

热液锆石 U-Pb 定年与石英脉型金矿 成矿时代: 评述与展望^{*}

毕诗健^{1a, 1b, 1c}, 李建威^{1b, 1c}, 赵新福²

(1. 中国地质大学 a. 研究生院; b. 地质过程与矿产资源国家重点实验室; c. 资源学院, 武汉 430074;
2. 香港大学地球科学系, 香港)

摘 要: 石英脉型金矿床是最重要的金矿床类型之一, 对其成矿时代的精确测定却一直是一道难题。近年来同位素质谱技术的发展使得通过含金石英脉中热液锆石的 U-Pb 定年来精确限定石英脉型金矿床成矿时代成为可能。但含金石英脉中的锆石组成通常较复杂, 除有热液锆石外, 还可能出现从围岩中捕获的岩浆锆石和变质锆石。锆石成因和组成的这种复杂性, 经常导致所获得的 U-Pb 年龄数据难以解释或缺乏明确的地质意义。因此石英脉型金矿床锆石 U-Pb 定年的关键是有有效区分从成矿流体中直接生长的热液锆石和从围岩中捕获的岩浆锆石或变质锆石。通过锆石形貌、结构、微量元素组成(含稀土元素)、矿物或流体包裹体特征等的系统分析和综合研究, 可以较好地地区分含金石英脉中的不同成因锆石。在此基础上利用先进的 SHRIMP 或 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析技术对石英脉中的热液锆石进行微区原位定年, 可以获得石英脉型金矿床可靠的成矿年龄。

关键词: 热液锆石; 石英脉型金矿床; U-Pb 定年; 成矿年代

中图分类号: P618.51

文献标识码: A

文章编号: 1000-7849(2008)01-0069-08

1 问题的提出

成矿年代学是矿床学研究的重要内容。精确可靠的成矿年龄对于阐明构造—岩浆—流体—成矿之间的成因联系、恢复和构建区域成矿系统、全面理解区域大规模成矿并指导矿产勘查等都具有重要的理论和实践意义。但另一方面, 成矿年龄的精确测定是一件难度较大的工作, 主要原因在于: ①许多矿床缺乏适合于传统同位素定年方法的矿物; ②成矿后的构造热事件有可能导致蚀变矿物或矿石矿物中同位素体系的扰动, 使放射成因同位素部分或全部丢失, 此时获得的同位素年龄将比实际的成矿年龄年轻很多; ③在利用等时线年龄法定年时(如 Sm-Nd 等时线年龄), 由于初始同位素组成的均一化程度不够及同位素母体或(和)子体同位素的分馏程度较低, 难以获得可靠的等时线年龄; ④某些元素在矿物中的含量非常低, 现有仪器灵敏度和实验室条件(本底)难以精确测定样品中这些元素的同位素组成。这些困难使得要精确测定各类矿床的形成年龄并不容易, 即使在一些研究程度较高的地区, 对于某些矿床的成矿时代仍然难以达成一致的认识^[1]。

石英脉型金矿床是最重要的金矿床类型之一。

这类矿床受构造控制明显, 产出环境复杂多样(如造山带环境、太古宙绿岩—花岗岩地体、各种时代的酸性侵入岩体等), 对其形成时代的确定是正确分析其矿床成因的重要途径^[2]。石英脉型金矿的围岩蚀变一般较弱, 要从中挑选出适合于常规同位素定年方法的矿物并不容易, 因此早期一般利用矿体与围岩或空间上与金矿化有关的地质体(如地层、岩体等)的相互关系来间接确定成矿时代。由于赋矿岩石或矿体的围岩与矿床之间并不一定存在成因上的联系, 矿床的形成可能要远远晚于赋矿地质体或围岩, 因此利用前者的年龄来间接推断成矿时代很可能得出错误认识^[3]。如最新研究表明, 胶东地区的金成矿作用集中发生于(120±5) Ma^[4-5], 与赋矿岩体或矿体围岩之间存在数百万年至数千万年甚至更大的时差。显然, 要准确限定石英脉型金矿床的成矿时代, 需要直接测定与金矿成矿有关的热液蚀变矿物或矿石矿物的同位素年龄^[4-5]。

石英脉型金矿床的含金石英脉中含有丰富的流体包裹体, 其中通常含有一定量的 K、Ar 和 Rb、Sr, 因此可以通过流体包裹体的⁴⁰Ar-³⁹Ar 和 Rb-Sr 定年来提供成矿时代方面的信息。Shepherd 等^[6]首次成功获得 Carrock Fell 石英脉型钨矿床中石英流

* 收稿日期: 2007-08-17 编辑: 禹华珍

基金项目: 国家自然科学基金创新群体基金(40521001); 中国地质大学研究生学术探索和创新基金(CUGYJS0715); 地学类研究生创新中心项目(C-0611)

作者简介: 毕诗健(1982—), 男, 现正攻读矿产普查与勘探专业硕士学位, 主要从事矿床学研究。

体包裹体的 Rb-Sr 等时线年龄[(392±5) Ma], 在误差范围内与同一石英脉中白云母的 K-Ar 年龄[(387±6) Ma] 一致^[7]。20 世纪 80 年代以来, 我国学者对胶东、辽东、粤西等地的石英脉型金矿床开展了流体包裹体的 Rb-Sr 等时线定年, 获得了一大批 Rb-Sr 等时线年龄, 其中一部分年龄与其他同位素定年方法获得的年龄(如 ^{40}Ar - ^{39}Ar 、U-Pb 等) 基本一致, 可以比较可靠地解释为成矿时代^[8-10]。但中高温条件下 Rb-Sr 同位素体系的开放行为及寄主矿物中多期流体包裹体的存在使流体包裹体 Rb-Sr 等时线定年在成矿年代学研究中的应用受到质疑^[11]。另外, Pettke 等^[12]发现在 Rb-Sr 同位素方法的元素提取过程中, 流体包裹体的 Rb、Sr 会不同程度地吸附于寄主矿物表面, 导致 $N(^{87}\text{Rb})/N(^{86}\text{Sr})$ 偏低并影响定年结果。与此同时, 石英流体包裹体的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年也得到广泛的应用。Kelley 等^[13]最先报道利用真空击碎技术进行石英流体包裹体的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素分析, 进而获得样品的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄和等时线年龄。但流体包裹体中过剩 Ar 的存在、放射成因 Ar 的丢失以及石英中含 K 矿物的存在, 都可能导致所获得的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄可信度不高并偏离真实的成矿年龄^[14]。

