黔东南石英脉型金矿毒砂 Re-Os 同位素定年及其地质意义

王加昇[1,2)]，温汉捷[1)]，李超[3)]，丁伟[1,2)]，张锦让[1,2)]

1）中国科学院地球化学研究所，矿床地球化学国家重点实验室，贵阳，550002；
2）中国科学院研究生院，北京，100049； 3）国家地质实验测试中心，北京，100037

内容提要：黔东南石英脉型金矿床是雪峰多金属成矿带的重要组成部分，有较好的找矿前景，但对该区成矿理论的认识，特别是在成矿物质来源、成矿时代以及成矿动力学背景的认识上仍存在很大分歧。本次研究分别对该区两个主要金矿床（平秋、金井）的载金矿物——毒砂进行了 Re-Os 同位素定年研究。测试结果表明，平秋金矿蚀变岩型毒砂等时线年龄为 400±24 Ma，MSWD=0.96，初始$^{187}Os/^{188}Os$=1.24±0.57；金井金矿石英大脉型毒砂等时线年龄为 174±15 Ma，MSWD=1.07，初始$^{187}Os/^{188}Os$=8.04±0.45。前者属于加里东期，并与该区存在的东西向基底剪切断裂形成时期一致；后者属印支—燕山期，与雪峰地区存在的中酸性岩体以及黔东南地区广泛存在的隐伏岩体应属同期岩浆-构造活动产物。通过硫化物的 Re-Os 同位素定年研究，首次报道了该区至少存在加里东期、印支—燕山期两个重要的金成矿期。初始$^{187}Os/^{188}Os$值则反映该区金矿成矿物质来源于地壳。

关键词：Re-Os 定年；毒砂；蚀变岩型；石英大脉型；金矿床

贵州省境内出露两大重要的金矿矿集区，其一是久负盛名的，属于西南大面积低温成矿域重要组成部分的黔西南卡林型金矿（涂光炽，2002；胡瑞忠等，2007）；其二是属于雪峰金成矿带西南段的黔东南石英脉型金矿。相比较黔西南卡林型金矿的高度关注、广泛而深入的研究，黔东南的石英脉型金矿尽管也有不少学者对该区进行了大量的工作（余大龙，1993；余大龙等，1998；卢焕章等，2005，2006；王尚彦等，2006；朱笑青等，2006；叶俊等，2008），取得一定的研究成果，但仍显得十分薄弱。相比较同属一个构造单元并与其邻近的湘西金矿，其研究程度亦显不足。

雪峰古陆为江南古陆的西南段，是华南最重要的金成矿区带之一，大小矿床星罗棋布，据不完全统计，雪峰地区有金矿床（点）319 处（彭建堂等，1998，2000；彭建堂，1999）。其中位于湖南境内著名的金矿床有沃溪、七宝山、黄金洞、万古、漠滨、肖家、平茶、铲子坪等。而贵州省境内主要分布在天柱、锦屏、黎平县地区，著名的金矿床有金井、平秋、八克、同古等。由于基础条件差，认识程度低，目前黔东南矿产资源的勘查和开采，主要集中在 500 m 以上的地表浅部（王尚彦等，2006）。以前的工作认为储量低、前景差的矿床如花桥、平秋金矿等与实际的开采情况大不相同（余大龙，1993；余大龙等，1998；卢焕章等，2005），其远景储量远远超出人们的预期，该区仍具有较大的找矿潜力。但是对该区成矿理论的认识，特别是在成矿物质来源、成矿时代以及成矿动力学背景的认识上却存在很大分歧。其中成矿时代的分歧归纳起来主要有 3 种观点：其一是武陵—雪峰期（1000～800 Ma）成矿（罗献林，1989；张景荣等，1989；陈柏林，2001）；其二是加里东期（370～450 Ma）成矿（王秀璋等，1999；卢焕章等，2005，2006；朱笑青等，2006）；其三是兼有加里东期，印支—燕山期两期成矿（刘继顺，1993；彭建堂等，1998；彭建堂，1999）。而这些分歧的存在很大程度上限制了该区找矿思维，找矿方法的突破。

辉钼矿 Re-Os 定年已经是一种比较成熟而被广泛应用于中高温矿床的直接定年方法，但是辉钼矿并非所有矿床的常见矿物，特别是中低温热液矿床中很难见其踪影，使得 Re-Os 定年方法的使用受

注：本文为国家重点基础研究发展计划项目（编号 2007CB411401），国家科技部专项（编号 KCZX20100104）联合资助成果。
收稿日期：2010-07-03；改回日期：2011-04-13；责任编辑：周健。
作者简介：王加昇，男，1985 年生。博士研究生，从事矿床地球化学研究。Email：jiashengwang@126.com。通讯作者：温汉捷，男，1971 年生。博导，研究员，从事矿床地球化学和非传统稳定同位素研究。Email：wenhanjie@vip.gyig.ac.cn。
DOI：CNKI：11－1951/P.20110517.1002.001 网络出版时间：2011-5-17 10：02
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20110517.1002.001.html

到很大限制。近年来，随着分析测试方法的不断改进(Shirey et al., 1995；漆亮等，2006；储著银等，2007；李超等，2009，2010；Qi et al., 2010)，以及高精度、高灵敏度仪器(HR-ICP-MS，TIMS)的更新和使用，一些低 Re、Os 含量硫化物(如黄铁矿、毒砂、黄铜矿、磁黄铁矿、斑铜矿、含砷黄铁矿等)的测试也成为可能(Freydier et al., 1997；Stein et al., 1998，2000；Mathur et al., 1999；Arne et al., 2001；Barra et al., 2003；Liu et al., 2004；Morelli et al., 2004，2005，2007；Mikulski et al., 2005；Yu et al., 2005；Zhang et al., 2005；陈懋弘等，2007；Cardon et al., 2008；Feng et al., 2009；Selby et al., 2009)。这极大地推进了 Re-Os 定年方法在各类型矿床中的使用，为解决中低温热液矿床的年代学限制带来了可能。本文利用载金矿物毒砂的 Re-Os 定年方法，分别对锦屏平秋金矿蚀变岩型毒砂以及金井金矿石英大脉型毒砂进行了定年尝试，以期获得该区准确的成矿时代及成矿动力学背景信息。

1 地质概况

黔东南天柱、锦屏地区的金矿床(图 1)位于扬子准地台和华南加里东褶皱带的结合部，雪峰山多金属成矿带的西南段。区内出露地层有前震旦系下江群(湖南省境内称之为板溪群)、震旦系、石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系，局部有第四系覆盖。其中震旦系与前震旦系下江群，石炭系与下江群或震旦系，二叠系与下江群、白垩系与下江群、第四系与下伏地层均呈角度不整合接触关系。石炭系与二叠系，侏罗系与二叠系之间呈平行不整合接触关系(卢焕章等，2005)。金矿主要赋存于前震旦系下江群中，下江群地层总厚度约 7000 多米，其从下至上分番召组、清水江组、平略组和隆里组。除平略组目前尚未见含金石英脉外，其余各组、段都发育有含金石英脉。区内最老的地层为番召组，可分为两段，岩性都是灰—淡绿色板岩夹少量变余砂岩及变余凝灰

