

# 云南哀牢山金矿带镇沅超大型金矿载金黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义

石贵勇<sup>①③</sup>, 孙晓明<sup>①②③\*</sup>, 潘伟坚<sup>②</sup>, 胡北铭<sup>②</sup>, 屈文俊<sup>④</sup>, 杜安道<sup>④</sup>, 李超<sup>④</sup>

① 中山大学海洋学院, 广州 510275;

② 中山大学地球科学系, 广州 510275;

③ 广东省海洋资源与近岸工程重点实验室, 广州 510006;

④ 国家地质实验测试中心, 北京 100037

\* 联系人, E-mail: cessxm@mail.sysu.edu.cn

2012-02-09 收稿, 2012-04-26 接受

国家重点基础研究发展计划(2009CB421006, 2002CB412610)、国家自然科学基金(40830425, 40673045, 40373027)、高等学校博士学科点专项科研基金(200805580031)和中央高校基本科研业务费专项资金(09lgpy09)资助

**摘要** 镇沅金矿是哀牢山金矿带最大的超大型金矿床, 但一直缺少同位素直接定年数据. 从镇沅金矿田冬瓜林矿段变石英杂砂岩金矿石中, 选取 4 个黄铁矿样品, 采用 Carius 管溶样, 蒸馏分离 Os, 丙酮萃取 Re, 高分辨率电感耦合等离子体质谱(HR-ICP-MS)测定法, 对其进行了 Re-Os 同位素定年, 获得其等时线年龄为  $229 \pm 38$  Ma (MSWD=2.0, 置信度 95%),  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  初始值  $0.68 \pm 0.24$ ,  $\gamma_{\text{Os}}$  为  $442 \pm 91$ , 黄铁矿 Re/Os 比值为 40.8~100.5. 结果显示: 镇沅超大型金矿至少在印支期存在一次重要的成矿事件, 该期成矿物质来源属壳-幔混合来源, 但以幔源为主. 构造-岩浆演化历史表明, 哀牢山复合造山作用经历了前寒武纪-早古生代基底的形成、晚古生代俯冲造山作用、海西期末-印支期强烈碰撞造山、燕山期-喜马拉雅期伸展(走滑)造山等复杂的演化过程. 多旋回的构造-岩浆-成矿作用使得镇沅金矿具有多期次成矿特征, 成矿作用可能主要发生于印支期碰撞造山过程, 而矿床中占次要地位的蚀变花岗斑岩型和蚀变煌斑岩型金矿可能是后期改造叠加所致.

## 关键词

Re-Os 同位素

定年

含金黄铁矿

蛇绿混杂岩

镇沅超大型金矿

哀牢山金矿带

哀牢山金矿带位于青藏高原东南缘. 自 20 世纪 80 年代以来, 先后发现了墨江金厂金矿、镇沅金矿(早期文献也称“老王寨金矿”)、元阳大坪金矿和金平长安金矿等一批大型-超大型金矿, 是我国新近崛起的重要黄金生产基地. 其中, 镇沅金矿田位于哀牢山北段, 在整个哀牢山金矿带中最具代表性, 是哀牢山金矿带中规模最大的超大型矿床, 且最近该区找金工作又有重大突破.

自 1985 年镇沅金矿被发现以来, 前人对其进行过大量研究. 围绕成矿地质特征、控矿因素、成矿流体性质、成矿物质来源、成矿时代及其成因等问题,

不同学者从哀牢山造山带后期构造-岩浆活动及热液蚀变改造等方面提出过众多观点, 主要有火山热液说<sup>[1]</sup>、煌斑岩蚀变说<sup>[2]</sup>、热液蚀变说<sup>[3]</sup>、超基性-基性岩蚀变说<sup>[4]</sup>、变质热液说<sup>[5]</sup>和构造蚀变说<sup>[6]</sup>等. 然而, 该矿床 Re-Os 同位素定年与示踪研究尚未见报道. 近年来, 随着该矿床的大规模开发逐步展开, 一些新的地质现象不断被发现, 越来越显现出镇沅金矿与区域上广泛分布的蛇绿混杂岩具有密切的时空关系. 本文利用镇沅超大型金矿田冬瓜林矿段的主要矿石类型——变质石英杂砂岩金矿石中载金黄铁矿样品进行 Re-Os 同位素的定年与示踪研究, 以期提供该矿

**英文版见:** Shi G Y, Sun X M, Pan W J, et al. Re-Os dating of auriferous pyrite from the Zhenyuan super-large gold deposit in Ailaoshan gold belt, Yunnan Province, Southwestern China. *Chin Sci Bull*, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-012-5275-z

床成矿时代及成矿物质来源的 Re-Os 同位素证据. 同时, 为该矿床深部与外围找矿提供依据.

### 1 矿床地质概况

镇沅金矿(田)位于哀牢山结合带, 九甲-安定断裂带与北西向断裂带交汇部位. 矿床主要分布于北西向脆韧性剪切带与东西向逆冲脆韧性剪切带交汇部位. 其中, 浪泥塘矿段、冬瓜林矿段、老王寨矿段、搭桥箐矿段和库独木矿段等 5 个主要矿段沿北西至南东依次分布(图 1). 由于受多期次北西向脆韧性剪切作用的影响, 不同岩性的岩片均呈北西向延伸, 致使各主要金矿床亦呈北西向分布; 受东西向逆冲脆韧性剪切带影响部位, 地层、脉岩或金矿体走向都变为近东西向. 矿田内岩浆岩十分发育, 岩石类型复杂, 产状各异. 前人研究显示: 广泛分布在区域内的蛇绿