近十几年来陆续有关于石英脉型金矿床中发现热液锆石的报道^[15-17], 为利用 U-Pb 定年直接限定石英脉型金矿床的成矿时代提供了可能。但由于缺乏热液锆石形貌、内部结构及地球化学组成等方面的系统研究, 对这些锆石的热液成因一直存在争议^[14, 18-19]。为此, 笔者拟总结热液锆石与其他成因锆石的特征差异, 并对利用热液锆石 U-Pb 定年确定石英脉型金矿床成矿时代的适用性进行评述。

2 热液锆石及主要特征

2.1 热液锆石形成机制

锆石是沉积岩、变质岩和中酸性岩浆岩中一种常见的副矿物, 其 U-Pb 年龄对于研究沉积物源区与岩相古地理、区域变质作用与变质历史、大规模岩浆活动时间与地壳增生过程等重大地质问题具有举足轻重的作用。过去十几年来来的研究表明^[20-23], 锆石可以直接从中低温热液流体中生长结晶, 锆石的热液成因及 U-Pb 定年也因此成为近年的研究热点。如 Claoue-Long 等^[15]及 Kerrich^[16]通过对加拿大 Abitibi 绿岩带金矿床石英脉中锆石的研究, 提出这些锆石是在 260~380℃、约 200 MPa 的条件下与石英、自然金等热液矿物近于同时结晶形成的。Dempster 等^[24]在苏格兰高地板岩中发现了颗粒细小(< 10 μm)、无环带结构的新生锆石, 认为它们是

在绿片岩相变质条件(< 350℃) 下从变质流体中结晶形成的。最近的一项研究发现^[25], 波兰 Sudetic 蛇绿岩的蛇纹石化过程中有大量热液锆石形成, 这些锆石形成于 270~300℃及 100 MPa 的温压条件。Hoskin^[26]将热液锆石的形成机制归纳为: ①从围岩中捕获的锆石(岩浆锆石或变质锆石) 在热流体中发生溶解后再次结晶(dissolution-reprecipitation), 形成新生锆石^[27]; ②低温条件(120~200℃) 下, 因放射性衰变而遭受晶体结构损伤的锆石与流体发生离子交换, 导致晶体结构的恢复(structural recovery)^[28]; ③中低温条件下流体中的 ZrSiO_4 因饱和而直接沉淀结晶^[25]。实验研究表明^[20], 流体中广泛存在的 F^- 和 Cl^- 是 Zr 的重要载体, 磷酸根、硫酸根和碳酸根离子也可以和 Zr 形成配位体, 使热液体系中 Zr 的活动性增强, 为热液锆石的形成提供重要条件。

2.2 热液锆石的鉴别特征

2.2.1 锆石形态和内部结构 热液锆石形成于中低温热液条件, 其结晶温度与岩浆锆石、变质变形程度与变质锆石相比明显偏低、偏弱, 因而可能具有不同的结晶习性和形貌结构特征^[1, 29]。岩浆锆石通常为半自形到自形, 一般具特征的岩浆振荡环带。变质锆石因变质条件的不同, 其外部形态为它形到非常自形, 内部结构主要包括无分带、弱分带、扇形分带、斑杂状分带和流动状分带等复杂结构类型。李惠民等^[30]利用光学显微镜及扫描电镜对大量锆石的观察表明, 热液锆石与从围岩中捕获的岩浆锆石及变质锆石在形态特征方面存在较大差异, 如热液锆石较为自形、磨圆度较差, 而从围岩中捕获的锆石在热流体搬运过程会被部分溶蚀, 导致自形程度降低。借助阴极发光(CL) 和背散射(BSE) 图像还可以进一步识别同一颗粒中不同成因的锆石域, 岩浆锆石的 CL 图像中锆石的异常亮色边可能是热液改造的结果^[31]。但对新疆天格尔地区糜棱岩化花岗岩中锆石的 CL 观察却发现^[32], 岩浆锆石的热液增生边不具有阴极发光特征。类似地, 澳大利亚 Boggity Plain 岩体中岩浆锆石的热液增生边也不具阴极发光特征^[26]。McNaughton 等^[33]认为, 热液锆石具有与人工合成岩浆锆石较为一致的形态学特征。其他一些人则认为热液锆石具有多晶面特征, 其环带-非环带晶体都被认为是热液成因^[19]。因此单凭形貌和结构特征还难以将热液锆石与岩浆锆石或变质锆石区分开来^[19, 34]。

2.2.2 普通铅含量 Watson 等^[35]对人工合成锆石的实验研究表明, 中低温热液条件下生长的锆石, 铅的相容性显著增强(Pb 的锆石-流体分配系数高达 4.2, 而锆石-熔体分配系数仅为 0.001), 因此认为中低温流体中形成的锆石通常会富集普通铅, 但

Pettke 等^[39] 的研究却表明, Pb 的锆石—流体分配系数一般不会高于 0.001, 因此热液锆石中不一定富集普通铅, 除非流体中 Pb 的浓度非常高。最近的一些研究似乎支持 Watson 等^[35] 的观点, 如胶东乳山金矿床含金石英脉中热液锆石^[17] 的普通铅含量比捕获的围岩锆石明显要高(表 1)。类似的发现也见于粤西河台金矿床含金石英脉^[37] 中, 其热液锆石和捕获锆石的普通铅质量分数分别为 0.65%~2.27% 和 <0.73%(表 1)。进一步分析发现^[37], 围

