

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.566>



# 湘西北五伦铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 定年及其地质意义

曾广乾<sup>1</sup>, 李泽泓<sup>1</sup>, 凌跃新<sup>1</sup>, 熊延旺<sup>1</sup>, 马筱<sup>2</sup>

1. 湖南省地质调查院, 湖南长沙 410016

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 五伦铅锌矿床位于扬子陆块东南缘之江南(雪峰)造山带北西侧, 是湘西北铅锌矿带内新近发现的热液脉型矿床。铅锌矿床产于万民岗背斜轴部, 矿体沿 NE 向比铁溪—陈家河断裂旁侧派生的 NW 向断裂呈陡倾脉状产出, 直接容矿围岩为奥陶系下统桐梓组和红花园组。对该矿床主成矿期的闪锌矿进行 Rb-Sr 等时线法定年, 获得成矿年龄为  $238.9 \pm 4.5$  Ma (MSWD=1.8), ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值为  $0.71086 \pm 0.00016$ , 指示其主成矿期为中三叠世晚期。结合已有的成矿年代学资料, 通过地球动力学背景探讨, 结果表明湘西北地区至少存在两期铅锌成矿作用, 分别对应于加里东期构造运动后伸展作用和印支早期华南陆块汇聚碰撞形成的局部伸展作用。五伦铅锌矿床的成矿物质应主要来源于含矿层之下成矿元素高含量的南华纪—寒武纪早期地层中的碎屑岩系, 其较高的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值指示成矿过程中陆壳影响较为明显。

**关键词:** 闪锌矿 Rb-Sr 定年; 成矿年龄; 物质来源; 五伦铅锌矿床; 湘西北地区; 同位素。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)07-2484-12

收稿日期: 2017-11-29

## Rb-Sr Dating of Sphalerites from Wulun Lead-Zinc Deposit in Northwestern Hunan and Its Geological Significance

Zeng Guangqian<sup>1</sup>, Li Zehong<sup>1</sup>, Ling Yuexin<sup>1</sup>, Xiong Yanwang<sup>1</sup>, Ma Xiao<sup>2</sup>

1. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410016, China

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The Wulun lead-zinc deposit lies to the northwest of Jiangnan (Xuefeng) orogenic belt on the southeastern margin of Yangtze block, as a newly discovered hydrothermal vein type of lead-zinc deposit in the lead-zinc ore belt along the Wanmingang anticline in northwestern Hunan. The ore bodies outcrop in the Lower Ordovician Tongzi and Honghuayuan formations as steep-dipping veins controlled by NW trending faults which derived by NE trending Bitiexi-Chenjiahe fault. Rb-Sr dating of sphalerite yielded an isochron age of  $238.9 \pm 4.5$  Ma (MSWD=1.8) with initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  value of  $0.71086 \pm 0.00016$  for the deposit, which shows that the end of Middle Triassic is the main mineralization period for the Wulun lead-zinc deposit. Integrated with the existing metallogenic geochronology data, and the discussing of the geodynamical setting, it is indicated that there are at least twice lead-zinc mineralization in northwestern Hunan, which was respectively related to the post-orogenic extension of late Caledonian tectonism and the local stretching derived from collision of South China block in the early Indosinian. The metallogenic materials of Wulun lead-zinc deposit shall be mainly derived from the clastic rocks with high ore-forming elements in the Nanhua-Early Cambrian stratas underlying the ore-bearing layers. The relatively high initial Sr isotope ratio indicates that the influence of continental crust was obvious in the metallogenic process.

**Key words:** sphalerite Rb-Sr dating; mineralization age; material source; Wulun lead-zinc deposit; northwestern Hunan Province; isotopes.

**基金项目:** 中国地质调查局项目(No. DD20160029); 国家自然科学基金面上项目(No. 41472190)。

**作者简介:** 曾广乾(1990—), 男, 助理工程师, 主要从事构造地质学研究。ORCID: 0000-0002-0157-4474. E-mail: 408164602@qq.com

**引用格式:** 曾广乾, 李泽泓, 凌跃新, 等, 2018. 湘西北五伦铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 定年及其地质意义. 地球科学, 43(7): 2484-2495.

湘西北铅锌矿带属湘西—鄂西铅锌多金属成矿带的南西段,带内由北而南可分为洛塔、保靖、花垣和凤凰4个矿田(杨绍祥和劳可通,2007a),五伦铅锌矿床位于洛塔矿田内。前人对湘西北铅锌矿带内铅锌矿床地质特征、成矿流体性质和矿床成因做过大量研究,但在矿床成矿类型上存在较大争议,这些认识可归纳为两类:一类强调同生沉积成矿作用(孙玉炯等,1985;刘宝珺和王剑,1990;龙宝林和刘忠明,2005),为沉积改造型或海底火山喷流型;另一类强调后生成矿作用(刘文均等,1999;芮宗瑶等,2004;周云等,2011),认为其地质特征和成矿机理可与MVT型相类比。正确理解铅锌矿床成因信息的最大障碍就是缺乏成矿年代学方面的资料。目前,湘西北地区铅锌矿床成矿年代学资料较少,仅有的精确成矿年龄为段其发等(2014)、廖震文等(2015)、周云等(2015)先后采用闪锌矿 Rb-Sr 法、石英 Rb-Sr 法测得似层状矿体的成矿年龄数据,分别为  $410 \pm 12$  Ma、 $348.6 \pm 1.9$  Ma 和  $372 \pm 9.8$  Ma(图1),而对陡倾脉状矿体尚未有精确同位素定年研究。

