

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

同源岩浆成因金矿成岩成矿时差的统计研究

谭俊, 魏俊浩, 谭文娟, 郭大招

中国地质大学资源学院, 武汉, 430074

内容提要: 同源岩浆成因金矿的成岩成矿时差是确定矿床与岩浆岩成因关系的重要基础。而中国同源岩浆成因金矿分布十分广泛,前人在成矿学和岩石学方面做了大量的研究,为此本文收集了国内一些典型金矿的成矿和相关同源岩浆岩的同位素测年数据,讨论并定量厘定了该类金矿床成岩成矿时差的分布特征及分布范围。数据统计分析及柯尔莫哥洛夫准则检验结果显示,成矿事件一般同步或略滞后于同源岩浆活动,成岩成矿时差在95%信度下服从正态分布,介于0~16.0Ma,均值约为7.0Ma。因此,若金矿成岩成矿存在着 $\leq 16.0\text{Ma}$ 的时差,就应该重视二者之间的同源成因联系。同时,笔者也强调,准确的成岩成矿时差应加强对金矿成岩成矿地质背景的研究;重视时差研究与微量元素和同位素示踪相结合,从年代学和地球化学方面对矿床成因作出合理的解释。

关键词: 同源岩浆成因金矿; 成岩成矿时差; 统计分析

金矿成岩成矿时差,是研究矿床成因、指导找矿以及建立区域成矿模式的重要基础,也是目前金矿研究的热点之一。20世纪80年代以来,随着同位素地质年代学的发展,其重要性也越来越备受人们的重视。刘连登等(1987)、王秀璋等(1992)对金矿成岩成矿时差做过较深入的研究,提出了深部同源岩浆热液成矿模式;李长江等(1992)统计研究了热液矿床成岩成矿的时差序列,即钨—铍—铌—钽>铜—铅—锌>金—银>萤石矿床;柳少波等(1996)根据不同年龄测试结果所代表的意义,提出了金矿成岩成矿存在着真时差、似时差和假时差的认识;罗镇宽等(2003)对冀东都山花岗岩基和三家金矿区成矿前花岗斑岩脉进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,结果表明岩浆活动形成于印支期(222.0~223.0Ma),与区内中生代燕山期金矿化存在着较大的时差,确认两者不存在直接的成因联系。

目前,对金矿成岩成矿时差理解有两种认识:一是容矿围岩年龄与成矿年龄的差值,二是主张与成矿有关的侵入岩年龄与成矿年龄的时差。但关于金矿成岩成矿时差系统性的定量研究却未见论述。中国岩金矿床中与侵入岩有关金矿约占82.3%(陈毓川等,2001),成矿时间上具有区域集中、地域差异的特点。近十几年来,随着矿床同位素年代学研究的迅速发展,积累了大批较高精度的年龄数据,为从时差

的角度研究金矿床成因提供了重要素材。笔者认为,研究金矿与具有同源成因侵入岩(也可能是容矿围岩)的成岩成矿时差,对确定岩浆演化与成矿的关系不仅具有理论意义,更有重要的找矿意义。为此,本文收集了近十几年来国内一些典型金矿床的成矿及相关岩体的同位素测年数据,详细讨论了该类金矿的成岩成矿时差分布特征,并初步统计厘定0~16.0Ma为其集中分布区间。

1 中国金矿成矿地质背景

中国处于欧亚板块、太平洋板块和印度板块的交汇地带,大地构造演化大致经历了太古宙—古元古代原始地壳克拉通化阶段,中、新元古代—早古生代大陆边缘或陆内盆地演化阶段,晚古生代欧亚板块拼合,古欧亚大陆形成阶段和中、新生代受太平洋板块和印度板块俯冲产生的叠加构造阶段。构成了古亚洲、滨太平洋和特提斯—喜马拉雅三大成矿域(郭文魁等,1987),金矿床多沿不同构造单元的交界部位及区域性深大断裂带分布,形成了新太古代末—古元古代(2500.0~1800.0Ma)、古生代晚期—中生代(280.0~100.0Ma)(李俊建,1997)以及新生代三次成矿高峰。新太古代末—古元古代金矿床主要分布在华北地台北缘,以太古宙绿岩建造为原始矿源层,代表性矿床有内蒙古十八顷壕(1800.0Ma,陈

注:本文为教育部博士点基金资助项目(编号 20040491502)的成果。

收稿日期:2005-04-13;改回日期:2005-09-22;责任编辑:章雨旭。

作者简介:谭俊,男,1982年生。主要从事矿产普查与勘探及矿床地球化学研究工作。通讯地址:430074,中国地质大学研究生院1200406信箱;Email:tanjunallan@163.com。

洪新等,1996)、冀北小营盘(1800.0Ma,胡小碟等,1997)、辽北龙王庙(>2409.0Ma,辽宁冶金101队,1981)等。古生代末华力西构造期,中部秦岭地区秦岭微板块与扬子板块、华北板块全面对接,开始强烈的陆陆碰撞,碰撞型花岗岩始于205.0~220.0Ma(Sun et al.,2002;王非等,2004),金矿主要与该类岩浆活动有成因联系,金矿化集中于印支晚期(李俊建,1997;卢欣祥等,2003);西部地区,西伯利亚板块与华北—塔里木板块聚合作用显得非常强烈,在中国西部天山、阿尔泰等造山带地区形成了以华力西晚—印支期为主成矿期的集中区,如新疆康古尔塔格金矿带、西准噶尔,甘肃北山地区等。西伯利亚板块、华北—塔里木板块和扬子—华南板块的相继碰撞聚合,构成了东西走向、南北分异的古亚洲大陆。从三叠纪(250.0Ma)开始,太平洋板块与欧亚板块发生挤压碰撞与俯冲作用(胡受奚等,2001),中国东部处于大陆边缘活动带,俯冲作用引起了地壳内部及壳—幔物质交换,同时形成了交代型富集地幔,演化晚期产生了与交代—重熔型酸性—中酸性岩浆岩有关的燕山期金矿矿集区,如胶东、燕辽、辽吉、江西、福建等地,构成了中国滨太平洋成矿域,大规模成矿时间集中在110.0~130.0Ma。西南地区,中、新生代以来,随着古特提斯构造带的演化及印度板块逐步向古亚洲大陆的俯冲,形成了特提斯—喜马拉雅褶皱造山带,金矿成矿以喜马拉雅期为主。另外,新生代产于板块边缘或板内与火山活动有关(包括热泉型)的金矿床也占有较大的比例,如台湾金瓜石、云南腾冲两河金矿床等。

