先, 高平. 1934. 中国北部震旦纪地层 [J]. *中国地质学会志*, 13: 243-288.
- 刘振峰, 郑桂森. 1994. 燕山地区蓟县纪-青白口纪层序地层学初探 [J]. *北京地质*, 3: 10-15.
- 全国地层委员会. 2009. 第三届全国地层委员会第十一次常委扩大会议在贵阳举行 [J]. *地层学杂志*, 33(3): 333-336.
- 孙世超. 1992. 石门寨地质概况及地质教学实习指南 [M]. 北京: 地震出版社, 188.
- 滕志宏, 孙勇. 1999. 秦皇岛地区地质实习指导书 [M]. 西安: 西北大学出版社, 58.
- 叶良辅. 1920. 北京西山地质志-地质专报甲种第 1 号 [M]. 南京: 前农商部地质调查所.
- 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 等. 2007. 大别山超高压榴辉岩和花岗岩片麻岩中锆石 Lu-Hf 同位素研究 [J]. *岩石学报*, 23(2): 317-330.

致 谢

2010 年度,许多地质学及相关学科的专家在百忙之中抽出时间,配合编辑部为本刊评审了稿件,为提高刊物质量做出了贡献。没有这些专家的辛勤劳动,本刊是不可能多方面取得进步的。为此,本刊编辑部特向他们表示衷心的感谢!

这些专家有(以姓氏笔画排序):

丁 林	于炳松	马清林	王长明	王长秋	王立本	王京刚	王治华	王洪亮	王晓霞	王 涛
冯 敏	史仁灯	白 峰	石玉若	刘志飞	刘勇胜	刘燕学	朱弟成	朱筱敏	江思宏	汤艳杰
闫 臻	何幼斌	何明跃	吴才来	吴柏林	吴泰然	吴朝东	宋玉财	张成立	张建新	张招崇
张 旗	李志明	李金洪	李献华	李锦轶	杨天南	杨志明	杨进辉	汪 相	沈渭洲	肖文交
连 宾	邱 峻	邱检生	陆松年	陆现彩	陈天虎	陈建平	陈美华	罗静兰	范宏瑞	郑亚东
郑建平	姜在兴	柳永清	胡明毅	胡修棉	赵永久	钟大康	党 志	徐九华	徐夕生	徐文艺
袁万明	高林志	高 峻	高善民	黄思静	黄智龙	曾令森	游国庆	葛文春	董发勤	蒋少涌
韩宝福	鲁安怀	路凤香	雷新荣	蔡元峰	樊祺诚	薛怀民	薛春纪			