

黑龙江老柞山金矿区片麻状花岗岩锆石 U-Pb 年龄、 Hf 同位素特征及其地质意义

寇林林¹, 张 朋¹, 陈 江¹, 赵 岩¹, 王筱箐², 毕中伟¹

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 中国地质调查局 自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201

摘 要: 黑龙江老柞山金矿床是佳木斯地块中北部的大型热液叠加夕卡岩型矿床。对矿区东矿带赋矿片麻状花岗岩进行了 LA-ICP-MS 的 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析, 共获得 3 组年龄, 分别为 697.1 ± 8.0 、 703.0 ± 8.8 和 484.7 ± 2.7 Ma。其中前 2 组为捕获的锆石年龄, 暗示佳木斯地块南缘可能存在新元古代的结晶基底。第三组锆石年龄代表片麻状花岗岩结晶年龄。锆石原位 Hf 同位素测试显示, 片麻状花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-2.4 \sim +3.6$, T_{DM2} 为 1620~1390 Ma, 指示片麻状花岗岩原岩可能是中元古代陆壳物质重熔。结合区域构造演化, 认为片麻状花岗岩可能形成于晚泛非—早加里东期的碰撞造山作用, 是麻山群深熔岩浆结晶作用的产物。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 片麻状花岗岩; 老柞山金矿床; 黑龙江省

ZIRCON U-Pb AGE AND Hf ISOTOPIC CHARACTERISTICS OF THE GNEISSIC GRANITES IN LAOZUOSHAN GOLDFIELD OF HEILONGJIANG PROVINCE: Geological Implication

KOU Lin-lin¹, ZHANG Peng¹, CHEN Jiang¹, ZHAO Yan¹, WANG Xiao-zheng², BI Zhong-wei¹

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Core and Sample Center of Natural Resources, Sanhe 065201, Hebei Province, China

Abstract: The Laozuoshan gold deposit in Heilongjiang Province is a large hydrothermal superimposed skarn deposit in the north-central of Jiamusi block. Three groups of age, 697.1 ± 8.0 , 703.0 ± 8.8 , and 484.7 ± 2.7 Ma respectively, are acquired through the LA-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotope analysis of gneissic granites in the east ore belt of orefield, among which the former two are the age of captured zircons, suggesting that there might be Neoproterozoic crystalline basement in the south margin of Jiamusi block, and the latter represents the crystallization ages of gneissic granites. The zircon Hf isotope tests show that the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ ranges from -2.4 to $+3.6$, with T_{DM2} of 1620–1390 Ma, indicating that the protolith of gneissic granite may be the derived from the remelting of Mesoproterozoic continental crust material. Combined with the regional tectonic evolution, it is believed that the gneissic granite was possibly formed by the late Pan-African-early Caledonian collision-orogeny as the product of anatectic magma crystallization of Mashan Group.

Key words: zircon U-Pb dating; Hf isotope; gneissic granite; Laozuoshan gold deposit; Heilongjiang Province

收稿日期:2019-12-11;修回日期:2020-03-12. 编辑:李兰英.

基金项目:国家自然科学基金“变质地体中内生金矿成矿模式研究——以辽东裂谷猫岭金矿为例”(41502093);中国地质调查局项目“东北地区区域成矿规律与总结”(121201103000150020).

作者简介:寇林林(1983—),女,硕士,高级工程师,主要从事区域地质和矿产调查工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//120526628@qq.com

0 引言

成岩、成矿年代学研究长期以来是地学研究领域的热点问题之一^[1]。成岩、成矿时代的精确确定对探讨岩浆活动、成矿作用至关重要。老柞山金矿位于中国东北黑龙江省双鸭山市和七台河市交界处,是一座典型的热液叠加夕卡岩型矿床^[2]。前人对该矿床的矿床地质、成矿流体、成矿物质和成矿时代做了大量研究^[3-4]。然而对矿区东部赋矿围岩混合岩却研究较少。近期,笔者及其研究团队对老柞山东部矿段的赋矿片麻状花岗岩开展精细年代学和 Hf 同位素分析,对片麻状花岗岩的形成时代和岩石源区性质作出深入探讨。

1 区域地质和矿床地质概况

老柞山金矿床位于兴蒙造山带东段佳木斯地块的中北部,是一个经历了太古宙古陆核的形成、元古宙裂谷及断拗的形成与演化、早古生代佳木斯地块的克拉通化、晚古生代兴蒙造山及古太平洋构造域形成与发展等多次构造运动叠加的复合构造区^[5-6]。

矿区内主要出露的地层有古元古界兴东群大马河组、中生界白垩系,此外还有第四纪松散沉积层。兴东群大马河组大理岩和大面积出露的混合岩为老柞山金矿的主要赋矿层位。其中东矿带和中矿带以麻山群混合岩、花岗岩为主要的赋矿围岩。西矿带赋矿围岩以花岗岩和闪长玢岩为主。矿区构造主要发育北西、北西西及北东 3 组断裂,较大断裂 36 条(图 1)。