混杂岩与金矿化具有密切的时空和成因联系<sup>[7-12]</sup>. 浪泥塘金矿体赋存于超基性岩或其他岩性的蚀变破碎带中; 冬瓜林金矿体赋存于夹杂有蛇绿混杂岩岩片的泥盆纪蚀变板岩中; 老王寨金矿体主要赋存于下石炭统蚀变碳质硅质钙质板岩(多含角砾)和蛇绿混杂岩中. 整个金矿化带长 8400 m, 宽 100~500 m, 矿体受断裂控制, 成群成带出现. 共有矿体群 16 个, 矿体 295 个, 其中工业矿体 84 个, 主矿体 11 个. 主矿体多出现于强应变域中, 呈似层状、板状产出, 产状变化较大, 随断裂变化而变化, 时有膨缩、分枝、尖灭和再现现象. 矿体与围岩没有明显界线. 矿石类型主要有蚀变超基性岩型、蚀变玄武岩型、蚀变变质石英杂砂岩型、蚀变绢云板岩型、蚀变花岗斑岩型和蚀变煌斑岩型等. 少数石英脉虽有矿化, 但矿化程度较弱, 不构成矿石类型. 矿石结构主要为半自形-粒状

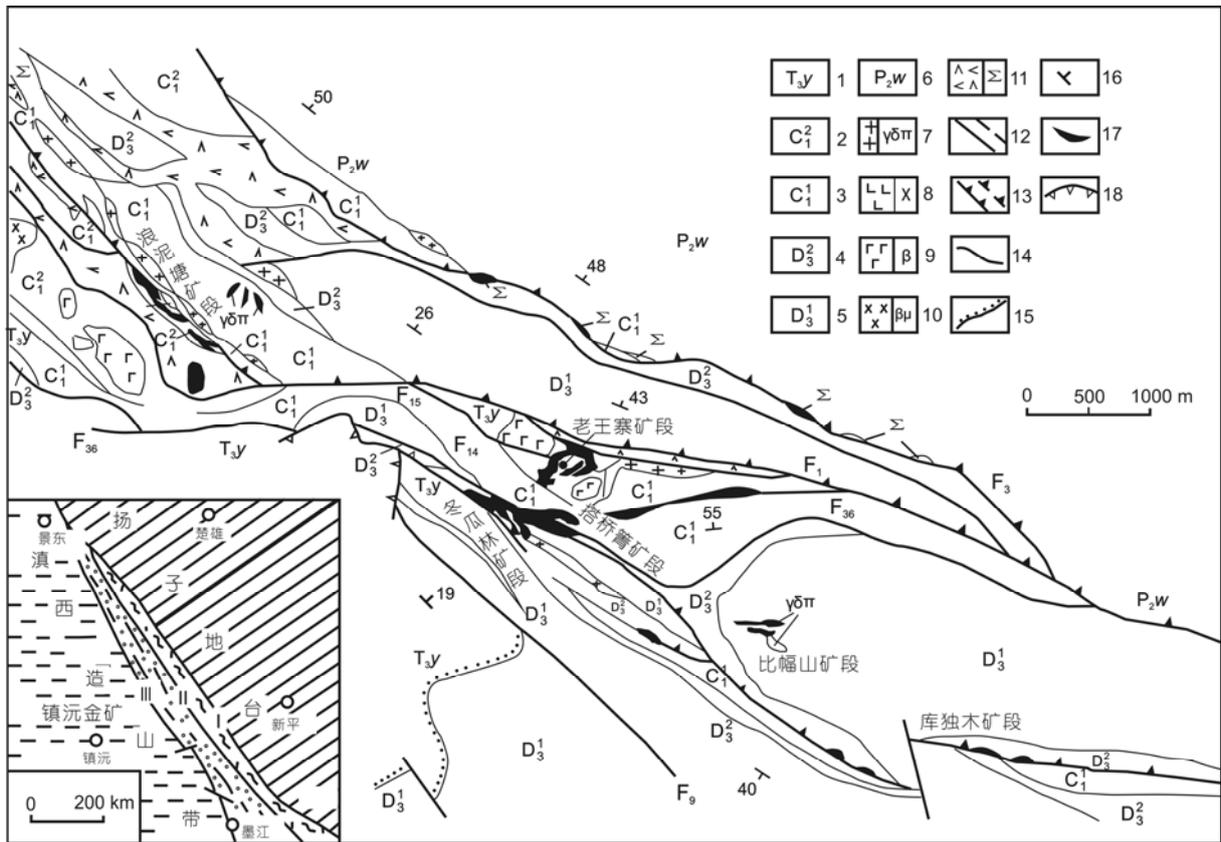


图 1 镇沅金矿田地质图

1, 三叠系上统一碗水组紫红色粉砂岩岩片; 2, 石炭系下统二段含砾砂板岩岩片; 3, 石炭系下统一段薄层泥晶灰岩岩片; 4, 泥盆系上统二段紫红色灰绿色绢云板岩、硅质岩岩片; 5, 泥盆系上统一段变质石英杂砂岩岩片; 6, 古生界外麦地岩组微晶片岩岩片; 7, 花岗闪长斑岩; 8, 煌斑岩; 9, 蚀变玄武岩; 10, 蚀变辉绿岩; 11, 蚀变超基性岩; 12, 实测推测断层; 13, 实测推测脆韧性剪切带; 14, 地质界线; 15, 地层不整合界线; 16, 地层产状; 17, 金矿体; 18, 滑塌堆积物界线. I, 红河深断裂; II, 哀牢山断裂; III, 九甲-墨江断裂. 据云南地质调查局内部资料修改

结构、充填结构、以及穿插交代结构. 矿石构造有浸染状、细脉状、网脉状等. 金属矿物除自然金外, 主要有黄铁矿, 次为毒砂、辉锑矿、铜硫化物和白铁矿等. 非金属矿物主要为石英、绢云母和碳酸盐等.

