

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*

张连昌** 沈远超 刘铁兵 曾庆栋 李光明 李厚民

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 位于山东东部中生代胶莱盆地北缘的蓬家乔、大庄子和发云乔等金矿是一类受中生代拉分盆地边缘低角度断层控制的构造碎裂-角砾岩型金矿。金矿体主要由角砾状和细脉浸染状矿石组成。通过对金矿石和煌斑岩脉的形成时代进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法和 Rb-Sr 等时线定年, 结果表明蓬家乔金矿 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 117.33~118.42 Ma。大庄子金矿 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 117.39 Ma, 发云乔金矿黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 128.49 ± 7.2 Ma。上述年代学资料证明受胶莱盆地北缘低角度断层控制的金矿形成时代在 117~128 Ma, 这与胶东北部金矿的形成时代(115~126 Ma)相同, 从而说明胶东地区金矿为同期成矿, 大规模成矿作用发生于晚燕山期(120 ± 10 Ma)的构造体系转折期。

关键词 胶莱盆地北缘 金矿形成时代 Ar-Ar 年龄 Rb-Sr 等时线

山东半岛(也称胶东)是中国重要的黄金产地。在胶东北部隆起区已先后发现了与燕山期花岗岩有关的十几个超大型-大型石英脉型(玲珑式)和破碎带蚀变岩型(焦家式)金矿。近年在莱阳盆地北缘找到了胶东金矿新类型——受低角度断层控制的构造碎裂-角砾岩型金矿^[1,2]。这类矿床的典型代表是蓬家乔、大庄子和发云乔金矿。

对于胶东北部金矿的成矿时代, 已积累了一些数据^[3,4], 主要测年数据集中在 115~126 Ma。对于胶莱盆地北缘金矿还未见可靠的年代学资料的报道。近年来, 金矿定年更趋精确, 如邱华宁^[5]、Reynolds 等^[6]和 Perkins 等^[7]曾利用与矿石矿物紧密共生的石英进行 Ar-Ar 法定年, 苗来成等^[8]利用容矿围岩花岗岩和穿切矿脉石英斑岩的锆石 SHRIMP 年龄来限定玲珑金矿的成矿年龄为 120~126 Ma, 杨进辉等^[9]利用载金矿物黄铁矿 Rb-Sr 同位素等时线法获得玲珑金矿主成矿期年龄为 121.6 Ma。本文利用黄铁矿 Rb-Sr 等时线法测定发云乔金矿的形成时代; 利用含金石英 Ar-Ar 法来测定蓬家乔和大庄子金矿的形成时代, 并利用与金矿体伴生的煌斑岩脉的 Ar-Ar 年龄来验证, 取得了可靠而精确的年龄值。

1 区域及矿床地质

胶东地区位于中国华北地块东部, 从全球构造角度看位于西环太平洋构造带上。该区西临郯庐断裂带, 南部发育中生代拉分盆地^[10], 并以五莲-荣城断裂为界与大别-苏鲁超高压变质带相接。胶东北部隆起由太古代胶东群和元古代荆山群等地层和一系列燕山期花岗岩组成,

2001-12-13 收稿

* 中国科学院知识创新工程项目(批准号: KZCX1-Y-03, KZCX1-07)和“九五”重大项目(批准号: KZ951-A1-404-02)资助

** E-mail: zhanglianhang@yahoo.com.cn

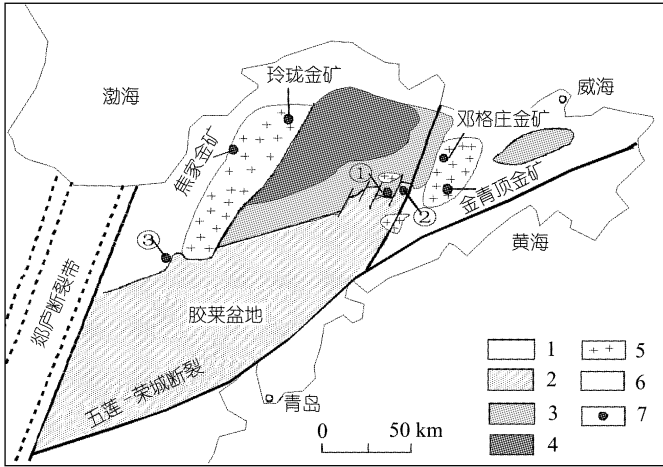


图 1 胶莱盆地北缘地质简图

1. 新生界; 2. 白垩系; 3. 元古宙荆山群; 4. 太古宙胶东群; 5. 燕山期花岗岩;
6. 断裂; 7. 金矿床(①蓬家乔金矿, ②发云乔金矿, ③大庄子金矿)

