

胶东金矿成矿时代及区域地壳演化 ——基性脉岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

宋英昕^{1,2}, 宋明春^{3,4}, 孙伟清^{1,2}, 马晓东¹, 李大鹏¹

SONG Yingxin^{1,2}, SONG Mingchun^{3,4}, SUN Weiqing^{1,2}, MA Xiaodong¹, LI Dapeng¹

1. 山东省地质科学研究院, 山东 济南 250013;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3. 山东省地质矿产勘查开发局, 山东 济南 250013;

4. 山东省地质勘查工程技术研究中心, 山东 济南 250013

1. Shandong Provincial Institute of Geological Sciences, Ji'nan 250013, Shandong, China;

2. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

3. Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Ji'nan 250013, Shandong, China;

4. Shandong Provincial Engineering Research Center for Geological Prospecting, Ji'nan 250013, Shandong, China

摘要:关于胶东金矿的成矿时代前人进行了较多研究,但其成矿时限尚未准确确定。对胶东焦家金矿床成矿前和成矿后的 2 个基性脉岩进行了锆石 SHRIMP 年龄测定和锆石氧同位素分析。锆石阴极发光图像显示,样品中有少量岩浆新生锆石,其晶形、环带清晰。在 2 个成矿前脉岩样品中测得岩浆锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄最小值为 $124.9\pm 1.8\text{Ma}$ 和 $124.2\pm 1.1\text{Ma}$, 1 个成矿后脉岩样品中测得最小年龄值为 $112.2\pm 0.7\text{Ma}$ 。故成矿前脉岩的侵位年龄小于等于 124.9Ma 和小于等于 124.2Ma , 成矿后脉岩的侵位年龄小于等于 112.2Ma , 金矿的成矿年龄被限制在 $124\sim 112\text{Ma}$ 之间。此外,较多的锆石年龄数据记录了早侏罗世、三叠纪、古生代、新元古代、中元古代和新太古代的岩浆事件和变质事件,指示胶北隆起深部既有华北克拉通新太古代、中元古代和新元古代的地质体或地质事件,也有苏鲁造山带古生代和三叠纪的地质体或地质事件,苏鲁超高压变质带曾俯冲到胶北隆起之下。锆石氧同位素组成变化范围较大, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $3.86\text{‰}\sim 11.37\text{‰}$, 指示了不同时代锆石氧同位素组成的不均一性和物质来源的差异性。

关键词:SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄;煌斑岩;金矿化;氧同位素;山东省焦家金矿床;成矿时代

中图分类号:P597+.3;P618.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2018)05-0908-12

Song Y X, Song M C, Sun W Q, Ma X D, Li D P. Metallogenic epoch and regional crust evolution in the Jiaodong gold deposit, Shandong Province: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb ages of mafic dykes. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(5): 908-919

Abstract: Although mineralogenetic epoch of the Jiaodong gold deposit in Shandong Province has been studied by many previous researchers, the accurate time frame of mineralization remains undecided. This paper reports SHRIMP zircon ages and oxygen isotopic values for pre-metallogenic and post-metallogenic mafic dykes in the Jiaojia gold deposit of Jiaodong Peninsula. In CL photos, the igneous zircons show good crystal form and clear zoning. Two samples from pre-metallogenic mafic dykes have recorded concordant ages of $124.9\pm 1.8\text{Ma}$ ($n=2$, MSWD=2.2) and $124.2\pm 1.1\text{Ma}$ ($n=2$, MSWD=0.50). A sample from post-mineraliza-

收稿日期:2017-01-19;修订日期:2017-05-09

资助项目:国家自然科学基金项目《探索胶东金矿成矿物质来源的新证据—岩石学、矿物学约束》(批准号:41503038)、泰山学者工程《胶东型金矿的构造岩浆背景和深部找矿关键技术》(编号:ts201511076)和山东省重点研发计划项目《深部金矿理论、方法与预测》(编号:2017CXGC1604)

作者简介:宋英昕(1989-),女,在读博士生,助理工程师,从事岩石与矿物学研究。E-mail:songying.xin2008@163.com

通讯作者:宋明春(1963-),男,研究员,从事金矿地质、矿产地质和区域地质研究。E-mail:mingchuns@163.com

tion lamprophyre yielded a concordant age of $112.2 \pm 0.7 \text{ Ma}$ ($n=1$), and therefore the emplacement age of the pre-metallogenic mafic dykes is $\leq 124.9 \text{ Ma}$ and $\leq 124.2 \text{ Ma}$. The emplacement age of the post-mineralization lamprophyre is $\leq 112.2 \text{ Ma}$. The metallogenic age of the Jiaojia gold deposit is $\leq 124.2 \text{ Ma}$. These data indicate that time limitation of mineralization of the Jiaojia gold deposit should be from 124 Ma to 112 Ma . Besides, the obtained multiple stages of inherited zircon ages from the samples have recorded the magmatic and/or metamorphic events of Jurassic, Triassic, Paleozoic, Neoproterozoic, Mesoproterozoic and Neoproterozoic. This suggests that, in addition to Neoproterozoic, Mesoproterozoic and Neoproterozoic geological bodies in North China Craton, there are also Paleozoic and Triassic geological bodies from Sulu orogenic belt in the depth of the Jiaobei uplift. These data suggest that the materials of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt was thrusting under the Jiaobei uplift. The $\delta^{18}\text{O}$ values of zircons vary from 3.86‰ to 11.37‰ , and this indicates that different stages of zircons have diverse oxygen isotope compositions and diversified material sources.

Key words: SHRIMP U-Pb zircon ages; lamprophyre; gold mineralization; oxygen isotopes; Jiaojia gold deposit in Shandong Province; metallogenic epoch

胶东是中国最重要的黄金基地,已查明金资源储量及黄金产量均居全国之首。胶东金矿集中区广泛分布各种中生代脉岩,它们与金矿床在空间上密切相伴。前人对脉岩的地球化学特征、成因及其与金成矿作用和岩石圈动力学演化的关系进行了较多研究^[1-10],许多研究者认为,中基性脉岩与金矿有成因联系^[11-13]。脉岩的年代学研究表明,其侵位时间介于 $132 \sim 113 \text{ Ma}$ 之间^[14-22]。

以往对胶东金矿的成矿时代进行过大量研究。早期研究者认为,金矿形成于新太古代、古元古代或为多期成矿^[23-27]。后来,已基本形成共识金矿为燕山期成矿,多数学者测试的金矿成矿年龄在 $130 \sim 110 \text{ Ma}$ 之间^[14-15,28-33],有研究者认为金矿化被严格限定于 $126 \sim 120 \text{ Ma}$ 之间^[14,34-35],也有学者将金成矿作用划分为 $134 \sim 126 \text{ Ma}$ 、 $122 \sim 119 \text{ Ma}$ 和 $110 \sim 107 \text{ Ma}$ 三个阶段^[36]。热液金矿床成矿时代的确定是矿床学界的难题之一,早期研究者主要利用与矿体有关的地质体(如地层、岩体等)的相互关系,间接测定成矿年代,近年来主要通过测定与金矿伴生的蚀变岩或蚀变矿物的同位素年龄来确定成矿时代。但由于诸多因素的影响,如与矿体相互穿切的地质体的年龄与金矿化年龄相距较大、蚀变岩或蚀变矿物的同位素体系受多个物质源区的影响通常达不到同位素平衡和同位素均一化、矿化蚀变的产物经常受到后期热扰动的叠加等^[34],使测试的同位素年龄与真实年龄有一定偏差,不同研究者获得的测试结果也不同。

脉岩与金矿的同位素年龄大致相当,对脉岩与金矿的关系进行研究,有可能获得金成矿的确切时代。为此,笔者对胶东金矿床中的中基性脉岩进行了大量调查,在焦家金矿床中发现了成矿前和成矿

后的基性岩脉,采用 SHRIMP 技术对其中的锆石进行了 U-Pb 同位素测试,首次获得与金矿成矿时代接近的成矿前和成矿后脉岩的锆石 U-Pb 年龄,限定了焦家金矿的成矿时间,并结合氧同位素研究,讨论了区域地壳演化历史。

