

文章编号: 1000-4734(2013)03-0287-08

金顶铅锌矿黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义

唐永永^{1,2}, 毕献武^{1*}, 武丽艳¹, 王雷³, 邹志超^{1,2}, 和利平⁴

(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, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 4. 云南金鼎锌业有限公司, 云南 兰坪 671401)

摘要: 关于金顶铅锌矿的成矿时代至今未获得精确的同位素测年数据, 这严重制约了我们准确厘定该矿的成矿动力学背景。鉴于此, 本文根据黄铁矿的产状特征, 将其区分为沉积成岩期和热液期黄铁矿, 并开展了 Re-Os 同位素测年的研究(ICP-MS 方法)。虽然黄铁矿的 Re($0.4069 \times 10^{-9} \sim 375.2620 \times 10^{-9}$)和 Os($0.0008 \times 10^{-9} \sim 0.4131 \times 10^{-9}$)含量变化很大, 部分样品含量很低, 但它们仍然揭示出两组等时线年龄: 分别为 114 ± 13 Ma 和 65 ± 10 Ma。笔者认为 114 Ma 等时线年龄可能代表了沉积成岩过程当中的一期矿化年龄, 而 65 Ma 可能记录了铅锌主矿化之前热液作用开始活动的时间。结合其他方面的地质证据推断金顶铅锌矿主矿化时代可能在 28~37 Ma 之间。

关键词: Re-Os 同位素; 黄铁矿; 成矿时代; 金顶铅锌矿

中图分类号: P618; P597

文献标识码: A

作者简介: 唐永永, 男, 1985 年生, 博士研究生, 矿床地球化学专业. E-mail: tangyong8514@163.com

西南三江地区作为我国重要的贱金属 Pb-Zn-Ag-Cu 成矿带, 成矿作用自北向南广泛发育于沱沱河、玉树和兰坪地区^[1], 仅在兰坪盆地就发现各类矿床、矿点上百余处(诸如金顶 Pb-Zn 矿床、白秧坪 Ag-Pb-Zn 多金属矿床、金满 Cu 矿床等)^[2]。金顶铅锌矿床 1960 年被发现, 1984 年完成勘探, 铅锌控制储量 1500 万吨, 成矿总金属量超过 2200 万吨, 是中国目前最大的铅锌矿床, 也是世界上铅锌金属储量超过千万吨的十几个超大型铅锌矿床之一^[1-8]。金顶矿床的研究始于上世纪 80 年代, 关于其成因机制陆续提出了“**“同生沉积-后期改造层控矿床”**”^[3,9]、“**“中低温非岩浆热液成矿”**”^[4]、“**“同生沉积-变形叠加成矿”**”^[10]、“**“喷气(热液)沉积成矿”**”^[11]、“**“岩溶成矿”**”^[12]、“**“壳幔流体混合成矿”**”^[13]等众多模式。而导致金顶铅锌矿近 30 年成因争论的原因之一即成矿的时代问题一直没有解决。Pb 模式年龄最早被应用于讨论金顶铅锌矿床的成矿时代^[5,14-15], 铅同位素年龄跨度很大(2~400 Ma), 绝大部分矿石铅集中分布在 130 Ma 以后; 李小明等^[16]通过含矿砂岩磷灰石裂变径迹获得 25.8~35.9 Ma 的年龄; 薛春

纪等^[7]测得黄铁矿 Re-Os 年龄为 67 Ma; 高炳宇等^[17]利用沥青 Re-Os 法获得年龄为 68 Ma, 认为它可能代表了金顶穹隆古油气的成藏年龄, 这一时间大致相当于寄主岩石古新统云龙组的沉积时代, 早于主矿化时代。王安建等^[18]结合区域地质和热事件分析, 将成矿时代推定在 28~33 Ma 之间。由于受矿物选择的代表性、测试方法误差和方法可靠性等因素制约, 迄今为止金顶超大型铅锌矿还没有获得令人信服的测年数据, 制约了我们对该矿床成矿动力学背景的深入认识。

随着 Re-Os 同位素体系的兴起, Re-Os 同位素已经成为研究金属硫化物矿床成矿时代和成矿物质来源示踪等最直接和最有效的方法^[19-20]。其中辉钼矿 Re-Os 测年技术发展最为成熟, 国内外相关报道屡见不鲜^[21-25]。而 Stein 等^[26]报道了剪切带型金矿中黄铁矿 Re-Os 定年成果之后, 关于黄铁矿 Re-Os 同位素体系的研究也取得了丰硕的成果, 我国学者^[7,27-29]在该领域做了很好的工作。本文在前人工作的基础上, 对金顶超大型铅锌矿床黄铁矿开展 Re-Os 同位素定年研究。