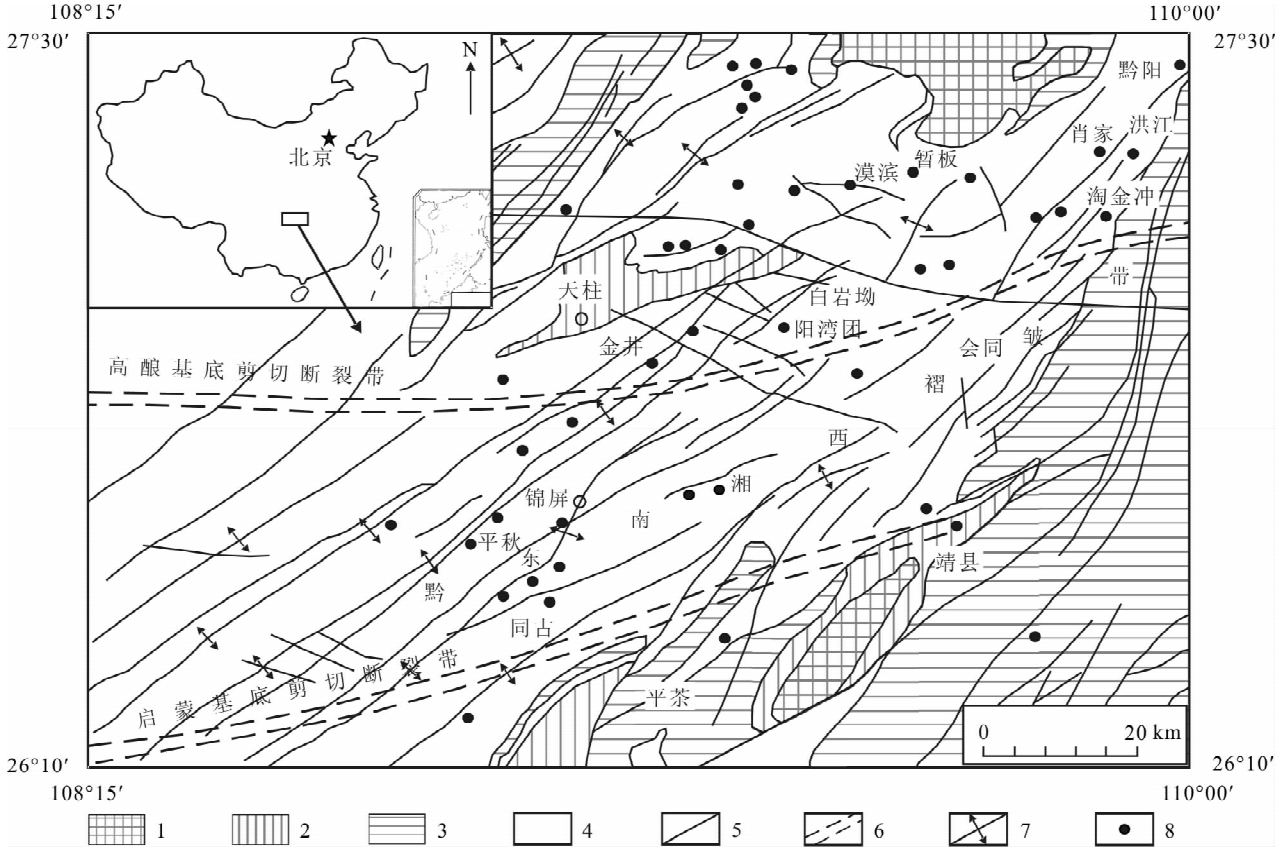

图 1 黔东南—湘西地区金矿床地质简图(据卢焕章等，2006 修改)

Fig. 1 Geological sketch map of gold deposits in southeast Guizhou and west Hunan (modified from Lu et al., 2006)

1—侏罗系—第四系；2—石炭系—二叠系；3—震旦系—奥陶系；4—下江(板溪)群；5—断层；6—深大断裂；7—背斜；8—金矿床(点)

1—Jurassic—Quaternary；2—Carboniferous—Permian；3—Sinian—Ordovician；4—Xiajiang (Banxi) Group；5—fault；6—shear zone；7—anticline；8—gold deposits (occurrence)

岩,厚度大于 1000 m;清水江组为浅灰、灰绿及深灰色变余凝灰岩,变余凝灰岩、变余砂岩和板岩组成互层,厚度为 2300～3700 m;平略组主要为浅灰、灰绿色板岩夹少量变余砂岩,厚 1500～2000 m;隆里组可以划分为两段:一段为浅灰色—灰色变余砂岩、变余粉砂岩夹板岩,厚 600～800 m;二段为浅灰绿、灰绿色板岩夹少量细砂岩,厚 700～900 m。清水江组和番召组的底部发育有凝灰岩,说明它曾经过一个海底火山喷发的环境,其沉积岩性为板岩、粉砂岩和砂岩,表明这些沉积岩是在一个浊流沉积的,不太深的海洋环境中形成的(卢焕章等,2005)。

新元古代以来,本区经历了多次构造运动,主要包括雪峰运动、加里东运动、海西—印支运动和燕山—喜马拉雅运动。雪峰期构造运动基本奠定了区内北东向的构造格局;加里东期构造运动,使黔东南整个地区发育多条东西向基底断裂,本区北部发育有东西向的高酿基底剪切断裂,南部发育有启蒙基底剪切断裂,这两条东西向的剪切断裂控制着本区地堑型的主要构造格局;尽管海西—印支期构造运动使本区局部下陷,但影响不大,区内东西向的构造格局基本没有改变;燕山运动、喜马拉雅运动,太平洋板块对亚洲大陆板块斜向俯冲,对亚洲大陆产生左旋压扭剪切作用,使本区北北东向构造叠加在东西向和北东向构造上。区内未见岩浆岩出露,但是存在与隐伏岩体有关的环形构造(朱永田,1992;卢焕章等,2005;赵震海等,2006)。

