

李家草泊铁矿黑云变粒岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学研究

余加威¹, 杨宇佳¹, 庞志勇², 李晓波³, 徐博会^{1*}

¹河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

²河北省煤田地质局勘查院(河北省非常规天然气勘查研究中心), 河北 邢台

³山东省第五地质矿产勘查院, 山东 泰安

收稿日期: 2025年3月24日; 录用日期: 2025年5月6日; 发布日期: 2025年5月15日

摘要

本研究采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)技术, 对山东省莱西市李家草泊铁矿矿体夹层中的黑云变粒岩开展锆石U-Pb年代学研究。分析结果表明: 锆石核部年龄呈2346~2925 Ma连续概率密度分布, 其中峰值年龄为2679 Ma, 与新太古代TTG岩浆活动期高度吻合, 揭示初始矿源形成于板块碰撞背景下的火山-沉积环境; 锆石边部变质增生域记录了~1853 Ma变质年龄, 与华北克拉通古元古代造山事件(1.95~1.80 Ga)具显著耦合性, 指示变质热液对铁矿的二次富集作用。综合区域地质演化与已有成矿数据, 揭示李家草泊铁矿成矿过程具有多期演化的特征: 矿源层初始沉积形成于新太古代早期(~2750 Ma), 经新太古代中期变质富集作用形成矿体, 最终在古元古代~1.85 Ga经历区域变质-热液改造, 促使铁质进一步活化富集。这一发现不仅完善了胶北地体铁矿成矿年代谱系, 更为华北克拉通早前寒武纪构造-成矿演化研究提供了关键年代学约束。

关键词

李家草泊铁矿, 黑云变粒岩, U-Pb年代学研究

LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronological Study of Biotite Leptynite from the Lijiacabo Iron Deposit

Jiawei Yu¹, Yujia Yang¹, Zhiyong Pang², Xiaobo Li³, Bohui Xu^{1*}

¹School of Earth Sciences and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Hebei Provincial Coal Geological Exploration Institute (Hebei Province Unconventional Natural Gas Exploration and Research Center), Xingtai Hebei

³Shandong Fifth Institute of Geology and Mineral Exploration, Tai'an Shandong

*通讯作者。

文章引用: 余加威, 杨宇佳, 庞志勇, 李晓波, 徐博会. 李家草泊铁矿黑云变粒岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(5): 638-645. DOI: 10.12677/ag.2025.155062

Abstract

This study employs the Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) technique to conduct zircon U-Pb geochronological research on the biotite granulite intercalated within the iron ore body of the Lijiacaobo Iron Deposit in Laixi City, Shandong Province. The analysis results indicate that the zircon core ages exhibit a continuous probability density distribution ranging from 2346 to 2925 Ma, with a peak age of 2679 Ma, which highly coincides with the Neoarchean TTG magmatic activity period, revealing that the initial ore source formed in a volcanic-sedimentary environment under a plate collision setting. The zircon rim metamorphic overgrowth domains record a metamorphic age of ~1853 Ma, showing significant coupling with the Paleoproterozoic orogenic event (1.95~1.80 Ga) of the North China Craton, indicating the secondary enrichment of iron ore by metamorphic hydrothermal processes. Based on comprehensive regional geological evolution and existing metallogenic data, it is revealed that the mineralization process of the LijiaCaobo iron deposit exhibits multi-stage evolution characteristics: the initial deposition of the source bed occurred in the early Neoarchean (~2750 Ma), the ore body was formed through metamorphic enrichment during the middle Neoarchean, and finally, it underwent regional metamorphism-hydrothermal alteration around ~1.85 Ga in the Paleoproterozoic, which further activated and enriched the iron content. This discovery not only refines the metallogenic chronology of the iron deposits in the Jiaobei Terrane, but also provides crucial chronological constraints for the study of the tectonic-metallogenic evolution of the North China Craton during the Early Precambrian.