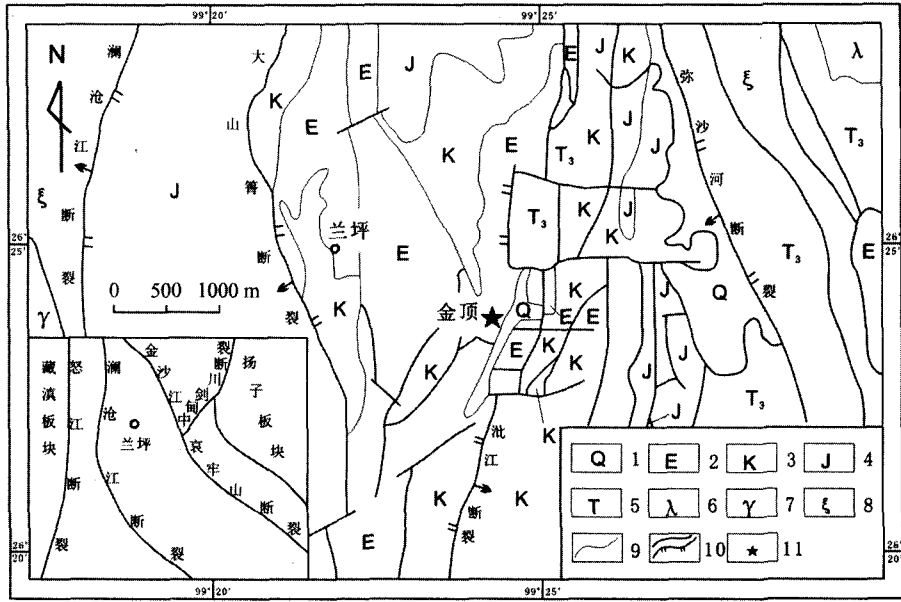
1 地质背景

兰坪盆地处于藏滇板块与扬子板块之间, 夹持于金沙江-哀牢山断裂带和澜沧江断裂带之间(图 1), 向北趋于渐灭, 向南与思茅盆地相接。

收稿日期: 2012-09-29

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2009CB421005); 中国科学院重要方向项目群项目(编号: KZCX2-YW-Q04-01)

* 通讯作者, E-mail: bixianwu@vip.gyig.ac.cn



1-第四系; 2-第三系; 3-白垩系; 4-侏罗系; 5-三叠系; 6-喜山期岩浆岩; 7-燕山期岩浆岩; 8-印支期岩浆岩;
9-地质界线; 10-断裂带; 11-金顶铅锌矿

图1 金顶地区区域地质略图

Fig. 1. Geological sketch map of Jinding area.

区域构造以南北向构造为基本骨架，并见有北北西向、北北东向的区域性断裂以及较晚形成的东西向断裂。盆地东西边缘超岩石圈断裂（金沙江-哀牢山断裂和澜沧江断裂）^[30]、盆地中央的穿壳断裂（兰坪-思茅断裂）^[13]及它们的次级断裂长期继承性活动，构成了兰坪盆地的基本断裂系统^[31]，这些断裂系统共同控制了盆地的构造演化，印支期为裂谷性质、燕山期为拗陷盆地、喜马拉雅期属走滑拉分盆地。

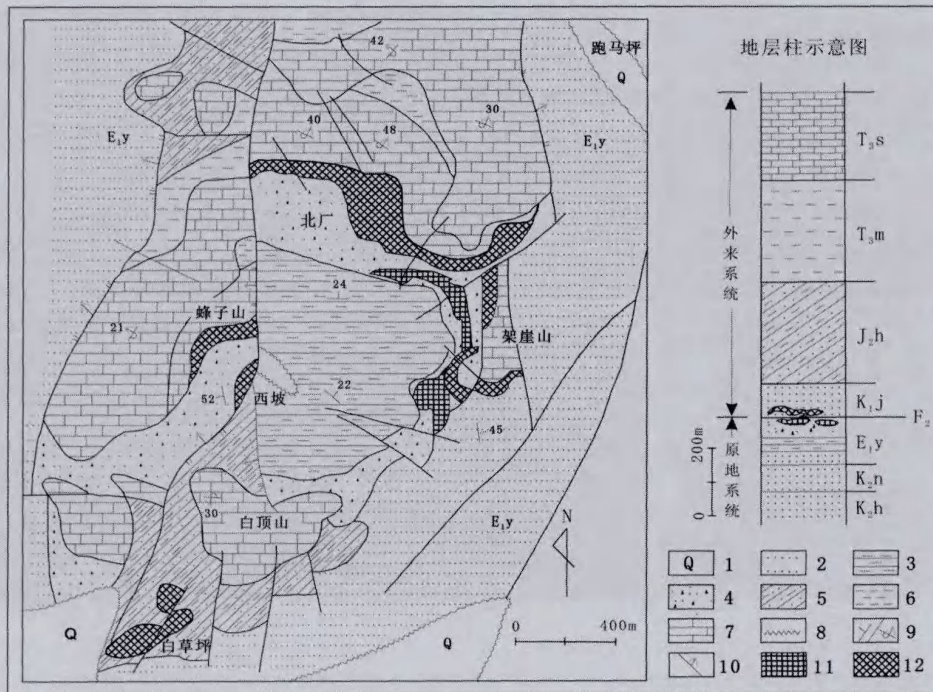
兰坪盆地区域上地层出露广泛，从元古界、古生界、中生界到新生界。盆地内出露最古老地层为上三叠统，中生界在盆地内分布最为广泛，新生界呈带状或零星分布于盆地之中。兰坪盆地火山岩浆活动分布主要集中在盆地东西两侧，并受控于深大断裂带，呈条带状展布。盆地内部出露岩浆岩很少，主要分布在盆地中部和东部，受断裂控制明显。