平秋金矿的矿石矿物主要包括毒砂(图 2A、B)、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等,脉石矿物主要为石英、铁白云石等。金的赋存状态主要是自然金,常呈粒状、树枝状或不规则状产出,金品位高的地方硫化物也相对较多,并常见自然金与毒砂等硫化物共生在一起(卢焕章等,2006);金井金矿矿石矿物主要为毒砂(图 2C、D)和黄铁矿,其他硫化物有闪锌矿、方铅矿、辉锑矿等,但含量相对较少,脉石矿物主要为石英,少量绿泥石、方解石、白云石等。笔者所采集的样品中,通过手标本和显微镜下对薄片的观察均发现明金的存在,手标本中观察到的金赋存于石英脉中(图 2E),也常呈粒状、片状、树枝状或不规则状产出,而显微镜下观察到的金则直接赋存于毒砂矿物中(图 2F)。

2　样品准备及分析方法

在详细的野外地质观察基础上,对两个不同矿区(平秋、金井),两种不同类型和产状的毒砂进行系统取样,包括:平秋金矿产于石英大脉与围岩接触带附近,与围岩关系密切,颗粒相对细小,金属光泽强烈的蚀变岩型毒砂(图 2A);以及金井金矿产于石英大脉中,颗粒粗大,呈团块状集合体产出,氧化蚀变现象相对较为严重的石英大脉型毒砂(图 2C)。

选择较为新鲜的毒砂样品,用捣钵将其捣碎,过筛至 40～60 目,然后在双目镜下手工挑纯,去除石英等脉石矿物、被氧化的毒砂及其他伴生硫化物杂质,使毒砂的纯度达到 99%以上。样品的分析测试在国家地质实验测试中心 Re-Os 实验室完成,分析仪器是由美国热电公司(Thermo Fisher Scientific)生产的高分辨电感耦合等离子体质谱仪 HR-ICP-MS Element 2。原理及分析方法详见杜安道等(1994,2009)、屈文俊等(2003,2004)。实验过程简述如下:准确称取毒砂样品 1 g 左右,通过细颈漏斗加入到 Carius 管底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中,使成粘稠状。然后将装有样品的 Carius 管放入该保温杯中。用适量超纯浓 HCl 通过细颈漏斗把准确称取的 ^{185}Re 和 ^{190}Os 混合稀释剂转入 Carius 管底部。再依次加入 2.5 mL 10 mol/L HCl,8 mL 16 mol/L HNO_3 和 3 mL 30% H_2O_2。当 Carius 管底溶液冻实后,用液化石油气和氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部分。擦净表面残存的乙醇,放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到 200℃,保温 24 h。取出,冷却后在底部冻实的情况下,先用细强火焰烧熔 Carius 管细管部分一点,使内部压力得以释放。再用玻璃刀划痕,并用烧热的玻璃棒烫裂划痕部分。将待打开的 Carius 管放在冰水浴中回温使内容物完全融化,用约 20 mL 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。把内装 5 mL 超纯水的 25 mL 比色管放在冰水浴中,以备吸收蒸馏出的 OsO_4。连接蒸馏装置,加热微沸 30 min。所得 OsO_4 水吸收液可直接用于 HR-ICP-MS 测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液转入 150 mL Teflon 烧杯中待分离铼。将蒸馏残液置于电热板上,加热近干。加少量水,加热近干,重复两次以降低酸度。根据样品量加入 4～10 mL 5～6 mol/L NaOH(如果碱化后沉淀量过多,可适当增加 NaOH 用量),稍微加热,促进样品转为碱性介质。转入 Teflon 离心管中,加入 4～10 mL 丙酮,振荡 1 min,萃取 Re。对于毒砂等低含量样品,在丙酮萃取离心后需进一步纯化含 Re 丙酮溶液,将离心管内上清液转入 Teflon 分液漏斗中分相,弃去碱溶液。再加入 2 mL 5 mol/L NaOH,振荡 1 min,弃去碱溶

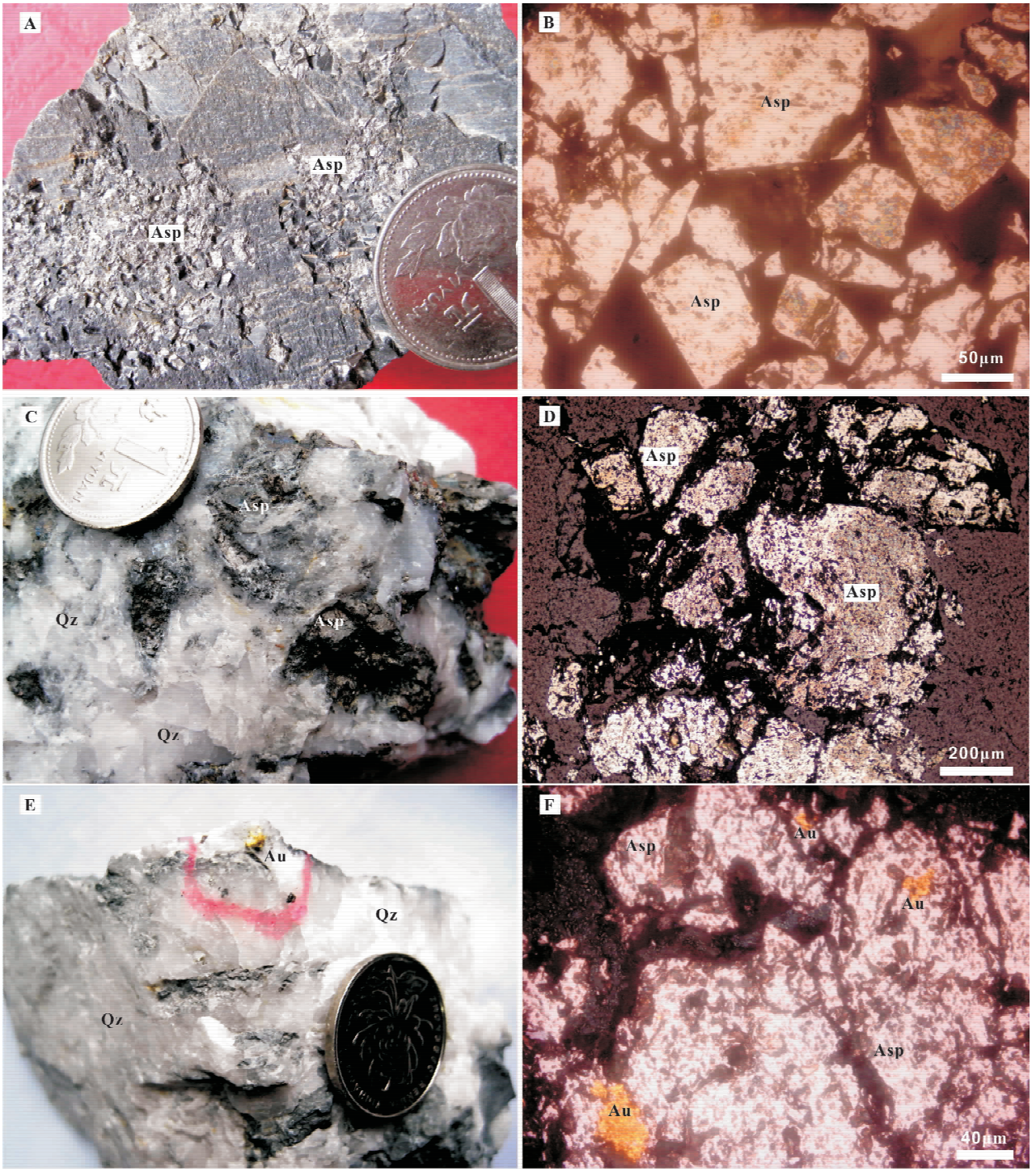

图 2 黔东南平秋、金井金矿床手标本照片及薄片显微照片

Fig. 2 Photographs of hand specimens and microphotographs of thin slice from Pingqiu and Jinjing gold deposits, southeast Guizhou Province

