

河北怀来龙凤山青白口系长龙山组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其构造古地理意义

王振涛¹⁾, 沈阳²⁾, 王训练³⁾, 马伯永⁴⁾, 黄晓宏⁵⁾

- 1) 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京, 100037;
2) 中国地质大学(北京)博物馆, 北京, 100083; 3) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083;
4) 中国地质调查局, 北京, 100037; 5) 中国人民武装警察部队黄金第九支队, 海口, 571127

内容提要:河北怀来龙凤山地区青白口系长龙山组(或称骆驼岭组)因发现“龙凤山生物群”而备受关注。本文报道了龙凤山西坡剖面长龙山组中部临近“龙凤山生物群”化石产出层位之下的粉砂岩中碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄。其年龄分布于 1573~2931 Ma 之间, 碎屑锆石年龄谱存在一个明显的峰值, 峰值年龄为~1.85 Ga, 此外还有其它若干次级峰值年龄, 分别响应了华北克拉通主要的前寒武纪若干地质事件。年龄主峰(~1.85 Ga)记录了华北克拉通东、西两大陆块的碰撞拼合事件, ~2.6 Ga(2.603 Ga 和 2.556 Ga)和~2.9 Ga(2.935 Ga)峰值年龄对应了华北克拉通重要的陆壳生长时间, 前者对应了华北克拉通东部地壳生长的最高峰。介于 2.4~2.0 Ga(2.07 Ga、2.177 Ga、2.228 Ga、2.286 Ga、2.324 Ga 和 2.388 Ga)的次级峰值年龄代表了华北克拉通经历的陆内拉伸—裂谷事件。~1.6 Ga(1.580 Ga)峰值年龄是大红峪的岩浆事件的反映, 大致对应于 Columbia 超大陆裂解的时间。缺失广布华北克拉通的~2.5 Ga 事件可能是由于长龙山区海侵超覆沉积使得~2.5 Ga 的露头被普遍覆盖所致。参照长龙山组下伏地层下马岭组报道的斑脱岩年龄, 本文测得的最小谐和年龄(1.573 Ga)并不能有效地约束其沉积时代的下限。对燕辽裂陷槽不同地区长龙山组或与之可对比地层的碎屑锆石年龄的对比研究表明, 燕辽裂陷槽内部对上述构造事件响应存在差异, 暗示了燕辽裂陷槽发育期内部古地理具有相当的复杂程度。秦皇岛柳江地区和辽东半岛青白口系长龙山组碎屑锆石年龄分布特征与燕辽裂陷槽内长龙山组存在的差异, 很大程度上是受当时的古地理背景制约。

关键词:长龙山组; 青白口系; 碎屑锆石; 燕辽裂陷槽; 华北克拉通

在华北克拉通前寒武纪结晶基底之上, 不整合覆盖着大面积的中—新元古代沉积盖层, 被划分为蓟县系(1600~1400 Ma)、待建系(1400~1000 Ma)、青白口系(1000~780 Ma)、南华系(780~635 Ma)和震旦系(635~541 Ma)(王泽九等, 2014), 主要分布于华北克拉通的周缘裂谷(王鸿祯, 1985; 翟明国和彭澎, 2007)。其中, 新元古界青白口系仅包括长龙山组(或称骆驼岭组)和景儿峪组, 原属青白口系的下马岭组由于其中斑脱岩锆石 U-Pb 年龄的确定(高林志等, 2007, 2008; Su et al., 2008), 使其归入中元古界。其中, 产出于长龙山组的龙凤山生物群的发现(Du and Tian, 1985; 张忠英, 1988; 陈梦莪, 1989; Du et al., 1995; 唐烽和高林志, 1999; 杜汝霖等, 2009), 对于探讨宏体后生生物的起源和

演化具有重要意义, 引起了国内外学者的普遍关注。

河北怀来龙凤山地区长龙山组是龙凤山生物群发现最早、数量最丰富、最有代表性的剖面(杜汝霖等, 2009), 除了古生物方面的成果以外, 还吸引了沉积学和碎屑岩地球化学方面的研究(王立峰等, 2000; 周洪瑞等, 2006; 陈小军等, 2011, 2012)。截止目前, 龙凤山剖面长龙山组尚无碎屑锆石年龄方面的报道。碎屑沉积岩是其源区出露岩石的天然混合样品, 其中的碎屑锆石通常可以保存源区曾经存在的岩石的年龄记录, 是探讨华北克拉通形成和演化的主要途径之一(万渝生等, 2010; 陈岳龙等, 2008; 第五春荣等, 2011, 2012, 2013; 李洪颜等, 2009; 胡波等, 2009, 2013; 耿显雷等, 2011; 胡国辉等, 2012; 王盟等, 2013; 马铭株等, 2014)。本文选择被认为代表

注: 本文由中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 2652014005)资助。

收稿日期: 2016-03-17; 改回日期: 2016-05-26; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 王振涛, 男, 1986 年出生, 博士, 博士后, 助理研究员。主要从事大地构造与沉积学研究。Email: wangz@cags.ac.cn。通讯作者: 沈阳, 男, 1983 年出生, 博士, 助理研究员。主要从事古生物学与地层学研究。电话: 010-82322204。Email: shenybj@126.com。

Rodinia 超级大陆裂解后的最早期沉积的长龙山组(曲永强等,2010;潘建国等,2013)作为研究对象,研究华北克拉通前寒武纪一些重要的地质事件。同时,通过对华北克拉通东部不同地区长龙山组或可对比层位碎屑锆石年龄(高林志等,2010;第五春荣等,2011;任荣等,2011)的对比研究,揭示燕辽裂陷槽内部对构造事件的差异响应。

1 区域地质概况

华北克拉通在~2.5 Ga 完成克拉通化,之后在经过约 2 亿年(约 2.5~2.3 Ga)的构造静寂期后经历了一个裂谷过程(翟明国等,2014)。古元古代末期(~1.85 Ga),吕梁运动(或称中条运动)导致了华北克拉通东、西两大陆块的碰撞拼合和统一结晶基底的最终形成(Zhao,2001;Zhao et al.,2001,2003,

2010;Wilde et al.,2002;Guo et al.,2005;Wilde and Zhao,2005;Wu et al.,2005;Kröner et al.,2005;Zhai et al.,2005;Liu et al.,2006;翟明国和彭澎,2007)。这次事件之后,华北克拉通构造体制发生根本改变,开始进入地台演化阶段,先前的碰撞造山体制逐渐被随后的克拉通内伸展裂解所替代,在其边缘形成了多个裂陷槽(裂谷盆地)(王鸿祯等,1985;Lu et al.,2002;翟明国和彭澎,2007;翟明国等,2014)(图 1a)。其中,燕辽裂陷槽以蓟县为沉积中心(和政军等,2000;黄学光,2006;潘建国等,2013),呈北东—南西方向插入克拉通中部地区(图 1a),其范围包括燕山及太行山中北段,经历了中元古代早期大陆裂谷阶段、中元古代中期被动陆缘阶段、中元古代晚期活动陆缘阶段、中元古代末期陆块碰撞阶段和新元古代地壳伸展断陷阶段(潘建国等,

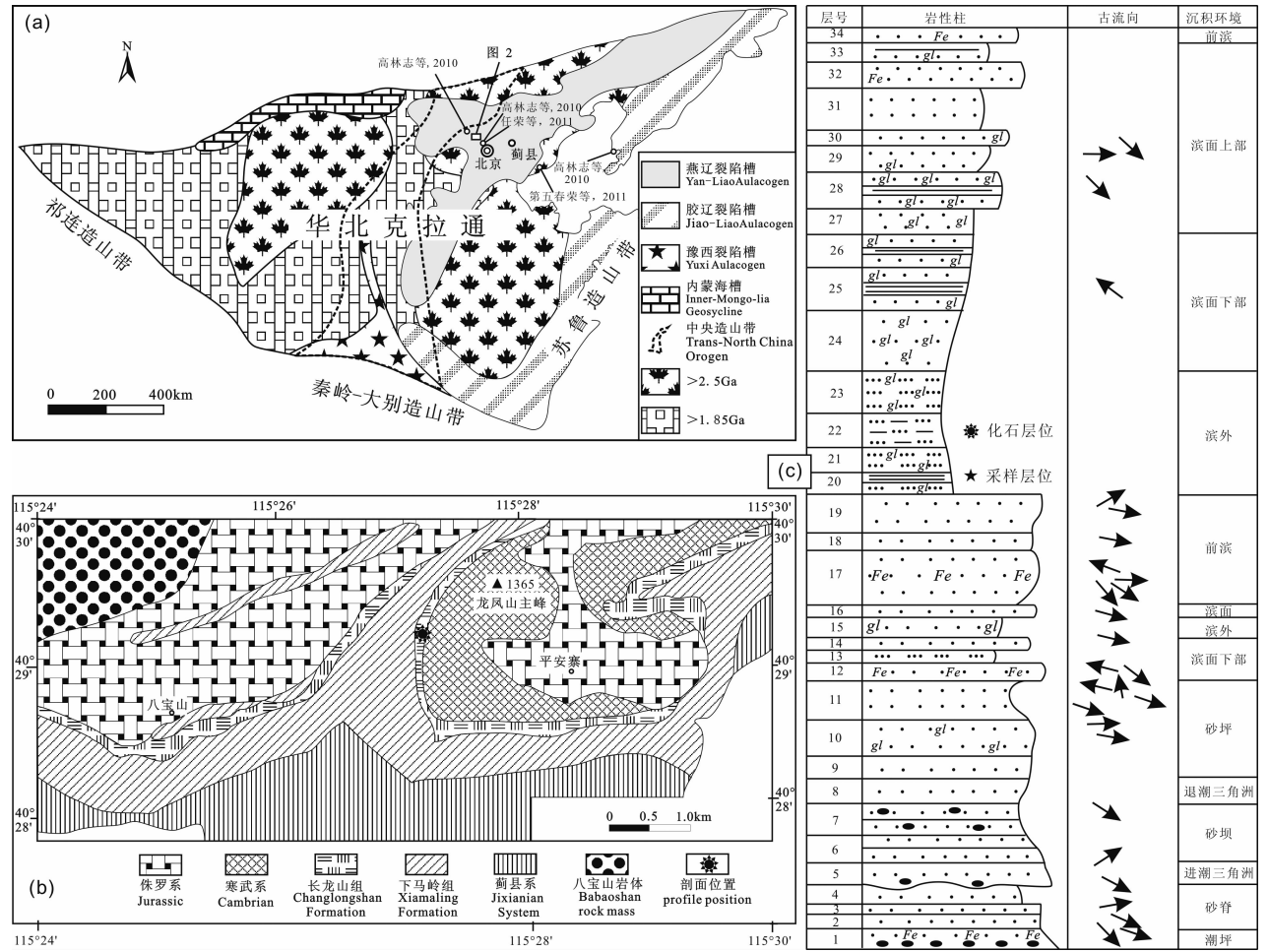


图 1 华北克拉通前寒武纪大地构造简图[a 据王鸿祯(1985)和 Zhao et al (2005)综合]、河北怀来龙凤山地区地质图和长龙山组地层柱状图[b 和 c 据杜汝霖等(2009)和张长厚等,2006]

Fig. 1 Precambrian tectonic map of the North China Craton [a after Wang (1985) and Zhao et al (2005)], geological map of the Longfengshan area, Huailai County, Hebei Province and stratigraphic column for the Changlongshan Formation [b and c after Du et al (2009) and Zhang et al (2006)]

2013)。燕辽裂陷槽中元古代沉积层序中出现多个沉积间断和不整合面(曲永强等,2010)。其中,“蔚县上升”造成下马岭组与长龙山组之间长达 320 Ma 的沉积间断(高林志等,2011;李怀坤等,2014),沉积间断前后古地理面貌完全不同(乔秀夫等,2007),表现为下马岭组深水相突变为长龙山组浅水相沉积(曲永强等,2010)。长龙山期,海侵范围急剧扩大,已经到达燕山青白口系沉积盆地周围的隆起区,在盆地边部长龙山组明显覆盖于老地层之上,显示了海侵超覆沉积的结果(曲永强等,2010;潘建国等,2013)。长龙山组的形成是继中元古代早期大陆裂谷阶段之后的新的一次大陆伸展的结果(曲永强等,2010),该组发育的石英砂岩和海绿石砂岩被认为是 Rodinia 超级大陆裂解后的最早期沉积,记录了海侵初期的超覆过程(潘建国等,2013)。

