

胶东乳山含金石英脉型金矿的成矿年龄：热液锆石 SHRIMP 法 U-Pb 测定

胡芳芳 范宏瑞* 杨进辉 万渝生 刘敦一 翟明国 金成伟

(中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室, 北京 100029; 中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心, 北京 100037. *联系人, E-mail: fanhr@mail.igcas.ac.cn)

摘要 胶东乳山金矿含金石英脉中的锆石具有较高的普通铅($^{206}\text{Pb}_c = 2.00\% \sim 15.88\%$)和 Th/U 比值(0.31~1.35), 其壳-幔部捕获的流体包裹体与含金石英脉中的流体包裹体类型相同, 表明锆石形成于高 Th/U 比值的成矿热液环境. SHRIMP 法 U-Pb 测定结果表明, 含金石英脉中热液锆石的成矿年龄为 $117 \pm 3 \text{ Ma}$, 与前人在胶东其他地区金矿床获得的成矿年龄相接近, 代表了乳山金矿的热液成矿时间; 围岩昆崙山二长花岗岩中锆石的成矿年龄为 $160 \pm 3 \text{ Ma}$, 表明金矿床形成与二长花岗质岩浆侵位事件无直接关系. 采用 SHRIMP 法直接测定含金石英脉中热液锆石的 U-Pb 年龄, 可用来限定热液成因金矿床的成矿时代.

关键词 热液锆石 SHRIMP U-Pb 法 成矿年龄 含金石英脉 乳山金矿 胶东

成矿年代学是矿床学研究最重要的内容和前沿课题之一, 而成岩、成矿精确年代谱系的确定是探讨内生热液矿床与区域岩浆活动和构造变形之间成因关系的基础.

胶东金矿密集区是中国最大的黄金产地, 也是环太平洋中、新生代金成矿系统的重要组成部分^[1]. 前人将胶东金矿床划分为玲珑式石英脉型、焦家式蚀变岩型和蓬家乔与发云乔式盆地边缘破碎带型^[2, 3]. 不同研究者曾利用不同方法对胶东众多金矿进行过成矿年龄测定, 获得了一大批数据^[4-6], 但这些数据的质量(精度与准确度)参差不齐, 根据这些数据所获得的“成矿年龄”比较分散(从三叠纪至新生代). 近年来, Wang 等人^[7]、Yang 等人^[8]、张连昌等人^[9]、Zhang 等人^[10]及 Li 等人^[11]分别采用花岗岩中锆石 SHRIMP U-Pb 法、黄铁矿 Rb-Sr 等时线法和石英与绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法成功地获得了胶东主要类型金矿床的成矿年龄, 但主要研究对象都集中在胶东西北部, 而对东部牟平-乳山金成矿区金矿很少涉及或尚未获得满意的数据. 本文通过 SHRIMP 法测定乳山金矿含金石英脉和围岩二长花岗岩中锆石 U-Pb 年龄, 并结合锆石特征、微区组分和流体包裹体性质, 探讨其地质意义、金成矿作用时间及与围岩花岗岩岩浆活动间的成因联系.

1 地质背景和样品描述

山东省乳山市乳山金矿(原称金青顶金矿)是目

前我国单脉金储量最大的矿床(>30 吨 Au), 它位于胶东牟平-乳山金矿区中部, 其西侧为蓬莱-栖霞和招远-莱州金成矿区, 东侧为著名的苏-鲁超高压变质带. 该矿床为一典型的黄铁石英脉型金矿, 矿体产于中生代昆崙山复式花岗岩体内(图 1), 受 NNE 及 NE 向两组断裂复合控制. 昆崙山复式岩体在矿区的东南部被中生代晚期三佛山似斑状花岗岩侵入, 西侧与太古界-元古界胶东群变质岩接触. 在矿区的花岗岩体内, 可见到少量呈孤岛状分布的胶东群残留体, 其岩性多为斜长角闪片麻岩, 并见有多条与金矿脉体时空关系密切的煌斑岩脉产出.

乳山金矿的成矿具有多期、多阶段的特点, 从早至晚可分为:(少)黄铁矿-石英、石英-黄铁矿、多金属硫化物和石英-碳酸盐 4 个阶段, 其中石英-黄铁矿和多金属硫化物阶段为金主沉淀成矿期. 含金矿体主要由黄铁石英脉、铅锌多金属硫化物石英脉和菱铁石英脉 3 种矿脉复合叠加而成, 其中黄铁石英脉为主矿体, 在中上部呈较规则的单脉, 与围岩边界清晰. 随深度增加在主矿脉两侧产出许多石英细脉, 局部可形成细脉浸染状矿化带. 矿石类型为黄铁石英型和多金属硫化物型, 金属矿物主要为黄铁矿, 其次有黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和菱铁矿等. 金主要以自然金产出, 其次为银金矿, 其赋存状态以裂隙金为主. 围岩蚀变具有分带特征, 不同蚀变带之间呈渐变关系, 以脉体为中心向两侧依次对称出现有



图1 胶东牟平-乳山金矿区地质略图(据文献[2]改绘)