2 矿区地质

金顶铅锌矿由北厂、跑马坪、架崖山、西坡、峰子山、白草坪等矿段组成（图2），矿区地质演化中存在沉积作用、推覆活动、热隆升-金属成矿、穹窿破裂等基本地质事件，它们大致反映出从沉积作用-推覆活动-热隆升-大规模成矿-隆升持续-穹窿破裂的地质演化过程^[6]。矿区断裂构造发育，矿区东部的泚江断裂呈南北向展布，研究

证实，泚江断裂控制了云龙组沉积盆地的边界，由于长期活动切穿了不同层位的地层，成为本区主要的导矿构造。矿区地层分为原地系统和外来系统，以F₂断裂为界，外来系统覆盖于原地系统之上。铅锌矿体环绕穹隆核心边缘呈不规则的环带分布，受构造和岩性控制明显，主要以板状、层状、似层状产在推覆构造中及其上下的白垩系景星组（K_j）（上含矿带）和第三系云龙组上段（E_{1y}^b）（下含矿带）。矿区主要发育两种类型的原生铅锌矿石，砂岩型和角砾岩型。角砾岩型矿石主要分布于架崖山和北厂东部，而砂岩型矿石则分布于角砾岩型矿石的外侧，少量分布于其顶部。

黄铁矿是金顶铅锌矿最为发育的金属矿物之一。金顶铅锌矿黄铁矿产状复杂，按成因大致可分为3种：①沉积成岩期黄铁矿，块状或浸染状构造，结晶颗粒粗大，自形程度高，具有压碎结构，裂隙中充填方解石、方铅矿、闪锌矿等，边缘有时被硫化物交代，或呈圆珠集合体（似莓群）数量少；②热液期黄铁矿，脉状或块状构造，颗粒粗大，但自形程度差，普遍发育碎裂结构，经常被硫化物充填或交代，被改造迹象明显，有的黄铁矿呈胶状、变胶状与白铁矿交生，组成斑块状、放射状、结核状集合体；③表生期黄铁矿，浸染状或脉状构造；颗粒自形，粒度变化大，少见硫化物交代溶蚀，与铁菱铁矿、褐铁矿及表生



1-第四系; 2-古新统; 3-粉砂岩泥岩 (E_{1y}^a); 4-灰岩角砾岩和砂岩 (E_{1y}^b); 5-砂岩粉砂岩(J₂h); 6-泥岩粉砂岩(T₃m); 7-三合洞组灰岩 (T₃s); 8-角度不整合; 9-正常/倒转地层; 10-断裂; 11-角砾岩型矿体; 12-砂岩型矿体

图2 金顶铅锌矿矿区地质图

Fig. 2. Geological sketch map of Jinding Pb-Zn ore deposit.

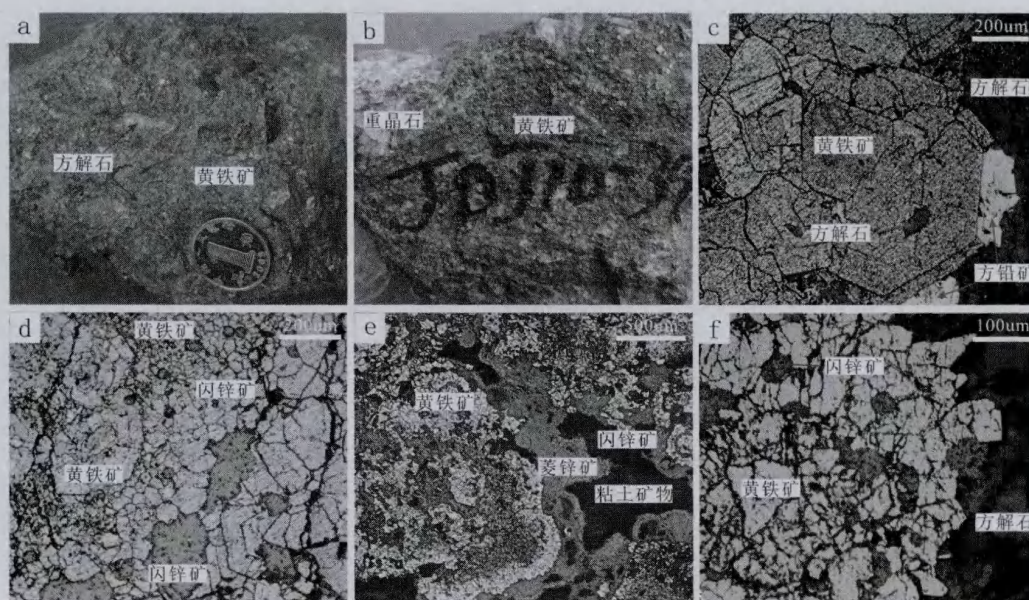
白铁矿密切伴生, 数量不多(图3)。显微镜下仔细观察所研究的黄铁矿普遍发育由应力作用引起的碎裂结构, 裂隙中充填闪锌矿、方铅矿。此外, 黄铁矿边部常见硫化物交代溶蚀现象。电子探针能谱分析显示: 沉积成岩期黄铁矿 S/Fe 原子比值 (2.22~2.36) 较大, As 含量较低, 而热液期黄铁矿 S/Fe 原子比值 (1.88~1.93) 较小, As 含量较高, 这种矿物成分上的区别可能主要是由沉淀介质的差异引起的。