2 剖面 and 采样位置

本文研究的剖面位于河北省怀来县龙凤山的西坡(图 1,图 2),距北京西北约 85 km,距怀来县城西北约 15 km。在龙凤山一带,青白口系与蓟县系剖面连续,组成宽缓的向斜构造。其中,青白口系长龙山组发育较好,研究程度颇高(杜汝霖等,2009)。

长龙山组主要由滨海潮间带的碎屑岩组成,并由含砾粗砂岩、细砂岩、含海绿石石英砂岩、粉砂岩及粉砂质页岩等组成 4 个较大的正向韵律层(杜汝霖等,2009)。整个组可明显的分为两个岩性段:下段砂砾岩段,上段为砂页岩段,总厚度约 70 m(图 2),与下伏下马岭组呈平行不整合接触,与上覆景儿峪组为连续沉积或有局部间断。用于锆石测年的样品采自 20 层黄绿色薄层含海绿石粉砂岩段(图 3),

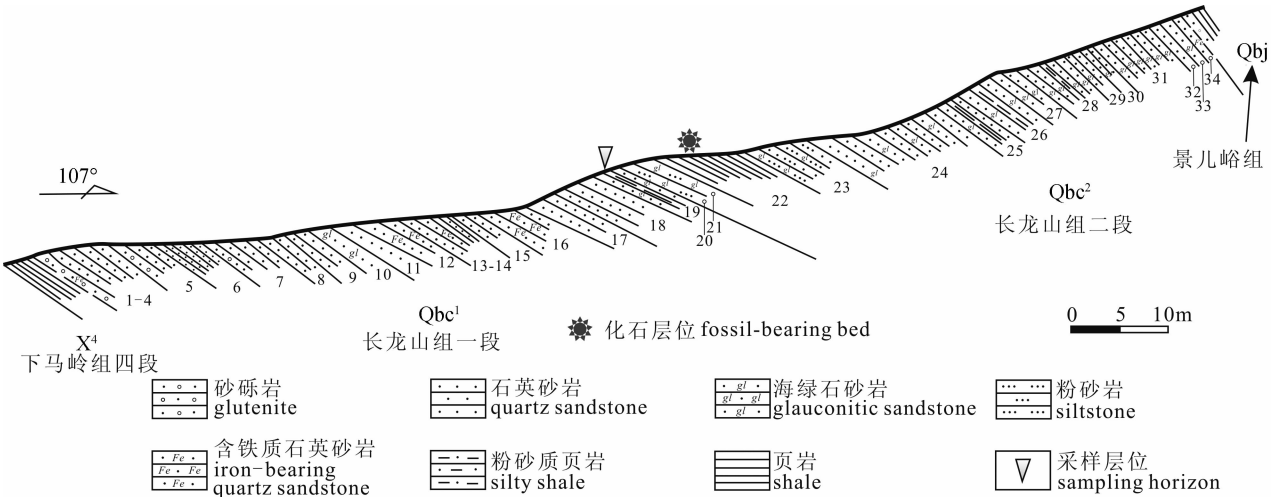


图 2 河北怀来龙凤山西坡长龙山组实测剖面图和采样位置(据杜汝霖等(2009))(剖面位置见图 1)

Fig. 2 Surveyed geological cross section of the Changlongshan Formation in the west slope of Longfengshan, Huailai County, Hebei Province (after Du et al (2009)) (See Fig. 1 for the profile location)

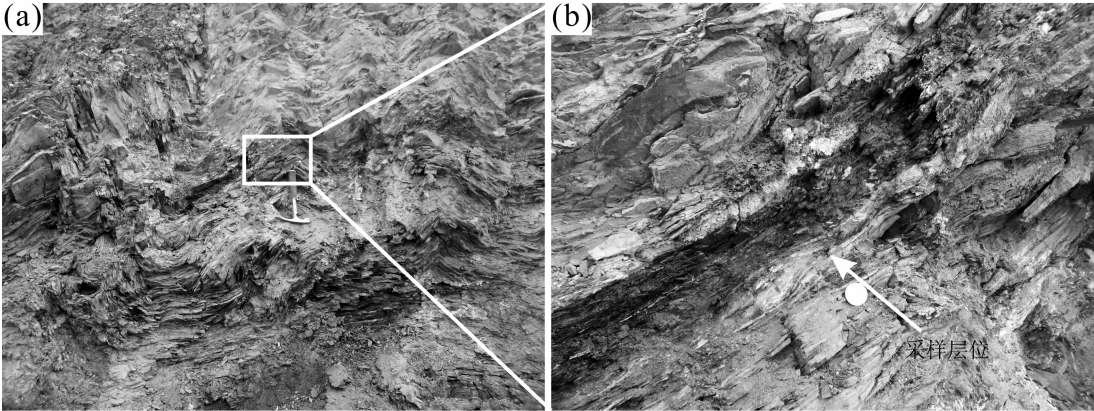


图 3 研究区长龙山组野外露头及采样位置

Fig. 3 Field outcrop of Changlongshan Formation and the sample location

紧邻发现“龙凤山生物群”化石的层位(22 层)。

3 分析方法与数据处理

锆石的分选和挑纯由河北省区域地质矿产调查研究所岩矿分析实验室完成。锆石分选大致流程如下:将新鲜的样品破碎到适当大小(一般为 80~100 目),淘洗后通过人工重砂、电磁分选出锆石,然后在双目镜下随机挑选出锆石颗粒。将挑出的锆石随机选取一定数量在玻璃板上排列粘牢,使用环氧树脂固定凝结,经打磨抛光处理制成靶样,再进行透射、反射光和阴极发光(CL)照相以观察锆石的表面及内部结构。锆石晶体的透射、反射和 CL 图像拍照由北京锆年领航科技有限公司完成。根据锆石反射、透射图像和 CL 图像所揭示的锆石晶体裂隙、包体、环带等内部结构特征,反复对比以选择合适的激光剥蚀点位进行 U-Pb 同位素年龄测定。

锆石微区 U-Pb 定年在中国地质调查局天津地质调查中心同位素实验室的激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪上(LA-MC-ICP MS)完成,仪器配置和测试流程参见相关文献(李怀坤等,2009;耿建珍等,2012)。采用²⁰⁸Pb 校正法对普通铅进行校正(Anderson,2002)。利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。在测试前用酒精对锆石靶进行清洗,以降低普通铅的污染。每个样品在开始和结束时分别测试 2 次 NIST612 标样,每完成 8 个测点再加测 2 次 NIST612 标样。采用 GJ-1 作为外部锆石年龄标准进行 U、Pb 同位素分馏校正(Jackson et al., 2004)。

对于小于 1000 Ma 的年轻锆石一般采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,大于 1000 Ma 的古老锆石多存在一定程度的铅丢失,一般采用更为可靠的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄(Black et al., 2003)。采用 ICPMSDataCal 程序(Liu et al., 2009)和 Isoplot 程序(版本 3.41)(Ludwig,2003)进行数据处理,分析结果在 Isoplot 软件(版本 3.41)完成加权平均年龄计算和谐和图的绘制。

4 结果

4.1 锆石形态和 Th/U 比值

从粉砂岩样品中分离出>1000 粒锆石,锆石颗粒大小不等,以短柱状、等轴状居多,含少量的长柱状颗粒,粒径介于 60~120 μm 之间,少数超过 150 μm。锆石外形呈次圆状和次棱角状,个别呈浑圆状,显示锆石受到较强的磨蚀及其较远的物源。

Th/U 比值介于 0.06~1.51 之间,其中,只有 7 个分布在 0.06~0.39 之间,其余均>0.4(表 1,图 4)。

阴极发光图像(图 5)分析表明,样品中的锆石内部特征各异,大部分锆石具有岩浆生长振荡环带,但发育程度各有差别。个别锆石可看出明显的核幔结构(如 LF-C-24,LF-C-47,Th/U 比值分别为 0.16 和 0.38)。锆石中既有具震荡环带结构的岩浆成因的锆石(如图 5 中 LF-C-1、LF-C-80、LF-C-91 和 LF-C-95,Th/U 比值分别为 0.67、0.66、0.51 和 0.56),又有内部均一和补丁状结构的变质成因的锆石(如图 5 中 LF-C-60,LF-C-71 和 LF-C-77,Th/U 比值

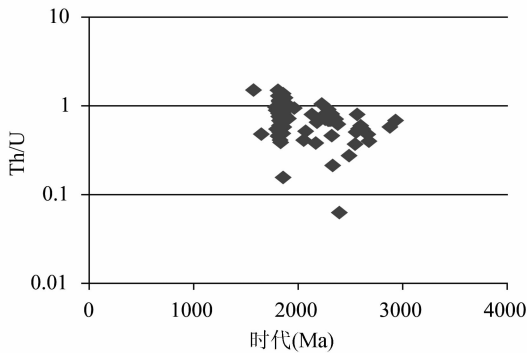


图 4 河北怀来龙凤山长龙山组碎屑锆石的 Th/U-年龄图
Fig. 4 Th /U vs. age diagrams of detrital zircons from the Changlongshan Formation in Longfengshan, Huailai County, Hebei Province

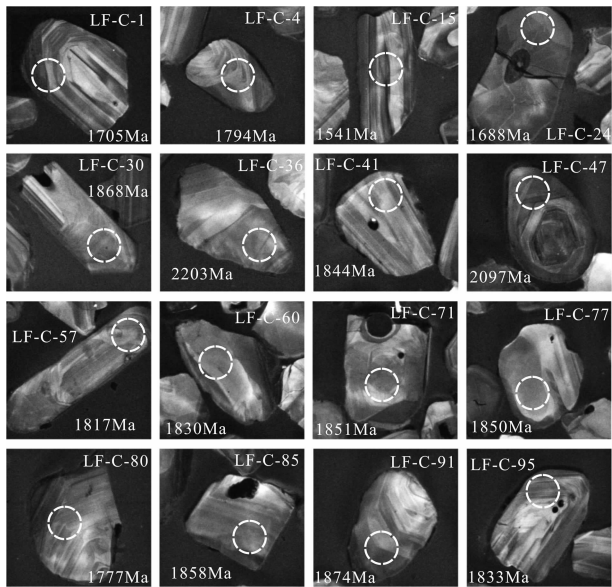


图 5 河北怀来龙凤山长龙山组粉砂岩(LF-C)具有代表性的锆石 CL 图像(束斑直径 35μm)
Fig. 5 Representative CL images of zircons from the siltstone (LF-C) from the Changlongshan Formation in Longfengshan, Huailai County, Hebei Province

表 1 河北怀来龙凤山新元古代长龙山组粉砂岩(样品 LF-C)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of the Neoproterozoic siltstone (sample LF-C) of the Changlongshan Formation in the Longfengshan area, Huailai County, Hebei Province