黄铁绢英岩带、钾化花岗岩带及未蚀变的花岗岩。

本次研究在乳山金矿井下-485 m中段采集了重约15 kg的新鲜含金石英脉样品(03R102),在矿区南侧(图1)采集了金矿体的直接围岩崆嵒山二长花岗岩样品(03R097),从中分选出可供SHRIMP定年的锆石。含金石英脉主要由石英、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和自然金组成,从中选出锆石40余粒,其粒径大多较小,30~150 μm,极个别长径可达350 μm以上,颜色呈浅米黄色,主要为长柱状-等粒状,少部分为半自形至它形,长柱状锆石长宽比约为2:1。透射光下,部分锆石干净无裂纹,而有些锆石内裂纹切穿了整个颗粒;矿体围岩崆嵒山二长花岗岩的主要岩性为黑云母二长花岗岩,岩石呈中粒等粒结构,弱片麻状或块状构造。主要造岩矿物为石英、斜长石、钾长石、黑云母和白云母,副矿物主要为榍石、磷灰石、磁铁

矿、绿帘石等。花岗岩中锆石数量较多,呈淡棕色,清晰透明、自形,粒径明显相对较大,80~300 μm,个别长径>300 μm。锆石形态为简单的四方柱或四方双锥,柱面和锥面平直且发育完善,长宽比平均为4:1,明显反映出岩浆结晶锆石的一般特点。可以看出,崆嵒山二长花岗岩中锆石在外形和个体大小上明显不同于含金石英脉中的锆石。

2 分析方法

锆石按常规方法分选,并在双目显微镜下挑纯。将每件锆石样品与实验室标准锆石置于环氧树脂内,研磨至锆石露出一半,抛光、清洗制成样品靶(具体制样方法参见文献[12]),以用于阴极发光(CL)研究及随后的激光Raman光谱测试和SHRIMP法U-Pb年龄测定。CL照像和激光Raman光谱测试分别在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室和流体包裹体实验室完成,SHRIMP法U-Pb年龄测定在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心SHRIMP上完成。锆石U-Pb分析选点以阴极发光图像为依据,原则上选择颗粒较大、自形、清晰锆石的无包体、无裂纹区进行分析,SHRIMP分析的详细流程和原理参见文献[13~15]。一次离子流强度约7.5 nA,加速电压约10 kV,样品靶上的离子束斑直径约25~30 μm,质量分辨率约5000(1%峰高)。应用澳大利亚国家地质调查局标准锆石TEM(417 Ma)进行元素间的分馏校正(interelement fractionation)[15],并用澳大利亚国立大学地学院标准锆石SL13(年龄572 Ma, U含量238 μg/g)标定待测锆石的U, Th和Pb含量。数据处理采用Ludwig SQUID 1.0[16]及ISOPLOT 3.0程序[17]。除了03R097样品的5.2分析点由于年龄非常不谐合而采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄外,其余数据点均采用²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄,其加权平均值具95%的置信度。

3 分析结果

乳山金矿含金石英脉(03R102)和崆嵒山二长花岗岩(03R097)样品中锆石的SHRIMP U-Pb分析结果列于表1,图2为部分代表性锆石CL图像、测试点位置及²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄或²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄值。

3.1 含金石英脉

对含金石英脉(03R102)中10颗锆石的10个点进行了SHRIMP法U-Pb年龄测定。CL图像显示,大部分锆石具有核边结构(如图2(a)~(i)),主要可分为两种类型:(1)核部和外侧有明显的界限,核部锆石的

表 1 胶东乳山金矿含金石英脉和昆嵛山花岗岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析结果^{a)}

点号	²⁰⁶ Pb _c /%	U /μg·g ⁻¹	Th /μg·g ⁻¹	²³² Th / ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* /μg·g ⁻¹	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma
03R102, 含金石英脉中锆石													
1.1	10.64	207	221	1.10	3.61	0.0280	83	0.0700	83	0.0181	3.9	116±5	< 0
2.1	1.63	493	453	0.95	33.80	0.0621	5.5	0.6740	6.0	0.0786	2.5	488±12	679± 120
3.1	3.42	1013	550	0.56	17.10	0.0306	19	0.0800	19	0.0190	2.5	121±3	< 0
4.1	6.30	473	404	0.88	7.72	0.0600	18	0.1480	19	0.0178	2.9	114±3	613± 400
5.1	4.54	501	178	0.37	7.90	0.0250	39	0.0600	39	0.0175	2.8	112±3	< 0
6.1	11.11	353	462	1.35	5.91	-	-	-	-	0.0174	3.3	111±4	< 0
7.1	2.00	487	147	0.31	7.93	0.0429	16	0.1100	16	0.0186	2.7	119±3	< 0
8.1	5.23	564	402	0.74	9.50	0.0386	22	0.0990	22	0.0186	2.8	119±3	< 0
9.1	15.88	660	455	0.71	13.60	0.0310	56	0.0870	56	0.0202	3.3	129±4	< 0
10.1	7.64	319	258	0.84	5.57	0.0390	59	0.1000	59	0.0188	3.7	120±4	< 0
03R097, 昆嵛山二长花岗岩中锆石													
1.1	3.56	266	23	0.09	6.01	0.0445	21	0.1560	21	0.0254	2.8	162±5	< 0
1.2	0.76	167	173	1.07	17.3	0.0614	4.0	1.0120	4.7	0.1194	2.6	727±18	655± 86
2.1	1.71	451	54	0.12	9.72	0.0459	9.1	0.1560	9.4	0.0247	2.6	157±4	< 0
3.1	1.71	356	129	0.37	7.67	0.0502	17	0.1710	17	0.0247	2.8	157±4	206± 400
4.1	1.82	878	95	0.11	19.5	0.0497	8.6	0.1740	9.0	0.0254	2.5	162±4	182± 200
5.1	0.65	1221	119	0.10	26.7	0.0488	4.2	0.1699	4.9	0.0253	2.4	161±4	138± 99
5.2	1.26	83	30	0.38	7.99	0.1446	4.1	2.2200	5.0	0.1114	2.9	681±19	2, 283± 70
6.1	5.76	169	14	0.09	3.75	0.0270	58	0.0890	58	0.0243	3.1	155±5	< 0
7.1	2.49	532	47	0.09	11.8	0.0399	16	0.1390	16	0.0253	2.6	161±4	< 0
8.1	2.26	159	44	0.28	3.98	0.0570	17	0.2230	17	0.0284	3.0	180±5	493± 380
9.1	1.44	723	63	0.09	16.10	0.0465	8.2	0.1640	8.5	0.0255	2.5	162±4	23± 200