1 地质背景

焦家金矿位于胶东半岛西北部的莱州市焦家村。大地构造位置属于华北克拉通南缘的胶北隆起,胶北隆起的南侧为胶莱盆地,西侧被郯庐断裂与鲁西隆起分割,东部与苏鲁超高压变质带的威海隆起毗邻。焦家金矿床附近区域主要由前寒武纪变质岩系和中—新生代地质体组成(图 1)。前寒武变质岩系主要为新太古代花岗-绿岩带,以 TTG 质片麻岩为主,部分变辉长岩(斜长角闪岩)、少量新太古代变质地层(胶东岩群)在 TTG 中呈残留包体;胶北隆起分布有古元古代荆山群和粉子山群,为经受麻粒岩相-角闪岩相变质的泥质岩、碎屑岩、碳酸盐岩和钙镁硅酸盐岩沉积建造。中生代地质体为各种类型的侵入岩,以侏罗纪玲珑型花岗岩为主,有少量白垩纪郭家岭型花岗岩,酸性、中-基性脉岩广泛分布;胶东地区还发育白垩纪伟德山型花岗岩、崂山型花岗岩。新生代地质体主要为第四纪松散沉积层。胶东地区 NE 走向断裂发育,其中三山岛断裂、焦家断裂、招平断裂是胶东西北部的主要控矿断裂,金矿床大多沿 3 条断裂及其旁侧的次级断裂分布,金矿类型主要有破碎带蚀变岩型和石英脉型,前者多赋存于主要控矿断裂中,后者主要见于玲珑型花岗岩中较小规模的断裂裂隙中。

焦家断裂长约 60 km ,宽 $50 \sim 500 \text{ m}$ 。总体走向

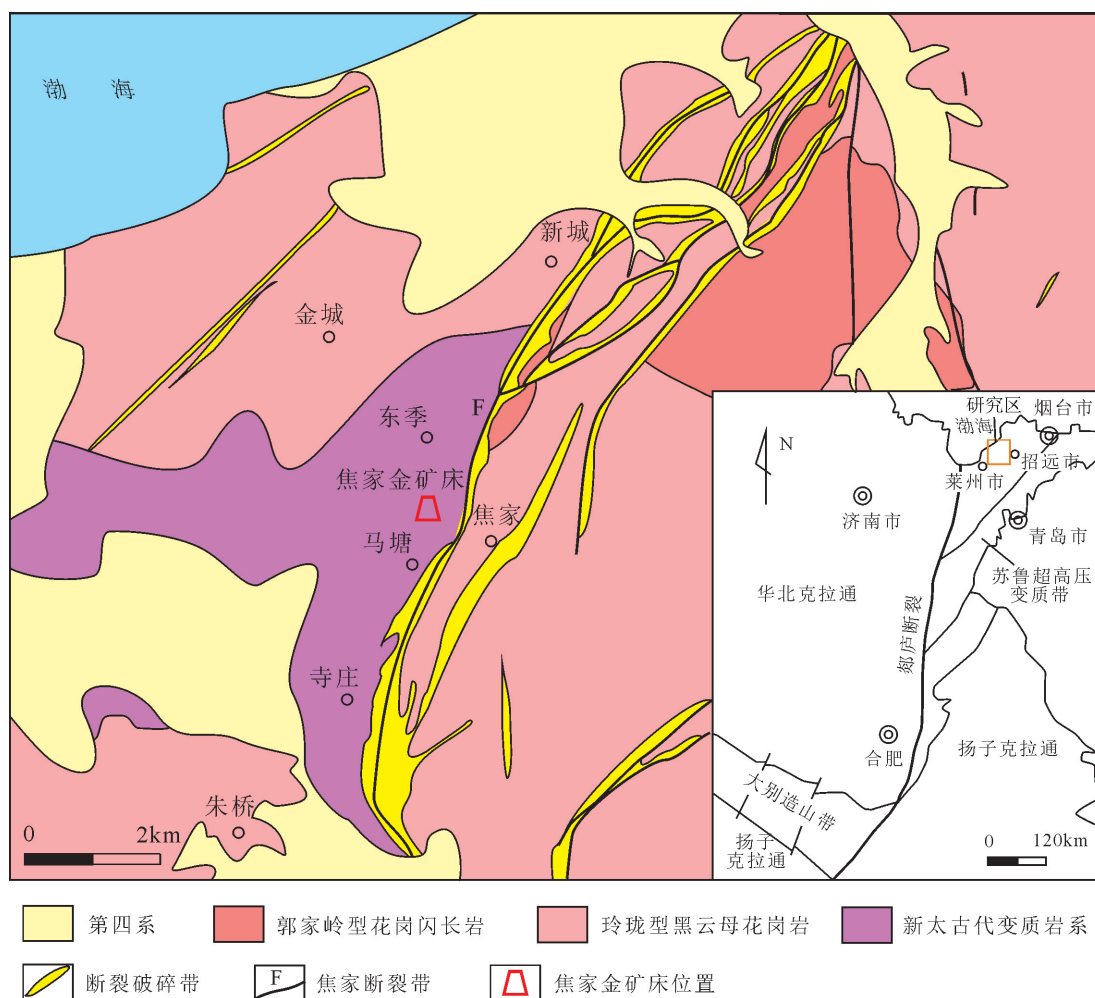


图1 焦家金矿床区域地质略图(据参考文献[37]修改)

Fig. 1 Geological map of the Jiaojia gold deposit

NE,倾向NW,倾角多为 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$,局部可达 78° 。断裂平面上呈“S”形,形态不规则,其下盘发育较多与主断裂平行或呈“入”字形相交的分枝构造,与主断裂组合成菱形格局。断裂倾角浅部较陡,向深部变缓,呈铲式阶梯状特征^[38]。特大型金矿焦家金矿床、新城金矿床及河东、河西等15处大中型金矿床均受焦家断裂或其旁侧的次级断裂控制。

焦家金矿床是“焦家式”破碎带蚀变岩型金矿的典型产地,已勘查、开发和研究了近50年,在矿床的中浅部(-500m 标高以浅)已累计探获金矿资源储量近130t。2007—2008年开展的焦家金矿床深部金矿详查,探求金矿资源量逾105t。后来的深部勘查证实,焦家金矿床与其南部的马塘、寺庄、朱郭李家、南吕-欣木、纱岭、前陈等金矿在深部连为一体,

实际上构成同一个金矿床,累计探明金资源量约1200t,是一个千吨级巨型金矿床^[37,39]。

2 基性脉岩及样品特征

焦家金矿床内可见较多煌斑岩、辉绿玢岩等基性脉岩。基性脉岩走向主要为NW向,倾向多为NE,倾角普遍大于 65° 。脉宽 $0.2\sim 3.2\text{m}$,延伸通常在几十到上百米。岩脉切穿新太古代变质岩系、侏罗纪玲珑花岗岩和白垩纪郭家岭花岗岩,与围岩的接触界线一般较平直。许多岩脉与金矿脉斜交,并切割矿脉和矿化裂隙(图2-b),局部岩脉中可见金矿化蚀变岩石的捕虏体,这种岩脉为成矿后岩脉;也有少数岩脉被矿脉或矿化裂隙错断(图2-a),呈不连续分布,岩脉有矿化蚀变现象,为成矿前岩脉;另

