

内蒙古莲花山铜银矿斜长花岗斑岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、 Hf 同位素研究及其地质意义

周振华¹ 武新丽² 欧阳荷根²

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:内蒙古莲花山铜银矿是大兴安岭南段成矿带上的一个重要矿床, 成矿与斜长花岗斑岩密切相关。对矿区内斜长花岗斑岩体进行 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明, 其形成年龄为 (236.8 ± 0.77) Ma (MSWD=0.85) 和 (237.9 ± 0.71) Ma (MSWD=1.02), 为中三叠世岩浆活动产物, 而不是前人认为的中侏罗世。莲花山斜长花岗斑岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = +5.6 \sim +11.5$, 具有较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值(0.282 762~0.282 954) 和年轻的二阶段 Hf 同位素模式年龄(477~810 Ma), 综合研究表明其主要源自从亏损地幔中新增长的年轻地壳物质的部分熔融, 也暗示兴安地块新元古代—早古生代曾发生一次重要的地壳增生事件。对兴蒙造山带及邻区近 1 100 个岩浆岩中锆石 Hf 同位素数据整理研究后发现, 兴安地块、松嫩地块和佳木斯地块属性相似, 其与额尔古纳地块和华北板块北缘各自具有不同的地壳增生历史, 揭示它们具有不同的早期地壳演化过程。

关键词: LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年; Hf 同位素; 三叠纪; 地壳增生; 莲花山铜银矿; 兴蒙造山带

中图分类号: P597; P588.1; P618.41; P618.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)06-1472-14

莲花山铜矿位于兴蒙造山带东段兴安地块(图 1-a)上, 是大兴安岭南段成矿带上的一个重要矿床。该矿自 1981 年勘探发现至今, 陆续开展了一些矿床地质特征^[1]、矿区侵入岩特征^[2-4]、成矿流体和成矿物质来源^[1]、找矿模型^[5]等工作。目前, 关于该矿床的成因多认为是与斜长花岗斑岩有关的斑岩型^[1, 6-7], 盛继福等^[8]测得斜长花岗斑岩的单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 161.8 Ma, 但对成矿岩体的高精度测年和岩浆来源等方面的研究工作还很薄弱。本文通过对斜长花岗斑岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和微区原位 Hf 同位素测试研究, 试图精确厘定成矿岩体年龄及岩浆源区性质, 同时在系统收集前人资料基础上, 初步探讨了兴蒙造山带地壳增生及演化问题。

1 矿区地质概况

莲花山铜银矿大地构造位置隶属大兴安岭南段晚古生代增生造山带。矿区出露的地层(图 1-b)主要有下二叠统大石寨组变质安山岩、英安质凝灰岩、凝灰质砂岩, 中侏罗统万宝组安山质-英安质角砾岩、凝灰岩夹砂岩以及呼日格组灰白色英安质凝灰熔岩, 其中大石寨组地层是形成矿体的主要围岩和赋矿层位^[9]。矿体主要受 3 个走向北西(300~330°), 倾向北东的断裂、裂隙带控制, 早期断裂带具有右行压扭性特征, 由于受晚阶段南北向左行剪切应力作用下, 断裂带由早先的右行压扭性转变为左行张扭性^[9]。矿区出露的岩浆岩主要为闪长玢岩、斜长花岗斑岩、花岗闪长斑岩等, 其中斜长花岗斑岩与成矿关系最

收稿日期: 2012-06-18; 改回日期: 2012-11-28

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212011085260)和内蒙古重要矿产资源潜力评及区域成矿规律研究项目(2006-02-YS01)联合资助。

作者简介: 周振华, 男, 1981 年生, 博士, 助理研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事矿床学研究; E-mail: zhzhou@cags.ac.cn。

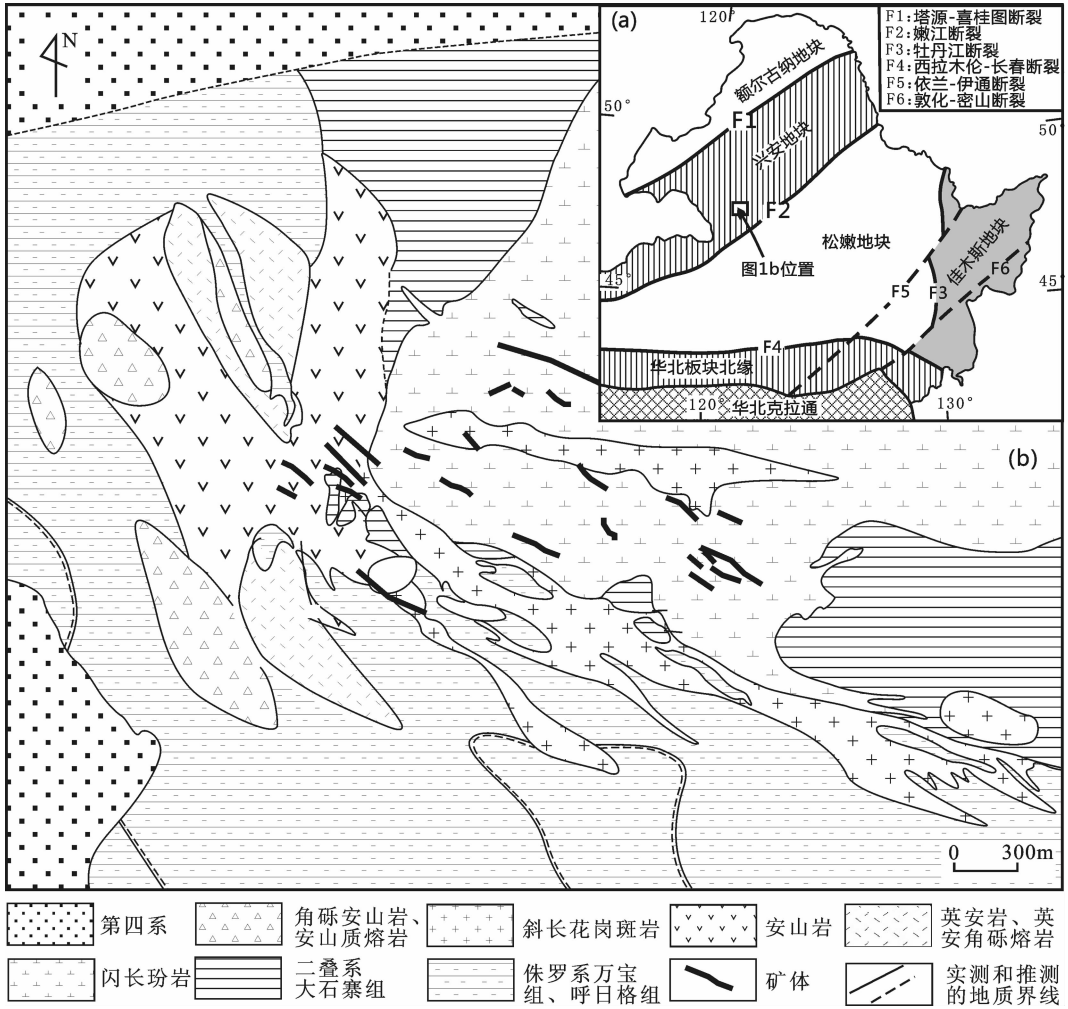


图 1 莲花山铜银矿大地构造位置(a)和矿区地质简图(b)(a 据葛文春等^[8]资料改编; b 据赵一鸣等^[11]修改)
 Fig.1 Tectonic position (a) and schematic geological map of the Lianhuashan Cu-Ag deposit
 (Fig. a after Ge et al. ^[8]; Fig. b after Zhao et al. ^[11])

为密切, 矿化主要集中在斑岩体顶部及外接触带附近, 并受岩体起伏顶面形态控制, 斑岩体上突部位是富矿体赋存有利地段^[1]。矿区现已探明矿体 30 多条, 按空间分布关系划分为 3 个矿脉群, 矿体总体走向 300~310°, 倾向北东, 倾角 50~70°, 矿体长一般 300~500 m, 最长者可达 700 m 以上, 厚度一般 1.14~3.39 m, 最厚可达 10 m; Cu 品位一般 0.7%~1.45%, 伴生 Ag 品位一般 44.87~67.45 g/t, 铜储量为中型, 银储量为大型^[9]。

矿床围岩蚀变强烈, 主要有钠长石化、黑云母化、电气石化、阳起石化、绿泥石化、硅化和碳酸盐化等。主要金属矿物有黄铜矿、黄铁矿、毒砂、闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、磁铁矿、深红银矿、银黝铜矿、硫锑铜银矿等; 次要金属矿物有辉铜矿、黝铜矿、辉钨

矿、辉锑铋矿、硫镍钴矿、钴镍黄铁矿等; 脉石矿物主要有石英、阳起石、电气石、绿泥石、绿帘石、黝帘石、方解石等^[2]。成矿可分为 5 个阶段: ①磁铁矿-赤铁矿成矿阶段; ②毒砂-黄铜矿成矿阶段; ③黄铜矿成矿阶段; ④黄铜矿-磁黄铁矿-闪锌矿成矿阶段; ⑤闪锌矿-方铅矿-碳酸盐成矿阶段。其中, 黄铜矿主要产于③和④阶段, 而区内的银矿物、铋矿物和钴镍矿物多产于④阶段。