A—平秋蚀变岩型毒砂样品;B—平秋蚀变岩型毒砂显微镜下照片;C—金井石英大脉型毒砂样品;D—金井石英大脉型毒砂显微镜下照片;E—金井石英大脉中的明金;F—金井金赋存于毒砂矿物中;Asp—毒砂;Qz—石英;Au—金

A—Pingqiu altered slate type arsenopyrite sample; B—Pingqiu altered slate type arsenopyrite under the microscope; C—Jinjing large quartz-vein type arsenopyrite sample; D—Jinjing large quartz vein-type arsenopyrite sample under the microscope; E—gold occurring in large quartz veins from Jinjing; F—gold occurring in arsenopyrites from Jinjing; Asp—arsenopyrite, Qz—quartz, Au—gold

液。转移丙酮相到 Teflon 离心管中,离心后,用滴 管直接取上层丙酮相到 150 mL 已加有 2 mL 水的

Teflon 烧杯中,在电热板上 50 ℃加热除去丙酮,然后电热板温度升至 120 ℃加热至干,加数滴浓硝酸和 30% H_2O_2,加热蒸干以除去残存的 Os。用数滴 HNO_3溶解残渣,用水转移到小瓶中,稀释到适当体积(1 mL),备 HR-ICP-MS 测定 Re 同位素比值。

3　结果

平秋金矿 4 个毒砂样品(其中样品 PQ-10-6 和 PQ-10-41 进行了平行样测定)和金井金矿 5 个毒砂样品的 Re-Os 测试结果均列于表 1 中,Re、Os 含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差,置信水平 95%。所有数据都经过空白校正。具体分析结果分别是平秋金矿 Re=0.2225～2.5713 ng/g,普 Os=0.0010～0.0053 ng/g,^{187}Os=0.0012～0.0118 ng/g;金井金矿 Re=0.2378～2.1905 ng/g,普 Os= 0.0010～0.0014 ng/g,^{187}Os=0.0019～0.0053 ng/g。平秋和金井两个矿区的毒砂 Re、Os 含量都比较低,而金井矿区毒砂的 Re、^{187}Os 整体含量高于平秋,但普 Os 整体含量却低于平秋。实验流程空白、监控样 JCBY 测定结果及推荐值见表 2。

表 1　贵州平秋、金井金矿毒砂 Re-Os 同位素测试结果

Table 1　Re-Os isotopic data for arsenopyrite from the Pingqiu and Jinjing gold deposits, Guizhou Province

原样号	样重	Re (ng/g)		普 Os(ng/g)		^{187}Os (ng/g)		^{187}Re/^{188}Os		^{187}Os/^{188}Os	
	(g)	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
PQ-10-6(1)	1.000	0.2947	0.0064	0.0016	0.0001	0.0015	0.0000	905.7	41.0	7.540	0.328
PQ-10-6(2)	1.001	0.2225	0.0020	0.0017	0.0001	0.0012	0.0000	633.6	47.9	5.387	0.422
PQ-10-18	1.001	0.5905	0.0049	0.0016	0.0000	0.0027	0.0001	1751	36	12.88	0.34
PQ-10-28	1.000	2.5713	0.0190	0.0053	0.0001	0.0118	0.0002	2355	65	17.20	0.54
PQ-10-41(1)	1.000	0.3863	0.0030	0.0010	0.0001	0.0018	0.0000	1843	121	13.93	0.97
PQ-10-41(2)	1.101	0.3384	0.0033	0.0012	0.0000	0.0016	0.0000	1416	46	10.42	0.34
JJ-3-4	1.107	0.2378	0.0049	0.0014	0.0000	0.0019	0.0001	819.7	24.4	10.55	0.36
JJ-3-5	1.101	0.9457	0.0044	0.0014	0.0001	0.0031	0.0001	3216	186	16.73	1.04
JJ-3-6	1.096	1.8436	0.0190	0.0011	0.0001	0.0047	0.0002	7784	954	31.53	4.08
JJ-3-9	1.099	2.1905	0.0030	0.0010	0.0001	0.0053	0.0000	10133	641	39.13	2.50
JJ-3-10	1.101	0.4758	0.0033	0.0012	0.0000	0.0021	0.0000	1971	61	13.65	0.43

注:PQ—平秋;JJ—金井。

表 2　本次实验空白(BK)水平、实验室内监控样 JCBY 测定结果及推荐值

Table 2　Blank level, determination of controlling sample (JCBY) and reference material in this test

编号	原样号	Re (ng)		普 Os (ng)		^{187}Os (ng)	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
091126-19	BK-01	0.0055	0.0003	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000
100123-13	BK-02	0.0031	0.0001	0.0003	0.0001	0.0003	0.0002
原样号	样重(g)	Re(ng/g)		总 Os(ng/g)		^{187}Os/^{188}Os	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
JCBY	0.100	39.14	0.40	16.16	0.13	0.3345	0.0026
推荐值	—	38.61	0.54	16.23	0.17	0.3363	0.0029

将两组样品分别用 Ludwig (1999) 的 ISOPLOT 软件作^{187}Re/^{188}Os-^{187}Os/^{188}Os 等时线年龄图解(图 3)。获得平秋金矿的等时线年龄是 400±24 Ma,MSWD=0.96,初始^{187}Os/^{188}Os=1.24±0.57;金井金矿等时线年龄为 174±15 Ma,MSWD=1.07,初始^{187}Os/^{188}Os=8.04±0.45。

4　讨论

4.1　实验结果评价

从表 2 中可以看出监控样 JCBY 测定结果与推荐值较为一致,两个样品(PQ-10-6、PQ-10-41)的平行样测定结果也较为接近,说明实验结果真实可信。对于低含量高放射成因的硫化物样品,空白校正显得尤为重要(Stein et al., 2000),本次试验中的空白水平(表 2)较低并进行了空白校正,这为获得可靠的年龄数据提供了保障。笔者将本文与前人所发表的毒砂 Re、Os 实验结果进行对比发现,本文毒砂的 Re、Os 含量除比 Mikulski 等(2005)文中的略高外,较 Arne 等(2001)、Frei 等(1998)、Yu 等