2 数据评价

2.1 前提及依据

同源岩浆成因金矿的同源岩体分两种情况:一是成矿流体与成矿物质是矿床内花岗质岩类的岩浆期后分异产物,二是与花岗质岩浆均来自深部的同一岩浆区。是否是金矿成矿的同源岩体一般通过微量元素和同位素示踪得到证实。该类型金矿的成岩成矿时差是客观存在的,受控于岩浆侵位的深度、岩体大小、岩浆成分、地热梯度、构造、围岩性质等,是许多随机因素综合作用的结果,具有正态分布变量的成因特征,符合统计意义。

同源金矿时差研究在具体过程中情况是很复杂的,其不准确性主要来源于成岩成矿年龄的误差,主要表现在:(1)对同一矿床,不同方法所测出的成岩成矿年龄差异很大,如张家口东坪金矿,含金石英脉

流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 103.0 ± 8.0 Ma(莫测辉等,1997), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法成矿年龄为 $172.0 \sim 188.0$ Ma(江思宏等,2000),锆石 U-Pb 年龄为 350.9 ± 0.9 Ma(李惠民等,1997);又如吉林夹皮沟金矿,含金石英脉流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 263.0 ± 21.0 Ma(李华芹等,1993),含金石英脉 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 3个年龄为 1824.0 ± 24.0 Ma, 1253.0 ± 17.0 Ma, 203.0 ± 60.0 Ma(吴尚全等,1991),矿体单颗粒锆石 U-Pb 年龄主成矿期为 $2469.0 \sim 2475.0$ Ma(李俊建等,1997)。显然,这些年龄数据很有可能未反映金矿真实的成矿年龄。(2)同一方法,选用不同的测年对象,所得到同一岩体(或矿床)的年龄差别很大,如辽宁阜新排山楼金矿黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄(骆辉等,1997)和石英 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄(李俊建等,2001)分别为 124.4 ± 0.4 Ma 和 2105.2 ± 10.4 Ma,二者差了1981.0Ma。另外,后期热事件会使测年对象的封闭性遭到破坏,如 Ar-Ar 法中氩同位素不同程度的带进和带出;辉钼矿 Re-Os 体系中 Re 的丢失;U-Pb 测年中锆石表面放射性成因铅的扩散等。这些因素都会影响到成岩成矿年龄的精度进而影响到金矿时差的准确确定。因而对成岩成矿年龄数据进行模拟计算前的质量评价和筛选是准确获得时差的首要工作和基础。

2.2 数据筛选

国内一些比较典型金矿和相应同源岩体的同位素测年数据见表1,且金矿床与矿区内岩浆岩的同源性已得到多方面的确认。如在胶东矿集区,罗镇宽等(2002)从地质学、岩石学、岩石化学、微量元素、同位素地球化学以及年代学方面,提出了郭家岭型花岗岩($126.0 \sim 130.0$ Ma)与金矿化成矿流体具同源性的认识,且成矿略晚于岩浆侵位。另外,牟平—乳山金矿成矿带昆崙山花岗质岩浆的上侵以及伴随的韧、脆性变形作用与金矿成矿关系也十分密切(徐洪林等,1997;张德全,1997);姬金生等(1996)、张连昌等(1998)根据 Pb、S、Sr、Nd 同位素对比,认为康古尔金矿矿区内次火山岩与金矿的形成有一定的成因联系;对于甘肃北山地区马庄山金矿,李华芹等(1999)根据矿石和成矿期矿物的稳定同位素组成及成岩成矿年代学研究,认为马庄山金矿床成矿作用与古火山作用有关;西秦岭大水金矿,赵彦庆等(2003)通过岩石化学、稳定同位素(C、H、O、Si)及稀土元素研究表明,大水金矿区的成岩与成矿作用具同源性,且同处造山带同碰撞环境。另外,数据收集时也综合考虑了矿床的区域地质背景和成矿时间的

表 1 同源岩成因金矿床和相关同源岩浆岩同位素年龄
Table 1 Isotope ages for comagmatic gold deposits and related cognate magmatites, China