Keywords

Lijiacaobo, Biotite Granulite, U-Pb Geochronological Study

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

华北克拉通作为中国大陆最古老的陆核之一[1], 总面积约 30 万平方公里, 呈倒三角形展布, 其南、北两侧分别克拉通的阶段性演化特征: 从太古宙早期(>3.0 Ga)陆核初始生长、中 - 新太古代(3.0~2.5 Ga)垂向增生到新太古代晚期(2.6~2.5 Ga)克拉通化完成的完整过程[2] [3]。这些研究不仅为理解早期陆壳形成机制提供了关键窗口, 也为全球克拉通演化对比奠定了重要基础。

华北克拉通东南缘的胶东半岛, 其构造单元由胶北隆起、胶莱盆地和苏鲁造山带组成[4]。其中, 胶北地体作为前寒武纪基底的核心出露区, 在构造上位于郯庐断裂带以东、五莲 - 烟台断裂带以北, 区域内广泛分布新太古代胶东群和古元古代荆山群变质岩系[5]。值得注意的是, 唐家庄岩群作为胶北地体中太古代壳岩的代表, 主要呈透镜状包体赋存于太古宙 TTG 片麻岩中, 岩性以黑云变粒岩、斜长角闪岩为主, 变质程度达麻粒岩相。尽管其被初步划归为中太古代(>2.9 Ga), 但当前研究仍存在显著不足。本研究以胶北地体莱西市李家草泊铁矿夹层中的黑云变粒岩为研究对象, 通过高精度锆石 U-Pb 定年, 厘定唐家庄岩群时代归属。