2 样品描述与测试方法

本次研究所采用的 2 件斜长花岗斑岩样品 (LHS-01、LHS-02) 来自莲花山北矿段 29 号坑口 2 中段 230 m 标高水平钻孔岩心样, 样品较新鲜, 有微弱钾长石化蚀变(图 2)。手标本呈灰白色, 间夹黄

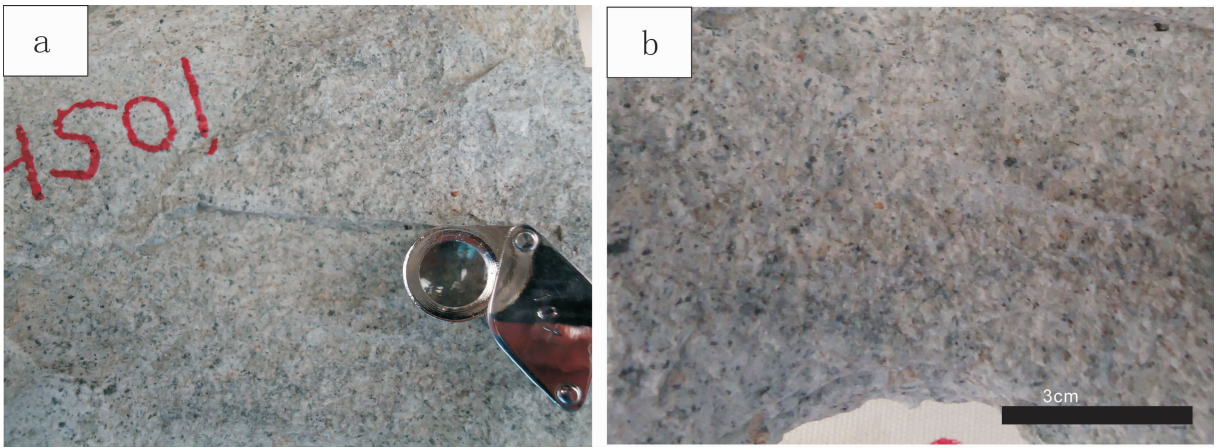


图 2 莲花山铜银矿斜长花岗斑岩照片(a)和局部钾长石化现象照片(b)

Fig.2 Photographs of plagioclase granite porphyry in the Lianhuashan Cu-Ag deposit (a) and partial K-feldspathization (b)

绿色斑点,斑状结构,块状构造。主要组成矿物为斜长石(60%~65%)、黑云母(10%)、角闪石(5%)、石英(20%~25%)。斑晶矿物主要为长石和石英。长石斑晶呈半自形板状或他形,大小2~5 mm,可见绢云母化蚀变;石英斑晶具六方双锥体,少量为浑圆状,大小1~3 mm,部分石英斑晶有破碎现象。基质为隐晶质结构,主要由长石类矿物组成。基质几乎全部绢云母化。黄铁矿呈浸染状散布于基质中,多为他形粒状,少量为自形立方晶体,含量约1%,偶见他形粒状黄铜矿。

LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱和 Nd-YAG 213nm 激光剥蚀系统下完成。

锆石 U-Pb 定年所采用的激光剥蚀坑径为 25 μm , 频率 10 Hz, 能量密度约 2.5 J/cm², 信号较小的 ²⁰⁷Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁴Pb (+²⁰⁴Hg), ²⁰²Hg 用离子计数器(multi-ion-counters)接收, ²⁰⁸Pb, ²³²Th, ²³⁸U 信号用法拉第杯接收, 实现了所有目标同位素信号的同时接收并且不同质量数的峰基本上都是平坦的, 进而可以获得高精度的数据, 均匀锆石颗粒 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁶Pb/²³⁸U, ²⁰⁷Pb/²³⁵U 的测试精度(2 σ)均为 2%左右, 对锆石标准的定年精度和准确度在 1%(2 σ)左右。LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式, 数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器, 使之达到最优状态, 锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, U、Th 含量以锆石 M127 (U: 923 10⁻⁶; Th: 439 10⁻⁶; Th/U: 0.475, Nasdala et al. [9]) 为外标进行校正。

测试过程中在每测定 5~7 个样品前后重复测定两个锆石 GJ1 对样品进行校正, 并测量一个锆石 Plesovice, 观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序(Liu et al. [10]), 测量过程中绝大多数分析点 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 大于 1000, 未进行普通铅校正, ²⁰⁴Pb 由离子计数器检测, ²⁰⁴Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响, 对 ²⁰⁴Pb 含量异常高的分析点在计算时剔除, 锆石年龄谐和图用 Isoplot 3.0 程序获得。详细实验测试过程可参见侯可军等 [11]。样品分析过程中, Plesovice 标样作为未知样品的分析结果为 (337.30 \pm 2.5)Ma (n=4, 2 σ), 对应的年龄推荐值为 (337.13 \pm 0.37)Ma (2 σ)(Slama et al. [12]), 两者在误差范围内完全一致。

锆石 Hf 同位素测试的激光坑径为 55 μm , 频率 20 Hz, 能量密度约 15 J/cm², 采用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质, 在 U-Pb 定年的原分析点上测定 Hf 同位素组成。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等 [13]。分析过程中锆石标准 GJ1 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 测试加权平均值为 0.282015 \pm 28(2SD, n=10), 与文献报道值 [13-14] 在误差范围内一致。

岩石主量和稀土元素分析测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成, 全岩的主量元素测试采用的 X-射线荧光光谱法(XRF), 仪器型号为 XRF-1500, 分析误差优于 5%。微量元素测定采用 ICP-MS 法, 测试方法和依据参照 DZ/T0223-2001(电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则, 实验过程中温度 20 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 30%, 当元素含量大于 10 \times 10⁻⁶ 时, 误差小于 5%; 元素含量小于 10 \times

10^{-6} 时,误差小于 10%。

3 测试结果

3.1 锆石测年结果

莲花山斜长花岗斑岩中锆石结晶较好,呈典型的长柱状晶形,具有典型的岩浆震荡环带,指示其主体为岩浆结晶的产物。由锆石的阴极发光图像可以看出(图 3),几乎所有锆石均具有清晰的单期生长的同心环带特征。

对 2 件样品(LHS-01、LHS-02)分别进行了 20 个点的测试,锆石 U-Pb 有效分析结果列于表 1,谐和图见图 4,谐和性 95%以上。样品 LHS-01 的 15

个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围为 234.9~238.6 Ma, $\text{Th}/\text{U}=0.32\sim 2.18$, 平均值 1.05。样品 LHS-02 的 U 和 Th 含量变化范围较大,分别为 $590\times 10^{-6}\sim 3\ 224\times 10^{-6}$ 和 $309\times 10^{-6}\sim 2\ 163\times 10^{-6}$, 个别分析点由于 U 含量或普通 Pb 含量较高,未获得理想年龄,在计算加权平均值时剔除。样品 LHS-02 的 13 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围为 234.7~240.6 Ma, $\text{Th}/\text{U}=0.58\sim 1.99$, 平均值 1.35。两件样品测试点的 Th/U 均远大于 0.1,符合岩浆成因锆石的特征(Hoskin et al. [15]),这与锆石在 CL 图像上呈现的典型的岩浆震荡环带的特征是一致的。这些点均投影在谐和线上或附近,2 件样品(LHS-01、LHS-02)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均

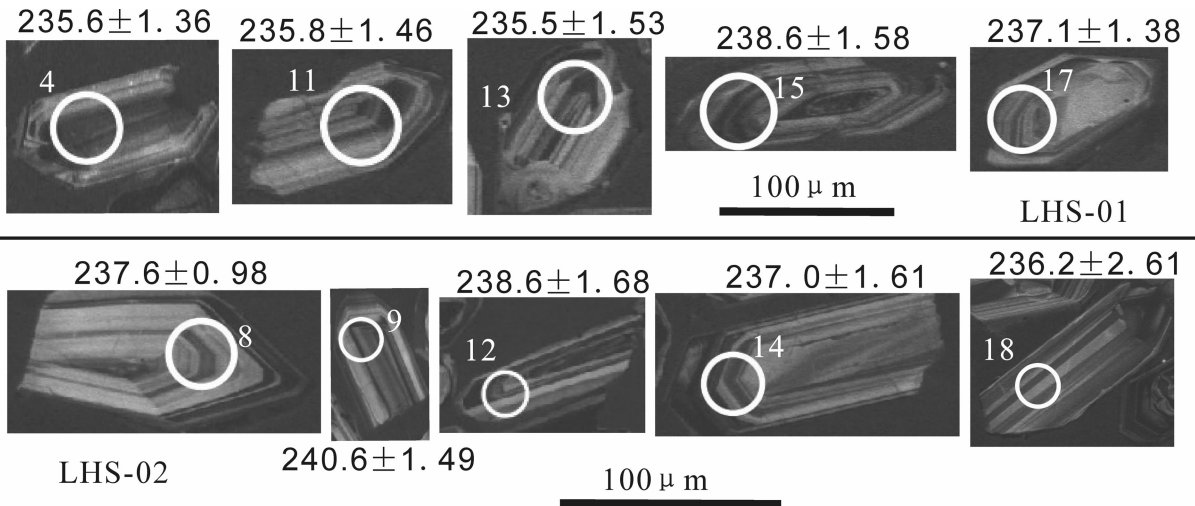


图 3 莲花山铜银矿斜长花岗斑岩锆石阴极发光(CL)图像及测点位置
Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons and measuring positions of plagioclase granite porphyry in the Lianhuashan Cu-Ag deposit