3 样品选择及测试方法

本次共选择黄铁矿单矿物样品 17 件, 主要来自北厂、架崖山和跑马坪矿段砂岩型矿石, 矿化主岩为下白垩统景星组和古新统云龙组, 据产状特征可将黄铁矿分为沉积成岩期和热液期(表1)。多数样品通过手工破碎, 过筛至粒度 40~80 目, 然后在双目镜下挑选获得, 小部分样品先后采用重力分离和电磁分离, 最后在双目镜下挑选获得, 所有样品纯度 > 98%。

样品分析和测试工作在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 Re-Os 同位素实验室完成, 分析仪器为 ELAN DRC-e 型

电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)。实验步骤简述如下: 准确称取 3~5 g 黄铁矿样品于 Carius 中, 缓慢加入 HNO₃ 分解黄铁矿, 产生的气体和 Os 用 2.5 mL 10 mol/L 的 HCl 在冰水浴中吸收。待反应完全后, 将吸收 Os 的 HCl 转移至 Carius 中, 并用 4 mL HCl 分两次清洗 Carius 管。加入适量的 Re 和 Os 稀释剂, 加入 15 mL HNO₃, 密封 Carius 管, 放入不锈钢套中于 200 °C 下加热 15 h。取出 Carius 管并在冰箱的冷冻室中冷却 2 h。打开 Carius 管, 将进气的 Teflon 管移至 Carius 管底部, 在沸腾的水浴中加热蒸馏, 蒸馏过程中在线缓慢加入约 5mL H₂O₂ 使 Os 蒸馏完全, Os 用净化的空气带出, 并用 1.5 mL 的 H₂O 在冰水浴中吸收。将吸收液保存于冰箱冷冻室中备测。将蒸馏 Os 剩下的溶液转移至 125 mL 的 Teflon 烧杯中, 蒸干, 加入 3 mL HCl 再蒸干。残渣用 25 mL 2 mol/L 的 HCl 溶解, 然后用阴离子交换树脂 (AGI-X8 200~400 目) 分离 Re。实验所用 HCl 和 HNO₃ 通过亚沸蒸馏提纯, 实验用水为 Millipore 18 MΩ·cm, 同位素稀释剂 ¹⁸⁵Re 和 ¹⁹⁰Os 分别稀释至 10 ng/g, 0.1 mg/g 备用。实验原理及详细分析方法见文献[23,32-35]。



a-砂岩型矿石, 块状黄铁矿; b-砂岩型矿石, 浸染状黄铁矿; c-自形黄铁矿, 具压碎结构, 中心充填方解石, 边缘被方铅矿交代; d-自形黄铁矿, 具压碎结构, 间隙充填闪锌矿, 伴生重结晶黄铁矿, 间隙充填莓球状闪锌矿; e-胶状黄铁矿, 具碎裂结构, 被菱锌矿等交代; f-胶状黄铁矿碎块间隙中充填闪锌矿

图3 金顶铅锌矿不同产状黄铁矿

Fig. 3. Pyrites with various occurrences from Jinding Pb-Zn ore deposit.

表1 金顶铅锌矿黄铁矿 Re-Os 同位素分析结果表

Table 1. Re-Os isotopic compositions of pyrites from Jinding Pb-Zn ore deposit

编号	采样位置	成矿阶段	普通 Os/ng·g ⁻¹	¹⁸⁷ Re/ng·g ⁻¹	¹⁸⁷ Os/ng·g ⁻¹
JDJ10-11	北厂	沉积成岩期	0.0483±0.0039	135.5469±2.3823	0.2788±0.0119
JDPMP2	跑马坪	沉积成岩期	0.0318±0.0030	86.5046±1.5543	0.1424±0.0082
JD09-12	北厂	沉积成岩期	0.0113±0.0011	23.0322±0.7426	0.0334±0.0009
JD09-55	北厂	沉积成岩期	0.0091±0.0007	11.6896±0.7927	0.0124±0.0002
JD-05	北厂	沉积成岩期	0.0043±0.0003	2.8833±0.0333	0.0028±0.0001
JD09-57	北厂	沉积成岩期	0.0040±0.0003	1.1403±0.0933	0.0018±0.0000
JD09-58	北厂	沉积成岩期	0.0029±0.0005	1.0191±0.0952	0.0024±0.0001
JD09-25	跑马坪	沉积成岩期	0.0055±0.0008	0.4937±0.0545	0.0012±0.0000
JD09-23	跑马坪	沉积成岩期	0.0046±0.0002	0.4069±0.0126	0.0008±0.0000
JD-09-45	北厂	热液期	0.0144±0.0077	375.2620±16.6826	0.4131±0.0124
JDJ10-15A	架崖山	热液期	0.0371±0.0030	56.5724±1.1985	0.1042±0.0031
JDJ10-24B	北厂	热液期	0.0166±0.0014	36.7063±1.0415	0.0601±0.0029
JDJ10-24C	北厂	热液期	0.0545±0.0061	40.8774±1.8010	0.0608±0.0030
JDJ10-39B	架崖山	热液期	0.0329±0.0032	24.4912±0.9064	0.0510±0.0009
JD5	北厂	热液期	0.0355±0.0026	24.5391±0.8769	0.0414±0.0017
JDJ10-40	架崖山	热液期	0.0365±0.0014	21.6755±1.1593	0.0414±0.0022
JDBC2	北厂	热液期	0.0311±0.0016	10.5379±0.3699	0.0193±0.0016