岩中 $w(\text{Pb})$ 低, 为 $4.2 \times 10^{-6} \sim 7.7 \times 10^{-6}$, 而含金石英脉中 $w(\text{Pb})$ 高, 为 22.7×10^{-6} (8 个样品的平均值), 且在中低温含金流体中常有方铅矿的沉淀结晶, 表明流体中 Pb 的浓度很高, 因此含金石英脉中锆石的普通铅质量分数也较高。对青龙山榴辉岩中高压变质新生锆石的研究表明^[38], 其普通铅质量分数较低, 仅为 0~3.12%。根据已有的资料, 我们认为锆石的普通铅质量分数可以作为区分热液锆石与岩浆锆石、变质锆石的依据之一。

表 1 胶东乳山、粤西河台金矿床含金石英脉和矿体围岩及青龙山榴辉岩中锆石的普通铅含量

Table 1 Common Pb concentration of zircons from auriferous quartz veins and wall rocks in the Rushan, Hetai deposits and Qinglongshan eclogites

采样地点	样品(点号)	普通铅质量分数 $w(^{206}\text{Pb})/\%$									
乳山金矿 ^[17]	热液锆石(03R102)	10.64	1.63	3.42	6.30	4.54	11.11	2.00	5.23	15.88	7.64
	围岩锆石(03R097)	3.56	0.76	1.71	1.71	1.82	0.65	1.26	5.76	2.49	1.44
河台金矿 ^[37]	热液锆石(C025)	1.43	0.95	0.77	1.01	2.27	0.75	0.65	1.44		
	围岩锆石(THQ)	0.14	0.10	0.21	0.23	0.24	0.61	0.18	0.49	0.73	0.14
青龙山榴辉岩 ^[38] 变质锆石(02QL-2)		1.35	1.11	2.23	3.12	0.83	0.70	0.50	0.00	2.38	2.97

2.2.3 微量元素特征 不同成因的锆石其微量元素组成可能存在较大差异^[39-40], 这对于正确认识锆石成因具有重要意义^[41]。Hanchar 等^[42] 提出, 稀土元素(REE)的含量和配分模式可以指示锆石的生长环境及熔体或流体的化学组成。对澳大利亚 Boggy Plain 岩体中锆石微量元素的研究发现^[26], 与岩浆锆石相比, 热液锆石具有较高的 W、Au、Mo 含量, 其稀土元素特征具有 REE 总量高、LREE 相对富集、呈现弱的 Ce 正异常等特征(图 1-A)。对埃及 Gabel Hamradom 地区的花岗岩及加拿大 Acasta 花岗岩脉岩中岩浆锆石热液生长边的研究也得出了同样的结论^[43-44], 热液锆石的 REE 配分特征显示出相似性并与未蚀变的岩浆锆石有明显区别(图 1-B, C)。变质锆石的微量元素特征会因变质改造条件的不同而产生差异。如麻粒岩相变质锆石一般具有重稀土元素相对亏损和明显 Eu 负异常的特征(图 1-D)^[45]; 榴辉岩相变质锆石表现为重稀土元素相对亏损, 无明显 Eu 负异常(图 1-E)^[46]; 角闪岩相变质增生锆石具有重稀土元素相对富集和 Eu 负异常明显的特征, 与热液锆石存在明显差别。Hoskin 等^[26] 还发现, 热液锆石与岩浆锆石可以在 $[w(\text{Sm})/w(\text{La})]_{\text{N}} - [w(\text{Ce})/w(\text{Ce}^*)] - [w(\text{Sm})/w(\text{La})]_{\text{N}}$ 图解(图 2)上很好地区分开。

对澳大利亚 Mole 花岗岩的研究却得出了相反的结论^[36], 即热液锆石具有比岩浆锆石低得多的 REE 总量、重稀土元素相对富集、较强的 Ce 正异常等特征(图 1-F)。然而, Pettke 等^[39] 将 Ce 含量或 Ce 异常作为区分热液锆石与岩浆锆石的标志这种认识可能存在一定的片面性, 因为只有在氧逸度较

高的条件下, Ce^{3+} 才被氧化成 Ce^{4+} , 并进入锆石矿物晶格中形成 Ce 正异常(Ce^{4+} 与 Zr^{4+} 的离子半径分别为 0.097, 0.084 nm, 二者具有相同的离子电价)。因此, 锆石中 Ce 异常的出现与否及其强弱程度与锆石结晶时流体(熔体)的氧化还原条件相关。研究还发现^[36], 锆石中的微量元素如 Zr、Y、Nb、Ta、Hf 等在不同成因锆石中表现出明显的差异性(图 3), 相比于岩浆锆石, 热液锆石中 Zr、Hf、Ta 等高场强元素(在流体作用过程中表现为相对不活动的元素)含量高。

总之, 热液锆石与岩浆锆石、变质锆石的稀土元素(图 1, 2)和微量元素(图 3)组成可能具有较明显的差异, 可以作为区分不同成因锆石的依据之一。但目前对造成这种差异的原因还不太清楚, 推测可能与热液流体的来源、物质组成及物理化学性质有关^[47]。

2.2.4 矿物和流体包裹体 不同条件下形成的锆石具有特定的矿物或(和)流体包裹体组成, 因此锆石中包裹体的研究对于锆石的成因和形成环境有很好的指示意义^[48-49]。典型热液矿物(如电气石、黄铁矿、绢云母等)中的包裹体与丰富的低盐度 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体包裹体, 可说明锆石是在热流体环境中沉淀结晶的。相反, 岩浆锆石由于结晶温度较高, 其中通常不会出现热液矿物包裹体和流体包裹体, 但却可能包含高温岩浆矿物(如金红石、磷灰石等)^[50] 与熔体包裹体。变质锆石中则常会出现各种变质矿物(如石榴石、绿辉石等)包裹体^[38]。Claoue-Long 等^[15] 发现加拿大 Abitibi 绿岩带金矿床含金石英脉中的锆石含有自然金颗粒和大量原生流体包裹体,