## 2 样品采集与测试

冬瓜林矿段在整个镇沅金矿田中占有重要地位, 其金储量为 66.26 t, 已达到大型矿床规模<sup>1)</sup>. 矿区出露地层为上泥盆统(D<sub>3</sub><sup>1</sup>)岩片: 上部为簿-微层状变质含钙质石英杂砂岩-硅质绢云砂质板岩, 其间夹杂有微层含砂含钙质绢云板岩, 且常夹灰岩透镜体. 下部出现硅质绢云绿泥板岩或硅质绿泥绢云板岩. 本层厚度>200 m. 矿石与围岩无明显界线, 靠分析金的品位才能确定, 加之矿区构造变形强烈, 给采样带来相当大的难度, 野外系统采集了 5 件样品. 需要特别指出的是, 蚀变变质石英杂砂岩型金矿石在浪泥塘矿段、老王寨矿段和冬瓜林矿段等 3 个重要矿段中矿石储量均占有较大比重, 是主要金矿类型. 鉴于此, 本次测试样品采集于镇沅金矿田冬瓜林矿段露天采场 62#勘探线, 地理坐标为 23°53.954'N, 101°27.167'E (图 2). 采集样品类型为金-黄铁矿变质石英杂砂岩金矿石, 灰色, 具块状和浸染状构造(图 3)和半自形-自形粒状(变晶)结构和压碎粒状结构(图 4). 样品经手标本观察、破碎、水淘洗、电磁选、酒精泡洗和重液分离, 最后在双目显微镜下挑选出黄铁矿样品, 每件样品重 5 g 左右.

为检查所选样品的纯度, 将待测样品于中国地质科学院矿产资源研究所进行 X 射线粉晶衍射分析, 结果见表 1 和图 5. 从 X 射线衍射图中表明, 所选黄铁矿样品不含其他矿物.

在冬瓜林矿段中, 金-黄铁矿变石英杂砂岩金矿石为该矿段的重要矿石类型, 黄铁矿是最主要的载金矿物, 但通过显微镜下观察薄片, 并未发现自然金颗粒的存在. 为查明金的赋存状态, 对待测 Re-Os 同位素的 4 件黄铁矿样品进行金的赋存状态分析. 具体操作步骤为: 准确称取 100 mg 样品置于 100 mL 烧杯中, 加入 10 mL 1.5% 硫脲溶液浸泡 3 d. 其间, 分别进行了 3 次超声波振荡, 每次 30 min. 过滤, 将滤液收集于试管中, 待 AAS 法测定. 滤纸上的黄铁矿经

蒸馏水充分洗涤后, 转入 100 mL 烧杯中, 加入 10 mL 新鲜配制的浓王水于电热板上加热分解. 待样品彻

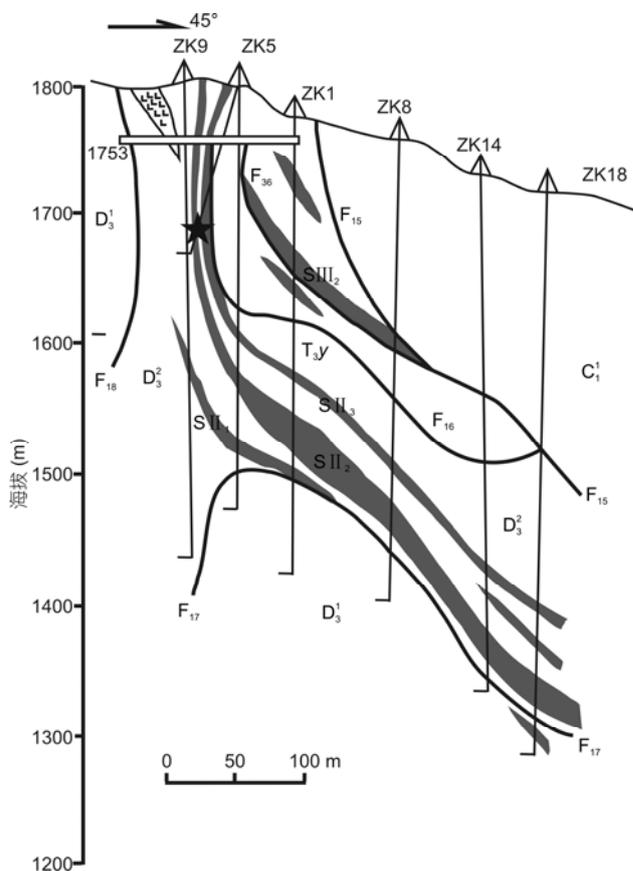


图 2 冬瓜林矿区 62#勘探线剖面图  
★为采样位置



图 3 变质石英杂砂岩金矿石手标本(DGL045)

1) 李文昌. 哀牢山地区金、多金属化探找矿技术研究与应用及成矿带预测. 云南地质调查局, 2008(内部资料)

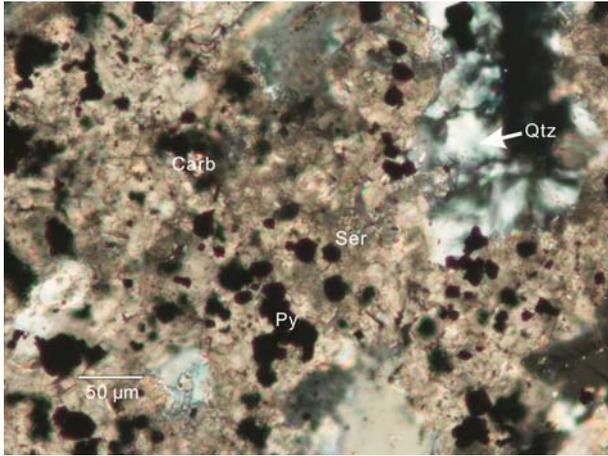


图4 变质石英杂砂岩金矿石显微照片(DGL045)  
Py, 黄铁矿; Qtz, 石英; Ser, 绢云母; Carb, 碳酸盐

表1 镇沅金矿中黄铁矿 X 射线衍射分析结果

	<i>a=b=c</i> (nm)	晶体尺寸(nm)
DGL-043	5.424	74
DGL-044	5.4259	71.9
DGL-045	5.418	137.3
DGL-046	5.42	101.4

底分解完全后, 溶液低温加热浓缩至湿盐状, 定溶到 10 mL 试管中, 连同硫脲浸取液上机测试. 测试结果显示, 金主要以包裹金的形式存在于黄铁矿中, 而黄铁矿中的裂隙金甚少, 反映了金与黄铁矿是同期形成的产物. 因此, 黄铁矿的 Re-Os 同位素年龄可以代表冬瓜林矿段金矿主要矿石类型的形成年龄.