(2005)、Morelli 等(2005)等文献中毒砂的 Re、Os 含量约低一个数量级,如此低的含量也使得本文中的年龄误差略偏大。

4.2 定年方法选择依据

湘西、黔东南地区的石英脉型金矿床,由于缺乏合适的定年矿物,其成矿时代一直备受争议(刘继顺,1993;王秀璋等,1999;彭建堂等,1998;彭建堂,1999,2002;陈柏林,2001;卢焕章等,2005,2006)。迄今为止,仅有朱笑青等(2006)运用石英包裹体的 Rb-Sr 定年方法报道了黔东南地区金矿的成矿年龄为 340～492 Ma,其中平秋金矿床 Rb-Sr 等时线年龄为 477～492 Ma,金井金矿床 340 Ma。但是该方法在定年测试方面依然面对着诸多困难和挑战,其可靠性也受到很多学者的质疑与否定(Pettke et al., 1995;刘建明等,1998;姚海涛等,2001)。而且朱笑青等(2006)所获得的 5 个年龄数据之间差别较大,误差也较大,很难准确提供成矿时代方面信息。

单矿物毒砂由于 Re、Os 含量较低,因此毒砂中 Re-Os 同位素体系容易受到破坏,对分析测试的要求也极高,Re-Os 同位素在毒砂中的应用尚不如辉钼矿 Re-Os 定年一样得到广泛使用,但自从 Frei 等(1998)首次认识到毒砂 Re-Os 定年的潜能后,国内外学者均有不少用其进行定年的成功范例(Arne et al., 2001; Mikulski et al., 2005; Morelli et al., 2005, 2007; Yu et al., 2005)。Morelli 等(2005)提出毒砂 Re-Os 定年可能会广泛应用于含毒砂的脉状金矿床中。黔东南、湘西地区的石英脉型金矿床,金除以明金的形式直接赋存于石英脉外,也大量赋存于其他硫化物矿物中。毒砂、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等都是该区的主要载金矿物,其中矿物含金性毒砂＞黄铁矿＞方铅矿(鲍振襄,1991)。虽然黄铁矿作为主要的载金矿物亦被广泛研究,但金矿中同时存在毒砂和黄铁矿时,毒砂的含金性要高于黄铁矿(陈明辉等,2007)。此外,黄铁矿也可用于 Re-Os 定年,不过黄铁矿的 Re-Os 同位素体系易受到后期变质作用或交代作用的扰动(Stein et al., 1998; Mathur et al., 1999)。所以选择毒砂进行 Re-Os 定年,不但具有代表性,而且可以直接获得成矿年龄信息,是目前该区最适合的定年方法之一。

湘西地区的石英脉型金矿床,毒砂普遍存在两个世代(鲍振襄,1990,1991;刘英俊等,1991;孙际茂等,2005;陈明辉等,2007),尽管各个矿床毒砂的产状、标型特征不尽一致,但是总体莫过于两种情况,一是蚀变岩型,二是石英大脉型。两种类型的毒砂

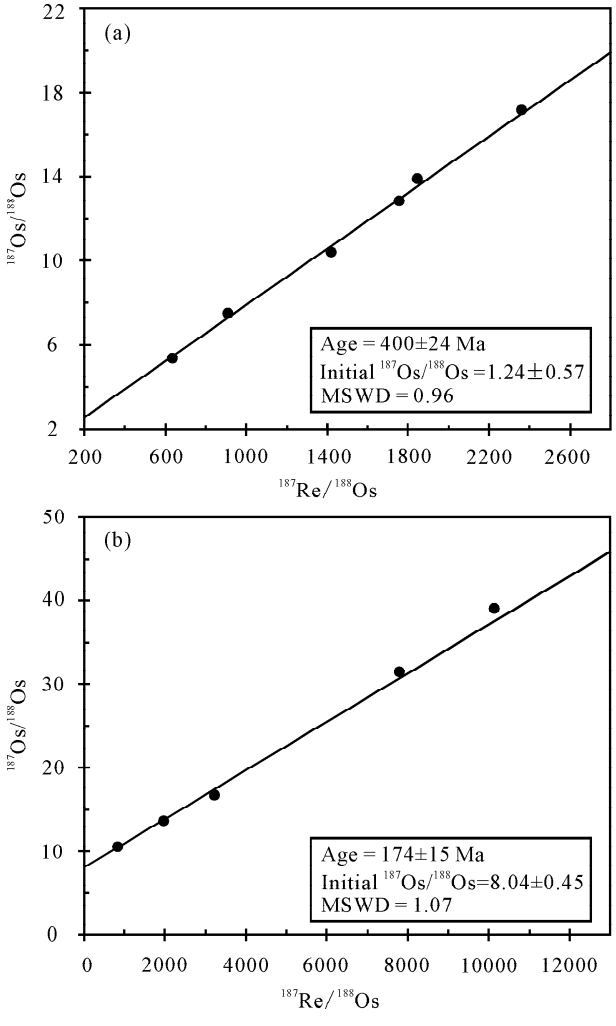

图 3 黔东南平秋(a)、金井(b)金矿毒砂 Re-Os 等时线年龄图解

Fig. 3 Re-Os isochrone diagrams of arsenopyrites from Pingqiu (a) and Jinjing (b) gold deposits, southeast Guizhou Province

含金性不一致,石英脉型含金量要高于蚀变岩型(鲍振襄,1991)。笔者在黔东南地区也发现了类似情况,两种类型的毒砂时常见于同一矿床中。此外,张洪信等(2005)也曾提出平秋金矿存在石英脉型和构造蚀变岩型两种类型金矿。平秋金矿蚀变岩型毒砂,常产于石英脉体与围岩的接触带或蚀变岩中(图 2A),呈自形、半自形、短柱状(图 2B),颗粒相对较小,金属光泽较强,有的周边有白云母生长,可能反应曾受到后期构造事件的影响。而金井金矿石英大脉型毒砂,常呈团块状集合体产出(图 2C),遭受蚀变较强,多具碎裂结构(图 2D),颗粒相对较大。两种产状的毒砂与成矿的关系均较为密切,所以笔者对两种类型的毒砂都进行了 Re-Os 定年尝试,结果反映两者形成于两个截然不同的时期。而对相同矿