闪锌矿的 Rb-Sr 同位素定年已被证明是一种直接测定浅成低温热液硫化物矿床形成年龄的有效方法(Nakai *et al.*, 1990, 1993; Brannon *et al.*, 1992; Christensen *et al.*, 1995a, 1995b),并在国内陆续有成功案例报道(李文博等,2004;张长青等,2008;蔺志永等,2010;胡乔青等,2012;郑伟等,2013;徐贻赣等,2013;黄华等,2014;张云新等,2014;杨郢城等,2015)。本文在详细研究五伦铅锌矿床地质特征的基础上,对陡倾脉状闪锌矿进行 Rb-Sr 同位素定年研究,获得了精确的年龄数据,为厘定成矿时代和探讨矿床成因提供了新的可靠证据。

## 1 区域地质概况及矿床地质

### 1.1 区域地质概况

湘西北地区位于扬子陆块东南缘,其南东侧以慈利—保靖断裂带与江南(雪峰)造山带相邻(图1a)。地层区划为上扬子分区,区内分布元古宙冷家溪群、板溪群、南华系、震旦系和古生界寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系,尤以下古生界最为发育,构成一系列北北东至北东向的褶皱;中生界亦较发育。仅局部分布有小规模的基性岩床,岩浆活动不明显。

区内的地壳构造运动经历了武陵、雪峰—加里东、海西、印支、燕山和喜马拉雅多个发展阶段。武陵运动造成了板溪群与冷家溪群之间的角度不整合。

加里东期末发生的造山运动,使扬子陆块边缘斜坡带褶皱隆起形成江南古陆,并导致本区隆起遭受长期风化剥蚀(杜远生和徐亚军,2012)。印支运动是一次强烈的陆内造山运动,在张家界—保靖一线以北形成侏罗山式褶皱,张家界—保靖一线以南则形成北东东向开阔—宽缓型褶皱。早燕山运动造成了区域上白垩系与侏罗系(或前白垩系)之间的角度不整合。喜马拉雅运动造成白垩纪—古近纪盆地的褶皱回返(柏道远等,2015)。

武陵构造层为本区的褶皱基底,青白口系至第三系均属盖层性质,白垩系为叠置盖层上的小型断陷盆地。深大断裂则以花垣—张家界断裂、吉首—古丈断裂、麻栗场断裂为主干所组成的断裂带,呈北北东—北东—北东东向弧形展布,并构成向南西方撒开、往北东方收敛的帚状(图1b)。断裂带南东由古丈复背斜、摩天岭背斜、涂乍—禾库复向斜等大型复式褶皱组成;断裂带北西主要分布侏罗山式褶皱,形成了规模巨大的桑植复向斜及后期的断陷盆地。

区内铅锌矿体主要赋存于寒武系中统清虚洞组、奥陶系下统桐梓组中;寒武系下统敖溪组和娄山关组下部是局部地区铅锌矿体的主要控矿层位;奥陶系下统红花园组、上统宝塔组也具一定的控矿性(杨绍祥等,2007b)。矿体形态简单,以整合似层状为主,脉状次之,脉状矿体赋存在大断裂旁侧派生的次级断裂和裂隙中,其中洛塔矿田内脉状矿体多为 NW 走向(周云等,2015),花垣矿田内脉状矿体走向 NE(段其发等,2014)。铅锌矿床的规模和分布受花垣—张家界断裂、吉首—古丈断裂、麻栗场断裂为主干的深大断裂与雪峰—加里东期褶皱共同控制。

### 1.2 矿床地质特征

五伦铅锌矿床位于洛塔矿田东部,矿区出露地层由老至新有:寒武系下统一芙蓉统娄山关组、奥陶系下统桐梓组、红花园组、中一下统大湾组、中统牯牛潭组、上统宝塔组、奥陶系上统一志留系下统龙马溪组、志留系下统新滩组及第四系(图2)。本矿区的主要含矿层位为桐梓组白云质灰岩、泥晶灰岩和红花园组亮晶生物屑砂屑灰岩,其次在娄山关组白云岩及宝塔组龟裂纹泥晶灰岩中也见有铅锌矿化。

矿区位于万民岗背斜轴部,背斜轴向  $NE40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ,延伸大于 35 km,宽约 6 km。核部出露寒武系娄山关组,两翼主要为奥陶系和志留系。SE 翼倾角  $45^{\circ} \sim 55^{\circ}$ ,NW 翼倾角  $35^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ,为一近直立水平褶皱。矿区断裂构造较发育,以 NE 走向为主,其中比铁溪—陈家河断裂贯穿矿区,沿万民岗背斜轴部呈

