



# 湘西合仁坪金矿床硫、铅同位素地球化学\*

邓穆昆<sup>1</sup> 彭建堂<sup>1,2,\*</sup> 胡诗倩<sup>1</sup> 李玉坤<sup>1</sup> 张婷<sup>1</sup>

(1 中南大学地球科学与信息物理学院 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 中国长沙 410083;

2 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, 中国贵阳 550002)

**摘要** 湘西柳林汉一带广泛分布钠长石-石英脉型金矿, 合仁坪金矿床是其典型代表。文章对合仁坪金矿床的硫、铅同位素进行了研究, 并与区域石英脉型金矿床进行对比, 探讨了该矿的成矿物质来源, 并初步确定了其矿床成因。研究表明, 合仁坪金矿床硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值范围较窄 ( $-4.8\text{‰} \sim 4.4\text{‰}$ ), 平均为  $-0.6\text{‰}$ , 该矿床的硫为深源硫, 由深部变质流体带入, 铅的同位素组成较均一, 并表现出明显的造山带铅的特点。结合区域成矿作用, 进一步研究揭示, 合仁坪金矿床为一典型的造山型金矿, 其成矿可能与湘西雪峰山地区加里东期的造山作用有关。

**关键词** 地球化学 硫、铅同位素 成矿物质来源 造山型金矿 合仁坪钠长石-石英脉金矿 湘西

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

## Sulfur and lead isotope geochemistry of Herenping gold deposit, western Hunan

DENG MuKun<sup>1</sup>, PENG JianTang<sup>1,2</sup>, HU ShiQian<sup>1</sup>, LI YuKun<sup>1</sup> and ZHANG Ting<sup>1</sup>

(1 School of Geosciences and Info-physics & Key Laboratory of Non-ferrous Metals Metallogenic Prediction of Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China)

### Abstract

Albite-quartz lode gold deposits are widespread in the Liulincha belt, western Hunan. Among them, the Herenping deposit is a typical one. Sulfur and lead isotopic compositions of ores in the Herenping deposit were analyzed in this study, compared with the quartz lode gold deposits in western Hunan, the ore-forming materials' source for the Herenping deposit was investigated, and its ore genesis was preliminarily ascertained. It is revealed that the  $\delta^{34}\text{S}$  values of sulfides in ores range narrowly from  $-4.8\text{‰}$  to  $4.4\text{‰}$ , with an average of  $0.6\text{‰}$ , which suggests that the sulfur in ores was mainly derived from the deep-seated source brought by the metamorphic fluids. The lead isotopic compositions in ores are relatively uniform and display obvious orogenic lead signature. In comparison with other gold deposits in western Hunan, it can be further concluded that the Herenping lode gold deposit is a typical orogenic gold deposit probably associated with Caledonian orogeny in the Xuefeng uplift.

**Key words:** geochemistry, S and Pb isotopes, source of ore-forming materials, orogenic gold deposit, Herenping albite-quartz lode gold deposit, western Hunan

脉型金矿床,是指矿体呈脉状(包括单脉、细脉、网脉和交代脉等)产出的金矿床。据不完全统计,该

\* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41073036、41473043)的资助

第一作者简介 邓穆昆,女,1989年生,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:125011026@csu.edu.cn

\* \* 通讯作者 彭建堂,男,1968年生,博士、教授,主要从事矿床地球化学研究。Email:jtpeng@126.com

收稿日期 2015-03-19;改回日期 2016-05-11。张绮玲编辑。

类金矿的储量约占世界岩金储量的60% (含南非 Witwatersrand 型砾岩金矿), 占中国金矿储量的50%。目前世界上已开采的黄金总产量中的1/4以上是来自脉型金矿。在南非 Barberton、西澳 Yilgarn、加拿大 Abitibi、印度 Kolar 等地变质地体中, 均分布有大量的脉型金矿床, 构成世界著名的金成矿省; 在中国华北的胶东、小秦岭和夹皮沟、以及华南的雪峰山等地, 也有大量的脉型金矿床产出。正因为脉型金矿床的重要性以及分布的广泛性, 长期以来, 脉型金矿床一直是国内外的研究重点(邱元禧等, 1999)。

湘西雪峰山一带金矿广泛分布, 是华南最重要的金成矿区带之一, 湖南省80%金矿床(点)分布于该区, 主要分布有六大金矿带(黎盛斯, 1978; 彭建堂, 1999)(图1)。特别是在湘西沅陵、桃源、安化一带的前寒武系浅变质岩中, 金矿床(点)密集产出, 这

些金矿主要为石英脉型, 沃溪金矿是其中的典型代表, 目前人们已对这类金矿床进行了广泛而深入的研究(黎盛斯, 1978; 罗猷林等, 1984; 杨燮, 1992; 中国人民武警黄金部队黄金指挥部, 1996; 彭建堂, 1999; 彭建堂等, 2003; 2005; 顾雪祥等, 2004a; 2004b; 彭渤等, 2006)。

在湘西的柳林汉一带, 还存在一类新的脉型金矿, 其矿脉主要由石英和钠长石组成, 脉体中的钠长石含量可高达30%~40%。相对于区域上的石英脉型金矿而言, 柳林汉一带钠长石-石英脉型金矿的研究程度很低(王国强等, 2009; 张婷等, 2014), 其成矿物质来源、矿床成因和形成机理目前均不清楚。因此, 本文拟在前人工作的基础上, 对该区典型的金矿床——合仁坪金矿进行硫、铅同位素研究, 并与区域上的石英脉型金矿进行对比, 以期查明柳林汉一带

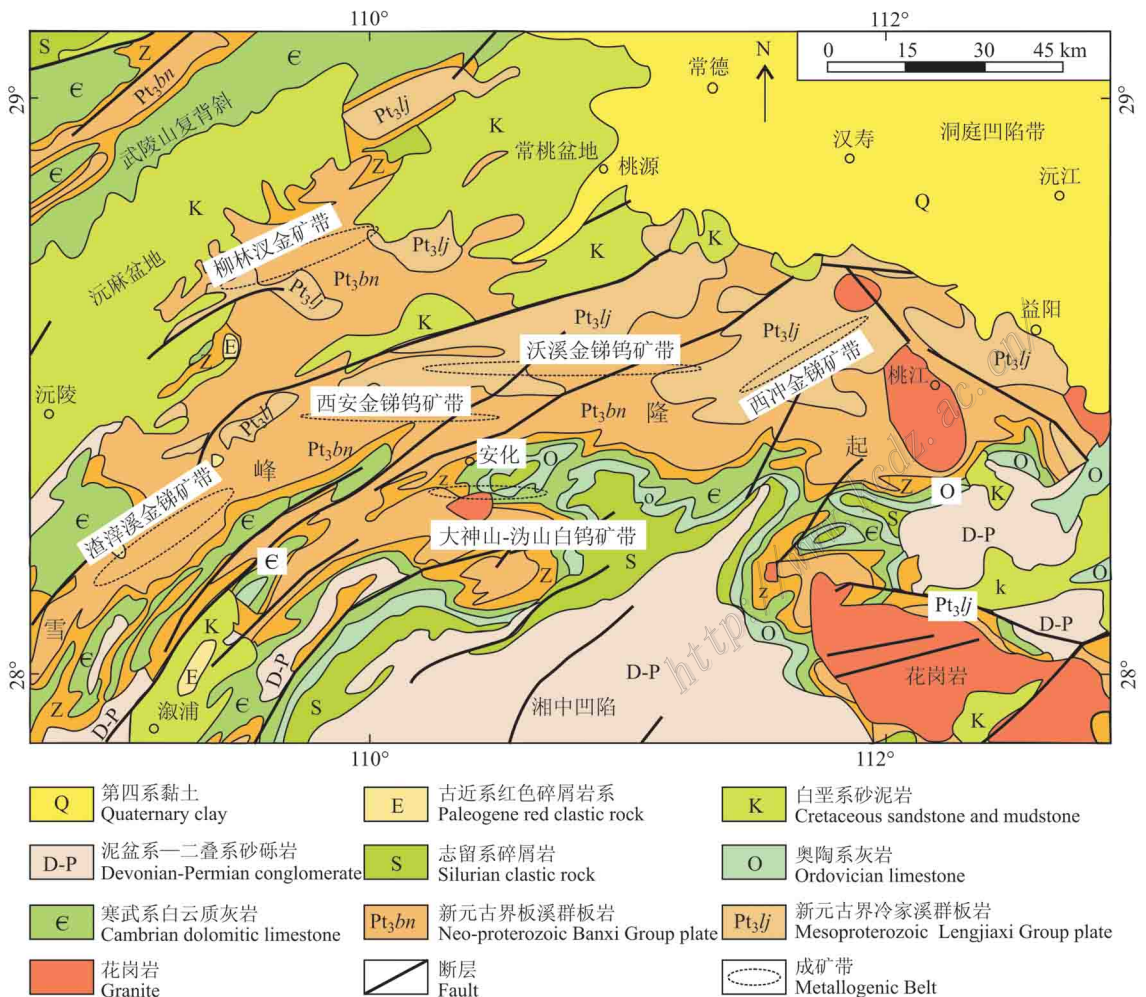


图1 湘西雪峰隆起区金矿带分布图(据包正相, 1987 修改)

Fig. 1 Distribution of gold belts in the Xuefeng uplift, western Hunan(modified after Bao, 1987)