该矿床由近北东向等间距分布的东矿带、中矿带和西矿带组成。已发现矿体约 200 多条,呈脉状、透镜状。矿体类型包括硫化物石英脉型矿体和含硫化物蚀变岩型矿体两种。其中:硫化物石英脉矿体多呈似层状、脉状、透镜状。含硫化物蚀变岩型矿体形态呈细脉状、网脉状、蝌蚪状。中矿带及东矿带矿体产状及分布受北西、北西西向断裂及夕卡岩层的控制,矿带规模大。西矿带只受北西、北西西向断裂控矿的区段,矿带规模较小。老柞山金矿石中矿石矿物主要为自然金、毒砂、黄铁矿、白铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿,其次是方铅矿、闪锌矿、孔雀石、褐铁矿。脉石矿物主要为微斜长石、石英、黑云母、透辉石、透闪石、方解石、钙铝榴石。

老柞山金矿围岩蚀变类型主要有硅化、绢云母化、夕卡岩化、钾化,其次为绿泥石化、碳酸盐化等。其中硅化常伴随着毒砂化、黄铁矿化。在西矿带毒砂化大

面积出露,而在中、东矿带以夕卡岩化为主。在众多的蚀变中,以硅化、夕卡岩化、毒砂化与成矿关系最为密切。

2 样品采集和分析测试方法

2.1 样品采集

本次测试片麻状花岗岩采自老柞山东矿带,样品号为 LZS-02。岩石呈肉红色,片麻状构造,花岗结构。岩石主要成分为:石英(20%~25%)、碱性长石(55%~65%)和黑云母(10%~15%)。地球化学测试表明(表 1),SiO₂ 含量较高,为 54.11%~68.50%;Na₂O 为 0.52%~3.80%;K₂O 为 3.83%~10.52%;CaO 为 2.43%~10.18%;Al₂O₃ 为 11.94%~17.16%。

2.2 样品处理

将采集的样品按照常规方法进行碎样,并进行分离锆石,全部过程在河北廊坊诚信地质服务有限公司完成。挑选 500 余粒锆石进行制靶、抛光、反射光和透射光照相,此项工作由北京锆年领航科技有限公司完成。

2.3 分析方法

2.3.1 锆石 U-Pb 定年

锆石 U-Pb 定年分析测试工作在中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室完成,采用仪器为激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)。LA-ICP-MS 激光剥蚀系统为美国 New Wave 公司生产的 UP193FX 型 193 nm ArF 准分子系统,激光器波长为 193 nm,脉冲宽度小于 4 ns,束斑直径为 35 μm。具体的实验原理和详细的测试方法见文献[7-8]。

2.3.2 锆石 Hf 同位素分析

本次在锆石定年基础上开展原位 Hf 同位素分析,此项工作在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开展。测试过程用氦气作为剥蚀物质载体,剥蚀束斑为 55 μm,测定时使用锆石国际标样 MT 作为参考物质。分析过程中锆石标准 MT 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 测试加权平均值为 0.282 008 ± 0.000 025(2σ, n=26)。详细的仪器参数和分析流程见文献[9]。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