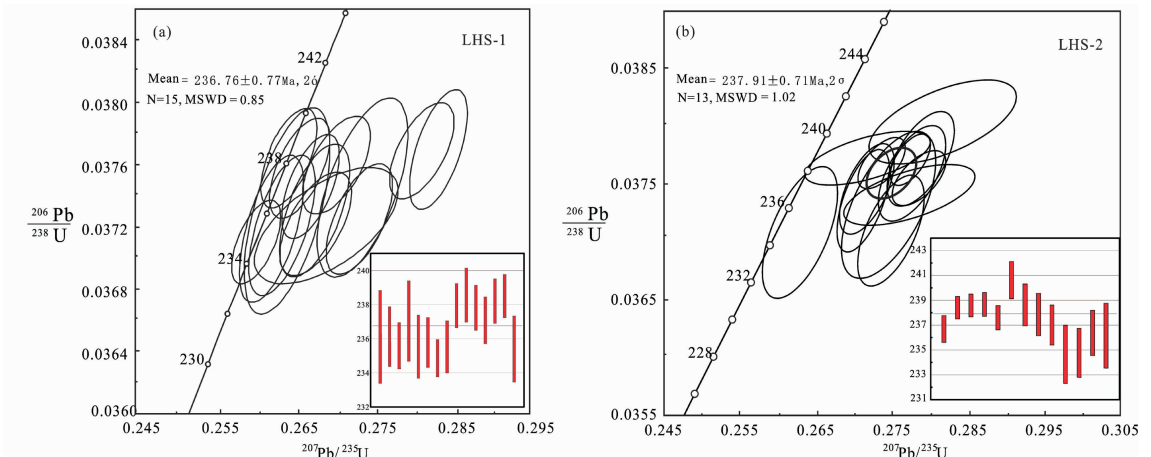


图 4 莲花山铜银矿斜长花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.4 Zircon U-Pb age and concordia diagram of plagioclase granite porphyry in the Lianhuashan Cu-Ag deposit

表 1 莲花山斜长花岗岩斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析数据
 Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb age of plagioclase granite porphyry in the Lianhuashan Cu-Ag deposit

分析号	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	Th/U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ
LHS-01													
LHS-01-1	1046	658	0.63	236.1	2.72	257.5	20.37	0.0514	0.0004	0.2643	0.0036	0.0373	0.0004
LHS-01-3	885	544	0.61	236.1	1.75	300.1	-12.04	0.0521	0.0005	0.2677	0.0029	0.0373	0.0003
LHS-01-4	1047	730	0.70	235.6	1.36	294.5	22.22	0.0522	0.0005	0.2677	0.0030	0.0372	0.0002
LHS-01-6	1812	1468	0.81	237.0	2.36	327.8	18.52	0.0530	0.0004	0.2738	0.0038	0.0375	0.0004
LHS-01-7	1087	1092	1.00	235.5	1.85	257.5	16.67	0.0514	0.0004	0.2636	0.0028	0.0372	0.0003
LHS-01-11	839	562	0.67	235.8	1.46	338.9	16.67	0.0532	0.0004	0.2734	0.0028	0.0373	0.0002
LHS-01-12	1293	993	0.77	234.9	1.10	235.3	14.81	0.0509	0.0003	0.2603	0.0021	0.0371	0.0002
LHS-01-13	1605	2223	1.39	235.5	1.53	301.9	46.29	0.0524	0.0011	0.2692	0.0060	0.0372	0.0002
LHS-01-14	619	199	0.32	237.9	1.29	300.1	25.00	0.0522	0.0004	0.2705	0.0028	0.0376	0.0002
LHS-01-15	1964	2913	1.48	238.6	1.58	394.5	8.33	0.0545	0.0003	0.2834	0.0024	0.0377	0.0003
LHS-01-16	773	1473	1.91	237.8	1.32	253.8	47.22	0.0513	0.0004	0.2659	0.0025	0.0376	0.0002
LHS-01-17	698	895	1.28	237.1	1.38	276.0	21.30	0.0518	0.0004	0.2672	0.0024	0.0375	0.0002
LHS-01-18	1761	3832	2.18	238.2	1.31	239.0	10.19	0.0509	0.0003	0.2645	0.0023	0.0376	0.0002
LHS-01-19	1169	968	0.83	238.5	1.27	388.9	15.74	0.0542	0.0005	0.2813	0.0027	0.0377	0.0002
LHS-01-20	1633	1906	1.17	235.4	1.94	255.6	11.11	0.0511	0.0003	0.2623	0.0027	0.0372	0.0003
LHS-02													
LHS-02-1	3211	1907	1.68	236.7	1.08	361.2	44.44	0.0538	0.0011	0.2775	0.0057	0.0374	0.0002
LHS-02-3	1281	1312	0.98	238.4	0.91	316.7	21.30	0.0527	0.0004	0.2738	0.0021	0.0377	0.0001
LHS-02-5	1254	887	1.41	238.6	0.91	346.4	8.33	0.0534	0.0003	0.2776	0.0017	0.0377	0.0001
LHS-02-7	2941	1797	1.64	238.7	0.95	300.1	47.22	0.0522	0.0009	0.2720	0.0054	0.0377	0.0002
LHS-02-8	616	309	1.99	237.6	0.98	364.9	18.52	0.0539	0.0004	0.2787	0.0023	0.0375	0.0002
LHS-02-9	1964	1366	1.44	240.6	1.49	361.2	50.00	0.0538	0.0012	0.2819	0.0064	0.0380	0.0002
LHS-02-12	803	797	1.01	238.6	1.68	366.7	22.22	0.0537	0.0005	0.2790	0.0029	0.0377	0.0003
LHS-02-13	2928	1708	1.71	237.9	1.69	353.8	13.89	0.0536	0.0004	0.2778	0.0029	0.0376	0.0003
LHS-02-14	1825	2010	0.91	237.0	1.61	322.3	12.96	0.0527	0.0003	0.2719	0.0024	0.0375	0.0003
LHS-02-15	961	182	1.82	234.7	2.34	261.2	20.37	0.0515	0.0004	0.2631	0.0033	0.0371	0.0004
LHS-02-16	1721	1815	0.95	234.8	1.97	361.2	14.82	0.0538	0.0003	0.2751	0.0029	0.0371	0.0003
LHS-02-17	3224	2163	1.49	236.4	1.82	316.7	11.11	0.0528	0.0003	0.2714	0.0023	0.0374	0.0003
LHS-02-18	590	1023	0.58	236.2	2.61	346.4	24.07	0.0534	0.0006	0.2747	0.0041	0.0373	0.0004

年龄分别为 $(236.8 \pm 0.77)\text{Ma}$ ($2\sigma, N=15, \text{MSWD}=0.85$), $(237.9 \pm 0.71)\text{Ma}$ ($2\sigma, N=13, \text{MSWD}=1.02$), 代表斜长花岗斑岩的结晶年龄, 属中三叠世的产物。

3.2 岩石地球化学特征

岩石主量、稀土元素测试结果(表 2)显示, 斜长花岗斑岩的 SiO_2 为 69.27%~70.68%, Al_2O_3 为 14.50%~16.51%, K_2O 含量偏高(2.39%~3.90%), 与样品钾化有关, Na_2O 较高(4.48%~5.62%), $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$; A/CNK 值在 0.97~1.04, 显示铝略不饱和至弱饱和; 碱度率 AR 值为 2.48~3.10, 里特曼指数 δ 值为 2.15~2.46, 属钙碱性系列。分异指数 DI 值为 35.01~46.92, 固结指数 SI 值为 6.93~7.71, 显示岩浆分异程度不高。稀土元素总量变化于 90.94×10^{-6} ~ 130.12×10^{-6} , δCe 为 0.90~0.97, δEu 为 0.56~1.07, 为轻稀土富集型, 样品的稀土元素配分曲线有一定差异(图 5-a)。

矿区内闪长玢岩的 SiO_2 为 51.69%~55.44%, Al_2O_3 为 16.58%~17.66%, K_2O 为 0.86%~1.51%, Na_2O 为 3.15%~3.46%, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$; 稀土元素总量变化于

75.54×10^{-6} ~ 142.72×10^{-6} , δCe 为 0.94~1.01, δEu 为 0.82~0.96, 样品的稀土元素配分曲线呈向右缓倾斜型(图 5-b)。