钠长石-石英脉型金矿的成矿物质来源,初步确定这类脉型金矿的矿床成因,为深入系统地认识湘西雪峰山一带金矿的区域成矿作用奠定基础。

## 1 区域成矿背景

湘西雪峰山金多金属成矿带的大地构造位置处于扬子陆块江南古陆武陵隆起与雪峰隆起带之间的次级隆起区内,雪峰隆起具有大陆缘弧陆碰撞造山带的性质,加里东期的陆内俯冲和顺层滑脱为其主要的地球动力过程和造山作用机制(邱元禧等,1996)。

该区地层从元古代至新生代皆有出露,但以前寒武纪地层为主,主要出露的地层从下到上有新元古界冷家溪群( $Pt_3lj$ )、新元古界板溪群( $Pt_3bn$ )、寒武系( $c$ )、奥陶系( $O$ )、志留系( $S$ )、泥盆系—二叠系( $D-P$ )、白垩系( $K$ )、古近系和第四系( $Q$ )。雪峰隆起区在不同历史时期不同大地构造环境内发育不同类型的岩浆岩,其分布特征是东部发育,中部少见,西南部未见出露。雪峰隆起区位于扬子板块与华南板块的过渡地带,经历了武陵构造变形、加里东构造变形和印支-燕山叠加构造变形 3 个主要变形阶段(贾宝华,1994),构造形迹总体表现为向西北突出的弧形构造带。造山带以临湘-慈利-保靖断裂(江南断裂)为北(西)界,以城步-新化-沅山-川口-文家市为南西边界(柏道远等,2011),带内西段构造形迹呈 NE-NNE 向,东段转为 EW 向。

## 2 矿床地质特征

柳林汉金矿带位于湘西雪峰山金多金属成矿带的西北部,该成矿带大体呈北东  $60\sim 70^\circ$  方向展布,长约 40 km,宽 2~6 km,目前在该矿带已发现金矿床(点)20 余处,这些金矿床主要分布于柳林汉-万善桥一带(图 2)。几乎所有金矿床(点)都赋存于新元古界板溪群马底驿组的紫红色绢云母板岩中,矿脉通常呈层状或似层状产出,受 NEE 向断裂和层间断裂的控制,明显不同于区域上的石英脉型金矿,该区含金矿脉主要由石英和肉红色的钠长石组成,钠长石是一种重要的载金矿物(王国强等,2009)。本次研究的合仁坪金矿是柳林汉金矿带中规模最大的金矿床,自北向南包含桐树面、合仁坪和长岭岗 3 个矿段。该矿采矿历史悠久,清末民初为采矿的鼎盛时期,是

解放前湖南境内四处主要的产金矿山之一。

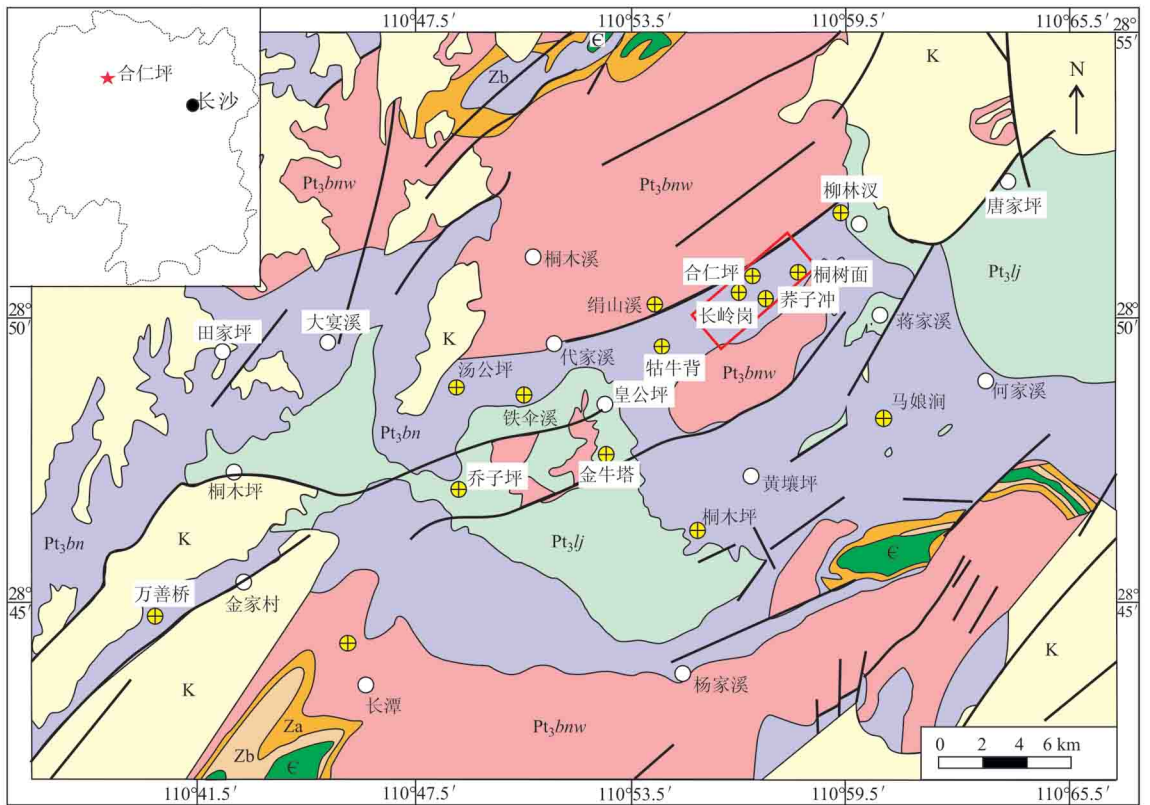
合仁坪金矿区出露地层简单,除第四系覆盖外,出露新元古界板溪群马底驿组和五强溪组(图 3)。其中,马底驿组主要分布于矿区中部,由紫红色泥质板岩、绢云母化褪色板岩以及条带状板岩组成,是该矿床的赋存层位。矿区西北角、东南角和中部局部出露有五强溪组地层,主要由灰绿色变质石英砂岩、凝灰岩组成,与下伏的马底驿组整合接触。矿区构造主要为长岭岗复式背斜及次级褶皱,含金矿脉在背斜两翼和核部均有分布,受构造控制显著(图 3)。矿区未见岩浆岩出露。

在合仁坪矿区,矿体主要受层间断裂及次级裂隙的控制,通常呈层状、似层状产出,与地层产状基本一致,少量呈网脉状,分枝复合现象及角砾岩化现象常见(图 4)。矿脉成带分布,东西长 3200 m,宽 1300 m(见图 3)。已圈定矿脉达 52 条,单脉矿脉长 1950 m,延深 126 m,平均厚 0.82 m,最厚 2.15 m;层间脉走向长 10~70 m,平均厚 0.24 m。矿脉主要为含金的钠长石-石英脉,矿脉中钠长石含量约 30%~40%,少数网脉中钠长石含量可高达 80%,局部可见明金产于钠长石矿物颗粒间,其脉体的矿物组成,明显有别于区域上单一的石英脉体。单脉金品位在  $4.0\times 10^{-6}\sim 7.0\times 10^{-6}$  之间,层间脉金品位较高,储量大于单脉状矿体数倍。

矿石具块状构造、脉状构造、条带状构造、浸染状构造和角砾状构造,最常见的为块状构造和角砾状构造。矿石结构主要有自形-半自形粒状结构、他形粒状结构、交代残余结构、包含结构、填隙结构、充填结构、固溶体分离结构、共边结构、镶边结构和碎裂结构等(图 5)。矿石矿物组成简单,金属矿物主要为黄铁矿、自然金、方铅矿、黝铜矿、黄铜矿、闪锌矿等(图 5),非金属矿物主要为石英、钠长石,其次为方解石、绿泥石、白云石和绢云母,少量高岭石和叶蜡石。其中黄铁矿、石英和钠长石是主要的载金矿物,金主要以裂隙金的形式存在。围岩蚀变主要为绢云母化(褪色化)、硅化,其次为碳酸盐化、绿泥石化、黏土化等。

## 3 样品采集和分析方法

本次用于硫同位素测试的样品为黄铜矿和黄铁矿的单矿物,铅同位素测试的样品为方铅矿和黄铁矿的单矿物,这些样品分别采自合仁坪(HRP)、桐树



- |  |  |   |  |
|--|--|---|--|
| <b>K</b> 白垩系砂泥岩<br>Cretaceous sandstone and mudstone   | <b>€</b> 寒武系白云质灰岩<br>Cambrian dolomitic limestone  | <b>Zb</b> 上震旦统白云岩<br>Upper-Sinian dolomite                                  | <b>Za</b> 下震旦统砂岩<br>Lower-Sinian sandstone |
| <b>Pt<sub>3</sub>bnw</b> 新元古界板溪群五强溪组砂质板岩<br>Wuqiangxi Formation sandy slate of Neo-proterozoic Banxi Group plate | <b>Pt<sub>3</sub>bn</b> 新元古界板溪群马底驿组板岩<br>Madiyi plate of Neo-proterozoic Banxi Group plate | <b>Pt<sub>3</sub>lj</b> 新元古界冷水溪群板岩<br>Mesoproterozoic Lengjiaxi Group plate | 断层<br>Fault                                |
| <b>+</b> 金矿床<br>Gold deposit   | <b>○</b> 地名<br>Place name  | <b>□</b> 研究区<br>Study area  |  |