老柞山金矿区片麻状花岗岩 LA-ICP-MS 锆石

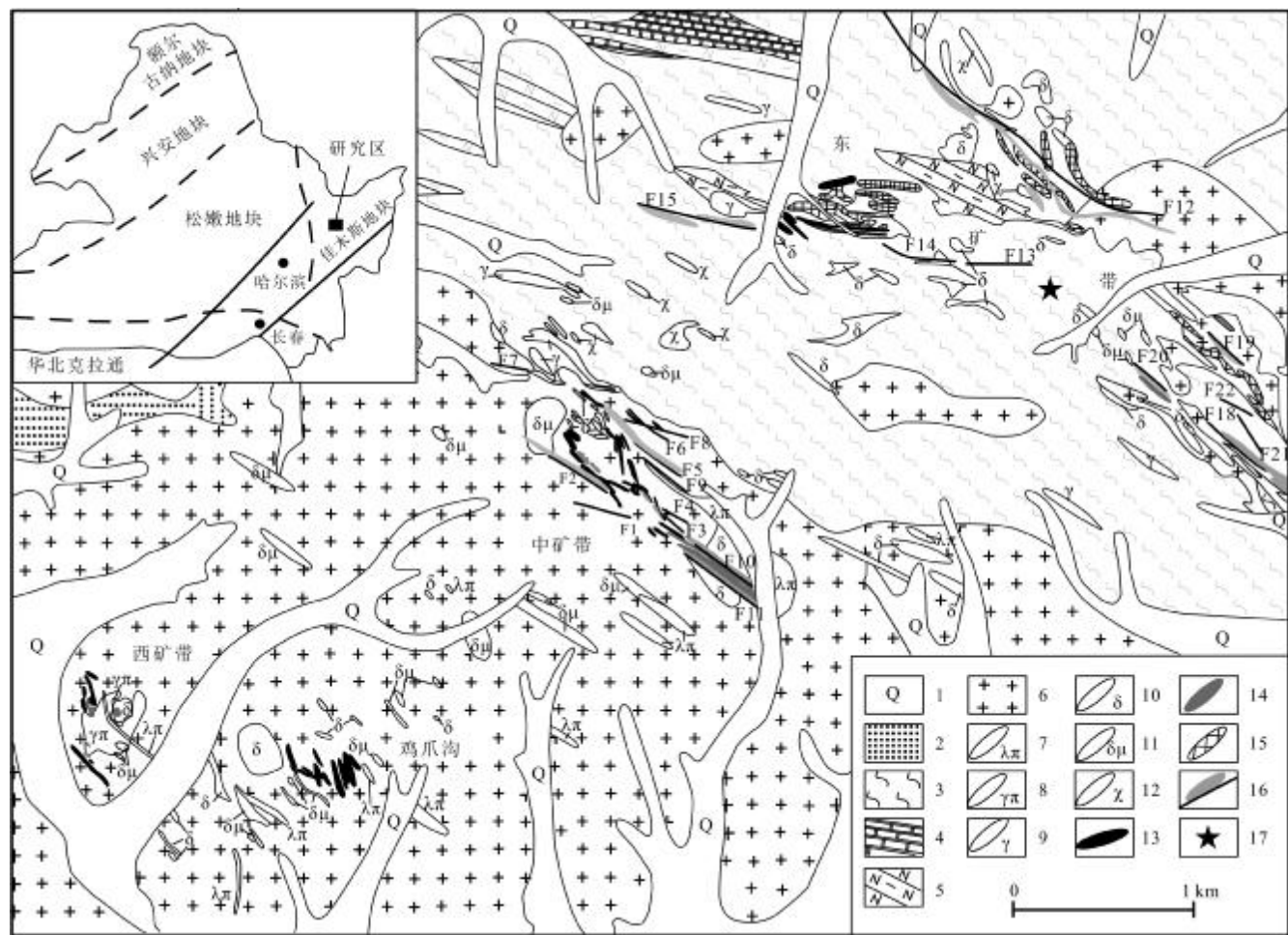


图 1 老柞山金矿床矿区地质图
(据文献[4]修编)

Fig. 1 Geological map of Laozuoshan goldfield
(Modified from Reference [4])

1—第四系(Quaternary); 2—城子河组碳质砂岩(carbonaceous sandstone of Chengzihe fm.); 3—麻山群混合岩(migmatite of Mashan gr.); 4—麻山群大理岩 (marble of Mashan gr.); 5—麻山群黑云斜长片麻岩 (biotite plagiogneiss of Mashan gr.); 6—华力西期花岗岩 (Variscan granite); 7—霏细岩 (felsite); 8—花岗斑岩 (granite porphyry); 9—斜长花岗岩 (plagiogranite); 10—闪长岩 (diorite); 11—闪长玢岩 (diorite porphyrite); 12—煌斑岩 (lamprophyre); 13—金矿体(gold orebody); 14—铜矿体(copper orebody); 15—夕卡岩(skarn); 16—断裂构造及破碎带(fault and fracture zone); 17—采样点(sampling site)

表 1 老柞山金矿片麻状花岗岩的主量元素测试结果

Table 1 Contents of major elements in the gneissic granites of Laozuoshan gold deposit

样品号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	TFe ₂ O ₃	FeO	LOI
LZS-1	3.80	4.60	11.94	56.32	0.39	2.82	5.07	0.84	0.037	5.94	5.12	2.58
LZS-2	0.52	0.45	12.27	54.11	0.06	10.52	10.18	0.30	0.093	3.15	2.43	8.37
LZS-3	2.54	1.70	14.19	63.74	0.24	3.83	5.40	0.60	0.035	3.89	3.50	3.25
LZS-4	3.42	1.95	17.16	61.38	0.30	3.94	4.52	0.92	0.054	5.19	4.40	1.42
LZS-5	1.70	0.82	13.30	68.50	0.19	7.22	2.43	0.56	0.047	3.89	3.39	1.47

含量单位:%.