测点号	含量		Th/ U	同位素比值								同位素年龄(Ma)						谐和
	($\times 10^{-6}$)			$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm \sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	度
	Ph	U																(%)
LF-C-01	55	177	0.67	0.1125	0.0007	4.361	0.035	0.2810	0.0019	0.0666	0.0014	1705	13	1597	11	1841	12	94
LF-C-02	54	140	1.37	0.1135	0.0008	4.993	0.035	0.3191	0.0016	0.0680	0.0013	1818	13	1785	9	1856	12	98
LF-C-03	52	229	0.67	0.1124	0.0008	3.145	0.021	0.2030	0.0012	0.0520	0.0009	1444	10	1191	7	1838	13	82
LF-C-04	46	134	0.68	0.1146	0.0008	4.854	0.032	0.3072	0.0018	0.0761	0.0012	1794	12	1727	10	1874	12	96
LF-C-05	70	194	0.78	0.1145	0.0007	5.159	0.033	0.3267	0.0018	0.0677	0.0010	1846	12	1822	10	1873	12	99
LF-C-06	72	218	0.72	0.1121	0.0007	4.592	0.030	0.2970	0.0015	0.0662	0.0010	1748	11	1677	9	1834	11	96
LF-C-07	21	59	0.98	0.1150	0.0011	4.901	0.046	0.3092	0.0016	0.0660	0.0011	1802	17	1737	9	1879	17	96
LF-C-08	41	117	0.76	0.1141	0.0009	4.922	0.038	0.3129	0.0016	0.0669	0.0011	1806	14	1755	9	1865	14	97
LF-C-09	99	194	0.51	0.1696	0.0010	10.903	0.076	0.4663	0.0028	0.0865	0.0015	2515	17	2467	15	2553	10	98
LF-C-10	78	157	0.81	0.1478	0.0009	8.876	0.056	0.4356	0.0023	0.0862	0.0012	2325	15	2331	12	2320	10	100
LF-C-11	34	88	1.12	0.1111	0.0008	5.115	0.039	0.3338	0.0019	0.0691	0.0009	1839	14	1857	11	1818	13	101
LF-C-12	81	246	0.28	0.1630	0.0009	7.045	0.048	0.3134	0.0018	0.0619	0.0007	2117	14	1758	10	2487	10	83
LF-C-13	69	215	0.58	0.1139	0.0007	4.622	0.031	0.2944	0.0019	0.0692	0.0007	1753	12	1663	11	1862	11	95
LF-C-14	74	202	0.74	0.1138	0.0007	5.174	0.033	0.3296	0.0018	0.0736	0.0007	1848	12	1837	10	1861	11	99
LF-C-15	44	131	1.51	0.0973	0.0007	3.561	0.027	0.2655	0.0016	0.0612	0.0006	1541	11	1518	9	1573	13	99
LF-C-16	63	142	0.65	0.1363	0.0008	7.512	0.048	0.3998	0.0022	0.0855	0.0009	2174	14	2168	12	2180	10	100
LF-C-17	124	399	0.48	0.1813	0.0010	7.026	0.065	0.2810	0.0024	0.0541	0.0007	2115	20	1597	14	2665	9	76
LF-C-18	79	217	0.60	0.1113	0.0006	5.194	0.032	0.3385	0.0018	0.0747	0.0007	1852	11	1879	10	1821	10	101
LF-C-19	55	133	0.06	0.1542	0.0011	8.724	0.062	0.4104	0.0022	0.0900	0.0008	2310	16	2217	12	2393	12	96
LF-C-20	68	214	0.78	0.1133	0.0007	4.466	0.034	0.2860	0.0017	0.0652	0.0006	1725	13	1621	10	1852	11	94
LF-C-21	146	285	0.71	0.1510	0.0008	9.486	0.056	0.4556	0.0024	0.0950	0.0008	2386	14	2420	13	2357	9	101
LF-C-22	44	115	1.03	0.1122	0.0008	5.180	0.036	0.3348	0.0018	0.0724	0.0006	1849	13	1862	10	1835	12	101
LF-C-23	33	90	0.82	0.1108	0.0008	5.082	0.039	0.3326	0.0019	0.0716	0.0007	1833	14	1851	10	1813	13	101
LF-C-24	52	195	0.16	0.1134	0.0008	4.273	0.043	0.2733	0.0024	0.0200	0.0003	1688	17	1557	14	1855	13	92
LF-C-25	33	100	0.88	0.1119	0.0008	4.357	0.045	0.2824	0.0026	0.0706	0.0007	1704	17	1604	15	1830	13	94
LF-C-26	87	232	0.89	0.1132	0.0007	5.231	0.033	0.3352	0.0018	0.0668	0.0006	1858	12	1864	10	1851	10	100
LF-C-27	88	244	0.55	0.1720	0.0010	7.753	0.066	0.3268	0.0026	0.0598	0.0006	2203	19	1823	15	2578	9	83
LF-C-28	68	200	0.47	0.1109	0.0006	4.921	0.033	0.3217	0.0019	0.0708	0.0006	1806	12	1798	11	1815	11	100
LF-C-29	26	64	1.24	0.1146	0.0010	5.319	0.047	0.3367	0.0018	0.0720	0.0006	1872	17	1871	10	1873	16	100
LF-C-30	56	153	0.56	0.1129	0.0007	5.296	0.035	0.3402	0.0019	0.0737	0.0007	1868	12	1888	10	1847	11	101
LF-C-31	106	184	0.60	0.1741	0.0010	12.252	0.074	0.5103	0.0027	0.1057	0.0011	2624	16	2658	14	2598	9	101
LF-C-32	122	396	0.94	0.1204	0.0007	4.429	0.045	0.2668	0.0025	0.0593	0.0007	1718	17	1525	15	1962	10	89
LF-C-33	91	252	0.41	0.1267	0.0007	6.035	0.042	0.3454	0.0021	0.0713	0.0008	1981	14	1913	12	2053	10	97
LF-C-34	43	91	0.69	0.1449	0.0009	8.501	0.058	0.4256	0.0023	0.0950	0.0010	2286	16	2286	13	2286	11	100
LF-C-35	94	259	0.64	0.1127	0.0007	5.164	0.033	0.3323	0.0019	0.0725	0.0008	1847	12	1850	11	1844	10	100
LF-C-36	42	95	0.71	0.1426	0.0009	7.751	0.051	0.3943	0.0022	0.0786	0.0009	2203	14	2143	12	2259	11	97
LF-C-37	59	120	0.75	0.1395	0.0008	8.340	0.054	0.4335	0.0024	0.0923	0.0010	2269	15	2321	13	2222	10	102
LF-C-38	98	258	0.82	0.1127	0.0007	5.317	0.032	0.3423	0.0018	0.0712	0.0008	1872	11	1898	10	1843	10	101
LF-C-39	74	195	0.82	0.1119	0.0007	5.254	0.034	0.3405	0.0018	0.0740	0.0010	1861	12	1889	10	1831	11	102
LF-C-40	84	226	0.75	0.1114	0.0007	5.176	0.033	0.3370	0.0018	0.0716	0.0010	1849	12	1872	10	1822	11	101
LF-C-41	26	67	1.20	0.1133	0.0009	5.149	0.043	0.3295	0.0017	0.0726	0.0011	1844	16	1836	10	1853	15	100
LF-C-42	46	126	0.64	0.1129	0.0007	5.224	0.036	0.3355	0.0019	0.0737	0.0010	1857	13	1865	10	1847	12	100
LF-C-43	44	124	0.72	0.1131	0.0008	5.056	0.036	0.3244	0.0018	0.0714	0.0008	1829	13	1811	10	1849	12	99
LF-C-44	54	150	0.77	0.1148	0.0008	5.100	0.036	0.3221	0.0019	0.0750	0.0009	1836	13	1800	11	1877	13	98
LF-C-45	73	199	0.68	0.1113	0.0006	5.166	0.031	0.3366	0.0018	0.0746	0.0007	1847	11	1870	10	1821	10	101
LF-C-46	29	73	0.96	0.1114	0.0008	5.141	0.039	0.3348	0.0019	0.0801	0.0008	1843	14	1862	10	1822	13	101
LF-C-47	122	312	0.38	0.1353	0.0008	6.887	0.047	0.3692	0.0021	0.0815	0.0008	2097	14	2026	12	2168	10	97
LF-C-48	23	57	1.15	0.1111	0.0009	5.232	0.046	0.3417	0.0019	0.0810	0.0008	1858	16	1895	10	1817	15	102
LF-C-49	84	227	0.52	0.1281	0.0007	6.030	0.056	0.3416	0.0030	0.0790	0.0009	1980	18	1894	16	2071	10	96
LF-C-50	119	291	0.69	0.1464	0.0008	7.248	0.043	0.3591	0.0019	0.0871	0.0008	2142	13	1978	10	2304	10	92
LF-C-51	75	218	0.69	0.1477	0.0008	6.418	0.043	0.3153	0.0019	0.0489	0.0005	2035	14	1767	11	2319	10	87
LF-C-52	63	199	0.41	0.1116	0.0007	4.655	0.029	0.3024	0.0016	0.0760	0.0008	1759	11	1703	9	1826	11	97