样品 Re-Os 同位素年龄测定在国家地质实验中心进行. 操作流程采用 Carius 管溶样, 蒸馏分离 Os, 丙酮萃取 Re, 阳离子交换柱进一步纯化 Re, 美国 TJA 公司生产的 Finnigan Element 2 型高分辨率电感耦合等离子体质谱(HR-ICP-MS)测定 Re-Os 浓度及其同位素比值. 具体原理和详细分析方法参见文献[13~15]. 对于 Re: 选择质量数 185, 187, 用 190 监测 Os. 对于 Os: 选择质量数为 186, 187, 188, 189, 190 和 192, 用 185 监测 Re. 整个实验流程空白为: Re<4 pg, Os<0.7 pg.

### 3 测定结果

本次对镇沅金矿床 5 件黄铁矿样品测定的 Re 和 Os 的含量以及  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  和  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比值见表 3.

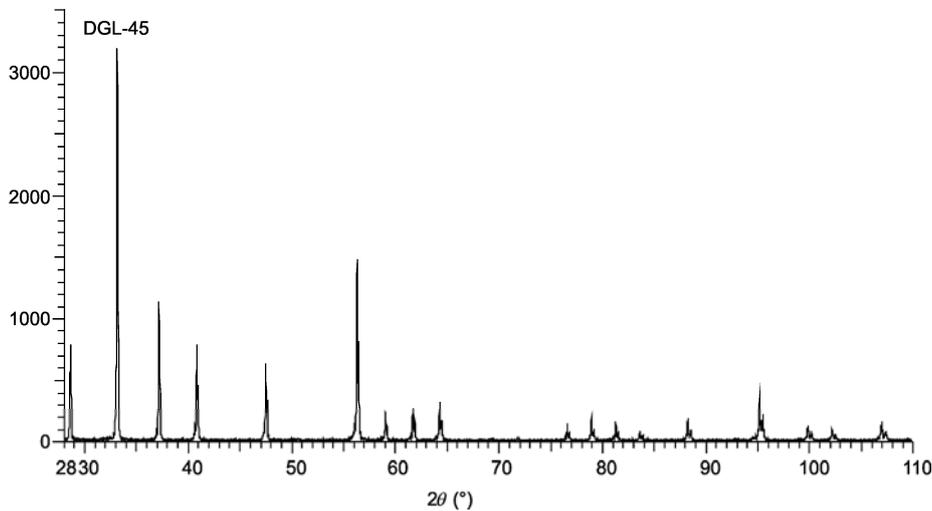


图5 镇沅金矿载金黄铁矿 X 射线粉晶衍射图

表2 黄铁矿中不同赋存状态金的分析结果

	DGL043	DGL044	DGL045	DGL046	空白
样重(mg)	100	100	100	100	
1.5%硫脲浸泡溶液 Au 含量(μg/g)	7.62	5.36	3.25	3.00	<检测限
王水溶解溶液 Au 含量(μg/g)	224.4	318.4	110.7	93.88	<检测限

表3 镇沅金矿中黄铁矿 Re-Os 同位素数据<sup>a)</sup>

原样名*	样重(g)	Re (ng/g)			普通 Os (ng/g)			<sup>187</sup> Os (ng/g)			<sup>187</sup> Re/ <sup>188</sup> Os			<sup>187</sup> Os/ <sup>188</sup> Os			
		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	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
DGL044	1.208	3.5665	0.0929	0.0479	0.0007	0.0131	0.0001	359.3	10.8	2.098	0.032						
DGL043	1.222	1.0551	0.0118	0.0105	0.0002	0.0034	0.0000	485.9	10.6	2.510	0.049						
DGL045	1.254	4.7436	0.0521	0.0473	0.0007	0.0156	0.0002	484.2	8.6	2.530	0.043						
DGL046	1.230	0.8445	0.0111	0.0207	0.0004	0.0038	0.0000	196.9	4.8	1.420	0.030						
DGL047	1.216	0.5975	0.0051	0.0079	0.0001	0.0017	0.0001	363.2	5.3	1.679	0.053						
8028	0.620	0.1623	0.0020	0.0044	0.0002	0.0006	0.0001	179.3	8.7	1.067	0.139						
8003	0.349	0.1436	0.0102	0.0140	0.0002	0.0028	0.0001	49.50	3.58	1.552	0.047						
8006	1.366	0.1211	0.0013	0.0296	0.0007	0.0035	0.0001	19.74	0.52	0.900	0.024						
8010	0.562	0.4430	0.0042	0.0139	0.0006	0.0033	0.0001	153.9	6.4	1.833	0.099						
8011	1.009	0.2137	0.0027	0.0166	0.0002	0.0044	0.0001	62.04	1.12	2.019	0.051						
8013	1.210	0.3968	0.0052	0.0171	0.0002	0.0050	0.0000	112.1	1.9	2.256	0.023						
BJL-1	0.624	0.1120	0.0044	0.0015	0.0001	0.0004	0.0000	350.2	28.7	1.872	0.151						
BJL-6	0.633	0.1231	0.0022	0.0021	0.0002	0.0002	0.0000	277.5	23.3	0.782	0.086						
04113	0.613	0.0267	0.0010	0.0008	0.0001	0.0002	0.0000	162.9	30.1	1.532	0.310						
04115	0.645	0.0370	0.0020	0.0016	0.0003	0.0001	0.0000	113.4	20.6	0.612	0.131						
BB012	0.638	0.0517	0.0024	0.0025	0.0003	0.0004	0.0000	99.3	11.2	1.249	0.138						
BB025	0.684	0.4152	0.0054	0.0180	0.0008	0.0032	0.0002	111.2	5.2	1.354	0.099						
JCBY	0.056	38.3282	0.4031	15.6550	0.1241	0.6788	0.0063	11.83	0.16	0.333	0.002						
推荐值		38.61	0.54	16.23**	0.17			0.3363			0.0029						
BK		0.0042	0.0027	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	29.97	19.29	0.267	0.140						
BK		0.0030	0.0002	0.0004	0.0000	0.0001	0.0000	40.8	2.8	2.441							
BK		0.0023	0.0001	0.0002	0.0000	0.0001	0.0000	50.29	5.04	2.339	0.328						