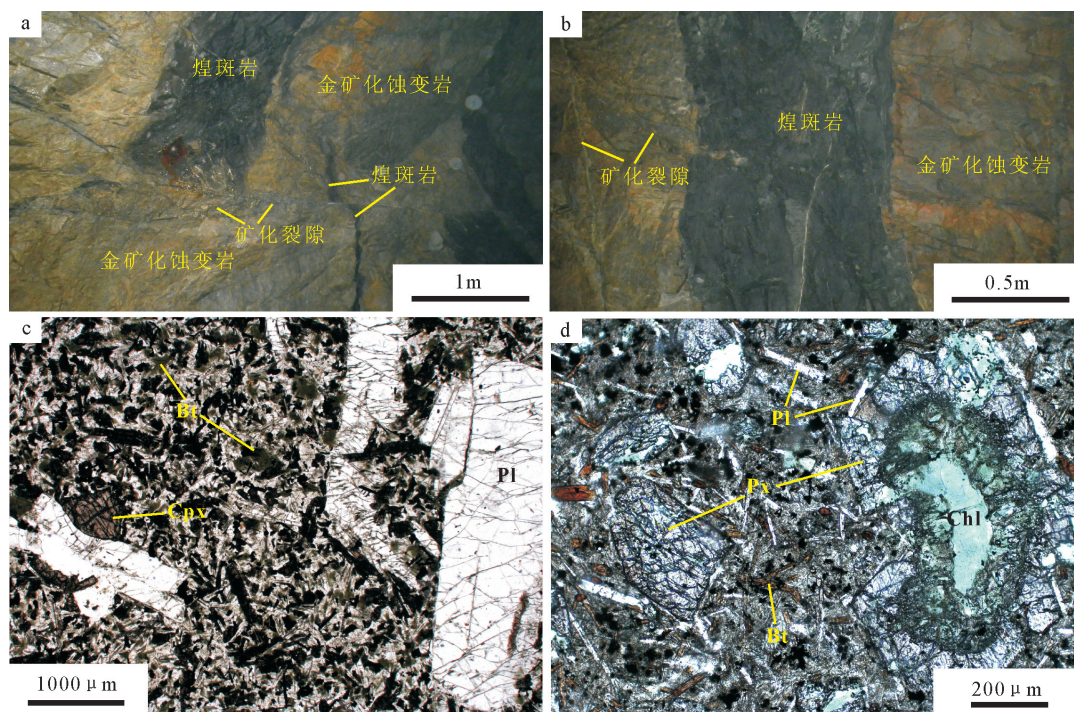


图2 焦家金矿床煌斑岩和辉绿玢岩野外露头(a,b)和显微(c,d)照片

Fig. 2 Macroscopic (a, b) and microcosmic (c, d) photographs of lamprophyre and sillite in the Jiaojia gold deposit
a—煌斑岩脉被矿脉错断,为成矿前脉岩(J270-1采样位置);b—煌斑岩脉切割矿化破碎带,为成矿后脉岩(J270-2采样位置);
c—辉绿玢岩微观特征:斑状结构,基质辉绿结构(单偏光);d—煌斑岩微观特征:煌斑结构,辉石发生绿泥石化(单偏光);Bt—黑云母;Cpx—辉石;Chl—绿泥石;Pl—斜长石

有部分岩脉与矿脉平行共生,岩脉也有矿化蚀变现象,为成矿期岩脉。

J0样品取自采矿坑道0m中段(距地表50m深)的辉绿玢岩脉,脉宽0.5~3m,位于金矿主矿体下盘,距离矿体7m左右,产状 $110^{\circ}\angle 50^{\circ}$ 。此处岩脉发育,成群分布,脉群宽10~30m。岩石呈斑状结构,块状构造,斑晶由斜长石(25%)和辉石(10%)组成,粒度一般为1~3mm;基质为辉绿结构(图2-c),成分为自形板条状斜长石(37%)、辉石(20%)和黑云母(2%),粒度在0.05~0.6mm之间;金属矿物为磁铁矿(6%)和少量黄铁矿,粒度一般为0.01~0.25mm,呈浸染状分布;副矿物有锆石、磷灰石、石榴子石等。斜长石为拉长石($An=59$),多发生绢云母化和碳酸盐化蚀变,暗色矿物则遭受绿泥石化蚀变。

J270-1和J270-2样品采自于-270m中段(距地表320m深)矿体下盘的煌斑岩脉群中,J270-1样品位于距矿体440m处的煌斑岩脉中,J270-2样品位于距矿体455m处的煌斑岩脉中。脉群宽3m,单脉

厚0.5~1m,产状 $285^{\circ}\angle 58^{\circ}$ 。J270-1样品所在岩脉被矿脉和矿化裂隙错断,为成矿前岩脉(图2-a);J270-2样品所在岩脉切割矿脉,为成矿后岩脉(图2-b)。二者均呈煌斑结构(图2-d),块状构造,斑晶由较自形的辉石(20%)和橄榄石(3%)组成,粒度为0.6~1.5mm;基质成分为斜长石(27%)、角闪石(25%)、辉石(15%)和橄榄石(4%),粒度为0.05~0.2mm;金属矿物为磁铁矿(6%)和少量黄铁矿,粒度为0.01~0.15mm,呈稀疏浸染状分布;副矿物有锆石、磷灰石、石榴子石等。斜长石为拉长石($An=55$),发生绢云母化和绿帘石化蚀变,暗色矿物多被绿泥石等蚀变矿物交代。

3 分析方法

锆石单矿物分选在廊坊市科大岩石矿物分选技术服务有限公司完成。将新鲜的岩石样品粉碎至60目左右的粉末,淘洗粉末得到重砂矿物组分,再经过电磁选分离出锆石,在双目镜中挑选出锆石

晶体。将挑选出的锆石晶体制作成样品靶,在光学显微镜下进行透射光、反射光拍摄,在扫描电镜下进行阴极发光(CL)图像拍摄。样品靶的制作、可见光和阴极发光拍摄、锆石 U-Th-Pb 同位素及氧同位素测定均在北京离子探针中心完成。

SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素测定过程中,一次粒子束采用 O_2^- ,直径约 $30\mu m$,强度在不同的时刻略有变化,介于 $3.0\sim 3.5nA$ 之间。采用标准锆石 M257 和 TEM 分别标定 U 含量和校正元素间的分馏效应。相关分析流程和工作原理见参考文献[40-41]。原始数据的处理和锆石 U-Pb 谐和图的绘制分别采用 1.02 版的 Squid 和 2.49 版的 Iso-

plot 程序^[42-43]。普通铅扣除根据实测的 ^{204}Pb 进行,普通铅的组成根据参考文献[44]给出的模式计算得到。检测数据表(表 1)中,同位素比值和年龄的误差分别为 1σ 的相对误差和绝对误差, $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值具 95% 的置信度误差。

选取已完成 U-Pb 同位素测年的部分锆石用于 SHRIMP IIe MC 氧同位素测试,其测定精度可达 0.4‰(95% 置信度)。

4 测试结果

J0 样品中锆石颜色为浅粉色,透明,金刚光泽,多呈自形短柱状、粒状,少量长柱状,晶体长轴 $60\sim$

表 1 焦家金矿床基性脉岩 SHRIMP 锆石 U-Th-Pb 定年结果

Table 1 Zircon U-Th-Pb data measured by SHRIMP for mafic dykes in the Jiaojia gold deposit

样品点	²⁰⁶ Pbc/%	元素含量/10 ⁻⁶			同位素比值						年龄/Ma				误差 相关 系数	
		²⁰⁶ Pb*	Th	U	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		1σ
J0																
1.1	0.35	9.90	9	457	0.02	0.0479	0.0016	0.166	0.006	0.02511	0.00016	92	79	159.9	1.0	0.183
2.1	0.02	269.0	68	599	0.12	0.1796	0.0022	12.930	0.170	0.52230	0.00290	2,649	20	2709.0	12.0	0.416
3.1	1.07	7.87	146	465	0.32	0.0493	0.0035	0.133	0.010	0.01950	0.00015	164	170	124.5	0.9	0.104
3.2	0.87	5.84	97	177	0.57	0.0528	0.0045	0.277	0.024	0.03803	0.00038	319	190	240.6	2.4	0.118
4.1	0.14	17.30	130	153	0.87	0.0661	0.0010	1.195	0.034	0.13110	0.00310	809	32	794.0	18.0	0.838
5.1	10.45	3.47	189	179	1.09	0.050	0.0220	0.139	0.062	0.02019	0.00044	180	1000	128.8	2.8	0.048
J270-1																
1.1	0.41	36.40	62	135	0.48	0.1133	0.013	4.89	0.015	0.3133	0.008	1852	24	1757.1	12.2	0.516
2.1	0.57	2.70	15	158	0.10	0.0448	0.091	0.12	0.092	0.0196	0.012	-67	222	125.2	1.4	0.127
3.1	0.00	1.60	33	82	0.41	0.0567	0.064	0.17	0.066	0.0224	0.015	479	142	142.6	2.1	0.221
4.1	0.34	15.70	232	939	0.25	0.0474	0.030	0.13	0.030	0.0194	0.005	70	70	124.1	0.6	0.161
5.1	0.56	6.20	20	43	0.49	0.0929	0.051	2.12	0.053	0.1654	0.014	1486	96	986.7	12.4	0.257
6.1	0.09	72.10	29	1261	0.02	0.5520	0.010	0.51	0.010	0.0665	0.003	418	22	414.8	1.2	0.305
7.1	0.17	16.10	75	272	0.28	0.5850	0.020	0.55	0.021	0.0687	0.006	548	45	428.6	2.5	0.281
8.1	0.88	2.50	29	133	0.22	0.4240	0.126	0.13	0.127	0.0221	0.009	-205	317	141.2	1.3	0.074
9.1	0.23	19.10	89	128	0.72	0.0742	0.015	1.78	0.017	0.1742	0.007	1046	31	1035.2	7.0	0.434
J270-2																
1.1	0.43	10.0	501	659	0.78	0.04970	3.50	0.120	3.60	0.01756	0.58	183	82	112.2	0.7	0.162
2.1	0.45	11.30	155	186	0.86	0.05380	3.20	0.524	3.30	0.07071	0.78	361	72	440.4	3.3	0.237
3.1	0.04	69.20	83	159	0.54	0.17723	0.50	12.340	0.80	0.5050	0.59	2627	8	2635.0	13.0	0.793
4.1	0.48	6.50	158	195	0.84	0.05040	4.50	0.270	4.50	0.03885	0.79	216	100	245.7	1.9	0.175
5.1	0.16	28.10	161	470	0.35	0.05630	2.0	0.540	2.0	0.06957	0.50	465	44	433.6	2.1	0.243
5.2	0.07	31.20	198	506	0.41	0.05594	1.10	0.552	1.20	0.07161	0.48	450	25	445.8	2.1	0.395
6.1	1.06	1.90	4	90	0.04	0.05070	5.70	0.170	5.90	0.02426	1.30	225	130	154.6	2.0	0.218
7.1	0.26	12.80	164	256	0.66	0.05325	1.90	0.424	2.0	0.05774	0.60	340	42	361.8	2.1	0.306
8.1	0.03	217.0	280	1019	0.28	0.09686	0.30	3.308	0.50	0.24770	0.36	1564	6	1426.6	4.7	0.748
9.1	0.41	63.60	413	452	0.94	0.11358	0.80	2.558	0.90	0.16333	0.37	1858	15	975.3	3.4	0.418