蓬家乔和发云乔金矿位于胶莱盆地东北缘。其中蓬家乔金矿赋矿围岩为荆山群变质岩; 金矿体分布在长约 5.5 km、宽 80~300 m 的构造蚀变带内, 该带总体走向近 EW, 倾向南, 倾角为 25~45°, 断裂带剖面形态呈铲状, 断裂构造带发育于糜棱岩与大理岩之间, 该断层为一典型的低角度正断层; 矿体上盘为黑云母二长片麻岩、石墨片岩和大理岩, 下盘为糜棱岩化长英质变质岩。发云乔金矿化则发育于中生代胶莱盆地底部白垩系砾岩中的断裂裂隙系统内, 该裂隙系统的形成与发育于盆地底部的低角度滑脱断层有关。大庄子金矿位于胶莱盆地西北缘, 赋矿围岩为荆山群变质岩; 金矿体分布在一低角度断裂构造带内, 该带总体走向 NE, 倾向东

表 1 胶莱盆地北缘蓬家乔、大庄子和发云乔金矿地质特征

	蓬家乔金矿	大庄子金矿	发云乔金矿
构造位置	胶莱盆地东北缘(盆外)	胶莱盆地西北缘(盆外)	胶莱盆地东北缘(盆内)
控矿构造	低角度正断层	低角度正断层	低角度断层上盘的次级裂隙系统
赋矿围岩	元古宙荆山群变质岩	元古宙荆山群变质岩	下白垩统莱阳组砾岩
矿体产状	似层状、透镜状, 上陡(45°)下缓(25°), 倾向盆内	似层状、透镜状, 倾角 20~30°, 倾向盆内	脉状、透镜状, 倾向 125°, 倾角 60°
矿石类型	主要角砾状、次要浸染状、细脉-网脉状	角砾状、浸染状、细脉-网脉状	主要细脉-网脉状、次要角砾状、浸染状
矿物组合	黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿; 铁白云石、石英、方解石; 自然金、银金矿	黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿; 石英、方解石; 自然金、银金矿	黄铁矿为主, 少量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿; 石英、方解石; 银金矿
金赋存状态	常见黄铁矿和石英中的包体金、矿物粒间金, 少见裂隙金	常见矿物包体金、粒间金, 少见矿物裂隙金	常见矿物裂隙金, 少见包体金和粒间金
围岩蚀变	硅化、黄铁矿化、绢云母化、碳酸盐化和绿泥石化	硅化、黄铁矿化、绢云母化、碳酸盐化、钾化	硅化、黄铁矿化、绢云母化
成矿阶段	第 I 为黄铁矿-石英-铁白云石阶段; 第 II 为石英黄铁矿阶段; 第 III 为石英-多金属硫化物阶段; 第 IV 为石英-方解石脉阶段	第 I 为黄铁矿-石英阶段; 第 II 为石英黄铁矿阶段; 第 III 为石英-多金属硫化物阶段; 第 IV 为石英-方解石脉阶段	第 I 为黄铁矿-石英阶段; 第 II 为石英黄铁矿阶段; 第 III 为石英-方解石脉阶段
成矿流体	包裹体均一温度: 150~250°C; 流体来源: 大气降水	包裹体均一温度: 160~280°C; 流体来源: 大气降水和岩浆水	流体来源: 大气降水

胶东地区的绝大多数金矿(如, 焦家、玲珑、邓格庄和金青顶金矿)产于上述花岗岩中或其附近。

蓬家乔、发云乔和大庄子金矿产出于中生代胶莱盆地北缘(图 1), 胶莱盆地充填物为中生代白垩系莱阳组砾岩、青山组火山岩、王氏组砂岩夹火山岩, 盆地基底为元古宙荆山群变质杂岩。在盆地北缘发育一系列具滑脱性质的低角度正断层, 该类断层控制了蓬家乔、发云乔、郭城、辽上和大庄子等金矿床, 同时也控制了部分煌斑岩脉及闪长岩脉的分布。

南, 倾角为 30°左右, 断裂构造带沿大理岩层分布; 矿体上盘为斜长角闪岩, 下盘为二长片麻岩. 上述各金矿区地质及矿石特征见表 1.

2 采样与分析方法

蓬家乔金矿样品采自露天采场和钻孔岩心, 其中 BP99-65 石英样品为采自矿体中部角砾状矿石中的石英黄铁矿胶结物, 样品 Au 含量 5.3 g/t; BP99-07 石英样品为采自矿体中的黄铁矿石英细脉, 该样品 Au 含量 3.4 g/t. 这两件样品均代表主成矿(II)阶段形成的矿石. BP99-66 黑云母样品为采自矿体下盘平行于矿体分布的煌斑岩脉. 大庄子金矿年龄样品采自井下采场角砾状矿石中的石英黄铁矿胶结物(主成矿阶段矿石). 蓬家乔和大庄子金矿采用 Ar-Ar 法定年, 发云乔金矿采用 Rb-Sr 等时线法定年, 其样品取自主矿体一采场工作面上的黄铁矿细脉(主成矿阶段矿石).