a) \*, DGL043-DGL047 为镇沅金矿冬瓜林矿区黄铁矿样品; 8003-8013 为长安金矿黄铁矿样品, 8028 为正长岩中黄铁矿; BIL-1~BIL-6 为大坪金矿芭蕉林矿区黄铁矿样品; 04113-04115 为大坪金矿东矿段黄铁矿样品; BB012~BB025 为西藏邦布金矿黄铁矿样品; JCBY 为监控标样; \*\*, 推荐值为总 Os 含量; BK 为测试空白

所测  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  和  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比值均扣除了全流程空白。 $^{187}\text{Re}$  衰变常数采用  $1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1} (\pm 1.02\%)$ <sup>[16]</sup>。采用 ISOPLOT 软件对所获得的 5 组数据进行计算发现, 1 件样品(DGL047)数据点明显偏离等时线, 究其原因, 可能是由于分析操作误差所致, 也有可能是该样品与前 4 件样品不属于同一矿脉。所得 Re-Os 等时线见图 6。计算获得镇沅金矿田冬瓜林矿段的 Re-Os 等时线年龄为  $229 \pm 38 \text{ Ma}$  (MSWD=2.0, 置信度 95%),  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  初始值  $0.68 \pm 0.24$ , 相当于  $\gamma\text{Os}$  为  $442 \pm 91$ 。整个实验测试过程质量监控用空白和 JCBY 国家级标样控制, 结果见表 3, 比较标样测定值与推荐值, 定年结果准确可靠。

## 4 讨论

随着超净实验技术的不断改进和新型 ICP-MS 的投入使用, Re-Os 同位素定年技术已经日趋成熟并广泛运用于金属矿床的年龄测定和成矿物质来源示踪研究<sup>[17-30]</sup>。与 N-TIMS 测定 Re-Os 同位素相比, HR-ICP-MS 的测定精度略显偏低, 但其测试结果不影响我们对成矿时代和成矿物质来源的讨论。

### 4.1 成矿时代

对矿床成因研究而言, 成矿时代能够提供至关重要的信息。直接的金矿成矿年龄测定必须重视 3 个问题: (1) 样品是否为金矿石或者可代表金矿化作用; (2) 测试对象是否为金成矿时的同期产物; (3) 测试方法是否可以确定金矿成矿事件的年龄<sup>[30]</sup>。目前,

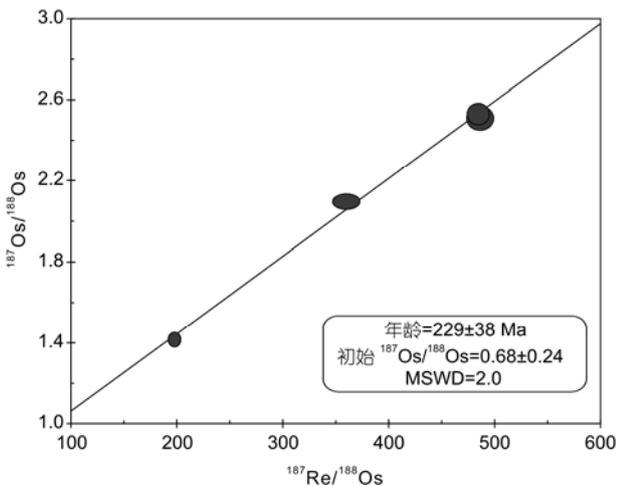


图 6 镇沅金矿载金黄铁矿 Re-Os 等时线

已知的镇沅金矿的年代学数据不少(均为间接法年龄)<sup>[31]</sup>, 但存在定年对象和定年方法的种种缺陷<sup>[31-37]</sup>。在成矿时代研究方面, 前人多局限于矿床与煌斑岩的空间关系, 而采用 Rb-Sr 法、K-Ar 法和 Ar-Ar 法对煌斑岩全岩或其中的云母矿物进行定年; 还有采用 ESR 法对石英进行年龄测定; 也有采用裂变径迹法对煌斑岩中磷灰石进行定年<sup>[32]</sup>等。事实上, 前人研究表明本区煌斑岩与金矿化无直接成因关系<sup>[1,38,39]</sup>。因此, 用喜马拉雅期煌斑岩形成年龄来代表镇沅金矿不同类型金矿石的成矿年龄是值得商榷的。在最近拓展的镇沅金矿田冬瓜林矿段的露天采场, 发现石英斑岩脉切穿金矿体, 而该石英斑岩同位素测年结果为  $115.9 \text{ Ma}$ <sup>[3]</sup>; 镇沅金矿田中, 玄武岩型金矿、超基性岩型金矿、变质石英杂砂岩型金矿和花岗斑岩型金矿均是重要类型, 这些类型矿石成因时代的确定, 是探讨镇沅金矿成因模式的重要基础。