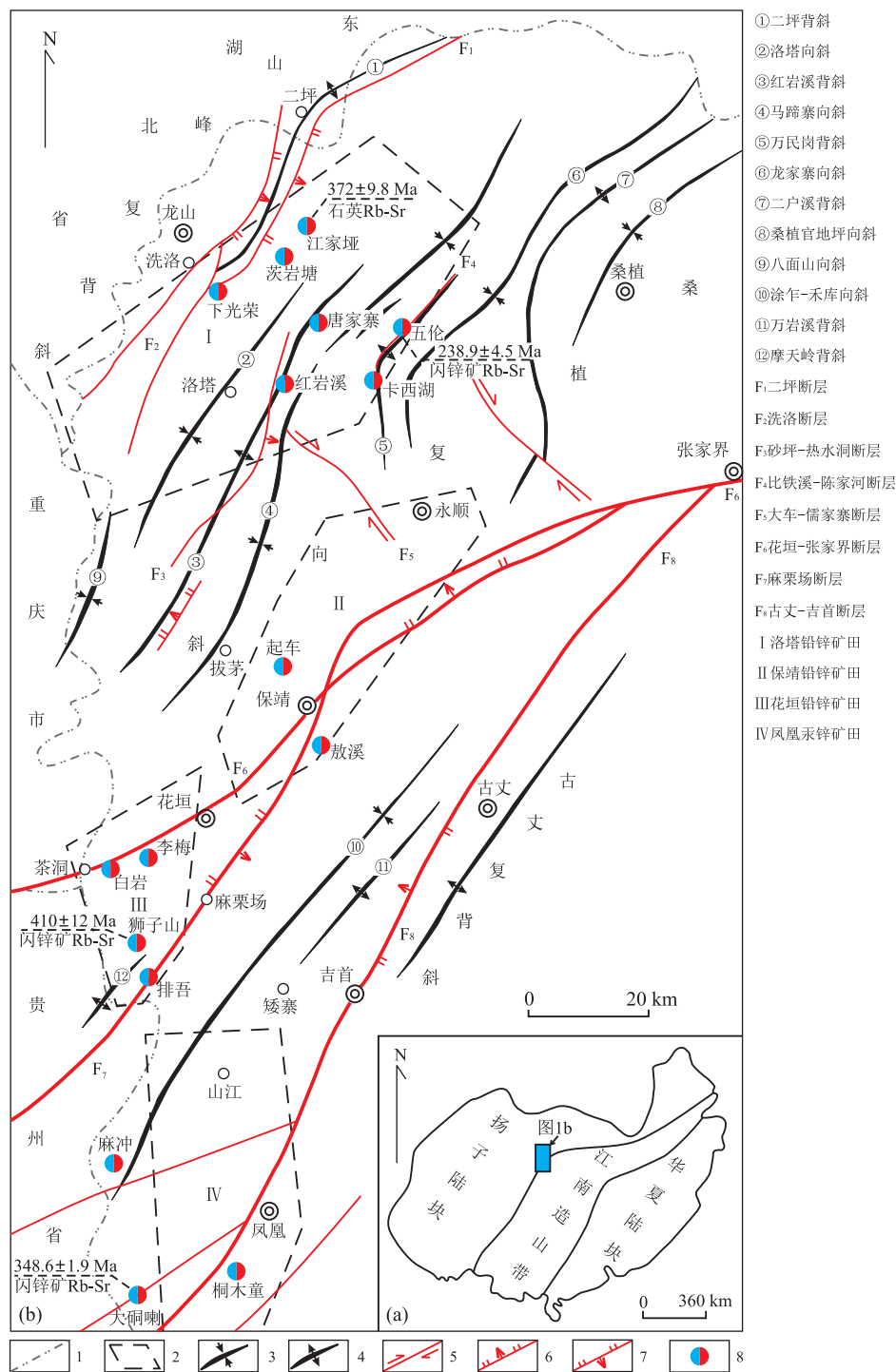


图 1 湘西北铅锌矿带区域构造略图

Fig.1 Regional tectonic sketch of lead-zinc deposits in northwestern Hunan Province  
底图据杨绍祥和劳可通(2007a)修编.1.省界;2.矿田界线;3.向斜;4.背斜;5.走滑断层;6.正断层;7.逆断层;8.铅锌矿床

NE 向延伸,断裂经历了早期挤压逆冲、之后左行走滑和晚期张性正断三期较明显的构造活动.另有较多规模较小的 NW 向断裂分布,显示为张剪性正断层性质,兼具右行走滑,为 NE 向比铁溪—陈家河断裂左行走滑所派生的里德尔剪裂( $R'$ ) (Bartlett *et*

*al.*, 1981)(图 2b).  
矿区内包含 3 个主要矿体,均严格受 NW 向张剪性断裂控制.其中, I 号矿体主要产于桐梓组下段泥云质灰岩中,矿体走向  $150^{\circ}$ ,走向长 200~250 m,矿体厚 1.2~1.4 m,平均品位(质量分数):Pb 为