2.1 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法分析

用所采样品经磨片在显微镜下观察后, 再破碎选样. 石英样品破碎后先手选, 再碎至 0.2~0.3 mm 的粒度, 经淘洗晾干后, 在双目显微镜下手工挑选, 样重 2 g. 为了减少包体成分及过剩 Ar 的干扰, 所选的石英样品新鲜、透明, 纯度 99%以上. 黑云母样品由煌斑岩经湿磨和湿电磁选获得, 所选黑云母片径为 0.4~0.5 mm, 纯度达 100%.

将挑选好的样品送到中国科学院地质与地球物理研究所 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年实验室进行测定. 首先将样品送到反应堆进行快中子照射, 照射时间为 60~80 h, 快中子照射参数 $J = 0.008471 \sim 0.009965$; 然后对照射后的样品取回做 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加热实验. 将样品置于 RGA-10 气体源质谱计与析 Ar 仪联合系统中进行 Ar 的提取与纯化; 最后用英国 VSS 公司 RGA-10 气体源质谱计做静态同位素分析.

样品采用逐级升温加热法提取 Ar 进行质谱分析, 中子活化照射参数及各温度条件下的 Ar 同位素比值、 ^{39}Ar 析出百分比和相应的视年龄值见表 2~5, 依有关数据绘成 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱(图 2). 由于上述坪年龄数据是同一样品经多次加热测定的结果, 样品满足同源、同时和化学封闭等条件^[11], 可利用坪年龄计算的数据点进行等时线年龄计算(图 2).

表 2 BP99-65 石英 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测年结果($W = 0.269 \text{ g}$, $J = 0.008471$, $\lambda = 5.543 \times 10^{-10}/\text{a}$)^{a)}

加热温度/°C	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$^{39}\text{Ar}_k$ $\times 10^{-12}/\text{mol}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k$ ($\pm 1\sigma$)	$^{39}\text{Ar}_k$ (10^{-2})	视年龄/Ma ($\pm 1\sigma$)
450	84.153	0.2513	0.5023	0.1912	0.424	10.22 ± 0.01	1.39	149.88 ± 2.58
530	48.701	0.1350	2.5923	0.1480	0.891	9.162 ± 0.01	2.92	134.86 ± 2.04
680	16.754	0.0298	0.6870	0.0814	3.501	8.019 ± 0.00	11.4	118.57 ± 1.50
780	10.828	0.0103	2.3989	0.0231	12.29	7.951 ± 0.00	40.3	117.60 ± 1.37
880	13.348	0.0183	0.8734	0.0348	5.054	7.994 ± 0.00	16.5	118.22 ± 1.39
970	19.022	0.0373	0.7937	0.0648	2.608	8.078 ± 0.00	8.55	119.42 ± 1.46
1050	28.024	0.0641	0.6322	0.0913	1.878	9.166 ± 0.00	6.15	134.91 ± 1.74
1150	38.431	0.0980	0.9269	0.0941	1.182	9.642 ± 0.00	3.87	141.65 ± 1.84
1250	47.446	0.1276	1.0338	0.1127	1.089	9.953 ± 0.00	3.57	146.05 ± 1.99
1350	46.842	0.1250	1.1749	0.1078	0.880	10.14 ± 0.00	2.88	148.71 ± 2.00
1550	53.728	0.1474	1.2019	0.1457	0.663	10.42 ± 0.00	2.24	152.72 ± 2.29

a) 由中国科学院地质与地球物理研究所 Ar-Ar 法定年实验室桑海清和王英菊完成; 测定仪器: 英国 RGA-10 气体源质谱计(VSS 公司), 下同

表 3 BP99-07 石英 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测年结果($W = 0.1916 \text{ g}$, $J = 0.009965$, $\lambda = 5.543 \times 10^{-10}/\text{a}$)