a) 表内单个数据点误差为 1σ; Pb_c和Pb*分别表示普通铅和放射性成因铅; 应用实测 ²⁰⁴Pb 值进行普通铅校正; 普通铅比值采用 Stacey 等人 [18] 的模式值

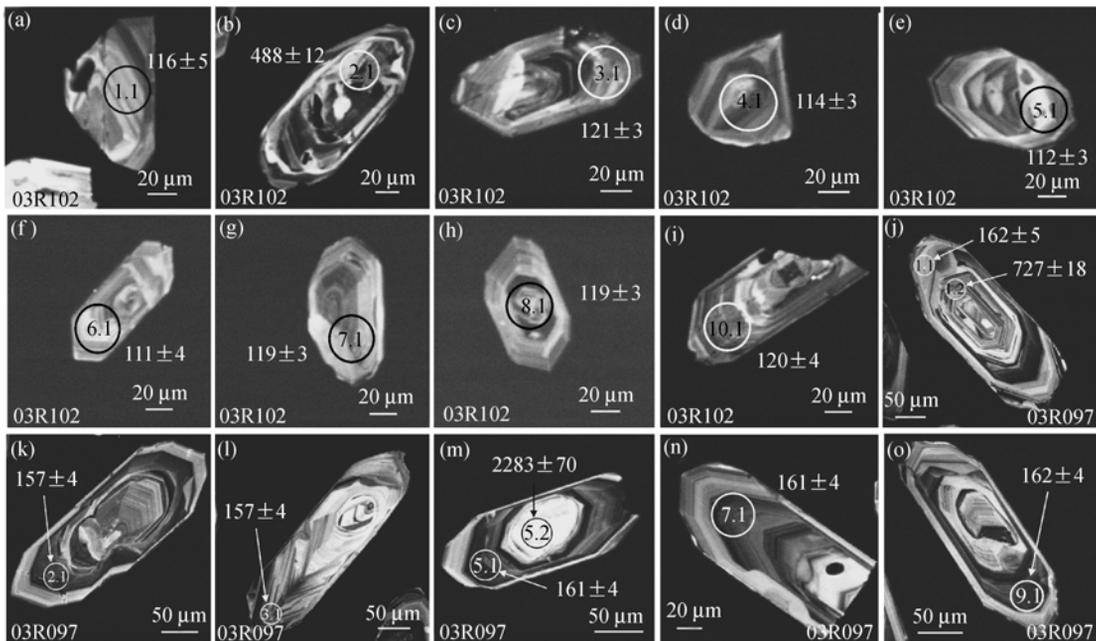


图 2 胶东乳山金矿含金石英脉中锆石((a)~(i))和昆嵛山二长花岗岩中锆石((j)~(o))CL 图像
圆圈标注为分析点位置及 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄((m)中 5.2 点为 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄), 圆圈直径约 30 μm

边部有非常明显的溶蚀结构(图 2(b)), 这种类型锆石的核部应为流体活动时捕获的围岩锆石, 并遭受到热液的溶蚀作用^[19], 高的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄 488 ± 12 Ma 也证明了这一点; (2) 也有“双层”结构, 核部具明显的振荡环带, 锆石边部的 CL 强度比核部强, 没有环带结构, 且局部出现边部穿插核部振荡环带的现象(图 2(c), (e)~(g)), 表明锆石核部是从流体中结晶出来的, 而边部可能与形成石英脉的晚期热液事件有关, 因而部分似有早阶段核的锆石(图 2(a), (c), (g)~(i)) 给出了稍老的一组表面年龄范围(116~121 Ma), 而从余下的 3 粒锆石则得出了另一组略年轻的表面年龄区间(111~114 Ma). 测试结果表明, 除 2.1 和 9.1 点外(表 1), 余下的 8 个数据点构成了一个较完好的相关年龄组, 在 Tera-Wasserburg 图解(图 3(a)) 上集中在谐合线上及附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄为 117 ± 3 Ma, MSWD=1.3(图 3(b)), 它代表了含金石英脉的形成年龄. 9.1 点给出的 129 ± 4 Ma 表面年龄值, 可能有核部岩浆锆石的混入.