图2 湘西柳林汉金矿带金矿床(点)分布图(据湖南省1:20万区域矿产图修编)

Fig. 2 Distribution of gold deposits in the Liulincha ore belt, western Hunan(modified after the Mineral Resources Map(1:200 000) of Hunan Province)

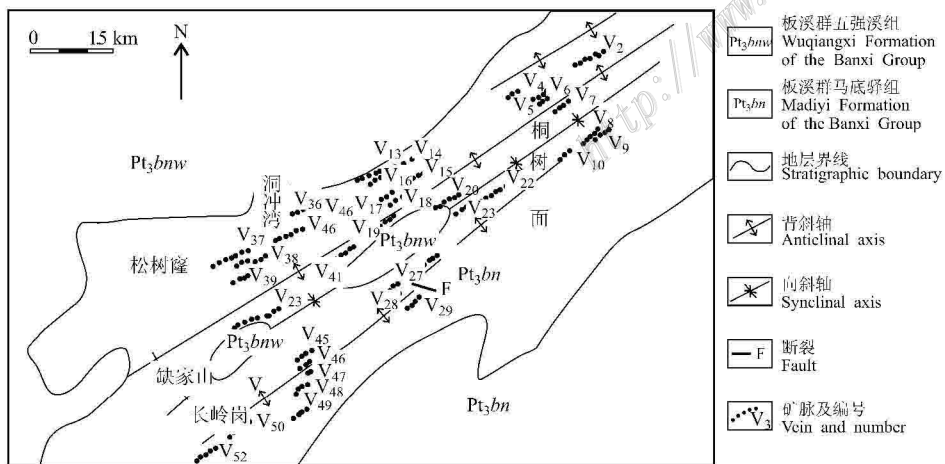


图3 湘西合仁坪矿床地质简图(据中国人民武装警察部队黄金指挥部,1996)

Fig. 3 Geological map of the Herenping gold deposit, western Hunan (after Gold Command of Chinese People's Armed Police, 1996)

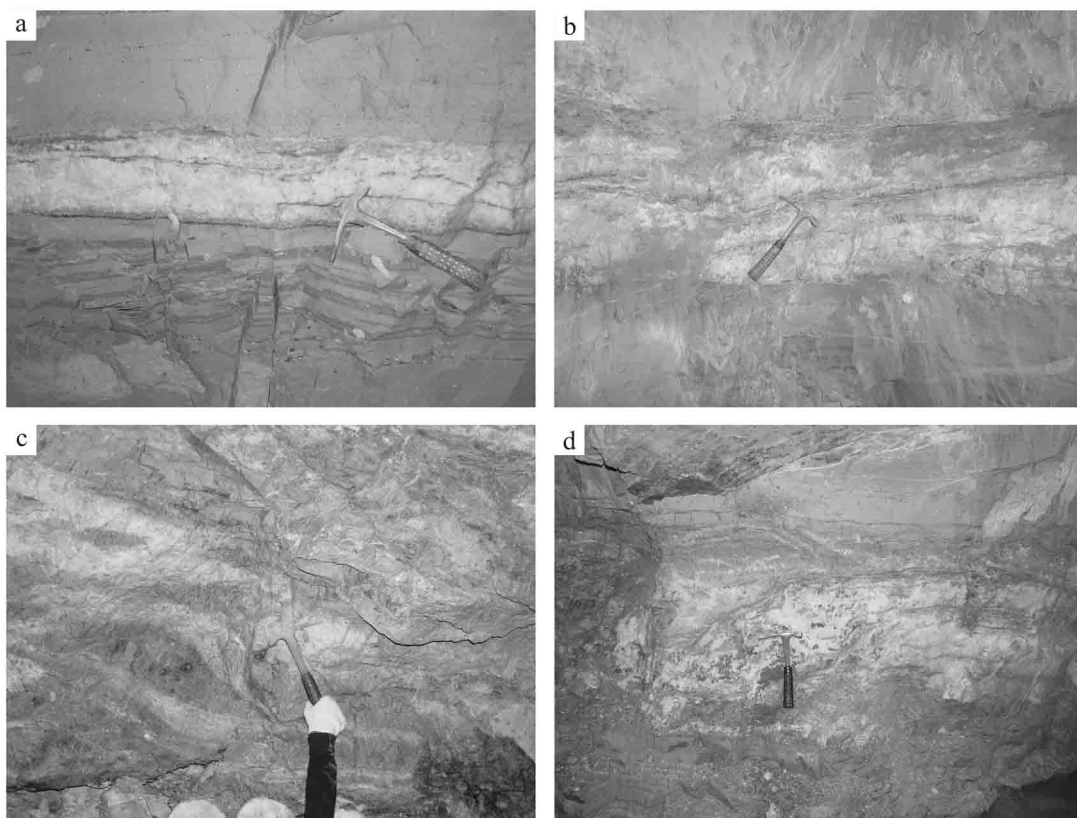


图 4 合仁坪金矿中含金钠长石-石英矿脉

a. 层状矿脉; b. 似层状矿脉; c. 网脉状矿脉; d. 角砾岩化矿脉

Fig. 4 Gold-bearing albite-quartz veins in the Herenping gold deposit

a. Bedded vein; b. Stratoid vein; c. Stockwork vein; d. Brecciated vein

面(TSM)和长岭岗(CLG)3个矿段。在野外观察和室内矿物鉴定的基础上,挑选出有代表性的样品,并将其磨至40~60目,使其单矿物解离,在双目镜下精心挑选单矿物颗粒,最后在玛瑙钵中将挑选干净的单矿物研磨至200目以下。

29件样品的硫同位素测试在中国科学院地球化学研究所的连续流同位素质谱仪(IsoPrime)上分析完成,测试结果为相对于VCDT的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

14件样品的铅同位素测试是在武汉地质矿产研究所实验检测中心的MAT-261固体同位素质谱仪上完成的。首先将约10~50mg的硫化物样品浸入丙酮淋滤掉表面污染物,然后用蒸馏水洗涤并在60℃下的烘箱中干燥,再用硝酸和氢氟酸混合稀液溶解洗净的硫化物,根据离子交换化学,使用磷酸-硅胶发射剂使溶液中的铅加载到铯带上。Pb同位素测试采用的标样为国际标样NBS981,测量精度为对于1 $\mu\text{g}$ 铅, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 优于万分之

五, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 优于十万分之五。

## 4 测试结果

除1个样品为黄铜矿外,其余用于硫同位素分析的样品均为黄铁矿。总体而言,合仁坪矿区中硫化物的硫同位素组成变化不大, $\delta^{34}\text{S}$ 值落在 $-4.8\text{‰}$ ~ $-4.4\text{‰}$ 之间(表1),平均为 $-0.6\text{‰}$ 。硫同位素组成直方图显示,硫同位素组成分布集中,存在一个峰值区间( $-3\text{‰}$ ~ $-1\text{‰}$ )(图6)。

用于铅同位素测试的矿物为方铅矿和黄铁矿,其测试分析结果见表2;铅同位素参数的计算采用了路远发教授设计的Geokit软件。合仁坪金矿床中方铅矿的铅同位素组成为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.270 \sim 18.057$ (平均为17.515), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.462 \sim 15.561$ (平均为15.496), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.664 \sim 38.293$ (平均为37.895)。黄铁矿的铅同位素组成为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.395 \sim 17.665$ (平均为17.503),

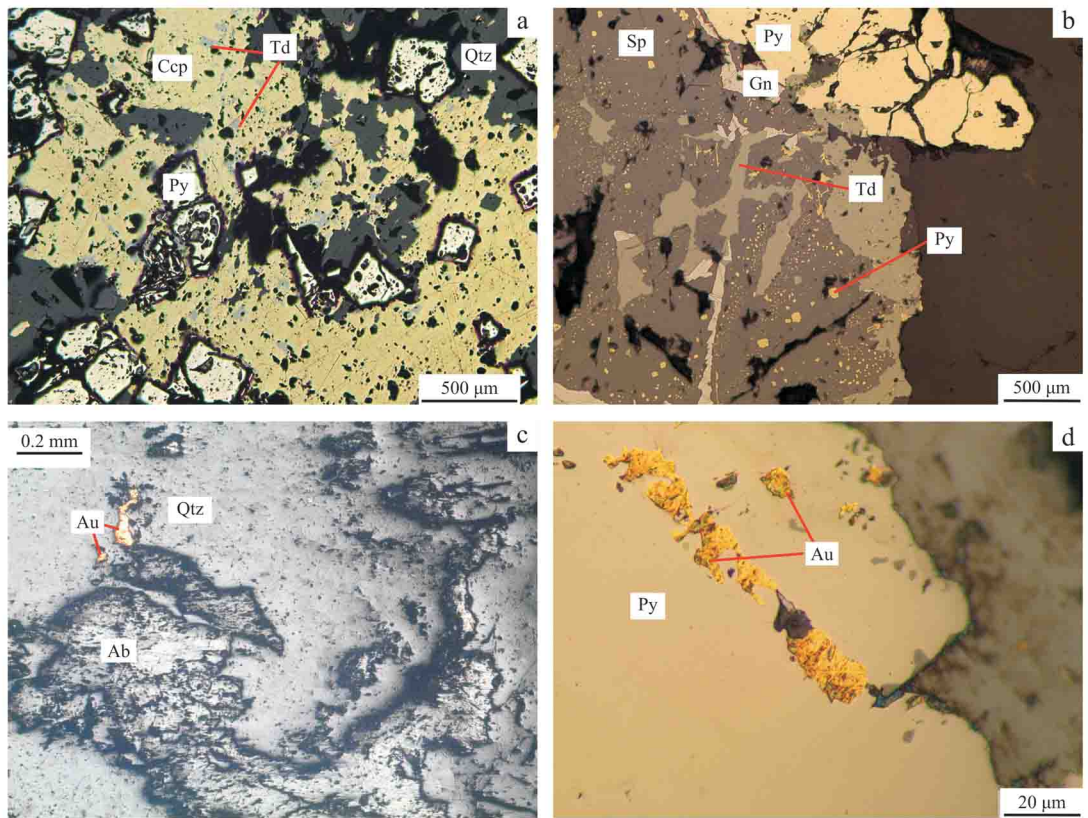


图5 矿物组合及金的赋存状态

a. 包含结构; b. 交代结构、固溶体分离结构; c. 充填结构; d. 填隙结构

Qtz—石英; Ab—钠长石; Py—黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Td—黝铜矿; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Au—自然金