续表 1

测点号	含量		Th/ U	同位素比值								同位素年龄(Ma)						谐和
	($\times 10^{-6}$)			$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	$\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/$ ^{232}Th	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	$\pm \sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	$\pm 1\sigma$	度
	Ph	U																(%)
LF-C-53	109	490	0.48	0.1012	0.0006	2.975	0.019	0.2131	0.0013	0.0457	0.0006	1401	9	1245	7	1647	10	89
LF-C-54	68	159	0.91	0.1450	0.0008	7.403	0.051	0.3704	0.0022	0.0805	0.0010	2161	15	2031	12	2287	10	94
LF-C-55	82	178	0.40	0.1826	0.0011	10.527	0.090	0.4180	0.0033	0.0868	0.0018	2482	21	2252	18	2677	10	91
LF-C-56	62	167	0.89	0.1131	0.0008	4.985	0.035	0.3198	0.0016	0.0800	0.0013	1817	13	1789	9	1850	12	98
LF-C-57	70	182	0.84	0.1442	0.0037	6.193	0.204	0.3115	0.0022	0.1023	0.0041	2003	66	1748	12	2278	45	87
LF-C-58	83	169	0.62	0.1529	0.0009	9.255	0.058	0.4391	0.0024	0.1005	0.0013	2364	15	2347	13	2378	10	99
LF-C-59	32	83	0.96	0.1150	0.0008	5.199	0.041	0.3280	0.0018	0.0809	0.0009	1852	14	1829	10	1879	12	99
LF-C-60	39	99	1.03	0.1110	0.0007	5.063	0.035	0.3307	0.0018	0.0832	0.0009	1830	12	1842	10	1816	11	101
LF-C-61	45	119	0.87	0.1108	0.0007	5.045	0.034	0.3303	0.0018	0.0852	0.0008	1827	12	1840	10	1812	12	101
LF-C-62	35	146	0.39	0.1120	0.0007	3.499	0.035	0.2266	0.0020	0.0651	0.0006	1527	15	1317	12	1832	12	86
LF-C-63	111	216	0.58	0.2064	0.0012	12.880	0.158	0.4525	0.0051	0.0766	0.0010	2671	33	2406	27	2878	9	90
LF-C-64	62	159	1.15	0.1125	0.0007	5.005	0.036	0.3227	0.0019	0.0808	0.0009	1820	13	1803	11	1840	11	99
LF-C-65	102	459	0.21	0.1486	0.0009	4.333	0.041	0.2115	0.0018	0.0659	0.0009	1700	16	1237	10	2330	10	73
LF-C-66	37	100	0.94	0.1115	0.0007	4.928	0.037	0.3207	0.0018	0.0739	0.0007	1807	13	1793	10	1823	12	99
LF-C-67	40	110	0.86	0.1107	0.0007	4.961	0.036	0.3250	0.0018	0.0690	0.0006	1813	13	1814	10	1811	12	100
LF-C-68	38	108	0.58	0.1123	0.0007	5.117	0.035	0.3305	0.0019	0.0721	0.0006	1839	12	1841	11	1837	12	100
LF-C-69	58	154	0.90	0.1151	0.0007	5.253	0.036	0.3311	0.0018	0.0727	0.0006	1861	13	1844	10	1881	11	99
LF-C-70	63	131	1.05	0.1398	0.0008	7.868	0.068	0.4081	0.0032	0.0877	0.0008	2216	19	2206	17	2225	10	100
LF-C-71	35	91	1.08	0.1150	0.0009	5.191	0.049	0.3275	0.0019	0.0720	0.0007	1851	17	1826	11	1879	14	99
LF-C-72	40	99	1.29	0.1106	0.0007	5.101	0.037	0.3344	0.0019	0.0706	0.0007	1836	13	1860	10	1810	12	101
LF-C-73	42	160	0.98	0.1147	0.0008	3.732	0.026	0.2360	0.0013	0.0424	0.0005	1578	11	1366	7	1875	12	87
LF-C-74	25	67	0.81	0.1128	0.0009	5.126	0.041	0.3295	0.0019	0.0708	0.0007	1840	15	1836	10	1845	14	100
LF-C-75	44	83	0.80	0.1706	0.0011	10.743	0.068	0.4567	0.0027	0.1012	0.0009	2501	16	2425	14	2563	10	97
LF-C-76	81	330	1.05	0.1129	0.0007	3.253	0.022	0.2091	0.0014	0.0488	0.0004	1470	10	1224	8	1846	12	83
LF-C-77	32	84	0.88	0.1102	0.0009	5.182	0.044	0.3409	0.0021	0.0777	0.0007	1850	16	1891	11	1803	14	102
LF-C-78	28	70	0.98	0.1123	0.0009	5.336	0.044	0.3445	0.0020	0.0766	0.0007	1875	15	1908	11	1837	14	102
LF-C-79	21	53	1.04	0.1120	0.0011	5.326	0.054	0.3449	0.0020	0.0800	0.0008	1873	19	1910	11	1832	17	102
LF-C-80	74	218	0.66	0.1123	0.0008	4.755	0.063	0.3072	0.0030	0.0735	0.0010	1777	23	1727	17	1836	13	97
LF-C-81	30	84	0.87	0.1118	0.0009	4.899	0.041	0.3178	0.0018	0.0714	0.0008	1802	15	1779	10	1829	14	99
LF-C-82	42	110	0.97	0.1090	0.0007	5.041	0.037	0.3354	0.0019	0.0730	0.0007	1826	13	1864	11	1783	12	102
LF-C-83	70	177	0.89	0.1094	0.0006	5.235	0.036	0.3472	0.0021	0.0783	0.0007	1858	13	1921	12	1789	11	103
LF-C-84	66	237	0.72	0.1167	0.0007	3.971	0.050	0.2469	0.0029	0.0631	0.0006	1628	21	1422	17	1906	11	87
LF-C-85	34	88	0.76	0.1109	0.0008	5.230	0.044	0.3422	0.0020	0.0780	0.0007	1858	15	1897	11	1814	14	102
LF-C-86	43	175	0.49	0.1132	0.0007	3.520	0.034	0.2255	0.0020	0.0660	0.0007	1532	15	1311	12	1851	12	86
LF-C-87	89	183	0.37	0.1686	0.0009	10.600	0.079	0.4560	0.0032	0.0640	0.0008	2489	18	2422	17	2544	9	97
LF-C-88	81	217	0.56	0.1110	0.0006	5.310	0.037	0.3470	0.0021	0.0803	0.0010	1870	13	1920	12	1815	10	103
LF-C-89	165	412	0.55	0.1762	0.0010	8.521	0.061	0.3507	0.0022	0.0934	0.0012	2288	16	1938	12	2618	9	85
LF-C-90	35	90	0.82	0.1108	0.0008	5.307	0.042	0.3475	0.0020	0.0799	0.0009	1870	15	1923	11	1812	13	103
LF-C-91	68	183	0.51	0.1114	0.0007	5.332	0.035	0.3470	0.0020	0.0820	0.0009	1874	12	1920	11	1823	11	102
LF-C-92	38	101	0.68	0.1118	0.0007	5.313	0.036	0.3446	0.0019	0.0789	0.0009	1871	13	1909	11	1829	11	102
LF-C-93	34	82	0.80	0.1324	0.0019	6.401	0.104	0.3505	0.0020	0.0986	0.0020	2032	33	1937	11	2131	25	95
LF-C-94	75	116	0.68	0.2133	0.0013	15.927	0.286	0.5415	0.0087	0.1249	0.0018	2872	52	2790	45	2931	10	97
LF-C-95	31	87	0.56	0.1131	0.0010	5.083	0.045	0.3261	0.0017	0.0798	0.0011	1833	16	1819	10	1849	15	99
LF-C-96	53	107	0.71	0.1444	0.0009	8.646	0.065	0.4341	0.0028	0.1024	0.0016	2301	17	2324	15	2281	10	101
LF-C-97	114	320	0.82	0.1135	0.0006	4.979	0.030	0.3181	0.0017	0.0696	0.0013	1816	11	1780	9	1857	10	98
LF-C-98	108	237	0.46	0.1478	0.0008	8.443	0.057	0.4143	0.0025	0.1038	0.0015	2280	15	2235	14	2320	10	98
LF-C-99	116	451	0.58	0.1124	0.0006	3.719	0.024	0.2399	0.0014	0.0537	0.0008	1575	10	1386	8	1839	10	88
LF-C-100	86	229	0.75	0.1139	0.0010	5.299	0.047	0.3375	0.0018	0.0800	0.0012	1869	17	1874	10	1862	15	100
LF-C-101	36	105	0.46	0.1105	0.0007	4.888	0.035	0.3208	0.0017	0.0787	0.0011	1800	13	1794	9	1808	12	100
LF-C-102	32	90	0.53	0.1110	0.0007	5.076	0.038	0.3315	0.0019	0.0872	0.0011	1832	14	1846	11	1816	12	101
LF-C-103	68	189	0.55	0.1096	0.0006	5.053	0.032	0.3344	0.0019	0.0853	0.0012	1828	12	1860	10	1793	11	102
LF-C-104	35	83	1.50	0.1104	0.0008	4.930	0.037	0.3239	0.0019	0.0837	0.0013	1807	14	1809	11	1806	13	100

注:谐和度= $(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})_{\text{年龄}}/(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U})_{\text{年龄}}\times 100$

分别为 1.03、1.08 和 0.88),这两种结构的锆石 Th/U 都比较高。

4.2 U-Pb 年龄

每个锆石颗粒进行 1 个分析点的测试,共获得了 104 个数据点(表 1)。从图 6 可以看出,多数数据点沿谐和线及其附近分布,部分锆石具有明显的铅丢失。去除不谐和度>10%的 25 个数据之后,对剩余的 79 组谐和数据点进行年龄统计。由于所测锆石的年龄均>1000 Ma,选取²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄作为锆石的形成年龄。锆石年龄分布于 1573 ~ 2931 Ma 之间(表 1),主要峰值年龄为 1824 Ma,还有其他多个次级峰值年龄:1580 Ma、2070 Ma、2177 Ma、2228 Ma、2286 Ma、2324 Ma、2388 Ma、2556 Ma、2603 Ma 和 2935 Ma。数据点靠近谐和线的最年轻碎屑锆石的年龄为(1573±13)Ma(LF-C-15,不谐和度为 3%)。年龄大于 2.8 Ga 的碎屑锆石很少,仅有 1 颗。所有的年龄都大于 1.5 Ga。

5 讨论

5.1 最小的碎屑锆石谐和年龄对长龙山组时代的约束及其构造意义

如果 U-Pb 系统没有被干扰,样品没有被污染,沉积岩样品中碎屑锆石获得的最年轻的年龄数据将提供沉积物的最大沉积年龄(Nelson,2001)。本文报道的长龙山组碎屑锆石最小的谐和年龄为 1573 ±13 Ma(测点 LF-C-15)是谐和的,代表了长龙山组最大的沉积年限,即长龙山组砂岩应在此时间之后沉积的。该年龄小于任荣等(2011)报道的昌平龙山

剖面长龙山组最小的谐和年龄(1644±51 Ma)。但根据长龙山组之下的下马岭组中钾质斑脱岩夹层 1360~1380 Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(高林志等,2007,2008;Su et al. , 2008)可以判断,上覆的长龙山组砂岩应是在 1380 Ma 之后沉积的。所以长龙山组测得的最小谐和年龄(1573 Ma)并不能有效地约束其沉积时代的下限,也无法约束所产龙凤山生物群的时代。

长龙山组与下马岭组之间存在的这个区域不整合面被广泛认为代表了一次强烈和长期的地壳抬升过程(“蔚县运动”)(杜汝霖和李培菊,1980),表现为下马岭组深水相黑色泥页岩突变为长龙山组浅水相含海绿石石英砂岩、砾岩和粉砂岩沉积(曲永强等,2010)。此次抬升(“蔚县运动”)被认为与华北地块与相邻地体(性质不明)之间的拼合和碰撞过程有关(张臣等,2006;潘建国等,2013)。此次挤压构造发生的时间对应于 Rodinia 超级大陆的形成期,长龙山组被认为是 Rodinia 超大陆裂解后最早期的沉积(曲永强等,2010;潘建国等,2013)。从本文报道的碎屑锆石年龄数据来看,既不能限定它是 Rodinia 超大陆裂解期沉积的,同时也不能看到华北克拉通与 Rodinia 超大陆有何关系,因为其中缺少此期间的锆石年龄。如果长龙山组代表了 Rodinia 超大陆裂解后最早期的沉积,那么此期间的锆石年龄缺失为代表的沉积物被搬运至了何处? 另外一种观点认为,这个长时间段(1.38~1.573Ga)碎屑锆石年龄的缺失反映了华北克拉通在中元古代期间处于比较稳定的状态并且基本没有岩浆作用的发生(Lu et

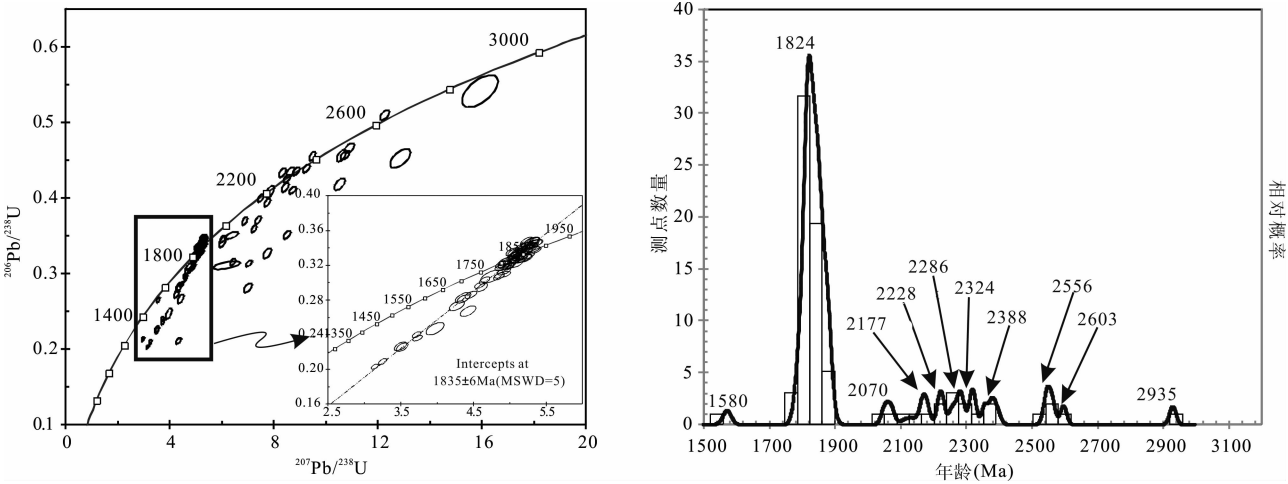


图 6 河北怀来龙凤山新元古代长龙山组碎屑锆石 U-Pb 谐和曲线图和年龄分布柱状图

Fig. 6 U-Pb concordia diagrams and age distributions of the detrital zircons from the Neoproterozoic Changlongshan Formation siltstone in the Longfengshan, Huailai County, Hebei Province

al., 2008; Zhang et al., 2009; 任荣等, 2011)。但实际上, 该时期的岩浆作用是存在的 (Su et al., 2010; 李怀坤等, 2010, 2014; 田辉等, 2015)。Su et al. (2010) 报道了华北北部铁岭组的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄— 1437 ± 21 Ma, 李怀坤等 (2010) 获得了北京延庆高于庄组张家峪亚组上部凝灰岩 1559 ± 12 Ma 的 SHRIMP U-Pb 年龄和 1560 ± 5 Ma 的 LA-MC-ICP MS U-Pb 年龄, 李怀坤等 (2014) 报道了蓟县中—新元古界标准剖面铁岭组和雾迷山组斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄 1439 ± 14 Ma 和 1483 ± 13 Ma 和 1487 ± 16 Ma, 田辉等 (2015) 在高于庄组三段 (即张家峪亚组) 下部白云岩凝灰岩夹层获得了 1577 ± 12 Ma 的锆石 LA-MC-ICP MS U-Pb 年龄。因此, 本文获得的长龙山组之所以缺失 1.38~1.573 Ga 的碎屑锆石很可能是所采样品中恰好没有该时期的锆石, 也就是说本文所研究的地点和层位岩石的物源区不存在该时期的锆石。这可能显示了当时燕辽裂陷槽复杂的古地理背景。因此, 对长龙山组碎屑锆石年龄揭示的长时间缺失的构造意义和当时详细的构造古地理还需要进一步的研究。

