

# 黔西南灰家堡卡林型金矿田硫铅同位素组成及成矿物质来源研究

王泽鹏<sup>1,2</sup>, 夏勇<sup>1</sup>, 宋谢炎<sup>1</sup>, 闫宝文<sup>1,2</sup>, 谭亲平<sup>1,2</sup>

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. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**为探讨黔西南灰家堡金矿田中成矿物质来源, 作者对其部分典型矿床中硫化物进行了系统的硫、铅同位素分析。结果显示, 雄黄  $\delta^{34}\text{S}$  值为 0.81‰~5.20‰, 均值为 1.96‰, 两件辉锑矿  $\delta^{34}\text{S}$  值分别为 -0.47‰和 -4.88‰。雄黄和辉锑矿  $\delta^{34}\text{S}$  值主要在 0‰附近, 硫同位素直方图显示明显的塔式效应, 指示成矿流体中硫可能主要来源于深部。雄黄、黄铁矿铅同位素组成变化均较大, 雄黄铅同位素组成的变化明显大于黄铁矿且更接近于区域地层及峨眉山玄武岩。矿石铅  $\mu$  值为 9.33~9.61, 主要小于 9.58, 推测为循环大气降水淋滤围岩地层岩石中高放射性成因的铅加入原始成矿流体, 从而导致晚期雄黄显示出部分壳源铅特征。矿田内雄黄、黄铁矿的铅同位素可能为壳幔混合铅。

**关键词:**硫同位素; 铅同位素; 成矿物质来源; 灰家堡金矿田; 黔西南

**中图分类号:** P618.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2013)06-0746-07

## Sulfur and Lead Isotopic Composition of the Huijiabao Carlin-type Gold Field and the Ore-Forming Material Sources in Southwest of Guizhou

WANG Ze-peng<sup>1,2</sup>, XIA Yong<sup>1</sup>, SONG Xie-yan<sup>1</sup>, YAN Bao-wen<sup>1,2</sup>, TAN Qin-ping<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** To discuss the evolution of potential metal sources, sulfur and lead isotopic compositions of sulfides in typical gold deposits from the Huijiabao Carlin-type gold field have been systematically analyzed. The results showed that the  $\delta^{34}\text{S}$  values of Realgars range from 0.81‰ to 5.20‰ with a mean of 1.96‰, and the  $\delta^{34}\text{S}$  values of two Stibnites are -0.47‰ and -4.88‰. The  $\delta^{34}\text{S}$  values of Realgars and Stibnites present a tower distribution with most values near 0‰, indicating deep zone originations. Lead isotopic compositions of realgars and pyrites range widely, the variation of lead isotopic composition of realgars is higher than that of pyrites, and lead isotope compositions of realgars are very close to those of the regional strata and the Emeishan basalts. The  $\mu$  values of the ores are from 9.33 to 9.61, with majorities are below 9.58. Lead in the late stage Realgar exhibits a crust-derived characteristics may be the result of radiogenic lead in wallrocks being leached into the primary ore-forming fluid by circulated meteoric water. The lead isotopes in the studied realgar and pyrite may indicate mixing of the crust and the mantle leads.

**Key words:** sulfur isotope; lead isotope; ore-forming material sources; huijiabao Carlin-type gold field; southwestern Guizhou

收稿日期: 2012-08-09 收到, 10-25 改回

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2006BAB01A13); 贵州省地质矿产勘查开发局地质科研项目[黔地矿科(2009)11号]; 矿床地球化学国家重点实验室自主研究基金资助项目

第一作者简介: 王泽鹏(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向: 地球化学. E-mail: wangzepengyu@126.com.

通讯作者简介: 夏勇(1960-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 矿床学. E-mail: xiayong@vip.gyig.ac.cn.

卡林型金矿主要分布在美国和中国,是典型的中低温热液型金矿床。前人对卡林型金矿做了大量工作,但有关成矿年代学和成矿物质来源等分歧较大。目前,成矿物质来源主要有以下几种观点:①赋矿地层就是矿源层<sup>[1~3]</sup>;②区域峨眉山玄武岩是矿源层<sup>[4,5]</sup>;③矿质来源于深部<sup>[6~10]</sup>,伴随深部流体将矿质带入上部地壳。我国卡林型金矿主要分布于扬子地台周边地区,构成滇-黔-桂和陕-甘-川两个重要金矿化集中区,其大地构造位置均处于扬子地台边缘不同时代的地槽褶皱系或两者过渡部位,金矿化主要发生于 140~75Ma,相当于燕山晚期<sup>[11]</sup>,受后期褶皱造山构造控制。黔西南卡林型金矿属于滇黔桂矿集区的重要组成部分,其物质来源与滇黔桂矿集区卡林型金矿相似<sup>[3~5,7,8,12~20]</sup>。

灰家堡金矿田是黔西南卡林型金矿的重要组成部分,位于黔西南灰家堡背斜上并沿背斜轴向分

布,自西往东产出有紫木凼、太平洞、水银洞、簸箕田等金矿床,展望灰家堡矿集区最终有望获得 300 t 以上金资源量<sup>[12]</sup>。由于开发进度不同,研究主要集中在水银洞金矿床<sup>[13~17]</sup>。已有的研究认为该区金矿床成矿物质来源围岩<sup>[18]</sup>、壳幔混合<sup>[19]</sup>、深部地幔<sup>[13,20]</sup>,认识不统一。本文通过对矿田内几个典型金矿床中硫化物作硫、铅同位素分析,探讨矿田内成矿物质来源,以期同类金矿的成因认识和进一步成矿预测及勘查开发提供依据。