Fig. 5 Mineral assemblages and modes of occurrence of gold

a. Enclave structure; b. Metasomatic texture, exsolution texture; c. Filling texture; d. Fissure-filling texture

Qtz—Quartz; Ab—Ablite; Py—Pyrite; Ccp—Chalcopyrite; Td—Tetrahedrite; Sp—Sphalerite; Gn—Galena; Au—Gold

表1 合仁坪金矿中硫化物的硫同位素组成

Table 1 Sulfur isotopic composition of sulfide in the Herenping gold deposit

样号	硫化物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	样号	硫化物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	样号	硫化物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
HRP-9	黄铁矿	-1.8	HRP-46	黄铁矿	4.2	HRP-16	黄铁矿	-1.9
HRP-9	黄铜矿	-3.9	HRP-47	黄铁矿	4.4	HRP-29	黄铁矿	-2.5
HRP-11	黄铁矿	-4.5	CLG-31	黄铁矿	3.0	HRP-34	黄铁矿	0.4
HRP-18	黄铁矿	-1.4	CLG-15	黄铁矿	2.1	HRP-37	黄铁矿	-4.5
HRP-20	黄铁矿	2.0	CLG-28	黄铁矿	-1.6	HRP-40	黄铁矿	-0.1
HRP-35	黄铁矿	0.2	CLG-34	黄铁矿	-1.7	TSM-6	黄铁矿	-1.1
HRP-41	黄铁矿	3.1	CLG-35	黄铁矿	-4.4	TSM-7	黄铁矿	-3.2
HRP-45	黄铁矿	1.9	CLG-13	黄铁矿	-4.8	HRP-38	黄铁矿	0.5
HRP-48	黄铁矿	3.0	CLG-36	黄铁矿	1.8	HRP-42	黄铁矿	3.4
HRP-10	黄铁矿	-2.2	TSM-3	黄铁矿	-2.2			

注: HRP系列的样品采自合仁坪矿段、CLG采自长岭岗矿段、TSM采自桐树面矿段。

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.483 \sim 15.561$  (平均为 15.526),  
 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.879 \sim 38.151$  (平均为 37.986)。总体而言,黄铁矿铅同位素比值稍高于方铅矿,由于方

铅矿中铅为主量元素,少量的 Th、U 对其铅同位素组成改变的影响几乎可以忽略,而铅含量极少的黄铁矿中母体 U、Th 后期衰变对其铅同位素的影响高

表 2 合仁坪金矿硫化物铅同位素组成及其参数

Table 2 The lead isotope compositions of various sulfides and their parameters in the Herenping gold deposit

样号	硫化物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$\mu$	$\omega$	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
HRP-9	方铅矿	18.057	15.561	38.293	1.1604	9.43	37.53	3.85	69.23	16.50	38.30
HRP-50	方铅矿	17.27	15.475	37.740	1.1160	9.37	39.09	4.04	61.23	14.01	44.32
HRP-51	方铅矿	17.466	15.469	37.908	1.1291	9.33	38.52	4.00	60.40	12.47	42.20
TSM-9	方铅矿	17.420	15.511	37.943	1.1231	9.42	39.42	4.05	64.53	15.82	46.84
HRP-24	方铅矿	17.386	15.499	37.824	1.1217	9.40	38.96	4.01	64.58	15.23	44.67
HRP-13	方铅矿	17.489	15.462	37.664	1.1311	9.31	37.20	3.87	59.72	11.84	34.39
HRP-11	黄铁矿	17.550	15.483	37.934	1.1335	9.34	38.25	3.96	61.69	13.08	40.88
HRP-37	黄铁矿	17.395	15.505	37.879	1.1219	9.41	39.22	4.03	63.98	15.52	45.58
HRP-46	黄铁矿	17.457	15.561	37.979	1.1218	9.52	39.85	4.05	69.29	19.32	49.14
HRP-47	黄铁矿	17.471	15.534	37.941	1.1247	9.46	39.31	4.02	66.67	17.24	46.27
HRP-48	黄铁矿	17.456	15.517	37.897	1.1250	9.43	39.03	4.01	65.04	16.07	44.68
CLG-31	黄铁矿	17.603	15.543	38.151	1.1325	9.46	39.5	4.04	67.5	17.22	48.23
CLG-35	黄铁矿	17.428	15.527	38.015	1.1224	9.45	39.86	4.08	66.08	16.97	49.39
CLG-13	黄铁矿	17.665	15.540	38.093	1.1367	9.44	38.81	3.98	67.18	16.69	44.46

注:  $\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ;  $\omega = ^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ ;  $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$  分别表示铅的三种同位素与同时代地幔值的相对偏差。

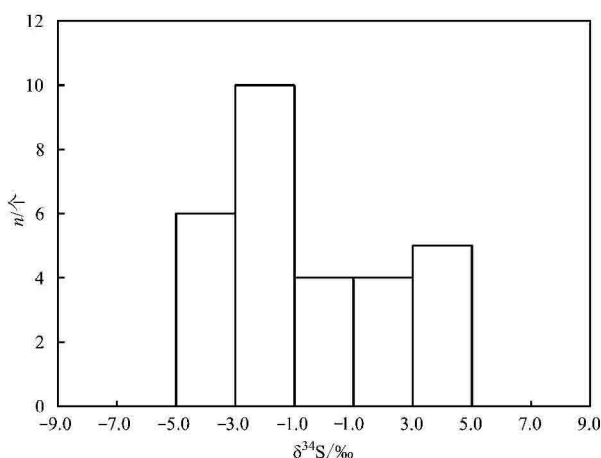


图 6 合仁坪金矿硫化物的硫同位素组成直方图

Fig. 6 The histogram of sulfur isotopic compositions for sulfides from the Herenping gold deposit

于方铅矿,而造成了其铅同位素组成高于方铅矿。

## 5 讨论

### 5.1 硫的来源及其对成矿过程的指示意义

已有的研究表明,在热液体系中硫同位素分馏达到平衡时,矿床中共生硫化物 $^{34}\text{S}$ 的富集程度按从大到小的顺序为:黄铁矿>闪锌矿>黄铜矿>方铅矿(Saikai, 1968)。从样品 HRP-9 的两种共生硫化物的分析结果来看,黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值( $-1.8\text{‰}$ )明显高于与其共生的黄铜矿( $-3.9\text{‰}$ ),因此合仁坪金矿中硫化物应该基本达到了硫同位素分馏平衡。成

矿流体与矿物发生平衡分馏时,沉淀矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值会随着流体的总同位素组成变化而不同,而成矿流体的温度、氧逸度和 pH 值决定了 S 以何种形式存在(Ohmoto et al., 1979; 1997)。鉴于该矿床的硫化物主要为黄铁矿,未见硫酸盐矿物和磁铁矿,围岩蚀变为酸性蚀变矿物组合:绢云母-高岭石-绿泥石-叶蜡石-黄铁矿,矿床流体包裹体的均一温度为 $110\sim 375\text{℃}$ ,主要集中在 $120\sim 240\text{℃}$ (胡诗倩等, 2015),因此,中-低温下的这种简单的矿物共生组合关系表明了成矿流体中的 S 主要为还原硫,且其存在形式为液态 $\text{H}_2\text{S}$ (Ohmoto et al., 1979; 1997)。据 Ohmoto (1972)报道,如果热液中仅存一种含硫物质(或以一种含硫物质占绝对优势,其余含硫物质可忽略不计),且黄铁矿与溶液中的含硫原子团的同位素相对富集系数还很低(如在 $150\sim 350\text{℃}$ 间,黄铁矿与 $\text{H}_2\text{S}$ 的相对富集系数为 $0.8\text{‰}\sim -0.2\text{‰}$ ),则黄铁矿的硫同位素组成( $\delta^{34}\text{S}_{\text{py}}$ )就可能与溶液中总的平均总硫同位素组成( $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ )相似(Ohmoto, 1972)。所以,本次样品的硫同位素分析结果基本上可以代表合仁坪金矿成矿溶液的原始硫同位素组成,即该矿成矿流体的原始硫同位素组成 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-4.4\text{‰}\sim 4.8\text{‰}$ ,平均 $-0.6\text{‰}$ 。