含金石英脉锆石样品除 2.1 点普通铅含量较低 ($^{206}\text{Pb}_c = 1.63\%$) 外(表 1), 其他分析测试点的普通铅含量都很高, $^{206}\text{Pb}_c$ 含量范围为 2.00%~15.88%, 平均为 7.42%; 而 Th/U 比值也都较高, 为 0.31~1.35, 平均值为 0.76.

我们在含金石英脉锆石中还找到了流体包裹体, 它位于一长柱状锆石的壳-幔部(图 4), 大小约 $6 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$. 包裹体激光 Raman 探针测试表明, 在 Raman 谱图上除了寄主矿物锆石的特征峰(1005, 973, 438, 353, 223 和 201 cm^{-1}) 和 SHRIMP 样品靶粘附剂环氧树脂的峰(1465, 2935 和 3069 cm^{-1}) 外, 还出现了液相 CO_2 特征峰(1386 和 1281 cm^{-1}) 和宽泛的液相 H_2O 峰($3310 \sim 3610 \text{ cm}^{-1}$) (图 5), 证实该流体包裹体中捕获有 CO_2 和 H_2O 相. 从包裹体的存在形式(图 4) 看, 该流体包裹体应属原生成因, 这说明锆石(特别是壳-幔部) 在其生长过程中处于富 CO_2 - H_2O 流体的环境, 而流体包裹体中捕获的流体相与乳山及胶东地区石英脉和蚀变岩型金矿成矿热液性质(低盐度 H_2O - CO_2 -NaCl 流体) 是一致的^[20]. 由于包裹体个体较小及其他条件限制, 目前尚无法对其进行均一温度等测试.

3.2 崑崙山二长花岗岩

CL 图像表明, 崑崙山二长花岗岩中的锆石具有明显的岩浆振荡环带结构, 并多有老的锆石核存在(图 2(j)~(o)). 此次共进行了 9 粒锆石的 11 点分析, 测

试点一般位于振荡环带处, 以获得岩浆结晶年龄. 其中的 8 个数据点构成了一个较完好的相关年龄组, 在 U-Pb 一致曲线上集中分布在谐合线上及附近(图 6), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄为 160 ± 3 Ma (MSDW=0.42); 而两个位于锆石核部(测试点 1.2 和 5.2) 的测试结果分别给出了较老的年龄, 1.2 点(图 2(j)) 采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (727 ± 18 Ma), 5.2 点(图 2(m)) 年龄非常不谐合, 采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 (2283 ± 70 Ma), 这两个较老的表面年龄值显示了古老残留锆石的年龄信息.

从测试结果来看(表 1), 二长花岗岩中锆石样品的普通铅含量和 Th/U 比值明显低于含金石英脉中锆石, 具有岩浆振荡环带的岩浆成因锆石的 9 个分析点 $^{206}\text{Pb}_c$ 含量范围为 0.65~5.76%, 平均为 2.38%; Th/U 比值为 0.09~0.37, 平均值为 0.15.

4 讨论

4.1 含金石英脉中锆石的热液成因及乳山金矿的成矿时代

近年来, 国内外学者对热液锆石的成因做了一些研究工作^[21~24], 认为 Zr 在热液体系中的活动性可以增强. 由于流体中的 F⁻ 和 Cl⁻ 是 Zr 元素的重要载体, 磷酸根、硫酸根和碳酸根阴离子也可以和 Zr 形成配位体, 锆石可以在较低的温压条件下生长. Clauoué-Long 等人^[25, 26] 及 Kerrich 等人^[24] 曾对加拿大 Abitibi 绿岩带金矿石英脉中热液锆石做过系统研究, 认为石英脉中锆石是在 260~380 °C, 约 200 MPa 的条件下与热液矿物如石英和金等同时形成的, 并在这些锆石中找到了自然金颗粒及原生流体包裹体. Dubińska 等人^[27] 对波兰 Sudetic 蛇绿岩与蛇纹石化有关的热液锆石研究后发现, 这些锆石的生长条件约为 270~300 °C 及 100 MPa. Dempster 等人^[28] 在苏格兰高地浅变质绿片岩相板岩薄片中发现大量颗粒细小(<10 μm)、它形、无环带的新生锆石, 并认为它们是在温度低于 350 °C 下结晶形成的. 这些锆石形成的温度和压力区间与胶东及乳山含金石英脉的形成条件极为相似^[20], 证明中温(热液)条件下是可以生成锆石晶体的.