4 分析结果

Re, Os 同位素分析结果见表1。普通 Os 是依据 Nier 值的 Os 同位素丰度, 通过 ¹⁹²Os/¹⁹⁰Os 的测量比计算得出的。其中 ¹⁸⁷Os 是指总 ¹⁸⁷Os,

计算时 ¹⁸⁷Re 和 ¹⁸⁷Os 的误差指其总误差, 包括样品的称量误差, 稀释剂标定误差和质谱测量误差等, 置信度为 95%。

由表1可见, 黄铁矿普通 Os 含量变化较大, 沉积成岩期黄铁矿普通 Os 介于(0.0029~0.0483)

$\times 10^{-9}$, 热液期黄铁矿普通 Os 介于 $(0.0144 \sim 0.0545) \times 10^{-9}$, 不同成矿阶段个别样品 (JD09-23、JD09-25、JD09-57、JD09-58、JDBC2) 的总 ^{187}Os 含量很低, 接近原点, 这些点对等时线的斜率和年龄影响甚微, 因此就可以总 ^{187}Os 代表放射成因 ^{187}Os 。据此, 采用 ISOPLOT 程序作黄铁矿 ^{187}Re - ^{187}Os 等时线图 (图 4), 获沉积成岩期黄铁矿等时线年龄为 $114 \pm 13 \text{ Ma}$, 热液期 $65 \pm 10 \text{ Ma}$ 。此外, 热液期黄铁矿 (JD09-45) 普通 Os 相对于总 ^{187}Os 可以忽略, 利用 $t = 1/\lambda \{ \ln[1 + (^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})] \}$, 其中 $\lambda = 1.666 \times 10^{-11}/\text{a}$, 获得模式年龄为 66 Ma , 该模式年龄与等时线年龄相当, 说明数据可靠。

5 讨论

5.1 黄铁矿 Re-Os 等时线年龄误差

Re-Os 同位素定年已成为当前金属矿床定年最重要的手段之一^[20], 尤其是低含量高放射成因硫化物 (黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等) 的 Re-Os 测年技术具有更加广泛的应用前景。但从已发表的黄铁矿 Re-Os 测年数据当中不难发现^[26,29,36-37], 存在的一个显著问题即等时线年龄误差偏大 (数据较好者误差小于 10%)。本文所获得的黄铁矿样品等时线年龄分别为 $114 \pm 13 \text{ Ma}$ 和 $65 \pm 10 \text{ Ma}$, 误差分别为 11% 和 15% (图 4a、b)。在假定实验方法可靠的前提下, 误差来源可能有以下几个方面: ①样品自身的瑕疵, 显微镜下详细观察所研究的沉积成岩期和热液期黄铁矿样品, 发现部分样品发育碎裂结构, 裂隙中时有充填物, 即便在单矿物挑选过程中尽可能地使黄铁矿破碎至更细粒度, 也不能很好的保证黄铁矿样品的纯度, 这可能导致年龄误差偏大; ②所研究的黄铁矿样

品比较年轻, 样品中的 Os 同位素比值异常低, 造成等时线上各点拉不开, 这对等时线结果的误差具有不容忽视的影响^[38]; ③各世代的黄铁矿常被后期的矿物所叠加、交代和溶蚀, 以致矿区的黄铁矿产状复杂, 不同世代黄铁矿容易混淆, 从而人为引入误差。

5.2 金顶铅锌矿成矿时代

金顶铅锌矿的成矿时代前人做了大量的工作, 至今没有取得突破性的进展, 这主要归咎于矿床本身的特殊性和复杂性, 此处不再赘述。本文通过黄铁矿 Re-Os 定年获得的两组等时线年龄: $114 \pm 13 \text{ Ma}$ 和 $65 \pm 10 \text{ Ma}$, 前者与矿化主岩 (早白垩系: $100 \sim 144 \text{ Ma}$) 相当, 可能代表了沉积成岩过程当中的一期矿化年龄, 该阶段成矿物质初步汇聚, 仅具微弱矿化。而对于 65 Ma 的等时线年龄, 这与薛春纪等^[7]和高炳宇等^[17]的研究结果相当, 其大致与喜马拉雅期幔源和壳源碱性岩浆活动开始的时间 (68 Ma) 同步或稍晚, 明显早于根据地质产状关系推断的主成矿年龄。在金顶矿区, 时代最新的地质体为云龙组地层, 时代上限大于 55 Ma (据云南地质三大队, 1984, 云南省兰坪县金顶铅锌矿详细勘探地质报告), 断裂控矿表明矿化晚于地层沉积时代。金顶铅锌矿化与 F_2 推覆断层密切相关, 该断层是云龙组地层沉积成岩之后发生的, 因为断层两侧的岩石明显破碎, 矿化发生于断层两侧的有利岩性段中, 矿石中主要硫化物 (闪锌矿、方铅矿) 未见受力变形及破碎现象, 说明主矿化是继 F_2 断层之后发生的^[14]。而区域上第一次较大规模的水平运动发生于中始新世与晚始新世之间, 大约距今 37 Ma ^[17-18,39-41]。这意