注: ^{206}Pbc 代表普通铅, $^{206}Pb^*$ 代表放射性铅

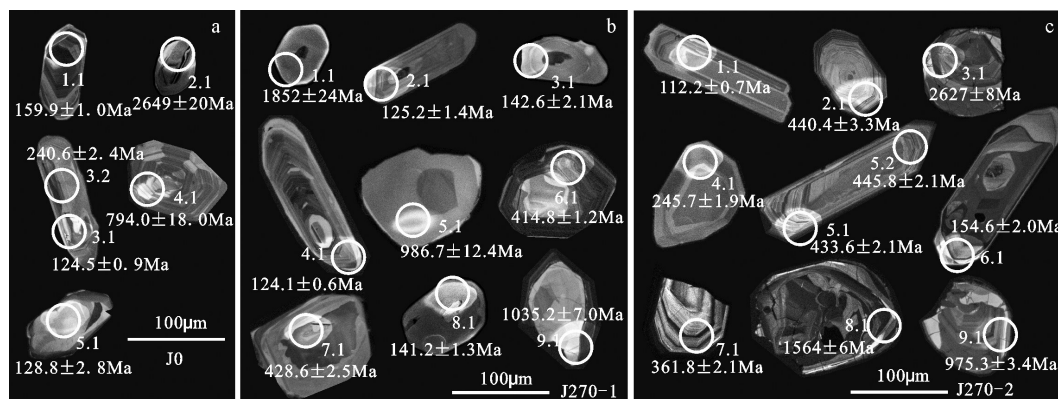


图3 焦家金矿床基性脉岩锆石阴极发光(CL)图像、U-Pb年龄测试点及年龄值

Fig. 3 Cathodeluminescence images of zircons from mafic dykes in the Jiaojia gold deposit and analytical positions of U-Pb ages

120 μm ,长宽比为1.5~3。锆石的阴极发光(CL)图像显示(图3-a),锆石具平行环带或无内部结构。对5颗锆石的6个点进行年龄测定,获得放射成因 ^{206}Pb ($^{206}\text{Pb}^*$)含量为 $3.47\times 10^{-6}\sim 269\times 10^{-6}$,Th和U含量变化范围分别为 $9\times 10^{-6}\sim 189\times 10^{-6}$ 和 $153\times 10^{-6}\sim 599\times 10^{-6}$,Th/U值为0.02~1.09(表1)。6个数据点均落于谐和线上(图4-a),其中4个数据点年龄分别为 $2649\pm 20\text{Ma}$ (点2.1,本文对于年龄大于1200Ma的锆石采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 数据,对于年龄小于1200Ma的锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据), $794\pm 18\text{Ma}$ (点4.1), $240.6\pm 2.4\text{Ma}$ (点3.2)和 $159.9\pm 1.0\text{Ma}$ (点1.1)。另外2个位于柱状锆石边部测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $124.5\pm 0.9\text{Ma}$ (点3.1)和 $128.8\pm 2.8\text{Ma}$ (点5.1),是所有年龄值中最小的年龄,其加权平均值为 $124.9\pm 1.8\text{Ma}$,此

年龄可以限定辉绿玢岩脉的侵位年龄,即成矿前辉绿玢岩脉的侵位年龄小于等于 $124.9\pm 1.8\text{Ma}$ 。对其中4颗锆石进行氧同位素测试,测得 $\delta^{18}\text{O}$ 值在5‰~8.5‰之间(表2)。

J270-1样品中锆石呈浅粉色,透明,金刚光泽,半自形-自形晶短柱状、粒状,有的为长柱状,晶体长轴为80~140 μm ,长宽比为1.5~4。CL图像显示(图3-b),锆石内部结构简单,存在颜色深的区域,看起来像残余核,有的锆石显示明显的韵律环带(2.1、3.1和8.1点所在锆石)。测定了9颗锆石,测定位置选取锆石边部。测得的9个数据的放射成因 ^{206}Pb ($^{206}\text{Pb}^*$)的含量为 $1.6\times 10^{-6}\sim 72.1\times 10^{-6}$,Th和U含量分别为 $15\times 10^{-6}\sim 232\times 10^{-6}$ 和 $43\times 10^{-6}\sim 1261\times 10^{-6}$,Th/U值为0.02~0.72(表1)。除1个点没有落在谐

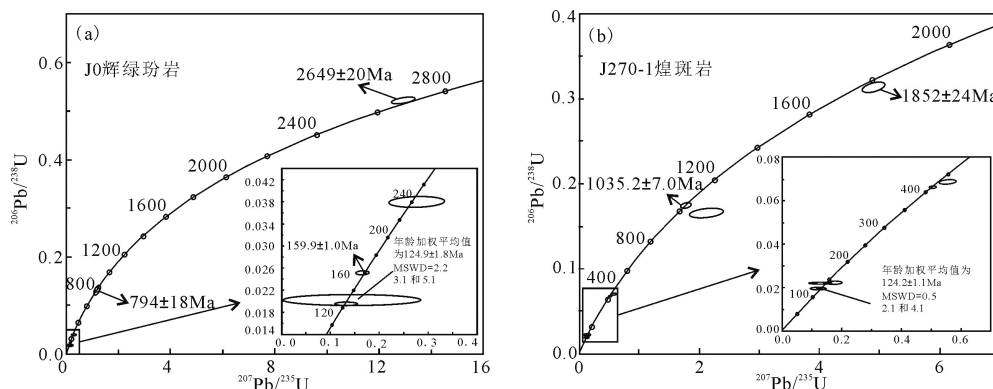


图4 焦家金矿床成矿前辉绿玢岩(a)和煌斑岩(b)锆石U-Pb谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams of zircon from sillite (a) and lamprophyre (b) before mineralization of the Jiaojia gold deposit

表2 焦家金矿床基性脉岩锆石氧同位素组成

Table 2 Oxygen isotope compositions of zircon from mafic dykes in the Jiaojia gold deposit

样品/分析点	J0-T1.1	J0-T2.1	J0-T3.1	J0-T5.1	J270-1-T2.1	J270-1-T3.1	J270-1-T4.1	J270-1-T6.1	J270-1-T7.1
$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	6.07	5.06	5.00	8.50	7.86	4.22	8.45	11.37	3.86
1 σ	0.24	0.12	0.31	0.28	0.23	0.25	0.16	0.19	0.19
样品/分析点	J270-1-T8.1	J270-1-T9.1	J270-2-T1.1	J270-2-T2.1	J270-2-T3.1	J270-2-T4.1	J270-2-T5.1	J270-2-T6.1	J270-2-T9.1
$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	7.27	9.51	8.41	9.01	6.16	5.89	9.29	5.77	4.57
1 σ	0.14	0.16	0.20	0.23	0.25	0.11	0.13	0.13	0.17