火山岩中安山岩、英安岩的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 含量分别为 57.09%、15.63%、0.83%、3.77% 和 70.15%、14.05%、4.84%、3.99%, 高于中国同类岩石^[3]; 安山岩的 δEu 值为 0.91, Eu 弱亏损, 稀土配分曲线光滑平直, 轻微向右倾斜(图 5-c), 具有较明显的幔源特征; 英安岩的 δEu 值为 0.17, 显示 Eu 强烈亏损, 稀土元素配分曲线 V 型明显(图 5-d), 显示壳幔混溶特征。

3.3 Hf 同位素特征

Hf 同位素分析结果显示, 除了 4 个点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值稍大于 0.002, 绝大多数都小于 0.002, 表明锆石在形成以后基本没有明显的放射性成因 Hf 的积累, 所测样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 基本代表了其形成时体系的 Hf 同位素组成(Amelin et al. ^[19]; Patchett et al. ^[45]; Knudsen et al. ^[58])。样品 LHS-01 分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$

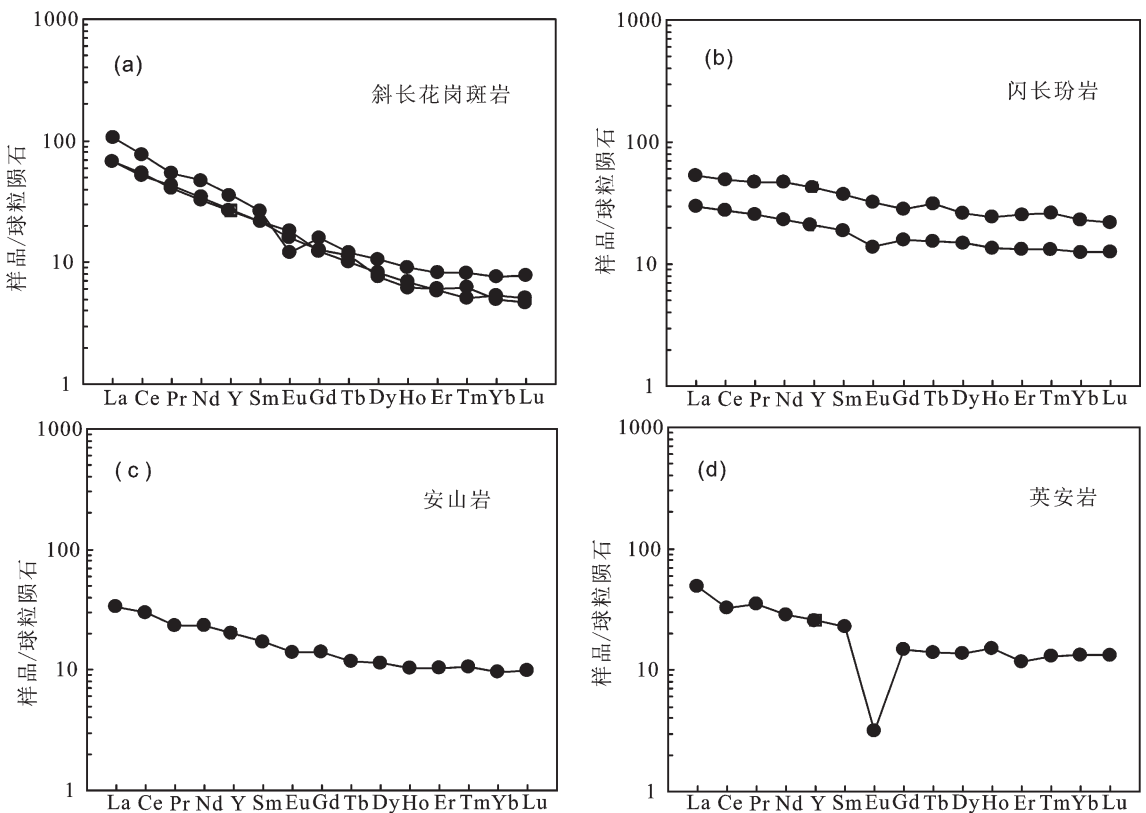


图 5 莲花山铜银矿岩浆岩稀土元素配分曲线图(据 Sun and McDonough^[16])

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of magmatic rocks in the Lianhuashan Cu-Ag deposit (chondrite and primitive mantle normalized values after Sun and McDonough^[16])

表 2 莲花山铜银矿岩浆岩主量元素(%)和稀土元素(10^{-6})组成
Table 2 Major elements and REE compositions of magmatic rocks in the Lianhuashan Cu-Ag deposit

样品	岩性	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	TOL	ANCK	DI	SI	AR	σ
LHS-1	斜长花岗斑岩	69.27	16.51	1.15	1.76	0.81	2.34	5.62	2.39	0.03	0.40	0.13	0.71	101.12	1.03	35.01	6.93	2.48	2.45
LHS-2	斜长花岗斑岩	68.77	16.22	1.75	2.20	0.99	2.24	5.11	2.84	0.03	0.39	0.129	1.05	101.72	1.04	37.92	7.71	2.51	2.46
●	斜长花岗斑岩	70.68	14.50	2.05	0.22	0.80	1.86	4.48	3.90	0.06	0.28	-	-	98.83	0.97	46.92	6.99	3.10	2.15
LHS-3	闪长玢岩	51.69	17.66	7.15	10.28	3.62	8.72	3.15	1.51	0.12	1.65	0.40	1.15	107.10	0.78	9.16	14.34	1.43	3.25
●	闪长玢岩	55.44	16.58	6.17	1.16	4.57	6.72	3.46	0.86	0.12	0.90	-	-	95.98	0.88	13.63	28.18	1.46	1.26
●	安山岩	57.09	15.63	9.06	2.06	3.06	2.42	3.77	0.83	0.15	1.08	-	-	95.15	1.36	22.10	16.29	1.68	1.31
●	英安岩	70.15	14.05	2.88	0.66	0.95	1.19	3.39	4.34	0.06	0.32	-	-	97.99	1.13	54.63	7.77	3.06	2.18
样品	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE	δ Eu	δ Ce
LHS-1	斜长花岗斑岩	15.90	32.60	3.85	15.20	3.33	0.92	2.60	0.43	1.93	0.35	1.01	0.16	0.84	0.12	11.70	90.94	0.92	0.95
LHS-2	斜长花岗斑岩	16.10	31.70	4.03	15.90	3.32	1.05	2.52	0.38	2.11	0.39	0.99	0.13	0.92	0.13	11.60	91.27	1.07	0.90
●	斜长花岗斑岩	25.44	46.70	5.07	22.28	4.04	0.70	3.27	0.45	2.70	0.51	1.37	0.21	1.31	0.20	15.89	130.12	0.56	0.97
LHS-3	闪长玢岩	12.70	29.90	4.40	22.00	5.77	1.84	5.87	1.18	6.60	1.36	4.26	0.67	3.92	0.55	41.70	142.72	0.96	0.94
●	闪长玢岩	7.01	16.69	2.42	10.90	2.88	0.81	3.23	0.57	3.85	0.76	2.21	0.34	2.16	0.32	21.39	75.54	0.82	1.01
●	安山岩	7.89	18.17	2.22	10.78	2.64	0.82	2.87	0.44	2.93	0.59	1.72	0.27	1.65	0.25	16.17	69.41	0.91	1.04
●	英安岩	11.58	19.88	3.36	13.50	3.47	0.18	3.07	0.53	3.45	0.86	1.93	0.33	2.24	0.34	20.62	85.12	0.17	0.82

注: 饱和度指数(A/CNK)=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)(mol); 分子指数(DI)=Qz+Or+Ab+Ne+Lc+Kp; 固结指数(SI)=MgO×100/(MgO+FeO+Fe₂O₃+Na₂O+K₂O)(wt%); 碱度率(AR)=[Al₂O₃+CaO+(Na₂O+K₂O)]/[Al₂O₃+CaO-(Na₂O+K₂O)] (wt%); 里特曼指数(σ)=(K₂O+Na₂O)/(SiO₂-43)(wt%)。

表 3 莲花山斜长花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon Hf isotopic compositions of plagioclase granite porphyry in the Lianhuashan Cu-Ag deposit