### 1 区域地质及矿床地质

灰家堡卡林型金矿田位于扬子地台西南缘与华南褶皱系右江褶皱带西延部分结合部位,黔西南灰家堡背斜上。灰家堡背斜东起贞丰县者相,西至兴仁县大山,长 20 km,宽约 6 km,背斜轴向总体呈近东西(图 1)。

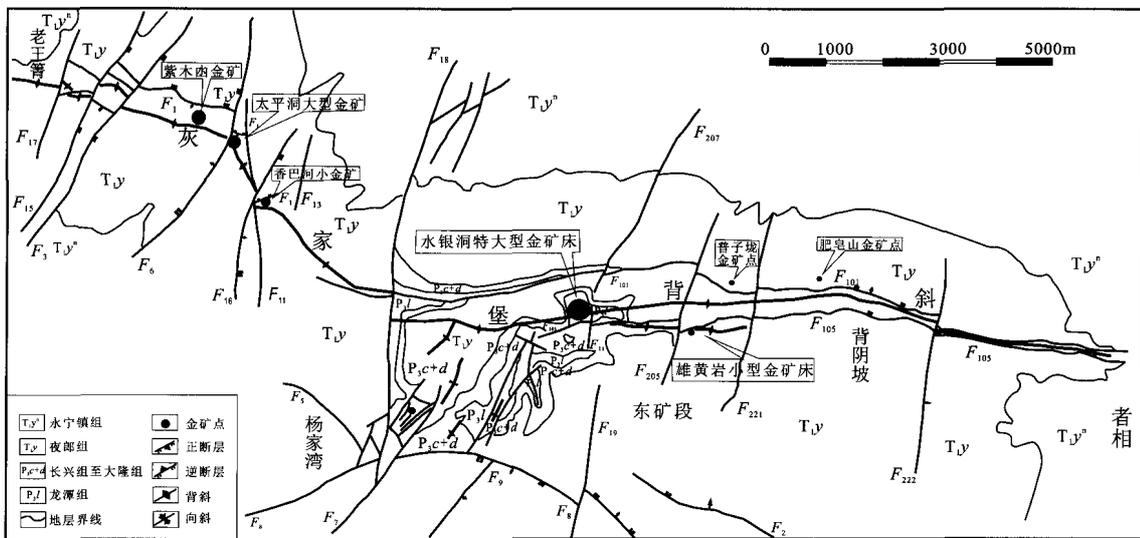


图 1 黔西南灰家堡金矿田地质略图(据文献[13]修编)

Fig. 1 Geologic sketch map of the Huijiabao Carlin-type gold field in southwestern Guizhou (modified from ref. [13])

区域出露地层主要有泥盆系至三叠系,以三叠系分布最广,二叠系次之,石炭系、泥盆系仅见于少数背斜核部。出露地层总厚万余米,显示为一套浅海-陆棚台盆交替沉积的特点。其中三叠系大致可分为扬子地台碳酸盐岩沉积和右江盆地碎屑岩沉积。泥盆系至二叠系地层发育显示了浅海陆棚台、盆相交替的沉积特色。区域构造轮廓定型于燕山期,其构造变形组合形式复杂多样,表现为背斜紧闭,向斜宽缓的特征。

灰家堡金矿赋存于二叠系和三叠系中,二叠系龙潭组及构造蚀变体(Sbt)中矿体一般顺层产出,呈层状、似层状产出,产状与岩层产状一致,主要赋存在不纯碳酸盐岩、粉砂岩中;二叠系长兴组、大隆组

及三叠系夜郎组中矿体以断控型为主,断控型矿体产于背斜近轴部缓倾斜逆冲断层中,严格受断层破碎带的控制,矿体沿断层破碎带分布。矿石构造主要是块状、浸染状、角砾状、脉状等。

矿田内各个矿床的矿物组合、蚀变特征等相似,矿石矿物有含砷黄铁矿、毒砂、雄(雌)黄、辉铋矿、辰砂(偶见)等,其中含砷黄铁矿、毒砂是金矿床中重要的载金矿物。含金的热液黄铁矿粒度细小,粒径一般仅为几个至几十微米,一些比较细粒的热液黄铁矿被后期沉积黄铁矿包裹,形成热液黄铁矿内核和沉积黄铁矿外层(可能受后期热液活动影响)的双层结构(图2A、B),而另外一些颗粒相对较粗的黄铁矿,它们由早期形成的沉积黄铁矿内核、

