

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.132>



湘西花垣矿集区柔先山铅锌矿床的成矿时间和物质来源

谭娟娟, 刘重芃, 杨红梅, 蔡应雄, 卢山松

中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205

摘要: 花垣矿集区位于我国湘西—黔东成矿带, 作为世界级的超大型铅锌矿床之一, 预测储量超过千万吨, 位于花垣矿集区中部渔塘矿田的柔先山铅锌矿床是区内典型的铅锌矿床。采用闪锌矿 Rb-Sr 分相法获得了柔先山铅锌矿床的 Rb-Sr 等时线年龄为 412 ± 6 Ma (MSWD=1.5, 初始 $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}=0.709\,32$), 地质时代为早泥盆世, 这一年龄限定了花垣地区铅锌矿床的时代。柔先山矿床的铅锌矿矿石流体包裹体、Sr-S-Pb 同位素示踪研究显示, 成矿流体可能是地层封存水与后期迁移流体的混合, 成矿元素中的铅主要来源于围岩, 硫由赋矿层位之上的含膏岩层经历热化学还原过程供给, 铅和锶同位素特征都指示上地壳来源。

关键词: 花垣矿集区; 柔先山矿床; 铅锌矿床; 闪锌矿 Rb-Sr 等时线; 同位素; 成矿流体; 地球化学。

中图分类号: P597.3

文章编号: 1000-2383(2018)07-2438-11

收稿日期: 2018-04-17

Geochronology and Ore-Forming Material Source Constraints for Rouxianshan Pb-Zn Deposit in Huayuan Ore Concentration Area, Western Hunan

Tan Juanjuan, Liu Chongpeng, Yang Hongmei, Cai Yingxiong, Lu Shansong

Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

Abstract: In Western Hunan-Eastern Guizhou metallogenic belt, the Huayuan ore concentration area with ten-million-ton expected reserves of Pb and Zn, is one of the world-class super-large Pb-Zn ore deposits. Rouxianshan Pb-Zn deposit located in the center of Huayuan area, is a typical deposit in the Yutang ore field. This study carries out Rb-Sr geochronology study of sphalerites from Rouxianshan, and utilizes phase-separation method to achieve an ideal Rb-Sr isochron line, yielding an Early Devonian age of 412 ± 6 Ma (MSWD=1.5, initial $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}=0.709\,32$), which is meaningful for constraining the ore-forming age in Huayuan area. The fluid inclusions, Sr-S-Pb isotopic composition of ore samples from Rouxianshan have also been analyzed. The results indicate that the ore-forming fluid may have originated from a mixture of strata-sealed water and transporting fluid, and the ore is characterized by Pb-Sr isotopic composition from upper crust. Further, the Pb in ores mainly comes from the wall rocks, and the S attributed to the thermo-chemical sulfate reduction (TSR) of overlying gypsum-bearing rock formation.

Key words: Huayuan ore-concentration area; Rouxianshan ore; Pb-Zn deposit; sphalerite Rb-Sr isochron line; isotope; ore-forming fluid; geochemistry.

湘西—黔东成矿带是我国典型的层控型金属矿集区, 具有易开采易选冶等优点, 前人从 20 世纪 50 年代开始了地质勘查工作(杨绍祥和劳可通, 2007)。

其中花垣铅锌矿集区位于湘黔铅锌矿带的北延, 是湘西北地区最具找矿潜力的铅锌成矿区。花垣铅锌矿集区位于扬子陆块东南缘与雪峰(江南)造山带过

基金项目: 中国地质调查局项目(Nos.12120114005701, DD20160029); 国土资源部公益性行业专项(No.201411075)。

作者简介: 谭娟娟(1985—), 女, 工程师, 从事同位素地球化学和矿床地球化学研究。ORCID: 0000-0002-5141-7274。

E-mail: heiditan@foxmail.com

引用格式: 谭娟娟, 刘重芃, 杨红梅, 等, 2018. 湘西花垣矿集区柔先山铅锌矿床的成矿时间和物质来源. 地球科学, 43(7): 2438—2448.

渡区(杨绍祥和劳可通,2007;陈明辉等,2011),构造上该区位于湘黔断裂带中部(刘文均,1985;杨志坚,1987),经历了晋宁期碰撞造山、加里东期拉张裂陷—被动大陆边缘盆地—前陆盆地(尹福光等,2001)以及印支期—燕山期陆内变形等演化过程,形成了多种金属和非金属矿产,区内的典型矿床如团结、耐子堡、李梅、土地坪、狮子山、渔塘、老虎冲等由北向南分布,在西南方的延伸区域还有贵州的松桃嗅脑和铜仁卜口场铅锌矿床。多年来,前人对矿床成因和成矿规律开展了大量讨论,尤其是近年对赋矿地层的沉积构造分析、矿田剖面序列、古地理构造环境,以及区域地球物理、地球化学等方面有了更深入地研究,从而对于湘西北地区铅锌矿成矿规律与找矿方向有了进一步分析,对区内铅锌矿的地质勘察工作起了重要指导作用(罗卫等,2009;段其发等,2014;杨红梅等,2015;薛长军等,2017)。然而,对于花垣区内的矿床年代学研究还比较有限,20世纪学者在区内的渔塘矿床的含矿岩层及其下层位发现了三叶虫化石(张欣平和邓华龙,1984),说明成矿不早于中寒武世;此后仅有花垣矿集区内的狮子山铅锌矿床在近年有闪锌矿的 Rb-Sr 等时线年龄被报道,为早泥盆世的 410 ± 12 Ma(MSWD=2.20),说明这一明显晚于地层的时代可能指示了流体运移活动(段其发等,2014)。本研究对花垣矿集区内鱼塘矿田中赋存于下寒武统清虚洞组藻灰岩中的柔先山铅锌矿床开展了闪锌矿 Rb-Sr 同位素定年和 Pb、S 稳定同位素和流体包裹体研究,以期为该区铅锌矿床的形成时限提供进一步的精确厘定,为探讨矿床成因提供同位素年代学和同位素地球化学依据。

1 矿区地质概况

渔塘柔先山铅锌矿床位于湘西—黔东铅锌矿带北延花垣铅锌矿集区中段,矿床大地构造上跨越上扬子地块和江南地块(北西缘)2个二级大地构造单元。矿区内地质活动不明显,仅在局部地区分布有小规模的基性岩床。由于经历了武陵期、雪峰—加里东期、海西期、印支—燕山期多阶段的发展,区内广泛发育断裂构造,起着控相控矿作用。北东向古丈复背斜、桑植复向斜为区内的主要褶皱,断裂主要呈北东东—北东—北北东向弧形展布,以花垣—保靖、松桃—渔塘、玉屏—铜仁—保靖断裂为主,构成北东向保靖收敛,南西向黔东撒开的帚状(图 1)。区域上主要的控矿断裂是张家界—花垣—茶洞大断裂,在研究区出露较好,

走向为北东向 $30^\circ \sim 50^\circ$,倾角变化较大, $45^\circ \sim 80^\circ$ 不等,产状多沿走向小角度倾伏,指示为以左行走滑为主的正断层,整体上断裂带破碎强烈,局部宽度可达 200 m 左右;矿区褶皱规模较小,其中最主要的李梅背斜呈小起伏的弯窿状构造。矿区内地层倾角平缓(多为 $3^\circ \sim 10^\circ$),次级断裂和裂隙构造发育。