编号	矿床名称	同源岩浆岩				矿床				资料来源	时差*(Ma)
		岩性	测定对象	测定方法	年龄(Ma)	测定对象	测定方法	年龄(Ma)			
1	黑龙江东安金矿	火山—侵入岩	全岩	Rb-Sr	112.0	矿石	Rb-Sr	108.0	敖贵武等,2004	4.0	
2	吉林八家子金矿	中酸性脉岩	锆石	SHRIMP U-Pb	241.0~218.0	绢云母	Ar-Ar	204.0±0.5 (I)	罗镇宽等,2002	14.0~37.0(25.5)	
3	吉林六批叶沟金矿	二长花岗岩	锆石	U-Pb	192.0~202.0	绢云母	Ar-Ar	190.3±0.3 (P) 190.0±0.6 (I)	a. 刘大瞻等,1994; b. 侯树桓等,2004	1.7~12.0(6.9)	
4	辽宁五龙金矿	三股流花岗岩	锆石 全岩	U-Pb Rb-Sr	129.0~131.0	黄铁矿	Rb-Sr	120.0±3.0	Wei et al., 2003, 2004	9.0~11.0(10.0)	
5	辽宁排山楼金矿	花岗岩类	锆石	SHRIMP U-Pb	124.0~126.0	全岩	K-Ar	125.0	a. 罗镇宽等,2001; b. 朱大岗等,2002	-1.0~1.0(0.0)	
6	内蒙古厂沟梁—二道沟金矿	西对面沟花岗岩	全岩	K-Ar	125.0~131.0	①		118.0~126.0	b. 王志等,1989; a. 苗来成,2003	-1.0~13.0(6.0)	
7	冀东峪耳崖金矿	蛇耳崖、牛心山花岗岩	锆石	SHRIMP U-Pb	172.0~175.0	石英	Rb-Sr	163.8	b. 李颖等,1993; a. 罗镇宽等,2001	8.2~11.2(9.7)	
8	冀东金厂峪金矿	青山口花岗岩	锆石	SHRIMP U-Pb	199.0±2.0	辉钼矿	Re-Os	177.0~192.0	罗镇宽等,2001	7.0~22.0(14.5)	
9	胶东玲珑金矿田	郭家岭花岗岩	锆石	SHRIMP U-Pb	126.0~130.0	②		120.0~126.0	Wang et al., 1998; 关康等,1998	0.0~10.0(5.0)	
10	胶东乳山金矿	崂山花岗岩	黑云母	K-Ar; Ar-Ar	120.0~123.0	绢英岩全岩	Rb-Sr	118.0±9.0	徐洪林等,1997	2.0~5.0(2.5)	
11	胶东玲珑金矿	郭家岭花岗岩	锆石	SHRIMP U-Pb	126.0~130.0	黄铁矿	Rb-Sr	121.6±8.1	杨进辉等,2000	4.4~8.4(6.4)	
12	胶东邓格庄金矿	崂山花岗岩	黑云母	Ar-Ar	129.0±0.6 (P) 130.7±2.7 (I)	绢英岩全岩	Rb-Sr	118.0±9.0	张德全等,1997	11.0~12.7(11.9)	
13	鲁西归来庄金矿	铜石杂岩体	锆石	SHRIMP U-Pb	175.7±3.8	③		160.0~170.0	胡华斌等,2004	5.7~15.7 (10.7)	
14	山西义寨金矿	闪长岩	*	*	159.8~134.7	石英	Ar-Ar	131.4±3.1(P) 150.8±2.3(P)	叶荣等,1999	-16.1~28.4(6.2)	
15	河南祁雨沟金矿	花山花岗岩	黑云母 全岩	K-Ar Rb-Sr	125.0~127.0	石英	Ar-Ar	107.1~130.3	齐金忠等,2004	-5.3~19.9(7.3)	
16	安徽铜陵朝山金矿	辉石闪长岩	锆石	SHRIMP U-Pb	142.9±1.1	④		133.0~143.0	王彦斌等,2004	-0.1~9.9(4.9)	
17	安徽凤阳—张人岭矿区	花岗闪长岩	锆石	U-Pb	128.0	石英	Ar-Ar	113.4~118.3	b. 应汉龙等,2002; a. 李学明等,1985	9.7~14.6(12.2)	
18	江西大背坞金矿	鹅湖花岗岩体	*	*	120.0~132.0	脉石矿物	Rb-Sr	118.1±1.3	陈柏林等,1997	1.9~13.9(7.9)	
19	福建紫金山金铜矿	花岗闪长斑岩	全岩	Rb-Sr	105.0±7.2	石英	Rb-Sr	100.0±3.0	张德全等,2001, 2003	5.0	
20	福建碧田金铜矿	流纹岩	全岩	Rb-Sr	94.0±7.7	冰长石	Ar-Ar	91.5±0.4	a. 张德全等,2003; b. 刘晓东等,2005	2.5	
21	海南抱伦金矿	尖峰岭花岗岩	黑云母	Ar-Ar	236.6±3.5(P)	白云母	Ar-Ar	219.4±0.6(P) 218.9±2.5(I)	舒斌等,2004	17.2~17.7(17.5)	
22	台湾金瓜石金矿	英安岩	*	*	1.1~1.7	**	**	1.2~1.4	谭立平等,1994	-0.3~0.5(0.1)	
23	内蒙安家营子金矿	花岗岩	锆石	U-Pb	132.0~138.0	⑤		126.0~132.0	李永刚等,2003	0.0~12.0(6.0)	
24	内蒙乌花敖包金矿	二长花岗岩	全岩	Rb-Sr	132.6±8.5	⑥		124.0±6.0	菅俊龙等,1997	8.6	
25	内蒙古朱拉扎嘎金矿	花岗斑岩	黑云母	K-Ar	291.0±1.0	矿石	Rb-Sr	275.0±6.0	江思宏等,2001	16.0	

26	西秦岭小沟里金矿	花岗岩	锆石	U-Pb	201.0±1.0	石英	Ar-Ar	197.0±1.0(P) 193.0±1.0(I)	a. 祁世才等, 2001; b. 冯建忠等, 2002	4.0~8.0(6.0)
27	西秦岭大水金矿	花岗岩	全岩	K-Ar	190.0~190.5	全岩	K-Ar	182.6~184.7	赵彦庆等, 2003	5.3~7.9(6.6)
28	甘肃寒山金矿	辉长岩	锆石	U-Pb	347.1±6.4	绢英岩	Rb-Sr	339.0±10.0	宋忠宝等, 2004	8.1
29	青海东昆仑五龙沟金矿	闪长玢岩	全岩	Rb-Sr	209.1±22.7	金矿石	K-Ar	197.0	李厚民等, 2001	12.1
30	北山地区马庄山金矿	潜流纹、潜英安斑岩	全岩	Rb-Sr	301.0~303.0	石英	Rb-Sr	298.0±28.0	李华芹等, 1999	3.0~5.0(4.0)
31	新疆萨吾尔金矿带	钙碱性火山岩	全岩	Rb-Sr	343.0±22.0	石英	Ar-Ar	332.1~336.8	Shen et al., 2005	6.2~10.9(8.6)
32	新疆布依尔克斯岱金矿	安山岩	全岩	Rb-Sr	347.0	石英	Ar-Ar	335.5~336.8	a. 贺伯初等, 1994; b. 曾庆栋等, 2005	10.2~11.5(10.9)
33	东天山西滩金矿	二长花岗岩斑岩	全岩	Rb-Sr	281.0	石英	Rb-Sr	273.0	姬金生等, 1996	8.0
34	东天山康古尔金矿	潜火山岩	全岩	Rb-Sr	282.0~300.0	石英	Rb-Sr	280.0~292.0	张连昌等, 1998	-10.0~20.0(5.0)
35	阿尔金山大平沟金矿	黑云母花岗岩	锆石	U-Pb	485.0±10.0	石英	Rb-Sr	487.0±21.0	杨屹等, 2004	-2.0