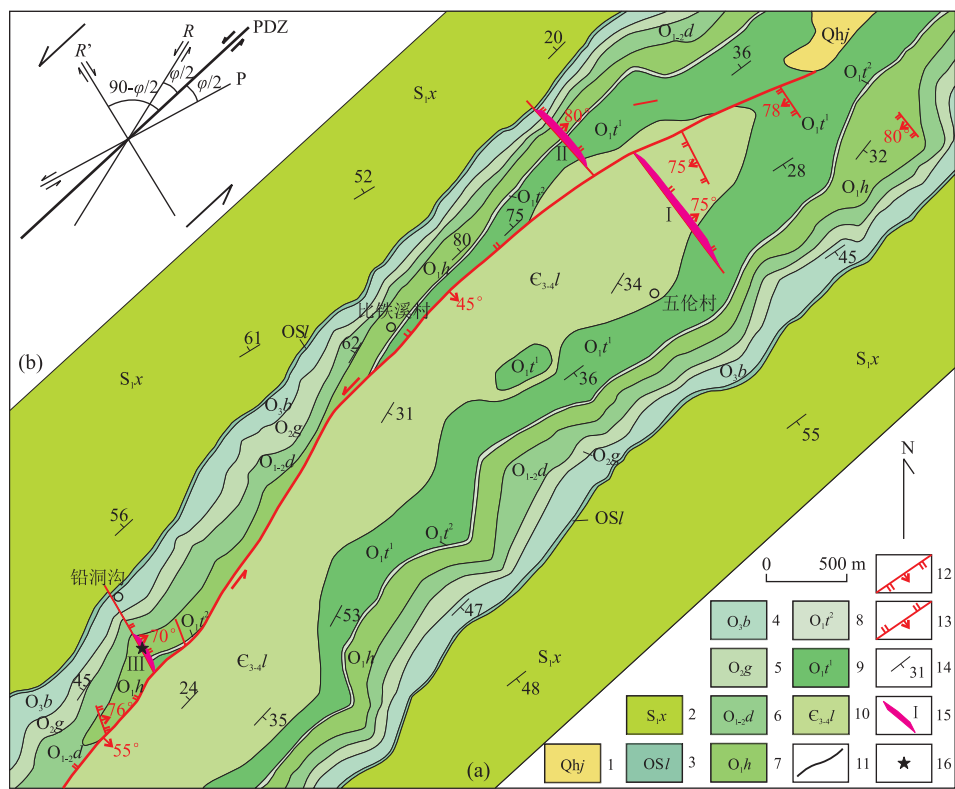


图 2 五伦铅锌矿床地质图

Fig.2 Geological sketch of the Wulun lead-zinc ore district

1.第四系;2.新滩组;3.龙马溪组;4.宝塔组;5.牯牛潭组;6.大湾组;7.红花园组;8.桐梓组上段;9.桐梓组下段;10.娄山关组;11.地质界线;12.正断层;13.逆断层;14.岩层产状;15.铅锌矿体及编号;16.采样点;PDZ.主位移带;R、R'.里德尔剪裂;P.压剪性破裂;φ.内摩擦角

3.37%,Zn 为 0.05%;Ⅱ号矿体主要赋存于宝塔组龟裂纹泥晶灰岩中,走向长大于 50 m,脉体厚度 1.2~1.7 m,平均品位(质量分数):Pb 为 1.43%,Zn 为 10.61%;Ⅲ号矿体赋存于桐梓组下段泥云质灰岩和红花园组亮晶含生物碎屑砂屑灰岩中,矿体产状 78°∠70°,走向延伸长约 310 m,矿体厚 1.0~1.5 m,平均品位(质量分数):Pb 为 6.47%,Zn 为 2.62%。

铅锌矿沿 NW 向裂隙呈不稳定的脉状、团块状、透镜状充填(图 3a),具尖灭再现产出,与围岩高角度斜交(倾角一般 70°~80°),区别于似层状矿体,表明其形成时代较晚,暗示区内存在明显的两期成矿作用.矿石矿物成分较简单,主要为闪锌矿,次为方铅矿,伴生有少量的黄铁矿、赤铁矿和黄铜矿.脉石矿物主要有方解石、白云石和石英,以及少量重晶石.矿石主要具半自形、他形粒状结构、包含结构及交代结构.黄铁矿部分与方铅矿及闪锌矿毗邻(图 3b),或被方铅矿交代,或分布于脉石中.方铅矿多交代黄铁矿,生成时期晚于黄铁矿,使黄铁矿被细化(图 3c),与闪锌矿既可见包裹也可见被包裹现象

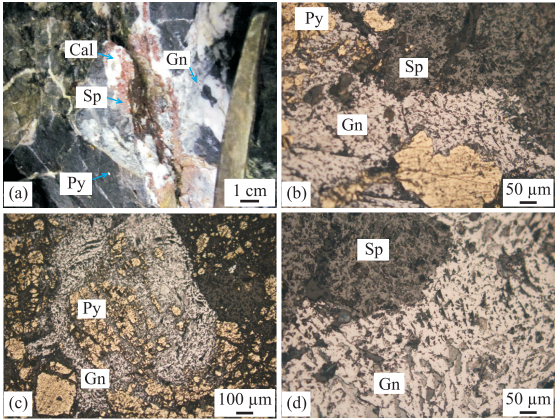


图 3 五伦铅锌矿床矿石构造和显微照片

Fig. 3 Ore structure and photomicrographs of sphalerite from the Wulun lead-zinc deposit

a.斑脉状构造,闪锌矿、方铅矿和粗晶方解石呈斑块状、脉状分布于粉晶灰岩中;b.黄铁矿、闪锌矿及方铅矿相互毗邻连生,单偏光;c.方铅矿交代细粒黄铁矿,单偏光;d.方铅矿包裹闪锌矿,单偏光;Sp.闪锌矿;Gn.方铅矿;Py.黄铁矿;Cal.方解石