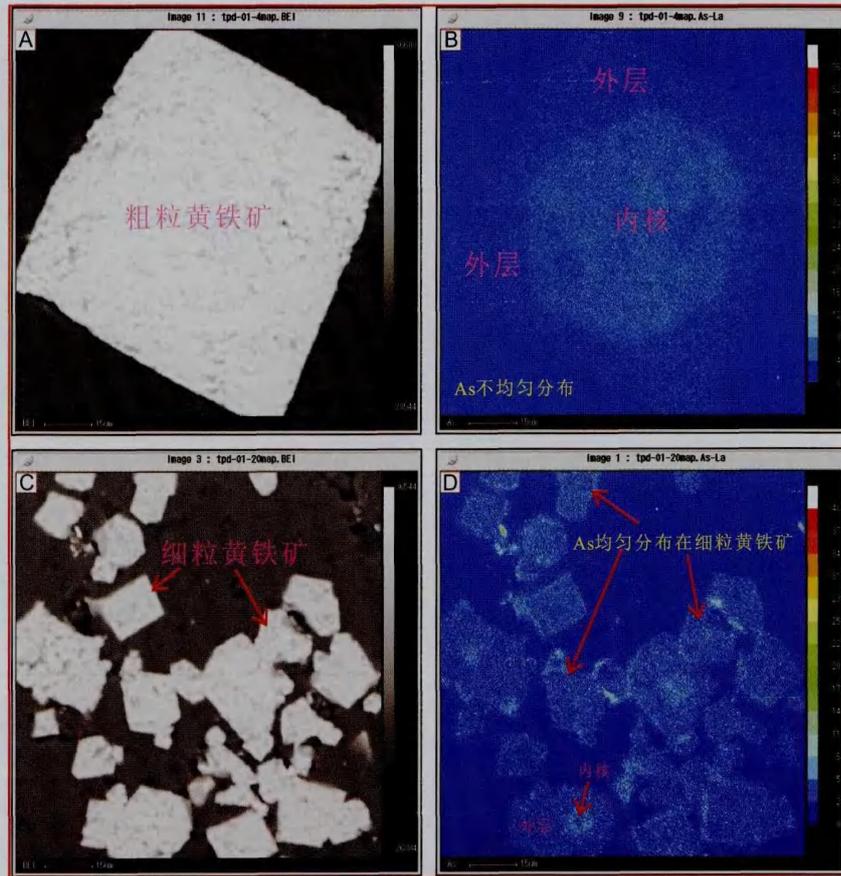


图2 卡林型金矿床中载金黄铁矿电子探针 AsLa 组成的面扫描图

Fig. 2 Section images of AsLa compositions of gold-bearing pyrites in the Carlin-type gold deposit scanned by electron microprobe spectrum

热液成因的黄铁矿环带及后期的沉积黄铁矿外层组成,形成典型的环带结构,其环带的宽度更小,而金则主要存在于这些热液成因的黄铁矿环带中<sup>[13]</sup>;毒砂常呈自形针状,粒度较小且在矿床中含量少;雄黄常发育在断裂破碎带和层间破碎带中,呈网脉状、脉状产出,根据其产出特征可分为早、晚两期雄黄,早期主要呈脉状产出(图 3A),晚期雄黄一般与方解石等矿物共生(图 3B),电子探针分析表明,早期或晚期的雄黄也是金矿床中次要的载金矿物<sup>[20]</sup>;辉锑矿也是金矿床中重要的硫化物之一,也分为早期和晚期,早期辉锑矿常呈针状、放射状产出(图 3C),晚期辉锑矿常呈脉状、网脉状与雄(雌)黄等共生(图 3D)。脉石矿物有石英、白云石、方解石、萤石、粘土矿物等。矿床中主要的热液蚀变有去碳酸盐化、硅化、硫化物化、粘土化等。

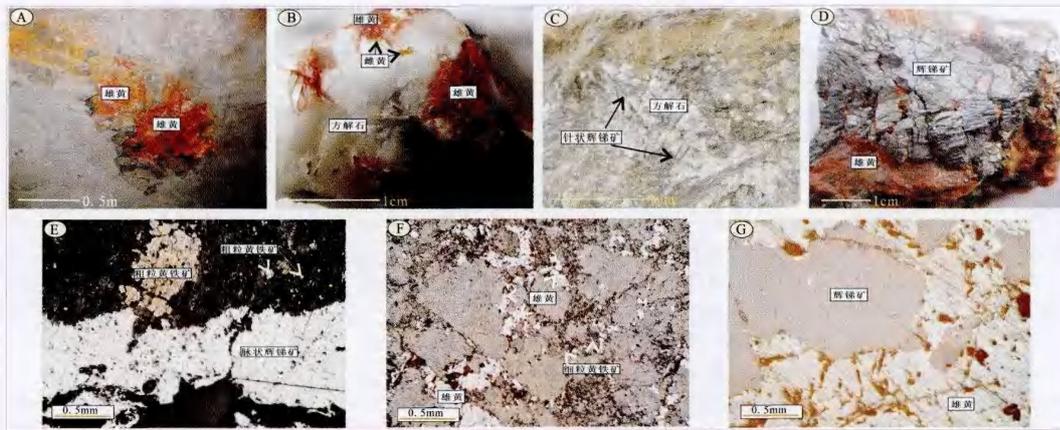
根据矿脉穿插关系、矿物共生组合及矿石组构等特点,可将矿田内金的成矿期划分为早期和晚期阶段,早期矿物组合为石英-黄铁矿-毒砂等,晚期主要为石英-辉锑矿-雄黄(雌黄)-方解石-萤石阶段等

矿物组合。

## 2 样品采集和分析方法

本次用于硫同位素和铅同位素分析的硫化物样品,均采自黔西南灰家堡金矿田内几个典型的矿床。雄黄采自紫木函金矿床的近平行于灰家堡背斜轴的  $F_1$  断控制型矿体、太平洞隐伏的层控矿体的层间破碎带、水银洞隐伏的层控矿体的层间破碎带、簸箕田层控矿体的层间破碎带中,均为晚期产物,并与方解石、雌黄共生。辉锑矿采自水银洞金矿的构造蚀变体,为早期辉锑矿,呈针状产出。沉积黄铁矿来自水银洞和太平洞金矿区的二叠系煤系地层中,颗粒粗大,自形程度较高,与热液成因的含砷黄铁矿有明显区别。

硫同位素测试在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成。将含有雄黄或辉锑矿的矿石样品粉碎至 40~60 目,双目镜下挑选纯净的雄黄或辉锑矿单矿物,使其纯度达到 99% 以上,研磨至 200 目以下备用。沉积黄铁矿的挑选、