2. 地质概况与样品采集

2.1. 矿区地质特征

李家草泊矿区位于华北地台鲁东地盾胶北隆起与胶莱拗陷的结合部位, 栖霞 - 莱州东西向复背斜的

南翼。区内广泛出露太古界唐家庄岩群、下元古界荆山群、中生界莱阳群、青山群、王氏群和新生界第四系松散堆积物[6] [7]。详细的矿区地质图见图 1。

2.2. 样品采集

本次实验选取李家草泊铁矿 I 号主矿体夹层中的黑云变粒岩为研究对象，对其开展锆石 U-Pb 同位素定年分析。

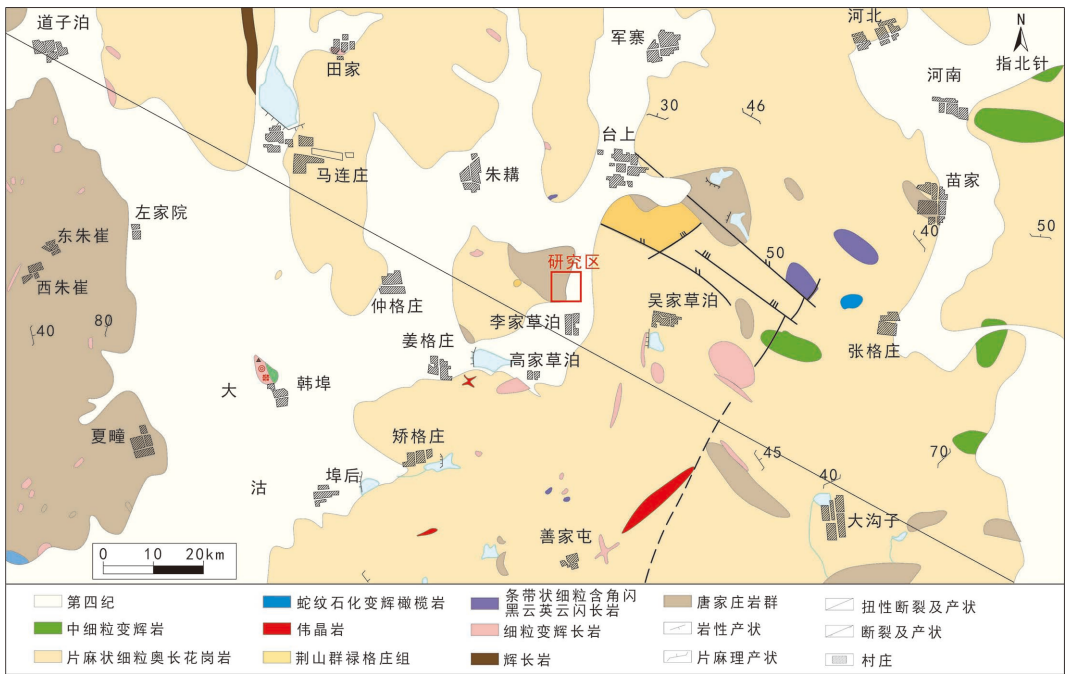


Figure 1. Geological map of the Lijiacaobo Mining area
图 1. 李家草泊矿区地质图

3. 测试方法与结果分析

3.1. 测试方法

对采集的岩石样品用清水清洗，去除表面的污染物，60 度恒温烘干岩石样品中的水分。选取 5 Kg 样品进行人工破碎并挑选新鲜的岩石碎块用磁选和重液的技术分选出不同粒级的锆石，然后在双目镜下挑选颗粒度相对完整的锆石共 50 粒[8]。制靶工作在廊坊市诚信地质服务有限公司完成，并根据 CL 图像、反射光和透射光图像，挑选出符合实验要求的锆石，并圈定每个锆石需要测试的部位(见图 2)。实验所用仪器由美国 NewWave 公司生产的 NWR193 型准分子激光器和德国 Analytik Jena AG 公司设计的 Plasma-Quant MS elite 四级杆质谱共同组成。激光剥蚀时，斑束直径为 25 μm ，频率为 12 Hz。采样方式为单点剥蚀，以 He 气作为剥蚀物质的载气，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，使仪器达到最高的灵敏度、最小的氧化物产率、最低的背景值和稳定的信号[9]。采用跳峰的方式进行数据采集，单点停留时间设定为 15 ms (204 Pb, 206 Pb, 207 Pb, 208 Pb, 232 Th 和 238 U)。每测试 5 个未知样品交替测试两次 Plesovice [10]和 Qinghu [11]标样，背景采集时间为 30 s，信号采集时间为 30 s。数据采用 Iolite v4 程序处理，各样品的加权平均年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot4.15 [12]。测试数据见表 1，鉴于所有锆石年龄均 $> 1.4 \text{ Ga}$ ，采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄体系进行数据