5.2 碎屑锆石记录的华北克拉通前寒武纪地质事件

华北克拉通古元古代末—新元古代裂谷盆地沉积岩碎屑锆石记录的华北克拉通前寒武纪基底构造热事件是以~2.5 Ga 和~1.85 Ga 为主, 2.9~2.7 Ga、1.8~1.6 Ga 及~1.2 Ga 中元古代的事件也很显著 (图 7)。其中~2.7 Ga、~2.5 Ga 和~1.85 Ga 对应华北克拉通前寒武纪重要的构造—岩浆—热事件发生的时代 (翟明国等, 2014 及其参考文献; Bao et al., 2015); 2.9~2.7 Ga 是华北克拉通重要的地壳生长时期; ~2.5 Ga 和 2.0~1.8 Ga 是华北克拉通发生克拉通化和活化再改造的时期, 有大量该时期的变质岩和岩浆岩出露。上述裂谷盆地的物源区基本上都是华北克拉通内部前寒武纪结晶基底 (翟明国等, 2014)。

本文报道的长龙山组碎屑锆石年龄分布一个显著的特点是存在~1.85 Ga 的年龄主峰, 缺失~2.5 Ga 事件的记录。其中, 大于 2.7 Ga 的年龄只有一个: 2931 Ma, 对应华北板块地壳生长期。而本文报道的~2.6 Ga (2556 Ma 和 2603 Ma) 岩浆事件则对应了华北克拉通东部地壳生长的最高峰 (2.6~2.7 Ga) (耿显雷等, 2011)。~2.5 Ga 的碎屑锆石年龄峰值对应华北克拉通前寒武纪一期重要的构造—岩浆—热事件发生的时代, 也是华北古元古代末—新

元古代沉积盆地碎屑锆石年龄中一个主要的年龄峰值 (图 7), 在华北克拉通显生宙各时代地层 (马收先等, 2011; 胡波等, 2013; 徐亚军等, 2013) 和现代河流沉积物中都有所显示 (耿显雷等, 2011; Diwu et al., 2012; 郑萍等, 2013; 包创等, 2013)。但结合燕辽裂陷槽青白口纪的古地理特征, 长龙山组沉积期燕辽裂陷槽存在一次大范围的海侵事件, 形成广布的超覆沉积, 覆盖了能提供~2.5 Ga 事件沉积的源区露头。因此~2.5 Ga 事件未能在长龙山组记录下来。

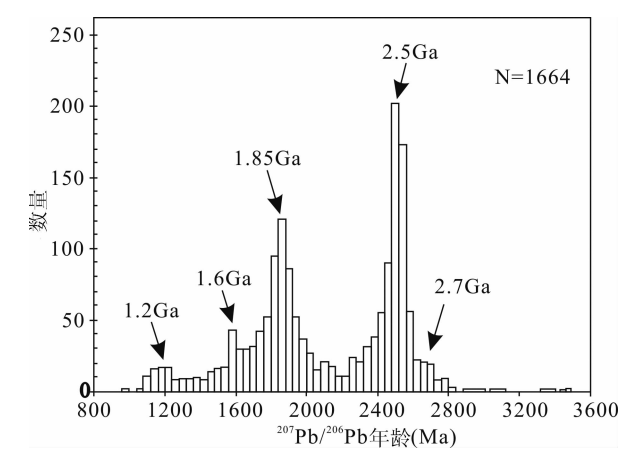


图 7 华北克拉通古元古代末—新元古代沉积岩碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分布图 (据胡波等, 2013)

Fig. 7 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age histogram of detrital zircons from Late Paleoproterozoic to Neoproterozoic sedimentary rocks in the North China Craton (after Hu et al., 2013)

华北克拉通于 2.3~2.0 Ga 经历了一次陆内拉伸—裂谷事件, 在华北北缘、东缘和中部形成丰镇、胶辽和晋豫三个裂谷带 (翟明国等, 2007)。本文报道的长龙山组 2.4~2.0 Ga (2070 Ma、2177 Ma、2228 Ma、2286 Ma、2324 Ma 和 2388 Ma) 的次级峰值就是华北克拉通这次裂谷事件的响应。需要说明的是, 最近在河北北部的隆化地区发现了古元古代中晚期 (1894~1878 Ma) 的石榴石花岗岩 (刘建峰等, 2016)。我们的样品中出现了这个年龄阶段的锆石。

龙凤山剖面长龙山组含有部分变质成因的碎屑锆石 (如图 5 中有代表性的 LF-C-60, LF-C-71, LF-C-77, 年龄分别为 1830 Ma, 1851 Ma 和 1850 Ma), 它们形成了 1835 ± 6 Ma 的上交点年龄 (图 6), 具有较高的 Th/U 比值 (分别为 1.03、1.08 和 0.88)。~1.85 Ga 为华北克拉通东、西两大陆块的碰撞拼合和统一—结晶基底的最终形成的时期, 这在长龙山组碎屑锆石年龄谱中有很好的响应。

华北克拉通于 1.85~1.8 Ga 期间已形成一

相对稳定的统一块体,并之后进入伸展构造体制发育中元古代裂谷盆地。华北克拉通分布于上述裂谷盆地的古元古代末—新元古代地层中碎屑锆石 U-Pb 年龄还存在~1.6 Ga 年龄峰值(图 7)。华北怀来青白口系长龙山组碎屑锆石年龄谱记录的 1580Ma(~1.6 Ga)峰值年龄就是此次事件的反映,对应了大红峪期的岩浆事件(陆松年等,1991;高林志等,2008;翟明国等,2014)。

5.3 碎屑锆石的物源区和燕辽裂陷槽对构造事件响应的差异

本文统计了燕辽裂陷槽内和华北克拉通东部的长龙山组(或可与之对比的地层)碎屑锆石年龄分布(图 1,图 8)。结果显示,它们展现出了不同的面貌,即使同处燕辽裂陷槽内部、碎屑锆石样品采样地相距不远,它们的年龄分布也展现了不同的特征(图 8),共同点是燕辽裂陷槽青白口系长龙山组的碎屑

锆石未出现比 1.4 Ga 更年轻的年龄。

河北怀来龙凤山剖面长龙山组粉砂岩具有一个主峰加多个次级峰值的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱(图 8a)。前人(高林志等,2010;任荣等,2011)报道了北京昌平地区龙山剖面的青白口系长龙山组碎屑锆石年龄,但两个年龄图谱也显示了细节上的差异(图 8b,c)。原因可能是样品采自相同剖面的不同层位:高林志等(2010)报道的样品采自长龙山组(或称骆驼岭组)的中下部,而任荣等(2011)研究的样品采自长龙山组的上部。但两个样品的整体年龄谱系基本一致,都显示了双峰式的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱。而河北宣化赵家山剖面骆驼岭组(即长龙山组)底部碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谱系呈现单一的峰值(高林志等,2010)(图 8d)。这 4 个样品的位置相距不远,都处于燕辽裂陷槽沉积中心——蓟县中新元古界剖面的西部,它们的碎屑锆石年龄谱系(图

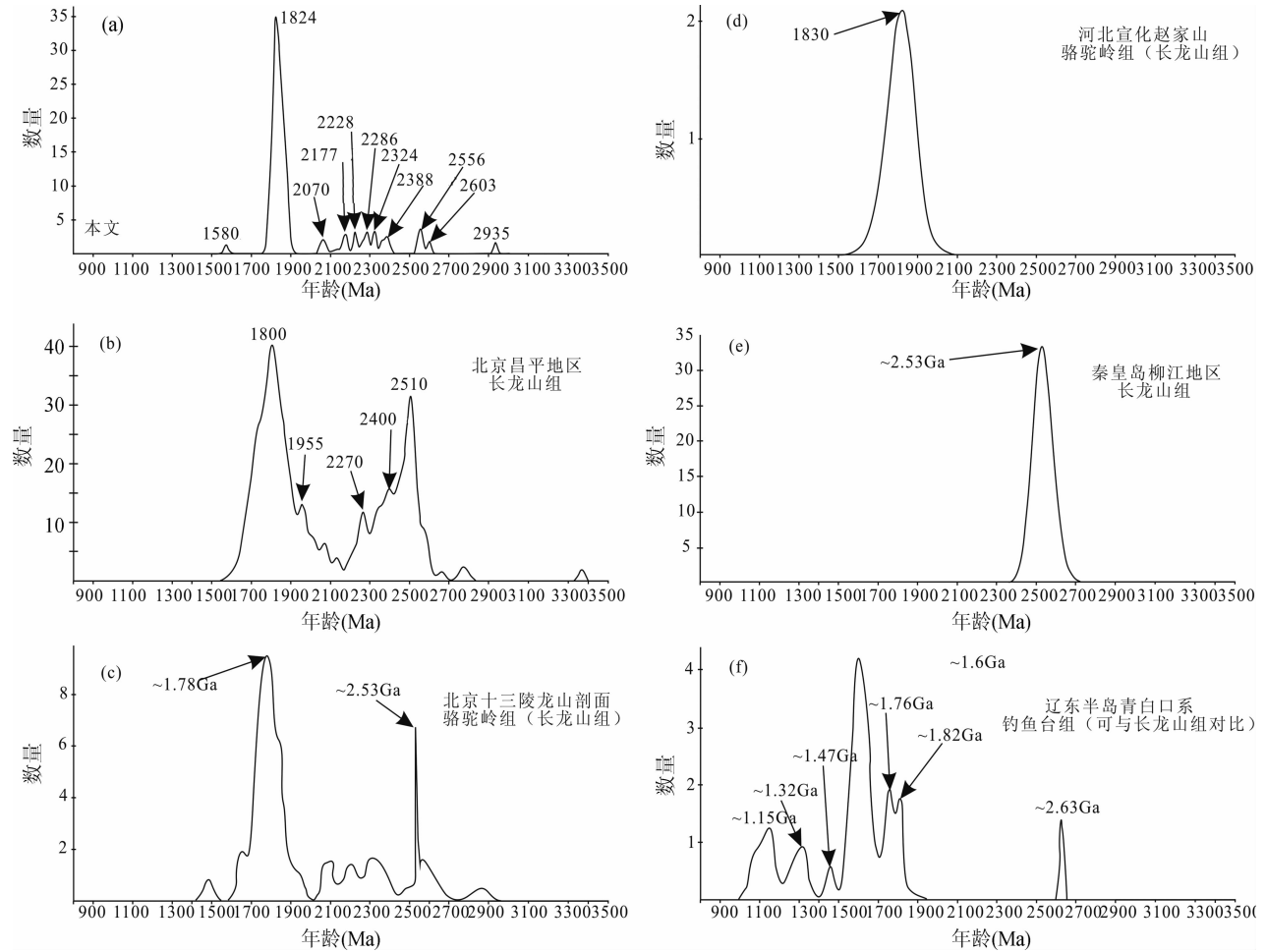


图 8 华北克拉通不同地区长龙山组或与之可对比的地层碎屑锆石年龄分布
(a—本文,b—据第五春荣等(2011),c—据任荣等(2011),d—f—据高林志等 2010)