注: 时差下限=最小成岩年龄-最大成岩年龄, 上限=最大成岩年龄-最小成岩年龄; 未栏圆括号内数据为平均成岩成矿时差; 表中部分数据按有效数字规则进行了取舍(保留 1 位), 部分年龄数据原文中未标出误差; * 原文作者未列出; 成岩或成矿年龄为同一作者采用相同或不同方法测定(a, b 分别为成岩、成矿年龄测试者), 同一方法多次测定或采用不同方法测定时, 给出的是年龄范围, 年龄误差省略; P, I 分别为 Ar-Ar 法中坪年龄和等时线年龄。① 据伴生脉岩年龄并结合前人资料推断; ② 根据成矿后的花岗岩斑岩脉为 120±2Ma 限定; ③ 据成岩年龄推断; ④ 据铜官山石英闪长岩两次脉动就位年龄得出; ⑤ 据矿体与花岗岩、脉岩的穿插关系; ⑥ 矿石-载金矿物。

可比性, 选择研究程度较深入且被公认可靠性较高的年龄值。如玲珑金矿田(120.0~126.0Ma)、乳山金矿(118.0±9.0Ma)等, 都与胶东大规模成矿时间(110.0~130.0Ma)(苗来成等, 1997; 关康等, 1998; 卢焕章等, 1999; Qiu et al., 2002; Zhang et al., 2003; 陈衍景等, 2004)一致; 秦岭小沟里金矿(193.0~197.0Ma)、大水金矿(182.6~184.7Ma)也基本与该地区岩浆成因金矿集中于印支晚期(李俊建, 1997; 卢欣祥等, 2003)的成矿地质背景一致; 东天山康古尔塔格金矿带, 金矿化与石炭纪火山岩(282.0~300.0Ma)在成因上密切相关(姬金生等, 1996; 张连昌等, 1998), 西滩金矿成矿年代为 273.0Ma, 康古尔金矿主成矿期为 280.0~292.0Ma, 成矿略滞后于火山岩活动。同时, 笔者选取成岩成矿年龄时也充分考虑了岩石学、矿物学及同位素地质年代学等方面的结论及证据, 如辽宁二道沟金矿, 颗粒锆石年龄为 2475.0Ma(李俊建等, 1996), 苗来成等(2003)运用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得成矿前或成矿期闪长玢岩脉的年龄为 126.0±1.0Ma, 并结合前人资料将本区金矿化年龄限定在 118.0~126.0Ma, 显然选择后者做时差统计可靠性更高, 且与辽西排山楼金矿(124.0~126.0Ma, 骆辉等, 1997; 罗镇宽等, 2001)、辽东五龙金矿(120.0±3.0Ma, 魏俊浩等, 2003)等矿化时间十分一致。其它矿床及同源岩体年龄的选择也遵循此原则, 在此不再赘述。

对于前寒武纪形成的金矿床, 一是受到后期地质改造或成矿叠加的影响, 二是受目前测年方法在古老矿床定年中应用局限性的制约, 如 K-Ar、Ar-Ar 法中 Ar 的丢失、体系封闭温度低, 锆石 U-Pb 体系表层放射性成因铅的扩散等, 成岩成矿年龄争议较大, 本文未选用该时期形成金矿床的成岩成矿年龄做时差统计。显生宙形成的矿床成岩成矿年龄认识相对较统一, 因而是时差研究较理想的选择对象。图 1 也显示了中国显生宙同源岩浆成因金矿床主要集中在华力西晚一印支期和燕山期。

3 时差统计分析

3.1 数据统计

统计的金矿成岩成矿时差数据表明(表 1), 金矿的成矿事件同步或略滞后于岩浆活动, 平均时差介于零到十几个百万年, 也有个别矿床的时差超过了 20.0Ma。另外, 部分金矿的成岩成矿时差出现了负值(即成矿早于成岩), 如: 辽宁排山楼金矿(-1.0~1.0Ma)、河南祁雨沟金矿(-5.3~19.9Ma)、安徽

铜陵朝山金矿(-0.1~9.9Ma)等,负值部分应当不具实际地质意义,可能由测量方法、测试误差或测试对象的同位素封闭程度所引起。时差—成矿年龄分布图(图1)同样显示,金矿成岩成矿时差一般不超过20.0Ma,集中在0~15.0Ma。

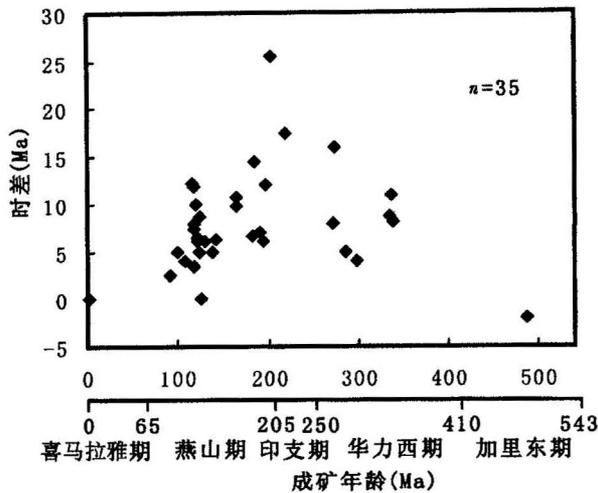


图1 同源岩浆成因金矿成岩成矿时差—成矿年龄分布图(数据来自表1)

Fig. 1 Diagenesis—mineralization time gap vs. mineralization age figure for the comagmatic gold deposits (data from Table 1)

为了尽量避免统计过程中的误差,本文采用了区间赋值的原则统计分析时差的分布范围,即在金矿时差范围内的每个时差间距均赋值“1”,如:胶东招掖地区玲珑金矿田的成岩成矿时差介于0.0~10.0Ma,则在时差统计分布图上(-2,0]、(0,2]、(2,4]、(4,6]、(6,8]和(8,10]各时差间隔均赋值“1”。在-18.0~38.0Ma区间内时差总频数为161,总时差间距数为28,平均每个时差间距的频数约为6。以此为时差频数背景值,从数据统计直方图(图2)可以看出,金矿与同源岩体的时差集中于0~16.0Ma。通过时差加权平均计算($mean = \sum \text{时差间距} \times \text{该间距内频数} / \text{矿床总数}$),时差均值约为6.3Ma。研究表明,对于一个30km²的隐伏岩体(埋深在1~2km以下),从800℃的岩浆冷却到岩体中心为600℃时,仅需7.2Ma时间(沈福农,1993),此时岩体已基本固结,不可能再分异出岩浆热液。本次研究得出的金矿与同源岩体的平均时差约为6.3Ma,基本与上述岩体的冷凝时限相吻合。这也进一步表明虽然在空间上和成因上与金矿成矿有密切联系的花岗岩体已经固结,但深部同源岩浆成矿也是可能