U-Pb 测试结果见表 2。锆石 CL 图像显示(图 2), 锆石的晶体形态多为半自形短柱状, 部分锆石呈长柱状、他形粒状, 粒径为 100~200 μm 。CL 图像显示锆石具有清晰的内部结构和典型的岩浆生长纹及振荡环带结构。锆石 Th 含量为 $52\times 10^{-6}\sim 427\times 10^{-6}$, U 含量为 $52\times 10^{-6}\sim 427\times 10^{-6}$ 。Th/U 比值变化范围较大, 为 0.1~1.23, 为典型的岩浆锆石结构^[10-11]。对老柞山金矿的片麻状花岗岩锆石的 17 个点 U-Pb 定年数据分析, 其中有 2 个点锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 值分别为 $697.1\pm 8.0\text{ Ma}$ 和 703.0 ± 8.8

Ma, 其余 15 个点均位于协和线上, 加平均值为 $484.7\pm 2.7\text{ Ma}$ (图 3)。

3.2 锆石 Hf 同位素特征

锆石的 Lu-Hf 同位素测定结果列于表 3。本次共分析了 15 个样品点, 具体测试位置见图 2。15 个 Hf 点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值变化范围为 0.282396~0.282502, 计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围-2.4~3.6, T_{DM2} 值变化范围为 1620~1390 Ma。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解中, 样品均分布在球粒陨石演化线附近(图 4)。

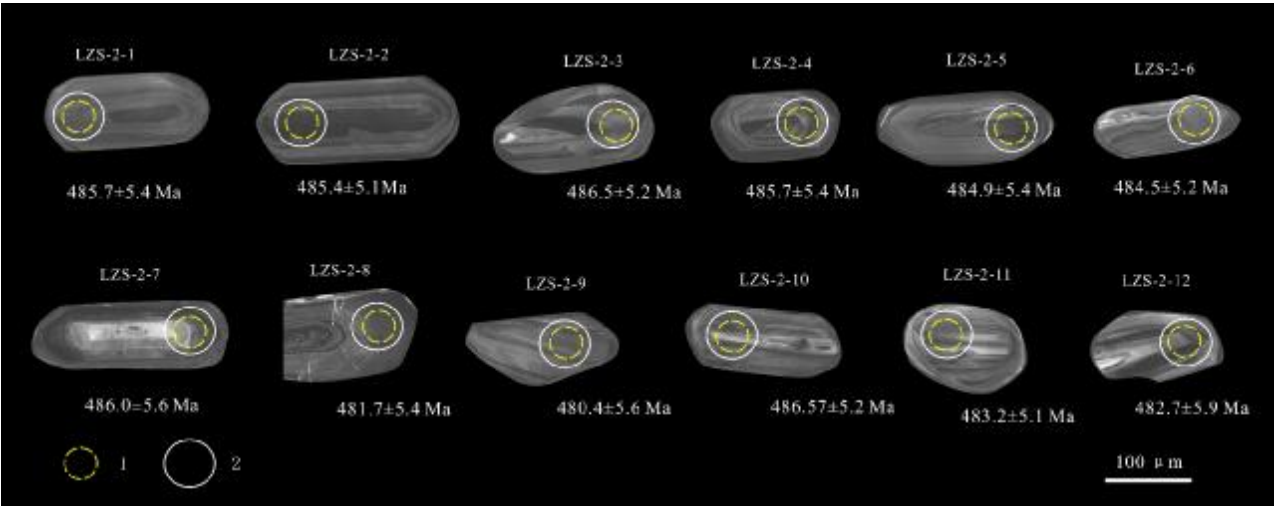


图 2 老柞山金矿片麻状花岗岩部分锆石阴极发光图像及测点

Fig. 2 CL images and dating points of zircons in the gneissic granites of Laozuoshan gold deposit

1—锆石 U-Pb 测试位置(position of zircon U-Pb dating); 2—锆石 Hf 测试位置(position of zircon Hf test)