和曲线上外(可能是由于Pb丢失造成的,该点年龄为 $986.7 \pm 12.4\text{Ma}$ (点5.1)),其他8个点均落在谐和曲线上(图4-b)。测得的8个年龄值可分为6组,即年龄最大的 $1852 \pm 24\text{Ma}$ (点1.1),最小的 $125.2 \pm 1.4\text{Ma}$ (点2.1)和 $124.1 \pm 0.6\text{Ma}$ (点4.1),以及居中的 $1035.2 \pm 7.0\text{Ma}$ (点9.1)、 $414.8 \pm 1.2\text{Ma}$ (点6.1)和 $428.6 \pm 2.5\text{Ma}$ (点7.1)、 $142.6 \pm 2.1\text{Ma}$ (点3.1)和 $141.2 \pm 1.3\text{Ma}$ (点8.1)。最年轻的2个年龄的加权平均值为 $124.2 \pm 1.1\text{Ma}$ (MSWD=0.50),可以限定煌斑岩脉的侵位年龄,即成矿前煌斑岩脉的侵位年龄小于等于 $124.2 \pm 1.1\text{Ma}$ 。对其中的7颗锆石进行氧同位素测试,测得 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $3.86\text{‰} \sim 11.37\text{‰}$ (表2)。

J270-2样品中锆石为浅粉色,透明,金刚光泽,呈半自形-自形短柱状、粒状,少量长柱状,晶体长轴为 $80 \sim 160\mu\text{m}$,长宽比为1~4。CL图像显示(图3-c),锆石发育韵律式环带,个别环带不明显(3.1、4.1、6.1和8.1点所在锆石);长柱状锆石(1.1点所在锆石)显示振荡环带的特点,无明显溶蚀现象,无蚀变边,为典型的岩浆锆石;少量锆石色深,浑圆状,内部裂纹发育,属于老的捕获锆石(3.1、8.1和9.1点所在锆石)。测定了9颗锆石,共分析10个点,获得的放射成因 ^{206}Pb ($^{206}\text{Pb}^*$)含量为 $1.9 \times 10^{-6} \sim 217.0 \times 10^{-6}$,Th和U含量分别为 $4 \times 10^{-6} \sim 501 \times 10^{-6}$ 和 $90 \times 10^{-6} \sim 1019 \times 10^{-6}$,Th/U值为 $0.04 \sim 0.94$ (表1)。其中2个点没有落在谐和曲线上,可能是Pb丢失造成的,年龄分别为 $1564 \pm 6\text{Ma}$ (点8.1)和 $975.3 \pm 3.4\text{Ma}$ (点9.1),其他8个点均落在谐和曲线上(图5)。其中最大的年龄值为 $2627 \pm 8\text{Ma}$ (点3.1),单个数据点年龄包括 $361.8 \pm 2.1\text{Ma}$ (点7.1)、 $245.7 \pm 1.9\text{Ma}$ (点4.1)、 $154.6 \pm 2.0\text{Ma}$ (点6.1)和 $112.2 \pm 0.7\text{Ma}$ (点1.1),成组分布的数据点年龄有 $440.4 \pm 3.3\text{Ma}$ (点2.1)、

$433.6 \pm 2.1\text{Ma}$ (点5.1)和 $445.8 \pm 2.1\text{Ma}$ (点5.2)。10个数据点中最小的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 $112.2 \pm 0.7\text{Ma}$,可以限定煌斑岩脉的侵位年龄,即成矿后煌斑岩脉的侵位年龄小于等于 $112.2 \pm 0.7\text{Ma}$ 。对其中的7颗锆石进行氧同位素测试,测得 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $4.57\text{‰} \sim 9.29\text{‰}$ (表2)。

5 讨论

5.1 从锆石年龄看区域重要地质事件

基性脉岩是地壳伸展体制下深源岩浆浅部就位的产物,是了解深部地幔性质和壳幔演化的重要媒介^[45-46]。在本文测试的焦家金矿床3件基性岩脉样品的25个年龄数据中,除5颗指示脉岩形成于早白垩世($112.2 \pm 0.7 \sim 128.8 \pm 2.8\text{Ma}$)的年轻锆石外,其余年龄较老锆石的晶体长度较短,磨圆度较高,环带不明显,内部裂隙较发育,表面剥蚀放射成因的

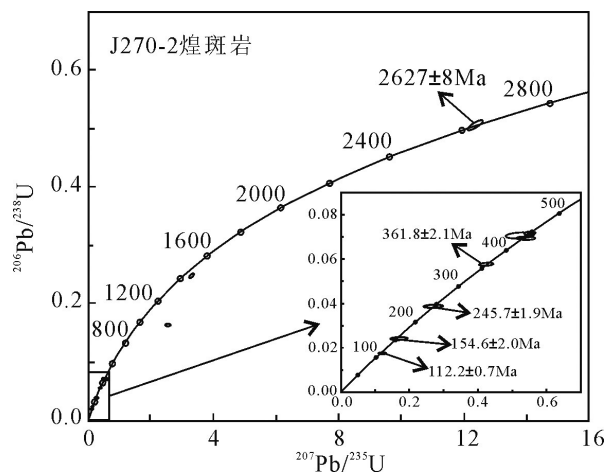


图5 焦家金矿床成矿后煌斑岩锆石U-Pb谐和图

Fig. 5 U-Pb concordia diagram of zircon from lamprophyre after mineralization of the Jiaojia gold deposit

^{206}Pb 值较高,说明这些老锆石为残留锆石或围岩捕获锆石。老锆石的同位素年龄分别记录了早侏罗世、三叠纪、古生代、新元古代、中元古代和新太古代的岩浆事件和变质事件,这些地质事件记录与胶东中生代花岗岩类侵入体,如玲珑型花岗岩、郭家岭型花岗岩、伟德山型花岗岩(牙山岩体和院格庄岩体)中的锆石年龄记录^[47-48]吻合。这些年龄数据除反映基性脉岩侵位之前胶北地区的地质演化外,也有受邻近的苏鲁造山带、鲁西隆起重大地质事件影响的印记。

2 个最老锆石测点的年龄值为 $2649 \pm 20\text{Ma}$ (J0-2.1) 和 $2627 \pm 8\text{Ma}$ (J270-2-3.1), 锆石 Th/U 值为 0.12 和 0.54, 前者接近于 0.1 (图 6), 具变质锆石特点, 后者应为岩浆锆石。锆石年龄值与胶北隆起栖霞一带新太古代 TTG 质片麻岩的形成时代^[49-50]一致。锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 5.06‰ (J0-T2.1) 和 6.16‰ (J270-2-T3.1), 接近于正常地幔的锆石值 $5.3\text{‰} \pm 0.3\text{‰}$ ^[51], 也与栖霞一带 TTG 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($5.11\text{‰} \sim 5.55\text{‰}$) 接近^[49]。胶东在 $2.6 \sim 2.5\text{Ga}$ 曾发生强烈的岩浆活动和变质作用^[52], 形成大量 TTG 质片麻岩, 焦家金矿床基性脉岩中的最老锆石应来源于与幔源岩石关系密切的 TTG 质片麻岩。

$1852 \pm 24\text{Ma}$ (J270-1-1.1) 和 $1035.2 \pm 7\text{Ma}$ (J270-1-9.1) 的锆石, Th/U 值为 0.48 和 0.72, 具岩浆锆石特征。胶北地区没有相应时代的地质体。区域上, 苏鲁超高压变质带中海阳斜长角闪岩的原岩形成于 $1.7 \sim 1.8\text{Ga}$, 胶北在 $1.7 \sim 1.9\text{Ga}$ 发生过强烈的构造变质事件^[49,53-54]。因此, 煌斑岩中古元古代末期年龄的锆石可能来自于受该期变质、岩浆事件影响的地质体。 $1035.3 \pm 7\text{Ma}$ 的锆石年龄值, 与鲁西莱芜