解释，U-Pb 谐和图中单个测点年龄误差为 1σ ，加权平均年龄协和度 $>95\%$ 。

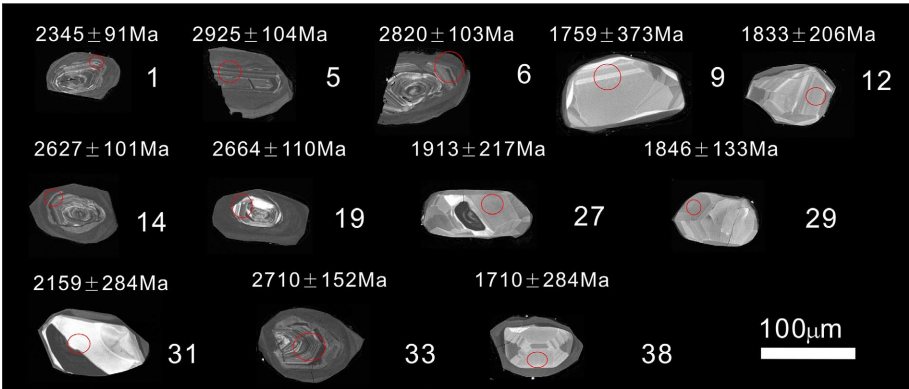


Figure 2. Cathodoluminescence (CL) images of zircon grains from biotite granulite in the Lijiacaobo Mining area with testing point locations
图 2. 李家草泊矿区黑云变粒岩锆石阴极发光图及测试点位置

3.2. 测试结果

对黑云变粒岩中锆石进行了 U-Pb 测年，共分析了 50 个锆石测试点，获得 39 个有效年龄，其分析结果见表 1 和协和图，U-Pb 谐和线数据协和度 $>95\%$ ，绝大多数数据点均落在协和线上(见图 3(a))，未发生显著的 Pb 丢失。其中 18 个核部测点的 CL 图像表现出震荡环带，Th、U 含量分别为 $43.5\sim496.5 \times 10^{-6}$ ppm、 $99.3\sim1063.2 \times 10^{-6}$ ppm，Th/U 比值为 0.08~0.84，均值 >0.4 ，指示岩浆成因[13] [14]；核部 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分布在 $2346 \pm 112\sim2925 \pm 91$ Ma 范围分布(见图 3(c))，加权平均年龄为 2782 ± 85 Ma (MSWD = 1.20)，年龄直方图峰值~2700 Ma (见图 3(b))，对应新太古代早期岩浆活动。21 个边部测点表现出无结构或海绵状变质增生带，Th、U 含量显著分异分别为 $11.4\sim46.5 \times 10^{-6}$ ppm、 $162.9\sim676.2 \times 10^{-6}$ ppm，Th/U 比值在 0.05~0.12，为变质锆石[14] [15]，加权平均年龄为 1868 ± 58 Ma (NSWD = 0.38) (见图 3(d))。结合 CL 结构特征，揭示其为古元古代变质热液事件~1.85 Ga 导致的原生锆石局部重结晶产物。锆石核-边结构演化及元素比值差异，揭示研究区经历多期岩浆-变质叠加过程。