Spot	t (Ma)	$\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$	2SE	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}\right)_i$	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
LHS-01											
LHS-01-01	236.1	0.042150	0.001459	0.282868	0.000024	3.4	8.4	0.282868	551	635	-0.96
LHS-01-02	264.4	0.071223	0.002437	0.282894	0.000023	4.3	9.7	0.282894	528	590	-0.93
LHS-01-03	236.1	0.042497	0.001635	0.282861	0.000025	3.1	8.1	0.282861	564	650	-0.95
LHS-01-04	235.6	0.058319	0.001562	0.282904	0.000026	4.7	9.6	0.282904	501	571	-0.95
LHS-01-05	237.0	0.060705	0.001784	0.282892	0.000022	4.2	9.2	0.282892	522	595	-0.95
LHS-01-06	237.0	0.061745	0.001562	0.282854	0.000029	2.9	7.9	0.282854	572	661	-0.95
LHS-01-07	235.5	0.026332	0.000832	0.282916	0.000017	5.1	10.1	0.282916	474	543	-0.97
LHS-01-08	221.9	0.054154	0.001373	0.282927	0.000021	5.5	10.2	0.282927	465	531	-0.96
LHS-01-09	224.5	0.064901	0.002108	0.282896	0.000020	4.4	9.0	0.282896	520	593	-0.94
LHS-01-10	221.0	0.055284	0.001513	0.282824	0.000025	1.8	6.5	0.282824	615	720	-0.95
LHS-01-11	235.8	0.052433	0.001191	0.282913	0.000020	5.0	10.0	0.282913	482	551	-0.96
LHS-01-12	234.9	0.064226	0.002442	0.282796	0.000027	0.9	5.6	0.282796	672	774	-0.93
LHS-01-13	235.5	0.042549	0.001300	0.282905	0.000022	4.7	9.7	0.282905	495	566	-0.96
LHS-01-14	237.9	0.054066	0.001717	0.282849	0.000023	2.7	7.7	0.282849	583	673	-0.95
LHS-01-15	238.6	0.052963	0.002033	0.282888	0.000029	4.1	9.0	0.282888	531	603	-0.94
LHS-01-16	237.8	0.032341	0.001094	0.282935	0.000019	5.8	10.8	0.282935	450	509	-0.97
LHS-01-17	237.1	0.032280	0.000991	0.282900	0.000018	4.5	9.6	0.282900	499	574	-0.97
LHS-01-18	238.2	0.036973	0.001323	0.282954	0.000022	6.4	11.5	0.282954	426	477	-0.96
LHS-01-19	238.5	0.051760	0.001353	0.282928	0.000019	5.5	10.5	0.282928	464	525	-0.96
LHS-01-20	235.4	0.046192	0.001421	0.282862	0.000021	3.2	8.1	0.282862	559	646	-0.96
LHS-02											
LHS-02-01	236.7	0.058343	0.001637	0.282872	0.000019	3.5	8.5	0.282872	549	630	-0.95
LHS-02-02	240.8	0.026515	0.000988	0.282895	0.000021	4.4	9.5	0.282895	505	581	-0.97
LHS-02-03	238.4	0.059795	0.001350	0.282895	0.000022	4.4	9.4	0.282895	510	584	-0.96
LHS-02-04	274.4	0.043036	0.001054	0.282883	0.000023	3.9	9.8	0.282883	524	595	-0.97
LHS-02-05	238.6	0.049239	0.001519	0.282911	0.000024	4.9	9.9	0.282911	490	557	-0.95
LHS-02-06	245.9	0.052432	0.001190	0.282914	0.000019	5.0	10.2	0.282914	482	547	-0.96
LHS-02-07	238.7	0.061232	0.001473	0.282878	0.000022	3.7	8.8	0.282878	537	617	-0.96
LHS-02-08	237.6	0.047088	0.001162	0.282892	0.000024	4.2	9.3	0.282892	513	590	-0.96
LHS-02-09	240.6	0.044567	0.001453	0.282876	0.000022	3.7	8.7	0.282876	539	619	-0.96
LHS-02-10	225.2	0.046509	0.001118	0.282875	0.000019	3.7	8.4	0.282875	536	623	-0.97
LHS-02-11	296.6	0.054945	0.001374	0.282762	0.000023	-0.3	5.9	0.282762	701	810	-0.96
LHS-02-12	238.6	0.062855	0.001901	0.282941	0.000020	6.0	10.9	0.282941	452	506	-0.94
LHS-02-13	237.9	0.046899	0.001665	0.282871	0.000020	3.5	8.5	0.282871	549	631	-0.95
LHS-02-14	237.0	0.047295	0.001207	0.282895	0.000022	4.4	9.4	0.282895	508	584	-0.96
LHS-02-15	234.7	0.048650	0.001262	0.282905	0.000023	4.7	9.7	0.282905	496	568	-0.96
LHS-02-16	234.8	0.040291	0.001263	0.282934	0.000021	5.7	10.7	0.282934	454	514	-0.96
LHS-02-17	236.4	0.063412	0.001803	0.282941	0.000021	6.0	10.9	0.282941	450	504	-0.95
LHS-02-18	236.2	0.046813	0.001293	0.282887	0.000021	4.1	9.1	0.282887	521	599	-0.96
LHS-02-19	222.7	0.048753	0.001366	0.282876	0.000019	3.7	8.4	0.282876	539	624	-0.96
LHS-02-20	229.0	0.041696	0.001122	0.282905	0.000021	4.7	9.6	0.282905	493	567	-0.97

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(0) = ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1) \times 10000$, $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)) / ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} \times (e^{\lambda t} - 1)) \times 10000$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i = (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)$ 。其中, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s$ 为样品测定值, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$ (Blichert-Toft et al. 1977)。t 为样品形成时间, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$ (Soderlund et al. 1988)。

比值分布于 0.282 796~0.282 954, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +5.6~+11.5, 平均+9.1, 两阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM2}) 变化范围为 477~774 Ma; 样品 LHS-02 分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 0.282 762~0.282 941, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +5.9~+10.9, 平均+9.3, 两阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM2}) 变化范围为 504~810 Ma。

4 讨论

4.1 成岩时代及其意义

从区域构造演化的角度而言, 三叠纪是大兴安岭地区一个非常重要的时期, 多数学者都认为三叠纪早—中期磨拉石沉积的出现和三叠纪中期岩浆活

动的发生, 标志着该区强烈碰撞造山作用的发生和碰撞过程及古亚洲洋构造演化的结束^[20-26]。而按照现有的成矿理论, 无论在洋—陆俯冲过程, 还是陆—陆碰撞体制, 均能形成大量晚古生代末期和早中生代的斑岩型、造山型、浅成低温热液型等多种类型的矿床^[27-31], 尤其是铜、金等矿床。最近几年随着同位素年代精确测定, 也开始识别出大兴安岭地区三叠纪成矿并非是一个孤立的地质事件, 这也在不少学者中形成共识^[32-33], 例如, 周振华等(未发表数据)测得大兴安岭南段敖尔盖斑岩铜矿花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (245.4±1.8) Ma, 形成于后碰撞伸展环境; 江思宏等^[33]测得白音诺铅锌矿区

内花岗闪长岩的形成年龄为(244.5±0.9)Ma,而白音诺尔铅锌矿的矿化蚀变发生在花岗闪长岩的就位过程中,因此其成矿时代应为印支早期,而不是前人认为的燕山早期,但受到燕山晚期岩浆活动影响,有成矿作用的叠加;在华北克拉通北缘,二叠纪末—三叠纪岩浆岩的分布范围很广泛,岩性主要为钾长花岗岩、二长花岗岩及碱性杂岩,其次为基性—超基性岩及少量中—酸性火山岩,岩浆活动主要开始于~250 Ma^[20],三叠纪代表性矿床有库里吐斑岩型钼矿(Re—Os 等时线年龄为(236±3.3)Ma)和车户沟斑岩型铜—钼矿(Re—Os 等时线年龄为(257.5±2.5 Ma))^[34-36]。

目前,大兴安岭地区金属矿床缺少足够的高精度 LA-ICP-MS U—Pb、SHRIMP U—Pb、Re—Os 年龄数据,而多为 Rb—Sr、K—Ar 等时线法或单颗粒锆石 U—Pb 法等,但是这些同位素体系通常会受到后期事件的扰动,往往不能代表岩体的结晶年龄或是通常记录着成岩或成矿末期的同位素封闭时间。因此,这些数据的可靠性值得商榷,例如,江思宏等^[33]测得的白音诺尔铅锌矿的 LA-ICP-MS 锆石 U—Pb 结果与之前的 Rb—Sr 等时线数据小了 30 Ma,周振华等(未发表数据)获得的台布呆铜矿花岗斑岩 SHRIMP 锆石 U—Pb 年龄也与前人的 Rb—Sr 等时线年龄相差 32 Ma。本次研究测得莲花山斜长花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U—Pb 年龄为(236.8±0.77) Ma (MSWD =0.85)~(237.9±0.71)Ma (MSWD =1.02),确定为中三叠世岩浆活动产物,而非前人所说的中侏罗世(单颗粒锆石 U—Pb 年龄 161.8 Ma^[2])。由于斑岩型矿床的成矿时代一般与岩体形成时代相近或略小,因此,莲花山铜银矿很有可能为印支期成矿,形成于华北板块和西伯利亚板块碰撞后岩石圈伸展环境。三叠纪成矿作用的发现也为全面认识大兴安岭区域成矿规律提供了重要资料,也提示我们要注重鉴别被燕山期强烈的岩浆活动叠加改造的印支期或更早的成矿事件。

4.2 岩浆源区性质与地壳增生

由于锆石的 Lu—Hf 同位素体系具有很高的封闭温度,锆石 Hf 同位素比值不会随后期部分熔融或分离结晶而变化,因此锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值代表了岩浆源区的成分特征,不均一的锆石 Hf 同位素特征很可能指示了一个开放体系,与具有不同放射性成因 Hf 同位素含量的几种岩浆混合有关^[37-39]。通常认为具有正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的花岗质岩石来自亏损地幔或从亏