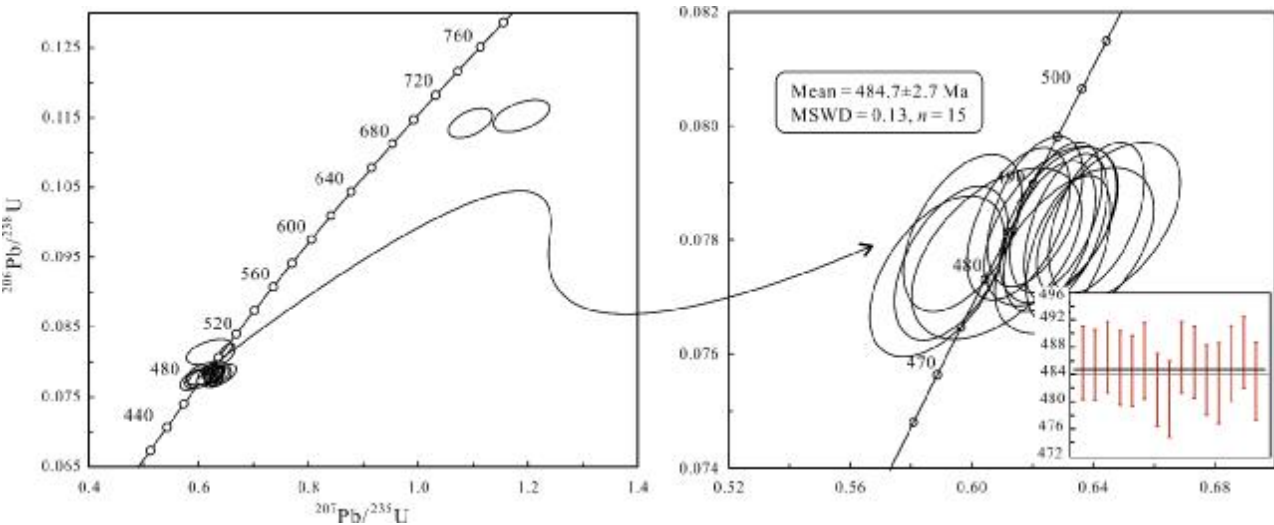


图 3 老柞山金矿片麻状花岗岩锆石 U-Pb 谐和年龄图和加权年龄图

Fig. 3 Concordia and weighted average age diagrams of U-Pb zircons in the gneissic granites of Laozuoshan gold deposit

表 2 老柞山金矿片麻状花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb isotopic compositions of the gneissic granites in Laozuoshan gold deposit

样品号	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Th/U	同位素比值								表面年龄/Ma							
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
LZS-2-1	109.01	415.97	0.26	0.07826	0.0009	0.62851	0.01264	0.02409	0.0004	0.07826	0.0009	539	43.84	495.2	7.88	485.7	5.37		
LZS-2-2	270.96	720.67	0.38	0.07821	0.00086	0.63095	0.00901	0.02452	0.00024	0.07821	0.00086	549.4	29.92	496.7	5.61	485.4	5.12		
LZS-2-3	109.14	540.61	0.20	0.07839	0.00087	0.62773	0.01003	0.02418	0.00033	0.07839	0.00087	532.7	34.4	494.7	6.26	486.5	5.19		
LZS-2-4	83.32	751.19	0.11	0.07812	0.00091	0.59695	0.01288	0.02508	0.00064	0.07812	0.00091	429.3	46.88	475.3	8.19	484.9	5.43		
LZS-2-5	84.62	881.61	0.10	0.07806	0.00087	0.6257	0.00995	0.02998	0.00051	0.07806	0.00087	534.8	34.28	493.4	6.22	484.5	5.17		
LZS-2-6	114.4	213.34	0.54	0.0783	0.00093	0.64509	0.01557	0.02681	0.00039	0.0783	0.00093	594.6	51.92	505.5	9.61	486	5.57		
LZS-2-7	157.76	505.57	0.31	0.11523	0.00152	1.18829	0.03381	0.04235	0.001	0.11523	0.00152	1063.3	56.91	795.2	15.69	703	8.76		
LZS-2-8	59.59	987.83	0.06	0.07759	0.00089	0.59325	0.01229	0.02991	0.0009	0.07759	0.00089	430.8	44.91	472.9	7.83	481.7	5.35		
LZS-2-9	58.32	1593	0.04	0.07736	0.00093	0.58852	0.01465	0.03057	0.00145	0.07736	0.00093	419.5	54.31	469.9	9.36	480.4	5.56		
LZS-2-10	255.56	478.25	0.53	0.07839	0.00087	0.64108	0.01044	0.02838	0.00028	0.07839	0.00087	579	34.3	503	6.46	486.5	5.2		
LZS-2-11	158.91	549.01	0.29	0.07828	0.00088	0.61534	0.01111	0.03126	0.0004	0.07828	0.00088	491.8	39	486.9	6.98	485.8	5.27		
LZS-2-12	70.01	924.55	0.08	0.07784	0.00085	0.63181	0.00924	0.03165	0.00051	0.07784	0.00085	562.6	30.86	497.2	5.75	483.2	5.11		
LZS-2-13	95.74	532.81	0.18	0.07776	0.00099	0.60816	0.01842	0.03003	0.00085	0.07776	0.00099	480.5	66.89	482.4	11.63	482.7	5.92		
LZS-2-14	79.67	496.06	0.16	0.07824	0.00092	0.62616	0.01451	0.03377	0.00072	0.07824	0.00092	531.3	50.45	493.7	9.06	485.6	5.52		
LZS-2-15	48.59	702.78	0.07	0.0785	0.00087	0.62085	0.01033	0.03211	0.00069	0.0785	0.00087	505.3	35.29	490.4	6.47	487.2	5.22		
LZS-2-16	142.49	317.16	0.45	0.1142	0.00139	1.09545	0.02643	0.05153	0.0008	0.1142	0.00139	916	49.06	751.1	12.81	697.1	8.04		
LZS-2-17	43.81	721.84	0.06	0.07781	0.00096	0.63374	0.01729	0.03733	0.00154	0.07781	0.00096	570.2	58.71	498.4	10.75	483	5.75		