A-金矿床中早期脉状雄黄;B-晚期雄(雌)黄与方解石共生;C-针状辉锑矿;  
D-雄黄呈脉状充填于辉锑矿中;E-矿石中的辉锑矿脉;F-矿石中的雄黄脉;G-辉锑矿和雄黄共生

图3 黔西南灰家堡金矿田岩相学特征

Fig. 3 Petrographic characters in the Huijiabao gold deposit field, southwest of Guizhou

分离过程与雄黄、辉锑矿相同。雄黄、辉锑矿、黄铁矿的硫同位素分析采用  $Cu_2O$  作为氧化剂制备  $SO_2$  并将其通入 MAT-252 型质谱仪进行测定。硫同位素相对标准选用 V-CDT, 相对误差小于 0.2‰。铅同位素测试在核工业北京地质研究院同位素室进行, 全岩样品用  $HNO_3$  和  $HF$  溶解后过阴离子交换树脂提取 Pb, 蒸干; 磷酸提取样品, 单铯带硅胶做发射剂质谱测试。仪器为热离子质谱计 MAT-261, 同位素分馏优于 1‰, NBS981 度为万分之一。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 硫同位素组成

卡林型金矿单矿物硫同位素研究, 前人主要基于对载金矿物黄铁矿的测定<sup>[20]</sup>。但卡林型金矿载金黄铁矿粒度细小且一些黄铁矿具有环带结构, 热液期黄铁矿主要沿沉积期黄铁矿表层生长<sup>[19]</sup>, 因此, 所测的黄铁矿硫同位素组成只能代表沉积期黄铁矿与热液黄铁矿混合结果。本文选取雄黄、辉锑矿为测试对象, 同时挑选矿区内龙潭组地层中典型的沉积黄铁矿硫同位素作为对比。测试结果列于表 1, 并据此绘制硫同位素直方图(图 4)。

研究表明, 热液硫化物的硫同位素组成, 不仅取决于源区物质的  $\delta^{34}S$  值, 而且与成矿流体演化的物理化学条件有关<sup>[21]</sup>。由于本次研究区基本无硫酸盐、磁黄铁矿、磁铁矿等矿物, 故热液硫化物的硫同位素组成能近似反映成矿流体的硫同位素组成。因此, 所测得的雄黄、辉锑矿的硫同位素组成, 能够有效地指示成矿流体中硫的信息。

灰家堡卡林型金矿田中, 前人得到的载金黄铁矿的  $\delta^{34}S$  值为  $-8.41\text{‰} \sim 27.17\text{‰}$ <sup>[14,19]</sup>, 变化范

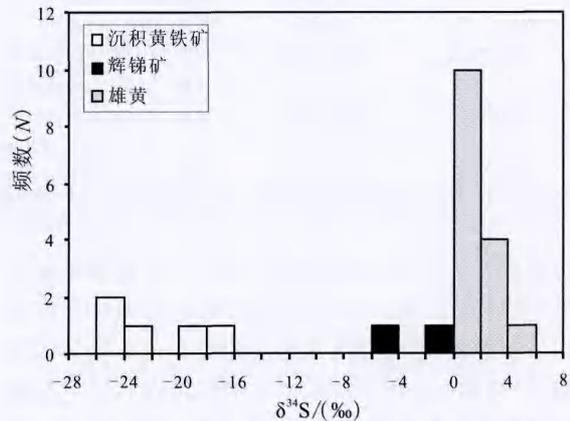


图4 黔西南灰家堡卡林型金矿硫同位素组成直方图

Fig. 4 Distributions of the sulfur isotopic compositions from Carlin-type gold deposits in the southwest of Guizhou

围较大, 可能与黄铁矿的多期叠加有关。显微观察和电子探针分析显示, 含砷热液黄铁矿颗粒细小且具有相对均匀的 As 含量变化(图 2C、D), 而一些较大的黄铁矿颗粒, 其 As 含量呈现内核高而外层低的特征(图 2B、D), 热液成因的黄铁矿中 As 与 Au 含量具有同向变化的规律<sup>[13,17]</sup>, 显示热液中 Au 和 As 共存迁移及黄铁矿的多期叠加过程, 由于沉积黄铁矿的存在且所占比例较热液黄铁矿大, 致分析结果仍表现为沉积地层硫特征, 显示较大变化范围。

雄黄  $\delta^{34}S$  值为  $0.81\text{‰} \sim 5.20\text{‰}$ , 极差  $4.39\text{‰}$ , 均值  $1.96\text{‰}$ , 数据变化范围较窄, 均一化程度较高, 显示幔源硫同位素特征, 这与美国卡林型金矿床中雄黄及黄铁矿热液环带中原位分析的硫同位素组成一致<sup>[10]</sup>; 两个辉锑矿的  $\delta^{34}S$  值分别为  $-0.47\text{‰}$  和  $-4.88\text{‰}$ , 低于雄黄, 显示沉积硫特点。野外及室

表 1 卡林型金矿硫化物(雄黄和辉锑矿)硫同位素组成  
Table 1 sulfur isotopic compositions of sulfides from the Carlin-type gold deposits