Watson 等人^[29] 曾用人工实验方法证明, 在低温含 Pb 或 P 流体中生长的锆石, 其铅的相容性增强, 指示了热液成因锆石中普通铅含量高的原因, Hoskin 等人^[30] 认为普通铅含量高是判别锆石热液成因的主要特征之一. 由于乳山金矿含金石英脉中有方铅矿和

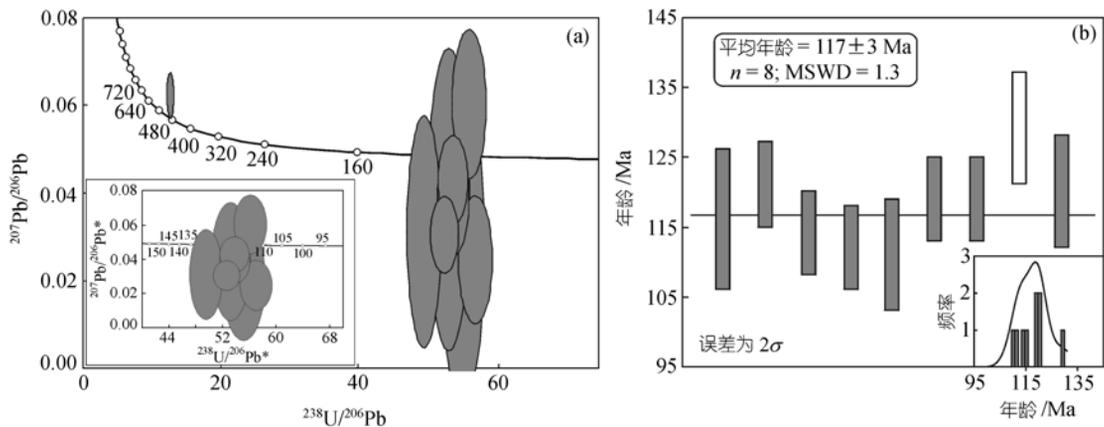


图 3 含金石英脉中锆石 U-Pb 谐合图(a)及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值(b)

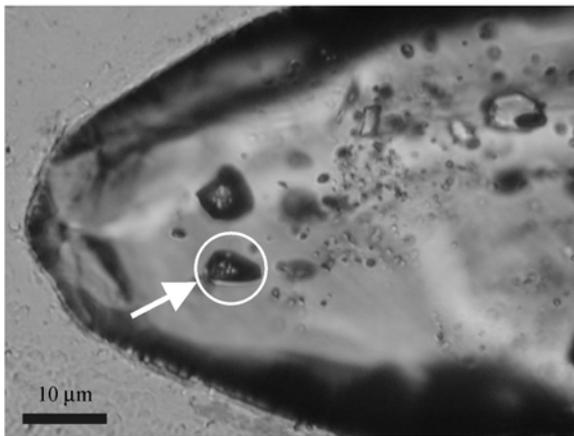


图 4 含金石英脉中锆石壳-幔部捕获的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 流体包裹体(箭头所指处)

闪锌矿的产出, 孙国曦等人^[31]也曾在矿区井下-425 m 中段的含金石英脉薄片中发现独居石单矿物, 可以推断成矿流体中Pb和P的含量很高. 因此, 含金石英脉锆石中普通铅含量高很可能是因为锆石生长过程中成矿流体中的Pb加入造成的. 通常认为锆石的Th/U比值主要受外在因素(如流体成分、同结晶的其他矿物等)的影响^[32-34], Möller等人^[35]认为锆石的Th/U比能反映其生长环境, 高Th/U比值(接近 1)说明体系处于开放环境中, 可能与高U矿物(如磷钇矿)的分解有关. 乳山金矿含金石英脉中锆石Th/U比值较高(平均为 0.76), 说明锆石是在高Th/U比的热液环境中形成的.

乳山金矿含金石英脉中锆石具有较高的普通铅含量($^{206}\text{Pb}_c = 2.00\% \sim 15.88\%$)和Th/U比值(0.31~1.35),

并且捕获有与金成矿热液性质一致的流体包裹体, 证明这些锆石是在高Th/U比的成矿热液条件下形成的, SHRIMP法锆石U-Pb平均年龄 $117 \pm 3 \text{ Ma}$ 可代表该矿床的热液成矿时代. Wang等人^[7]对胶东招远-莱州金矿带成矿前花岗岩和成矿后脉体中锆石进行SHRIMP U-Pb年龄测定后认为, 金的成矿时代介于126~120 Ma之间. Yang等人^[8]对招远玲珑石英脉型金矿黄铁矿Rb-Sr法测定获得的金成矿年龄为 123~122 Ma. 张连昌等人^[9]对胶莱盆地边缘破碎带型蓬家乔、大庄子和发云乔金矿 $^{40}\text{Ar}\text{-}^{39}\text{Ar}$ 和Rb-Sr年龄测定获得的结果分别为 117~118, 117 和 $128 \pm 7 \text{ Ma}$. 最近, Zhang等人^[10]和Li等人^[11]分别对招远-莱州金矿带上的仓上、焦家、新城和望儿山蚀变岩型金矿进行了 $^{40}\text{Ar}\text{-}^{39}\text{Ar}$ 年龄测定, 获得的成矿年龄为 119~121 Ma. 我们此次获得的乳山金矿成矿年龄 $117 \pm 3 \text{ Ma}$ 与上述在胶东西北部地区获得的金成矿年龄值相近或略稍年轻, 说明它们是在同一成矿-热事件、不同构造背景下形成的. 这也验证了胶东地区在 $120 \pm 10 \text{ Ma}$ 处于构造机制转折、岩石圈强烈减薄及金爆发成矿这一关键期间的论断^[36]. 因此, 用含金矿脉中热液锆石的SHRIMP U-Pb法限定脉状金矿的成矿时代, 为确定金矿床的形成年龄开辟了新的途径, 它有望成为研究金矿床形成时代更为精确可靠的方法之一.