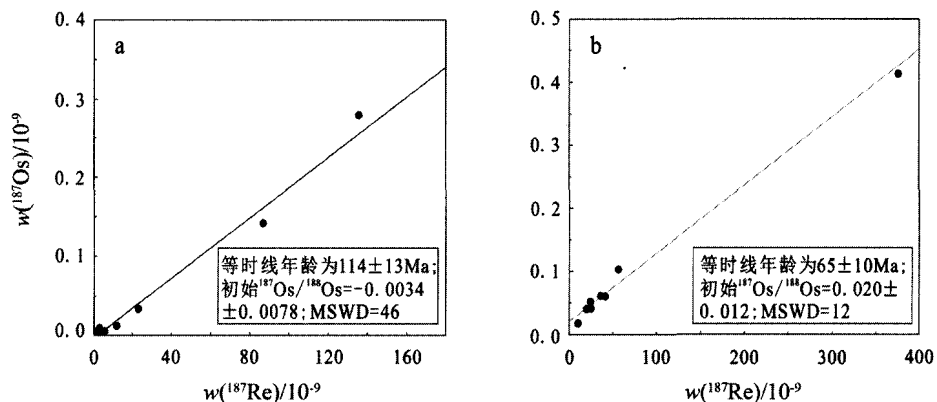


图 4 金顶铅锌矿黄铁矿 Re-Os 等时线年龄: 沉积成岩期(a)和热液期(b)

Fig. 4. Isochron ages, diagenetic stage (a) and hydrothermal stage (b) of pyrite Re-Os in the Jinding Pb-Zn ore deposit.

味着金顶铅锌矿床的主矿化时代应晚于 37 Ma。王晓虎等^[42]研究兰坪盆地白秧坪铅锌铜银多金属矿床成矿时代获得 29~30 Ma 的成矿年龄,并且认为此次矿化事件在三江成矿带上普遍发育,但是在不同部位成矿时代略有不同。考虑到区域上沿中轴构造及其与之垂直的东西向伸展构造侵位的碱性正长斑岩和花岗岩的年龄集中在 28~33 Ma,它集中反映了区域上一次大规模热事件的年龄。笔者比较认可王安建等^[18]的观点,鉴于金顶铅锌矿与区域上众多铅锌银锑多金属矿床和地球化学异常多分布在两组伸展构造交汇部位,暗示这一时期也是区域上重要的成矿事件,推断金顶铅锌矿可能形成于这一时段。尽管如此,地质历史事件往往具有其特殊性,在没有可信的同位素证据的前提下,笔者认为应将金顶成矿时代的下限定在 F_2 主断层形成之后(37 Ma,相当于区域上大规模水平运动活动时间),以期最大限度地符合地质事实。根据 Hou 和 Cook^[43]对印度—欧亚大陆碰撞阶段的划分,金顶铅锌矿床形成于晚碰撞阶段(26~41 Ma),即区域整体由碰撞挤压转向区域走滑的应力背景。该时间也恰好是兰坪思茅地区地壳挤压缩短造山达到峰期稍后开始松弛的调整时期,也是幔源岩浆沿着两组伸展构造交汇部位上涌形成碱性岩体侵位的时期,岩浆活动及其热源为区域相关矿床的形成提供了驱动力^[18]。

而热液期黄铁矿通常呈脉状或块状构造,胶状或变胶状结构,有时也具有交代残余结构,与之伴生的铅锌硫化物或镶嵌于黄铁矿中,或呈脉体穿插,这说明铅锌矿化晚于该类型黄铁矿。鉴于与热液黄铁矿共生的铅锌硫化物较少,可能暗示了该阶段成矿元素铅和锌的供给相对有限。热液期黄铁矿所揭示的 Re-Os 等时线年龄(65 Ma)与金顶穹窿内古油气的成藏时间大致相当。高炳宇等^[17]指出金顶古油气藏形成于古新世,先于铅锌硫化物大规模成矿,烃类物质具有通过热化学还原硫酸盐提供铅锌成矿所需硫化氢的客观条件,成藏与成矿是一个先后发生的连续的地质过程。总的来看,金顶铅锌矿热液成矿作用始于黄

铁矿化,之后才开始了大规模的铅锌成矿作用。虽然现在还不甚清楚黄铁矿化与铅锌矿化之间究竟具有何种成因联系,但是(65 Ma)的等时线年龄姑且可视为金顶铅锌矿热液作用开始活动的时间。

6 结 论

金顶铅锌矿黄铁矿 Re-Os 同位素定年研究揭示出两组等时线年龄: 114 ± 13 Ma 和 65 ± 10 Ma。前者可能代表了沉积成岩过程当中的一期矿化年龄,而后者可能记录了铅锌主矿化之前热液作用开始活动的时间。结合其他方面的地质证据推断金顶铅锌矿主矿化时代可能在 28~37 Ma 之间。精确的同位素测年历来是中低温热液矿床成矿理论研究的重点和难点之一。以往对金顶铅锌矿的各种测年研究,要么获得的年龄与地质事实不符,要么采用相同方法获得的年龄相差较大^[7,44]。今后一段时间内,深入开展成矿年龄研究依然是金顶铅锌矿成矿理论研究的重要任务,它对于我们准确厘定成矿动力学背景,深入认识成矿机理具有重要的意义。硫化物 Re-Os 定年技术无疑是我们的首选方法,但就目前已获得的黄铁矿 Re-Os 年龄来看,还没有揭示出与地质实际相吻合的主矿化时间。根据地质条件来限定成矿时代则显得必要起来,但准确地限定成矿时代取决于以往对地层-构造-岩浆等的精确定年成果以及对各种地质要素的套合状况。笔者认为金顶铅锌矿精细成矿时代的确定必须依赖于放射性同位素测年技术(如闪锌矿 Rb-Sr 法、硫化物 Re-Os 法和方解石 Sm-Nd 法)。加强相关实验技术和方法的改进,以及详化矿区基础地质研究,区分不同成矿阶段的矿化特征,确保样品具有同时性,同源性和封闭性决定了同位素测年工作的成败。