柔先山矿区内地层主要有下寒武统石牌组、下寒武统清虚洞组、中寒武统高台组、中上寒武统娄山关组和第四系。其中下寒武统清虚洞组又可分为 5 段(表 1,刘文均和郑荣才,2000a),铅锌矿主要产出下寒武统清虚洞组的 2、3 段,沿大陆边缘呈北北东向分布的丘—礁相藻灰岩、台缘浅滩相颗粒灰岩及其间的泥质灰岩中。矿体形态以缓倾斜整合层状为主,似层状—透镜状和非整合型的陡倾斜脉状次之。缓倾斜整合层状矿体规模较大,走向长度 600~1 500 m,倾向延深 200~600 m,平均厚度 2.45~4.34 m,Pb 平均品位 0.36%~1.00%,Zn 平均品位 1.59%~2.56%;透镜状矿体走向长度 300~700 m,倾向延深 100~350 m,平均厚度 2.93~4.50 m,Pb 平均品位 0.97%~1.20%,Zn 平均品位 0.61%~2.14%;非整合型矿体包括沿构造裂隙充填的脉状、囊状、筒状和其他不规则状矿体,矿体规模小,一般长 250 m 左右,延深 20~60 m,厚度 1~3 m,这种矿体中产出的矿石品位较高:Pb 平均品位 3.99%~4.24%,Zn 平均品位 5.57%。

柔先山铅锌矿床中的矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿和少量黄铁矿,偶见白铁矿、脆硫锑铅矿等;脉石矿物主要为方解石、白云石和少量萤石。矿石结构多呈他形一半自形粒状、他形隐—微粒状、交代充填和包含结构等。矿石构造主要有网脉状、致密块状、浸染状、角砾状、脉状及条带状(图 2a~2c)。镜下观察显示,矿石中的闪锌矿呈自形一半自形粒状,粒径多数为 0.2~0.5 mm,部分 0.5~1.0 mm,在薄片上呈致密浸染状、细脉状或星散状分布;黄铁矿呈半自形—他形粒状(图 2f~2h)。早期方解石多呈泥晶胶结物状(图 2a~2b),晚期的热液方解石则晶型发育(图 2c,2e,2f),在浸染状矿石的手标本中可观察到:自形一半自形的闪锌矿和晚期方解石一起形成细脉或充填孔隙,可视为同期形成的产物。

2 分析方法和结果

2.1 闪锌矿的 Rb-Sr 同位素分析

本次用于 Rb-Sr 同位素定年的样品采自花垣渔

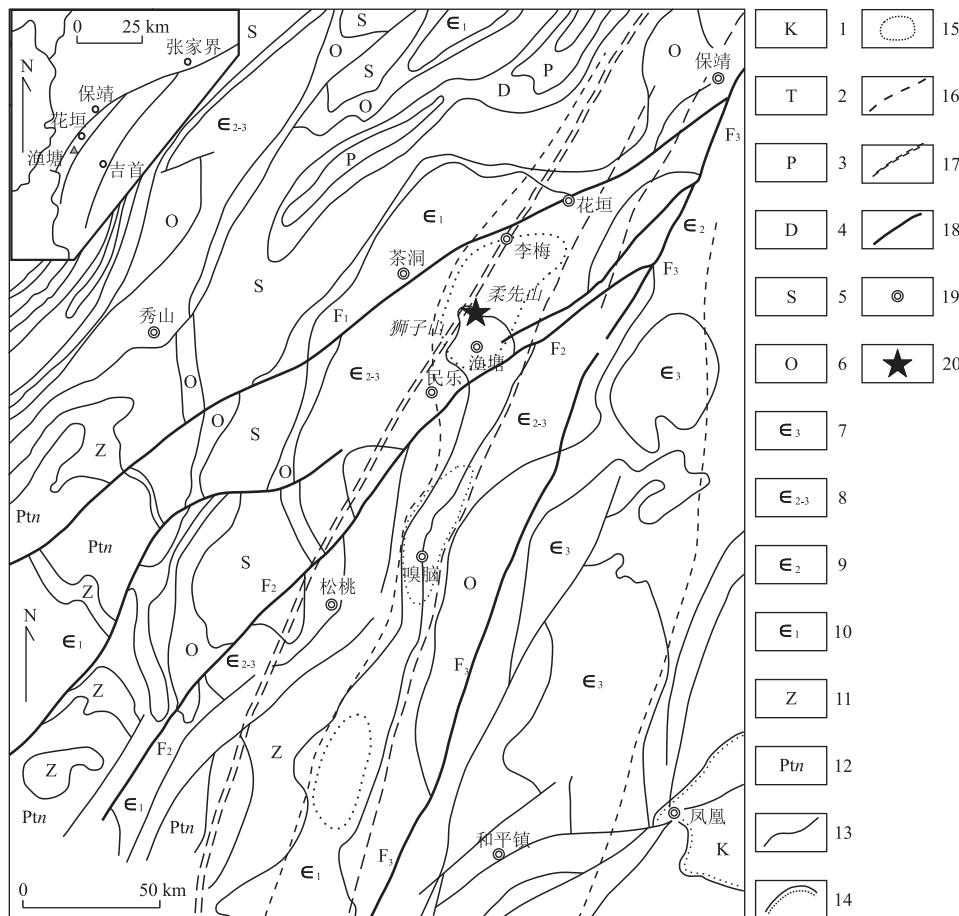


图 1 湘西黔东区域地质简图及矿床位置

Fig.1 Geological sketch of the ore deposits in western Hunan-eastern Guizhou area

1.白垩系;2.三叠系;3.二叠系;4.泥盆系;5.志留系;6.奥陶系;7.上寒武统牛蹄塘组黑色薄层状含碳质页岩和石牌组中一薄层状泥晶粉砂岩;8.中一上寒武统;9.中寒武统灰白色中一薄层状泥质白云岩;10.下寒武统层状灰岩、砂屑灰岩、藻灰岩、亮晶鲕粒灰岩、白云岩;11.震旦系;12.板溪群;13.地层界线;14.不整合接触界线;15.实测或推测礁藻界线;16.矿带界线;17.根据重磁资料解释的深大断裂;18.地表断层;19.县城;20.柔先山矿床;F₁.保靖—花垣断裂;F₂.松桃断裂;F₃.玉屏—铜仁断裂.图 1 据陈明辉等(2011)、湖南省地质调查院(2011)、蔡应雄等(2015)、匡文龙等(2015)、胡太平等(2017)修改

表 1 花垣矿区下寒武统清虚洞组沉积相及含矿层位

Table 1 The sedimentary facies and ore-bearing strata in Qingxudong Formation, Lower Cambrian, Huayuan ore concentration area

层位分段		岩性	沉积相	厚度(m)	矿化
1	白云岩段	灰白色厚层—纹层白云岩	潮坪相	70~120	
2	鲕粒灰岩段	灰白色厚层块状亮晶灰岩—鲕粒灰岩—碎屑灰岩	台缘浅滩相	6~70	次要矿化层位
3	藻灰岩段	灰白色厚层块状藻灰岩藻屑—砂屑灰岩顶部夹透镜状灰黑色泥质条带灰岩及角砾灰岩	丘—礁相礁间通道向	8~125	主要矿化层位
4	泥晶灰岩段	灰—绿色中厚层砂屑泥晶灰岩	上缓坡相	10~50	
5	条带灰岩	深灰色中薄层泥质条带灰岩	下缓坡相	50~100	

塘矿田的柔先山矿区 5 号矿井的井下(井口坐标: E109°19'51", N28°26'23").8 件样品均为新鲜的浸染状矿石, 属于主成矿阶段的产物, 伴有热液蚀变产生的方解石。样品采集于同一矿体局部较小的范围内, 结晶程度好, 闪锌矿纯度高, 满足热液矿物 Rb-Sr 等时线测年对样品“同时、同源、封闭”的前提要求(李