损地幔中新增生的年轻地壳物质的部分熔融^[40],负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 通常代表古老地壳成因^[41]。Sr—Nd 同位素研究表明,大兴安岭地区显生宙以来的花岗岩的源岩通常都具有正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和较低的 T_{DM} 值,被认为是在地壳垂向增生过程中源于地幔的年轻地壳物质^[8]。莲花山样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值(+5.6~+11.5),具有较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值(0.282762~0.282954)和年轻的二阶段 Hf 同位素模式年龄(477~810Ma),反映其源区物质为显生宙期间从亏损地幔新增生的年轻地壳物质,而 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围较大,这种不均一性可能是受到了地壳或岩石圈地幔物质的混染^[42]。因此,可以推测莲花山斜长花岗斑岩主要来源于亏损地幔,在侵位过程中受到了地壳或岩石圈地幔的混染。

兴蒙造山带自西向东依次分布有额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块、佳木斯地块,北邻华北板块北缘(图 1-a),近年来关于兴蒙造山带乃至中亚造山带地壳增生及演化问题的研究引起了众多学者的关注^[8,43-44],为了更深入地了解兴蒙造山带及邻区的地壳演化史,本次研究系统收集整理了近年来报道的 1097 个岩浆岩锆石 Hf 同位素测试数据,Hf 同位素相关图解(图 6)显示,兴安地块、松嫩地块、佳木斯地块等具有相似的性质,而与额尔古纳地块和华北板块北缘具有明显的区别。一般而言,亏损地幔源区具有更高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值,而大陆地壳相对于亏损地幔而言有着更低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值^[45-46],在 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值直方图(图 6-a)中,兴安地块、松嫩地块、佳木斯地块岩浆岩中锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值较高,集中在 0.282 850~0.283 050,额尔古纳地块和华北板块北缘则分别集中在 0.282 600~0.282 750 和 0.282 300~0.282 450,反映不同的岩浆源区属性。锆石 Hf 同位素 T_{DM2} 直方图(图 6-b)显示,兴安地块、松嫩地块、佳木斯地块 Hf 同位素模式年龄介于 0.50~0.80 Ga,表明其地壳物质的增生时代主要发生在显生宙;额尔古纳地块 Hf 同位素模式年龄变化范围集中在 1.20~1.40 Ga,反映其地壳物质增生时代主要发生在中元古代;华北板块北缘 Hf 同位素模式年龄变化范围很大(1.00~2.00 Ga),峰值区间不明显,其说明华北板块自新太古代晚—末期微陆块拼合和古元古代大陆拼合与裂解事件^[47]之后,可能经历了漫长的地壳增生和相对稳定的发展阶段。

在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ -t 图解(图 6-c)和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ -t 图解(图 6-d)中,兴安地块、松嫩地块、佳木斯地块岩浆

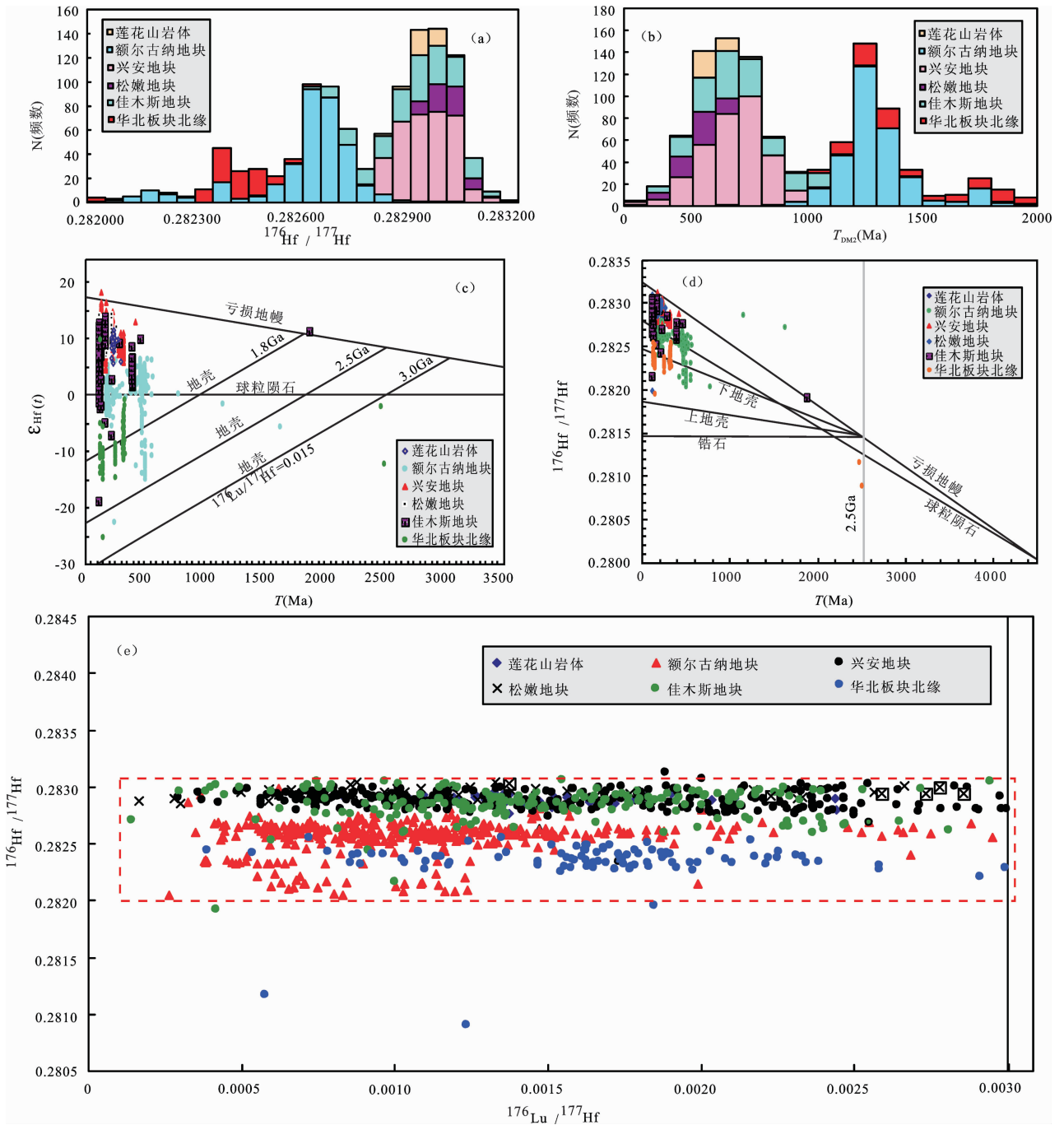


图 6 兴蒙造山带及邻区岩浆岩的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 直方图 (a)、 T_{DMC} 直方图 (b)、Hf 同位素演化图 (c、d, 底图据^[48]) 及 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} - ^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 图解 (e)

数据来源: 莲花山岩体据本文; 额尔古纳地块据隋振民等^[40,44]、葛文春等^[8]、王召林等^[46]; 兴安地块据隋振民等^[40,44]、周漪等^[49]、张彦龙等^[50]、Zhou et al. ^[51]; 松嫩地块据冯光英等^[52]、高妍^[53]; 佳木斯地块据孟恩^[54]、程瑞玉^[55]; 华北板块北缘据张松等^[56]、王彦斌等^[57]

Fig.6 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ histogram (a), T_{DMC} histogram (b), Hf isotope evolution diagram (c, d) ^[48] and $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ versus $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ diagram (e) of zircons from magmatic rocks in the Xingmeng orogenic belt and its adjacent areas

Data sources: Lianhuashan rock body after this study; Ergun massif after Sui et al. ^[40,44], Ge et al. ^[8], Wang et al. ^[46]; Hinggan massif after Sui et al. ^[40,44], Zhou et al. ^[49], Zhang et al. ^[50], Zhou et al. ^[51]; Songnen massif after Feng et al. ^[52], Gao^[53]; Jiamusi massif after Meng^[54], Cheng^[55]; North China Plate margin after Zhang et al. ^[56], Wang et al. ^[57]

岩中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 除佳木斯地块个别样品外绝大多数为正值,绝大多数数据点落在球粒陨石演化线和亏损地幔演化线之间,个别点落在亏损地幔演化线之上,显示其岩浆源区主要来源于亏损地幔物质的部分熔融;额尔古纳地块 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围较大,主要介于-15~+5之间,表明其具有不同的岩浆源区;华北板块北缘 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 全部为负值,说明其可能主要来自于下地壳物质的部分熔融。兴蒙造山带及邻区锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值集中在 0.2820~0.2830(图 6-e),且随着岩浆岩年龄逐渐变新, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值逐渐变大(图 6-d),与 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 呈明显的线性关系(图 6-e)。综合以上研究表明,兴蒙造山带及其邻区中,兴安地块、松嫩地块和佳木斯地块属性相似,其与额尔古纳地块和华北板块北缘各自具有不同的地壳增生历史^⑧,揭示它们具有不同的早期地壳演化过程。

5 结 论

(1) 莲花山铜银矿中斜长花岗斑岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年显示两个样品的年龄分别为 $(236.8 \pm 0.77)\text{Ma}$ (MSWD=0.85) 和 $(237.9 \pm 0.71)\text{Ma}$ (MSWD=1.02),为中三叠世岩浆活动的产物,证明大兴安岭地区三叠纪成矿事件并非孤立的地质事件。

(2) 锆石 Hf 同位素研究表明,莲花山斜长花岗斑岩主要来源于从亏损地幔中新增生的年轻地壳物质的部分熔融,在侵位过程中受到了地壳或岩石圈地幔的混染或者直接来源于轻度富集的地幔物质部分熔融;年轻的 Hf 同位素模式年龄(477~810 Ma)暗示兴安地块早古生代早期—晚元古代时期曾发生一次重要的地壳增生事件。

(3) 系统的 Hf 同位素数据整理研究表明,兴安地块、松嫩地块和佳木斯地块属性相似,其与额尔古纳地块和华北板块北缘各自具有不同的地壳增生历史,揭示它们具有不同的早期地壳演化过程。

致谢:野外地质工作期间得到了内蒙古自治区地质调查院的大力支持;论文实验工作得到了中国地质科学院矿产资源研究所侯可军博士、郭春丽副研究员的热情帮助,在此一并致谢!