的,也就是说成矿期岩浆热液是深部与岩体同源的岩浆区分异的结果。

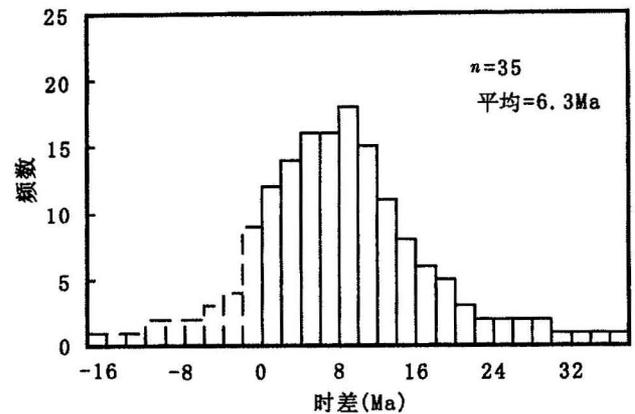


图2 同源岩浆成因金矿成岩成矿时差统计直方图(数据来自表1;虚线为时差负值部分,无地质意义)

Fig. 2 Histogram of diagenesis—mineralization time gap for the comagmatic gold deposits (data from Table 1; broken line part is without geological significance)

3.2 柯尔莫哥洛夫准则检验

许多地质变量是服从或接近正态分布的(赵鹏大等,1994),本文对金矿成岩成矿平均时差采用柯尔莫哥洛夫准则进行了检验,考虑到吉林八家子金矿(平均25.5Ma)成岩成矿时差较大,本次未将其列入正态检验范围。其余34个时差数据均值($mean$)为7.4Ma,标准方差($Std. Dev$)4.3Ma,采用时差组距 $d=2Ma$ 统计。结果表明,时差经验分布与理论分布的最大累计频率差 $D_{n-max}=0.0580$ (在此不详述,具体可查阅相关统计书籍),而柯尔莫哥洛夫临界值 $D_{34,0.05}=0.2274$ (α 为信度),远大于 D_{n-max} ,因而在0.05信度下数据具有较优的正态分布特征。对于正态变量,在($mean-2 \cdot Std. Dev$, $mean+2 \cdot Std. Dev$)范围内已占95.6%的概率(赵鹏大等,1994)。从图3中可以看出,除去没有地质意义的负值部分,同源岩浆成因金矿的成岩成矿时差主要集中在0~16.0Ma,平均约为7.4Ma。

上述散点图、统计直方图及正态分布图的分析结果十分一致,都集中在0~16.0Ma,代表了同源岩浆成因金矿成岩成矿时差的集中分布区间。

4 讨论

本文运用时差模拟统计,初步将同源岩浆成因金矿的成岩成矿时差限定在0~16.0Ma,平均约为

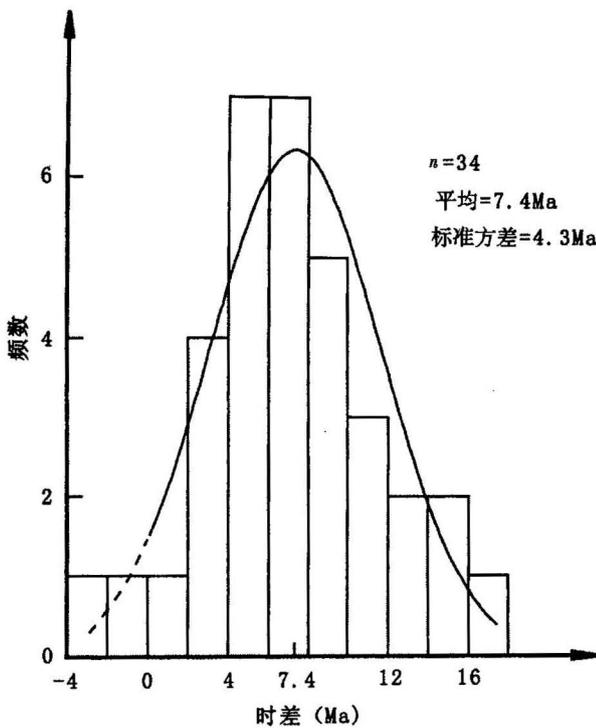


图3 同源岩浆成因金矿成岩成矿时差的正态分布曲线
(数据来自表1;虚线为时差负值部分,无地质意义)
Fig. 3 Normal distribution curve of diagenesis—
mineralization time gap for the comagmatic gold
deposits (data from Table 1; broken line part is
without geological significance)

7.0Ma。尽管也有学者认为,单一侵入体所引起的热液活动最长时间 $<1.0\text{Ma}$ (Cathles et al., 1997)。在目前的定年测试条件下,笔者认为,成岩成矿年龄要精确到 1.0Ma 还是很困难的,而且在地质问题的讨论上也没有太大的实际意义。另外,考虑到金矿化一般与花岗岩类小岩株有关,而对于一个大的侵入岩体,其冷凝时间通常仅需 $7.2\sim 10.0\text{Ma}$ (沈福农, 1993; 马昌前等1994); 同时对一个中、大型金矿的形成,其主成矿阶段可以持续 8.0Ma 左右(魏俊浩等, 2001),我们完全有理由相信同源岩浆金矿的成岩成矿时差可以达到 16.0Ma 的可能。至少可以认为,在同一构造背景条件下,若成岩与成矿存在着 $\leq 16.0\text{Ma}$ 时差,就应该重视二者之间的联系(岩浆后期热液成矿与深部同源成矿均有可能),需要结合微量元素和同位素示踪进一步揭示其成因关系。

金矿化温度(一般 $200\sim 350^\circ\text{C}$)低于花岗岩类冷凝封闭温度(一般 $>600^\circ\text{C}$),说明金矿床中同源岩体与矿床形成的年龄差是客观存在的。时差获取的关键还是成岩成矿年龄的准确测定及矿床成因的正确