前人对湖南雪峰山地区前寒武纪地层的硫同位素的研究显示(罗猷林, 1990),冷家溪群地层中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $12.9\text{‰}\sim 23.5\text{‰}$ (湘西区),湘西板溪群马底驿组和五强溪组地层中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 分别为 $-6.3\text{‰}\sim 1.9\text{‰}$ 和 $4.4\text{‰}\sim 17.2\text{‰}$ 。显然,合仁坪金

矿的  $\delta^{34}\text{S}$  范围(  $-4.8\text{‰} \sim 4.4\text{‰}$  )与上覆五强溪组和下伏冷家溪群的地层硫相差甚远,而与赋矿围岩马底驿组的  $\delta^{34}\text{S}$  (  $-6.3\text{‰} \sim 1.9\text{‰}$  ) (罗献林, 1990) 部分重叠,亦与幔源岩浆的  $\delta^{34}\text{S}$  重叠。鉴于该矿区范围内未见岩浆岩出露,矿石硫来源于岩浆的可能性不大,王国强等( 2009 )的研究显示,该矿床的钠长石矿物学、地球化学特征,明显不同于岩浆成因的钠长石,因此,基本可排除矿石硫为幔源岩浆来源的可能性;此外,围岩蚀变质量平衡计算表明,蚀变围岩中的 S 是带入组分,是被成矿流体带入围岩的(张婷等, 2014),因此,绝大部分硫元素也不应是来自马底驿组地层。因而最可能的一个解释是合仁坪金矿的硫来自深部地壳流体,且这一成矿流体中的硫同位素组成较均一。

雪峰山是一个陆内造山带(邱元禧等, 1996),造山作用必然伴随着流体的运移和演化以及成矿物质的活化与沉淀过程,合仁坪金矿矿石铅为造山带铅的结论也暗示了造山成矿的可能性(详见后节)。从图 7 中可以看出,产于雪峰地区的这些金矿床硫同位素塔式效应显著,硫同位素峰值与典型造山型脉金矿的硫同位素组成(  $-3\text{‰} \sim +9\text{‰}$  ) (Ridley et al., 2000) 重叠较多,合仁坪金矿的  $\delta^{34}\text{S}$  (  $-4.8\text{‰} \sim +4.4\text{‰}$  ) 与其基本一致。造山型金矿的这种较窄硫同位素变化范围,被认为是具有均一同位素组成的还原性流体沉淀成矿造成的( McCuaig et al., 1998 ),世界上一些超大型造山型金矿(如 Ashanti, Homestake, Ballarat, Bendigo) 也被证明是从这种具有严格限制范围的还原性流体中沉淀成矿的( Groves et al., 2003 )。然而,合仁坪金矿的  $\delta^{34}\text{S}$  主要集中在  $-3\text{‰} \sim -1\text{‰}$ , 尽管其与一般造山型金矿硫同位素组成大体吻合,但整体偏低。前人已有的研究表明,这种  $\delta^{34}\text{S}$  呈负值是流体发生氧化作用所致( Lambert et al., 1984; McNeil et al., 1986; Phillips et al., 1986; Cameron et al., 1987; Hagemann et al., 1993 ),而流体发生氧化作用有 3 种可能途径:① 广泛的水-岩反应促使流体中的还原性 S 减少并生成黄铁矿( Lambert et al., 1984 );② 具有氧化性质的岩浆流体加入( Cameron et al., 1987 );③ 相分离/沸腾导致还原性气体(如  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2$ ) 从成矿流体中分离出来( Drummond et al., 1985 )。如前所述,该矿成矿流体与岩浆作用关系不大,因此,可以排除第二种机制导致该区硫同位素偏低的可能性。Yang 等( 1999 )研究认为,湘西紫红色马底驿组

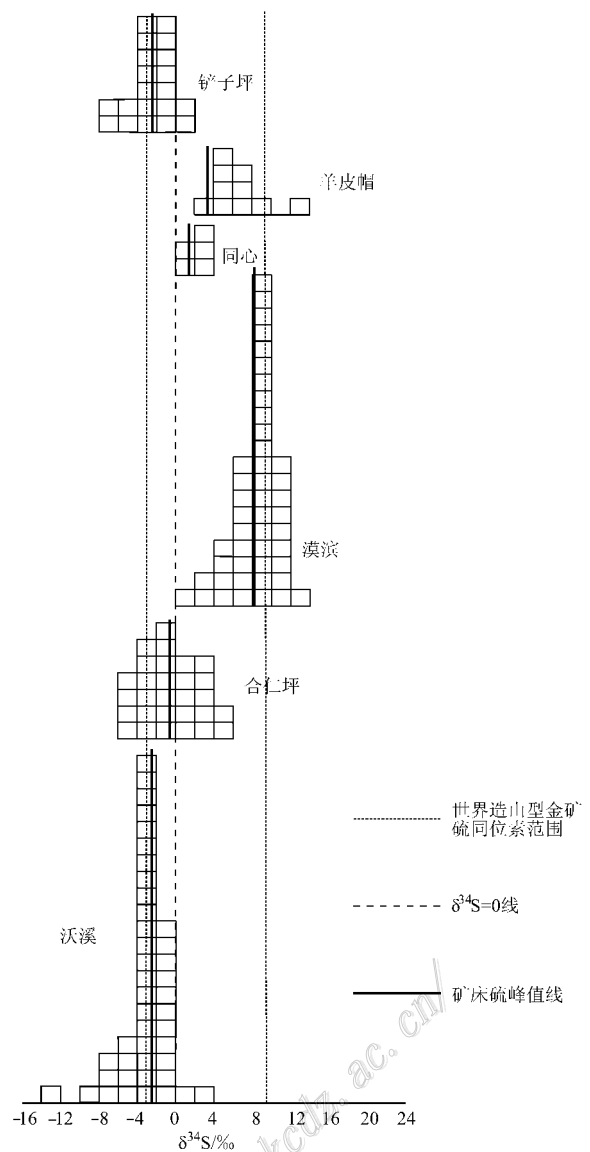


图 7 雪峰地区部分金锑钨矿床的硫同位素分布 (数据来源张理刚, 1985; 骆学全, 1996; 鲍振襄等, 1999; 顾雪祥等, 2004a; Ridley et al. 2000 本文)

Fig. 7. Distribution of sulfur isotopic compositions in different gold deposits in the Xuefeng area

板岩是金聚集的天然地球化学氧化障,而金通常被认为是以 S 的络合物形式运移( Ridley et al., 1996 ),因此,可以合理推断湘西合仁坪金矿一个可能的成矿机制是还原性成矿流体与紫红色板岩发生氧化还原反应,导致围岩中的铁与流体中的硫结合形成黄铁矿,流体中还原性 S 不断减少,导致金的硫络合物不再稳定,金发生沉淀。近矿围岩普遍发生褪色化的现象也证实了水/岩作用的广泛存在。此外,对该矿的流体包裹体研究发现(胡诗倩等, 2015),显微镜下同视域内可见到不同气相分数的



包裹体共存的现象,成矿压力变化范围很大,矿区常见液压致裂的角砾岩也验证了压力变化的存在,这些现象说明成矿流体在成矿过程中发生了沸腾作用。因此,一个更为可能的流体氧化机制就是:压力骤降导致成矿溶液发生沸腾作用,还原性气体  $H_2S$  从流体中跑出,此时金的络合物失去稳定,导致金沉淀,从而也改变了硫化物的  $\delta^{34}S$  值。这一成矿机制也被认为是太古宙脉型金矿床中金最主要的沉淀机制之一(Ridley et al., 1996)。最近对湘西沃溪金矿的硫同位素研究也认为,这两种成矿机制是该类矿床的最有可能的成因模式(祝亚男, 2014)。总之,合仁坪金矿的成矿流体可能主要为一种与造山作用有关的深部还原性变质流体,水/岩反应与压力骤变引起的相分离可能是导致金沉淀的主要机制。

## 5.2 铅的来源

总体而言,合仁坪矿区硫化物的铅同位素组成范围比较窄(表 2),变化率低于 0.3%,表明铅可能来源于一个均一储库或者在成矿前或成矿期间曾发生过铅同位素均一化事件。计算表明(表 2),该矿的矿石铅  $\mu(^{238}U/^{204}Pb)$  值 9.31~9.46(平均 9.41);Th/U 比值为 3.85~4.05(平均 4.0)。从计算的  $\mu$  值和 Th/U 比值来看,合仁坪金矿的源区较富 Th;与 Stacey 的二阶段演化模式(Stacey et al., 1975)对比发现,相对于全球平均地壳铅而言,本区矿石铅略富 Th、贫 U,这与中国大陆富钍铅的特征(李龙等, 2001)相吻合。因此该矿石铅为均一的高  $\mu$  值铅,并且与华南地区许多显