Table 1. Zircon U-Pb isotope analysis data from the Lijiacaobo iron deposit metabasalt samples
表 1. 李家草泊铁矿黑云变粒岩样品锆石 U-Pb 同位素分析数据

序号	Th (ppm)	U (ppm)	Th/U	207 Pb/206 Pb	1σ	207 Pb/235 U	1σ	206 Pb/238 U	1σ	207 Pb/206 Pb	1σ	207 Pb/235 U	1σ	206 Pb/235 U	1σ
01	155	752	0.21	0.1488	0.0094	7.9207	0.6452	0.4013	0.0277	2346	91	2205	76	2167	128
02	496	643	0.77	0.1534	0.0108	8.2416	0.7525	0.3940	0.0296	2365	132	2225	83	2127	134
03	90	1063	0.08	0.1553	0.0100	8.3428	1.0220	0.4214	0.0506	2367	119	2250	118	2234	225
04	20	245	0.08	0.1143	0.0132	5.0161	0.6365	0.3140	0.0189	1615	273	1742	118	1752	94
05	333	519	0.64	0.2192	0.0139	16.4191	1.2366	0.5548	0.0336	2926	104	2863	82	2826	139
06	357	485	0.74	0.2049	0.0123	14.8683	1.0363	0.5414	0.0248	2820	103	2797	61	2779	104
07	27	298	0.09	0.1267	0.0153	5.7014	0.7648	0.3357	0.0234	1956	223	1898	110	1857	114
08	25	223	0.11	0.1144	0.0155	6.0906	1.0630	0.3578	0.0236	1668	298	1886	138	1959	113
09	11	163	0.07	0.1257	0.0201	5.9098	0.9049	0.3478	0.0269	1760	373	1897	148	1948	146

续表

10	29	269	0.11	0.1223	0.0142	5.5566	0.7129	0.3315	0.0249	1887	226	1844	124	1835	121
11	20	357	0.06	0.1189	0.0127	5.3597	0.4993	0.3368	0.0286	1876	207	1858	75	1853	136
12	23	283	0.08	0.1228	0.0126	5.7475	0.6188	0.3317	0.0172	1833	207	1883	95	1839	84
13	125	423	0.30	0.1663	0.0130	11.3093	1.0220	0.4929	0.0314	2506	125	2537	87	2566	133
14	348	467	0.74	0.1799	0.0116	14.0619	1.4365	0.5423	0.0368	2627	101	2717	89	2770	153
15	301	480	0.63	0.1871	0.0122	13.0790	1.0120	0.5042	0.0297	2665	108	2667	79	2616	123
16	23	486	0.05	0.1035	0.0083	4.6517	0.4239	0.3229	0.0131	1618	155	1720	80	1800	63
17	277	328	0.84	0.2123	0.0130	16.5232	1.1740	0.5653	0.0284	2880	97	2879	67	2875	117
18	21	337	0.06	0.1216	0.0152	5.0787	0.6619	0.3129	0.0161	1916	191	1800	112	1749	78
19	197	425	0.46	0.1851	0.0124	13.1375	1.0316	0.5242	0.0198	2665	110	2684	77	2710	84
20	17	163	0.10	0.1029	0.0172	4.5817	0.7345	0.3312	0.0122	1414	299	1691	118	1841	60
21	26	271	0.10	0.1130	0.0101	4.7707	0.4684	0.3246	0.0186	1722	183	1752	90	1804	91
22	263	393	0.67	0.1865	0.0143	12.4483	1.2198	0.4929	0.0316	2634	136	2584	95	2595	148
23	21	278	0.08	0.1158	0.0137	5.2311	0.6902	0.3411	0.0223	1731	262	1769	125	1881	107
24	396	795	0.50	0.1852	0.0083	12.8745	1.1168	0.5303	0.0447	2673	78	2643	87	2708	186
25	16	236	0.07	0.1006	0.0125	4.7361	0.6678	0.3399	0.0246	1390	254	1680	126	1872	119
26	23	226	0.10	0.1090	0.0192	5.3852	1.1933	0.3552	0.0330	1785	291	1609	231	1969	164
27	23	499	0.05	0.1178	0.0086	5.1417	0.5078	0.3315	0.0292	1846	134	1810	97	1825	142
28	99	544	0.18	0.1674	0.0166	10.8972	1.2508	0.4870	0.0457	2443	173	2437	115	2520	192
29	28	285	0.10	0.1245	0.0140	5.6768	0.7804	0.3385	0.0278	1913	217	1842	119	1862	132
30	29	281	0.10	0.1231	0.0120	5.7497	0.6292	0.3578	0.0300	1963	182	1921	100	1953	138
31	43	99	0.44	0.1343	0.0248	6.7155	1.1943	0.3830	0.0285	2159	284	1839	258	2074	129
32	30	250	0.12	0.1110	0.0189	5.1452	0.8553	0.3425	0.0240	1671	321	1795	167	1922	130
33	331	505	0.66	0.1918	0.0189	13.4694	1.6840	0.5103	0.0592	2711	152	2672	126	2729	314
34	46	676	0.07	0.1270	0.0103	6.0150	0.6302	0.3454	0.0307	1994	164	1927	90	1892	143
35	418	627	0.67	0.2070	0.0152	16.0100	1.7407	0.5483	0.0478	2820	130	2820	105	2786	191
36	480	690	0.69	0.1828	0.0121	13.3088	1.2178	0.5304	0.0361	2623	112	2676	94	2720	151
37	150	367	0.41	0.1999	0.0166	14.1889	1.3665	0.5253	0.0407	2761	160	2746	109	2692	172
38	15	212	0.07	0.1183	0.0182	5.9166	1.0088	0.3491	0.0262	1710	285	1841	159	1915	127
39	23	294	0.08	0.1114	0.0141	5.5646	0.7273	0.3573	0.0247	1626	283	1842	135	1956	117