本文所获得的镇沅金矿 Re-Os 等时线年龄结果, 可从前人的 Pb 同位素研究结果中获得证据支持。胡云中等人<sup>[1]</sup>对镇沅金矿田不同矿区进行了 51 件 Pb 同位素测定, 其中矿石 27 件。分析结果表明矿石中的黄铁矿确实存在 200~270 Ma 的模式年龄段。据此提出哀牢山金矿带在海西晚期-印支期已具雏形的观点。此外, 张志兰等人<sup>[40]</sup>的资料表明, 与镇沅金矿邻近的墨江金厂金矿(大型), 其矿石 Pb 模式年龄为 304~114 Ma, 峰值为 250 Ma; 陈景荣等人<sup>[41]</sup>也认为墨江金矿与超基性蛇绿岩具有密切的成因联系, 其成岩成矿延续时间较长, 从海西期到喜马拉雅期均有不同程度的金矿化, 是多期次和多矿化叠加的结果。

### 4.2 成矿物质来源

本次工作由 Re-Os 等时线得到的  $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i$  值为  $0.68 \pm 0.24$ , 明显高于 229 Ma 时地幔  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  的比值(0.125), 低于地壳 229 Ma 时  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  的比值(3.459), 表明成矿物质来源为壳-幔混合来源, 该结论在地幔-地壳-矿石中  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  随时间的演化关系图中(图 7)可以清楚得到反映。地幔演化初始时间为地球形成年龄值(4.558 Ga), 其初始  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  为 0.09531。当地幔演化至 2.7 Ga 时分异形成地壳, 其  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  初始值为 0.10825。伴随着壳幔的各自继续演化, 当其演化至 229 Ma 时(镇沅金矿主成矿时代), 地壳的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比值为 3.459, 远高于此时镇沅金矿成矿的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  初始值 0.68, 而此时地幔

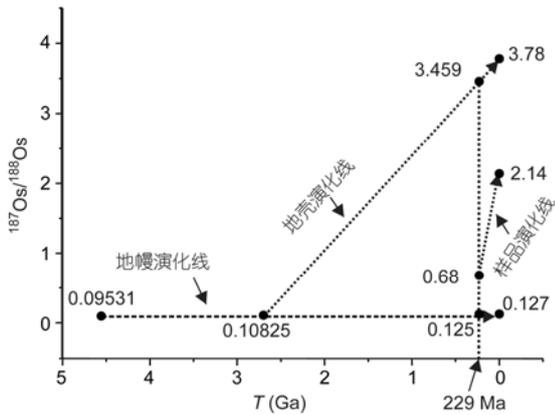


图7 地幔、地壳、矿石  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  随时间的演化关系图

$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  值为 0.125. 表明镇沅金矿形成初期成矿物质来源虽然具壳幔混合来源, 但主要来源于地幔. 地壳演化至现在的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  大约为 3.78, 地幔现在的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  为 0.127, 而镇沅金矿的现在值为 2.14, 可能暗示在金矿的形成过程中, 有地壳成矿物质的加入.

原始上地幔的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  初始值和  $\gamma\text{Os}$  值分别为 +0.129 和 +1.6, 而相应的大陆地壳平均值为 +3.63 和

+2758<sup>[20]</sup>, 具有典型壳源特征的辽宁猫岭金矿含金毒砂的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  初始值为  $1.32\pm 0.48$ <sup>[21]</sup>. 而镇沅金矿  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  初始值和  $\gamma\text{Os}$  值分别为  $0.68\pm 0.24$  和  $442\pm 91$ , 介于地幔和地壳之间. 且前人大量研究结果显示, 镇沅金矿黄铁矿中铅同位素具有幔源特征<sup>[1,6,35]</sup>. 因此可以推论镇沅金矿成矿物质来源为壳-幔混合型, 但以地幔来源为主.

对哀牢山金矿带镇沅金矿、大坪金矿和长安金矿载金黄铁矿作普通 Os 与 Re/Os 关系投影图<sup>[42]</sup>(图 8), 图中显示, 矿石中黄铁矿的投影点落在地幔熔体与 Lewisian 下地壳之间, 也反映了成矿物质来源具有壳-幔混合来源但以幔源为主的特征.

### 4.3 成矿事件与构造-岩浆作用的耦合

构造-岩浆演化历史表明, 哀牢山复合造山作用经历了前寒武纪-早古生代基底的形成、晚古生代俯冲造山、海西期末-印支期强烈碰撞造山、燕山期-喜马拉雅期伸展(走滑)造山等复杂的演化过程<sup>[43-45]</sup>. 在早石炭世古特提斯洋扩张阶段, 海底扩张达到高潮, 出现了大量基性火山岩的喷发, 形成了一套岩性为