样品编号	矿床名称	产状	矿物名称	$\delta^{34}\text{S}/(\%)$
ZMD-01	紫木凼	脉状,雄黄+方解石+石英	雄黄	1.18
ZMD-02	紫木凼	块状、角砾状,雄(雌)黄+方解石	雄黄	1.57
ZMD-02-02	紫木凼	块状、角砾状,雄(雌)黄+方解石	雄黄	1.81
ZMD-03	紫木凼	脉状,雄黄+方解石	雄黄	1.55
ZMD-13	紫木凼	脉状,雄黄+方解石	雄黄	1.09
ZMD-26	紫木凼	块状、角砾状,雄(雌)黄+方解石	雄黄	1.81
ZMD-34	紫木凼	脉状,雄(雌)黄+方解石	雄黄	2.25
TPD-01	太平洞	网状状,雄(雌)黄+方解石	雄黄	1.14
TPD-02	太平洞	脉状,雄(雌)黄+方解石	雄黄	1.33
TPD-30	太平洞	脉状,雄黄+方解石	雄黄	0.81
TPD-73	太平洞	脉状,雄黄+方解石	雄黄	3.03
TPD-80	太平洞	脉状,雄黄+方解石	雄黄	1.25
ZK21524-3	水银洞	块状矿石中针状辉锑矿	辉锑矿	-0.47
SYD-21	水银洞	块状矿石中针状辉锑矿	辉锑矿	-4.88
SYD-XH	水银洞	脉状,雄(雌)黄+方解石	雄黄	2.64
ZK27916	水银洞	脉状,雄黄+方解石	雄黄	2.72
ZK15117-3	水银洞	脉状,雄黄+方解石	雄黄	5.2
SYD-W-3	龙潭组地层	粗粒、半自形结构黄铁矿	黄铁矿	-25.73
SYD-W-2	龙潭组地层	粗粒、半自形结构黄铁矿	黄铁矿	-23.67
SYD-W-5	龙潭组地层	粗粒、半自形结构黄铁矿	黄铁矿	-24.92
TPD-P21	龙潭组地层	粗粒、自形-半自形结构黄铁矿	黄铁矿	-17.35
TPD-P2L	龙潭组地层	粗粒、自形-半自形结构黄铁矿	黄铁矿	-18.31

测试者:中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室安宁

内显微观察可知,本次硫同位素分析的辉锑矿形成早于雄黄(图 3D、G),但辉锑矿却显示相对低的硫同位素组成,可能受局部地层硫源和成矿流体的影响,卡林型金矿床中辉锑矿仅局部地存在于一些断裂体系及不整合面中,显示辉锑矿形成于相对开放的环境。从硫同位素直方图(图 4)可见,雄黄、辉锑矿硫同位素组成主要集中在 0‰ 附近,具有明显的塔式效应,指示成矿过程中的硫可能主要来源于深部。对比围岩地层中黄铁矿的硫同位素组成发现,其  $\delta^{34}\text{S}$  值变化为  $-25.73\%$  ~  $-17.35\%$ , 为较大的负值,显示典型的沉积硫特征,与成矿相关的硫化物的硫同位素组成显著不同。

### 3.2 铅同位素组成

表 2 显示,灰家堡金矿田雄黄的铅同位素组成为  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.064 \sim 19.077$ , 均值 18.361;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.585 \sim 15.702$ ; 均值 15.56;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.219 \sim 39.201$ , 均值 38.452。前人所得水银洞金矿黄铁矿铅同位素数据<sup>[14]</sup>, 为  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.942 \sim 18.452$ , 均值 18.265,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.532 \sim 15.642$ , 均值 15.564;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.158 \sim 38.729$ , 均值 38.426。对比发现,雄黄的铅同位素组成变化明显大于黄铁矿的,说明其铅同位素组成和成因可能有一些差异。

在矿床成因研究中,矿石铅同位素组成能有效

地探索成矿物质的来源<sup>[22]</sup>,对比金矿中矿石矿物和区域地层及岩石的铅同位素组成,一定程度上能反映铅的可能来源。区域上栖霞组-茅口组的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.189 \sim 18.759$ , 均值 18.474;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.609 \sim 16.522$ , 均值 16.066;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.493 \sim 38.542$ , 均值 38.518; 峨眉山玄武岩  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.175 \sim 18.855$ , 均值 18.568;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.528 \sim 15.662$ , 均值 15.587;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.380 \sim 39.928$ , 均值 39.038<sup>[23]</sup>。与上述雄黄、黄铁矿铅同位素组成相比,区域上栖霞组-茅口组、峨眉山玄武岩的铅同位素组成变化明显大于金矿田内矿石矿物雄黄、黄铁矿的铅同位素组成,且雄黄的铅同位素组成更接近区域地层及峨眉山玄武岩。

在  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解中(图 5),灰家堡矿田矿石铅表现出一定的线性相关性,这种线性关系并非等时线,也不是二次等时线,而是一种混合线<sup>[24]</sup>,这种近似线性关系可能说明矿床中不同硫化物具有相似的铅源<sup>[25]</sup>。且铅同位素投点主要分布在上地幔铅和上地壳铅之间,不同矿物的投点在图中分布区域不同,黄铁矿铅同位素组成主要分布于造山带铅与上地幔铅之间的靠近造山带铅线的一侧,而雄黄铅同位素组成分布于上地壳铅与造山带铅之间和上地壳铅附近。因此,灰家堡金矿田的铅同位素组成

表 2 黔西南灰家堡金矿田中硫化物的铅同位素组成及参数

Table 2 The lead isotopic compositions and parameters of sulfides from the Huijiabao