(图 3d),属于同期产出.闪锌矿晶形主要为半自形或他形粒状,与黄铁矿及方铅矿均见毗邻连生;矿石构造主要为斑脉状和网脉状,其次为致密块状构造、

表 1 五伦铅锌矿床闪锌矿 Rb、Sr 同位素分析结果

Table 1 Rb-Sr dating data for sphalerites from the Wulun lead-zinc deposit

| 序号 | 样品编号 | 样品名称 | Rb( $10^{-6}$ ) | Sr( $10^{-6}$ ) | $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(1\sigma)$ |
|----|------|------|-----------------|-----------------|---------------------------------|------------------------------------------|
| 1  | TW-1 | 闪锌矿  | 0.113 30        | 0.131 8         | 2.482 0                         | $0.719\ 33\pm0.000\ 10$                  |
| 2  | TW-2 | 闪锌矿  | 0.194 90        | 0.139 4         | 4.038 0                         | $0.724\ 65\pm0.000\ 08$                  |
| 3  | TW-3 | 闪锌矿  | 0.049 06        | 0.136 1         | 1.040 0                         | $0.714\ 44\pm0.000\ 03$                  |
| 4  | TW-4 | 闪锌矿  | 0.100 40        | 0.120 2         | 2.412 0                         | $0.718\ 87\pm0.000\ 07$                  |
| 5  | TW-5 | 闪锌矿  | 0.065 91        | 0.389 5         | 0.488 1                         | $0.712\ 55\pm0.000\ 06$                  |

条带状构造与浸染状构造.围岩蚀变主要为硅化、方解石化、褪色化等.矿化分布于硅化带中,硅化的强弱与矿化强度呈正相关.

2 样品特征、测试方法及结果

2.1 样品特征

本次用于 Rb、Sr 同位素定年的样品采自五伦矿区Ⅲ号脉状矿体不同空间位置,赋矿地层为红花园组,5 件样品均为新鲜的斑脉状矿石,属主成矿阶段的产物,热液蚀变为硅化、方解石化.样品矿物成分较简单,矿石矿物以闪锌矿为主,其次为方铅矿,矿石中的脉石矿物为方解石.闪锌矿为褐黄色,呈半自形或他形粒状,大小一般为 0.05~2.00 mm,以粒状集合体形式产于热液粗晶方解石与亮晶生物碎屑砂屑之间,未见矿物穿插、交代现象.

2.2 分析流程及分析结果

将已挑纯的硫化物单矿物样品放置稀盐酸中浸泡 12 h,超纯水清洗后,放入超纯水中用超声波机清洗 3~5 遍,烘干备用.称取适量硫化物单矿物样品,加入 $^{85}\text{Rb}+^{84}\text{Sr}$ 混合稀释剂,用适量王水溶解样品,采用阳离子树脂(Dowex50×8)交换法分离和纯化 Rb、Sr.同位素质谱分析在热电离质谱仪 TRITON 上完成,用同位素稀释法计算试样中的铷、锶含量及锶同位素比值.在整个同位素分析过程中,用 NBS987、NBS607 和 GBW04411 标准物质分别对仪器和分析流程进行监控.NBS987 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素组成测定值为 $0.710\ 32\pm0.000\ 04(2\sigma)$ ,NBS607 的 Rb、Sr 含量与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分别为 $\text{Rb}=523.60\times10^{-6}$ , $\text{Sr}=65.54\times10^{-6}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=1.200\ 50\pm0.000\ 04(2\sigma)$ ,GBW04411 的 Rb、Sr 含量与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分别为 $\text{Rb}=249.90\times10^{-6}$ 、 $\text{Sr}=158.80\times10^{-6}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.760\ 09\pm0.000\ 03(2\sigma)$ ,与其证书值在误差范围内完全一致.同位素分析样品制备的全过程均在超净化实验室内完成,全流程 Rb、Sr 空白分别为 $2\times10^{-10}$ 和 $5\times10^{-10}$ .本次

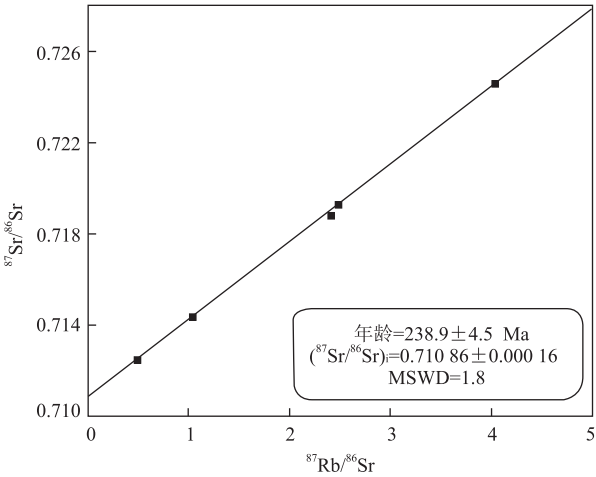


图 4 五伦铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 同位素等时线

Fig.4 Rb-Sr isochron of sphalerites from the Wulun lead-zinc deposit

样品测试在中国地质调查局武汉地质调查中心同位素实验室完成.等时线年龄计算采用 Isoplot/Ex Version 2.49 计算程序(Ludwig, 2001).衰变常数 $\lambda$ 值为 $1.42\times10^{-11}\text{ a}^{-1}$ ,等时线回归计算时 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值误差给定 3%, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值误差给定 0.03%.