床另一类型毒砂的定年研究工作也正在开展中。

4.3　成矿时代及成矿动力学背景

平秋金矿蚀变岩型毒砂 Re-Os 等时线年龄显示为 400±24 Ma,与彭建堂等(2003)利用白钨矿 Sm-Nd 法以及石英 Ar-Ar 法对湘西沃溪、板溪金矿的定年(402±6 Ma,397.4±0.4 Ma)以及与王秀璋等(1999)利用钾长石的 K-Ar 法分别对湘西柳林钗和漠滨金矿所测年龄(412.46 Ma,404.20 Ma)一致。也与该区存在的两条东西向的基底剪切断裂,包括高酿基底剪切断裂以及启蒙基底剪切断裂形成时期一致(朱藹林等,1995;卢焕章等,2005,2006)。所以说加里东期对于华南地区来说应该是一次比较重要的金成矿事件,而对于黔东南石英脉型金矿来说也是一次重要的成矿期。而金井金矿石英大脉型毒砂 Re-Os 年龄显示为 174±15 Ma,属于印支—燕山期。截至目前,唯有史明魁等(1993)使用石英包裹体的 Rb-Sr 法报道过湘中龙山金矿成矿年龄(175 Ma)与金井石英大脉型毒砂年龄一致。虽然刘继顺(1993)、彭建堂等(1998)、彭建堂(1999)认为雪峰山金成矿带存在印支—燕山期的金成矿作用,但都没有其他任何可信的年龄数据,该时期的成矿年龄数据在黔东南、湘西地区尚属首次报道。

笔者认为雪峰山金成矿带确实存在印支—燕山期的成矿作用。虽然黔东南地区未见有岩体出露,但根据遥感图像信息发现该区存在许多与隐伏岩体有关的环形构造(朱永田,1992;卢焕章等,2005,2006;赵震海等,2006)。笔者认为这种隐伏岩体与湘东、湘西等地出露的中酸性岩体应属同期次产物。彭建堂(1999)提出从湘东→湘西→湘西南,岩浆活动趋于减弱。事实上再向西延伸到黔东南地区,岩浆活动更弱,甚至难有岩体出露至近地表,而是以隐伏岩体的形式存在。前人研究证实印支—燕山运动对雪峰地区的影响很大,因为在雪峰金成矿区的南缘,发育有印支期的中华山岩体和沧水铺岩株(225 Ma),燕山期的大神山岩株(188～175 Ma)和扬材冲岩体及符竹溪、板溪等地的花岗斑岩脉(何谷先,1989;刘继顺,1993);姚振凯等(1995)对符竹溪金矿床研究发现其主矿脉及田庄矿点金锑矿体均直接产于花岗斑岩脉上下盘接触构造带内,并通过全岩 K-Ar 法测出符竹溪金矿床花岗斑岩体形成年龄为 209 Ma;赵军红等(2005)通过全岩 K-Ar 法测出板溪石英斑岩的形成年龄为 194～202 Ma。所以笔者结合前人的资料和本人目前的工作认为金井金矿石英大脉中的毒砂与雪峰地区存在的中酸性岩体以及黔东南地区存在的隐伏岩体均属同期构造活动产物。关于成矿物质的来源问题亦是本区争论的焦点。由于 Re 与 Os 在地幔和地壳间表现出显著的分馏,Re 是中等不相容元素,倾向于从地幔分配到岩浆熔体中,而 Os 是高度相容元素,强烈趋向于保持在地幔中,所以 Re-Os 同位素体系常做为成矿物质来源的有效示踪剂。其中 Au 和 Os 又同属贵金属元素,具有许多相似的地球化学性质,因此,通过 Os 同位素研究,有可能为金矿床成矿物质来源和成因机理研究提供有用信息(蒋少涌等,2000)。平秋、金井两个金矿区,由两条等时线分别获得的初始 $^{187}Os/^{188}Os = 1.24 \pm 0.57$,$^{187}Os/^{188}Os = 8.04 \pm 0.45$,都明显大于地幔值(0.12～0.13; Shirey et al., 1998),反映成矿物质来源于地壳,可能是容矿浊积岩地层。由于矿源层经历了 400 Ma 到 174 Ma 相差约 226 Ma 的演化,接受了更多的放射性成因 Os,从而使年轻得多的金井石英大脉型毒砂初始 $^{187}Os/^{188}Os$ 值(8.04)要明显大于平秋蚀变岩型毒砂(1.24)。

5　结论

(1)利用平秋金矿载金矿物蚀变岩型毒砂进行 Re-Os 同位素直接定年,获得 $^{187}Re/^{188}Os$-$^{187}Os/^{188}Os$ 等时线年龄为 400±24 Ma(MSWD=0.96),属加里东期,这与该区存在的两条东西向基底断裂,包括高酿基底剪切断裂以及启蒙基底剪切断裂形成时期一致,也说明该期金矿的形成与区域韧性剪切作用密不可分。

(2)对金井金矿载金矿物石英大脉型毒砂进行 Re-Os 同位素测试,获得 $^{187}Re/^{188}Os$-$^{187}Os/^{188}Os$ 等时线年龄为 174±15 Ma,MSWD=1.07,该时期的成矿年龄在黔东南、湘西地区属首次报道,它与雪峰地区存在的中酸性岩体以及黔东南地区存在的隐伏岩体应属同期岩浆-构造活动产物。本次研究证实了加里东期和印支—燕山期对于华南地区特别是雪峰金成矿带来说都是特别重要的两个成矿时期。

(3)平秋、金井两矿区初始 $^{187}Os/^{188}Os$ 同位素比值指示该区金矿成矿物质来源于地壳,可能是容矿浊积岩地层。

致谢:在野外地质考察及采样过程中得到涌金公司吴华经理,平秋、金井金矿各位同行的大力帮助;在实验过程中得到中国地质科学院地质研究所周利敏、江小均等几位博士的关心与指导;中国科学院广州地球化学研究所的裘愉卓研究员、地球化学

研究所的彭建堂研究员在成文过程中给予悉心指导，而与地球化学研究所的朱经经、韩涛、陈恒等几位博士的交流中也深受启发，审稿专家及编辑部对完善本文提出了宝贵的建议，在此一并表示衷心的感谢！

参 考 文 献

鲍振襄. 1990. 湘西钨锑砷金矿床黄铁矿和毒砂含金性的研究. 黄金，11(3)：1～6.

鲍振襄. 1991. 湖南金矿床中黄铁矿和毒砂的含金性探讨. 矿产与地质，5(24)：368～374.

陈柏林. 2001. 论华南地区金矿床的成矿时代——兼与王秀璋等“华南加里东期金矿床的基本特征”一文的讨论. 地质科技情报，20(3)：47～52.

陈懋弘，毛景文，屈文俊，吴六灵，Uttley P J，Norman T，郑建民，秦运忠. 2007. 贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿床含砷黄铁矿 Re-Os 同位素测年及地质意义. 地质论评，53(3)：371～382.

陈明辉，高利军，杨洪超，鲍振襄，包觉敏. 2007. 金矿床中毒砂标型特征及金的赋存状态——以湖南金矿床为例. 地质与资源，16(2)：102～106.