文博等, 2002)。

Rb、Sr 的含量和 Sr 同位素比值分析在中国地质调查局武汉地质调查中心同位素地球化学研究室的热电离质谱仪 TRITON 上完成。为了获得更理想的等时线年龄, Rb-Sr 的同位素年代学测试的化学预处理部分采用了分相法: 先用 0.2 mol/L HCl 对

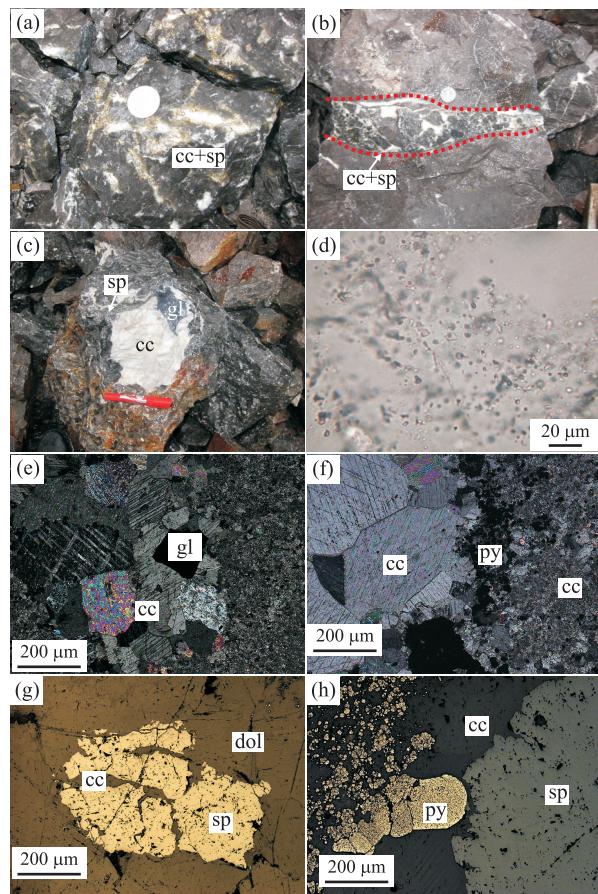


图 2 花垣矿集区柔先山铅锌矿床矿体、矿石照片和薄片照片

Fig.2 The pictures of hand specimen, fluid inclusions and

thin sections of the ores from Rouxianshan deposit

a.网脉状方解石-闪锌矿石(浅黄色为闪锌矿,白色为方解石);b.细脉状闪锌矿矿体(方解石、浅黄色闪锌矿围绕灰岩角砾边缘分布);c.铅锌矿石(团块状闪锌矿、方铅矿分布于灰岩晶洞中的方解石边缘);d.方解石中成群分布的包裹体;e.方解石脉中的方解石和石榴石;f.脉石中的亮晶方解石(左)和泥晶方解石胶结物(右),中间为黄铁矿脉;g.矿石中的闪锌矿颗粒,裂隙被方解石和白云石充填;h.矿石中的自形闪锌矿、方解石和他形黄铁矿;sp.闪锌矿;G.方铅矿;py.黄铁矿;cc.方解石;dol.白云石

挑纯的闪锌矿单矿物进行浸泡,过滤后得到的硫化物用王水溶解后,再进行 Rb-Sr 同位素质谱分析,具体分析方法见杨红梅等(2015, 2018).Rb、Sr 的流程空白分别为 $\sim 1 \times 10^{-10}$ 和 $\sim 5 \times 10^{-10}$.整个分析过程采用标准物质 GBW04411、NBS607 和 NBS987 进行质量监控,其中 GBW04411 的 Rb、Sr 含量(10^{-6})和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分别为 249.9 ± 0.7 、 158.8 ± 0.5 和 $0.760\ 09 \pm 0.000\ 03$ (2σ), NBS607 分别为 523.6 ± 0.9 、 65.54 ± 0.26 和 $1.200\ 50 \pm 0.000\ 02$, NBS987 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值平均值 $0.710\ 32 \pm 0.000\ 04$,分析结果与其证书推荐值在误差范围内完全一致,表明 Rb-Sr 测试数据可靠可信。

柔先山矿床的闪锌矿分相 Rb-Sr 同位素分析的结果列于表 2,分析数据显示闪锌矿样品具有高 Rb、低 Sr 的特征, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值在 $0.046\ 5$ 到 $0.398\ 5$ 之间,变化范围大,用 Isoplot 程序计算得到闪锌矿矿物 Rb-Sr 参考等时线年龄为 412 ± 6 Ma (MSWD=1.5, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.709\ 32$, 图 3).

2.2 柔先山矿床中硫化物的 S、Pb 同位素分析

笔者在柔先山矿区采集了 10 件主成矿期矿石中的硫化物样品进行 S 同位素分析,另选取了两个样品进行 Pb 同位素分析.单矿物挑选新鲜部分破碎至 $60\sim 80$ 目后在双目镜下挑选,硫化物单矿物纯度大于 99%.样品的 S、Pb 同位素分析均在中国地质调查局武汉地质调查中心同位素实验室完成,硫同位素和铅同位素分析的具体过程见蔡应雄等(2014).

本文分析了 4 件方铅矿和 4 件闪锌矿样品的硫同位素组成(表 3),并统计前人发表的 87 件矿石硫化物样品的硫同位素组成,分析及统计结果列于表 4.柔先山矿床中全部矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $26.36\% \sim 33.54\%$,平均值为 29.97% ;其中方铅矿为 $26.36\% \sim 27.62\%$,平均值为 6.96% ;闪锌矿为 $32.51\% \sim 33.54\%$,平均值 32.97% .两个方铅矿的 Pb 同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 $18.114 \sim 18.102$ 、 $15.698 \sim 15.682$ 和 $38.306 \sim 38.283$,变化范围很小.

3 流体包裹体的特征分析

柔先山铅锌矿矿石样品的流体包裹体分析在核工业北京地质研究院完成,测试仪器为英国 Linkam THMSG600 型冷热台,测温范围为 $-196\sim 600\ ^\circ\text{C}$,均一温度误差小于 $2\ ^\circ\text{C}$,冰点温度误差小于 $0.1\ ^\circ\text{C}$.流体包裹体气相成分分析测试仪器为 LAB-HR-VIS LabRAM HR800 型显微激光拉曼光谱仪,波长为 $532\ \text{nm}$,扫描范围为 $100\sim 4\ 200\ \text{cm}^{-1}$,测试环境温度为 $25\ ^\circ\text{C}$,湿度为 50%.本次研究一共分析了 8 张包体测温片中的 97 个包裹体,汇总于表 5 和图 4.