4. 成矿年龄讨论

结合华北克拉通前寒武纪构造演化史，新太古代晚期，为华北克拉通岩浆活动的重要时期，频繁的热构造事件使得华北克地区陆壳增生，这一时期形成的矽卡岩型铁矿广泛分布在华北克拉通不同地区。此后，华北克拉通古元古代又发生了一些列强变质作用，而伴随古元古代构造-变质热事件新成的矽卡岩型铁矿较为常见，但对于胶东地区的矽卡岩型铁矿年代学研究少闻，本文将在前人的研究基础上，对李家草泊铁矿矿床成矿年代学研究。针对李家草泊铁矿缺乏直接成矿年龄的难题，本文创新性采用地层序列约束法。

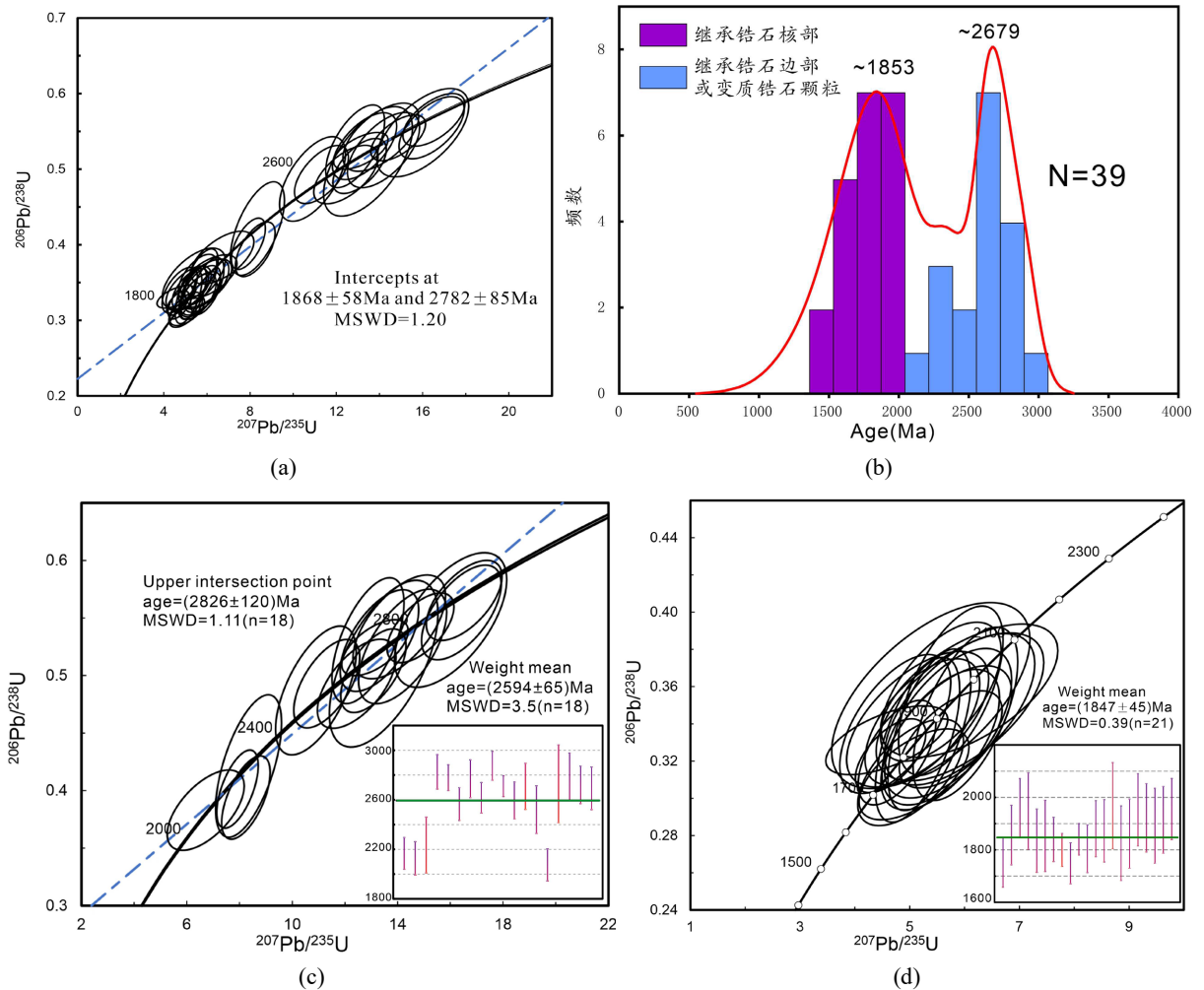


Figure 3. Concordia diagram of zircon U-Pb ages from biotite granulite in the Lijiacaobo iron deposit

图 3. 李家草泊铁矿黑云变粒岩锆石年龄协和图

前人对胶北地体早前寒武纪岩系划分做了大量工作, 主要被划分为太古宇胶东群和唐家庄岩群, 以及古元古界粉子山群和荆山群[16]-[18]。关于唐家庄岩群上伏地层得年龄, 前人做了丰富得测年数据: Wan *et al.* (2006) [19]通过对烟台荆山群二云母夕线石榴石片麻岩进行锆石年代学研究, 获得碎屑锆石得年龄为 $2175 \pm 16 \text{ Ma}$, 变质锆石得年龄为 $1882 \pm 12 \text{ Ma}$, 并认为荆山群的沉积时代为 $2.2 \sim 1.9 \text{ Ga}$ 。刘平华等(2011) [20]通过对莱西南野墅镇-日庄镇和莱阳沐浴店镇-观里镇的富铝片麻岩进行锆石年代学测试, 指出荆山群原岩形成时代晚于 $\sim 2100 \text{ Ma}$ 。张连祥等(2021) [21]利用 LA-ICP-MS 技术对莱阳沐浴店荆山群禄格庄组长石石英进行锆石年代学测试, 获得碎屑锆石年龄介于 $2502 \pm 22 \text{ Ma} \sim 1970 \pm 21 \text{ Ma}$ 。因此荆山群大致年龄在 $1.8 \sim 2.5 \text{ Ga}$ 。

部分学者对含矿层唐家庄岩群的年龄进行研究, 于志臣(1998) [22]将胶东群底部呈包体残存的紫苏磁铁矿石岩、二辉斜长角闪麻粒岩等划分出来, 并建立了胶北地体唐家庄岩群, 并统计唐家庄岩群及侵位其中的超基性岩体的同位素测年数据, 指出唐家庄岩群锆石同位素年龄分布在 $2763 \sim 2936 \text{ Ma}$, 位于侵位的超基性岩的 Sm-Nd 同位素年龄在 $2639 \sim 3150 \text{ Ma}$ 。沈其韩(2008) [23]指出侵入胶东群栖霞单元条带状英云闪长岩测年结果在 $2703 \sim 2716 \text{ Ma}$ 。智云宝(2024) [24]对该层斜长角闪岩和黑云变粒岩进行锆石 SHRIMP 与 U-Pb 年代学研究, 其中变质基性火山岩锆石年龄为 $2907 \pm 6 \text{ Ma}$, 代表了唐家庄岩群形成时代。