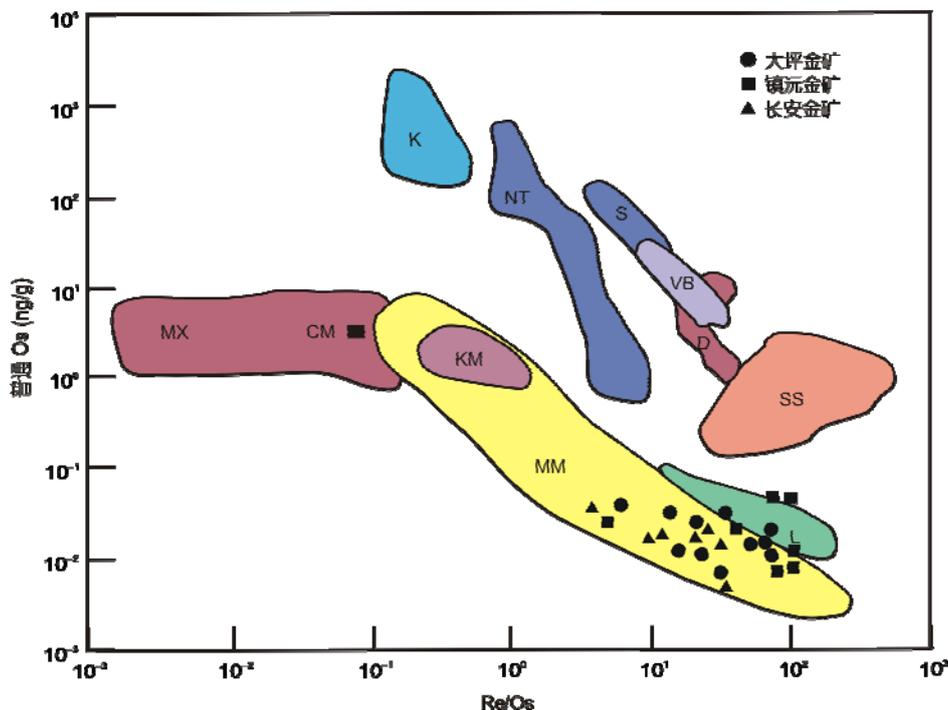


图8 哀牢山金矿带黄铁矿 Re/Os 比值与普通 Os 关系图

CM, 球粒陨石地幔丰度; D, Duluth 硫化物; K, Kambalda 硫化物; KM, 科马提岩; L, Lewisian 下地壳; MM, 地幔熔体; MX, 地幔捕虏体; NT, Noril'sk-Talnakh 硫化物; S, Sudbury 硫化物; SS, 富硫沉积物. 据 Lambert 等人<sup>[42]</sup>改编

纯橄榄岩-二辉橄榄岩、堆晶岩、拉斑玄武岩、基性脉岩、硅质岩等组成的金背景值高的蛇绿混杂岩,其形成时代大致为 320 Ma<sup>[46,47]</sup>。哀牢山金矿带中一系列的金矿床、金矿点及金地球化学异常,基本上都是沿此混杂岩带分布<sup>[1]</sup>。因此可以看出,该岩带的形成和演化是哀牢山金矿带赖以存在的重要物质基础。晚二叠世初洋壳蛇绿岩由西向东俯冲,与扬子陆块发生碰撞,古特提斯洋闭合,对应的地质构造运动为海西晚期-印支早期碰撞造山,本区 3 条深大断裂(红河、哀牢山和九甲-墨江)此时已经形成,特别是九甲-墨江断裂在其前缘旁侧派生一系列近乎平行的剪切断裂,形成不同尺度的脆韧性剪切带,对金矿成矿流体的活化、运移和沉淀起着最为基础的控制作用<sup>[48]</sup>。在强烈的构造-岩浆作用下,金富集成矿,这应是本区最主要的金成矿事件之一。总结哀牢山金矿带构造-岩浆演化历史及前人对镇沅金矿的研究成果,我们认为镇沅金矿经历过多期地质作用,主成矿期为印支期,成矿物质来源和成矿流体性质具有幔源特

征,矿床成因为蛇绿混杂岩建造型金矿。蚀变花岗斑岩型金矿和蚀变煌斑岩型金矿分别为燕山期和喜马拉雅期后期改造叠加所致。

## 5 结语

(1) 利用 Re-Os 同位素分析方法,测定了镇沅金矿田冬瓜林矿段主要矿石类型(变质石英杂砂岩)成矿年代,获得了 229±38 Ma 的成矿年龄,表明印支期该区存在一次重要的成矿事件。

(2) 测定的黄铁矿 <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os 初始值为 0.68±0.24, γOs 为 442±91, <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os 为 1.420~2.530,均高于地幔而低于地壳,结合普通 Os 对 w(Re)/w(Os) 比值,表明镇沅金矿成矿物质是壳幔混合来源,但主要是幔源。

(3) 镇沅金矿成因与本区蛇绿混杂岩存在着密切的关系,其成岩成矿时差约为 100 Ma。矿床中占次要地位的蚀变花岗斑岩型和蚀变煌斑岩型金矿石可能是后期改造叠加所致。

**致谢** 野外工作中,镇沅金矿地质科给予了大力支持和热情帮助,并提供了部分地质资料。在此特表谢忱!

## 参考文献

- 1 胡云中,唐尚鹁,王海平,等.哀牢山金矿地质.北京:地质出版社,1995.106-250
- 2 何文举.镇沅金矿田煌斑岩特征及其与金矿成矿的关系.云南地质,1993,12:148-158
- 3 唐尚鹁,李经典,何叔欣.哀牢山北段金矿成矿带成矿规律初探.云南地质,1991,10:44-70
- 4 任胜利,覃功炯,池三川,等.云南镇源老王寨-冬瓜林金矿床的成矿物质来源.地球科学,1995,20:47-52
- 5 沈上越,魏启荣,程惠兰,等.云南哀牢山金矿带成因类型探讨.特提斯地质,1997,21:73-84
- 6 杨夕辉.云南镇沅老王寨构造蚀变岩型金矿矿床成因.云南地质,2005,24:371-378
- 7 田农,杨岳清.云南哀牢山北段蛇绿混杂岩建造金矿床的地质地球化学特征及成因探讨.青藏高原地质文集,1991,21:84-97
- 8 李定谋,李保华.云南哀牢山金矿床的成矿条件.沉积与特提斯地质,2000,20:60-77
- 9 边千韬.地球壳幔结构构造与老王寨超大型金矿床形成关系探索.中国科学 D 辑:地球科学,1998,28:303-309
- 10 俞广钧.哀牢山金矿带原生金矿床的类型及控矿条件.地质与勘探,1990,26:3-11
- 11 葛良胜,邓军,杨立强,等.哀牢山矿集区构造环境演化与金多金属成矿系统.岩石学报,2010,26:1699-1722
- 12 葛良胜,邓军,郭晓东,等.哀牢山多金属矿集区深部构造与成矿动力学.中国科学 D 辑:地球科学,2009,39:271-284
- 13 杜安道,何红蓼,殷宁万,等.辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究.地质学报,1994,68:339-347
- 14 杨胜洪,屈文俊,杨刚,等.电感耦合等离子体质谱法测量铼和钨同位素比值的质量分馏校正.岩矿测试,2007,26:4-8
- 15 李超,屈文俊,杜安道,等.铼-钨同位素定年法中丙酮萃取铼的系统研究.岩矿测试,2009,28:233-238
- 16 Smoliar H J, Walker R J, Morgan J W. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA, and IVB iron meteorites. Science, 1996, 271: 1099-1102
- 17 赵葵东,蒋少涌.金属矿床的同位素直接定年方法.地学前缘,2004,11:425-434
- 18 杜安道,屈文俊,李超,等.铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展.岩矿测试,2009,28:288-304
- 19 靳新娣,李文君,吴华英,等.Re-Os 同位素定年方法进展及 ICP-MS 定年测试关键技术.岩石学报,2010,26:1617-1624
- 20 蒋少涌,杨竞红,赵葵东,等.金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究.南京大学学报,2000,36:669-677
- 21 喻钢,杨刚,陈江锋,等.辽宁猫岭金矿中含金毒砂的 Re-Os 年龄及地质意义.科学通报,2005,50:1248-1252
- 22 丰成友,张德全,屈文俊,等.青海格尔木骆驼沟喷流沉积型(金)矿床的黄铁矿 Re-Os 定年.地质学报,2006,80:571-576