把握。目前,直接和间接的定年方法在金矿床同位素年代学研究中均应用十分广泛。后者是根据热液蚀变或热液脉中矿物、地质体间的相互关系等方法来间接确定岩体和矿床的年龄,误差相对较大。但如果蚀变矿物的形成及其同位素体系的封闭与金矿物在形成时间上接近,且没有受到后期热事件的扰动,蚀变矿物的年龄是可以较准确反映成矿年龄的,如与矿石矿物密切共生且是同时代产物的单颗粒热水锆石、金红石、榍石、磷灰石 U-Pb 法,云母类、冰长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法等。在测年矿物和测试方法得当的前提下,由此计算得出的成岩成矿时差应当与真实时差十分接近。直接的定年方法近来发展较快的有流体包裹体 Rb-Sr 和 Ar-Ar 法、矿石矿物 Rb-Sr、Sm-Nd 及 Re-Os 法、单矿物 Pb 逐步淋滤法,运用这些方法得到的就是直接的成岩成矿年龄,二者差值反映的是矿床的真时差。

本文收集的成矿年龄过半数为直接定年方法测定的结果(16/35),岩体年龄测试中锆石 U-Pb 法占了相当大的比例(16/35),而且综合考虑了岩体与成矿的同源性、区域地质背景和成矿时间的可比性及单个矿床年代学数据的可靠性,从多方面来厘定同源岩浆成因金矿的时差。当然,随着同位素地质年代学的进一步完善,该类金矿时差的厘定将会更具体,这对有关矿床的成因探讨,诸如年代学和地球化学数据的解释等均有帮助。

5 结论及建议

本文通过数据统计和柯尔莫哥洛夫准则检验,对同源岩浆成因金矿成岩成矿时差的分布特征及范围主要得出以下结论:

(1)同源岩浆成因金矿成岩成矿时差受控于多种随机因素,具有正态分布的特征,均值为 7.0Ma 左右;

(2)同源岩浆成因金矿成矿同步或略滞后于同源岩浆活动,成岩成矿时差的分布范围一般介于 $0\sim 16.0\text{Ma}$ 。

目前,关于金矿成岩成矿时差的专属性报道还不是很多,主要原因是矿床年代学的不完善,不同学者对同一矿床采用不同的测试方法有时会得出相差十分悬殊或者截然相悖的结论。为此,笔者对金矿成岩成矿时差研究提出了以下建议:

(1)加强对金矿成岩成矿地质背景的研究。任何矿床的形成都是区域构造—岩浆演化综合作用的结果,因此时差研究所基于的矿床年代学数据必须符合

合地质事实。中国金矿成岩成矿年代表现出了明显的时域分布特征,东部地区(广东、福建、江西、安徽、胶东、辽东、吉南等)金矿化主要形成于燕山期;中西部(西秦岭,新疆等地)金矿,其成矿期主要为华力西晚期和印支期。因此在金矿时差研究中要重视成矿地质背景的研究分析,从而对成岩成矿同位素测年结果是否合乎实际作出判断。

(2)重视时差研究与微量元素和同位素示踪的结合,对矿床成因从年代学和地球化学角度作出合理的解释。微量元素及放射性成因同位素等,由于其在一般的地质作用及岩浆分异作用过程中地球化学性质比较稳定,因此现已成为研究岩浆源区演化、判别成矿物质来源和分析矿床成因的有力工具。金矿成岩成矿时差主要从年代学角度研究金矿的成因,尤其是与岩浆岩的关系。而在目前的定年测试技术条件下,加之成矿作用的多期性、后期热事件等原因,要做到十分精确还是有困难的。因而,利用金矿时差对矿床成因的判断,不仅需要高精度的成岩成矿年龄数据做基础,更离不开微量元素和同位素地球化学实践技术的佐证。