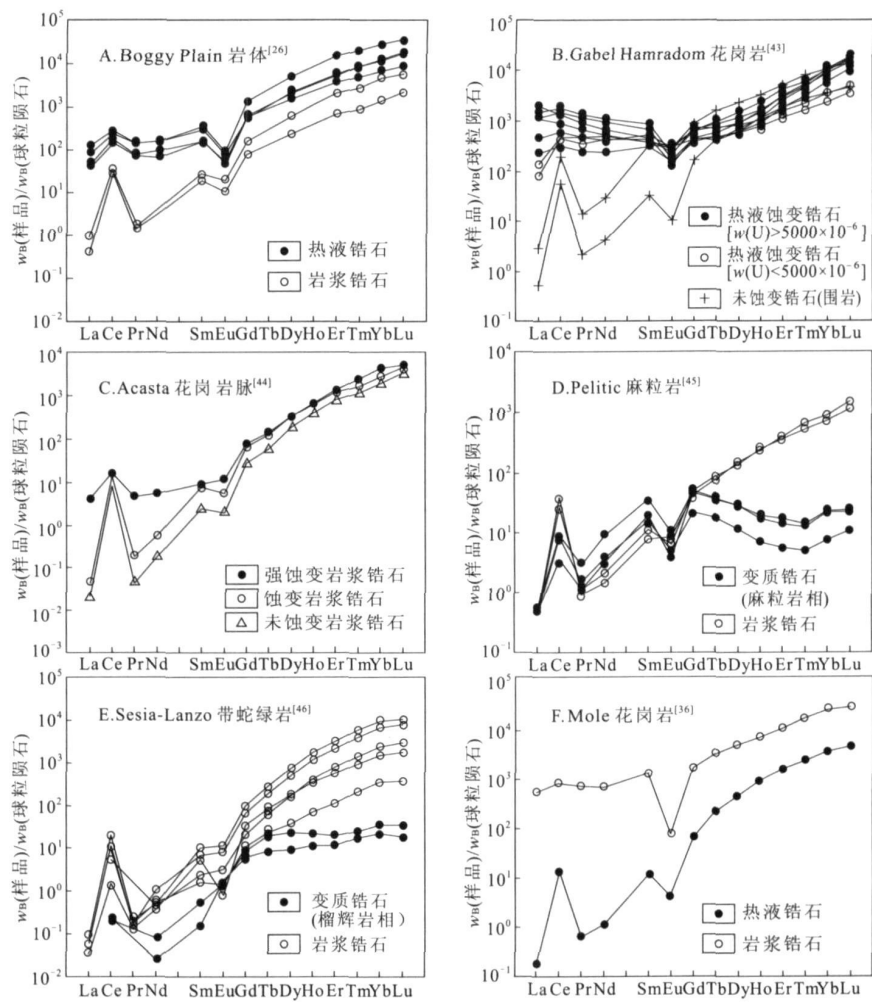


图1 热液、岩浆及变质成因锆石的 REE 球粒陨石标准配分模式图(球粒陨石标准化数据引自文献[51])

Fig.1 Chondrite-normalized REE patterns of hydrothermal, magmatic and metamorphic zircons

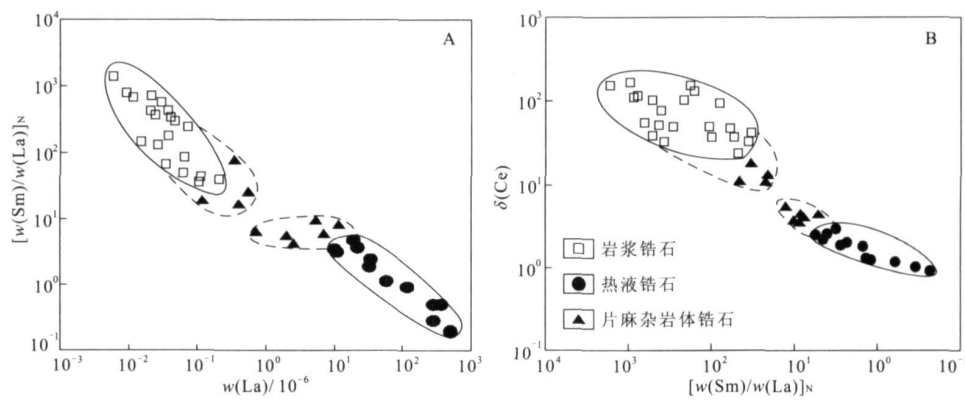


图2 不同成因锆石 $[w(\text{Sm})/w(\text{La})]_N - w(\text{La})$ (A) 及 $\delta(\text{Ce}) - [w(\text{Sm})/w(\text{La})]_N$ (B) 相关图解^[29]

Fig.2 Discrimination for magmatic and hydrothermal zircons

认为锆石、石英与金等热液矿物是在 260 ~ 380 °C、200 MPa 的环境下同时形成的。Kerrich^[19] 对同一金矿区的研究发现, 石英脉中的锆石包含石英、电气石、白钨矿、黄铁矿、自然金等典型热液矿物包裹体,

并与低盐度 H₂O-CO₂ 流体包裹体及富 CO₂ 包裹体共存, 充分表明这些锆石是直接从成矿流体中沉淀的。我国粤西河台金矿床含金石英脉中的锆石也广泛存在硫化物包裹体^[37]。Hu 等^[7] 在胶东乳山金矿