Carlin-type gold field in southwestern Guizhou

矿床	样号	名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\mu$
紫木函	ZMD-01	雄黄	18.973	15.670	39.054	9.55
	ZMD-02	雄黄	18.967	15.669	39.051	9.55
	ZMD-02-02	雄黄	18.961	15.662	39.032	9.53
	ZMD-03	雄黄	18.963	15.664	39.038	9.54
	ZMD-13	雄黄	18.300	15.585	38.415	9.45
	ZMD-26	雄黄	18.534	15.629	38.666	9.51
	ZMD-34	雄黄	18.064	15.596	38.219	9.50
太平洞	TPD-01	雄黄	18.501	15.646	38.720	9.54
	TPD-02	雄黄	18.606	15.628	38.670	9.50
	TPD-30	雄黄	18.883	15.657	38.966	9.53
	TPD-73	雄黄	18.809	15.660	38.913	9.54
	TPD-80	雄黄	18.943	15.661	39.004	9.53
簸箕田	ZK27403-3	雄黄	18.951	15.685	39.073	9.58
	ZK27403-4	雄黄	18.930	15.700	39.060	9.61
	ZK27403-5	雄黄	19.077	15.702	39.201	9.60
	ZK27403-6	雄黄	19.034	15.667	39.095	9.54
	ZK27403-7	雄黄	19.007	15.668	39.055	9.54
	ZK27403-1	雄黄	18.974	15.666	39.019	9.54
水银洞	SYD	雄黄	18.476	15.667	38.644	9.59
	Ile	黄铁矿	18.361	15.560	38.452	9.39
	Ilf	黄铁矿	18.383	15.642	38.729	9.55
	IIIa	黄铁矿	18.304	15.540	38.501	9.36
	IIIb(底板)	黄铁矿	18.145	15.551	38.382	9.40
	IIIb(下矿层)	黄铁矿	17.942	15.560	38.158	9.44
	IIIb(上矿层)	黄铁矿	18.452	15.532	38.332	9.33

注:水银洞金矿黄铁矿数据来自文献[14]; $\mu$ =样品的 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$

可能为壳幔混合的岩浆作用铅、造山带铅、上部地壳源铅的混合。事实上,研究区位于扬子与华南两大构造板块结合的活动部位,印支晚期至燕山早期的构造运动结束了该区盆地演化历史,地层褶皱、断裂,深大断裂和岩浆活动发展<sup>[14]</sup>,一些研究认为黔西南地区深部存在隐伏的花岗岩体,其与该区大面积集中分布的卡林型金矿存在密切的成因联系<sup>[26]</sup>,该区深部物质可能参与了金的成矿作用,这与铅同位素研究结果吻合。

计算表明,灰家堡金矿田中矿石铅的 $\mu$ 值为9.33~9.61,绝大多数小于9.58,说明成矿流体中的铅主要为具有低放射成因深源铅,少量雄黄(3个)样的 $\mu$ 值超过上限9.58,显示部分高放射性成因的铅。岩相学观察表明,在卡林型金矿床中热液含砷黄铁矿沉淀相对早于雄黄(图3F),且氢氧同位素研究也显示,卡林型金矿的成矿过程中存在大气循环水参与<sup>[2,11]</sup>。原始成矿流体运移中,深循环大气降水不断淋滤围岩地层岩石中高放射性成因的铅逐渐加入到原始成矿流体,此过程导致地壳浅部高放射性成因铅在成矿流体中逐渐富集,伴随着黄铁矿、雄黄等硫化物的沉淀,成矿晚期阶段的雄黄

中的富集高放射性成因铅,造成雄黄铅同位素组成明显偏高,显示部分壳源铅特征。

## 4 结 论

(1)灰家堡金矿田内雄黄 $\delta^{34}\text{S}$ 值为0.81‰~5.20‰,极差为4.39‰,均值为1.96‰;两个辉锑矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为-0.47‰和-4.88‰,而沉积黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-25.73‰~-17.35‰。雄黄和辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 主要在0‰附近,硫同位素直方图中塔式效应明显,指示成矿相关硫化物的硫可能主要来源于深部。

(2)雄黄、黄铁矿铅同位素组成变化均较大,雄黄铅同位素组成的变化明显大于黄铁矿且更接近于区域地层及峨眉山玄武岩。在Zartman铅构造模式图上,雄黄、黄铁矿的铅同位素投点主要分布在上地幔铅和上地壳铅之间,反映铅可能为壳幔混合的岩浆作用铅、造山带铅、上部地壳源铅的混合。计算结果表明,成矿流体中铅主要为具有低放射成因的深源铅,部分为具有高放射性成因的壳源铅。原始成矿流体运移中,深循环大气降水不断淋滤围

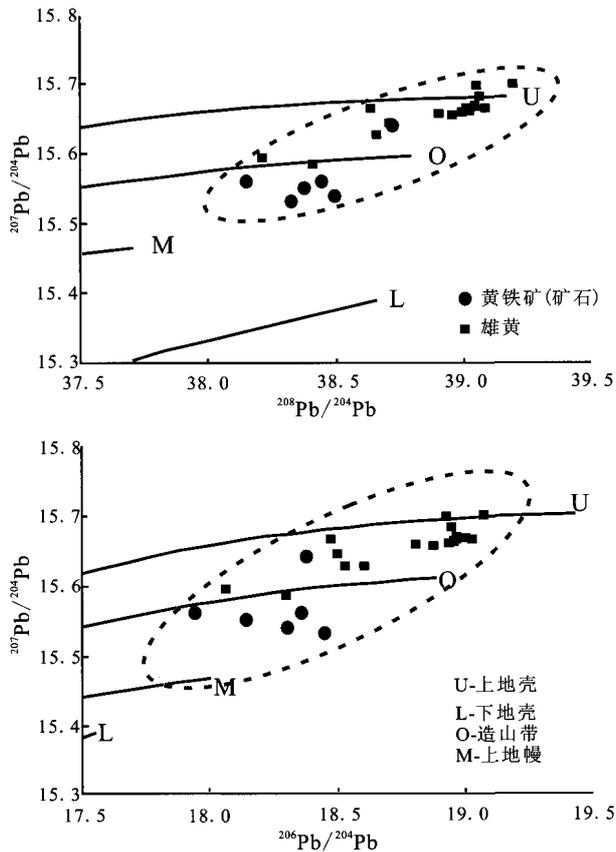


图5 黔西南灰家堡金矿田硫化物铅同位素组成(底图据文献[25])