参考文献(References):

[1] 赵一鸣,张德全.大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价[M].北京:地震出版社,1997:135-137.
Zhao Yiming, Zhang Dequan. Metallogenic Regularity and Prospective Evaluation of the Copper-polymetallic Deposits in

Daxinganling and Adjacent Areas [M]. Beijing: Seismological Press, 1997:135-137 (in Chinese).

[2] 盛继福,付先政,李鹤年.大兴安岭中段成矿环境与铜多金属矿床地质特征[M].北京:地震出版社,1999:139-169.
Sheng Jifu, Fu Xianzheng, Li Henian. The ore-forming Environment and the Geological Features of the Middle Daxinganling [M]. Beijing: Seismological Press, 1999:139-169 (in Chinese).

[3] 肖丙建,王伟德,张强,等.内蒙古突泉县莲花山银铜矿床成矿地质背景探讨[J].地质与勘探,2008,44(1):26-30.
Xiao Bingjian, Wang Wei'de, Zhang qiang, et al. Geology background of Lianhuashan Ag-Cu deposit in Tuquan County, Inner Mongolia [J]. Geology and Prospecting, 2008, 44 (1): 26-30 (in Chinese with English abstract).

[4] 宋长春.内蒙古莲花山铜银矿床蚀变统计分带研究[J].矿物岩石地球化学通报,1996,15(3):182-184.
Song Changchun. Statistical alteration belt of Lianhuashan Cu-Ag deposit [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1996, 15(3):182-184(in Chinese with English abstract).

[5] 刘光海,白大明.莲花山铜银矿床综合找矿模式[J].矿床地质,1994,13(2):163-170.
Liu Guanghai, Bai Daming. The integrated geological-geophysical-geochemical prospecting model of the Lianhuashan copper-silver deposit [J]. Mineral Deposits, 1994, 13 (2): 163-170 (in Chinese with English abstract).

[6] 王京彬,王玉往,王莉娟.大兴安岭中南段铜矿成矿背景及找矿潜力[J].地质与勘探,2000,36(5):1-4.
Wang Jingbin, Wang Yuwang, Wang Lijuan. Copper metallogenic setting and prospecting potential in the middle-southern part of Da Hinggan Mountains [J]. Geology and Prospecting, 2000, 36(5): 1-4 (in Chinese with English abstract).

[7] 冯建忠,王京彬,梅友松.论中国火山次火山岩-斑岩型金银成矿系列[J].地质与勘探,2000,36(3):1-4.
Feng Jianzhong, Wang Jingbin, Mei Yousong. Au-Ag polymetallic metallogenic series related to volcano-subvolcanic-porphyry of China [J]. Geology and Prospecting, 2000, 36(3): 1-4 (in Chinese with English abstract).

[8] 葛文春,隋振民,吴福元,等.大兴安岭东北部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义[J].岩石学报,2007,23(2):423-440.
Ge Wenchun, Sui Zhenmin, Wu Fuyuan, et al. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic characteristics and their implications of the Early Paleozoic granites in the northeastern Da Hinggan Mts., northeastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 423-440 (in Chinese with English abstract).

[9] Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, et al. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2008, 32: 247-265.

[10] Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, et al. 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 [J]. *Journal of Petrology*, 2009, 51(1/2):537-571.
- [11] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 2009, 28(4):481-492.
Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(4):481-492(in Chinese with English abstract).
- [12] Slàma J, Kosler J, Condon D J, et al. Plesovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 2008, 249:1-35.
- [13] 侯可军, 李延河, 邹天仁, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10):2595-2604.
Hou Kejun, Li Yanhe, Zhou Tianren, et al. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10):2595-2604 (in Chinese with English abstract).
- [14] Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, et al. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2006, (Suppl.):A158.
- [15] Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solidstate recrystallization of protolith igneous zircon [J]. *J. Metamorph Geol.*, 2000, 18:423-439.
- [16] Sun S S, McDonough F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D and Norry M J (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 1989, 42:528-548.
- [17] Blichert-Toft J, Albarede F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1997, 148:243-258.
- [18] Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, 219:311-324.
- [19] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Nature of the earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircon [J]. *Nature*, 1999, 399:252-255.
- [20] 刘伟, 杨进辉, 李潮峰. 内蒙赤峰地区若干主干断裂带的构造热年代学[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4):717-725.
Liu Wei, Yang Jinhui, Li Chaofeng. Thermochronology of three main faults in the Chifeng area, Inner Mongolia of China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(4):717-728(in Chinese with English abstract).
- [21] 刘伟, 潘小菲, 谢烈文, 等. 大兴安岭南段林西地区花岗岩类的源岩:地壳生长的时代和方式[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2):441-460.
Liu Wei, Pan Xiaofei, Xie Liwen, et al. Sources of material for the Linxi granitoids, the southern segment of the Great Xing'an Range: when and how continental crust grew [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2):441-460(in Chinese with English abstract).
- [22] Davis G A, Xu Bei, Zheng Yadong, et al. Indosinian extension in the Solonker suture zone: The Sonid Zuoqi metamorphic core complex, Inner Mongolia, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 11: 2004, 135-144.
- [23] Li Jinyi. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the paleo-Pacific plate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26(3/4):207-224.
- [24] 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. *岩石学报*, 2007, 23(3):565-582.
Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, et al. Shuangjingzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(3):565-582 (in Chinese with English abstract).
- [25] 吴华英, 张连昌, 陈志广, 等. 内蒙古西拉木伦成矿带库里吐铜(铜)矿区二长花岗岩地球化学、构造环境及含矿性分析[J]. *岩石学报*, 2008, 24(4):867-878.
Wu Huaying, Zhang Lianchang, Chen Zhiguang, et al. Geochemistries, tectonic setting and mineralization potentiality of the ore-bearing monzogranite in the Kulu molybdenum (copper) deposit of Xar moron metallogenic belt, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(4):867-878 (in Chinese with English abstract).
- [26] 赵越, 陈斌, 张栓宏, 等. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件[J]. *中国地质*, 2010, 37(4):900-915
Zhao Yue, Chen Bin, Zhang Shuanhong, et al. Pre-Yanshannian geological events in the northern margin of the North China craton and its adjacent areas [J]. *Geology in China*, 2010, 37(4):900-915 (in Chinese with English abstract).
- [27] Kerrich R, Goldfarb R J, Groves D I, et al. The geodynamics of world-class gold deposits: Characteristics, space-time distribution, and origin [J]. *Reviews in Economic Geology*, 2000, 13:649-690.
- [28] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13:7-27.
- [29] Groves D I, Goldfarb R J, Robert F, et al. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance [J]. *Economic Geology*, 2003, 98:1-29.
- [30] 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. *中国地质*, 2006, 33(6):1181-1196.
Chen Yanjing. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential [J]. *Geology in China*, 2006, 33(6):1181-1196 (in Chinese with English abstract).
- [31] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 2007, 23(9):2085-2108.
Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, et al. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(9):2085-2108 (in Chinese with English abstract).
- [32] 曾庆栋, 刘建明, 张作伦, 等. 华北克拉通北缘鸡冠山斑岩铜矿床成矿年代及印支期成矿事件[J]. *岩石学报*, 2009, 25(2):393-398.