生宙矿床( $^{206}Pb/^{204}Pb \approx 18.3 \sim 18.7$ ,  $^{207}Pb/^{204}Pb \approx 15.6$ )相比,具更低放射成因铅,为典型的扬子铅特征(朱炳泉, 1998)。湖南新元古界板溪群马底驿组地层铅同位素组成为:  $^{206}Pb/^{204}Pb = 17.674 \sim 18.396$ (平均为 18.022),  $^{207}Pb/^{204}Pb = 15.553 \sim 15.705$ (平均为 15.605),  $^{208}Pb/^{204}Pb = 37.354 \sim 39.971$ (平均为 38.930)(刘海臣等, 1994)。本课题组的微量元素测试结果表明,马底驿组的  $\alpha(U)$ 、 $\alpha(Th)$  平均为  $2.063 \times 10^{-6}$  和  $11.564 \times 10^{-6}$ 。为消除围岩中 U、Th 对铅的影响,本文将围岩现代铅同位素比值回扣至柳林汉金矿成矿时代(412.46 Ma)时,可得( $^{206}Pb/^{204}Pb$ ) = 17.72 ( $^{207}Pb/^{204}Pb$ ) = 15.59 ( $^{208}Pb/^{204}Pb$ ) = 38.39, 分别高于矿石铅同位素平均值 17.515、15.496 和 37.895。其中回扣年龄为柳林汉金矿的成矿年龄(王秀璋等, 1999)。因而,可以肯定的是,合仁坪金矿床中的矿石铅不应是来自板溪群马底驿组地层。

在 Zartman 的铅构造模式中,合仁坪矿区铅同位素投影点集中在地幔、下地壳演化线和造山演化线之间(图 8),说明该矿的铅可能是下地壳以及更深部循环作用的产物。为了进一步示踪矿石铅的来源,本文将合仁坪金矿与区域上典型的石英脉型金矿的铅同位素组成进行了对比。在铅同位素  $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$  图解中,合仁坪金矿床、沃溪金锑钨矿床(罗献林, 1989)和铲子坪金矿床(魏道芳, 1993)的矿石铅均落入造山带铅的范围(图 9);与合仁坪金矿类似,沃溪和铲子坪的矿石铅在  $^{206}Pb/^{204}Pb$ - $^{206}Pb/^{204}Pb$  图解中

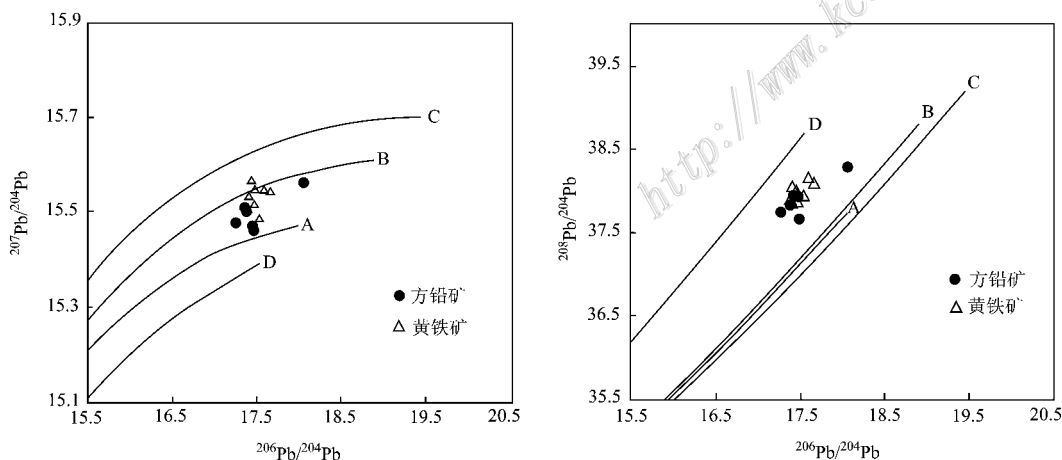


图 8 合仁坪金矿铅构造模式图(底图据 Zartman et al., 1981)

A—地幔; B—造山带; C—上地壳; D—下地壳

Fig. 8 Plumbotectonics model of lead isotope in the Herenping gold deposit (base map after Zartman et al., 1981)

A. Mantle; B. Orogenic belt; C. Upper crust; D. Lower crust

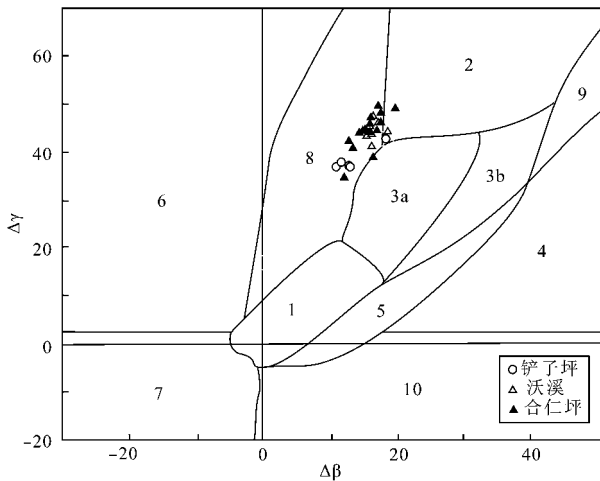


图9 湘西地区几个金矿床的  $\Delta\beta-\Delta\gamma$  图解

(底图据 Zartman et al., 1981)

- 1—地幔源铅；2—上地壳源铅；3—上壳与地幔混合的俯冲带铅 (3a—岩浆作用；3b—沉积作用)；4—化学沉积铅；5—海底热水作用铅；6—中深变质作用铅；7—深变质下地壳铅；8—造山带铅；9—古老页岩上地壳铅；10—退变质

Fig. 9  $\Delta\beta-\Delta\gamma$  diagram of several gold deposits in western Hunan (base map after Zartman et al., 1981)

- 1—Mantle-derived lead ; 2—Upper crust-derived lead ; 3—Mixed upper crust-derived and mantle-derived lead in subduction zones (3a—Magmatism ; 3b—Deposition) ; 4—Lead from chemical deposition ; 5—Lead from submarine hydrothermalism ; 6—Lead from medium-deep metamorphism ; 7—Lower crust-derived metamorphism lead ; 8—Orogenic lead ; 9—Ancient shale upper crust-derived lead ; 10—Retrograde metamorphism lead

亦落在造山带演化线附近(图10),表明这些金矿床的矿石铅主要为造山作用中各造山物质循环过程中形成的造山带铅,这与沃溪最新的铅同位素研究成果吻合(祝亚男, 2014)。

### 5.3 矿床成因

合仁坪金矿受构造控制明显,呈脉状产出,为典型的后生矿床;成矿时间(以同一金矿带的柳林汉金矿的412.46 Ma为参考)晚于马底驿组围岩的变质期;赋矿主岩为古老浅绿片岩相变质岩,矿区未见岩浆岩出露,矿脉主要成分为石英、钠长石,金属矿物为硫化物,主要为黄铁矿;围岩蚀变主要为黄铁矿化、绢云母化、钠长石化、碳酸盐化和绿泥石化等;成矿流体主要为富CO<sub>2</sub>的低盐度流体(胡诗倩等, 2015);以上矿床特征表明其与Groves等提出的造山带型金矿的特征十分吻合(Groves et al., 1998; 2003; Kerrich et al., 2000)。硫同位素研究也表明其成矿流体是深部变质来源的,与造山型金矿的流体来源相吻合,此外,金矿石中石英和钠长石氧同位素组成  $\delta^{18}\text{O}$  分别为 16.4‰~20.5‰和 15.4‰~17.7‰,石英中流体包裹体  $\delta\text{D}$  测定值为 -69‰~-55‰,钠长石中流体包裹体的  $\delta\text{D}$  测定值为 -67‰~-62‰,  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  图解亦表明成矿流体落于变质水和岩浆水的重叠处及其附近(胡诗倩等, 2015),其中  $\delta^{18}\text{O}$  落在国外一般造山型金矿附近,  $\delta\text{D}$  的范围完全落在世界上典型造山型金矿的范围内

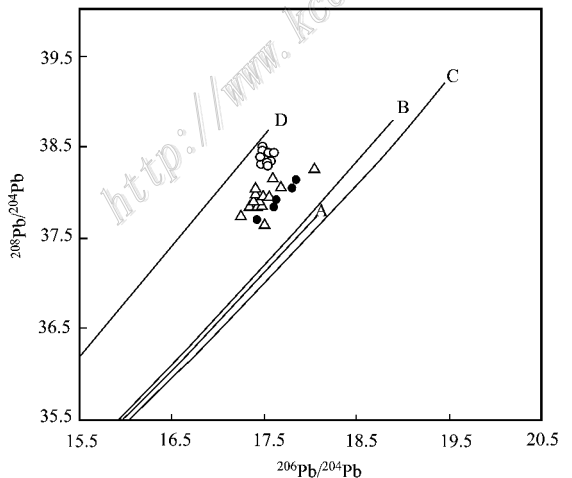
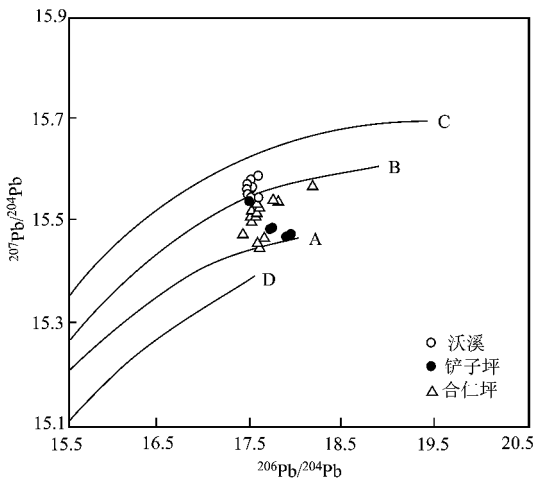