细脉浸染状矿石中闪锌矿、方解石矿物内的包裹体较为发育,主要为成群分布(图 2d),部分呈带状分布,并无明显规律.包裹体以近负晶形的六边形、四边形或三角形为主,少数呈不规则状.其中以无色透明的纯液态包裹体为主,局部视域内发育少量呈无色-灰色的富液包裹体与呈无色-深灰色的气体包裹体.气液比多数在 $10\%\sim 30\%$,但多数集中在 10% 到 15% 之间;包裹体粒径范围在 $2\sim 20\ \mu\text{m}$

表 2 湘西北花垣柔先山铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 同位素组成分析结果

Table 2 The Rb-Sr isotope composition analysis of the sphalerite in Rouxianshan Pb-Zn deposit

样号	样品性质	Rb(10^{-6})	Sr(10^{-6})	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ
14YT-08	闪锌矿矿物	0.162 2	2.257	0.207 2	0.710 53	0.000 05
14YT-17	闪锌矿矿物	0.120 1	4.163	0.083 2	0.709 82	0.000 03
14YT-19GRE	闪锌矿矿物	0.156 5	4.333	0.104 1	0.709 94	0.000 04
14YT-21GRE	闪锌矿矿物	0.155 2	5.467	0.081 9	0.709 82	0.000 02
14YT-23YEW	闪锌矿矿物	0.050 9	0.369	0.398 5	0.711 66	0.000 03
14YT-23GRE	闪锌矿矿物	0.099 8	1.361	0.211 4	0.710 58	0.000 02
14YT-20	闪锌矿矿物	0.074 3	4.613	0.046 5	0.709 59	0.000 02
14YT-25	闪锌矿矿物	0.144 7	6.897	0.060 5	0.709 66	0.000 01

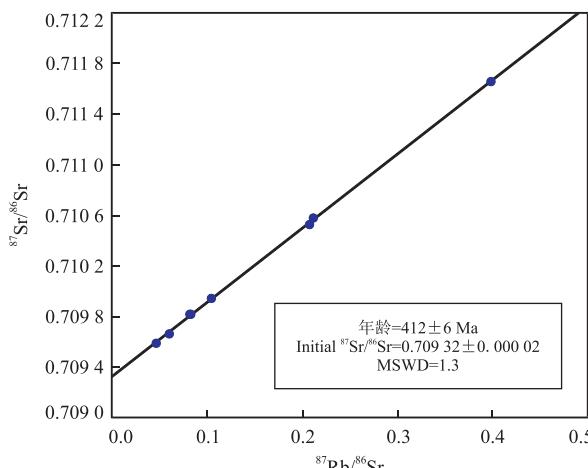


图 3 湘西北花垣柔先山铅锌矿床闪锌矿矿物 Rb-Sr 同位素等时线图

Fig.3 The Rb-Sr isochron line of sphalerite in Rouxianshan ore deposit

表 4 渔塘柔先山矿床中方铅矿的 Pb 同位素组成特征

Table 4 The Pb isotope composition in galena from Rouxianshan deposit

样品号	测定矿物	同位素比值		
		$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
14YT-2	方铅矿	18.114 ± 0.003	15.698 ± 0.002	38.306 ± 0.004
14YT-20	方铅矿	18.102 ± 0.003	15.682 ± 0.003	38.283 ± 0.007

范围多集中在 13%~22% 之间, 属于热卤水范畴.

4 讨论

4.1 柔先山铅锌矿的成矿年龄

成矿时代的精确厘定对于系统认识区内成矿作用和区域成矿规律非常重要, 而碳酸盐地层的年代学研究, 尤其是其中铅锌矿床的定年一直是地质学界一大挑战 (Qiu and Jiang, 2007; 万渝生等, 2010; 高炳宇等, 2012; 杨红梅等, 2015; 卢山松等, 2016). 近年来随着分析测试技术的改进和分析精度的提高, 对矿石矿物进行直接定年的手段也丰富起来, 其中, 用 Rb-Sr 等时线法对闪锌矿进行定年是一种直接测定浅成低温热液硫化物矿床的有效方法 (Nakai *et al.*, 1990; 李文博等, 2002). 闪锌矿中 Rb、Sr 元素的赋存形式前人已有研究 (Nakai *et al.*, 1990; Christensen and Halliday, 1995; 韩以贵等, 2007), 认为可能存在于原生矿物包裹体 (如黑云母、钾长石、绢云母等硅酸盐或方解石等碳酸盐矿物)、流体包裹体、晶格缺陷或八面体晶体的空隙中. 杨红梅等 (2018) 具体探讨了闪锌矿分相 Rb-Sr 定年机理, 对提纯后的闪锌矿单矿物的弱酸提取相和硫化物相 (王水中可溶解相) 进行了 X 射线粉晶衍射和电子探针分析, 结果显示: Rb 与 Pb、Zn 和 Fe 等元素一起分布在硫化物相中, 溶于王水; 而大量 Sr 与 Ca、Mg 等元素分布在弱酸提取相中. 在这样的分相预处理中, 弱酸淋滤的过程把赋存在碳酸盐包裹体

表 3 渔塘柔先山矿床中硫化物的 S 同位素组成

Table 3 The S isotope composition in sulfides from Rouxianshan deposit

样品编号	测试对象	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}} (\text{\textperthousand})$
14YT-01		27.08
14YT-04		27.62
14YT-16	方铅矿	26.36
14YT-25		26.80
14YT-04		32.51
14YT-16A	闪锌矿	32.63
14YT-16B		33.54
14YT-25		33.19

注: CDT 代表 Canyon Diablo Troilite, 国际标准物质迪亚布洛峡谷陨石中的陨硫铁, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 0.

范围内变化, 但以 10 μm 以下居多. 方解石的均一温度变化范围较大, 在 71 $^{\circ}\text{C}$ 到 340 $^{\circ}\text{C}$ 的区间中表现为单峰的近正态分布, 80~180 $^{\circ}\text{C}$ 之间的居多, 在 120~140 $^{\circ}\text{C}$ 达到峰值; 而笔者在闪锌矿中观察到的包裹体数目少于方解石, 均一温度集中在 80~100 $^{\circ}\text{C}$. 柔先山的方解石和闪锌矿中包裹体的盐度

表5 柔先山铅锌矿床流体包裹体显微特征及均一温度

Table 5 Summary of fluid inclusion data of minerals in Rouxianshan Deposit

样品号	矿物	包裹体形态	包裹体类型	大小(μm)	气液比(%)	均一温度(℃)	盐度(%)
14YT-01	方解石	成群分布形态规则	富液	2~10	10~30	71~348	14.25~22.38
14YT-08	闪锌矿	成群分布形态规则	富液	2~5	10	77~80	15.27
14YT-09	方解石	均匀分布形态规则	富液	4~10	10~30	71~348	15.27~23.18
14YT-09	闪锌矿	成群分布形态规则	富液	3~5	10	85~103	16.43~22.44
14YT-12	方解石	均匀分布形态规则	富液	2~6	10	80~90	13.9~14.04
14YT-12	方解石	均匀分布形态规则	富液	5~12	10~15	95~180	13.94~18.88
14YT-19	方解石	成群分布形态规则	富液	5~20	15~20	110~244	1.74~12.85
14YT-20	方解石	成群分布形态规则	富液	4~12	5~10	83~125	20.45~22.24
14YT-20	闪锌矿	均匀分布形态规则	富液	4~10	5	65~104	20.45~22.38
14YT-25	方解石	成群分布形态规则	富液	4~20	15~25	121~273	4.80~12.96

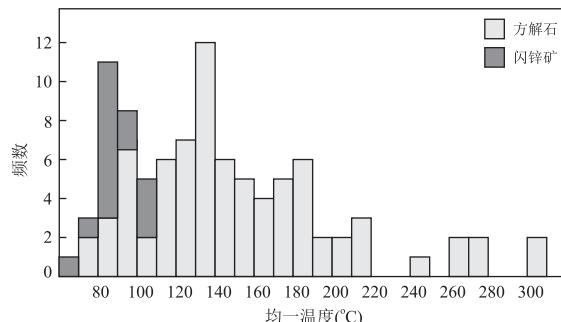


图4 柔先山矿床中方解石和闪锌矿的包裹体均一温度直方图

Fig.4 Histogram of homogenization temperature of inclusions in calcite and sphalerite from Rouxianshan deposit