表 3 老柞山金矿片麻状花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 LA-MC-ICP-MS zircon Hf isotopic compositions of the gneissic granites in Laozuoshan gold deposit

样品号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$	T_{DM2} (镁铁质)	T_{DM2} (长英质)
LZS-2-1	485.7	0.017895	0.001385	0.000471	0.000039	0.282438	0.000011	-11.8	-1.3	0.4	1135	1536	-0.99	1973	1331
LZS-2-2	485.4	0.017814	0.000334	0.000469	0.000009	0.282468	0.000013	-10.8	-0.2	0.5	1093	1469	-0.99	1878	1277
LZS-2-3	486.5	0.028564	0.002643	0.000776	0.000073	0.282413	0.000013	-12.7	-2.2	0.5	1179	1597	-0.98	2060	1380
LZS-2-4	484.9	0.007256	0.000166	0.000182	0.000004	0.282455	0.000012	-11.2	-0.6	0.4	1103	1492	-0.99	1912	1295
LZS-2-5	484.5	0.029353	0.001744	0.000778	0.000049	0.282482	0.000013	-10.3	0.2	0.5	1082	1444	-0.98	1844	1257
LZS-2-6	486.0	0.041257	0.00338	0.00112	0.000091	0.28249	0.000015	-10.0	0.4	0.5	1081	1432	-0.97	1826	1247
LZS-2-7	481.7	0.011692	0.000101	0.000304	0.000003	0.282451	0.000011	-11.4	-0.8	0.4	1112	1506	-0.99	1932	1306
LZS-2-8	480.4	0.004508	0.000017	0.000114	0.000001	0.282418	0.000012	-12.5	-2.0	0.4	1151	1577	-1.00	2033	1362
LZS-2-9	486.5	0.004923	0.00025	0.000126	0.000007	0.28242	0.000013	-12.4	-1.8	0.5	1149	1569	-1.00	2019	1357
LZS-2-10	485.8	0.032692	0.000503	0.000886	0.00001	0.282501	0.000015	-9.6	0.8	0.5	1059	1403	-0.97	1785	1224
LZS-2-11	483.2	0.026504	0.000698	0.000698	0.000015	0.282473	0.000012	-10.6	-0.2	0.4	1093	1464	-0.98	1871	1272
LZS-2-12	482.7	0.009875	0.000151	0.000255	0.000005	0.282407	0.000011	-12.9	-2.4	0.4	1171	1603	-0.99	2069	1384
LZS-2-13	485.6	0.00573	0.000288	0.000123	0.000008	0.282431	0.000015	-12.1	-1.4	0.5	1134	1544	-1.00	1985	1338
LZS-2-14	487.2	0.024292	0.000951	0.000649	0.000026	0.282498	0.000014	-9.7	0.8	0.5	1056	1404	-0.98	1786	1225
LZS-2-15	505.0	0.021344	0.000134	0.000578	0.000004	0.282396	0.000013	-13.3	-2.4	0.5	1196	1620	-0.98	2084	1402
LZS-2-16	697.0	0.012193	0.000611	0.000325	0.000017	0.282443	0.000012	-11.6	3.6	0.4	1123	1390	-0.99	1678	1254
LZS-2-17	483.0	0.016992	0.000152	0.00045	0.000004	0.282502	0.000012	-9.5	0.9	0.4	1045	1394	-0.99	1773	1216

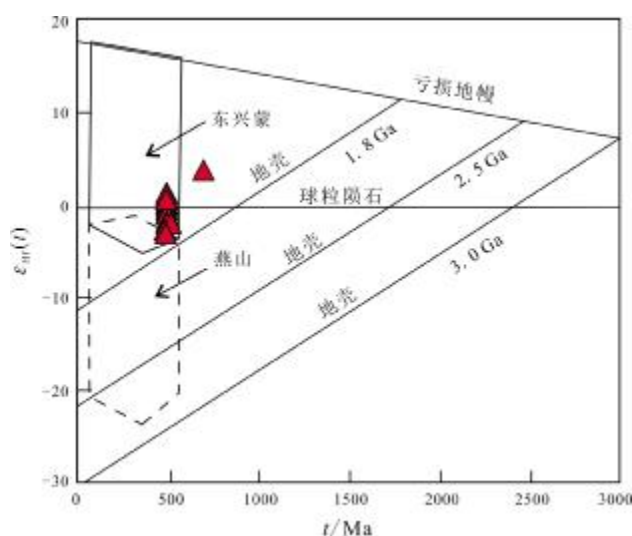


图4 老柞山金矿片麻状花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素图解
(底图据文献[14])