参 考 文 献 / References

- 敖贵武,刘智明,薛明轩,裴志霞,汪长生,陈海明,姜迎久. 2004. 黑龙江东安金矿床成矿机理. 黄金地质, 10(1): 15~19.
- 陈洪新,孟宪刚,王建平. 1996. 内蒙古韧性剪切带型金矿——十八顷毫矿区⁴⁰Ar/³⁹Ar坪年龄特征及其地质意义. 矿物学报, 16(1): 58~61.
- 陈柏林,董法先,王平安,刘建民,沈庭远. 1997. 江西大背坞金矿床成因探讨. 江西地质, 11(3): 7~15.
- 陈毓川,李兆鼎,毋瑞身. 2001. 中国金矿床及其成矿规律. 北京: 地质出版社, 285~287.
- 陈衍景, Pirajno F, 赖勇, 李超. 2004. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境. 岩石学报, 20(4): 907~922.
- 冯建忠,汪东波,邵世才,王学明,林国芳. 2002. 西秦岭小沟里石英脉型金矿床成矿地质特征及成因. 矿床地质, 21(2): 159~167.
- 郭文魁,刘梦庚,王永勤,刘兰笙,等. 1987. 中国内生金属成矿图说明书. 北京: 地图出版社, 1~72.
- 关康,罗镇宽,苗来成,黄佳展. 1998. 胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究. 地质科学, 33(3): 318~328.
- 贺伯初,谭克仁,吴玺虹. 1994. 北疆吉木乃布氏金矿幔源岩浆岩时代及 Sr, Nd 同位素证据. 大地构造与成矿学, 18(3): 219~228.
- 胡小蝶,陈志宏,赵彦明,王魁元. 1997. 河北小营盘金矿成矿年代——单颗粒锆石 U-Pb 同位素年龄新证据. 前寒武纪研究进展, 20(2): 22~28.
- 胡受奚,孙景贵,凌洪飞,叶瑛,翟建平,方长泉. 2001. 中生代苏—鲁活动大陆边缘榴辉岩、煌斑岩、金矿及富集地幔间的成因联系. 岩石学报, 17(3): 425~435.
- 胡华斌,毛景文,刘敦一,牛树银,王涛,李永峰,石玉若. 2004. 鲁西铜岩体的锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义. 地学前缘, 11(2): 453~460.
- 侯树桓,桑海清. 2004. 吉林六批叶沟金矿床绢云母⁴⁰Ar-³⁹Ar快中子活化法定年研究. 矿床地质, 23(4): 502~508.
- 姬金生,张连昌,曾章仁,卢登蓉,杨幸科,杨建国. 1996. 东天山康古尔塔格金矿带年代学研究. 地质科学, 31(1): 80~89.
- 江思宏,杨岳清,聂凤军,张建华,刘妍. 2001. 内蒙古朱拉扎嘎金矿床地质特征. 矿床地质, 20(3): 234~242.
- 李学明,李彬贤,张巽,周泰禧. 1985. 安徽管店岩体的同位素地质年龄和郟庐断裂带的动力学变质作用. 中国科学技术大学学报, (增刊): 254~261.
- 李长江,徐步台,蒋叙良,胡永和. 1992. 中国东部某些热液矿床的成岩成矿的时差序列及有关问题讨论. 矿床地质, 11(2): 106~112.
- 李颖,刘连登. 1993. 斑岩型金矿床成矿模式. 中国金矿床: 进展与思考. 北京: 地质出版社, 46~53.
- 李惠民,李怀坤,陆松年. 1997. 用矿床中的热水锆石 U-Pb 法确定东坪金矿的成矿时代. 地球学报, 18(增刊): 176~178.
- 李厚民,沈远超,胡正国,钱壮志. 2001. 青海东昆仑五龙沟金矿床成矿条件及成矿机理. 地质与勘探, 37(1): 65~69.
- 李永刚,翟明国,杨进辉,苗来成,关康. 2003. 内蒙古赤峰安家营子金矿成矿时代以及对华北中生代、爆发成矿的意义. 中国科学(D辑), 33(10): 960~966.
- 李俊建,沈保丰,毛德宝,李双宝,周慧芳,程玉明. 1996. 吉林夹皮沟金矿成矿年代的研究. 70(4): 335~341.
- 李俊建. 1997. 初论中国金矿的成矿时代. 前寒武纪研究进展, 20(1): 17~26.
- 李俊建,沈保丰,骆辉,翟安民,曹秀兰. 2001. 辽宁阜新排山楼金矿的⁴⁰Ar/³⁹Ar成矿年龄. 地质科学, 36(1): 107~111.
- 李华芹,刘家齐,魏林. 1993. 热液矿床流体包裹体研究及其地质应用. 北京: 地质出版社, 1~114.
- 李华芹,陈富文,蔡红,刘后群. 1999. 新疆东部马庄山金矿成矿作用同位素年代学研究. 地质科学, 34(2): 251~256.
- 罗镇宽,裘有守,关康,苗来成, Qiu N J, McNaughton N J, Groves D I. 2001. 冀东峪耳崖和牛心山花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 278~285.
- 罗镇宽,苗来成,关康,裘有守, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2001. 辽宁阜新排山楼金矿区岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其意义. 地球化学, 30(5): 483~490.
- 罗镇宽,苗来成. 2002. 胶东招掖地区花岗岩和金矿床. 北京: 冶金工业出版社, 20~56.
- 罗镇宽,关康,苗来成. 2002. 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. 现代地质, 16(1): 19~25.
- 罗镇宽,苗来成,关康,裘有守, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2003. 冀东都山花岗岩基及相关花岗斑岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年及其意义. 地球化学, 32(2): 173~180.
- 刘连登. 1987. 论中国最主要的脉状金矿的成因. 长春地质学院院报, 17(4): 373~382.
- 刘大瞻,曲森,刘跃文,花艳秋. 1994. 五道溜河序列的建立及地质意义. 吉林地质, 13(1): 51~58.
- 刘晓东,华仁民. 2005. 福建碧田金银铜矿床冰长石的⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄. 地质论评, 51(2): 151~155.
- 柳少波,王联魁. 1996. 金矿的成岩成矿时差评述. 地质论评, 42(2): 154~165.
- 卢焕章,袁万春,张国平,李院生,龙洪波. 1999. 玲珑—焦家地区主要金矿床稳定同位素及同位素年代学. 桂林工学院学报, 19(1): 1~8.
- 卢欣祥,尉向东,于在平,叶安旺. 2003. 小秦岭—熊耳山地区金矿