五伦铅锌矿床的 5 件闪锌矿样品 Rb、Sr 同位素测定结果见表 1.闪锌矿中 Rb 含量变化范围为 $0.049\ 06\times10^{-6}\sim0.194\ 90\times10^{-6}$ ,Sr 含量变化范围为 $0.120\ 20\times10^{-6}\sim0.389\ 50\times10^{-6}$ , $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 的变化范围为 0.488 1~4.038 0, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的变化范围为 $0.712\ 55\pm0.000\ 06\sim0.724\ 65\pm0.000\ 08$ .

5 个闪锌矿样品测点的 Rb-Sr 年龄计算结果如图 4,计算获得的等时线年龄为 $238.9\pm4.5\text{ Ma}$ ,Sr 初始值( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>为 $0.710\ 86\pm0.000\ 16(1\sigma)$ ,MSWD=1.8.5 个闪锌矿样品点显示出良好的线性关系,该等时线具有实际地质意义,可代表成矿阶段的年龄.成矿地质时代晚于赋矿地层奥陶系下统红花园组地层年代,表明该矿床形成于后生成矿过程.

3 讨论

3.1 成矿年代

热液矿物 Rb-Sr 等时线定年的基本前提是同源、同时、封闭性、一致的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>, 以及具有不同的 ( $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> (李文博等, 2002). 用于本次同位素测试的样品采自同一矿体局部较小的范围内, 选择不存在脉石矿物穿插、未见裂隙或少见裂隙发育, 且结晶较好的斑脉状矿石作为研究对象, 这样闪锌矿纯度较高, 最大程度上满足了 Rb-Sr 同位素测年的同时、同源、封闭性和 Sr 初始值一致性的基本前提, 同时样品点位不同保证其具有不同的 ( $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值.

Petke and Diamond (1996) 和李文博等 (2002) 提出可利用  $1/\text{Rb}$  与  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  和  $1/\text{Sr}$  与  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  图解判别闪锌矿生长期间 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值是否保持不变, 进行判断所获数据的合理性. 本次测试结果在图 5 中显示, 样品点不存在线性关系, 而且相对稳定, 说明闪锌矿生长期间 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值基本保持不变. 因此, 图 4 给出的直线具有等时线意义, 可代表矿床的形成年龄.

前人认为湘西北地区铅锌矿床具有多期成矿特征 (段其发等, 2014; 梁恩云等, 2015), 更有学者指出似层状矿体和脉状矿体分别形成于加里东末期和印支-燕山期 (舒见闻和彭国忠, 1986; 李宗发, 1991). 本次工作用精确的成矿年龄数据反映的地质事实与前人推断一致.

3.2 成矿物质来源

( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值是判断成岩成矿物质来源的重要指标, 在矿床地质研究中, 常利用其来示踪成矿物质来源、岩浆流体、深源流体的壳幔混染作用 (侯明兰等, 2006). 五伦铅锌矿体的主要赋存层位为奥陶

系下统桐梓组与红花园组, 在寒武系第三统一芙蓉统娄山关组及奥陶系上统宝塔组中也有铅锌矿化. Qing *et al.* (1998) 和 Denison *et al.* (1998) 获得奥陶纪海相碳酸盐岩的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  平均值为 0.708 737, 据 McArthur *et al.* (1994) 绘制的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  曲线, 可知早奥陶世海水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  平均值为 0.708 988 (表 2), 且奥陶系海水中  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值具有随时间单调下降的总体趋势 (黄思静等, 2004). 五伦铅锌矿床闪锌矿 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值为  $0.710\ 86 \pm 0.000\ 16$ , 明显大于同期海相碳酸盐  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值, 暗示了成矿物质来源于相对富放射性成因 Sr 的源区或成矿流体曾经流经富放射性成因 Sr 的地质体.

事实上, 通过对湘西花垣地区铅锌矿床的研究, 笔者发现矿带外的碳酸盐岩中或在含矿地层寒武系清虚洞组、高台组和奥陶系桐梓组、红花园组中成矿元素 Pb、Zn 含量普遍较低, 而清虚洞组之下的地层, 尤其牛蹄塘组、留茶坡和大塘坡组的碳质泥 (页) 岩 Zn 含量较高 (图 6) (杨绍祥和劳可通, 2007b). 可见成矿物质并不是来自含矿围岩地层, 而应为下伏地层中的碎屑岩系, 碳质泥 (页) 岩尤为重要. 值得注意的是, 从新元古代中晚期至寒武纪早期, 该阶段海水中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值随时间呈波浪式上升 (McArthur *et al.*, 2012), 其最高值是寒武纪早期海水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值 0.709 178 (黄思静等, 2002), 而五伦铅锌矿床闪锌矿 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值为  $0.710\ 86 \pm 0.000\ 16$ , 稍高于该值. 陆地风化物质通过河流系统带入海洋中的锶具有较高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值, 为  $0.712 \pm 0.001$ , 而从 MOR 型玄武岩淋滤进入海水中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值则较低, 一般约为 0.703 (Palmer and Edmond, 1989; McArthur, 1994), 海洋  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  同位素比值即是这两端元组分在海水中的混合作用所决定 (余文超等, 2016). 基于以上原理, 笔者认为