- Zeng Qingdong, Liu Jianming, Zhang Zuolun, et al. Ore-forming time of the Jiguanshan porphyry molybdenum deposit, northern margin of North China Craton and the Indosinian mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (2): 393-398 (in Chinese with English abstract).
- [33] 江思宏, 聂凤军, 白大明, 等. 内蒙古白音诺尔铅锌矿床印支期成矿的年代学证据[J]. *矿床地质*, 2011, 30(5): 787-798.
- Jiang Sihong, Nie Fengjun, Bai Daming, et al. Geochronology evidence for Indosinian mineralization in Baiyinnuoer Pb-Zn deposit of Inner Mongolia [J]. *Mineral Deposits*, 2011, 30(5): 787-798 (in Chinese with English abstract).
- [34] Liu Jianming, Zhao Yue, Sun Yali, et al. Recognition of the Latest Permian to Early Triassic Cu-Mo mineralization on the northern margin of the North China block and its geological significance [J]. *Gondwana Research*, 2010, 17(1): 125-134.
- [35] Wan Bo, Ernst H, Zhang Lianchang, et al. Rb-Sr geochronology of chalcopyrite from the Chehugou porphyry Mo-Cu deposit (Northeast China) and geochemical constraints on the origin of hosting granites [J]. *Economic Geology*, 2009, 104: 351-363.
- [36] Zhang Lianchang, Wu Huaying, Wan Bo, et al. Ages and geodynamic settings of Xilamulun Mo-Cu metallogenic belt in the northern part of the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 2009, 16: 243-254.
- [37] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma genesis, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 2002, 61: 237-269.
- [38] Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G L, et al. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon [J]. *Science*, 2007, 16: 980-983.
- [39] Ravikant V, Wu Huaying and Ji W Q. U-Pb age and Hf isotopic constraints of detrital zircons from the Himalayan foreland Subathu sub-basin on the Tertiary palaeogeography of the Himalaya. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304: 356-368.
- [40] 隋振民, 葛文春, 吴福元, 等. 大兴安岭北部察哈彦岩体的 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39(5): 849-867.
- Sui Zhenmin, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, et al. Hf isotopic characteristics and geological significance of the Chahayan pluton in northern Daxing'anling Mountains [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39 (5): 849-867 (in Chinese with English abstract).
- [41] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185-220.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. Lu-Hf isotope systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 185-220 (in Chinese with English abstract).
- [42] Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, et al. Lhasa terrane in southern Tibet came from Australia [J]. *Geology*, 2011, 39: 727-730.
- [43] Zhang Jiheng, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, et al. Mesozoic bimodal volcanic suite in Zhalatun of the Da Hinggan Range and its geological significance: zircon U-Pb age and Hf isotopic constraints [J]. *Acta Geologica Sinica (English version)*, 2006, 80 (1): 58-69.
- [44] 隋振民, 葛文春, 吴福元, 等. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 461-480.
- Sui Zhenmin, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, et al. Zircon U-Pb ages, geochemistry and its petrogenesis of Jurassic granites in northeastern part of the Da Hinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 461-480 (in Chinese with English abstract).
- [45] Patchett P J, Kouvo O, Hedge C E, et al. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: evidence from Hf isotopes [J]. *Contrib. Mineral. Petrology*, 1981, 78: 279-297.
- [46] 王召林, 金浚, 李占龙, 等. 大兴安岭中北段莫尔道嘎地区含矿斑岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及成矿意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6): 796-810.
- Wang Zhaolin, Jin Jun, Li Zhanlong, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic characteristics of mineralized porphyries in the Mordaoga area, northern-central Da Hinggan Mountains, and their metallogenic significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(6): 796-810 (in Chinese with English abstract).
- [47] Zhai Mingguo, Li T S, Peng Peng, et al. Precambrian key tectonic events and evolution of the North China Craton [C]//Kusky T, Zhai Mingguo, Xiao Wwnjiao (eds.). *The Evolving Continents*. *Geol Soc Spe Pub London*, 2010, 338: 235-262.
- [48] Vervoort J D, Pachel P J, Gehrels G E, et al. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes. *Nature*, 1996, 379: 624-627.
- [49] 周漪, 葛文春, 王清海. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的成因——地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(5): 901-923.
- Zhou yi, Ge Wenchun, Wang Qinghai. Petrogenesis of Mesozoic granite in W ulanhaote region, Central Da Hinggan Mountains: constraints from geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30 (5): 901-923 (in Chinese with English abstract).
- [50] 张彦龙, 葛文春, 高妍, 等. 龙镇地区花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及地质意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 1059-1073.
- Zhang Yanlong, Ge Wenchun, Gao Yan, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of granites in Longzhen area and their geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4): 1059-1073 (in Chinese with English abstract).
- [51] Zhou Zhenhua, Mao Jingwen, Peter L. Geochronology and isotopic geochemistry of the A-type granites from the Huanggang Sn-Fe deposit, Southern Great Hinggan Range, NE China: Implication for their origin and tectonic setting [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 49: 272-286.
- [52] 冯光英, 刘燊, 冯彩霞, 等. 吉林红旗岭超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2011, 27 (6): 1594-1606.
- Feng Guangying, Liu Shen, Feng Caixia, et al. Zircon U-Pb age. Sr-Nd-Hf isotope geochemistry and the petrogenesis of the ultramafic pluton in Hongqiling, Jiling Province [J]. *Acta*

- Petrologica Sinica, 2011, 27 (6):1594-1606 (in Chinese with English abstract).
- [53] 高妍. 松辽盆地东南缘中生代火山岩的年代学和地球化学特征 [D]. 吉林大学硕士学位论文, 2008, 1-78.
- Gao Yan. Chronology and Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks in Southeastern Songliao Basin [D]. Master Dissertation. Jinlin: Jinlin University, 2008, 1-78(in Chinese with English abstract).
- [54] 孟恩. 黑龙江省东部晚古生代-早中生代构造演化: 碎屑锆石与火山事件的制约 [D]. 吉林大学博士学位论文, 2011: 1-146.
- Meng En. Late Paleozoic-Early Mesozoic Tectonic Evolution in the Eastern Heilongjiang Province, NE China: Constraints from Detrital Zircons and Volcanical Events [D]. Ph. D. Dissertation. Jinlin: Jinlin University, 2011: 1-146 (in Chinese with English abstract).
- [55] 程瑞玉. 黑龙江省东部饶河地区花岗岩时代及其成因 [D]. 吉林大学硕士学位论文, 2006: 1-63.
- Cheng Ruiyu. The Era and Petrogenesis of Raohe Granites in East Heilongjiang Province [D]. Master Dissertation. Jinlin: Jinlin University, 2006: 1-63(in Chinese with English abstract).
- [56] 张松, 王永彬, 褚少雄. 华北克拉通北缘东段海沟岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素组成及其动力学背景 [J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 544-556.
- Zhang Song, Wang Yongbin, Chu Shaoxiong. Zircon U-Pb ages and Sr-Nd-Hf isotopic composition of the Haigou granitoids at the northeastern margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(2): 544-556 (in Chinese with English abstract).
- [57] 王彦斌, 韩娟, 李建波, 等. 内蒙赤峰楼子店拆离断层带下盘变形花岗岩质的时代、成因及其地质意义—锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据 [J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 763-778.
- Wang Yanbin, Han Juan, Li Jianbo, et al. Age, petrogenesis and geological significance of the deformed granitoids in the Louzidian metamorphic core complex, southern Chifeng, Inner Mongolia: Evidence from zircon U-Pb dates and Hf isotopes [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, 29(6): 763-778(in Chinese with English abstract).
- [58] Knudsen T L, Griffin W L, Hartz E H, et al. In-situ hafnium and lead isotope analyses of detrital zircon from the Devonian sedimentary basin of NE Greenland: a record of repeated crustal reworking [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2001, 141: 83-94.

LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and Hf isotope study of the plagioclase granite porphyry in the Lianhuashan Cu-Ag deposit of Inner Mongolia and its geological significance

ZHOU Zhen-hua¹, WU Xin-li², OU-YANG Hegen²

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Lianhuashan Cu-Ag deposit of Inner Mongolia is an important deposit in southern Da Hinggan Mountains metallogenic belt, and its mineralization is closely related to the plagioclase granite porphyry. Zircon LA-MC-ICP-MS dating of the plagioclase granite porphyry shows that its formation ages range from $236.8 \pm 0.77\text{Ma}$ (MSWD=0.85) to $237.9 \pm 0.71\text{Ma}$ (MSWD=1.02), suggesting that it is a product of the Triassic magmatism rather than the Middle Jurassic magmatic activity. The Lianhuashan plagioclase granite porphyry has ϵ_{Hf} (t) values range from +5.6 to +11.5 with relatively high $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ values and younger two-stage model ages (477~810Ma), indicating that it was mainly derived from the partial melting of the new-born lower crust that originated from the depleted mantle, and that there probably existed an important crustal growth event in Hinggan massif which occurred in the early Paleozoic-late Proterozoic period. Based on a systematical study of ~1100 zircon Hf isotope data from the magmatic rocks in the Xingmeng orogenic belt, the authors found that the Hinggan, Songnen and Jiamusi massifs have similar properties, and these three massifs, the Ergun massif and the North China plate margin have their respective crustal accretion histories, revealing that they had different early crustal evolution processes.

Key words: LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating; Hf isotope; Triassic; crustal growth; Lianhuashan Cu-Ag deposit; Xingmeng orogenic belt

About the first author: ZHOU Zhen-hua, male, born in 1981, doctor, assistant researcher, mainly engages in the study of mineral deposits; E-mail: zhzhou@cags.ac.cn.