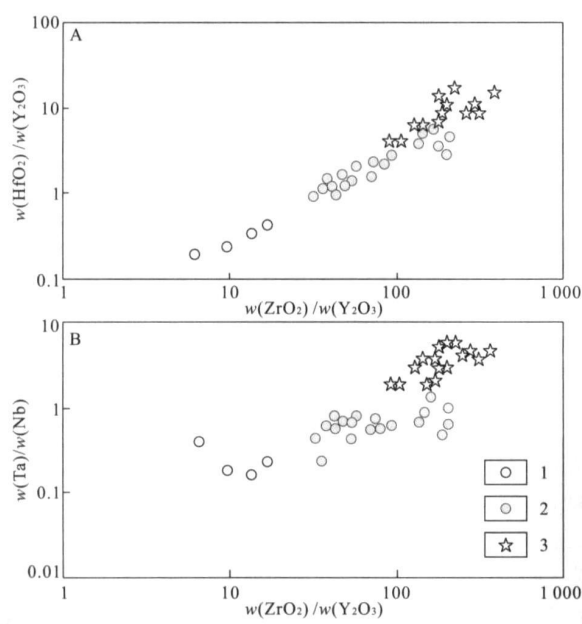


图 3 不同成因锆石的 $w(\text{HfO}_2)/w(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{Ta})/w(\text{Nb})$ — $w(\text{ZrO}_2)/w(\text{Y}_2\text{O}_3)$ (A, B) 图解^[36]

Fig.3 Discrimination plots for magmatic and hydrothermal zircons from the Mole Granite

1. 早期岩浆锆石; 2. 晚期岩浆锆石; 3. 热液锆石

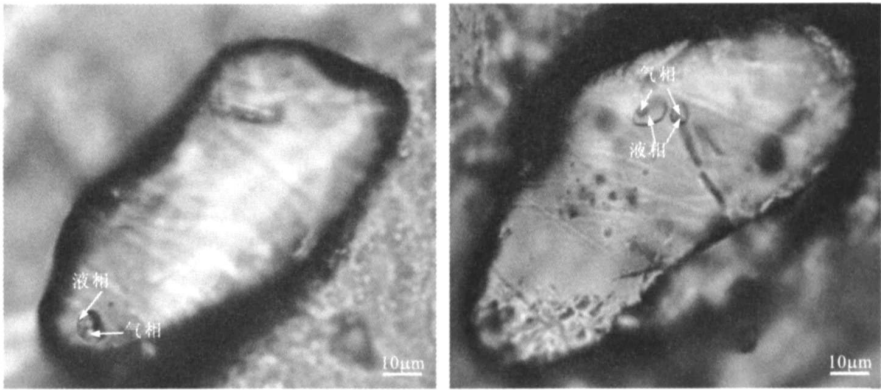


图 4 山东范家埠石英脉型金矿床热液锆石中的流体包裹体

Fig.4 Fluid inclusions in the hydrothermal zircons from auriferous quartz vein in Fanjiabu gold deposit in Shandong Province

1. 早期岩浆锆石; 2. 晚期岩浆锆石; 3. 热液锆石

石的 Lu-Hf 同位素组成可能存在较大差异, 利用 Lu-Hf 同位素进行锆石的成因分析应该成为今后锆石研究的重要内容之一。

3 石英脉型金矿床中热液锆石的 U-Pb 定年

对石英脉中的热液锆石进行原位微区 U-Pb 定年, 有可能获得石英脉型金矿床可靠的成矿年龄^[15-17]。但其锆石成因的多样性可能会使锆石 U-Pb 定年结果变得十分复杂和难以解释。罗镇宽等^[14]指出, 有些石英脉中“热液锆石”的年龄与围岩

床含金石英脉体中锆石边-核部发现原生流体包裹体, 其激光拉曼图谱中出现明显的液相 CO_2 和 H_2O 峰值, 说明锆石在其生长过程中处于富 CO_2 - H_2O 流体的环境。笔者最近对山东范家埠石英脉型金矿床中的锆石进行了详细的显微镜下观察, 发现其中存在较丰富的原生流体包裹体(图 4)。但对流体包裹体的成分仍需进一步研究, 具体可采用激光拉曼光谱、激光剥蚀等离子质谱等方法^[52-53] 进行定性与定量分析。

另外, 由于①Hf 与 Zr 的地球化学性质相同, 较容易置换 Zr 而进入锆石晶格中; ②Lu-Hf 同位素在锆石中的封闭性很好, 即使锆石的 U-Pb 体系发生了扰动、丢失, Hf 同位素体系仍能保持相对封闭^[39, 54], 因此锆石的 Lu-Hf 同位素组成有可能用来区分不同成因的锆石^[55]。近年来激光技术和现代质谱技术的快速发展使单颗粒锆石(主要是岩浆锆石)原位微区 Lu-Hf 同位素测定在岩石学中得到了广泛的应用, 但目前尚未开展热液锆石的 Lu-Hf 同位素研究。由于成矿热流体通常具有多来源的特点(岩浆流体、变质流体、大气降水), 其 Hf 同位素组成应该具有多来源特征。因此, 热液锆石与岩浆锆

年龄十分相近, 如吉林夹皮沟金矿床石英脉中热液锆石 $[(2\,469\pm33)\,\text{Ma}]$ 与围岩钾长花岗岩 $[(2\,505\pm14)\,\text{Ma}]$ 年龄近于一致, 是否为真正热液锆石值得怀疑。李俊建等^[56] 也对该金矿床石英脉中的锆石进行了 U-Pb 同位素稀释法年龄的测定, 认为金矿床的成矿年龄为 $(2\,475\pm19)\sim(2\,469\pm33)\,\text{Ma}$ 。而罗镇宽等^[57] 却获得蚀变绢云母的 $^{40}\text{Ar}\text{--}^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄为 $(203.9\pm0.5)\,\text{Ma}$, 与矿体密切相关脉岩的 U-Pb 年龄为 241~218 Ma, 因而对李俊建等^[56] 获得的成矿年龄提出了质疑。齐金忠等^[58] 利用 SHRIMP 技术测定了甘肃阳山微细浸染型金矿