- 的成矿流体特征. 矿床地质, 22(4): 377~385.
- 骆辉, 赵运起. 1997. 辽宁阜新排山楼金矿地质和成矿作用. 前寒武纪研究进展, 20(4): 13~24.
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华. 1994. 花岗岩类岩浆动力学. 武汉: 中国地质大学出版社, 97~99.
- 莫测辉, 王秀璋, 程景平. 1997. 冀西北东坪金矿含金石英脉石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄及地质意义. 地球化学, 3: 20~27.
- 苗来成, 罗镇宽, 黄佳展, 关康, Wang L G, McNaughton N J, Groves D I. 1997. 山东招掖金矿带内花岗岩类侵入体锆石 SHRIMP 研究及其意义. 中国科学(D辑), 27(3): 207~213.
- 苗来成, 范蔚茗, 翟明国, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2003. 金厂沟梁—二道沟金矿带内花岗岩类侵入体锆石的离子探针 U-Pb 年代学及意义. 岩石学报, 19(1): 71~80.
- 齐金忠, 马占荣, 李莉. 2004. 河南祁雨沟金矿床成矿流体演化特征. 黄金地质, 10(4): 1~10.
- 沈福农. 1993. 花岗岩与热液成矿关系剖析——三论深源热液成矿模式. 北京: 地质出版社, 7~8.
- 邵世才, 汪东坡. 2001. 南秦岭三个典型金矿床的 Ar-Ar 年龄及其地质. 地质学报, 75(1): 106~110.
- 舒斌, 王平安, 李中坚, 陈柏林, 董法先. 2004. 海南抱伦金矿的成矿时代研究及其意义. 现代地质, 18(3): 316~320.
- 宋忠宝, 任有祥, 李智佩, 杨建国, 张江华. 2004. 北祁连山寒山辉长岩成岩时代的确定. 岩石矿物学杂志, 23(3): 253~256.
- 谭立平, 陈正宏, 陶正章. 1994. 台湾更新世金矿床的构造和地球化学特征. 地质地球化学, 1: 18~22.
- 魏俊浩, 刘丛强, 赵永鑫, 李志德. 2001. 辽宁五龙金矿主成矿阶段成矿持续时限. 地质论评, 47(4): 433~437.
- 魏俊浩, 刘丛强, 赵永鑫, 李志德. 2003. 论金矿成矿年代的确定. 地质学报, 77(1): 113~119.
- 王志, 徐忠勋, 杨福和. 1989. 辽宁二道沟金矿地质与成因. 长春地质学院学报, 19: 287~297.
- 王秀璋, 程景平, 张宝贵. 1992. 中国改造型金矿床地球化学. 北京: 科学出版社, 36~121.
- 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 杨竹森, 田世洪. 2004. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的时代——朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年. 地球学报, 25(4): 423~427.
- 王非, 朱日祥, 李齐, 贺怀宇, 罗清华, 卢欣祥, 桑海清, 王英兰. 2004. 秦岭造山带的差异升降特征——花岗岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究的证据. 地学前缘, 11(4): 445~459.
- 吴尚全. 1991. 吉林夹皮沟金矿含金石英脉的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 中子活化年龄测定. 矿床地质, 10(4): 349~358.
- 徐洪林, 张德全, 孙桂英. 1997. 胶东昆崙山花岗岩的特征、成因及其与金矿的关系. 岩石矿物杂志, 16(2): 131~143.
- 营俊龙, 赵溥云, 郭虹. 1997. 原生金矿成矿年龄测定研究. 铀矿地质, 13(4): 232~240.
- 叶荣, 赵伦山, 沈辅立. 1999. 山西义兴寨金矿床地球化学研究. 现代地质, 13(4): 415~418.
- 杨进辉, 周新华. 2000. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物 Rb-Sr 等时线年龄与成矿年代. 中国科学(D辑), 45(14): 1547~1553.
- 应汉龙, 刘秉光. 2002. 安徽凤阳和张八岭地区含金石英脉的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义. 矿床地质, 21(3): 240~245.
- 杨屹, 陈宣华, George G, 王小凤, 秦, 陈正乐, 杨风, 陈柏林, 李学智. 2004. 阿尔金山早古生代岩浆活动与金成矿作用. 矿床地质, 23(4): 464~472.
- 张德全, 徐洪林, 孙桂英. 1997. 山东牟平邓格庄金矿的地球化学特征及成因. 矿床地质, 16(3): 204~213.
- 张德全, 李大新, 丰成友, 董英君. 2001. 紫金山地区中生代岩浆系统的时空结构及其地质意义. 地球学报, 22(5): 403~408.
- 张德全, 丰成友, 李大新, 余宏全, 董英君. 2003. 福建碧田矿床冰长石的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义. 矿床地质, 22(4): 360~364.
- 张德全, 余宏全, 李大新, 丰成友. 2003. 紫金山地区的斑岩—浅成热液成矿系统. 地质学报, 77(2): 254~261.
- 张连昌, 姬金生, 曾章仁, 李华芹. 1998. 康古尔金矿区次火山岩同位素年龄学及其意义. 新疆地质, 16(2): 158~162.
- 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 1994. 矿床统计预测. 北京: 地质出版社, 17~47.
- 赵彦庆, 叶得金, 李永琴, 陈国忠. 2003. 西秦岭大水金矿的花岗岩成矿作用特征. 现代地质, 17(2): 151~156.
- 朱大岗, 曲亚军, 孟宪刚. 2002. 辽宁阜新地区金及多金属矿构造控矿分析与资源评价. 北京: 地震出版社, 72~88.
- 曾庆栋, 沈远超, 刘铁兵, 李光明, 申萍. 2005. 新疆北部布尔克斯岱金矿床 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素年代学研究. 吉林大学学报, 35(1): 12~16.
- Cathles L M, Erendi A H, Barrie T. 1997. How long can a hydrothermal system be sustained by a single intrusive event? Economic Geology, 92: 766~771.
- Qiu Y M, Groves D I, McNaughton N J, Wang L, Zhou T. 2002. Nature, age and tectonic setting of orogenic lode-gold mineralization in the Jiaodong Peninsula of North China Craton, China. Mineralium Deposita, 37: 283~305.
- Sun W D, Li S G, Chen Y D, Li Y J. 2002. Timing of syngenetic granitoids in the South Qinling, Central China: Constrains on the evolution of the Qinling—Dabie orogenic belt. Journal of Geology, 100: 457~468.
- Shen P, Shen Y C, Zeng Q D, Liu T B, Li G M. 2005. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ age and geological significance of the Sawur gold belt in northern Xinjiang, China. Acta Geologica Sinica (English edition), 79(2): 276~285.
- Wang L G, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I, Luo Z K, Huang J Z, Miao L C, Liu Y K. 1998. Constrains on crustal evolution and gold metallogeny in the northwestern Jiaodong peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids. Ore Geology Reviews, 13: 275~291.
- Wei J H, Liu C Q, Tang H F. 2003. Rb-Sr and U-Pb isotopic systematics of pyrite and granite in Liaodong gold province, North, China; implication for the age and genesis of a gold deposit. Geochemical Journal, 37: 567~577.
- Wei J H, Qiu X P, Guo D Z, Tan W J. 2004. Geochemistry of ore fluids and Rb-Sr isotopic dating for the Wulong gold deposit in Liaoning, China. Acta Geologica Sinica (English edition), 78(6): 1267~1274.
- Zhang X O, Cawood P A, Wilde S A, Liu R Q, Song H L, Li W, Snee L W. 2003. Geology and timing of mineralization at the Cangshan gold deposit, north-western Jiaodong Peninsula, China. Mineralium Deposita, 38: 141~153.

Statistic Study of Diagenesis—Mineralization Time Gap for Comagmatic Gold Deposits

TAN Jun, WEI Junhao, TAN Wenjuan, GUO Dazhao

Faulty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei, 430074

Abstract

The diagenesis—mineralization time gap as one hotspot in gold deposit study is one important basis to confirm the genetic relationship between gold deposits and their cognate magmatites. Moreover, these gold deposits distribute broadly in China and the metallogeny and petrology for them are in the greatest details. In this paper, the authors collected published isotopic ages of some typical gold deposits and related intrusions to discuss the time gap distribution characteristic and range. According to data statistic and Kolmogorov rule test, the mineralizing events are coeval with or postdate comagmatic intrusions. The time gap obeys to normal distribution under 0.05 confidence level and cluster between 0 and 16.0 Ma averaging at about 7.0 Ma. Thus, if the time gap is ≤ 16.0 Ma, we should recognize the cognate relationship between the deposit and the intrusion. The authors also emphasize that for the exact diagenesis—mineralization time gap one should strengthen the study of geological setting of gold mineralization, pay attention to the combination between the time gap and trace elements and isotopic trace study, and explain the deposit genesis on the basis of both chronology and geochemistry.

Key words: comagmatic gold deposit; diagenesis—mineralization time gap; statistic analysis