Fig. 8 Detrital zircon ages distribution from the Changlongshan Formation or cotemporary strata in different regions of the North China Craton [a by this paper, b after Diwu et al. , (2011), d—f after Gao et al. , (2010)]

8a~d)的共同点是它们的主峰峰值年龄一致,都对应了~1.85 Ga 地质事件,显示了它们具有一致的物源区。从图 1 可以看出,上述 4 个样品的位置靠近华北克拉通的中部造山带,它们一致的主峰年龄应是~1.85 Ga 华北克拉通东、西部分汇聚、碰撞事件的反映。另外,这 4 个样品的差异除了龙凤山长龙山组缺失~2.5 Ga 事件的记录之外,比较明显的是宣化长龙山组的物源单一,只形成了一个峰值年龄(图 8d),这可能与测年数据太少有关(只有 27 个谐和的年龄)(高林志等,2010)。

华北克拉通东部秦皇岛柳江地区长龙山组石英砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄分布在 2635~2487 Ma 之间(第五春荣等,2011)(图 8e),与怀来龙凤山地区和昌平龙山剖面的长龙山组(图 8a,b,c)明显不同,其物质来源较为单一。与北京一蓟县标准剖面相比,柳江地区在较长的一段地质时期为古陆壳的缓慢剥蚀区(第五春荣等,2011)。对比分析表明,柳江地区长龙山组缺少~1.85 Ga 事件的年龄记录,并非是因为计算的测年数据太少之故(谐和年龄 80 个),而是受当时的古地理环境约束:长龙山期柳江地区与华北克拉通中部造山带被浅海分开,不具备物源输送的路径(乔秀夫等,2007)。而辽东半岛青白口系细河群钓鱼台组物源来自辽东半岛的狼岭古陆,即朝鲜半岛(高林志等,2010),显示了与燕辽裂陷槽完全不同的构造演化特征。

燕辽裂陷槽沉积的物源区基本上都是华北克拉通内部前寒武纪结晶基底(翟明国等,2014)。地层对比结果显示长龙山组明显的沉积超覆过程,在盆地边缘长龙山组覆盖于老地层之上;在易县西北和蔚县地区,长龙山组砾岩超覆在铁岭组之上,它们之间缺失下马岭组;在蓟县东南部和燕山东南边缘,长龙山组底部燧石角砾岩呈角度不整合覆盖在雾迷山组或古老片麻岩和花岗岩之上(曲永强等,2010;潘建国等,2013)。燕辽裂陷槽内部不同地区长龙山组或与之可对比地层的碎屑锆石年龄分布都具有明显的~1.85 Ga 峰龄,但本文报道的龙凤山剖面长龙山组对广布华北克拉通的~2.5 Ga 事件没有记录,虽然在其附近的河北省西北部甘陶河群所有样品均有约 2.5Ga 的年龄峰值(崔笛等,2015),但可能是由于长龙山期海侵事件使得~2.5 Ga 的露头被大范围的超覆沉积覆盖,进而不能提供相应的物源。目前,具体的物源区还不能确切判断,但依据当时的古地理特征(乔秀夫等,2007;潘建国等,2013),长龙山组的物源区可能来自研究区南部或者北东向不远

的火山岛。另外,长龙山期的海侵范围如此之广,海侵超覆区也已覆盖到秦皇岛柳江地区(潘建国等,2013),秦皇岛柳江地区如何能由浅海相隔造成年龄结构如此大的差异呢?可见,燕辽裂陷槽新元古代的古地理面貌比目前想象的还要复杂。对其详细的刻画需要更多的资料来补充和约束。

6 结论

通过对华北克拉通北部河北怀来地区燕辽裂陷槽内青白口系长龙山组中部粉砂岩的碎屑锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄研究,得出以下结论:

(1)碎屑锆石年龄分布于 1573~2931 Ma 之间,碎屑锆石年龄谱存在一个明显的峰值,此外还有其它若干次级峰值年龄。

(2)各年龄峰值响应了华北克拉通主要的前寒武纪地质事件:年龄主峰(~1.85 Ga)记录了华北克拉通东、西两大陆块的碰撞拼合事件,~2.9 Ga (2935 Ma)峰值年龄对应了华北克拉通重要的陆壳生长时间,2.6 Ga(2603 Ma 和 2556 Ma)响应了华北克拉通东部地壳生长的高峰期,而介于 2.4~2.0 Ga 的次级峰值年龄代表了华北克拉通经历的一次陆内拉伸—裂谷事件,1580 Ma 峰值年龄是高于庄期的岩浆事件的反映。缺少华北克拉通的~2.5 Ga 事件的记录。

(3)长龙山组中部粉砂岩碎屑锆石最小谐和年龄(1573 Ma)并不能有效地约束其沉积时代的下限。

(4)秦皇岛柳江地区和辽东半岛青白口系长龙山组碎屑锆石年龄分布特征与燕辽裂陷槽内长龙山组存在的差异,很大程度上是受当时的古地理背景制约。

致谢:河北省廊坊区域地质调查研究所实验室帮助完成了锆石单矿物分选工作,锆石 U-Pb 测年得到天津地质矿产研究所周红英老师、耿建珍博士的热情帮助,在此一并致谢!

References

Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59~79.

Bao Chuang, Chen YueLong, Li Dapeng, Chen Xue. 2015. Evolutionary history of Precambrian continental crust in the North China Craton. *Geochemical Journal*, 49: 53~62.

Bao Chuang, Chen Yuelong, Li Dapeng. 2013. U-Pb ages, Hf isotopic composition and its geological significance of detrital zircons in the floodplain sediments from the Xar Moron River,

- Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3159~3172.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Korsch R J, Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200: 155~170.
- Chen Menge. 1989. Some aspects of studies on Late Precambrian macrofossils in China. *Scientia Geologica Sinica*, 3: 244~255 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaojun, Li Renyuan, Luo Shunshe. 2012. Sedimentary facies in the Changlongshan Formation, Xuanlong depression, Yanshan area, Hebei. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32 (1): 50~54 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaojun, Luo Shunshe, Li Jia. 2011. Clastic rock geochemical features of Changlongshan Formation in Qingbaikou System within Xuanlong Depression. *Geology in China*, 38(6): 1477~1484 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuelong, Li Dapeng, Zhou Jian, Zhang Hongfei, Liu Fei, Nie Lanshi, Jiang Liting. 2008. U-Pb ages of zircons in Western Qinling Mountain, China, and their tectonic implications. *Earth Science Frontiers*, 15(4): 88~107 (in Chinese with English abstract).
- Cui Di, Chen Yuelong, Li Dapeng, Wang Shanhui, Chenxue. 2015. Zircons U-Pb dating and Hf isotopic composition of clastic sedimentary rock in the Nansi Formation, Gantaohu Group, North China Craton and its tectonic significance. *Geological Review*, 61(2): 425~442 (in Chinese with English abstract).
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Gao Jianfeng, Pan Longgang. 2013. Early Precambrian tectonothermal events of the North China Craton: Constraints from in situ detrital zircon U-Pb, Hf and O isotopic compositions in Tietonggou Formation. *Chinese Science Bulletin*, 58(4): 3760~3770.
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Liu Yangjie, Han Wei, Dai Mengning, Li Yongxiang. 2011. The protolith nature of quartz sandstone from Changlongshan Formation in Liujiang area, Qinhuangdao City: evidence of U-Pb and Hf-isotope from detrital zircons. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 30(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Wang Qian. 2012. The crustal growth and evolution of North China Craton: Revealed by Hf isotopes in detrital zircons from modern rivers. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3520~3530 (in Chinese with English abstract).
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Zhang Hong, Wang Qian, Guo Anlin, Fan Longgang. 2012. Episodic tectonothermal events of the western North China Craton and North Qinling Orogenic Belt in central China: Constraints from detrital zircon U-Pb ages. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 107~122.
- Du Rulin, Li Peiju. 1980. Sinian Subgroup in the Western Yanshan. In: *Sinian Subgroup of China*. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press: 341~357 (in Chinese with English abstract).
- Du Rulin, Tian Lifu, Hu Huabin, Sun Liming, Chen Jie. 2009. The Neo-Proterozoic Qingbaikou Period Longfengshan Biota in China. Beijing: Science Press: 1~145 (in Chinese with English abstract).
- Du Rulin, Tian Lifu. 1985. Algal macrofossils from the Qingbaikou System in the Yenshan Range of North China. *Precambrian Research*, 29: 5~14.
- Du Rulin, Wang Qizheng, Tian Lifu. 1995. Catalogue of algal megafossils from the Proterozoic of China. *Precambrian Research*, 73: 291~298.
- Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Pang Weihua, Zhang Chuanheng. 2011. New geologic time scale of Meso- and Neoproterozoic of China and geochronologic constraint by SHRIMP zircon U-Pb dating. *Journal of Stratigraphy*, 35(1): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Liu Pengju, Ding Xiaozhong, Liu Yanxue, Dong Chunyan, Song Biao. 2010. Detrital zircon SHRIMP U-Pb age from the Diaoyutai Formation, Xihe Group in Liaodong Peninsula, China and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 29(8): 1113~1122 (in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Liu Pengju, Ding Xiaozhong, Wang Ziqiang, Zhang Yanjie. 2009. Recognition of Meso- and Neoproterozoic stratigraphic framework in North and South China. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(4): 433~446 (in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Shi Xiaoying, Zhou Hongrui, Wang Ziqiang. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuff bed in the Xiamaling Formation of the Qingbaikouan System in North China. *Geological Bulletin of China*, 26(3): 249~255 (in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Yin Chongyu, Shi Xiaoying, Wang Ziqiang, Liu Yaoming, Liu Pengju, Tang Feng, Song Biao. 2008. SHRIMP Zircon Ages: Basis for refining the chronostratigraphic classification of the Meso- and Neoproterozoic strata in North China old land. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(3): 366~376 (in Chinese with English abstract).
- Geng Jianzhen, Zhang Jian, Li Huaikun, Li Huimin, Zhang Yongqing, Hao Shuang. 2012. Ten-micron-sized Zircon U-Pb Dating Using LA-MC-ICP-MS. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(6): 877~884 (in Chinese with English abstract).
- Geng Xianlei, Gao Shan, Chen Chen. 2011. Crustal growth of the eastern North China Craton and Sulu Orogen as revealed by U-Pb dating and Hf isotopes of detrital zircons from modern rivers. *Earth Science*, 36(3): 483~499 (in Chinese with English abstract).
- Guo J H, Sun M, Chen F K, Zhai M G. 2005. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic continental collision. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 529~542.
- He Zhengjun, Song Tianrui, Ding Xiaozhong, Zhang Qiaoda. 2000. Sedimentary Record of the Proterozoic Changchengian Volcanic