加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$^{39}\text{Ar}_{\text{k}}$ $\times 10^{-12}/\text{mol}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{k}}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{39}\text{Ar}_{\text{k}}$ (10^{-2})	视年龄/Ma ($\pm 1\sigma$)
450	29.596	0.0717	0.8476	0.3318	0.517	8.552 ± 0.03	3.71	147.54 ± 4.51
560	23.288	0.0531	0.7552	0.3356	0.677	7.727 ± 0.03	4.85	133.83 ± 3.73
670	17.439	0.0353	0.5911	0.2274	1.050	7.082 ± 0.02	7.53	123.03 ± 2.49
780	11.596	0.0159	0.4692	0.1202	2.180	6.917 ± 0.01	15.6	120.26 ± 1.71
860	9.2857	0.0084	0.5421	0.1214	3.571	6.825 ± 0.01	25.6	118.70 ± 1.68
940	12.143	0.0178	0.8814	0.1690	1.948	6.943 ± 0.01	13.1	120.69 ± 1.99
1020	15.552	0.0292	1.0996	0.2191	1.428	7.031 ± 0.02	10.2	122.17 ± 2.37
1100	21.984	0.0482	1.3936	0.4048	0.864	7.901 ± 0.03	6.11	136.73 ± 4.33
1200	27.946	0.0673	1.4320	0.4141	0.688	8.253 ± 0.03	4.93	142.59 ± 4.89
1300	32.245	0.0796	1.4788	0.4000	0.568	8.951 ± 0.03	4.07	154.15 ± 5.53
1500	38.832	0.0981	1.5192	0.4467	0.456	9.841 ± 0.04	3.27	168.76 ± 7.36

表 4 BP99-66 黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测年结果($W = 0.118 \text{ g}$, $J = 0.008471$, $\lambda = 5.543 \times 10^{-10}/\text{a}$)

加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$^{39}\text{Ar}_{\text{k}}$ $\times 10^{-12}/\text{mol}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{k}}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{39}\text{Ar}_{\text{k}}$ (10^{-2})	视年龄/Ma ($\pm 1\sigma$)
400	44.869	0.1182	1.9318	0.1078	1.332	10.21 ± 0.01	0.69	149.76 ± 2.48
540	29.651	0.0860	1.1650	0.0744	1.993	4.404 ± 0.00	1.03	66.09 ± 0.88
670	27.437	0.0743	2.2546	0.0683	2.304	5.715 ± 0.00	1.20	85.29 ± 1.11
780	14.058	0.0251	1.3396	0.0317	5.539	6.754 ± 0.00	2.88	100.38 ± 1.19
900	11.442	0.0115	0.4397	0.0184	12.06	8.054 ± 0.00	6.28	119.07 ± 1.39
980	9.7872	0.0063	0.2618	0.0175	21.80	7.901 ± 0.00	11.3	116.88 ± 1.36
1060	8.7908	0.0029	0.2132	0.0165	62.53	7.905 ± 0.00	32.6	116.94 ± 1.36
1140	9.5275	0.0051	0.2435	0.0247	29.45	8.012 ± 0.00	15.3	118.48 ± 1.38
1250	10.085	0.0075	0.4276	0.0188	21.61	7.881 ± 0.00	11.2	116.60 ± 1.36
1350	10.376	0.0081	0.4299	0.0177	17.85	7.975 ± 0.00	9.31	117.94 ± 1.37
1450	10.954	0.0106	0.9603	0.0231	15.30	7.885 ± 0.00	7.97	116.64 ± 1.36

表 5 DZ-004 号石英样品 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测试结果($W = 0.2496 \text{ g}$, $J = 0.00991$, $\lambda = 5.543 \times 10^{-10}/\text{a}$)

加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$^{39}\text{Ar}_{\text{k}}$ $\times 10^{-12}/\text{mol}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{k}}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{39}\text{Ar}_{\text{k}}$ (10^{-2})	视年龄/Ma ($\pm 1\sigma$)
460	46.276	0.1276	0.8495	0.2074	0.871	8.774 ± 0.01	4.49	150.42 ± 2.74
540	19.988	0.0446	0.5378	0.0971	2.076	6.867 ± 0.00	10.7	118.79 ± 1.57
620	13.557	0.0231	0.7109	0.0749	5.507	6.777 ± 0.00	28.4	117.28 ± 1.47
700	16.044	0.0320	1.0027	0.1171	3.106	6.664 ± 0.00	16.0	115.37 ± 1.60
800	20.412	0.0463	1.1133	0.1453	2.248	6.835 ± 0.00	11.6	118.24 ± 1.79
900	26.615	0.0653	1.3417	0.1892	1.506	7.473 ± 0.01	7.77	128.89 ± 2.22
1000	32.264	0.0830	1.3584	0.2169	1.228	7.937 ± 0.01	6.34	136.61 ± 2.56
1150	40.975	0.1121	1.3850	0.2121	0.950	8.067 ± 0.01	4.90	138.76 ± 2.57
1300	35.937	0.0937	0.9718	0.1854	1.112	8.419 ± 0.01	5.74	144.58 ± 2.46
1500	51.060	0.1454	0.8604	0.2242	0.765	8.325 ± 0.01	3.94	143.02 ± 2.76

2.2 Rb-Sr 等时线分析

将初选样品用去离子水清洗表面后,在玛瑙钵中将样品粉碎至 80~100 目,然后在双目镜下挑选出纯度大于 99% 的同一世代黄铁矿.在玛瑙钵中将挑选出的黄铁矿再粉碎至 200 目,用不同浓度的 HCl 在超声波振动器内清洗 10~12 h,再用去离子水冲洗 3~4 次;干燥后称取 0.5 g 左右的样品,加入稀释剂和 HCl + HNO₃ 混合酸,加热使其全部溶解、蒸干;再加入相应浓度