图10 湘西雪峰山地区部分金矿床的铅构造模式图解(底图据 Zartman et al., 1981)

A. 地幔; B. 造山带; C. 上地壳; D. 下地壳

Fig. 10 Plumbotectonics model of lead isotope for several gold deposits in the Xuefeng area, western Hunan (base map after Zartman et al., 1981)

A. Mantle, B. Orogenic belt, C. Upper crust, D. Lower crust

(Kerrich et al., 2000)。矿石铅同位素研究也证实了矿床铅落在造山带铅的范围内,因此,合仁坪金矿应属于造山带型金矿。近年来,亦有人将区域上沃溪等石英脉型金矿床划为造山型金矿(Zhou et al., 2002; Zhu et al., 2015)。

合仁坪金矿赋存于扬子地台边缘加里东褶皱断带,加里东期扬子地块东南大陆边缘已开始转化为陆内造山,是本区一次重要的造山运动,导致了这一时期相关金矿的形成(邱元禧等,1999;彭建堂等,2000)。王秀璋等(1999)对柳林汉金矿的定年结果为412.46 Ma,也完全印证了这一结论。随后,越来越多的年代学工作表明,湘西、黔东南一带变质岩中的脉型金矿床均形成于加里东期(彭建堂等,2003;朱笑青等,2006;王加等,2011),晚加里东期是雪峰山地区最重要的金成矿期。因此,合仁坪金矿应为与加里东造山运动有关的造山型金矿。该矿的可能成矿模式可概括为:加里东期的陆内挤压、俯冲和顺层滑脱等造山作用导致了一些深大断裂的形成和变形变质作用的发生,这些变质作用导致深部岩石发生脱水、脱挥发分,形成含硫的变质流体,流体沿着这些深大断裂向上运移并萃取底部岩石的金,随着区域地壳的隆升,这些含矿的变质流体迁移至浅部的断裂中,在遇到浅部氧化性围岩(马底驿组地层)以及断裂裂隙时,流体因与围岩反应或因压力骤降而发生氧化,导致金的络合物失稳以及流体硫同位素组成发生改变,硫与围岩中的铁结合形成较原始流体富轻硫的黄铁矿,从而导致金沉淀成矿。

## 6 结论

(1) 合仁坪金矿的矿石  $\delta^{34}\text{S}$  值为  $-4.8\text{‰} \sim +4.4\text{‰}$ , 大多落入典型的造山型金矿范围,其主要来源于深部而非赋矿围岩,  $\delta^{34}\text{S}$  值相对偏低可能与成矿流体发生氧化作用有关。

(2) 矿石铅明显不同于赋矿围岩铅的组成,而是表现为造山带铅的特征。

(3) 硫、铅同位素的特征与世界上典型造山型金矿的对比研究表明,合仁坪金矿可能为造山型金矿,其形成与加里东造山作用有关。

## References

Bai D Y, Jia B H, Zhong X, Jia P Y, Liu Y R and Ma T Q. 2011.

- Neoproterozoic tectonic evolution framework of Xuefeng Uplift belt[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 31(3): 78-87 (in Chinese with English abstract).
- Bao Z X, Wan R J and Bao Y M. 1999. The metallogenetic series of the W-Sb-Au deposits and its stable isotopic research in western Hunan Province[J]. *Beijing Geology*, 11(1): 11-17 (in Chinese with English abstract).
- Bao Z X. 1987. Geological features and mineralization of stratabound scheelite deposits in western Hunan[J]. *Mineral Deposits*, 6(4): 33-41 (in Chinese with English abstract).
- Cameron E M and Hattori K. 1987. Archean gold mineralization and oxidized hydrothermal fluids[J]. *Econ. Geol.*, 82: 1177-1191.
- Drummond S E and Ohmoto H. 1985. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems[J]. *Econ. Geol.*, 80: 126-147.
- Gold headquarters of Chinese People's Armed Police Force. 1996. *Geology of Woxi-type stratabound gold deposit in Hunan Province* [M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G and Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 13: 7-27.
- Groves D I, Goldfarb R J and Robert F. 2003. Gold deposits in metamorphic belts: Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance[J]. *Econ. Geol.*, 98: 1-29.
- Gu X X, Liu J M, Oskar Schulz, Franz Vavtar and Zheng M H. 2004a. Ore fabric characteristic of Woxi W-Sb-Au deposit in Hunan and their genetic significance[J]. *Mineral Deposits*, 21(2): 107-114 (in Chinese with English abstract).
- Gu X X, Liu J M, Oskar Schulz, Franz Vavtar and Zheng M H. 2004b. Syngenetic origin of the Woxi W-Sb-Au deposit in Hunan: Evidence from trace elements and sulfur isotopes[J]. *Chinese Journal of Geology*, 39(3): 424-439 (in Chinese with English abstract).
- Hagemann S G, Groves D I and Ridley J R. 1993. The Wiluna lode-gold deposits, western Australia: An example of a high crustal-level Archean lode-gold system[A]. In: Hach-Ali F, Tomes-Ruiz J and Gervilla F, eds. *Current research in geology applied to ore deposit*[C]. 469-472.
- Hu S Q, Peng J T, Deng M K and Li Y K. 2017. The ore-forming fluids study of the Herenping gold deposit, western Hunan[J]. *Mineral Technonogy*, 37(1): in Press (in Chinese with English abstract).
- Jia B H. 1994. Tectonic deformation of the Xuefeng Uplift area in Hunan[J]. *Regional geology of Chian*, 13(1): 65-71 (in Chinese with English abstract).
- Kerrich R, Goldfarb R J, Groves D I, Garwin S and Jia Y F. 2000. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces[J]. *Science in China (Series D)*, 43: 1-68.
- Lambert L B, Phillips G N and Groves D I. 1984. Sulphur isotope com-

- positions and genesis of Archean gold mineralization, Australia and Zimbabwe [ A ]. In : Foster R P, ed. Gold '82 : The geology, geochemistry and genesis of gold deposits [ C ]. 373-387.
- Li L, Zheng Y F and Zhou J B. 2001. A kinetic model for the evolution of lead isotopes in the continental crust of China [ J ]. Acta Petrologica Sinica, 17( 1 ): 61-68 ( in Chinese with English abstract ).
- Li S S. 1978. Introduction to the geological survey of Hunan gold mines [ M ]. Changsha : Central South University Press ( in Chinese ).
- Liu H C and Zhu B Q. 1994. On the age of Banxi and Lengjiayi group in Xiangxi [ J ]. Chinese Science Bulletin, 39( 2 ): 148-150 ( in Chinese with English abstract ).
- Luo X L, Yi S J and Liang J C. 1984. Ore genesis of the Woxi Au-Sb deposit, western Hunan [ J ]. Geology and Prospecting, 28( 7 ): 21-37 ( in Chinese with English abstract ).
- Luo X L. 1989. On the epoch of the formation of Precambrian gold deposits in Hunan Province [ J ]. Journal of Guilin College of Geology, 9( 1 ): 25-34 ( in Chinese with English abstract ).
- Luo X L. 1990a. On the genesis and metallogenic model of the Huangjindong gold deposit from Hunan [ J ]. Journal of Guilin college of Geology, 10( 8 ): 225-240 ( in Chinese with English abstract ).
- Luo X L. 1990b. On the source of ore-forming substances of Precambrian gold deposits in Hunan Province [ J ]. Journal of Guilin College of Geology, 10( 1 ): 13-26 ( in Chinese with English abstract ).
- Luo X Q. 1996. Mineralization and prospecting guide of Chanziping gold deposits in Hunan [ J ]. Hunan Geology, 15( 1 ): 33-38 ( in Chinese with English abstract ).
- McCuaig T C and Kerrich R. 1998. P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits : Evidence from alteration systematics [ J ]. Ore Geology Reviews, 12 : 381-453.
- McNeil A M and Kerrich R. 1986. Archean lamprophyre dykes and gold mineralization, Matheson, Ontario : The conjunction of LILE-enriched mafic magmas, deep crustal structures and Au concentration [ J ]. Canadian Journal of Earth Sciences 23 : 324-343.
- Ohmoto H and Goldhaber M B. 1997. Sulfur and carbon isotopes [ A ]. In : Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits [ C ]. 3rd ed. New York : John Wiley and Sons. 517-611.
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon [ A ]. In : Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits [ C ]. 2nd ed. New York : John Wiley and Sons. 509-567.
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits [ J ]. Econ. Geol., 67 : 551-578.
- Peng B, Robert Frei and Tu X L. 2006. Nd-Sr-Pb isotopic geochemistry of scheelite from the Woxi W-Sb-Au deposit, western Hunan : Implications for sources and evolution of ore-forming fluids [ J ]. Acta Geologica Sinica, 80( 4 ): 561-570 ( in Chinese with English abstract ).
- Peng J T and Hu R Z. 2000. Caledonian gold mineralization in Xuefeng ancient land [ J ]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 19( 4 ): 246-247 ( in Chinese with English abstract ).
- Peng J T, Hu R Z, Zhao J H, Fu Y Z and Lin Y X. 2003. Sm-Nd dating of scheelite and Ar-Ar dating of quartz from W-Sb-Au deposit in Woxi, west Hunan [ J ]. Chinese Science Bulletin, 48( 18 ): 1976-1981 ( in Chinese ).
- Peng J T, Hu R Z, Zhao J H, Fu Y Z and Yuan S D. 2005. Rare earth element ( REE ) geochemistry for scheelite from the Woxi Au-Sb-W deposit, western Hunan [ J ]. Geochimica, 34( 2 ): 115-122 ( in Chinese with English abstract ).
- Phillips G N, Groves D I, Neall F B, Donnelly T H and Lambert L B. 1986. Anomalous sulphur isotope compositions in the golden mile, Kalgoolli [ J ]. Econ. Geol., 81 : 2008-2015.
- Qiu Y X, Ma W P, Fan X L, Zhang Y C, Deng J R, Xia L H and Zhang X L. 1996. Tectonic nature and tectonic evolution of the " Xuefeng oldland " in the Caledonian stage [ J ]. Regional Geology of China, 15( 2 ): 150-160 ( in Chinese with English abstract ).
- Qiu Y X, Zhang Y C and Ma W P. 1999. Tectonic nature and evolution : Formation and evolution model of a intercontinental orogenic belt [ M ]. Beijing : Geological Publishing House. 1-154 ( in Chinese ).
- Ridley J R and Diamond L W. 2000. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models [ J ]. Reviews in Economic Geology, 13 : 141-162.
- Ridley J R, Mikucki E J and Groves D I. 1996. Archean lode-gold deposits : Fluid flow and chemical evolution in vertically extensive hydrothermal systems [ J ]. Ore Geology Reviews, 10 : 279-293.
- Saikai H. 1968. Isotopic properties of sulfur compounds in hydrothermal processes [ J ]. Geochemical Journal, 2 : 29-49.
- Stacey J S and Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model [ J ]. Earth and Planetary Science Letters, 26( 2 ): 207-221.
- Wang J S, Wen H J, Li C, Ding W and Zhang J R. 2011. Re-Os isotope dating of arsenopyrite from the quartz vein-type gold deposit, southeastern Guizhou Province, and its geological implication [ J ]. Acta Geologica Sinica, 85( 6 ): 955-964 ( in Chinese with English abstract ).
- Wang X Z, Liang H Y, Shan Q, Cheng J P and Xia P. 1999. Metallogenic age of the Jinshan gold deposit and Caledonian gold mineralization in South China [ J ]. Geological Review, 45( 1 ): 19-25 ( in Chinese with English abstract ).
- Wei D F. 1993. Source of ore-forming materials in Chanziping gold deposit and the geologic study of its mechanism of formation [ J ]. Hunan Geology, 12( 1 ): 29-34 ( in Chinese with English abstract ).
- Yang S X and Blum N. 1999. A fossil hydrothermal system or a source-bed in the Madiyi Formation near the Xiangxi Au-Sb-W deposit, NW Hunan, PR China [ J ]. Chemical Geology, 155 : 151-169.
- Yang X. 1992. Source of ore material and paragenesis of ore-building elements in Woxi Au-Sb-W deposit, Hunan [ J ]. Journal of Chengde College of Geology, 19( 2 ): 20-28 ( in Chinese with English abstract ).
- Zartman E R and Doe R B. 1981. Plumbotectonics-the model [ J ]. Tectonophysics, 75 : 135-162.
- Zhang L G. 1985. The stable isotopic research of W-Sb-Au deposits in Xuefeng uplift, Western Hunan [ J ]. Geology and Prospecting, 21