- Events in Beijing and Its Neighbouring Area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(4): 510~520 (in Chinese with English abstract).
- Hu Bin, Zhai Mingguo, Peng Peng, Liu Fu, Diwu Chunrong, Wang Haozheng, Zhang Haidong. 2013. Late Paleoproterozoic to Neoproterozoic geological events of the North China Craton: Evidences from LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Cambrian and Jurassic sedimentary rocks in Western Hills of Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2508~2536 (in Chinese with English abstract).
- Hu Bo, Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Peng Peng, Liu Fu, Liu Shuang. 2009. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircon from the Huade Group in the northern margin of the North China Craton and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 193~211 (in Chinese with English abstract).
- Hu Guohui, Zhao Taiping, Zhou Yanyan, Yang Yang. 2012. Depositional age and provenance of the Wufoshan Group in the southern margin of the North China Craton: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions. *Geochimica*, 41(4): 326~342 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xueguang. 2006. Tectonic Evolution of the Mesoproterozoic Sedimentary Basin in Yanshan Range. *Geological Survey and Research*, 29(4): 263~270 (in Chinese with English abstract).
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, Belousova E A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211(1-2): 47~69.
- Kröner A, Wilde S A, Li J H, Wang K Y. 2005. Age and evolution of a Late Archean 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 Hongyan, Xu Yigang, Huang Xiaolong, He Bin, Luo Zhenyu, Yan Bin. 2009. Activation of northern margin of the North China Craton in Late Paleozoic: Evidence from U-Pb dating and Hf isotopes of detrital zircons from the Upper Carboniferous Taiyuan Formation in the Ningwu-Jingle basin. *Chinese Science Bulletin*, 24(5): 632~640.
- Li Huaikun, Lu Songnian, Li Huimin, Sun Lixin, Xiang Zhenqun, Geng Jianzhen, Zhou Hongying. 2009. Zircon and beddeleyite U-Pb precision dating of basic rock sills intruding Xiamaling Formation, North China. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1396~1404 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Zhu Shixing, Xiang Zhenqun, Su Wenbo, Lu Songnian, Zhou Hongying, Geng Jianzhen, Li Sheng, Yang Fengjie. 2010. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131~2140 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Su Wenbo, Zhou Hongying, Xiang Zhenqun, Tian Hui, Yang Ligong, Huff W D, Ettensohn F R. 2014. The first precise age constraints on the Jixian System of the Mesoproterozoic to Neoproterozoic Standard Section of China: SHRIMP zircon U-Pb dating of bentonites from the Wumishan and Tieling formations in the Jixian Section, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2999~3012 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng, Li Jinyi, Qu Junfeng, Hu Zhaochu, Guo Chunli, Chen Junqiang. 2016. Petrogenesis of Lanqizhen Paleoproterozoic garnet granite at Longhua area in the northern margin of the North China Craton and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2365~2383 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen, Zhao Guochun, Wilde S A, Shu Guiming, Sun Min, Li Qiugen, Tian Wei, Zhang Jian. 2006. Th-U-Pb monazite geochronology of the Liliang and Wutai Complexes: Constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 148: 205~224.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 2009. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537~571.
- Lu S N, Zhao G C, Wang H C, Han G J. 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review. *Precambrian Research*, 160: 77~93.
- Lu Songnian, Li Huimin. 1991. A precise U-Pb single zircon age determination for the volcanic of Dahongyu Formation Changcheng System in Jixian. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 22: 137~146 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Yang Chunliang, Li Huaikun, Li Humin. 2002. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China Craton. *Gondwana Research*, 5: 123~131.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot/Ex, version 3.00. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1~70.
- Ma Mingzhu, Zhang Yuxu, Xie Hangqiang, Wan Yusheng. 2014. SHRIMP U-Pb dating and LA-ICPMS Hf isotope analysis of detrital zircons from medium- to coarse-grained sandstones of the Bayan Obo Group and Sailinhuodong Group and its geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2973~2988 (in Chinese with English abstract).
- Ma Shouxian, Meng Qingren, Qu Yongqiang. 2011. A study of detrital zircons of Late Carboniferous-Middle Triassic strata in the northern margin of North China block and its geological implication. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1485~1500 (in Chinese with English abstract).
- Nelson D R. 2001. An assessment of the determination of

- depositional ages for Precambrian clastic sedimentary rocks by U-Pb dating of detrital zircons. *Sedimentary Geology*, 141 ~ 142; 37~60.
- Pan Jianguo, Qu Yongqiang, Ma Rui, Pan Zhongkui, Wang Hailong. 2013. Sedimentary and Tectonic Evolution of the Meso-Neoproterozoic Strata in the Northern Margin of the North China Block. *Geological Journal of China Universities*, 19 (1): 109~122 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Xiufu, Gao Linzhi, Zhang Chuanheng. 2007. New idea of the Meso- and Neoproterozoic chronostratigraphic chart and tectonic environment in Sino- Korean Plate. *Geological Bulletin of China*, 26 (5): 503 ~ 509 (in Chinese with English abstract).
- Qu Yongqiang, Meng Qingren, Ma Shouxian, Li Lin, Wu Guoli. 2010. Geological characteristics of unconformities in Mesoproterozoic successions in the northern margin of North China Block and their tectonic implications. *Earth Science Frontiers*, 17 (4): 112 ~ 127 (in Chinese with English abstract).
- Ren Rong, Han Baofu, Zhang Zhicheng, Li Jianfeng, Yang Yueheng, Zhang Yanbin. 2011. Zircon U-Pb and Hf isotopic studies of basement gneiss and overlying Meso-Neoproterozoic sedimentary rocks from the Changping area, Beijing, and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6):1721~1745(in Chinese with English abstract).
- Su Wenbo, Li Huaikun, Huff W D, Ettensohn F R, Zhang Shihong, Zhou Hongying, Wan Yusheng. 2010. SHRIMP U-Pb dating for a K-bentonite bed in the Tieling Formation, North China. *Chinese Science Bulletin*, 55(22): 2197~2206.
- Su Wenbo, Zhang Shihong, Huff W D, Li Huaikun, Ettensohn F R, Chen Xiaoyu, Yang Hongmei, Han Yigui, Song Biao, Santosh M. 2008. SHRIMP U-Pb ages of K-bentonite beds in the Xiamaling Formation; Implications for revised subdivision of the Meso-to Neoproterozoic history of the North China Craton. *Gondwana Research*, 14(3): 543~553.
- Su Wenbo, Li Huaikun, Huff W D, ETTENSOHN F R, Zhang Shihong, Zhou Hongying, Wan Yusheng. 2010. SHRIMP U-Pb dating for a K-bentonite bed in the Tieling Formation, North China. *Chinese Science Bulletin*, 55, doi: 10. 1007/s11434-010-4007-5.
- Tang Feng, Gao Linzhi. 1999. The biofacies of the Qingbaikouan Period, Neo-Proterozoic, in Beijing area and its neighboring areas. *Geological Review*, 45(1): 50 ~ 57 (in Chinese with English abstract).
- Tian Hui, Zhang Jian, Li Huaikun, Su Wenbo, Zhou Hongying, Yang Ligong, Xiang Zhenqun, Geng Jianzhen, Liu Huan, Zhu Shixing, Xu Zhenqing. 2015. Zircon LA-MC-ICPMS U-Pb dating of tuff from Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in Jixian County of North China and its geological significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(5): 647~658 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Miao Peisheng, Liu Dunyi, Yang Chonghui, Wang Wei, Wang Huichu, Wang Zhejiu, Dong Chunyan, Du Lilin, Zhou Hongying. 2010. Formation ages and source regions of the Palaeoproterozoic Gaofan, Hutuo and Dongjiao groups in the Wutai and Dongjiao areas of the North China Craton from SHRIMP U-Pb dating of detrital zircons; Resolution of debates over their stratigraphic relationships. *Chinese Science Bulletin*, 55(7): 572~582.
- Wang Hongzhen. 1985. Atlas of the palaeogeography of China. Sinomaps Press, 1~143.
- Wang Lifeng, Li Wenxuan, Luo Junlin, Hu Huabin. 2000. The Study on Sedimentary Facies of Changlongshan Formation of Neo-Porteozoic Era in Huailai, Hebei. *World Geology*, 19 (2): 138~143 (in Chinese with English abstract).
- Wang Meng, Luo Jinglan, Li Miao, Bai Xuejing, Cheng Chen, Yan Liaowei. 2013. Provenance and tectonic setting of sandstone-type uranium deposit in Dongsheng area, Ordos basin; Evidence from U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8): 2746~2758(in Chinese with English abstract).
- Wang Zejiu, Huang Zhigao, Yao Jianxin, Ma Xiulan. 2014. Characteristics and Main Progress of The Stratigraphic Chart of China and Directions. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(3): 271~276 (in Chinese with English abstract).
- Wilde S A, Zhao G C, Sun M. 2002. Development of the North China Craton during the Late Archean and its final amalgamation at 1.8Ga: Some speculations on its position within a global Paleoproterozoic Supercontinent. *Gondwana Research*, 5: 85~94.
- Wilde S A, Zhao G C. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 519~522.
- Wu Fuyuan, Zhao Guochun, Wilde Sa, Sun Deyou. 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 523~545.
- Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai. 2013. Tectonic evolution of the North Qilian Orogenic belt from the Late Ordovician to Devonian; Evidence from detrital zircon geochronology. *Earth Science*, 38(5): 934~946 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Liu Wenjun. 2005. Neoarchean to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 547~561.
- Zhai Mingguo, Hu Bo, Peng Peng, Zhao Taiping. 2014. Meso-Neoproterozoic magmatic events and multi-stage rifting in the NCC. *Earth Science Frontiers*, 21(1): 100~119 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Peng Peng. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665~2682(in Chinese with English abstract).
- Zhang Changhou, Zhang Yong, Li Hailong, Wu Ganguo, Wang Genhou, Xu Debin, Xiao Weifeng, Dai Lin. 2006. Late Mesozoic thrust tectonics framework in the western part of the

Yanshan orogenic belt and the Western Hills of Beijing: characteristics and significance. *Earth Science Frontiers*, 13 (2): 165~183 (in Chinese with English abstract).

Zhang Chen, Liu Shuwen, He Guoqi, Huang Baoling. 2006. Characteristics and their tectonic environment of Mesoproterozoic granitoids in the middle segment of north margin of the North China Plate. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 42(4): 451~456 (in Chinese with English abstract).

Zhang S H, Zhao Y, Yang Z Y, He Z F, Wu H. 2009. The 1.35Ga diabase sills from the northern North China Craton: Implications for breakup of the Columbia (Nuna) supercontinent. *Earth and Planetary Science Letters*, 288: 588~600.

Zhang Zhongying. 1988. Longfengshania Du Emend.: An earliest record of Bryophyte-like fossils. *Acta Palaeontologica Sinica*, 27(4): 416~425 (in Chinese with English abstract).

Zhao G C, Sun M, Wilde S A, Li S Z. 2003. Assembly, accretion and breakup of the Paleo- Mesoproterozoic Columbia Supercontinent: Records in the North China Craton. *Gondwana Research*, 6: 417~434.

Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107: 45~73.

Zhao G C, Wilde S A, Guo J H, Cawood P A, Sun M, Li X P. 2010. Single zircon grains record two Paleoproterozoic collisional events in the North China Craton. *Precambrian Research*, 177: 266~276.

Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A, Li Sanzhong. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136: 177~202.

Zhao Guochun. 2001. Paleoproterozoic assembly of the North China Craton. *Geological Magazine*, 138: 87~91.

Zheng Ping, Li Dapeng, Chen Yuelong, Hou Kejun, Liu Changzheng. 2013. Zircon U-Pb ages of clastic sediment from the outfall of the Yellow River and their geological significance. *Geoscience*, 27 (1): 79 ~ 90 (in Chinese with English abstract).

Zhou Hongrui, Mei Mingxiang, Luo Zhiqing, Xing Kuang. 2006. Sedimentary sequence and stratigraphic framework of the Neoproterozoic Qingbaikou system in the Yanshan region, North China. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 280~290 (in Chinese with English abstract).

陈小军, 李任远, 罗顺社. 2012. 燕山地区宣龙坳陷长龙山组沉积相特征研究. *沉积与特提斯地质*, 32 (1): 50~54.

陈小军, 罗顺社, 李家. 2011. 龙坳陷青白口系长龙山组碎屑岩地球化学特征. *中国地质*, 38(6): 1477~1484.

陈岳龙, 李大鹏, 周建, 张宏飞, 刘飞, 聂兰仕, 蒋丽婷, 柳小明. 2008. 中国西秦岭碎屑锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. *地学前缘*, 15(4): 88~107.

崔笛, 陈岳龙, 李大鹏, 王善辉, 陈雪. 2015. 华北克拉通甘陶河群南寺组碎屑岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及构造意义. *地质论评*, 61(2): 425~442.

第五春荣, 孙勇, 高剑峰, 樊龙刚. 2013. 华北克拉通早前寒武纪构造—热事件性质探索: 铁铜沟组石英岩中碎屑锆石 U-Pb-Hf-O 同位素组成. *科学通报*, 58(28~29): 2946~2957.

第五春荣, 孙勇, 刘养杰, 韩伟, 戴梦宁, 李永项. 2011. 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. *岩石矿物学杂志*, 30(1): 1~12.