4.2 昆崙山二长花岗岩的形成时代及其与金矿的关系

乳山金矿的直接围岩-昆崙山二长花岗岩的侵位时间为 $160 \pm 3 \text{ Ma}$, 与从含金石英脉中锆石获得的年龄相差较大, 它应代表二长花岗岩浆的结晶年龄, 即

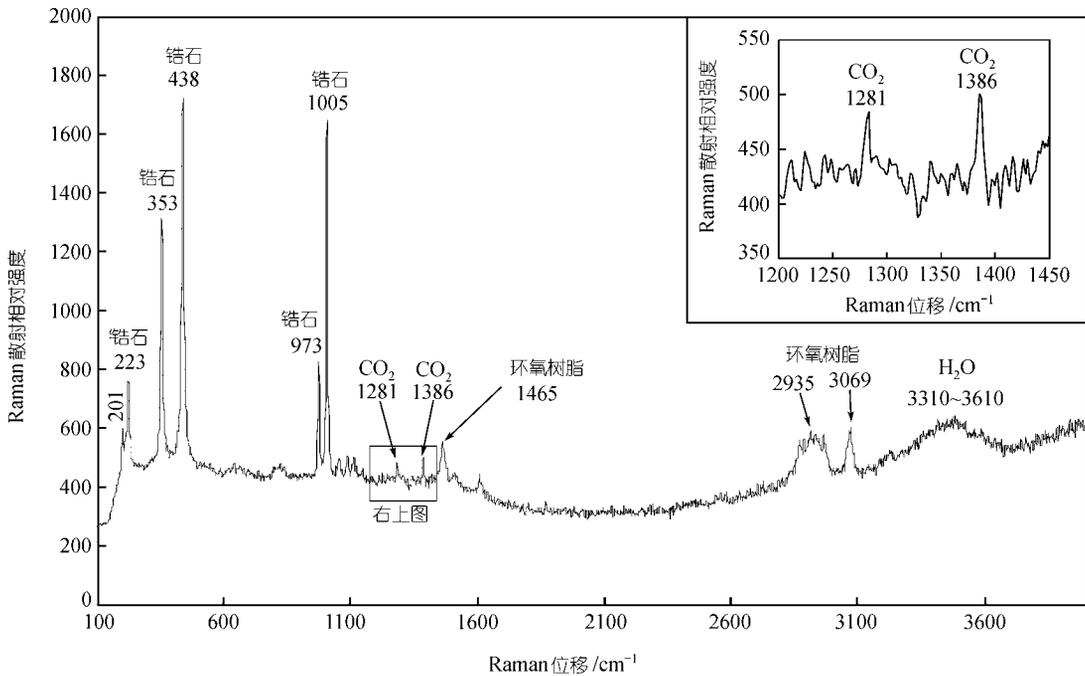


图5 含金石英脉中锆石流体包裹体激光拉曼光谱图

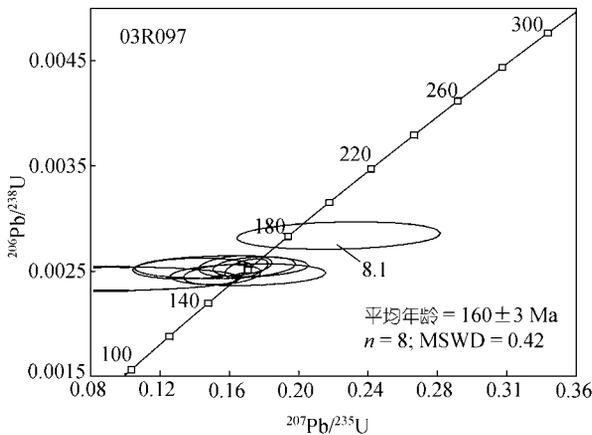


图6 昆崙山花岗岩中锆石 U-Pb 一致曲线图

乳山金矿围岩花岗岩的侵位时代。昆崙山二长花岗岩中锆石形态特征、普通铅含量及Th/U比值与含金石英脉中锆石有显著差异。此外，乳山金矿的成矿时代与围岩二长花岗岩的成岩时间存在着约40 Ma的时差，而Cathles等人^[37]和Henry等人^[38]的研究表明由单一侵入体引起的岩浆热液活动时间最长为小于1 Ma，即使考虑岩浆在深部侵位的缓慢冷却效应也不会超过10 Ma。因此，乳山金矿床的形成与这期二长花岗