Fig. 5 Lead isotopic compositions of sulfides from the Huijiabao gold field in southwestern Guizhou (modified from ref. [25])

岩地层岩石中高放射性成因的铅加入到原始成矿流体,导致地壳浅部高放射性成因铅在成矿流体中逐渐富集。

**致谢:**野外工作得到贵州新恒基矿业公司和贵州金兴黄金矿业有限责任公司宋石辉、何友国工程师,汪小勇、钱应强、崔云祥等同志的大力帮助;分析测试得到中国科学院地球化学研究所安宁老师、核工业北京地质研究院铅同位素分析室各位老师的指导和帮助,在此一并致谢。

#### 参考文献 (References):

[1] 刘东生. 中国卡林型(微细浸染型)金矿床[M]. 南京:南京大学出版社,1994.  
 [2] Hofstra A H, Cline J S, Characteristics and models of Carlin-type gold deposits[J]. Hagemann S G, Brown P E, eds., Gold in 2000; Reviews in Economic Geology, 2000, 13: 163-220.  
 [3] 陈懋弘. 基于成矿构造和成矿流体耦合条件下的贵州锦丰(烂泥沟)金矿成矿模式[D]. 北京:中国地质科学院,2007.  
 [4] 聂爱国,张竹如. 黔西南水银洞金矿床成矿地质条件研究[J].

黄金,2006,27(6):5-9.  
 [5] 聂爱国. 黔西南卡林型金矿的成矿机制及成矿预测[D]. 昆明:昆明理工大学,2007.  
 [6] 王登红. 卡林型金矿找矿新进展及其意义[J]. 地质地球化学, 2000,28(1):92-96.  
 [7] 朱赖民,金景福,何明友,胡瑞忠. 初论黔西南微细浸染型金矿床深源流体成矿[J]. 矿物岩石地球化学通报,1997,16(3): 173-177.  
 [8] 朱赖民,刘显凡,金景福,何明友. 滇-黔-桂微细浸染型金矿床时空分布与成矿流体来源研究[J]. 地质科学,1998,33(4): 463-474.  
 [9] Kesler S E, John F, Ye Z J, Alt J C, Core D P, Zohar P, Borhauer J, Chryssoulis S L. Evaluation of the role of sulfidation in deposition of gold, screamer section of the betze-post carlin-type deposit, Nevada [J]. Economic Geology, 2003, 98: 1137-1157.  
 [10] Kesler S E, Riciputi L C, Ye Z J. Evidence for a magmatic origin for Carlin-type gold deposits: Isotopic composition of sulfur in the Betze-Post-Screamer Deposit, Nevada, USA [J]. Mineralium Deposita, 2005, 40: 127-136.  
 [11] Hu R Z, Su W C, Bi X W, Tu G C, Hofstra A H. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China [J]. Mineralium Deposita, 2002, 37: 378-392.  
 [12] 刘建中,陈景河,邓一明,付芝康,陈发恩,陈明,游彬. 贵州水银洞超大型金矿勘查实践及灰家堡矿集区勘查新进展[J]. 地质调查与研究,2009,32(2):138-143.  
 [13] 夏勇. 贵州贞丰县水银洞金矿床成矿特征和金的超常富集机制研究[D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所,2005.  
 [14] 夏勇,张瑜,苏文超,陶琰,张兴春,刘建中,邓一明. 黔西南水银洞层控超大型卡林型金矿床成矿模式及成矿预测研究[J]. 地质学报,2009,83(10):1473-1482.  
 [15] Su W C, Xia B, Zhang H T, Zhang X C, Hu R Z. Visible gold in arsenian pyrite at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: Implications for the environment and processes of ore formation [J]. Ore Geology Reviews, 2008, 33: 667-679.  
 [16] Su W C, Hu R Z, Xia B, Xia Y, Liu Y P. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China [J]. Chemical Geology, 2009, 258: 269-274.  
 [17] Su W C, Heinrich C A, Pettke T, Zhang X C, Hu R Z, Xia B. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: Products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluids [J]. Economic Geology, 2009, 104: 73-93.  
 [18] 覃礼敬,刘道明. 贵州省兴仁县太平洞金矿床地质地球化学特征[J]. 贵州地质,2006,23(3):187-196.  
 [19] 王成辉,王登红,刘建中,邓一明,刘川勤,李建康,陈发恩. 贵州水银洞超大型卡林型金矿同位素地球化学特征[J]. 地学前缘,2010,17(2):396-403.  
 [20] 张瑜,夏勇,王泽鹏,闫宝文,付芝康,陈明. 贵州簸箕田金矿单矿物稀土元素和同位素地球化学特征[J]. 地学前缘, 2010, 17(2):385-395.