第五春荣, 孙勇, 王倩. 2012. 华北克拉通地壳生长和演化: 来自现代河流碎屑锆石 Hf 同位素组成的启示. *岩石学报*, 28(11): 3520~3530.

杜汝霖, 李培菊. 1980. 燕山西段震旦亚界. 见: *中国震旦亚界*. 天津: 天津科学技术出版社, 341 ~357.

杜汝霖, 田立富, 胡华斌, 孙黎明, 陈洁. 2009. 中国前寒武纪古生物研究成果—新元古代青白口纪龙凤山生物群. 北京: 科学出版社: 1~145.

高林志, 丁孝忠, 庞维华, 张传恒. 2011. 中国中—新元古代地层年表的修正—锆石 U-Pb 年龄对年代地层的制约. *地层学杂志*, 35(1): 1~7.

高林志, 张传恒, 陈寿铭, 刘鹏举, 丁孝忠, 刘燕学, 董春燕, 宋彪. 2010. 辽东半岛细河群沉积岩碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *地质通报*, 29(8): 1113~1122.

高林志, 张传恒, 刘鹏举, 丁孝忠, 王自强, 张彦杰. 2009. 华北—江南地区中、新元古代地层格架的再认识. *地球学报*, 30(4): 433~446.

高林志, 张传恒, 史晓颖, 周洪瑞, 王自强. 2007. 华北青白口系下马岭组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *地质通报*, 26(3): 249~255.

高林志, 张传恒, 尹崇玉, 史晓颖, 王自强, 刘耀明, 刘鹏举, 唐烽, 宋彪. 2008. 华北古陆中、新元古代年代地层框架—SHRIMP 锆石年龄新依据. *地球学报*, 29(3): 366~376.

耿建珍, 张健, 李怀坤, 李惠民, 张永清, 郝爽. 2012. 10 μ m 尺度锆石 U-Pb 年龄的 LA-MC-ICP-MS 测定. *地球学报*, 33(6): 877~884.

耿显雷, 高山, 陈晨. 2011. 华北克拉通东部及苏鲁造山带的地壳生长: 来自现代河流碎屑锆石的 U-Pb 定年和 Hf 同位素证据. *地球科学*, 36(3): 483~499.

和政军, 宋天锐, 丁孝忠, 张巧大. 2000. 北京及邻区长城纪火山事件的沉积记录. *沉积学报*, 18(4): 510~520.

胡波, 翟明国, 彭澎, 刘富, 第五春荣, 王浩铮, 张海东. 2013. 华北克拉通元古代末—新元古代地质事件—来自北京西山地区寒武系和侏罗系碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学的证据. *岩石学报*, 29(7): 2508~2536.

胡波, 翟明国, 郭敬辉, 彭澎, 刘富, 刘爽. 2009. 华北克拉通北缘化

参 考 文 献

包创, 陈岳龙, 李大鹏. 2013. 内蒙古西拉木伦河河漫滩沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义. *岩石学报*, 29(9): 3159~3172.

陈梦莪. 1989. 中国晚前寒武纪的宏体化石概况. *地质科学*, 3: 244~255.

- 德群中碎屑锆石的 LA-ICP-MSU-Pb 年龄及其构造意义. 岩石学报, 25(1):193~211.
- 胡国辉, 赵太平, 周艳艳, 杨阳. 2012. 华北克拉通南缘五佛山群沉积时代和物源区分析:碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据. 地球化学, 41(4):326~342.
- 黄学光. 2006. 燕山中、新元古代沉积盆地构造演化. 地质调查与研究, 29(4): 263~270.
- 李洪颜, 徐义刚, 黄小龙, 何斌, 罗震宇, 燕滨. 2009. 华北克拉通北缘晚古生代活化:山西宁武—静乐盆地上石炭统太原组碎屑锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素证据. 科学通报, 24(5): 632~640.
- 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 孙立新, 相振群, 耿建珍, 周红英. 2009. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年一对华北中元古界地层划分方案的制约. 地质通报, 28(10): 1396~1404.
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 苏文博, 陆松年, 周红英, 耿建珍, 李生, 杨锋杰. 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束. 岩石学报, 26(7): 2131~2140.
- 李怀坤, 苏文博, 周红英, 相振群, 田辉, 杨立公, Huff W D, Ettensohn F R. 2014. 中—新元古界标准剖面蓟县系首获高精度年龄制约—蓟县剖面雾迷山组和铁岭组斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年研究. 岩石学报, 30(10): 2999~3012.
- 刘建峰, 李锦轶, 曲军峰, 胡兆初, 郭春丽, 陈军强. 2016. 华北克拉通北缘隆化地区蓝旗镇古元古代石榴石花岗岩的成因及地质意义. 地质学报, 90(9):2365~2383.
- 陆松年, 李惠民. 1991. 蓟县长城系大红峪组火山岩的单颗粒锆石 U-Pb 法准确测年. 中国地质科学院院报, 22: 137~146.
- 马铭株, 章雨旭, 颜颇强, 万渝生. 2014. 华北克拉通北缘白云鄂博群和腮林忽洞群底部碎屑锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素分析及其地质意义. 岩石学报, 30(10):2973~2988.
- 马收先, 孟庆任, 曲永强. 2011. 华北地块北缘上石炭统一中三叠统碎屑锆石研究及其地质意义. 地质通报, 30(10): 1485~1500.
- 潘建国, 曲永强, 马瑞, 潘中奎, 王海龙. 2013. 华北地块北缘中新元古界沉积构造演化. 高校地质学报, 19(1): 109~122.
- 乔秀夫, 高林志, 张传恒. 2007. 中朝板块中、新元古界年代地层柱与构造环境新思考. 地质通报, 26(5): 503~509.
- 曲永强, 孟庆任, 马收先, 李林, 武国利. 2010. 华北地块北缘中元古界几个重要不整合面的地质特征及构造意义. 地学前缘, 17(4):112~127.
- 任荣, 韩宝福, 张志诚, 李建锋, 杨岳衡, 张艳斌. 2011. 北京昌平地区基底片麻岩和中—新元古代盖层锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究及其地质意义. 岩石学报, 27(6):1721~1745.
- 苏文博, 李怀坤, Huff WD, Ettensohn F R, 张世红, 周红英, 万渝生. 2010. 铁岭组钾质斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义. 科学通报, 55(22): 2197~2206.
- 唐烽, 高林志. 1999. 北京及邻区青白口纪生物相研究. 地质论评, 45(1): 50~57.
- 田辉, 张健, 李怀坤, 苏文博, 周红英, 杨立公, 相振群, 耿建珍, 刘欢, 朱士兴, 许振清. 2015. 蓟县中元古代高于庄组凝灰岩锆石 LA-MC-ICP MS U-Pb 定年及其地质意义. 地球学报, 36(5): 647~658.
- 万渝生, 苗培森, 刘敦一, 杨崇辉, 王伟, 王惠初, 王泽九, 董春艳, 杜利林, 周红英. 2010. 华北克拉通高凡群、滹沱群和东焦群的形成时代和物质来源:碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年代学制约. 科学通报, 55(7):572~582.
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集. 北京:地图出版社, 1~143.
- 王立峰, 李文宣, 罗均林, 胡华斌. 2000. 河北省怀来新元古代长龙山组沉积相研究. 世界地质, 19(2): 138~143.
- 王盟, 罗静兰, 李杪, 白雪晶, 程辰, 闫辽伟. 2013. 鄂尔多斯盆地东胜地区砂岩型铀矿源区及其构造背景分析—来自碎屑锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素的证据. 岩石学报, 29(8): 2746~2758.
- 王泽九, 黄枝高, 姚建新, 马秀兰. 2014. 中国地层表及说明书的特点与主要进展. 地球学报, 35(3): 271~276.
- 徐亚军, 杜远生, 杨江海. 2013. 北祁连造山带晚奥陶世—泥盆纪构造演化:碎屑锆石年代学证据. 地球科学—中国地质大学学报, 38(5): 934~946.
- 翟明国, 胡波, 彭澎, 赵太平. 2014. 华北中—新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件. 地学前缘, 21(1): 100~119.
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. 岩石学报, 23(11): 2665~2682.
- 张臣, 刘树文, 何国琦, 黄宝玲. 2006. 华北板块北缘中段中元古代晚期花岗岩类特征及其构造意义. 北京大学学报:自然科学版, 42(4): 451~456.
- 张长厚, 张勇, 李海龙, 吴淦国, 王根厚, 徐德斌, 肖伟峰, 戴凛. 2006. 燕山西段及北京西山晚中生代逆冲构造格局及其地质意义. 地学前缘, 13(2): 165~183.
- 张忠英. 1988. 龙凤山苔属(新修订)—可能的最早的苔藓植物化石. 古生物学报, 27(4): 416~425.
- 郑萍, 李大鹏, 陈岳龙, 侯可军, 刘长征. 2013. 黄河口河流沙碎屑沉积物锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 现代地质, 27(1): 79~90.
- 周洪瑞, 梅冥相, 罗志清, 邢矿. 2006. 燕山地区新元古界青白口系沉积层序与地层格架研究. 地学前缘, 13(6): 280~290.

Detrital Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of the Changlongshan Formation of Qingbaikou System in Huailai County, Hebei Province and Its Tectonic-Paleogeographic Significance

WANG Zhentao¹⁾, SHEN Yang²⁾, WANG Xunlian³⁾, MA Boyong⁴⁾, HUANG Xiaohong⁵⁾

1) MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing, 100037, China;

2) Museum, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China;

3) School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083;

4) China Geological Survey, Beijing, 100037, China;

5) No. 9 Gold Party of Chinese People's Armed Police, Haikou, 521127, Hainan, China

Abstract

The Changlongshan Formation (also called the Luotuoling Formation) of Qingbaikou System in Huailai County, Hebei Province receives much concern for the discovery of the Longfengshan Biota. The study reports an LA-ICP-MS U-Pb age of detrital zircons from siltstone occurring in the middle Longshan Formation (near to the strata bearing the Longfengshan Biota) in the west slope of Longfengshan Mountain. The result shows that U-Pb ages yielded are distributed between 1573 Ma~2931 Ma, with a distinct peak at~1.85 Ga, and several other secondary age peaks responding to some geological events of the North China Craton (NCC) in the Pre-Cambrian. The main peak age of 1.85 Ga reveals the amalgamation event of the western and eastern blocks of the NCC, 2.6 Ga (2.603 Ga and 2.556 Ga) and 2.9 Ga (2.935 Ga) correspond to the important continental crust growth time of the NCC, and especially the former (2.6 Ga) correspond to the most prominent time of continental rapidly growth of the NCC. Detrital zircon ages of between 2.4~2.0 Ga (2.07 Ga, 2.177 Ga, 2.228 Ga, 2.286 Ga, 2.324 Ga and 2.388 Ga) record intracontinental extension and rifting events of the NCC. 1.6 Ga (1.580 Ga) age peak reflects the Gaoyuzhuang period magmatic event, roughly corresponding to the Columbia supercontinent breakup. Widespread lack of 2.5 Ga age peak of the NCC may be due to the Changlongshan transgression, which likely covers all the 2.5 Ga outcrop. Referring to the bentonite age (1.36~1.38 Ga) of underlying Xiamaling Formation, the minimum concordia age (1.573 Ga) of the detrital zircon ages obtained in this study can not effectively constrain the deposition time of the Changlongshan Formation. Comparative study on the detrital zircon ages of Changlongshan Formation or comparable strata within the Yan-Liao aulacogen indicates that internal differences response to the above tectonic events in the Yan-Liao Aulacogen, suggesting considerable complexity of the geography within the Yan-Liao Aulacogen in the Changlongshan period. The age distribution of detrital zircons from the Changlongshan Formation of Qingbaikou System in the Liujiang region and the Liaodong Peninsula has obvious differences with that in the Yan-Liao Aulacogen, which is largely restrained by the paleo-geographical background.

Key words: Changlongshan Formation; Qingbaikou System; detrital zircon; Yan-Liao Aulacogen; North China Craton