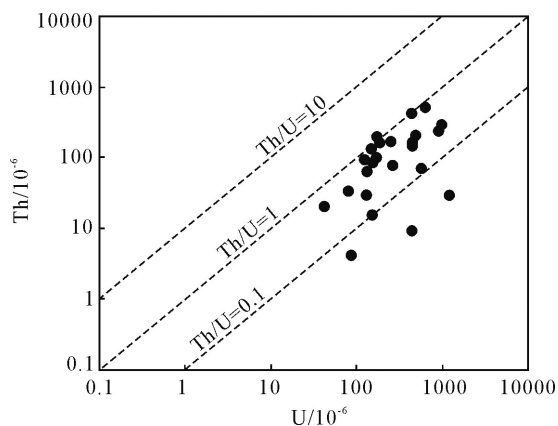


图 6 基性脉岩锆石 U-Th 投影图

Fig. 6 U versus Th plot of zircons from mafic dykes

辉绿岩墙的同位素年龄 ($1139 \pm 25\text{Ma}$, $1157 \pm 18\text{Ma}$ ^[55]) 接近, 也接近于华北克拉通中—新元古代第二次伸展事件和 Mckenzie 巨型岩墙群的形成时间, 可能是受华北克拉通中元古代伸展作用影响的残留锆石。中元古代末期锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 9.51‰ (J270-1-T9.1), 明显高于正常地幔的锆石值, 可能是源岩形成后长期遭受低温热液蚀变作用的结果。

胶东金矿集中区东侧和以南的苏鲁超高压变质带中存在大量新元古代花岗质片麻岩, 其同位素年龄介于 $896 \sim 622.7\text{Ma}$ 之间^[56]。本文辉绿玢岩中 $794 \pm 18\text{Ma}$ (J0-4.1) 的锆石年龄位于该年龄范围内, 其 Th/U 值 (0.87) 与新元古代花岗质片麻岩中锆石较高的 Th/U 值相当^[53]。另外, 前人在煌斑岩的区域围岩——玲珑花岗岩中也发现大量新元古代年龄的锆石^[48]。这些新元古代年龄的锆石应当来源于苏鲁超高压变质带的新元古代花岗质片麻岩, 说明华北板块南缘中生代侵入岩中的老锆石揭示了扬子板块北缘新元古代的岩浆活动事件。

$445.8 \sim 361.8\text{Ma}$ 年龄段的测试点共有 6 个 (J270-1-6.1、J270-1-7.1、J270-2-2.1、J270-2-5.1、J270-2-5.2、J270-2-7.1), 即在胶东中生代岩浆活动中有较多古生代年龄数据的残留。但是, 胶东地区尚未发现关于古生代构造热事件的地质记录。在苏鲁超高压变质带中测得古生代的年龄数据^[57-58], 研究者认为, 苏鲁地区存在加里东期超高压变质作用和古生代超镁铁质侵入体^[59-60]。本文古生代年龄锆石中 Th/U 值低 (0.02) 的 1 颗变质锆石 (J270-1-6.1) 可能来自于加里东期变质岩, 其他 Th/U 值较高 (0.28~0.86) 的锆石可能主要来自于经受了超高压变质作用的岩浆岩。部分锆石测试点的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (J270-1-T7.1、J270-2-T6.1) 接近于正常的地幔锆石值, 指示其与超镁铁质的地幔岩有关; 而高 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($9.01 \sim 11.37$) 锆石 (J270-1-T6.1、J270-2-T2.1、J270-2-T5.1) 的出现, 说明部分锆石可能来源于高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的表壳物质或经受长期低温热液蚀变作用使其 $\delta^{18}\text{O}$ 值升高。另外, 鲁西金伯利岩的同位素年龄约为 465Ma ^[61-62], 本文锆石的古生代同位素年龄值与之接近。

三叠纪是扬子板块与华北板块的碰撞期, 在苏鲁造山带形成广泛分布的超高压变质岩。胶东中生代花岗岩中有大量印支期锆石的残留^[47-48], 本文 $240.6 \pm 12\text{Ma}$ 和 $245.7 \pm 1.9\text{Ma}$ 的锆石年龄值 (J0-3.2,

J270-2-4.1),指示了这一强烈的构造活动事件。2颗锆石均呈短柱状,Th/U值(0.57和0.84)高,显示岩浆锆石的特征。锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为5.89‰(J270-2-T4.1),接近于正常地幔值和胶东东部榴辉岩值^[53],指示研究区基性脉岩中的印支期锆石可能来自于苏鲁超高压变质带的榴辉岩。暗示胶东中生代岩浆岩受到三叠纪板块碰撞物质的混染。

有4个测点的年龄范围为141.2~159.9Ma(J0-1-1.1、J270-1-3.1、J270-1-8.1、J270-2-6.1),与基性脉岩的直接围岩——160~140Ma的玲珑花岗岩^[63]年龄范围一致,指示这些锆石来源于玲珑花岗岩。锆石的Th/U值为0.02、0.04、0.22、0.41,普遍较低,其中数值较低的2颗锆石接近于变质锆石数值。玲珑花岗岩为陆壳重熔型花岗岩,具有强烈的混合岩化现象,可能由于混合岩化作用导致了较低的Th/U值。锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为4.22‰、6.07‰和7.27‰(J270-1-T3.1、J0-1-T1.1、J270-1-T8.1),其中2颗锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值高于幔源锆石值,说明在陆壳重熔过程中局部有外部高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的流体加入。由于胶东粉子山群变质长英质碎屑岩中有很高的氧同位素组成,因此高 $\delta^{18}\text{O}$ 值流体可能来源于这一沉积变质地层^[49]。

5个最年轻锆石测点的年龄值为 $112.2\pm0.65\sim128.8\pm2.8\text{Ma}$ (J0-3.1、J0-5.1、J270-1-2.1、J270-1-4.1、J270-2-1.1)。所测锆石中,除 $128.8\pm2.8\text{Ma}$ 的锆石呈短柱状、具明显熔蚀特征外,其余4颗锆石均为长柱状,晶形较好,环带清晰,应为岩浆活动的新生锆石。5颗锆石分属于3个样品,为各样品中的最小年龄值。其中,J0样品的2个最小年龄的加权平均值为 $124.9\pm1.8\text{Ma}$ (MSWD=2.2),J270-1样品的2个最小年龄的加权平均值为 $124.2\pm1.1\text{Ma}$ (MSWD=0.50),J270-2样品中的最小年龄值为 $112.2\pm0.7\text{Ma}$ 。这些最小年龄值指示了脉岩的最大侵位年龄。可以确定,以J0和J270-1样品为代表的2条成矿前脉岩的侵位年龄分别小于等于 124.9Ma 和小于等于 124.2Ma ,而以J270-2样品为代表的1条成矿后脉岩的侵位年龄小于等于 112.2Ma 。锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值除1颗为5‰(J0-T3.1),指示其为地幔来源外,其余均为高 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石(7.86~8.50)(J0-T5.1、J270-1-T2.1、J270-2-T1.1),显然是遭受后期低温热液蚀变作用的结果。

总之,焦家金矿床中的煌斑岩、辉绿岩为结晶

程度较低的浅成脉岩,其内含有的少量最小年龄值锆石为岩浆结晶阶段锆石,较多的老锆石则为残留锆石或捕获的围岩锆石,可以借此推测基性岩浆通道周围地质体的演化历史,其作用如同穿越岩石圈上部的“探针”。基性脉岩侵位于矿化蚀变的侏罗纪玲珑型花岗岩体中,但在其内有多时期、多来源的锆石。这说明基性脉岩由深部至浅部侵位过程中,穿越的地壳深部既有华北克拉通新太古代、中元古代和新元古代的地质体或地质事件,也有苏鲁造山带古生代和三叠纪的地质体或地质事件。由此推测,位于华北克拉通南缘的胶北隆起区的地壳组成比较复杂,其中苏鲁超高压变质带曾俯冲到胶北隆起之下,基性脉岩在侵位过程中捕获了其中的锆石并将其携带到地壳浅部。

5.2 基性脉岩对金矿化年龄的限定

胶东地区已发表的中生代脉岩年龄多数为132~113Ma,另外尚有一些时限跨度大的K-Ar和Rb-Sr年龄,167~71Ma均有分布^[17-18,64]。高精度的锆石U-Pb和单矿物Ar-Ar测年数据较少,年龄范围为120~114Ma^[14,18,22,65]。根据脉岩与金矿体的穿切关系,将其分为成矿前、成矿期和成矿后3种,即脉岩的活动时限相对较长,矿化的时间较短。在热液成矿期,脉岩与金矿化交错重叠,形成时间相近。本文分别对成矿前和成矿后基性脉岩进行了SHRIMP锆石U-Pb同位素年龄测试,精确限定了焦家金矿的形成时代。