基于胶东已有得 U-Pb 年代学研究及本次 LA-ICP-MS 定年结果, 揭示了李家草泊矿区黑云变粒岩具有阶段性的演化特征: 1) 锆石核部年龄呈连续概率密度分布在 2346~2925 Ma, 峰值年龄为 2679 Ma, 对应新太古代 TTG 岩浆活动期, 指示初始矿源形成于碰撞背景下得火山 - 沉积环境; 2) 锆石边部变质增生域年龄分布于~1853 Ma, 与华北克拉通古元古代造山运动有关, 暗示变质流体对铁矿得再富集效应。根据区域地质发展史并结合研究区地质条件, 李家草泊铁矿的成矿过程可划分为: 矿源层初始沉积形成于新太古代早期, 经新太古代中期变质富集作用形成矿体, 最终在古元古代~1.85 Ga 经历区域变质-热液改造, 促使铁质进一步活化富集, 并建立了李家草泊铁矿成矿模式(见图 4)。

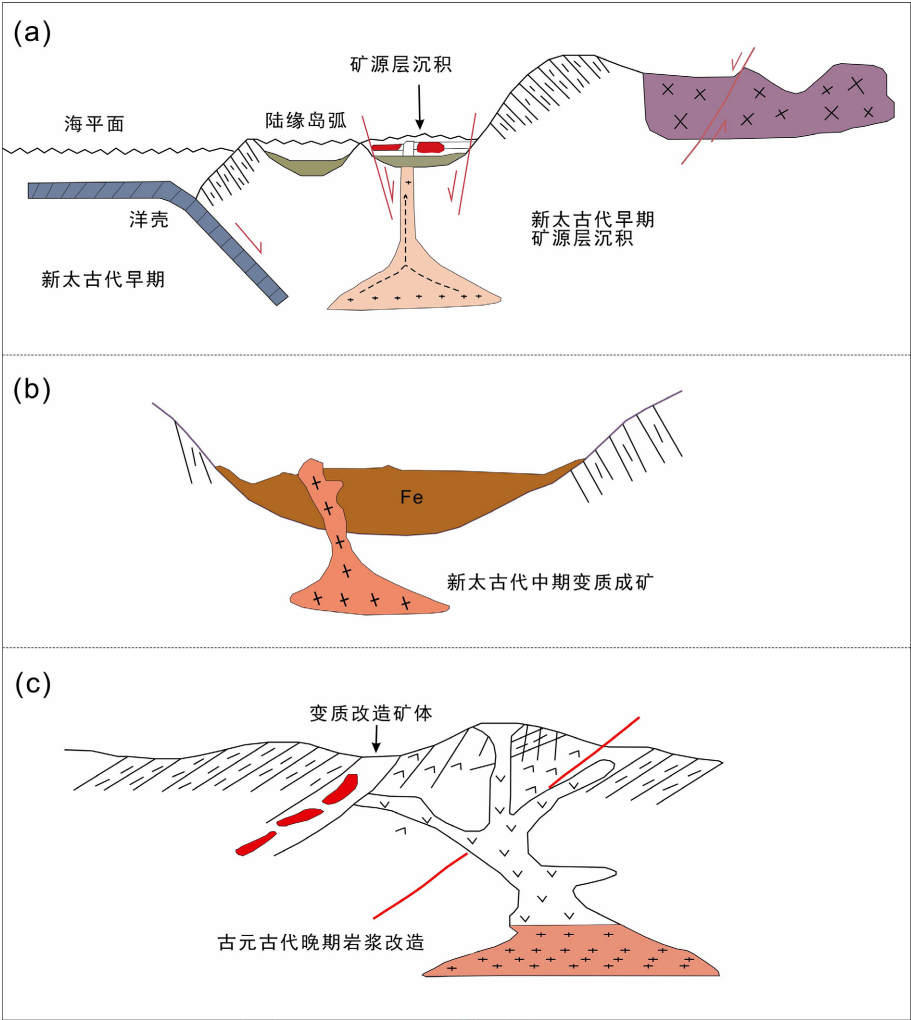


Figure 4. Metallogenic model diagram of Lijiacaobo iron ore
图 4. 李家草泊铁矿成矿模式图

5. 结论

- 1) 锆石核部年龄呈连续概率密度分布在 2346~2925 Ma, 峰值年龄为 2679 Ma, 对应新太古代 TTG 岩浆活动期, 指示初始矿源形成于碰撞背景下的火山 - 沉积环境;
- 2) 锆石边部变质增生域年龄分布于~1853 Ma, 与华北克拉通古元古代造山运动有关, 暗示变质流体对铁矿得再富集效应。