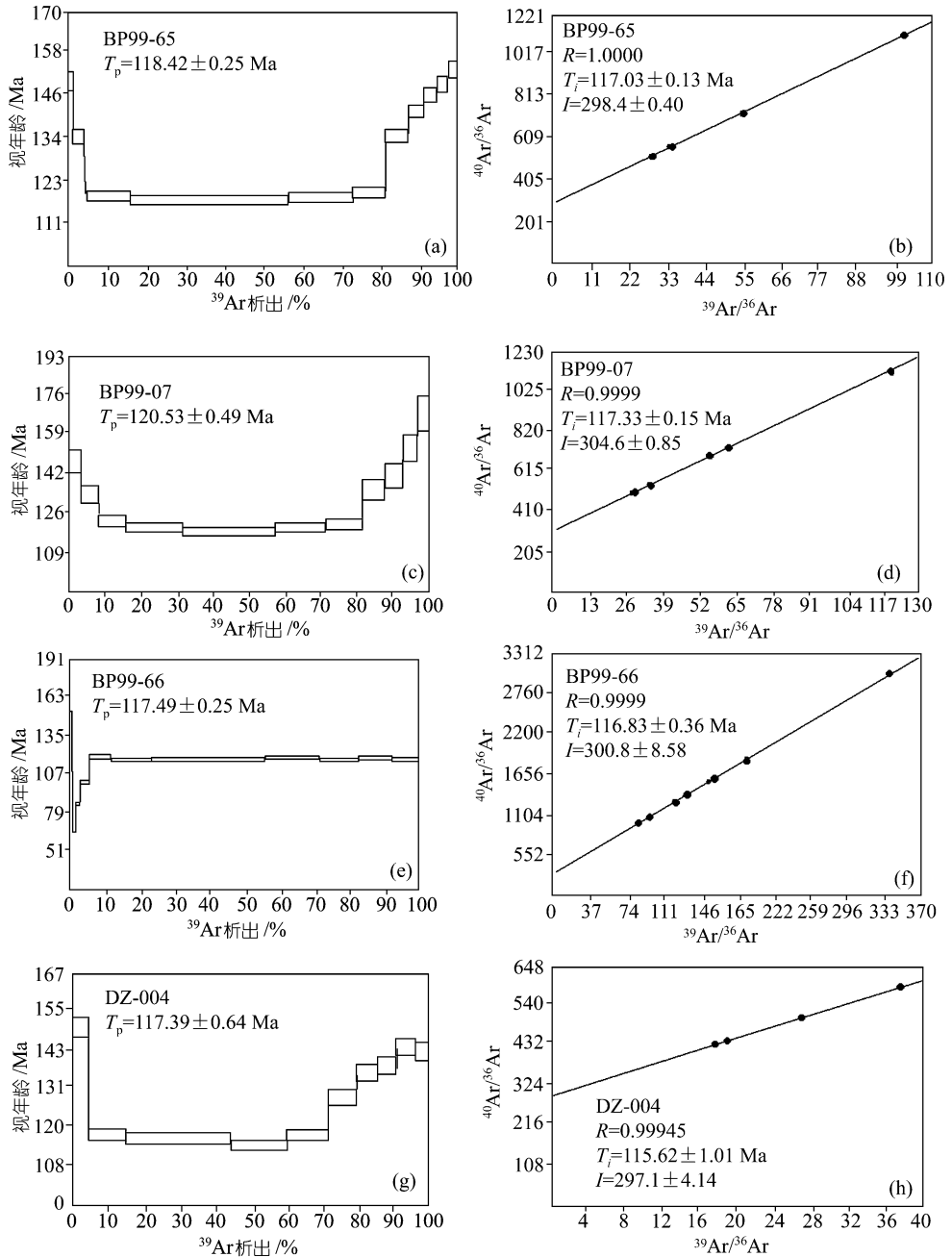


图 2 蓬家乔和大庄子金矿 Ar-Ar 法年龄图解

(a) BP99-65 号石英样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱; (b) BP99-65 号石英样品 Ar-Ar 等时线; (c) BP99-07 号石英样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱; (d) BP99-07 号石英样品 Ar-Ar 等时线; (e) BP99-66 号黑云母样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱; (f) BP99-66 号黑云母样品 Ar-Ar 等时线; (g) DZ-004 号石英样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱; (h) DZ-004 号石英样品 Ar-Ar 等时线

的 HCl, 使沉淀物全部溶解, 用阳离子交换树脂分离出高纯度的 Rb 和 Sr. 同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所 Rb-Sr 同位素实验室的动态多接收固体质谱(VG354)上完成, 质

谱分析过程中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.119$ 校正; 全部流程本底 Rb 和 Sr 均小于 $n \times 10^{-10}$ g/g. 与样品同时分析的国际标样 NBS607 的测试结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 1.200325 \pm 0.000011$. 黄铁矿 Rb-Sr 同位素分析结果见表 6 和图 3.