(11):24-28(in Chinese with English abstract).

Zhang T and Peng J T. 2014. Wall-rock alteration and mass balance of Herenping albite-quartz vein-type gold deposit in the Western Hunan[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 36(4):32-44(in Chinese with English abstract).

Zhou T H, Goldfarb R J and Phillips G N. 2002. Tectonics and distribution of gold deposits in China-An overview[J]. Mineralium Deposita, 37:2459-282.

Zhu B Q. 1998. Theory and application of isotopic system in earth sciences-On the Chinese mainland crust-mantle evolution[M]. Beijing: Science Press. 1-330(in Chinese).

Zhu X Q, Wang G L, Lu H Z, Wu X Y and Chen W Y. 2006. Determination of the age of gold deposits in southeastern Guizhou: with a discussion of the Caledonian Hunan-Guizhou gold ore belt[J]. Geology in China, 33(5):1092-1099(in Chinese with English abstract).

Zhu Y N. 2014. Mineralization and geochemistry study of ore-minerals in Au-Sb-W deposits, western Hunan[PhD]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 92(in Chinese).

Zhu Y N and Peng J T. 2015. Infrared microthermometric and noble gas isotope study of fluid inclusions in ore minerals at the Woxi orogenic Au-Sb-W deposit, western Hunan, South China[J]. Ore Geology Reviews, 65:56-69.

#### 附中文参考文献

柏道远, 贾宝华, 钟响, 贾朋远, 刘耀荣, 马铁球. 2011. 雪峰造山带新元古代构造演化框架[J]. 沉积与特提斯地质, 31(3):78-87.

包正相. 1987. 湘西层控白钨矿床地质特征及其成矿作用[J]. 矿床地质, 6(4):33-41.

鲍振襄, 万容江, 鲍珏敏. 1999. 湘西钨锡金矿床成矿系列及其稳定同位素研究[J]. 北京地质, 11(1):11-17.

顾雪祥, 刘建明, Oskar Schulz, Franz Vavtar, 郑明华. 2004a. 湖南沃溪钨-锡-金矿床的矿石组构学特征及其成因意义[J]. 矿床地质, 21(2):107-114.

顾雪祥, 刘建明, Oskar Schulz, Franz Vavtar, 郑明华. 2004b. 湖南沃溪钨锡金建造矿床同生成因的微量元素和硫同位素证据[J]. 地质科学, 39(3):424-439.

胡诗倩, 彭建堂, 邓穆昆, 李玉坤. 2015. 湘西合仁坪钠长石石英脉型金矿床的成矿流体研究[J]. 矿物学报, 37(1):出版中.

贾宝华. 1994. 湖南雪峰隆起区构造变形研究[J]. 中国区域地质, 13(1):65-71.

李龙, 郑永飞, 周建波. 2001. 中国大陆地壳铅同位素演化的动力学模型[J]. 岩石学报, 17(1):61-68.

黎盛斯. 1978. 湖南金矿地质概论[M]. 湖南长沙:中南工业大学出版社.

刘海臣, 朱炳泉. 1994. 湘西板溪群及冷家溪群的时代研究[J]. 科学通报, 39(2):148-150.

罗献林, 易诗军, 梁金城. 1984. 论湘西沃溪金锑钨矿床的成因[J]. 地质与勘探, 28(7):21-37.

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

罗献林. 1990a. 论湖南黄金洞金矿床的成因及成矿模式[J]. 桂林冶金地质学院学报, 10(8):225-240.

罗献林. 1990b. 论湖南前寒武系金矿床的成矿物质来源[J]. 桂林冶金地质学院学报, 10(1):13-26.

骆学全. 1996. 湖南铲子坪金矿的成矿规律及找矿标志[J]. 湖南地质, 15(1):33-38.

彭渤, Robert Frei, 涂湘林. 2006. 湘西沃溪 W-S b-Au 矿床白钨矿 Nd-Sr-Pb 同位素对成矿流体的示踪[J]. 地质学报, 80(4):561-570.

彭建堂, 胡瑞忠. 2000. 雪峰古陆加里东期金的成矿作用[J]. 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[J]. 科学通报, 48(18):1976-1981.

彭建堂, 胡瑞忠, 赵军红, 符亚洲, 袁顺达. 2005. 湘西沃溪金锑钨矿床中白钨矿的稀土元素地球化学[J]. 地球化学, 34(2):115-122.

邱元禧, 马文璞, 范小林, 张渝昌, 邓家瑞, 夏亮辉, 张旭亮. 1996. “雪峰古陆”加里东期的构造性质和构造演化[J]. 中国区域地质, 15(2):150-160.

邱元禧, 张渝昌, 马文璞. 1999. 雪峰山的构造性质与演化——一个陆内造山带的形成演化模式[M]. 北京:地质出版社. 1-154.

王加, 温汉捷, 李超, 丁伟, 张锦让. 2011. 黔东南石英脉型金矿毒砂 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. 地质学报, 85(6):955-964.

王秀璋, 梁华英. 1999. 金山金矿成矿年龄测定及华南加里东成金期的讨论[J]. 地质论评, 45(1):19-25.

魏道芳. 1993. 铲子坪金矿成矿物质来源及成矿机理的地球化学研究[J]. 湖南地质, 12(1):29-34.

杨燮. 1992. 湖南沃溪金-锡-钨矿床成矿物质来源及成矿元素的共生机制[J]. 成都地质学院学报, 19(2):23-31.

张理刚. 1985. 湘西雪峰山隆起区钨锡金矿床稳定同位素地质学[J]. 地质与勘探, 21(11):24-28.

张婷, 彭建堂. 2014. 湘西合仁坪钠长石-石英脉型金矿床围岩蚀变及质量平衡[J]. 地球科学与环境学报, 36(4):32-44.

中国人民武警黄金部队黄金指挥部. 1996. 湖南沃溪式层控金矿地质[M]. 北京:地震出版社.

朱炳泉. 1998. 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. 1-330.

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[J]. 中国地质, 33(5):1092-1099.

祝亚男. 2014. 湘西 Au-Sb-W 矿床矿石矿物的矿物学和地球化学研究[博士学位论文]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所. 92页.