致 谢: 野外工作中得到云南省地质矿产开发局和云南省金鼎锌业有限公司的大力支持,同时,中国科学院地球化学研究所黄小文博士、李亮实验员给予了很大帮助,在此向以上单位及个人一并表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 侯增谦, 宋玉财, 李政, 王召林, 杨志明, 刘英超, 田世洪, 何龙清, 陈开旭, 王富春, 赵呈祥, 薛万文, 鲁海峰, 等. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型[J]. 矿床地质, 2008, 27(2): 123-144.
- [2] 梅嗣英, 程敦模, 张立生, 夏文杰, 朱创业, 等. 兰坪-思茅盆地铜矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [3] 白嘉芬, 王长怀, 纳荣仙. 云南金顶铅锌矿床地质特征及成因初探[J]. 矿床地质, 1985, 1(1): 1-9.
- [4] 高广立. 论金顶铅锌矿床的地质问题[J]. 地球科学, 1989, 14(5): 468-475.
- [5] 赵兴元. 兰坪金顶铅锌矿床铅源探讨[J]. 云南地质, 1990, 9(1): 25-36.
- [6] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 王登红, 杨伟光, 杨清标, 等. 金顶铅锌矿床地质-地球化学[J]. 矿床地质, 2002, 21(3): 270-277.
- [7] 薛春纪, 陈毓川, 王登红, 杨建民, 杨伟光, 曾荣, 等. 滇西北金顶和白秧坪矿床: 地质和 He, Ne, Xe 同位素组成及成矿时代[J]. 中国科学 d 辑, 2003, 33(4): 315-322.
- [8] Xue C J, Zeng R, Liu S W, Chi G X, Qing H R, Chen Y C, Yang J M, Wang D H. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, South China: A review [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31(1-4): 337-359.
- [9] 施加辛, 易凤煌, 文启鏊. 兰坪金顶铅锌矿床的岩矿特征及成因[J]. 云南地质, 1983, 2(3): 179-195.
- [10] 吴淦国, 吴习东. 云南金顶铅锌矿床构造演化及矿化富集规律初探[J]. 地球科学, 1989, 14(5): 477-486.
- [11] 赵兴元. 云南金顶铅锌矿床成因研究[J]. 地球科学, 1989, 14(5): 523-530.
- [12] 胡明安. 试论岩溶型铅锌矿床的成矿作用及其特点-以云南兰坪金顶矿床为例[J]. 地球科学, 1989, 14(5): 531-538.
- [13] 尹汉辉, 范蔚若, 林舸. 云南兰坪-思茅地洼盆地演化的深部因素及幔-壳复合成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 1990, 4(2): 113-124.
- [14] 张乾. 云南金顶超大型铅锌矿床的铅同位素组成及铅来源探讨[J]. 地质与勘探, 1993, 29(5): 21-28.
- [15] 修群业, 王安建, 高兰, 刘俊来, 于春林, 曹殿华, 范世家, 翟云峰, 等. 金顶超大型矿床容矿围岩时代探讨及地质意义[J]. 地质调查与研究, 2006, 29(4): 294-302.
- [16] 李小明, 谭凯旋, 龚文君, 龚革联, 等. 利用磷灰石裂变径迹法研究金顶铅锌矿成矿时代[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(3): 282-286.
- [17] 高炳学, 薛春纪, 弛国祥, 李超, 屈文俊, 杜安道, 李足晓, 顾浩, 等. 云南金顶超大型铅锌矿床沥青 Re-Os 法测年及地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1561-1567.
- [18] 王安建, 曹殿华, 高兰, 王高尚, 管焯, 修群业, 刘俊来, 等. 论云南兰坪金顶超大型铅锌矿床的成因[J]. 地质学报, 2009, 83(1): 43-54.
- [19] 蒋少涌, 杨竞红, 赵葵东, 于际民, 等. 金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2000, 36(6): 669-677.
- [20] 靳新娣, 李文君, 吴华英, 张连昌, 杜安道, 等. Re-Os 同位素定年方法进展及 ICP-MS 精确定年测试关键技术[J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1617-1624.
- [21] Luck J M, Allegre C J. The study of molybdenites through the ^{187}Re - ^{187}Os chronometer [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, 61(2): 291-296.
- [22] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Du A, Sun Y. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China [J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 1997, 92(7-8): 827-835.
- [23] 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚利, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊, 等. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. 地质学报, 1994, 68(4): 339-347.
- [24] 侯增谦, 曲晓明, 王淑贤, 高永丰, 杜安道, 黄卫, 等. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄: 成矿作用时限与动力学背景应用[J]. 中国科学 d 辑, 2003, 33(7): 609-618.
- [25] 王光辉, 宋玉财, 侯增谦, 王晓虎, 杨竹森, 杨天南, 刘燕学, 江迎飞, 潘小菲, 张洪瑞, 刘英超, 李政, 薛传东, 等. 兰坪盆地连城脉状铜矿床辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 413-424.
- [26] Stein H J, Morgan J W, Schersten A. Re-Os dating of low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides: The Harnas gold deposit, southwest Sweden, records continental-scale tectonic events [J]. *Economic Geology and Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 2000, 95(8): 1657-1671.
- [27] 刘玉龙, 杨刚, 陈江峰, 杜安道, 谢智, 等. 白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床黄铁矿 Re-Os 定年[J]. 科学通报, 2005, 50(2): 172-175.
- [28] Zhang L, Xiao W, Qin K, Qu W, Du A. Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tianshan, NW China, and its geological significance [J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 39(8): 960-969.
- [29] 丰成友, 张德全, 屈文俊, 杜安道, 李大新, 余宏全, 等. 青海格尔木骆驼沟喷流沉积型钨(金)矿床的黄铁矿 Re-Os 定年[J]. 地质学报, 2006, 80(4): 571-576.
- [30] 罗军烈, 杨荆舟. 滇西特提斯的演化及主要金属矿床成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 149-239.
- [31] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 王登红, 杨伟光, 杨清标, 等. 滇西兰坪盆地构造体制和成矿背景分析[J]. 矿床地质, 2000, 21(1): 36-44.
- [32] 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 孙德忠, 刘敦一, 等. Carius 管溶样-负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄[J]. 岩矿测试, 2001, 20(4): 247-252.
- [33] 杜安道, 屈文俊, 李超, 杨刚, 等. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. 岩矿测试, 2009, 28(3): 288-304.
- [34] 漆亮, 周美夫, 严再飞, 皮道会, 胡静, 等. 改进的卡洛管溶样等离子体质谱法测定地质样品中低含量铂族元素及铼的含量[J]. 地球化学, 2006, 35(6): 667-674.
- [35] Qi L, Zhou M F, Gao J F, Zhao Z. An improved Carius tube technique for determination of low concentrations of Re and Os in pyrites [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2010, 25: 585-589.
- [36] 刘玉龙, 杨刚, 陈江峰, 杜安道, 谢智, 等. 白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床黄铁矿 Re-Os 定年[J]. 科学通报, 2005, 50(2): 172-175.
- [37] 梁婷, 王登红, 屈文俊, 蔡明海, 韦可利, 等. 广西铜坑锡多金属矿黄铁矿的 Re-Os 同位素组成及成矿物质来源示踪[J]. 地球科学与环境学