表 6 发云乔金矿黄铁矿 Rb 和 Sr 分析结果^{a)}

样号	测试对象	Rb/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Sr/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} (2\sigma)$
FA9-2	黄铁矿	1.651	3.970	1.2020	0.715260 ± 0.000032
FA9-5		2.114	3.897	1.5680	0.715676 ± 0.000017
FA5-2		2.709	3.488	2.2440	0.716908 ± 0.000011
FA9-1		1.294	8.081	0.4626	0.713636 ± 0.000017

a) NBS-607 测试结果为: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 1.200325 \pm 0.000011 (2\sigma, n = 6)$; $\lambda^{87}\text{Rb} = 1.42 \times 10^{-11}/\text{a}$; 测试由中国科学院地质与地球物理研究所 Rb-Sr 同位素实验室完成

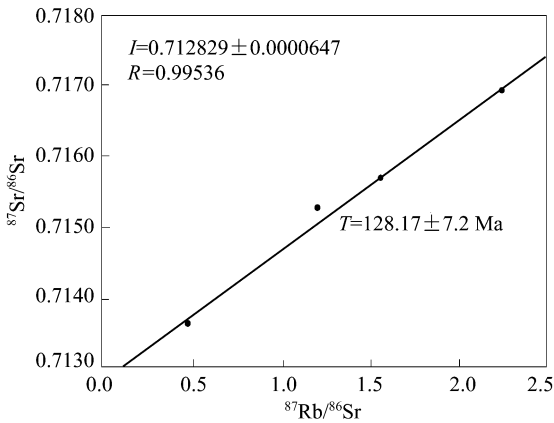


图 3 发云乔金矿黄铁矿 Rb-Sr 等时线图解

3 分析结果

3.1 蓬家乔金矿 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄

BP99-65 号样年龄谱显示了低温和高温阶段气体的视年龄大、中温阶段视年龄小的特点(图 2(a)). 在低于 680°C 条件下, 样品释放出的 ^{39}Ar 占 4.31%, 其视年龄值为 $149.88 \sim 134.86$ Ma. 由于此阶段石英含有流体包裹体(其中含 K, Cl), 故该年龄值无地质意义. 当温度由 680°C 升至 970°C , 样品释放出的 ^{39}Ar 占 76.75%, 其视年龄值最低, 为 $117.6 \sim 119.42$ Ma, 平均 118.42 ± 0.25 Ma. 当温度由 1050°C 持续升至 1550°C , 样品释放出的 ^{39}Ar 占 18.71%, 其视年龄值逐步升高, 为 $134.91 \sim 152.72$ Ma. 从而形成一条似“马鞍型”的年龄谱^[12,13], “马鞍型”的年龄谱是测试样品中含有过剩 Ar 的明显标志. 所以, 低温和高温部分气体给出的视年龄, 不具地质年代学意义, 而年龄谱中最小的视年龄代表了石英的形成时代. 利用 BP99-65 石英样品在 $680 \sim 1050^\circ\text{C}$ 4 个中温阶段的数据点, 求得等时线, 其相关系数 $R = 1.00000$, 年龄为 117.03 ± 0.13 Ma(图 2(b)). 该值与坪年龄中的最低值 117.6 ± 1.37 Ma 和平均值 118.42 ± 0.25 Ma 非常接近, 反映了 BP99-65 石英年龄真实可信. 由该等时线求得的初始值($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)_i = 298.4 ± 0.40 , 与尼尔值^[14](295.5 ± 5) 基本一致, 受过剩 Ar 的影响很小, 证明该坪年龄准确可靠.

BP99-07 号样也具备一条似“马鞍型”的年龄谱, 年龄谱中最小的视年龄为 $123 \sim 118.70$ Ma, 平均值为 120.53 Ma(图 2(c)). 利用 5 个中温阶段的数据点, 求得等时年龄为 117.33 ± 0.15 Ma(图 2(d)). 该值与坪年龄中的最低值 118.70 ± 1.68 Ma 和平均值 120.53 Ma 非常接近. 由该等时线求得的初始值($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)_i = 304.6 ± 0.85 , 比尼尔值稍大, 受少量过剩 Ar 的影响, 等时线年龄比坪年龄能更好地代表石英结晶年龄.