中的普通 Sr 过滤去除,消除了方解石包裹体和次生流体包裹体中的普通 Sr 对硫化物中放射性成因 Sr 的干扰,而通过把王水溶解后的溶液离心过滤,把不溶于王水的黑云母等硅酸盐矿物滤除,进一步消除影响。王水溶解的硫化物相比单纯酸提取相的 Rb/Sr 比值变化范围大大提高,这样可以获得更理想的 Rb-Sr 等时线年龄,反映矿床的形成时代(杜国民等,2012;杨红梅等,2012, 2015;段其发等,2014)。

本次研究得到的柔先山矿床的 Rb-Sr 等时线年龄为 412 ± 6 Ma, 地质时代为早泥盆世。这条等时线由 8 个样品的数据点构成,所有样品都落在等时线上且分布合理,相对误差小、精度高,可以作为矿床的形成年龄。这个年龄与段其发等(2014)报道的同属于花垣矿集区的狮子山矿床的年龄 410 ± 12 Ma 在误差范围内一致,表明这可能与雪峰隆起在晚志留世开始的持续隆升有关。华南地区存在广泛的加里东变形事件,雪峰隆起西界上的张家界—花垣—凯里断裂带很可能是其影响范围的最西边缘(胡召齐等,2010),这种构造热事件可以促成成矿流体在有利部位汇集形成矿床。

4.2 柔先山矿床的成矿物质来源

4.2.1 柔先山矿床的流体包裹体特征 柔先山铅锌矿床中闪锌矿及脉石方解石中的流体包裹体的特征是:(1)以富液相包裹体为主、气液两相包裹体较少;(2)粒径多为 $3\sim15\text{ }\mu\text{m}$,半规则状成群分布;(3)均一温度集中于 $80\sim200\text{ }^{\circ}\text{C}$;(4)盐度属于热卤水范围。这与文献中对狮子山、李梅、渔塘、松桃、耐子堡等湘西—黔东下寒武统铅锌矿床的流体包裹体主要特征的描述一致(蔡应雄等,2014),由于区内其他层位中产出的铅锌矿矿体也有类似的流体包裹体温度盐度特征,如下奥陶统的洛塔铅锌矿和中寒武统的凤凰铅锌矿床(杨绍祥和劳可通,2007;匡文龙等,2015),所以区内不同铅锌矿床的成矿流体很可能最初源于相同的地层封存水,后期混合了区域迁移的其他流体(刘文均等,2000a;杨绍祥和劳可通,2007;蔡应雄等,2014)。

4.2.2 柔先山矿床的同位素示踪 影响含硫矿物中硫同位素组成的主要因素包括流体中的总硫同位素组成($\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{s}}$)、矿物从流体中沉淀时的温压和 pH 值、氧逸度条件以及体系开放程度等(郑永飞,2001; Hoefs, 2009)。柔先山矿床的硫化物主要为闪锌矿、方铅矿和少量黄铁矿,笔者野外和镜下观察都没有发现硫酸盐,属于低氧逸度的典型矿物组合,一般认为这种情况下的硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值基本能代表成矿流体的总硫值 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{s}}$ (Ohmoto, 1972),因此可以利用矿石硫化物的硫同位素来进行成矿流体的 S 来源示踪。柔先山矿床中全部矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $26.4\text{‰}\sim33.5\text{‰}$,平均值为 30.0‰ ,闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 比值区间全部大于铅锌矿的比值区间,这个 $\delta^{34}\text{S}$ 闪锌矿 $>\delta^{34}\text{S}$ 方铅矿的特征可以表明该矿床中成矿流体很可能已基本达到硫同位素平衡。表 6 展示了花垣地区部分铅锌矿床硫同位素组成特征,从表中可以

表 6 花垣地区部分铅锌矿床硫同位素组成特征

Table 6 Characteristics of the S isotope composition in sulfides from typical Pb-Zn deposits in Huayuan area

矿床	测定矿物	样品数	$\delta^{34}\text{S}(\text{\textperthousand})$		资料来源
			变化范围	平均值	
柔先山	闪锌矿	5	33.19~33.54	32.97	本文
	方铅矿	4	26.36~27.62	26.96	
狮子山	闪锌矿	10	31.30~34.10	32.78	蔡应雄等, 2014; 曹亮等, 2017
	方铅矿	8	24.93~27.60	26.74	
	黄铁矿	2	32.80~33.00	32.90	
李梅	闪锌矿	10	28.80~33.13	31.33	蔡应雄等, 2014; 曹亮等, 2017
	方铅矿	6	22.46~26.37	25.22	
	黄铁矿	2	25.70~34.66	30.18	
耐子堡	闪锌矿	5	27.06~33.36	29.86	曹亮等, 2017
	方铅矿	2	23.96~26.59	25.27	
	黄铁矿	2	26.87~30.91	28.89	
大石沟	闪锌矿	23	28.6~33.1	31.2	李塑等, 2017
	方铅矿	7	24.5~27.7	26.4	
土地坪	闪锌矿	7	29.3~32.3	31.2	李塑等, 2017
	方铅矿	3	25.2~29.6	26.9	

看出, 柔先山矿床的硫同位素比值数据($\delta^{34}\text{S}=26.36\text{\textperthousand} \sim 33.54\text{\textperthousand}$)与同属于花垣矿集区的其他邻近矿床如狮子山、耐子堡等数据也十分接近, $\delta^{34}\text{S}$ 值都位于 $22.4\text{\textperthousand} \sim 33.6\text{\textperthousand}$ 范围内。这些数据反映了区内矿床的硫同位素数据整体较集中, 以重硫为主。

目前海相硫酸盐转化为还原硫的机制主要有有机质中硫的热降解、生物作用还原(BSR) 和热化学还原(TSR) 这 3 种, 其中前两种机制都发生在相对低温的条件下, 而热化学还原的过程通常是在相对高温($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的条件下产生大量还原硫, 且还原硫与其来源硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值之间有 $0\text{\textperthousand} \sim 15\text{\textperthousand}$ 的偏差。柔先山铅锌矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 均值为 $29.8\text{\textperthousand}$, 与同期海水硫酸盐 $\sim 30\text{\textperthousand}$ 的 $\delta^{34}\text{S}$ 非常接近(Hoelser, 1977), 所有 $\delta^{34}\text{S}$ 数据所在的范围($26.36\text{\textperthousand} \sim 33.54\text{\textperthousand}$)与海水硫酸盐之间的差值都小于 $10\text{\textperthousand}$, 这些都与热化学还原作用的特征一致。一般沉积地层中的膏岩层与同期海水硫酸盐有一致的硫同位素组成, 而湘西黔东地区广泛分布的中上寒武统蒸发相白云岩中发育了巨厚的含膏岩层, 而前人发表的湘黔地区下寒武统底部的沉积重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的变化范围在 $32.30\text{\textperthousand} \sim 33.54\text{\textperthousand}$ (刘文均和郑荣才, 2000b), 这些岩层都可能为矿床提供了丰富的硫。

热化学还原作用通常需要有机质作为还原剂参与, 有机流体对铅锌矿床中金属元素的迁移和聚集过程也起着重要作用(李荣西等, 2012; 熊索菲等, 2016)。前人在渔塘及相邻的半坡和耐子堡矿床的闪锌矿包裹体中测得了较高的有机质含量, 其中甲烷摩尔含量可达 2.86% ; 乙、丙、丁烷的摩尔含量