- 通报, 2011, 3(2): 160-171.
- [8] 彭军, 伊海生, 夏文杰. 扬子板块东南大陆边缘上震旦统热水成因硅质岩的地球化学标志[J]. 成都理工学院学报, 2000, 1(1): 8-14.
- [9] 周永章, 涂光炽, Edward H C, Jayanta G, 卢焕章. 粤西古水剖面震旦系顶部层状硅岩的热成因属性: 岩石学和地球化学证据[J]. 沉积学报, 1994, 12(3): 1-11.
- [10] 宋光永, 刘树根, 黄文明. 川东南丁山-林滩场构造灯影组热液白云岩特征[J]. 成都理工大学学报, 2009, 36(6): 706-715.
- [11] 张位华, 姜立君, 高慧, 杨瑞东. 贵州寒武系底部黑色硅质岩成因及沉积环境探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 174-178.
- [12] 陈先沛, 高计儿, 陈多福. 热水沉积作用的概念和几个岩石学标志[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 124-132.
- [13] 黎彤. 地球与地壳的地球化学丰度[J]. 地球化学, 1992, 10(3): 124-132.
- [14] 杨建民, 王登红, 毛景文, 张作衡, 张招崇, 王志良. 硅质岩岩石化学研究方法及其在“镜铁山式”铁矿床中的应用[J]. 岩石矿物学杂志, 1999, 18(2): 108-120.
- [15] Adach I M, Yamamoto K, Suigiski R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific: Their geologic significance as indication of ocean ridge activity [J]. *Sedimentary Geology*, 1986, 47: 125-148.
- [16] Yamamoto K. Geochemical characteristics and deposition environment of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto terranes [J]. *Sedimentary Geology*, 1987, 52: 65-108.
- [17] Bostrom K. Genesis of ferromanganese deposits-diagnostic criteria for recent and old deposits [M]. New York: Plenum Press, 1983.
- [18] Zhou Y Z, Chown E H, Guha J, Lu H Z, Tu G Z. Hydrothermal origin of Precambrian bedded chert at Gusui, Guangdong, China: Petrologic and geochemical evidence [M]. *Sedimentology*, 1994, 3: 605-619.
- [19] 涂光炽. 热水沉积矿床[J]. 四川地质科技情报, 1987, 5(1): 1-5.
- [20] Murray R W, Buchholtz T, Brink M R. Rare earth, major, and trace elements in chert from the Franciscan complex and Monterey Group, California: Assessing REE sources to fine-grained marine sediments [J]. *Geochim. Acta*, 1991, 55: 1875-1895.
- [21] 王忠诚, 吴浩若, 邝国敦. 广西晚古生代硅岩的地球化学及其形成的大地构造环境[J]. 岩石学报, 1995, 11(4): 449-455.
- [22] 李献华. 赣东北蛇绿混杂岩带中硅质岩的地球化学特征及构造意义[J]. 中国科学(D), 2000, 30(3): 284-290.
- [23] 彭军, 伊海生, 夏文杰. 湘黔桂地区晚前寒武纪层状硅质岩地球化学特征及成因[J]. 地质地球化学, 1999, 27(4): 33-39.
- [24] Rona P A. Hydrothermal mineralization of etaliferous sediments [J]. *Marine Geology*, 1983, 50(3): 241-256.
- [25] 冯胜斌, 周洪瑞, 燕长海. 东秦岭二郎坪群硅质岩热水沉积地球化学特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2007, 25(4): 564-573.
- [26] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [27] Shimizu H M. A cerium in chert as an indication of marine environment of its formation [J]. *Nature*, 1977, 266: 364-348.
- [28] Fleet A J. Hydrothermal and hydrogeneous ferromanganese deposits [A]. *Hydrothermal processes at seafloor spreading centers* [M]. New York: Plenum Press, 1983: 537-570.
- [29] 杨海生, 周永章, 杨志军, 张澄博, 付伟. 华南热水成因硅质岩建造的稀土元素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(1): 61-64.
- [30] 周永章, 何俊国, 杨志军, 付伟, 杨小强, 张澄博, 杨海生. 华南热水沉积硅质岩建造及其成矿效应[J]. 地学前缘, 2004, 11(2): 373-377.
- [31] Douthitt C B. The geochemistry of the stable isotopes of silicon [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1982, 46(8): 1449-1458.
- [32] 丁梯平, 万德芳, 李金城. 硅同位素测量方法及其地质应用[J]. 矿床地质, 1988, (4): 90-95.
- [33] Knauth P L, Epstein S. Hydrogen and oxygen isotope ratios in nodular and bedded cherts [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1976, 40(9): 1095-1108.

(上接第 752 页)

- [21] 吴南平, 蒋少涌, 廖启林, 潘家永, 戴宝章. 云南兰坪-思茅盆地脉状铜矿床铅、硫同位素地球化学与成矿物质来源研究[J]. 岩石学报, 2003, 19(4): 799-807.
- [22] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用—兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [23] 周家喜, 黄智龙, 周国富, 金中国, 李晓彪, 丁伟, 谷静. 黔西北赫章天桥铅锌矿床成矿物质来源: S、Pb 同位素和 REE 制约[J]. 地质论评, 2010, 56(4): 513-524.
- [24] 彭建堂, 胡瑞忠, 苏文超. 扬子地块南缘锑矿床中矿石铅的组成及其地质意义[J]. 地质地球化学, 2000, 28(4): 43-47.
- [25] 张乾, 邵树勋, 刘家军, 刘志浩. 兰坪盆地大型矿集区多金属矿床的铅同位素组成及铅的来源[J]. 矿物学报, 2002, 22(2): 147-153.
- [26] 刘建中, 邓一明, 刘川勤, 张兴春, 夏勇. 贵州省贞丰县水银洞层控特大型金矿成矿条件与成矿模式[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 169-177.