床石英细脉(YM 和 AB)及含金石英脉(SG)中锆石的 U-Pb 年龄,其中 YM 和 AB 脉中 26 颗锆石给出了 3 组年龄:200.9~195.4 Ma(锆石颗粒数 $N=3$),137.0~121.4 Ma($N=11$),55.3~48.1 Ma($N=12$),SG 脉中 22 颗锆石的年龄则集中于 2 455,981,803 Ma。据此,齐金忠等^[58]认为金矿床石英脉中的锆石是热液活动期间捕获的新太古代—新元古代结晶基底、侏罗纪花岗斑岩^[59],白垩—始新世隐伏岩体中的锆石,而不是真正的热液锆石。类似地,李文良等^[60]获得甘肃寨上金矿床含金石英脉的 4 组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄:2 000~1 800,1 000~800,500~400,300 Ma 左右,均远远大于由其他方法(如蚀变绢云母的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄约为 130~125 Ma^[61])所获得的成矿年龄,因此认为金矿床含金石英脉中的锆石均捕获于围岩。

但也有不少成功的研究实例。如 Claoue-Long 等^[15]对加拿大 Abitibi 绿岩带含金石英脉中的热液锆石进行了 SHRIMP U-Pb 定年,测得含金石英脉的形成年龄为 2 680 Ma,晚于含矿岩体侵位时代 20 Ma 左右,并与区域退变质峰期事件相一致。胡小蝶等^[62]获得河北小营盘金矿床含金石英脉中锆石的 U-Pb 年龄为 $(1\,826\pm31)\sim(1\,800\pm14)$ Ma,该年龄明显晚于矿床围岩——太古宇桑干群杂岩的锆石 U-Pb 年龄(约 2 400 Ma),并与该区 1 800 Ma 左右发生的退变质及金活化成矿事件吻合,因而被认为是可靠的成矿年龄。Nesbitt 等^[63]对伊比利亚东部黄铁矿带中典型块状硫化物矿床石英脉中的锆石进行 SHRIMP U-Pb 定年,获得的成矿年龄为 (345.7 ± 4.6) Ma,支持该区成矿作用与泥盆—石炭纪之交的火山-沉积作用同时的观点^[64]。Hu 等^[17]利用 SHRIMP 技术测得胶东乳山金矿床含金石英脉中热液锆石的 U-Pb 年龄为 (117 ± 3) Ma,比赋矿岩体昆崙山二长花岗岩的侵位年龄晚约 40 Ma,但与胶东地区大量高精度成矿年龄 $[(120\pm5)\text{Ma}]$ ^[4-5]相一致。粤西河台金矿床含金石英脉中锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄为 (152.5 ± 3.1) Ma^[37],晚于赋矿围岩的年龄 $[(239.6\pm3.9)\text{Ma}]$,但与河台金矿蚀变绢云母³⁹Ar-⁴⁰Ar 年龄 $[(141\pm6)\text{Ma}]$ ^[65]比较接近。

上述分析表明,由于含金石英脉中锆石的来源通常较复杂,对这些锆石进行 U-Pb 定年有时难以获得有明确地质意义的年龄数据;但只要通过详细、系统的锆石成因研究(锆石形貌结构观察、微量元素和稀土元素分析、矿物和流体包裹体研究等),仍然有可能识别出与含金石英脉同时形成的热液锆石,其 U-Pb 年龄可以被可靠地解释为金矿床的成矿年龄。石英脉型金矿床锆石 U-Pb 定年的关键是如何

将从成矿流体中生长的热液锆石与从围岩中捕获的岩浆锆石和变质锆石区分开来。

4 结 语

锆石可以从中低温成矿流体中直接生长,对含金石英脉中的热液锆石进行微区、原位 U-Pb 定年是精确限定石英脉型金矿床成矿时代的重要途径之一。但含金石英脉中锆石的成因类型通常较复杂,除热液锆石外,还经常出现从围岩中捕获的岩浆锆石或变质锆石。锆石组成的复杂性很可能导致所获得的 U-Pb 年龄无法解释或缺乏明确的地质意义。因此,石英脉型金矿床锆石 U-Pb 年代学研究的关键是将热液锆石与捕获锆石有效地区分开来。对锆石的形貌、结构、微量元素组成(包括普通铅的含量)、稀土元素配分模式、矿物或流体包裹体特征等进行系统研究及综合分析,可以较好地识别热液锆石。但这方面的工作还需要进一步深化和拓宽,如开展锆石的 Lu-Hf 同位素分析。利用先进的 SHRIMP 或 LA-ICP-MS U-Pb 定年技术对热液锆石进行原位、微区同位素定年,有可能获得精确的成矿年龄。在可能的情况下,石英脉型锆石 U-Pb 定年结果需要与其他同位素年龄(如蚀变矿物的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄、含矿岩体的 U-Pb 年龄等)及野外地质关系进行对比,以提高将其解释为成矿年龄的可靠性。

参考文献:

- [1] 陆松年,李怀坤.成矿地质事件的同位素年代学研究[J].地学前缘,1999,6(2):335-342.
- [2] 翟明国,杨进辉,刘文军,等.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.
- [3] Li J W, Vasconcelos P M, Zhou M F, et al. Geochronology of the Pengjiakuang and Rushan Gold Deposits, Eastern Jiaodong Gold Province, Northeastern China: Implications for regional mineralization and geodynamic setting[J]. *Economic Geology*, 2006, 101: 1 023-1 038.
- [4] Yang J H, Zhou X H. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lead gold deposits[J]. *Geology*, 2001, 29: 711-714.
- [5] 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]. *Journal of Geology*, 2003, 111: 741-751.
- [6] Shepherd T J, Darbyshire D P F. Fluid inclusion Rb-Sr isochrons for dating mineral deposits[J]. *Nature*, 1981, 290: 578-579.
- [7] Shepherd T J, Beckinsale R D, Rundle C C, et al. Genesis of Carrock Fell Tungsten Deposits, Cumbria: Fluid inclusion and isotopic study[J]. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B*, 1976, 85: 62-73.
- [8] 陈好寿,李华芹.云开隆起金矿带流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄[J].矿床地质,1991,10(4):333-341.