Fig. 4 The Lu-Hf isotopic diagram of gneissic granites in
Laozuoshan gold deposit
(After Reference [14])

4 讨论

4.1 花岗岩成岩时代

有关老柞山金矿的成岩成矿时代前人做了大量研究,如:获得老柞山金矿成矿年龄为 108.76 ± 0.7 Ma(绢云母 Ar-Ar)、闪长玢岩成岩年龄为 105 Ma(锆石 U-Pb 年龄)和花岗岩成岩年龄为 262.6 ± 3.9 Ma^[12-13]。赋存于麻山群老地层且与岩浆热液有关的老柞山金矿床中的片麻状花岗岩其锆石定年结果复杂,获得 697.1 ± 8.0 、 703.0 ± 8.8 和 484.7 ± 2.7 Ma 三组年龄。前两者 Th/U 比值分别为 0.450 和 0.31,均大于 0.1,CL 图像显示,具有典型岩浆环带,切在协和线附近,说明铅丢失可能性较小,推测为捕获的锆石年龄,同时也说明该地区可能存在新元古代结晶基底。本次获得的第三组年龄锆石阴极发光图像(CL)显示,其具有典型清晰的岩浆锆石震荡环带,其 Th/U 比值变化范围较大,为 0.1~1.23,符合 Belousova 等^[10]研究的岩浆锆石的 Th/U 比值范围,为典型的岩浆成因锆石。因此认为获得的 484.7 ± 2.7 Ma 加权平均年龄为片麻状花岗岩的结晶年龄。

4.2 岩石源区性质

除了 Sr-Nd 同位素外,Hf 同位素同样能对岩浆源区性质提出精确的制约^[14-16]。Hf 同位素显示, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} < 0.02$,排除锆石在形成后有放射成因 Hf 的积累,

测定 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的比值基本代表了其形成时体系的 Hf 同位素组成^[17]。片麻状花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-2.4 \sim +3.6$,两阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 为 1620~1390 Ma,该岩浆是中元古代陆壳物质重熔作用形成的,并伴有幔源物质的加入。目前研究表明,佳木斯地块的麻山群在 500 Ma 左右遭受了麻粒岩相变质作用^[18-19],这次变质事件是陆-陆碰撞造山所导致的^[20]。本次获得的片麻状花岗岩的年龄与麻山群变质事件相近,但从锆石形态和 Th/U 比值可以确定所测锆石均为岩浆锆石,显然与麻山群变质作用形成不相符。前人研究显示,在麻山群变质过程中,深熔岩浆事件是普遍存在的^[15-17]。因此,本次获得的片麻状花岗岩可能是麻山群深熔岩浆结晶作用的产物。

5 结论

(1)老柞山金矿片麻状花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 484.7 ± 2.7 Ma,表明花岗岩为寒武纪末形成,捕获的锆石年龄暗示佳木斯地块南缘可能存在新元古代的结晶基底。

(2)Hf 同位素显示片麻状花岗岩原岩可能是中元古代陆壳物质重熔并伴有幔源物质。片麻状花岗岩可能形成于晚泛非—早加里东期的碰撞造山作用,是麻山群深熔岩浆结晶作用的产物。

参考文献:

- [1]陈行时,聂喜涛,孙景贵,等.黑龙江宁安英城子热液金矿床与成矿伴生的辉绿玢岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].世界地质,2010,29(2):211-217.
- [2]邢树文,孙景贵,张增杰,等.中国东北部陆缘金、有色金属多期成矿作用和勘查选区研究[M].北京:地质出版社,2014:94-108.
- [3]张红军.老柞山金矿床地质特征及同位素地球化学特征[J].地质找矿论丛,1999,14(1):48-52,87.
- [4]李怡欣.黑龙江省老柞山金矿床的成因与成矿地质模式[D].长春:吉林大学,2014:24-43.
- [5]周喜文,李宪洲,李晓敏.黑龙江省老柞山金矿成矿模式探讨[J].地质与勘探,2002,38(2):18-22.
- [6]刘蒙财,毛永强.老柞山金矿成矿规律分析[J].黑龙江冶金,2009,29(4):27-29.
- [7]陈熠,方小敏,宋春晖,等.准噶尔盆地南缘新生代沉积物碎屑锆石记录的天山隆升剥蚀过程[J].地学前缘,2012,19(5):225-233.
- [8]陈会军,崔天日,钱程,等.大兴安岭北段巴升河岩体锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J].地质与资源,2019,28(5):405-412.