虽然以往已获得许多胶东金矿的同位素年龄,但这些数据本身不能确切地限定成矿的时限。前人主要根据胶东地区最年轻的控矿围岩——郭家岭花岗闪长岩的最小年龄,将金矿化的最大年龄限定于 126Ma ^[34-35]。本文获得的2个成矿前脉岩的同位素年龄,更接近于焦家金矿的成矿时代,将金矿化年龄限定于约 124Ma 之后;而本文获得的成矿后脉岩同位素年龄则将金矿化的时间限定于约 112Ma 之前。本文的成矿后脉岩年龄与胶莱盆地东北缘的郭城地区成矿后脉岩的锆石U-Pb年龄($114\pm2\text{Ma}$)接近^[18],小于玲珑金矿田成矿后的花岗斑岩和长英质脉岩的锆石U-Pb年龄(约 120Ma)^[14,18]。Ma等^[22]对焦家金矿床中3件煌斑岩样品进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄分析,获得的岩浆侵位年龄是 $120.6\pm2.9\text{Ma}$ 、 $120.8\pm1.8\text{Ma}$ 和 $121.6\pm1.7\text{Ma}$,这3个年龄可能代表了成矿期脉岩的时代。

焦家金矿床矿石的绢云母和白云母 Ar-Ar 同位素年龄为 $120.5 \sim 119.2\text{Ma}$ ^[66], 邻近的东季金矿钾长石和脉石英的 Ar-Ar 同位素年龄为 $114.44 \pm 0.16 \sim 116.34 \pm 0.81\text{Ma}$ ^[31], 新城金矿黄铁绢英岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $116.6 \pm 5.3\text{Ma}$ ^[67], 仓上金矿绢云母 Ar-Ar 同位素年龄为 $121.1 \pm 0.5\text{Ma}$ ^[15]。可见, 已获得的焦家金矿床及其附近蚀变岩型金矿的同位素年龄介于 $121.1 \sim 114.44\text{Ma}$ 之间。这一年龄值, 位于本文测试的焦家金矿床成矿前和成矿后基性脉岩同位素年龄范围内, 且二者非常接近, 说明基性脉岩的锆石同位素年龄准确指示了金矿的成矿年龄, 金矿化被严格限制在 $124 \sim 112\text{Ma}$ 。

6 结 论

(1) 焦家金矿床中存在成矿前、成矿期和成矿后的基性脉岩, 成矿前脉岩被矿脉和矿化裂隙错断, 成矿后脉岩切割矿脉和矿化裂隙, 它们较好地限定了金矿化的时限。

(2) 成矿前脉岩的锆石结晶年龄为 $124.9 \pm 1.8\text{Ma}$ 和 $124.2 \pm 1.1\text{Ma}$, 成矿后脉岩的侵位年龄为 $112.2 \pm 0.7\text{Ma}$, 结合金矿同位素测年结果的分析, 将焦家金矿成矿年龄限制在 $124 \sim 112\text{Ma}$ 之间。

(3) 基性岩脉中的锆石年龄记录了早侏罗世、三叠纪、古生代、新元古代、中元古代和新太古代的岩浆事件和变质事件, 揭示了基性岩浆通道周围地质体的演化历史, 指示胶北隆起深部既有华北克拉通新太古代、中元古代和新元古代的地质体或地质事件, 也有苏鲁造山带古生代和三叠纪的地质体或地质事件, 苏鲁超高压变质带曾俯冲到胶北隆起之下。

(4) 锆石的氧同位素组成变化范围较大, 指示了不同时代锆石氧同位素组成的不均一性。许多锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近于正常的地幔锆石值, 指示其与超镁铁质的地幔岩有关; 部分明显高于地幔锆石值, 可能受低温热液蚀变的影响或有外部高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的流体加入, 使锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显升高。

致谢: 野外工作得到山东黄金集团有限公司相关工作人员的帮助和支持, 北京离子探针中心宋彪研究员辅导了 SHRIMP 测试并处理了原始数据, 审稿专家提出了宝贵的意见建议, 研究工作中山东地质科学研究院张志敏老师、杨德平及刘鹏瑞研究员给予启发和指导, 同时得到领导和有关同事的关

心, 在此一并致以诚挚的感谢。

参考文献

- [1] 程小久, 程景平, 王江海. 胶东蓬家矿金矿区钾质煌斑岩的元素地球化学研究[J]. 地球化学, 1998, 27(1): 91-99.
- [2] 孙景贵, 胡受奚, 凌洪飞, 等. 胶西北两类金矿田的高钾-钾质脉岩元素地球化学与成岩作用研究[J]. 地球化学, 2000, 29(2): 144-151.
- [3] 孙景贵, 胡受奚, 凌洪飞. 胶东金矿区高钾-钾质脉岩地球化学与俯冲-壳幔作用研究[J]. 岩石学报, 2000, 16(30): 401-412.
- [4] 刘洪文, 邢树文, 孙景贵. 胶西北两类金矿床暗色脉岩的碳、氧同位素地球化学[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(1): 11-15.
- [5] 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 等. 山东幔源岩浆岩的碳-氧和铈-钕同位素地球化学研究[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(10): 921-930.
- [6] 刘燊, 胡瑞忠, 赵红军, 等. 山东中生代基性脉岩的元素地球化学及其成因[J]. 地球化学, 2005, 34(4): 340-346.
- [7] 刘燊, 胡瑞忠, 赵红军, 等. 胶北晚中生代煌斑岩的岩石地球化学特征及其成因研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 947-958.
- [8] 谭俊, 魏俊浩, 杨春福, 等. 胶东郭城地区脉岩类岩石地球化学特征及成岩构造背景[J]. 地质学报, 2006, 80(8): 1177-1188.
- [9] 杨红梅, 凌文黎, 张军波, 等. 华北克拉通岩石圈减薄机制: 来自山东白垩纪基性-中基性岩浆岩 Re-Os 同位素地球化学特征的制约[J]. 地球科学, 2013, 38(3): 529-540.
- [10] 孙华山, 韩静波, 申玉科, 等. 玲珑、焦家金矿田锆石(U-Th)/He 年龄及其对成矿后剥露程度的指示[J]. 地球科学, 2016, 41(4): 644-654.
- [11] 刘辅臣, 卢作祥, 范永香, 等. 玲珑金矿中基性脉岩与矿化的关系探讨[J]. 地球科学, 1984, 8(4): 37-46.
- [12] 季海章, 赵懿英, 卢冰, 等. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初探[J]. 地质与勘探, 1992, 28(2): 15-18.
- [13] 申玉科, 邓军, 徐叶兵. 煌斑岩在玲珑金矿田形成过程中的地质意义[J]. 地质与勘探, 2005, 41(30): 45-49.
- [14] Wang L G, Qiu Y M, McNaughton N J, et al. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids[J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 275-291.
- [15] Zhang L C, Liu T B, Shen Y C, et al. Structure, isotopes, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Pengjiakuang gold deposit, Mesozoic Jiaolai basin, eastern China[J]. International Geology Review, 2003, 45: 691-711.
- [16] Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. Origin of early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu orogen in eastern China: implications for enrichment processes beneath continental collisional belt[J]. Lithos, 2004, 78: 291-305.
- [17] Yang J H, Chung S L, Zhai M G, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: Evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle[J]. Lithos, 2004, 73: 145-160.
- [18] 谭俊, 魏俊浩, 郭玲利, 等. 胶东郭城地区脉岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及斑晶 EPMA 研究: 对岩石圈演化的启示[J]. 中国科