BP99-66 号黑云母样在温度高于 900°C , 直至 1450°C 样品释放出的 ^{39}Ar 占 93.96%, 其视年龄值几乎不变, 保持在 $116.60 \sim 119.07$ Ma 之间, 形成一稳定的年龄坪, 其平均值为 117.49 ± 0.25 Ma(图 2(e)). 这是一条理想的年龄谱, 反映岩石冷却迅速, 没有经历过其他热作用影响^[13], 该

年龄值代表了煌斑岩的结晶和冷却年龄. 利用高于 900℃ 7 个数据点, 求得相关系数(R)为 0.9999 和等时线年龄(T_i)为 116.83 ± 0.36 Ma(图 2(f)). 由该等时线求得的初始值($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) $_i = 300.8 \pm 8.58$, 与尼尔值基本一致, 受过剩 Ar 的影响很小, 证明该年龄准确可靠.

3.2 大庄子金矿 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄

DZ-004 号样年龄谱显示了低温和高温阶段气体的视年龄大、中温阶段视年龄小的特点(图 2(g)). 其视年龄最低值为 115.37~118.79 Ma, 平均值 117.39 Ma. 利用 4 个中温阶段的数据点, 求得等时线年龄为 115.62 ± 1.01 Ma(图 2(h)). 该值与坪年龄中的平均值 117.39 Ma 非常接近. 由该等时线求得的初始值($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) $_i = 297.14 \pm 4.14$, 与尼尔值(295.5 ± 5)基本一致, 受过剩 Ar 的影响很小, 证明该坪年龄准确可靠.

3.3 发云乔金矿 Rb-Sr 等时线年龄

黄铁矿 Rb-Sr 等时线图(图 3), 4 个样品点拟合成一条线性关系良好的等时线, 其相应的等时线年龄和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值分别为 128.17 ± 7.2 Ma 和 0.712829 ± 0.0000647 . 该初始值与胶东北部金矿($0.7014\sim 0.7163$)^[4]基本一致, 反映二者成矿物源的相似性.

4 讨论

4.1 实验数据的准确性与可靠性

石英中 K 含量极低, 而且一般含有包体成分的干扰, 用常规 K-Ar 稀释法很难准确测定其同位素地质年龄. 而利用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 快中子活化定年法, 通过石英 $^{39}\text{K}(n, p)^{39}\text{Ar}$ 核反应, 把微量 K 的化学分析转化为 ^{39}Ar 静态质谱法测定, 从样品挑选、样品用量、照射时间、实验流程、质谱分析及数据处理等环节严格把关, 使 Cl 和过剩 Ar 的干扰降低到最低限度, 所获得的测试实验准确可靠^[11].

蓬家乔金矿区两类矿石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄完全一致($117.33\sim 118.42$ Ma), 说明是同一成矿阶段的产物, 这和地质露头观察的情况相一致. 该热液成矿阶段的石英黄铁矿组合, 充填在由大理岩质构造角砾之间时, 便构成角砾状矿石; 若充填在长英质碎裂岩中时, 便构成为细脉-网脉状矿化, 二者在空间上紧密共生. 矿石与煌斑岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法年龄也基本一致, 说明二者的形成时代相同. 实际上, 煌斑岩脉与金矿体在宏观上相伴平行分布, 也证实了上述测年结果的可靠性. 孙丰月等^[15]曾测得一蚀变矿物绢云母 K-Ar 年龄, 其结果为 100.59 ± 1.96 Ma, 与本文测试的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄值相比偏小, 可能反映了成矿期后热事件扰动的年龄. 朱大岗等^[16]曾对大庄子金矿区 3 条煌斑岩脉进行 K-Ar 法测年, 其表面年龄为 $127 \pm 1.2 \sim 106 \pm 1.0$ Ma, 而本文的测试值更为准确.

研究表明, 黄铁矿中 Rb 和 Sr 等微量元素主要以类质同象形式赋存在矿物晶格中. 在成矿过程中, 黄铁矿结晶温度高($227\sim 320^\circ\text{C}$)、结晶速度快并形成完好晶形, 从而保持良好的封闭状态. 所以利用载金矿物黄铁矿 Rb-Sr 同位素直接测定发云乔金矿主成矿期成矿时代是可靠的办法之一.

4.2 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和 Rb-Sr 年龄意义

由蓬家乔和大庄子金矿石英 Ar-Ar 年龄可知这两个矿床的成矿年龄分别为 $117.33\sim 118.42$ 和 117.39 Ma, 发云乔金矿黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 128.49 ± 7.2 Ma. Rb-Sr 等时线与 Ar-Ar 年龄在误差范围内接近一致. 由此推测, 胶莱盆地北缘金矿形成于 $117\sim 128$ Ma 期间.

蓬家乔等金矿位于胶东地区盆(莱阳盆地)山(胶北隆起)转换地带, 搞清该矿床的形成时代不仅对于认识区域成矿规律, 而且对于研究盆山演化及其对成矿作用的控制也具有重大意义.