- [9]张朋,陈冬,寇林林,等.辽东宽甸东北沟钼矿二长花岗岩年代学、地球化学及 Hf 同位素特征[J].中国地质,2016,43(6):2092-2103.
- [10]Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002,143(5):602-622.
- [11]曾振,孙雷,张兴洲,等.饶河杂岩中枕状玄武岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J].地质与资源,2019,28(2):119-127.
- [12]李怡欣,聂喜涛,张朋,等.老柞山金矿床的成矿时代与成矿背景[J].矿物学报,2011,31(S1):612.
- [13]Wu M, Li L, Sun J G, et al. Geology, geochemistry, and geochronology of the Laozuoshan gold deposit, Heilongjiang Province, Northeast China: Implications for multiple gold mineralization events and geodynamic setting[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 2018,55(6):604-619.
- [14]Yang J H, Wu F Y, Shao J A, et al. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006,246:336-352.
- [15]Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. Nature, 1999,399(6733):252-255.
- [16]Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Early-middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000,64(24):4205-4225.
- [17]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.
- [18]宋彪,李锦铁,牛宝贵,等.黑龙江省东部麻山群黑云斜长片麻岩中锆石的年龄及其地质意义[J].地球学报,1997,18(3):306-312.
- [19]李锦铁,牛宝贵,宋彪,等.长白山北段地壳的形成与演化[M].北京:地质出版社,1999:46-53.
- [20]Wilde S A, Dorsett-Bain H L, Lennon R G. Geological setting and controls on the development of graphite, sillimanite and phosphate mineralization within the Jiamusi Massif: An exotic fragment of Gondwanaland located in north-eastern China? [J]. Gondwana Research,1999,2(1):21-46.

(上接第 238 页 /Continued from Page 238)

参考文献:

- [1]李俊建.蒙古地质矿产概况[M].天津:天津科学技术出版社,2013.
- [2]沈光银.蒙古西北部金多金属矿床地质特征及找矿前景[J].矿产勘查,2013,4(2):219-223.
- [3]彭素霞,李永,陈隽璐,等.阿尔泰成矿带首次发现中型白钨矿床[J].中国地质,2018,45(5):1080-1081.
- [4]肖伟,王义天,江思宏,等.南蒙古及邻区地质矿产简图及地形地貌特点[J].地球学报,2010,31(3):473-484.
- [5]Graupner T, Kempe U, Dombon E, et al. Fluid regime and ore formation in the tungsten(-yttrium) deposits of Kyzyltau (Mongolian Altai): Evidence for fluid variability in tungsten-tin ore systems [J]. Chemical Geology, 1999,154(1/4):21-58.
- [6]Kempe U, Belyatsky B V. Direct isotope dating of W (-Y) mineralization at Kyzyltau (Mongolian Altai): Preliminary results [J]. International Geology Review, 2000,42(5):470-480.
- [7]李俊建,刘新秒.蒙古地质矿产研究进展[M].天津:天津科学技术出版社,2013.
- [8]叶天竺,吕志成,庞振山,等.勘查区找矿预测理论与方法[M].北京:地质出版社,2014.
- [9]张发山.蒙古国巴彦乌列盖省乌兰乌拉地区钨钼矿床地质特征及成矿条件[J].地球,2014(11):106-107.
- [10]徐繁昌,李葆华,李表鹏,等.赣南钨矿类型划分及其成矿流体特征[J].地质与资源,2016,25(4):339-344.
- [11]聂凤军,江思宏,白大明,等.蒙古国南部及邻区金属矿床类型及其时空分布特征[J].地球学报,2010,31(3):267-288.
- [12]聂凤军,胡朋,江思宏,等.中蒙边境沙麦-玉古兹尔地区钨和钼(钼)矿床地质特征、形成时代和成因机理[J].地球学报,2010,31(3):383-394.
- [13]李俊建,张锋,任军平,等.中蒙边界地区构造单元划分[J].地质通报,2015,34(4):636-662.
- [14]王鸿祯,何国琦,张世红.中国与蒙古之地质[J].地学前缘,2006,13(6):1-13.
- [15]王涛,童英,李舫,等.阿尔泰山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例[J].岩石矿物学杂志,2010,29(6):595-618.
- [16]王佳新,张雪旒,张赋.内蒙古化德县沙拉哈达石英脉型钨矿床成矿地质特征[J].地质与资源,2014,23(2):154-157.
- [17]向安平,陈毓川,余宏全,等.内蒙古苇莲河石英脉型黑钨矿赋矿花岗岩成岩时代、地球化学特征及其地质意义[J].中国地质,2018,45(5):963-976.
- [18]王登红,唐菊兴,应立娟,等.“五层楼+地下室”找矿模型的适用性及其对深部找矿的意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2010,40(4):733-738.
- [19]许建祥,曾载淋,王登红,等.赣南钨矿新类型及“五层楼+地下室”找矿模型[J].地质学报,2008,82(7):880-887.
- [20]苏康明,吕书君,孔令兵,等.湖南崇阳坪地区石英脉型钨矿床的地质特征、成矿规律及成矿模式[J].矿床地质,2016,35(5):902-912.