- [9] 李华芹. 胶东金矿床石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄测定 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994: 340—341.
- [10] 魏俊浩, 邱小平, 郭大招, 等. 辽宁五龙金矿成矿流体地球化学研究及 Rb-Sr 同位素测年 [J]. 地质学报, 2004, 78(6): 847.
- [11] 刘建明, 赵善仁, 沈洁, 等. 地质流体活动的同位素定年方法评述 [J]. 地球物理学进展, 1998, 13(3): 46—55.
- [12] Pettke T H, Diamond L W. Rb-Sr isotopic analysis of fluid inclusions in quartz: Evaluation of bulk extraction procedures and geochronometer systematics using synthetic fluid inclusions [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59(19): 4 009—4 027.
- [13] Kelley S, Turner G, Butterfield A W, et al. The source and significance of argon isotopes in fluid inclusions from areas of mineralization [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 79(3-4): 303—318.
- [14] 罗镇宽, 苗来成, 关康. 华北地台北缘金矿床成矿时代讨论 [J]. 黄金地质, 2000, 6(2): 70—76.
- [15] Clauze Long J C, King R W, Kerrich R. Archaean hydrothermal zircon in the Abitibi greenstone belt: Constraints on the timing of gold mineralization [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 98(1): 109—128.
- [16] Kerrich R. Hydrothermal zircon and baddeleyite in Val-d'Or Archaean mesothermal gold deposits: Characteristics, compositions, and fluid-inclusion properties, with implications for timing of primary gold mineralization [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1993, 30: 2 334—2 351.
- [17] 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): 1 629—1 636.
- [18] Corfu F, Davis D W. Comment on "Archaean hydrothermal zircon in the Abitibi greenstone belt: Constraints on the timing of gold mineralization" by J. C. Clauze Long, R. W. King and R. Kerrich [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104(2-4): 545—552.
- [19] Schaltegger U. Hydrothermal zircon [J]. *Elements*, 2007, 3(1): 51—52.
- [20] Rubin J N, Henry C D, Price J G. The mobility of zirconium and other "immobile" elements during hydrothermal alteration [J]. *Chemical Geology*, 1993, 110(1-3): 29—47.
- [21] Sinha A K, Wayne D M, Hewitt D A. The hydrothermal stability of zircon: Preliminary experimental and isotopic studies [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1992, 56: 3 551—3 560.
- [22] Hoskin P W O, Kinny P D, Wyborn D. Chemistry of hydrothermal zircon: investigating timing and nature of water-rock interaction [M] // Arehart G B, Hulston J R. *Water-rock interaction*. Rotterdam: Balkema, 1998: 545—548.
- [23] Cherniak D J, Watson E B. Diffusion in zircon [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 113—143.
- [24] Dempster T J, Hay D C, Bluck B J. Zircon grows in slate [J]. *Geology*, 2004, 32: 221—224.
- [25] Dubinska E, Bylina P, Kozłowski A, et al. U-Pb dating of serpentinization: Hydrothermal zircon from a metasomatic rodingite shell (Sudetic ophiolite, SW Poland) [J]. *Chemical Geology*, 2004, 203(3-4): 183—203.
- [26] Hoskin P W O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, 69(3): 637—648.
- [27] Tomaschek F, Kennedy A K, Villa I M, et al. Zircons from Syros, Cyclades, Greece: recrystallization and mobilization of zircon during high-pressure metamorphism [J]. *J. Petrol.*, 2003, 44: 1 977—2 002.
- [28] Geisler T, Pidgeon R T, Kurtz R, et al. Experimental hydrothermal alteration of partially metamict zircon [J]. *Am. Mineral.*, 2003, 88: 1 496—1 513.
- [29] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1 589—1 604.
- [30] 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 [J]. 地球学报, 1997, 18(增刊): 176—178.
- [31] 林慈奎, 孙勇, 陈丹玲, 等. 柴北缘卡河花岗质片麻岩的地球化学特征和锆石 LA-ICPMS 定年 [J]. 地球化学, 2006, 35(5): 489—505.
- [32] 朱永峰, 宋彪. 新疆天格尔糜棱岩化花岗岩的岩石学及其 SHRIMP 年代学研究: 兼论花岗岩中热液锆石边的定年 [J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 135—144.
- [33] McNaughton N J, Mueller A G, Groves D J. The age of the giant Golden Mile Deposit, Kalgoorlie, Western Australia: Ion-microprobe zircon and monazite U-Pb geochronology of a synmineralization lamprophyre dike [J]. *Economic Geology*, 2005, 100: 1 427—1 440.
- [34] Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, et al. A atlas of zircon textures [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 469—500.
- [35] Watson E B, Cherniak D J, Hanchar J M, et al. The incorporation of Pb into zircon [J]. *Chemical Geology*, 1997, 141(1-2): 19—31.
- [36] Pettke T h, Audetat A, Schaltegger U, et al. Magmatic-to-hydrothermal crystallization in the W-Sn mineralized Mole Granite (NSW, Australia): Part II: Evolving zircon and thorite trace element chemistry [J]. *Chemical Geology*, 2005, 220(3-4): 191—213.
- [37] 翟伟, 李兆麟, 孙晓明, 等. 粤西河台金矿锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义 [J]. 地质论评, 2006, 52(5): 690—699.
- [38] 李秋立, 李曙光, 侯振辉, 等. 青龙山榴辉岩高压变质新生锆石 SHRIMP U-Pb 定年、微量元素及矿物包裹体研究 [J]. 科学通报, 2004, 49(22): 2 329—2 334.
- [39] Hoskin P W O, Ireland T R. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator [J]. *Geology*, 2000, 28(7): 627—630.
- [40] 陆松年, 李惠民, 李怀坤, 等. 胶南新元古代花岗片麻岩中淡色脉体的锆石年代学和稀土元素研究 [J]. 地质调查与研究, 2005, 28(4): 207—212.
- [41] 倪涛, 陈道公, 靳平. 大别山变质岩锆石微区稀土元素和 Th, U 特征 [J]. 高校地质学报, 2006, 12(2): 249—258.
- [42] Hanchar J M, Westrenen W V. Rare earth element behavior in zircon-melt system [J]. *Elements*, 2007, 3(1): 37—42.
- [43] Geisler T, Rashwan A A, Rahn M K W, et al. Low-temperature hydrothermal alteration of natural metamict zircons from the Eastern Desert, Egypt [J]. *Mineral Mag.*, 2003, 67(3): 485—508.
- [44] Rayner N, Stem R N, Carr S D. Grain-scale variations in trace element composition of fluid-altered zircon, Acasta gneiss com-