- 学(D辑), 2008, 38(8): 913–929.
- [19] Liu S, Hu R Z, Zhao J H, et al. K–Ar geochronology of Mesozoic mafic dikes in Shandong Province, Eastern China: implications for crustal extension[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(6): 1207–1213.
- [20] Liu S, Hu R, Gao S, et al. Petrogenesis of Late Mesozoic mafic dykes in the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton and implications for the foundering of lower crust[J]. *Lithos*, 2009, 113: 621–639.
- [21] Li G W, Bi S G, Vasconcelos P M. Mineralization and genesis of the Fanjiabu gold deposit in the Sulu ultrahigh pressure metamorphic terrane, with a comparison to the gold mineralization in the Jiaobei terrane[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16: 125–142.
- [22] Ma L, Jiang S Y, Hofmann A W, et al. Lithospheric and asthenospheric sources of lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: A consequence of rapid lithospheric thinning beneath the North China Craton? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 124: 250–271.
- [23] 郭文魁, 段承敬. 山东招远玲珑金矿[J]. *地质论评*, 1951, 16(1): 112–143.
- [24] 王鹤年, 汪耀陈. 胶东西北部混合岩、花岗岩及其与金矿化的关系[J]. *南京大学学报*, 1984, 20(增刊): 29–40.
- [25] 余汉茂. 胶东西北部地区岩石同位素地质年代学研究[J]. *山东地质*, 1987, 3(1): 75–86.
- [26] 沈保丰, 骆辉, 李双宝, 等. 华北陆台太古宙绿岩带地质及成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1–39.
- [27] 王义文. 中国金矿床成矿时代[C]//张贻侠, 寸珪, 刘连登. 中国金矿床: 进展与思考. 北京: 地质出版社, 1996: 137–153.
- [28] Yang J H, Zhou X H. The Rb–Sr isochron of ore and pyrite sub-samples from Linglong gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China and their geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(24): 2272–2276.
- [29] Yang J H, Zhou X H. Rb–Sr, Sm–Nd and Pb isotope systematics of pyrite: implications for the age and genesis of lode gold deposits. *Geology*, 2001, 29(8): 711–714.
- [30] Qiu Y M, Groves D I, McNaughton N J, et al. Nature, age and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits ore the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37: 283–305.
- [31] 李厚民, 毛景文, 沈远超, 等. 胶西北东季金矿钾长石和石英的 Ar–Ar 年龄及其意义[J]. *矿床地质*, 2003, 22(1): 72–77.
- [32] Zhang X O, Cawood P A, Wilde S A. Geology and timing of mineralization at the Cangshang gold deposit, north-western Jiaodong Peninsula, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38(2): 141–153.
- [33] Hu F F, Fan H R, Yang J H, et al. Mineralizing age of the Rushan lode gold deposit in the Jiaodong Peninsula: SHRIMP U–Pb dating on hydrothermal zircon[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1629–1636.
- [34] 翟明国, 杨进辉, 刘文军. 胶东大型黄金矿集区及大规模成矿作用[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(7): 545–552.
- [35] 李俊建, 罗镇宽, 刘晓阳, 等. 胶东中生代花岗岩及大型–超大型金矿床形成的地球动力学背景[J]. *矿床地质*, 2005, 24(4): 361–372.
- [36] 杨立强, 邓军, 王中亮, 等. 胶东中生代金成矿系统[J]. *岩石学报*, 2014, 30(9): 2447–2467.
- [37] Song M C, Deng J, Yi P H, et al. The kiloton class Jiaojia gold deposit in eastern Shandong Province and its genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(3): 801–824.
- [38] 宋明春, 崔书学, 周明岭, 等. 山东省焦家矿区深部超大型金矿床及其对“焦家式”金矿的启示[J]. *地质学报*, 2010, 84(9): 1349–1358.
- [39] 宋明春. 胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展[J]. *地质通报*, 2015, 34(9): 1758–1771.
- [40] Compston W, Williams I S, Kirschvink J L. Zircon U–Pb ages for the Early Cambrian time-scale[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 1992, 149: 171–184.
- [41] 宋彪. 用 SHRIMP 测定锆石 U–Pb 年龄的工作方法[J]. *地质通报*, 2015, 34(10): 1777–1788.
- [42] Ludwig K R. *Squid 1.02: A user's manual*[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publish, 2001.
- [43] Ludwig K R. *Users manual for isoplot/ex rev. 2.49: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2001.
- [44] Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1975, 26: 207–221.
- [45] 李艳军, 魏俊浩, 伍刚, 等. 海南石碌地区早三叠世闪长玢岩脉 U–Pb 年代学及其构造意义[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2013, 38(2): 241–252.
- [46] 贺新星, 肖龙, 王国灿, 等. 西准噶尔晚古生代中基性岩墙群岩石学成因及地质意义[J]. *地球科学*, 2015, 40(5): 777–796.
- [47] 邱连贵, 任凤楼, 曹忠祥, 等. 胶东地区晚中生代岩浆活动及对大地构造的制约[J]. *大地构造与成矿学*, 2008, 32(1): 117–123.
- [48] 黄涛, 杨立强, 刘向东, 等. 胶北地体地壳演化: 玲珑黑云母花岗岩继承锆石 U–Pb 年龄、微量元素和 Hf 同位素证据[J]. *岩石学报*, 2014, 30(9): 2574–2589.
- [49] 唐俊, 郑永飞, 吴元保, 等. 胶东地块西部变质岩锆石 U–Pb 定年和氧同位素研究[J]. *岩石学报*, 2004, 20(5): 1064–1083.
- [50] 王世进, 王来明, 万渝生, 等. 鲁东地区侵入岩形成时代和期次划分——锆石 SHRIMP U–Pb 年龄的证据[J]. *山东国土资源*, 2009, 25(12): 8–21.
- [51] Valley J W, Kinny P D, Schulze D J, et al. Zircon metacryst from kimberlite: oxygen isotope variability among mantle melts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1998, 133: 1–11.
- [52] 万渝生, 刘敦一, 董春艳, 等. 高级变质作用对锆石 U–Pb 同位素体系的影响: 胶东栖霞地区变质闪长岩锆石定年[J]. *地学前缘*, 2011, 18(2): 17–25.
- [53] 唐俊, 郑永飞, 吴元保, 等. 胶东地块东部变质岩锆石 U–Pb 定年和氧同位素研究[J]. *岩石学报*, 2004, 20(5): 1040–1060.

- [54] Li S Z, Zhao G C, Santosh M, et al. Paleoproterozoic structural evolution of the southern segment of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. Precambrian Research, 2012, 200/203: 59–73.
- [55] 侯贵廷, 刘玉琳, 李江海, 等. 关于基性岩墙群的 U–Pb SHRIMP 地质年代学的探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 14(3): 179–185.
- [56] 宋明春, 韩景敏, 宫述林. 苏鲁造山带大规模岩浆活动的证据: 新元古代多成因花岗质片麻岩[J]. 矿物岩石, 2007, 27(2): 22–32.
- [57] 陈道公, 倪涛. 大别–苏鲁造山带高级变质岩中锆石微区 U、Th 和 Pb 化学组成特征统计[J]. 岩石学报, 2004, 20(5): 999–1006.
- [58] Liu F L, Liou J G. Zircon as the best mineral for *PT* time history of UHP metamorphism: A review on mineral inclusions and U–Pb SHRIMP ages of zircons from the Dabai, Sulu UHP rocks[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(1): 1–39.
- [59] 杨经绥, 刘福来, 吴才来, 等. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用: 来自含柯石英锆石的定年证据[J]. 地质学报, 2003, 77(4): 463–474.
- [60] 杨经绥, 李天福, 梁风华, 等. 中国大陆科学钻探主孔 (CCSD–MH) 石榴石橄榄岩: 一个经历了深俯冲作用的古生代超镁铁质侵入体[J]. 岩石学报, 2007, 23(12): 3153–3170.
- [61] Dobbs P N, Duncan D J, Hu S, et al. The geology of the Mengyin kimberlites, Shandong, China[C]//Meyer H O A, Leonards O H. Proceedings of the 5th international kimberlite conference 1. diamonds: characterization, genesis and exploration. CPRM Brasilia, 1994: 106–115.
- [62] 张宏福, 杨岳衡. 华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的同位素年龄和 Sr–Nd–Hf 同位素地球化学特征[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 285–294.
- [63] 苗来成, 罗镇宽, 关康, 等. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱 U–Pb 年龄及其岩石学意义[J]. 岩石学报, 1998, 14(2): 198–206.
- [64] Sun J G, Hu S X, Liu J M, et al. A study of Sr, Nd and O isotopes of the K-rich melanocratic dykes in the late Mesozoic gold field in the Jiaodong Peninsula[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75: 732–444.
- [65] 张连昌, 沈远超, 刘铁兵, 等. 山东胶莱盆地北缘金矿 Ar–Ar 法和 Rb–Sr 等时线年龄与成矿时代[J]. 中国科学 (D 辑), 2002, 32(9): 727–734.
- [66] Li J W, Vasconcelos P M, Zhang J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ constraints on a temporal link between gold mineralization, magmatism, and continental margin transtension in the Jiaodong gold province, eastern China[J]. Journal of the Geological Society, 2003, 111: 741–751.
- [67] 杨进辉, 周新华, 陈立辉. 胶东地区破碎带蚀变岩型金矿时代的测定及其地质意义[J]. 岩石学报, 2000, 16(3): 454–458.