也可达 0.34% (刘文均和郑荣才, 1999), 这些低分子正烷烃可能在 TSR 过程中起到了热降解作用, 在一定的温压条件下正烷烃因为失去氢而转化为芳烃, 通过消耗氢而还原硫。另外, 前人对这些矿床围岩灰岩的方解石中烃类组成特征分析显示: 主要成矿阶段的包裹体中 CH_4 的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $-27.08\text{\textperthousand}$ ($-27.97\text{\textperthousand} \sim -26.13\text{\textperthousand}$, PDB), CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 的主要部分平均值为 $-17.28\text{\textperthousand}$, $\delta^{13}\text{C}$ 负值较大这一特点也表明成矿流体可能主要为与油气有关的有机来源(刘文均和郑荣才, 2000b)。

笔者把本文获得的铅同位素和前人在花垣地区的狮子山、李梅、耐子堡等矿床得到的数据一起投影在 Zartman and Doe(1981) 提出的铅构造模式图中(图 5), 这些矿床的数据大部分落于上地壳铅和造山带铅之间。柔先山的两个数据点与前人的方铅矿范围一致, 略高于围岩的分布范围, 位于上地壳铅附近, 显示成矿物质中的铅主要来自于围岩。

锶同位素在海相碳酸盐的研究中有广泛应用, 因为锶在海水中的残留时间($\approx 10^6\text{ a}$)远大于海水的混合时间($\approx 10^3\text{ a}$), 所以全球范围内的海相锶同位素组成在地质历史中的某一特定时期是均一的, 海水中锶同位素的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值是时间的函数, 即随时间变化而变化(Burke *et al.*, 1982; McArthur *et al.*, 1992)。本文获得的闪锌矿的锶同位素数据变化范围为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.709\ 59 \sim 0.711\ 66$, 通过等时线获得的 Sr 初始值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 为 $0.709\ 32$, 这个值落在了赋矿地层清虚洞组灰岩的 Sr 同位素比值范围之内($0.708\ 89 \sim 0.709\ 36$, Schneider *et al.*,

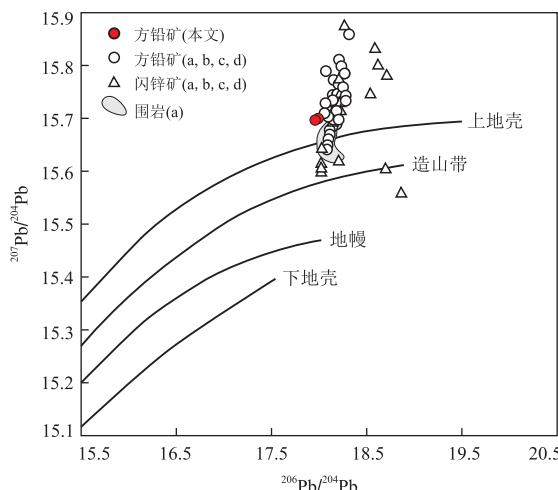


图5 铅同位素构造模式

Fig.5 Tectonic model diagram of Pb isotope from Pb-Zn deposits in Huayuan area

数据引自蔡应雄等(2014)、曹亮等(2017)、李堃等(2017)、付胜云等(2006)、周云等(2016)

2002),表明成矿流体中的锶主要来源是地壳,这也与上文中的铅同位素特征一致。

5 结论

(1)湘西花垣矿集区柔先山矿床主成矿阶段的闪锌矿 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 412 ± 6 Ma (MSWD=1.5), 表明矿床形成于早泥盆世, 与同属于花垣矿集区的狮子山矿床年龄在误差范围内一致, 这一年龄对于整个花垣矿集区的铅锌矿成矿时代都有指示意义。

(2)柔先山铅锌矿床中闪锌矿及脉石方解石中的流体包裹体以富液相为主、气液两相包裹体较少、均一温度集中于 $80\sim200$ °C、盐度属于热卤水范围, 说明成矿流体很可能是地层封存水与后期迁移流体的混合来源。

(3)柔先山矿床中全部矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $26.36\text{\%}_{\text{o}}\sim33.54\text{\%}_{\text{o}}$, 平均值为 $29.97\text{\%}_{\text{o}}$, 成矿的硫很可能由寒武纪巨厚碳酸盐岩地层中的海水硫酸盐通过热化学还原过程产生, 有机质也许起到了一部分还原剂的作用。

(4)铅同位素比值位于上地壳铅附近, 略高于围岩铅的范围, 显示成矿流体中的铅主要来自于围岩。柔先山闪锌矿矿石获得的 Rb-Sr 等时线的锶同位素初始值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 0.709 32, 与赋矿地层的锶同位素比值基本一致, 表明成矿元素主要来源于地壳。

致谢:野外踏勘和采样工作中得到了武汉地质调查中心汤朝阳研究员和李堃高级工程师提供的帮助,两名匿名审稿专家对本文提出了非常有益的修改意见,一并在此表示衷心感谢!

References

- Burke, W.H., Denison, R.E., Hetherington, E.A., et al., 1982. Variation of Seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic Time. *Geology*, 10(10): 516. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1982\)10;1-516](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1982)10;1-516)
- Cai, Y.X., Yang, H.M., Duan, R.C., et al., 2014. Fluid Inclusions and S, Pb, C Isotope Geochemistry of Pb-Zn Deposits Hosted by Lower Cambrian in Western Hunan-Eastern Guizhou Area. *Geoscience*, 28(1): 29–41 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8527.2014.01.003>
- Cai, Y.X., Tan, J.J., Yang, H.M., et al., 2015. The Origin of Ore-Forming Material in the Tongshanling Cu-Poly-metallic Ore Field in Hunan Province: Constraints from S-Pb-C Isotopes. *Acta Geologica Sinica*, 89(10): 1792–1803 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.0001-5717.2015.10.007>
- Cao, L., Duan, Q.F., Peng, S.G., et al., 2017. Sources of Metallogenic Materials of Lead-Zinc Deposits in Western Hunan Province: Evidence from S and Pb Isotopes. *Geological Bulletin of China*, 36(5): 834–845 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-2552.2017.05.015>
- Chen, M.H., Hu, X.Z., Bao, Z.X., et al., 2011. Geological Features and Metallogenesis of the Yutang Pb-Zn Ore Concentration Belt in Hunan Province. *Geology and Exploration*, 47(2): 251–260 (in Chinese with English abstract).
- Christensen, J.N., Halliday, A.N., 1995. Direct Dating of Sulfides by Rb-Sr: A Critical Test Using the Polaris Mississippi Valley-Type Zn-Pb Deposit. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 59(24): 5191–5197. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00345-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00345-2)
- Du, G.M., Cai, H., Mei, Y.P., 2012. Application of Rb-Sr Isochron Dating Method in Sphalerite of Sulphide Deposits: A Case Study from Dagoudong Pb-Zn Deposit in Xinhua, Western Hunan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 28(2): 175–180 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3701.2012.02.011>
- Duan, Q.F., Cao, L., Zeng, J.K., et al., 2014. Rb-Sr Dating of Sphalerites from Shizishan Pb-Zn Deposit in Huayuan Ore Concentration Area, Western Hunan, and Its Geological Significance. *Earth Science*, 39(8): 977–999 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0962.2014.08.011>

- Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.089>
- Fu, S.Y., Peng, Z.G., Liu, H.M., 2006. The Geological Characteristics in Zn-Pb Metallogenic Belt, Northwestern Hunan. *Land and Resources Herald*, 3(3):99—103 (in Chinese).
- Gao, B.Y., Xue, C.J., Chi, G.X., et al., 2012. Re-Os Dating of Bitumen in the Giant Jinding Zn-Pb Deposit, Yunnan and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1561—1567 (in Chinese with English abstract).
- Han, Y.G., Li, X.H., Zhang, S.H., et al., 2007. Single Grain Rb-Sr Dating of Euhedral and Cataclastic Pyrite from the Qiyugou Gold Deposit in Western Henan, Central China. *Chinese Science Bulletin*, 52(11): 1307—1311 (in Chinese). <https://doi.org/10.3321/j.issn:0023-074X.2007.11.015>
- Hoefs, J., 2009. Stable Isotope Geochemistry. 6th Edition. Springer Berling Heidelberg, Berlin, 123—146.
- Holser, W. T., 1977. Catastrophic Chemical Events in the History of the Ocean. *Nature*, 267(5610): 403—408. <https://doi.org/10.1038/267403a0>
- Hu, T.P., Wang, M.F., Ding, Z.J., et al., 2017. C, O, S and Pb Isotopic Characteristics and Sources of Metallogenic Materials of Limei Pb-Zn Deposit in Huayuan County, Western Hunan Province. *Mineral Deposits*, 36(3): 623—642 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2017.03.006>
- Hu, Z.Q., Zhu, G., Zhang, B.L., et al., 2010. K-Ar Geochronology of the Caledonian Event in the Xuefeng Uplift. *Geological Review*, 56(4): 490—500 (in Chinese with English abstract).
- Hunan Institute of Geological Survey, 2011. Survey Report of Pb-Zn deposits in Huayuan-Fenghuang Area, Hunan Province.
- Kuang, W.L., Xiang, S.C., Xiao, W.Z., et al., 2015. Metallogenic Geological Characteristics and Genesis of Lead-Zinc Deposits in Northwestern Hunan. *Mineral Deposits*, 34(5): 1072—1082 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2015.05.014>
- Li, K., Duan, Q.F., Zhao, S.R., et al., 2017. Material Sources and Ore-Forming Mechanism of the Huayuan Pb-Zn Ore Deposit in Hunan Province: Evidence from S, Pb, Sr Isotopes of Sulfides. *Geological Bulletin of China*, 36(5): 811—822 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-2552.2017.05.013>
- Li, R.X., Dong, S.W., Zhang, S.N., et al., 2012. Features and Formation of Organic Fluids during Dabashan Orogenesis. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 48(3): 295—307 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13232/j.cnki.jnju.2012.03.005>
- Li, W.B., Huang, Z.L., Xu, D.R., et al., 2002. Rb-Sr Isotopic Method on Zinc Lead Ore Deposits: A Review. *Geotectonica et Metallogenesis*, 26(4): 436—441 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2002.04.015>
- Liu, W.J., 1985. Evolution of Hunan-Guizhou Fault Zone and the Features of Mineralization. *Geological Review*, 31(3): 224—231 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16509/j.georeview.1985.03.005>
- Liu, W.J., Zheng, R.C., 1999. Research of Fluid Inclusion Gas Composition in Huayuan Lead-Zinc Deposits-Organic-Mineralization Study of MVT Lead-Zinc Deposit (II). *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(4): 608—614 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W.J., Zheng, R.C., 2000a. Characteristics and Movement of Ore-Forming Fluids in the Huayuan Lead-Zinc Deposit. *Mineral Deposits*, 19(2): 173—181 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2000.02.010>
- Liu, W.J., Zheng, R.C., 2000b. Thermochemical Sulphate Reduction and Huayuan Lead-Zinc Ore Deposit in Hunan, China. *Science in China (Series D)*, 30(5): 456—464 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7240.2000.05.002>
- Lu, S.S., Qiu, X.F., Tan, J.J., et al., 2016. The Pb-Pb Isochron Age of the Kuangshishan Formation in Shennongjia Area on the Northern Margin of the Yangtze Craton and Its Geological Implications. *Earth Science*, 41(2): 317—324 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.023>
- Luo, W., Yin, Z., Kong, L., et al., 2009. Discussion on the Geological Features and Genesis of the Limei Pb-Zn Ore Concentration Belt in North-Western Hunan Province. *Geological Survey and Research*, 33(3): 194—202 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4135.2009.03.005>
- McArthur, J. M., Kennedy, W. J., Gale, A. S., et al., 1992. Strontium Isotope Stratigraphy in the Late Cretaceous: Intercontinental Correlations for the Campanian/Maastrichtian Boundary. *Terra Nova*, 4(3): 385—393. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1992.tb00827.x>
- Nakai, S., Halliday, A. N., Kesler, S. E., et al., 1990. Rb-Sr Dating of Sphalerites from Tennessee and the Genesis of Mississippi Valley Type Ore Deposits. *Nature*, 346(6282): 354—357. <https://doi.org/10.1038/346354a0>
- Ohmoto, H., 1972. Systematics of Sulfur and Carbon Isotopes in Hydrothermal Ore Deposits. *Economic Geology*, 67(5): 551—558. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.67.5.551>
- Qiu, H., Jiang, Y., 2007. Sphalerite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Progressive