- 报, 2009, 31(3): 230-235.
- [38] 李超, 屈文俊, 王登红, 陈郑辉, 杜安道, 等. 富有机质地质样品Re-Os同位素体系研究进展[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(4): 421-430.
- [39] 覃功炯, 朱上庆. 金顶铅锌矿床成因模式及找矿预测[J]. 云南地质, 1991, 10(2): 145-190.
- [40] 王国芝, 胡瑞忠, 王成善, 曾允孚, 等. 云南金顶超大型铅锌矿床的成矿地质背景[J]. 矿物学报, 2001, 21(4): 571-577.
- [41] 陶晓风, 朱利东, 刘登忠, 王国芝, 李佑国, 等. 滇西兰坪盆地的形成及演化[J]. 成都理工学院学报, 2002, 29(5): 521-525.
- [42] 王晓虎, 侯增谦, 宋玉财, 杨天南, 张洪瑞, 等. 兰坪盆地白秧坪铅锌铜银多金属矿床:成矿年代和区域成矿作用[J]. 岩石学报, 2010, 27(9): 2625-2634.
- [43] Hou Z Q, Cook N J. Metallogensis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue [J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 36: 2-24.
- [44] 何明勤, 刘家军, 李朝阳, 李志明, 刘玉平, 杨爱平, 桑海清, 等. 云南兰坪白秧坪铜钴多金属矿集区矿石中石英的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄[J]. 地质科学, 2006, 41(4): 688-693.

Re-Os Isotopic Dating of Pyrite from Jinding Zn-Pb Ore Deposit and Its Geological Significance

TANG Yong-yong^{1,2}, BI Xian-wu¹, WU Li-yan¹, WANG Lei³, ZOU Zhi-chao^{1,2}, HE Li-ping⁴

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Chinese University of Geosciences, Wuhan, 430074, China;

4. Yunnan Jinding Zinc Industry Limited Company, Lanping County 671401, China)

Abstract: In this study, Re-Os isotopes of pyrite from the Jinding Pb-Zn deposit were carried out by ICP-MS method. According to occurrences of pyrite, they were identified as sedimentary diagenetic pyrite and hydrothermal pyrite, and showed large variation in contents of Re (0.4069×10^{-9} - 375.2620×10^{-9}) and Os (0.0008×10^{-9} - 0.4131×10^{-9}), with low contents of Re and Os in some samples, they display two isochron ages of 114 ± 13 Ma and 65 ± 10 Ma, respectively. Combined with other geological evidences, it is concluded that the two ages could not represent the epoch of the main mineralization which are assessed at 37-28 Ma based on other geological constraints. However, 114 Ma is likely related to a mineralization event during diagenesis, while 65 Ma might indicate the beginning of hydrothermal mineralization of Jinding Zn-Pb deposit.

Key words: Re-Os isotope; pyrite; mineralization age; Jinding Zn-Pb deposit; Yunnan Province