储著银，陈福坤，王伟，谢烈文，杨岳衡. 2007. 微量地质样品铼锇含量及其同位素组成的高精度测定方法. 岩矿测试，26(6)：431～435.

杜安道，何红蓼，殷宁万，邹晓秋，孙亚利，孙德忠，陈少珍，屈文俊. 1994. 辉相矿的铼-锇同位素地质年龄测定方法研究. 地质学报，68(4)：339～347.

杜安道，屈文俊，李 超，杨刚. 2009. 铼－锇同位素定年方法及分析测试技术的进展. 岩矿测试，28(3)：288～304.

何谷先. 1989. 湘西雪峰山地区金矿床地质特征及其分布规律. 黄金，10(5)：2～6.

胡瑞忠，彭建堂，马东升，苏文超，施春华，毕献武，涂光炽. 2007. 扬子地块西南缘大面积低温成矿时代. 矿床地质，26(6)：583～596.

蒋少涌，杨竟红，赵葵东，于际民. 2000. 金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究. 南京大学学报(自然科学)，36(6)：669～677.

李超，屈文俊，杜安道，孙文静. 2009. 铼-锇同位素定年法中丙酮萃取铼的系统研究. 岩矿测试，28(3)：233～238.

李超，屈文俊，周利敏，杜安道. 2010. Carius 管直接蒸馏快速分离锇方法研究. 岩矿测试，29(1)：14～16.

刘继顺. 1993. 关于雪峰山一带金成矿区的成矿时代. 黄金，14(7)：7～12.

刘建明，赵善仁，沈洁，姜能，霍卫国. 1998. 成矿流体活动的同位素定年方法评述. 地球物理学进展，13(3)：46～55.

刘英俊，孙承辕，季峻峰，崔卫东. 1991. 湖南黄金洞元古界浊积岩型金矿床的地质地球化学特征. 地质找矿论丛，6(1)：1～13.

卢焕章，王中刚，吴学益，陈文益，朱笑青，郭迪江，胡瑞忠，Keita M. 2005. 贵州东南部的地质构造与金矿床的关系. 地质学报，79(1)：98～105.

卢焕章，王中刚，陈文一，吴学益，朱笑青，胡瑞忠. 2006. 贵州东南部浊积岩中金矿的地质特征和成因. 矿床地质，25(4)：369～387.

罗献林. 1989. 论湖南前寒武系金矿床的形成时代. 桂林冶金地质学院学报，9(1)：25～34.

彭建堂，戴塔根. 1998. 雪峰地区金矿成矿时代问题的探讨. 地质与勘探，34(4)：37～41.

彭建堂. 1999. 湖南雪峰地区金成矿演化机理探讨. 大地构造与成矿学，23(2)：144～151.

彭建堂. 2002. 对“论华南地区金矿床的成矿时代”一文的几点看法——兼论雪峰山金矿带加里东期成矿的可能性. 地质科技情报，21(4)：27～30.

彭建堂，胡瑞忠. 2000. 雪峰古陆加里东期金的成矿作用. 矿物岩石地球化学通报，19(4)：246～247.

彭建堂，胡瑞忠，赵军红，符亚洲，林源贤. 2003. 湘西沃溪 Au-Sb-W 矿床中白钨矿 Sm-Nd 和石英 Ar-Ar 定年. 科学通报，48(18)：1976～1981.

漆亮，周美夫，严再飞，皮道会，胡静. 2006. 改进的卡洛斯管溶样等离子体质谱法定地质样品中低含量铂族元素及铼的含量. 地球化学，35(6)：667～674.

屈文俊，杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-锇地质年龄. 岩矿测试，22(4)：254～257.

屈文俊，杜安道. 2004. 电感耦合等离子体质谱法测定辉钼矿含量质量分馏效应的校正. 质谱学报，25：181～182.

史明魁，傅必勤，靳西祥，等. 1993. 湘中锑矿. 长沙：湖南科技出版社.

孙际茂，李国银，荆亭山，鲍振襄，包觉敏. 2005. 泥潭冲金矿床中毒砂标型特征及金的赋存状态. 地质找矿论丛，20(4)：264～268.

涂光炽. 2002. 我国西南地区两个别具一格的成矿带(域). 矿物岩石地球化学通报，21(1)：1～2.

王尚彦，张立新，陶平，戴传固，况顺达，王敏. 2006. 贵州东部石英脉型金矿地质特征和成矿作用. 贵州地质，23(1)：36～43.

王秀璋，梁华英，单强，程景平，夏萍. 1999. 金山金矿成矿年龄测定及华南加里东金期的讨论. 地质论评，45(1)：19～25.

姚海涛，郑海飞. 2001. 流体包裹体 Rb-Sr 等时线定年的可靠性. 地球化学，30(6)：507～511.

姚振凯，朱蓉斌. 1995. 湖南符竹溪金矿床地质特征和成矿预测. 铀矿地质，11(6)：344～349.

叶俊，杨忠琴，余大龙. 2008. 贵州省天柱县主山冲金矿金的赋存状态研究. 贵州地质，25(2)：106～109.

余大龙. 1993. 黔东脉型金矿构造控矿规律研究——兼论黔东寻找大型金矿的方向. 贵州地质，10(4)：308～313.

余大龙，吴攀. 1998. 锦屏花桥金矿床地质特征. 贵州地质，15(2)：254～258.

张洪信，张华，彭慈刚，任定权，冯运富. 2005. 黔东南锦屏平秋金矿找矿前景初步分析. 贵州地质，22(4)：242～245.

张景荣，罗献林. 1989. 论华南地区内生金矿床的形成时代. 桂林冶金地质学院学报，9(4)：369～379.

赵军红，彭建堂，胡瑞忠，符亚洲. 2005. 湖南板溪脉岩的年代学、岩石学、地球化学及其构造环境. 地球学报，26(6)：525～534.

赵震海，况顺达，王成相. 2006. 黔东南地区遥感构造研究与金矿的关系. 中国矿业，15(5)：80～83.

朱蔼林，王常微，易国贵，卢定彪. 1995. 贵州雷公山地区过渡性剪切带及其与锑金多金属矿关系. 贵州地质，12(1)：1～22.

朱笑青，王甘露，卢焕章，吴学益，陈文益. 2006. 黔东南金矿形成时代的确定兼论湘黔加里东金矿带. 中国地质，33(5)：1092～1099.

朱永田. 1992. 黔东南地区内生金属矿产与环形构造的关系. 贵州地质，9(1)：63～71.

Arne D C, Bierlein F P, Morgan J W, Stein H J. 2001. Re-Os dating of sulfides associated with gold mineralization in central Victoria, Australia. Economic Geology, 96:1455～1459.