- Crushing and Stepwise Heating Techniques. *Earth and Planetary Science Letters*, 256 (1/2): 224 — 232. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.01.028>
- Schneider, J., Boni, M., Lapponi, F., et al., 2002. Carbonate-Hosted Zinc-Lead Deposits in the Lower Cambrian of Hunan, South China: A Radiogenic (Pb, Sr) Isotope Study. *Economic Geology*, 97(8): 1815 — 1827. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.8.1815>
- Wan, Y.S., Miao, P.S., Liu, D.Y., et al., 2010. Formation Ages and Source Regions of the Palaeoproterozoic Gaofan, Hutuo and Dongjiao Groups in the Wutai and Dongjiao Areas of the North China Craton from SHRIMP U-Pb Dating of Detrital Zircons: Resolution of Debates over their Stratigraphic Relationships. *Chinese Science Bulletin*, 55(7): 572 — 582 (in Chinese). <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0615-3>
- Xiong, S.F., Yao, S.Z., Gong, Y.J., et al., 2016. Ore-Forming Fluid and Thermochemical Sulfate Reduction in the Wusihe Lead-Zinc Deposit, Sichuan Province, China. *Earth Science*, 41(1): 105 — 120 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.008>
- Xue, C.J., Lü, G.X., Gao, W.L., et al., 2017. Lithofacies Paleogeographic Analysis of Ore-Bearing Layers in Qingxudong Period and Metallogenic Prediction in Limei Ore Field in Huayuan, Western Hunan, China. *Earth Science Frontiers*, 24(2): 159 — 175 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13745/j.esf.yx.2016-12-7>
- Yang, H.M., Cai, H., Duan, R.C., et al., 2012. Progress in Rb-Sr Isotopic Dating of Sulfide. *Advances in Earth Science*, 27(4): 379 — 385 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H.M., Liu, C.P., Cai, H., et al., 2018. Preliminary Research on the Rb-Sr Dating Mechanism of Sphalerites with Diluted Acid Leaching. *Geology and Mineral Resources of South China*, in Press (in Chinese with English abstract).
- Yang, H. M., Liu, C. P., Duan, R. C., et al., 2015. Rb-Sr and Sm-Nd Isochron Ages of Bokouchang Pb-Zn Deposit in Tongren, Guizhou Province and their Geological Implication. *Geotectonica et Metallogenesis*, 39(5): 855 — 865. <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2015.05.009> (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. X., Lao, K. T., 2007. Geological Characteristics and Ore Indicators of Lead-Zinc Deposits in Northwestern Hunan, China. *Geological Bulletin of China*, 26(7): 899 — 908 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.J., 1987. A Paleo-Fault Zone Traversing Southeastern China. *Chinese Journal of Geology*, 22(3): 221 — 230 (in Chinese with English abstract).
- Yin, F.G., Xu, X.S., Wan, F., et al., 2001. The Sedimentary Response to the Evolutionary Process of Caledonian Foreland Basin System in South China. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(5): 425 — 428 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:1006-3021.2001.05.009>
- Zartman, R.E., Doe, B.R., 1981. Plumbotectonics-The Model. *Tectonophysics*, 77(1/2): 135 — 162. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90213-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90213-4)
- Zhang, X. P., Deng, H. L., 1984. On the Age of the Yutang Lead-Zinc Deposit and Trilobite Fossils of Lower-Middle Cambrian, Huayuan, Hunan Province. *Hunan Geology*, 3(3): 36 — 44 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., 2001. Theoretical Modeling of Stable Isotope Systems and Its Applications to Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. *Mineral Deposits*, 20(1): 57 — 70, 85 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Duan, Q.F., Chen, Y.C., et al., 2016. C, O, H, S, Pb and Sr Isotope Constraints on the Metals Sources of Huayuan Pb-Zn Deposits in Western Hunan. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2786 — 2802 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 蔡应雄, 谭娟娟, 杨红梅, 等, 2015. 湘南铜山岭铜多金属矿床成矿物质来源的 S、Pb、C 同位素约束. *地质学报*, 89(10): 1792 — 1803.
- 蔡应雄, 杨红梅, 段瑞春, 等, 2014. 湘西—黔东下寒武统铅锌矿床流体包裹体和硫、铅、碳同位素地球化学特征. *现代地质*, 28(1): 29 — 41.
- 曹亮, 段其发, 彭三国, 等, 2017. 湘西地区铅锌矿成矿物质来源——来自 S、Pb 同位素的证据. *地质通报*, 36(5): 834 — 845.
- 陈明辉, 胡祥昭, 鲍振襄, 等, 2011. 湖南渔塘铅锌矿集中区地质特征及成矿问题讨论. *地质与勘探*, 47(2): 251 — 260.
- 杜国民, 蔡红, 梅玉萍, 2012. 硫化物矿床中闪锌矿 Rb-Sr 等时线定年方法研究——以湘西新晃打狗洞铅锌矿床为例. *华南地质与矿产*, 28(2): 175 — 180.
- 段其发, 曹亮, 曾健康, 等, 2014. 湘西花垣矿集区狮子山铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 定年及地质意义. *地球科学*, 39(8): 977 — 999.
- 付胜云, 彭志刚, 刘红梅, 2006. 湘西北铅锌矿带成矿地质特征. *国土资源导刊*, 3(3): 99 — 103. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-5603.2006.03.026>
- 高炳宇, 薛春纪, 池国祥, 等, 2012. 云南金顶超大型铅锌矿床沥青 Re-Os 法测年及地质意义. *岩石学报*, 28(5): 1561 — 1567.
- 韩以贵, 李向辉, 张世红, 等, 2007. 豫西祁雨沟金矿单颗粒和碎裂状黄铁矿 Rb-Sr 等时线定年. *科学通报*, 52(11):

- 1307—1311. <https://doi.org/10.3321/j.issn:0023-074X.2007.11.015>
- 胡太平,王敏芳,丁振举,等,2017.湘西花垣李梅铅锌矿床 C、O、S、Pb 同位素特征及成矿物质来源.矿床地质,36(3): 623—642.<https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2017.03.006>
- 胡召齐,朱光,张必龙,等,2010.雪峰隆起北部加里东事件的 K-Ar 年代学研究.地质论评,56(4): 490—500.<https://doi.org/10.16509/j.georeview.2010.04.003>
- 湖南地质调查院,2011.湖南花垣—凤凰地区铅锌矿调查报告.
- 匡文龙,向世超,肖文舟,等,2015.湘西北地区铅锌矿床成矿地质特征及矿床成因研究.矿床地质,34(5): 1072—1082.<https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2015.05.014>
- 李塑,段其发,赵少瑞,等,2017.湖南花垣铅锌矿床成矿物质来源与成矿机制——来自 S、Pb、Sr 同位素的证据.地质通报,36(5): 811—822.
- 李荣西,董树文,张少妮,等,2012.大巴山造山过程有机流体研究.南京大学学报(自然科学版),48(3): 295—307.
- 李文博,黄智龙,许德如,等,2002.铅锌矿床 Rb-Sr 定年研究综述.大地构造与成矿学,26(4): 434—441.
- 刘文均,1985.湘黔断裂带的演化及其成矿作用特点.地质论评,31(3): 224—231.<https://doi.org/10.16509/j.georeview.1985.03.005>
- 刘文均,郑荣才,2000a.花垣铅锌矿床成矿流体特征及动态.矿床地质,19(2): 173—181.<https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7106.2000.02.009>
- 刘文均,郑荣才,1999.花垣铅锌矿床包裹体气象组份研究:MVT 矿床有机成矿作用研究(Ⅱ).沉积学报,17(4): 608—614.
- 刘文均,郑荣才,2000b.硫酸盐热化学反应与花垣铅锌矿床.中国科学(D辑),30(5): 456—464.<https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7240.2000.05.002>
- 卢山松,邱啸飞,谭娟娟,等,2016.扬子克拉通北缘神农架地区矿石山组 Pb-Pb 等时线年龄及其地质意义.地球科学,41(2): 317—324.
- 罗卫,尹展,孔令,等,2009.花垣李梅铅锌矿集区地质特征及矿床成因探讨.地质调查与研究,33(3): 194—202.
- 万渝生,苗培森,刘敦一,等,2010.华北克拉通高凡群、滹沱群和东焦群的形成时代和物质来源:碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年代学制约.科学通报,55(7): 572—582.
- 熊索菲,姚书振,宫勇军,等,2016.四川乌斯河铅锌矿床成矿流体特征及 TSR 作用初探.地球科学,41(1): 105—120.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.008>
- 薛长军,吕古贤,高伟利,等,2017.湘西花垣李梅矿田含矿层清虚洞期岩相古地理分析及成矿预测.地学前缘,24(2): 159—175.<https://doi.org/10.13745/j.esf.yx.2016-12-7>
- 杨红梅,蔡红,段瑞春,等,2012.硫化物 Rb-Sr 同位素定年研究进展.地球科学进展,27(4): 379—385.
- 杨红梅,刘重范,蔡红,等,2018.闪锌矿分相 Rb-Sr 体系定年机理初探.华南地质与矿产,待刊.
- 杨红梅,刘重范,段瑞春,等,2015.贵州铜仁卜口场铅锌矿床 Rb-Sr 与 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义.大地构造与成矿学,39(5): 855—865.<https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2015.05.009>
- 杨绍祥,劳可通,2007.湘西北铅锌矿床的地质特征及找矿标志.地质通报,26(7): 899—908.<https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-2552.2007.07.015>
- 杨志坚,1987.横贯中国东南部的一条古断裂带.地质科学,22(3): 221—230.
- 尹福光,许效松,万方,等,2001.华南地区加里东期前陆盆地演化过程中的沉积响应.地球学报,22(5): 425—428.
- 张欣平,邓华龙,1984.花垣县渔塘铅锌矿含矿层时代及早、中寒武世的三叶虫.湖南地质,3(3): 36—44.
- 郑永飞,2001.稳定同位素体系理论模式及其矿床地球化学应用.矿床地质,20(1): 57—70, 85.<https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7106.2001.01.007>
- 周云,段其发,陈毓川,等,2016.湘西花垣铅锌矿田成矿物质来源的 C、O、H、S、Pb、Sr 同位素制约.地质学报,90(10): 2786—2802.