已知青山组火山岩的形成时代为早白垩世晚期(黑云母 K-Ar 年龄为 118.6~127.5 Ma)^[17], 该火山岩为陆内裂谷环境火山喷发的产物. 另外, 在胶莱盆地东北边缘还有燕山晚期壳-幔混合型花岗岩(如院格庄花岗岩, Sm-Nd 等时线年龄为 120 Ma)的侵入^[15]. 可见处于盆地周边拉张环境下的火山-岩浆活动与金矿化有一定的成因关系. 胶东金矿区与世界许多金矿区(如西澳、加拿大、中国小秦岭等)一样, 煌斑岩的形成时代变化范围不大. 胶东地区煌斑岩的形成时代在 88~150 Ma 之间^[15], 与金成矿时代接近, 两者属同一构造岩浆活动的产物. 根据与主成矿期的时间关系, 可进一步划分为成矿前、成矿期和成矿后煌斑岩.

胶莱盆地北缘金矿成矿年龄与胶西北地区的焦家、玲珑等金矿的形成时代(115~126 Ma)相近, 说明它们是同一成矿期不同地质背景条件下的产物, 同时有力地说明和验证了胶东地区在晚燕山期(120 ± 10 Ma 左右)处于区域构造调整和转换、岩石圈强烈减薄的重要时期^[18~20], 也正是发生成矿大爆发的有利时期.

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所 Ar-Ar 法定年实验室桑海清和王英菊高级工程师所做的实验工作. 成文过程中还得到裴荣富院士、周新华研究员的指导和帮助, 在此一并表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- 1 张竹茹, 陈世桢. 胶莱盆地中新类型金矿的发现. 科学通报, 1994, 39(20): 1917
- 2 沈远超, 谢宏远, 李光明, 等. 山东蓬家乔金矿的基本地质特征及找矿方向. 地质与勘探, 1998, 34(5): 3~7
- 3 骆万成, 伍勤生. 应用蚀变矿物测定胶东金矿的成矿年龄. 科学通报, 1987, 32(16): 1245~1248
- 4 李华芹, 刘家齐, 魏 林. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用. 北京: 地质出版社, 1993. 1~126
- 5 邱华宁, 戴樟漠, 李朝阳, 等. 滇西上芒岗金矿床 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄测定. 科学通报, 1994, 39(3): 257~260
- 6 Reynolds P, Ravenhurst C, Zentilli M, et al. High-precision ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of two consecutive hydrothermal events in the Chuquicamata porphyry copper system, Chile. Chemical Geology, 1998, 148(1-2): 45~60
- 7 Perkins C, McDougall I, Claoue-Long J, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar and U-Pb geochronology of the Geonumbla porphyry Cu-Au deposits, New South Wales, Australia. Econ Geol, 1994, 85: 1808~1824
- 8 苗来成, 罗镇宽, 黄佳展, 等. 山东招掖金矿带内花岗岩类侵入体锆石 SHRIMP 研究及意义. 中国科学, D 辑, 1997, 27(3): 207~213
- 9 杨进辉, 周新华. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代. 科学通报, 2000, 45(14): 1547~1553
- 10 陆克政, 戴俊生. 胶莱盆地的形成与演化. 东营: 石油大学出版社, 1994. 1~132
- 11 桑海清, 王松山, 胡世玲, 等. 石英的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年方法及 Ar 同位素质谱分析. 质谱学报, 1994, 15(2): 17~27
- 12 Lanphere M A, Dalrymple G B. Identification of excess ⁴⁰Ar by the ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectrum technique. Earth Planet Sci Lett, 1976, 32: 141~148
- 13 Zeitler P K, Gerald D F. Saddle-shaped ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectra from young, micro-structurally complex potassium feldspars. Geochim Cosmochim Acta, 1986, 50: 1185~1199
- 14 Nier A O. A redetermination of the relative abundances of the isotopes of carbon, nitrogen, oxygen, argon, and potassium. Phys Rev, 1950, 77: 789~793
- 15 孙丰月, 石准立, 冯本智. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿. 长春: 吉林人民出版社, 1995. 1~170
- 16 朱大岗, 张振江. 胶东大庄子金矿地质特征. 矿物岩石地球化学通报, 1998, 17(1): 9~12
- 17 李守军. 山东侏罗-白垩纪地层划分与对比. 石油大学学报, 1998, 22(1): 37~43
- 18 任纪舜. 中国东部的构造格局和动力演化. 地质研究, 1997, 29-30: 43~55
- 19 裴荣富. 金属成矿省地质历史演化与特大型矿床. 矿床地质, 1997, 16(2): 169~170
- 20 邓 军, 翟裕生, 杨立强, 等. 成矿系统的构造演化和动力学——以山东胶东金矿集中区为例. 地质前缘, 1999, 2: 1~9