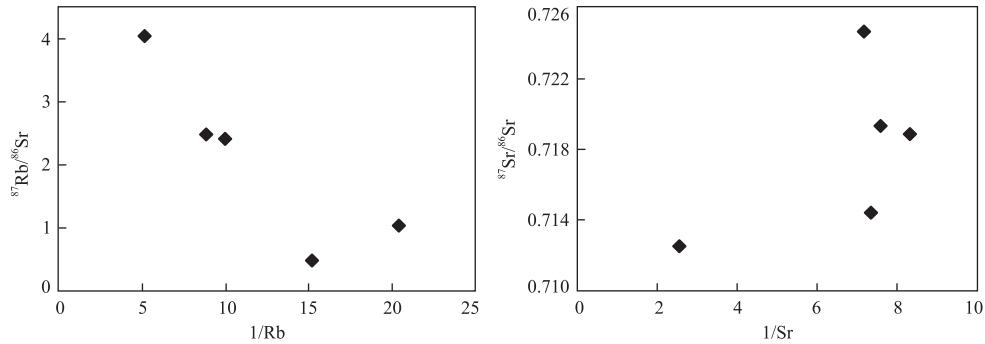


图 5 五伦铅锌矿床闪锌矿  $1/\text{Rb}$ - $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  和  $1/\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  关系

Fig.5 Diagrams of  $1/\text{Rb}$  vs.  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  and  $1/\text{Sr}$  vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of sphalerites from the Wulun lead-zinc deposit

表 2 奥陶系及其上、中、下统的锶同位素<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 平均值

Table 2 Average <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr values for Ordovician and Upper, Middle and Lower Ordovician strata

| 地层     | <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr 比值                   |                               | 数据频数 |
|--------|---------------------------------------------------------|-------------------------------|------|
|        | Qing <i>et al.</i> (1998)和 Denison <i>et al.</i> (1998) | McArthur <i>et al.</i> (1994) |      |
| 奥陶系上统  | 0.707 970                                               | 0.707 961                     | 65   |
| 奥陶系中统  | 0.708 061                                               | 0.708 505                     | 22   |
| 奥陶系下统  | 0.708 737                                               | 0.708 988                     | 157  |
| 奥陶系平均值 | 0.708 472                                               | 0.708 537                     | 244  |

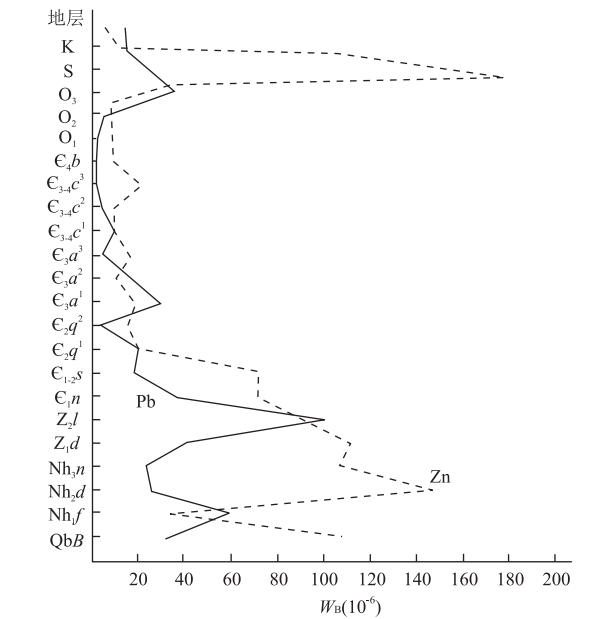


图 6 湘西北铅锌矿床矿带外区域地层 Pb、Zn 的含量分布

Fig.6 Distribution of Pb and Zn contents in strata outside the ore zone in northwest Hunan

K.白垩系;S.志留系;O<sub>3</sub>.奥陶系上统;O<sub>2</sub>.奥陶系中统;O<sub>1</sub>.奥陶系下统;  
∈<sub>4b</sub>.寒武系芙蓉统比条组;∈<sub>3-4c<sup>3</sup></sub>.寒武系第三统一芙蓉统车夫组上  
段;∈<sub>3-4c<sup>2</sup></sub>.寒武系第三统一芙蓉统车夫组中段;∈<sub>3-4c<sup>1</sup></sub>.寒武系第三  
统一芙蓉统车夫组下段;∈<sub>3a<sup>3</sup></sub>.寒武系第三统敖溪组上段;∈<sub>3a<sup>2</sup></sub>.寒武  
系第三统敖溪组中段;∈<sub>3a<sup>1</sup></sub>.寒武系第三统敖溪组下段;∈<sub>2q<sup>2</sup></sub>.寒武系  
第二统清虚洞组上段;∈<sub>2q<sup>1</sup></sub>.寒武系第二统清虚洞组下段;∈<sub>1-2s</sub>.寒武  
系组芬兰统一第二统石牌组;∈<sub>1n</sub>.寒武系组芬兰统牛蹄塘组;Z<sub>2l</sub>.震旦  
系上统留茶坡组;Z<sub>1d</sub>.震旦系下统陡山沱组;Nh<sub>3n</sub>.南华系上统南沱组;  
Nh<sub>2d</sub>.南华系中统大塘坡组;Nh<sub>1f</sub>.南华系下统富禄组;QbB.青白口系  
板溪群;数据引自杨绍祥和劳可通(2007b)