- 23 石贵勇, 孙晓明, 王生伟, 等. 云南白马寨铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素定年及其地质意义. 岩石学报, 2006, 22: 2451-2456
- 24 陈懋弘, 毛景文, 屈文俊, 等. 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, 2007, 53: 371-382
- 25 刘玉龙, 杨刚, 陈江峰, 等. 白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床黄铁矿 Re-Os 定年. 科学通报, 2005, 50: 172-175
- 26 杨刚, 陈江峰, 杜安道, 等. 安徽铜陵老鸦岭含钼碳质页岩的 Re-Os 定年. 科学通报, 2004, 49: 1205-1208
- 27 王登红, 屈文俊, 李志伟, 等. 金沙江-红河成矿带斑岩铜矿的成矿集中期: Re-Os 同位素定年. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34: 345-349
- 28 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 等. 安徽铜陵新桥 Cu-Au-Fe-S 矿床黄铁矿 Re-Os 定年及成矿意义. 地质科学, 2009, 44: 183-192
- 29 Selby D, Kelley K D, Hitzama M W, et al. Re-Os sulfide (bornite, chalcopyrite and pyrite) systematics of the carbonate-hosted copper deposit at Ruby Creek, southern Brooks range, Alaska. *Econ Geol*, 2009, 104: 437-444
- 30 Stein H J, Morgan J W, Scherstén A. Re-Os dating of low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides: The Harnasgold deposit, southwest Sweden, records continental-scale tectonic events. *Econ Geol*, 2000, 95: 1657-1671
- 31 杨立强, 邓军, 赵凯, 等. 哀牢山造山带金矿成矿时序及其动力学背景探讨. 岩石学报, 2011, 27: 2519-2532
- 32 杨立强, 刘江涛, 张闯, 等. 哀牢山造山型金成矿系统: 复合造山构造演化与成矿作用初探. 岩石学报, 2010, 26: 1723-1739
- 33 毕献武, 胡瑞忠, 何明友. 牢山金矿带 ESR 年龄测定及其地质意义. 科学通报, 1996, 41: 1301-1303
- 34 毕献武, 胡瑞忠, 何明友. 哀牢山金矿带的成矿时代及其成矿机制探讨. 地质地球化学, 1996, 24: 16-19
- 35 何明友, 胡瑞忠. 老王寨金矿床成因探讨. 物探化探计算技术, 1996, 18: 17-20
- 36 王江海, 漆亮, 尹安, 等. 云南老王寨金矿区煌斑岩的侵位年龄和铂族元素地球化学. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31(增刊): 122-127
- 37 魏俊浩, 刘丛强, 刘国春. 金矿测年方法讨论及定年中存在的问题. 地学前缘, 2003, 10: 319-326
- 38 黄智龙, 刘丛强, 宋成明, 等. 云南老王寨金矿区煌斑岩成因及其与金矿化的关系. 北京: 地质出版社, 1999. 1-251
- 39 朱桂田, 朱世戎. 煌斑岩与金矿成矿关系探讨. 矿产与地质, 1996, 10: 368-376
- 40 张志兰, 张树发, 袁海华, 等. 云南墨江金厂金矿的同位素地质特征及成因探讨. 成都地质学院学报, 1987, 14: 29-41
- 41 陈锦荣, 崔学武, 武玉海, 等. 云南墨江金厂金矿床成岩成矿年龄研究. 黄金地质, 2002, 8: 1-5
- 42 Lambert D D, Frick L R, Foster J G, et al. Re-Os isotope systematic of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co magmatic sulfide system, Labrador, Canada: II. Implications for parental magma chemistry, orogenesis, and metal redistribution. *Econ Geol*, 2000, 95: 867-888
- 43 张志斌, 刘发刚, 包佳凤. 哀牢山造山带构造演化. 云南地质, 2005, 24: 137-141
- 44 范蔚茗, 彭头平, 王岳军. 滇西古特提斯俯冲-碰撞过程的岩浆作用记录. 地学前缘, 2009, 16: 291-301
- 45 莫宣学, 潘桂棠. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的制约. 地学前缘, 2006, 13: 43-51
- 46 简平, 汪啸风, 何龙清, 等. 云南新平县双沟蛇绿岩 U-Pb 年代学初步研究. 岩石学报, 1998, 14: 207-211
- 47 简平, 刘敦一, 孙晓猛. 滇川西部金沙江石炭纪蛇绿岩 SHRIMP 测年: 古特提斯洋壳演化的同位素年代学制约. 地质学报, 2003, 77: 1-13
- 48 梁业恒, 孙晓明, 石贵勇, 等. 云南哀牢山老王寨大型造山型金矿成矿流体地球化学. 岩石学报, 2011, 27: 2533-2540