参考文献

- [1] 万渝生, 董春艳, 颜炳强, 等. 华北克拉通新太古代晚期岩浆作用: 对构造体制和克拉通化的启示[J]. 地学前缘, 2024, 31(1): 77-94.
- [2] Jiang, N., Guo, J. and Chang, G. (2013) Nature and Evolution of the Lower Crust in the Eastern North China Craton: A Review. *Earth-Science Reviews*, **122**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.03.006>
- [3] 万渝生, 董春艳, 任鹏, 等. 华北克拉通太古宙 TTG 岩石的时空分布、组成特征及形成演化: 综述[J]. 岩石学报, 2017, 33(5): 1405-1419.
- [4] 骊马, 毛先成. 大尹格庄金矿床黄铁矿原位微区微量元素地球化学特征[J]. 地球科学前沿(汉斯), 2020, 10(9): 813-825.
- [5] 唐荣贞, 陈衍景. 华北克拉通古元古代条带状铁建造同位素年代学研究进展[J]. 岩石学报, 2024, 40(11): 3663-3684.
- [6] 陈昌昕. 山东郭城土堆-沙旺金矿床地质特征及矿床成因研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [7] 刘春伟, 王重, 胡彩萍, 等. 综合物探方法在胶东岩浆岩缺水山区找水中的应用[J]. 物探与化探, 2023, 47(2): 512-522.
- [8] 于喜洹, 李新鹏, 陈旭峰, 等. 下嘎来奥伊河地区晚侏罗世正长花岗岩的成因机制[J]. 黑龙江科技大学学报, 2022, 32(1): 20-26.
- [9] 孙德有, 吴福元, 高山. 小兴安岭东部清水岩体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定[J]. 地球学报, 2004, 25(2): 213-218.
- [10] Sláma, J., Košler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., *et al.* (2008) Plešovice Zircon—A New Natural Reference Material for U-Pb and Hf Isotopic Microanalysis. *Chemical Geology*, **249**, 1-35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- [11] Li, X., Tang, G., Gong, B., Yang, Y., Hou, K., Hu, Z., *et al.* (2013) Qinghu Zircon: A Working Reference for Microbeam Analysis of U-Pb Age and Hf and O Isotopes. *Chinese Science Bulletin*, **58**, 4647-4654. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5932-x>
- [12] Paton, C., Woodhead, J.D., Hellstrom, J.C., Hergt, J.M., Greig, A. and Maas, R. (2010) Improved Laser Ablation U-Pb Zircon Geochronology through Robust Downhole Fractionation Correction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **11**, Q0AA06. <https://doi.org/10.1029/2009gc002618>
- [13] Hoskin, P.W.O. (2000) Patterns of Chaos: Fractal Statistics and the Oscillatory Chemistry of Zircon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**, 1905-1923. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(00\)00330-6](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(00)00330-6)
- [14] 胡彩霞, 袁万明. 不同成因类型的锆石特征及年代学意义[J]. 中国矿业, 2021, 30(S1): 204-207.
- [15] 王一丁. 锆石成因矿物学与 U-Pb 同位素定年应用[J]. 地球科学前沿(汉斯), 2022, 12(3): 238-244.
- [16] 赵懿英, 胡受奚, 卢冰, 徐兵, 李海章. 山东胶北地体早前寒武纪地层的划分[J]. 地层学杂志, 1992, 16(3): 161-170.
- [17] 于志臣. 胶北西部平度、莱州一带粉子山群研究新进展[J]. 山东地质, 1996, 12(1): 24-34.
- [18] 马洪昌. 论粉子山群的划分与对比[J]. 山东地质, 1993, 9(1): 1-17.
- [19] Wan, Y., Song, B., Liu, D., Wilde, S.A., Wu, J., Shi, Y., *et al.* (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**, 249-271. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.006>
- [20] 刘平华, 刘福来, 王舫, 等. 山东半岛荆山群富铝片麻岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(5): 829-843.
- [21] 张连祥, 刘平华, 田忠华, 等. 胶北地体荆山群禄格庄组沉积时代与物源——来自山东沐浴店地区长石石英岩碎屑锆石 U-Pb 年龄与稀土元素的新证据[J]. 地质通报, 2021, 40(1): 164-188.
- [22] 于志臣. 鲁东胶北地区中太古代唐家庄岩群[J]. 山东地质, 1998, 14(2): 7-13.
- [23] 沈其韩. 再论我国早前寒武纪地层研究的新进展[J]. 地层学杂志, 2008, 32(3): 231-238.
- [24] 智云宝, 李秀章, 孙斌, 等. 华北克拉通栖霞地区-2.9Ga 变质基性火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年、Hf-O 同位素特征及构造意义[J]. 岩石学报, 2024, 40(6): 1907-1921.