岩的岩浆侵位事件无直接关系。

Claoué-Long等人^[25]利用SHRIMP U-Pb法对加拿大Abitibi绿岩带金矿石英脉中热液锆石进行了SHRIMP法U-Pb年龄测定，认为含金石英脉的形成年龄为2680 Ma，晚于侵入体约20 Ma。李惠民等人^[39]用同位素稀释法对冀西北东坪金矿含金石英脉中热液锆石进行了U-Pb定年探索工作，获得了350 Ma的成矿年龄，晚于围岩石英二长岩60 Ma。此次我们利用热液锆石SHRIMP U-Pb法也成功获得了乳山金矿的成矿年龄，比围岩昆崙山二长花岗岩的岩浆侵位年龄晚约40 Ma。显然，热液锆石与寄主侵入岩锆石在U-Pb年龄上存在着明显差异，两者之间在时间-空间上的成因关系值得进一步研究。

昆崙山二长花岗岩中个别锆石的核部给出了 727 ± 18 Ma的表面U-Pb年龄值(表1)，Guo等人^[40]在昆崙山岩体中也曾获得过一批700~800 Ma的继承锆石U-Pb年龄，并认为昆崙山花岗岩主要源自扬子陆壳物质的低程度部分熔融。郑永飞等人^[41]对大别-苏鲁造山带不同类型超高压变质岩中低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石的U-Pb定年结果表明，其岩浆岩原岩侵位时代为新元古代，扬子板块北缘新元古代岩浆活动主要集中在

700~800 Ma. 这些结果指示, 胶东地区与热液金矿床有关的中生代花岗岩与大别-苏鲁造山带超高压变质火成岩在原岩时代上具有一致性, 两者可能具有一定的成因联系, 这有待作进一步探讨.

5 结论

() 乳山金矿含金石英脉中锆石含有较高的普通铅和 Th/U 比值, 捕获有与成矿热液性质相同的 CO₂-H₂O 流体包裹体, 表明这些锆石是在高 Th/U 比的成矿热液环境中形成的.

() 含金石英脉中锆石 SHRIMP 法 U-Pb 年龄为 117 ± 3 Ma, 代表了金矿床的热液成矿时代. 该年龄与前人在胶东其他地区获得的金成矿年龄相近, 表明胶东不同类型金矿是在同一成矿-热事件、不同构造背景下形成的. 直接测定热液成因锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄可用于限定热液成因石英脉型金矿床的成矿作用及其相关热事件的时间.

() 锆石 SHRIMP 法 U-Pb 年代学研究表明, 崑崙山二长花岗岩的侵位时间为 160 ± 3 Ma, 它与含金石英脉中锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄相差约 40 Ma, 表明乳山金矿床的形成与围岩二长花岗质岩浆侵位事件无直接关系.

致谢 野外工作中得到山东金洲矿业集团公司领导和地质测量科人员的大力协助; 在锆石制样和测试过程中, 中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心和中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室的工作人员曾付出辛勤的劳动; 成文过程中, 陈福坤博士、郑永飞教授、郭敬辉研究员和李曙光院士等提出了有益的建议, 特别是 2 位匿名审稿人对本文提出了许多宝贵的修改意见, 在此一并致以衷心的感谢. 本工作受国家自然科学基金(批准号: 40273024)、国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G1999075502)及中国科学院知识创新工程项目(批准号: KZCX1-07)资助.

参 考 文 献

- 1 Goldfarb R J, Phillips G N, Nokleberg W J. Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific Rim. *Ore Geol Rev*, 1998, 13: 185~218[DOI]
- 2 杨敏之, 吕古贤. 胶东绿岩带金矿地质地球化学. 北京: 地质出版社, 1996. 120~196
- 3 沈远超, 谢宏远, 李光明, 等. 山东蓬家矿金矿的基本地质特征及找矿方向. *地质与勘探*, 1998, 34(5): 3~7
- 4 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
- 5 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. 83~90
- 6 张振海, 张景鑫, 叶素芝. 胶东金矿同位素年龄的厘定. 北京: 地震出版社, 1994. 1~56
- 7 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. *Ore Geol Rev*, 1998, 13: 275~291[DOI]
- 8 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: 711~714[DOI]
- 9 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. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(9): 727~734[摘要][PDF]
- 10 Zhang X O, Cawood P A, Wilde S A, et al. Geology and timing of mineralization at the Cangshang gold deposit, north-western Jiaodong Peninsula, China. *Miner Deposita*, 2003, 38: 141~153
- 11 Li J W, Vasconcelos P M, Zhang J, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar constraints on a temporal link between gold mineralization, magmatism, and continental margin transtension in the Jiaodong gold province, Eastern China. *J Geol*, 2003, 111: 741~751
- 12 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 2002, 48(增刊): 26~30
- 13 Compston W, Williams I S, Campbell I H, et al. Zircon xenocrysts from the Kambalda volcanics: Age constraints and direct evidence for the older continental crust below the Kambalda-Norseman greenstones. *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 76: 299~311[DOI]
- 14 Williams I S, Claesson S. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high-grade paragneisses from the Sveinnes, Scandavian Caledonides. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 97: 205~217
- 15 刘敦一, 简平, 张旗, 等. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据. *地质学报*, 2003, 77(3): 317~327
- 16 Ludwig K R. *Squid 1.02: A user manual*. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 2001, 2: 19
- 17 Ludwig K R. *User's Manual for Isoplot 3.00, a geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronological Center Special Publication No. 4, 2003: 25~32
- 18 Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model. *Earth Planet. Sci Lett*, 1975, 26: 207~221
- 19 Rubatto D, Gebauer D, Compagnoni R. Dating of eclogite-facies