Barra F, Ruiz J, Mathur R, Titley S. 2003. A Re-Os study of sulfide minerals from the Bagdad porphyry Cu-Mo deposit, northern Arizona, USA. Mineralium Deposita, 38:585～596.

Cardon O, Reisberg L, Sylvie A, Andre-Mayer A S, Leroy J, Milu V, Zimmermann C. 2008. Re-Os systematics of pyrite from the Bolcana porphyry copper deposit, Apuseni Mountains, Romania. Economic Geology, 103:1695～1702.

Feng C Y, Qu W J, Zhang D Q, Dang X Y, Du A D, Li D X, She H Q. 2009. Re-Os dating of pyrite from the Tuolugou stratabound Co (Au) deposit, eastern Kunlun orogenic belt, northwestern China. Ore Geology Reviews, 36:213～220.

Frei R, Nägler T F, Schönberg R, Kramers J D. 1998. Re-Os, Sm-Nd, U-Pb, and stepwise lead leaching isotope systematics in shear-zone hosted gold mineralization: genetic tracing and age constraints of crustal hydrothermal activity. Geochimica et Cosmochimica Acta, 62:1925～1936.

Freydier C, Ruiz J, Chesley J, McCandless T, Munizaga F. 1997. Re-Os isotope systematics of sulfides from felsic igneous rocks: application to base metal porphyry mineralization in Chile. Geology, 25:775～778.

Liu Y L, Yang G, Cheng, J F, Du A D, Xie Z. 2004. Re-Os dating of pyrite from Giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit. Chinese Science Bulletin, 49:2627～2631.

Ludwig K R. 1999. Isoplot/Ex, Version 2.0: a geochronogical toolkit for Microsoft excel. Berkeley: Geochronology Center Special Publication 1a.

Mathur R, Ruiz J, Tornos F. 1999. Age and sources of the ore at Tharsis and Rio Tinto, Iberian pyrite belt, from Re-Os isotopes. Mineralium Deposita, 34:790～793.

Mikulski S Z, Markey R J, Stein H J. 2005. Re-Os ages for auriferous sulfides from the gold deposits in the Kaczawa Mountains (SW Poland). Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge, 1～2:793～796.

Morelli R M, Creaser R A, Selby D, Kelley K D, Leach D L, King A R. 2004. Re-Os sulfide geochronology of the Red Dog sediment-hosted Zn-Pb-Ag deposit, Brooks Range, Alaska. Economic Geology, 99:1569～1576.

Morelli R M, Creaser R A, Selby D, Kontak D J, Horne R J. 2005. Rhenium-Osmium arsenopyrite geochronology of Meguma Group gold deposits, Meguma terrane, Nova Scotia, Canada: evidence for multiple goldmineralizing events. Economic Geology, 100:1229～1242.

Morelli R M, Creaser R A, Seltmann F, Stuart F M, Selby D, Graupner T. 2007. Age and source constraints for the giant Muruntau gold deposit, Uzbekistan, from coupled Re-Os-He isotopes in arsenopyrite. Geology, 35:795～798.

Pettke T, Diamond L W. 1995. Rb-Sr isotopic analysis of fiuid inclusions in quartz: evaluation of bulk extraction procedures and geochronometer systematics using synthetic fluid inclusions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59:4009～4027.

Qi L, Zhou M F, Gao J F, Zhao Z. 2010. An improved Carius tube technique for determination of low concentrations of Re and Os in pyrites. Analytical Atomic Spectrometry, 25:585～589.

Selby D, Kelley K D, Hitzman M W, Zieg J. 2009. Re-Os sulfide (bornite, chalcopyrite, and pyrite) systematics of the carbonate-hosted copper deposits at Ruby Creek, Southern Brooks range, Alaska. Economic Geology, 104:437～444.

Shirey S B, Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis. Analytical Chemistry, 67: 2136～2141.

Shirey S B, Walker R J. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry. Annual Review of Earth Planetary Sciences, 26:423～500.

Stein H J, Sundblad K, Markey R J, Morgan J W, Motuza G. 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kivisuo, Finland, and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: testing the chronomter in a metamorphic and metasomatic setting. Mineralium Deposita, 33:329～345.

Stein H J, Morgan J W, Schersten A. 2000. Re-Os dating of low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides: the Harnas gold deposit, southwest Sweden, records continental scale tectonic events. Economic Geology, 95:1657～1671.

Yu G, Yang G, Chen J F, Qu W J, Du A D, He W. 2005. Re-Os dating of gold-bearing arsenopyrite of the Maoling gold deposit, Liaoning Province, Northeast China and its geological significance. Chinese Science Bulletin, 50:1509～1514.

Zhang L C, Xiao W J, Qin K Z, Qu W J, Du A D. 2005. Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tianshan, NW China, and its geological significance. Mineralium Deposita, 39:960～969.

Re-Os Isotope Dating of Arsenopyrite from the Quartz Vein-Type Gold Deposit, Southeastern Guizhou Province, and Its Geological Implications

WANG Jiasheng[1,2], WEN Hanjie[2], LI Chao[3], DING Wei[1,2], ZHANG Jinrang[1,2]

1) *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang*, 550002;

2) *Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing*, 100039;

3) *National Research Center for Geoanalysis, Beijing*, 100037

Abstract

The quartz vein-type gold deposit in southeastern Guizhou, being one of the important parts of the Xuefeng polymetallic ore belt, has showed the potential prospect for exploration. However, there still have been disputes on understanding of mineralized mechanism, especially the origin of metallogenetic materials, mineralization epoch, and geochronology and geodynamical setting of mineralization. The gold-bearing minerals (arsenopyrites) collected from two main gold deposits (Pingqiu and Jinjing) in the region were used to conduct Re-Os dating. The results show that the altered slate type arsenopyrites from the Pingqiu gold deposit yield an isochron age of 400±24 Ma, with an initial $^{187}Os/^{188}Os$ ratio of 1.24±0.57 (MSWD=0.96); while large quartz vein-type arsenopyrites from the Jinjing gold deposit yield an isochron age of 174±15 Ma, with an initial $^{187}Os/^{188}Os$ ratio of 8.04±0.45 (MSWD=1.07). The former age belongs to Caledonian period, and is consistent with the formation age of EW-trending shearing zone in the region; the latter belongs to Indosinian-Yanshanian period, and may be associated with the contemporaneous tectonic-magma activities as revealed by widely exposed intermediate-acid rocks in the Xuefeng area and the concealed intrusive bodies in southeast Guizhou Province. It is firstly reported using sulphide Re-Os isotopic dating that at least two important gold mineralizations occurred in Calidonian and Indosinian-Yanshanian periods. In addition, the initial $^{187}Os/^{188}Os$ ratios also suggest that the metallogenic materials derived from the crust rock.

Key words: Re-Os dating; arsenopyrite; altered slate type; large quartz vein-type; gold deposit