- plex, northwestern Canada [J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 2005, 148: 721—734.
- [45] Whitehouse M J, Platt J P. Dating high-grade metamorphism: constraints from rare-earth elements in zircons and garnet [J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 2003, 145: 61—74.
- [46] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 2002, 184(1-2): 123—138.
- [47] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 27—62.
- [48] Liu J, Ye K, Maruyama S. Mineral inclusions in zircon from gneisses in the ultrahigh-pressure zone of the Dabie Mountains, China [J]. *Journal of Geology*, 2001, 109: 523—535.
- [49] Hermann J, Rubatto D, Korsakov A. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan) [J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 2001, 141: 66—82.
- [50] 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 苏鲁地体超高压和非超高压花岗质片麻岩的判别标志——来自锆石中矿物包裹体的证据 [J]. *地质论评*, 2003, 47(2): 164—169.
- [51] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3-4): 223—253.
- [52] Beny C, Feofanov A. New data on fluid inclusions obtained with the help of a niw micro-Raman confocal image spectrometer [J]. *Arch. Mineral.*, 1993, 49(1): 27—28.
- [53] Andéat A, Günther D, Heinrich C A. Formation of a magmatic-hydrothermal ore deposit: Insights with LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions [J]. *Science*, 1998, 279(27): 2 091—2 094.
- [54] Patchett P J. Importance of the Lu-Hf isotopic system in studies of planetary chronology and chemical evolution [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1983, 47(1): 81—91.
- [55] Kinny P D, Maas R. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 327—341.
- [56] 李俊建, 沈保丰, 毛德宝, 等. 吉林夹皮沟金矿成矿时代的研究 [J]. *地质学报*, 1996, 70(4): 335—341.
- [57] 罗镇宽, 关康, 苗来成. 吉林夹皮沟金矿带岩脉和蚀变绢云母定年及金矿成矿时代 [J]. *现代地质*, 2002, 16(1): 19—25.
- [58] 齐金忠, 李莉, 袁士松, 等. 甘肃省阳山金矿床石英脉中锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究 [J]. *矿床地质*, 2005, 24(2): 141—150.
- [59] 齐金忠, 袁士松, 李莉, 等. 甘肃省文县阳山金矿床地质特征及控矿因素研究 [J]. *地质论评*, 2003, 49(1): 85—92.
- [60] 李文良, 陈勇敢, 赵玉锁, 等. 甘肃肃上金矿床含金石英脉中锆石 SHRIMP 法 U-Pb 同位素测定及地质意义 [J]. *黄金*, 2006, 27(7): 4—7.
- [61] 路彦明, 陈勇敢, 李振华, 等. 甘肃岷县寨上金矿区及外围金矿成矿规律及找矿预测科研报告 [R]. 廊坊: 中国人民武装警察部队黄金地质研究所, 2003.
- [62] 胡小蝶, 陈志宏, 赵彦民, 等. 河北小营盘金矿成矿时代——单颗粒锆石 U-Pb 同位素年龄新证据 [J]. *前寒武纪研究进展*, 1997, 20(2): 22—28.
- [63] Nesbitt R W, Pascual E, Fanning C M, et al. U-Pb dating of stockwork zircons from the eastern Iberian Pyrite Belt [J]. *Journal of the Geological Society*, 1999, 156(1): 7—10.
- [64] Pereira Z, Saez R, Pons J M, et al. Edad Devonica (strunienense) de las mineralizaciones de Aznalcollar (Faja Pirítica Iberica) en base apalino-logia [J]. *Geogaceta*, 1996, 20: 1 609—1 612.
- [65] 富云莲, 叶伯丹. 广东清远—高要金矿的⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年 [J]. *岩石矿物学杂志*, 1991, 10(1): 21—28.

Hydrothermal Zircon U-Pb Dating and Geochronology of Quartz Vein-Type Gold Deposits: A Review

BI Shi-jian^{1a}, LI Jian-wei^{1b, 1c}, ZHAO Xin-fu²

(1a. Graduate School; 1b. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources;

1c. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Department of Earth Sciences, University of Hongkong, Hongkong, China)

Abstract: Quartz vein-type gold deposit is the most important type of gold deposits in the world. However, the lack of minerals suitable for most conventional isotopic dating methods constrains the direct and precise dating. Recent development in mass spectrometry makes it possible to determine the age of auriferous quartz veins by U-Pb dating of zircons from quartz veins. Unfortunately, hydrothermal zircons that grow directly from mineralizing fluids and inherited magmatic or metamorphic zircons from wall rocks may coexist in the same vein. Such complexity poses significant problem while interpreting the U-Pb data. Thus, the key for zircon U-Pb dating of quartz vein-type gold deposit will be to distinguish hydrothermal zircon precipitated from ore-forming fluids from the inherited zircons. Combined studies of zircon morphology, internal texture, trace elemental geochemistry (including rare earth element), compositions of mineral and fluid inclusions will permit identification of hydrothermal zircons, which then can be precisely dated by SHRIMP or LA-ICP-MS methods to provide reliable age constraints of quartz vein-type gold deposits.

Key words: hydrothermal zircon; quartz-vein-type gold deposit; U-Pb dating; age of ore deposit