- zircon: The age of Alpine metamorphism in the Sesia-Lanzo Zone (Western Alps). *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 167: 141~158[DOI]
- 20 Fan H R, Zhai M G, Xie Y H, et al. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. *Miner Deposita*, 2003, 38: 739~750[DOI]
- 21 Rubin J N, Henry C D, Price J G. Hydrothermal zircons and zircon overgrowths, Sierra Blanca Peaks, Texas. *Am Mineral*, 1989, 74: 865~869
- 22 Rubin J N, Henry C D, Price J G. The mobility of zirconium and other "immobile" elements during hydrothermal alteration. *Chem Geol*, 1993, 110: 29~47[DOI]
- 23 Sinha A K, Wayne D M, Hewitt D A. The hydrothermal stability of zircon: Preliminary experimental and isotopic studies. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56: 3551~3560[DOI]
- 24 Kerrich R, King R W. Hydrothermal zircon and baddeleyite in Val-d'Or Archean mesothermal gold deposits: Characteristics, compositions, and fluid-inclusion properties, with implications for timing of primary gold mineralization. *Can J Earth Sci*, 1993, 30: 2334~2351
- 25 Claoué-Long J C, King R W, Kerrich R. Archean hydrothermal zircon in the Abitibi greenstone belt: Constraints on the timing of gold mineralization. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 98: 109~128
- 26 Claoué-Long J C, King R W, Kerrich R. Reply to comment by F. Corfu and D. W. Davis on "Archean hydrothermal zircon in the Abitibi greenstone belt: Constraints on the timing of gold mineralization". *Earth Planet Sci Lett*, 1992, 109: 601~609[DOI]
- 27 Dubińska E, Bylina P, Kozłowski A, et al. U-Pb dating of serpentinization: hydrothermal zircon from a metasomatic rodingite shell (Sudetic ophiolite, SW Poland). *Chem Geol*, 2004, 203: 183~203[DOI]
- 28 Dempster T J, Hay D C, Bluck B J. Zircon growth in slate. *Geology*, 2004, 32: 221~224[DOI]
- 29 Watson E B, Cherniak D J, Harrison T M, et al. The incorporation of Pb into zircon. *Chem Geol*, 1997, 141: 19~31[DOI]
- 30 Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hancher J M, Hoskin P W O, eds. *Zircon, Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. Mineral Soc Amer, 2003, 53: 27~62
- 31 孙国曦, 胡文璋, 胡受奚, 等. 胶北乳山金矿含金石英脉中稀土矿物的发现及其意义. *南京大学学报(自然科学)*, 2002, 38(3): 446~456
- 32 Klotzli U S. Th/U zonation in zircon derived from evaporation analysis: A model and its implications. *Chem Geol*, 1999, 158: 325~333[DOI]
- 33 Rowley D B, Xue F, Tucker R D, et al. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and portolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 151: 191~203[DOI]
- 34 Vavra G, Schmid R, Gebauer D. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of maphibolite-to-granulite facies zircons: Geochronology of the Ivrea Zone(Southern Alps). *Contrib Mineral Petrol*, 1999, 134: 380~404[DOI]
- 35 Möller A, O'Brien P J, Kennedy A, et al. The use and abuse of Th-U ratios in the interpretation of zircon. *Geophysical Research Abstracts*, 2003, 5: 12113
- 36 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. *中国科学, D辑*, 2003, 33(10): 913~920
- 37 Cathles L M, Erendi A H J, Barrie T. How long can a hydrothermal system be sustained by a single intrusive event? *Econ Geol*, 1997, 92: 766~771
- 38 Henry C D, Elson H B, McIntosh W C, et al. Brief duration of hydrothermal activity at Round Mountain, Nevada, determined from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology. *Econ Geol*, 1997, 92: 807~826
- 39 李惠民, 李怀坤, 陆松年, 等. 用矿脉中热液锆石的 U-Pb 定年确定东坪金矿的成矿时代. *地球学报*, 1997, 18(增刊): 176~179
- 40 Guo J H, Chen F K, Siebel W, et al. Crustal structure and tectonics in post UHP collisional environment of the Su-Lu orogen, eastern China: Implications from SHRIMP zircon U-Pb dating on Jurassic granites. *Terra Nova*, 2004, 16 (in press)
- 41 郑永飞, 陈福坤, 龚冰, 等. 大别-苏鲁造山带超高压变质岩原岩性质: 锆石氧同位素和U-Pb年龄证据. *科学通报*, 2003, 48(2): 110~119[摘要][PDF]

(2004-03-09 收稿, 2004-04-19 收修改稿)