五伦铅锌矿床成矿过程中陆壳影响较为明显。

3.3 地质意义

本次获得的五伦铅锌矿床的成矿年龄弥补了湘  
西北地区铅锌矿床中陡倾脉状矿体的成矿时代空  
白,结合前人在该区运用 Rb-Sr 法测得的似层状矿  
体的年龄,笔者认为湘西北地区铅锌矿床的形成是  
多期次的,至少存在两期成矿作用,而且它们都与同  
时期主要构造运动有关.现有的测年数据表明,典型  
MVT 矿床形成与地球演化历史中强烈的挤压构造

事件密切相关(Bradley and Leach, 2003).发生于泥  
盆纪到二叠纪时期的 Pangea 泛大陆汇聚,这一时期  
是地质历史上 MVT 矿床形成的最为重要的时期,  
有 75% 的 MVT 矿床形成于泛大陆汇聚时期  
(Leach *et al.*, 2001).湘西北地区铅锌矿床中似层  
状矿体即形成于这一时期,已获得的似层状矿体的  
精确成矿年龄(348.6~410.0 Ma)与加里东期构造  
运动后伸展作用引起的盆地流体活动相对应.而脉  
状矿体的成矿地质时代为中三叠世晚期,该时期华  
南板块进入早印支期陆内造山运动阶段,正是这一  
时期区域构造活动驱动流体迁移、成矿.研究表明  
MVT 型铅锌矿床的形成与板块俯冲碰撞形成的局  
部伸展环境有关(张长青等,2009),包括五伦铅锌  
矿床在内的洛塔铅锌矿田中“NE 向断裂导矿,NW 向  
断裂容矿”的现象很好地印证了这一点.印支早期受  
华南板块南北边缘碰撞造山事件影响(张岳桥等,  
2009),矿区处于近 NS 向挤压应力场,NE 向陈家河  
断裂发生逆冲兼左行走滑运动,并派生 NW 向里德  
尔剪裂 R’张剪性断裂,NE 向断裂处于压剪状态,  
不具备矿质卸载的空间和物化环境而成为导矿构  
造,NW 向断裂处于张剪状态利于成矿而成为容矿  
构造.与之类似,孔华等(2015)认为花垣—张家界断  
裂的左行剪切派生形成的 NE 向张性次级断裂(里  
德尔 R 剪裂)(Bartlett *et al.*, 1981)(图 2b)是花垣  
矿田内脉状矿体的容矿构造,其铅锌成矿应与五伦  
铅锌矿床同期。

从湘西北花垣铅锌矿、到黔东北嗅脑铅锌矿和  
卜口场铀矿,矿体多呈整合似层状赋存于寒武系  
第二统清虚洞组含藻灰岩中,含矿岩性多为藻礁相  
灰岩.前人根据层控、相控的特点将该区铅锌矿床作  
为沉积矿床的观点(刘铁庚和叶霖,2000;罗卫等,  
2009;陈明辉等,2011),与近年来的研究认识不符:  
其一,若该区铅锌矿床为同生沉积成因,则其成矿时  
代应与赋矿地层一致;显然,矿石矿物的同位素测年  
研究结果不支持这一认识,而指示其形成于后生成  
矿过程;矿石多为角砾状构造、网脉状构造,成矿地

质特征也显示后生成矿特点,其二,从成矿物质来源上看,前人认为清虚洞组礁灰岩提供成矿物质,实则其 Pb、Zn 含量并未出现异常高的丰度,也就是说沉积成岩期并未出现初始成矿产物的富集;前人获得的似层状矿体的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值介于 0.709 23~0.709 50(段其发等,2014;廖震文等,2015;周云等,2015),与五伦铅锌矿床的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值接近,暗示成矿物质具有同源性,矿源层亦为含矿层之下成矿元素高含量的南华纪—寒武纪早期地层中的碎屑岩系,进一步表明该区铅锌矿床为后生成因。层控、相控仅是表象,这种控制主要是为后期成矿流体提供了有利的聚集场所,而与沉积作用成矿无关,构造与岩性控制才是区内铅锌成矿的关键。具体表现在以下方面:(1)湘西北地区铅锌矿严格受区内断裂构造控制。NE 向深大断裂带属导矿构造,控制了矿田和矿床的分布,铅锌矿床主要夹持在花垣—张家界断裂和麻栗场断裂两条深大断裂之间(刘劲松等,2012)。层间滑动破碎带和 NE、NW 向张剪性断裂为容矿构造,控制了矿体和矿化带的分布范围与规模。(2)赋矿岩系以藻灰岩、白云岩、砂屑灰岩为主,其次为硅化云质灰岩、硅化生物碎屑灰岩、硅化龟裂纹灰岩等,均具有性脆、质纯、孔隙较高的特点(匡文龙等,2015)。在挤压构造应力作用下,容易产生各种裂隙,为矿液流动和矿质沉淀提供有利空间。且碳酸盐岩化学活动性强,容易与成矿热液发生交代作用,也是岩性控矿的因素之一。(3)含矿碳酸盐岩上、下均发育泥页岩、泥灰岩、泥质灰岩等隔水层,如寒武系下统敖溪组下段、奥陶系下统桐梓组上段和奥陶系上统一志留系下统龙马溪组等。渗透性较差的上、下屏蔽层夹高孔隙度碳酸盐岩组合,使得成矿热液发生横向不均衡的面型渗滤、蚀变和交代充填作用,形成受层滑构造控制的似层状铅锌矿体。

## 4 结论

(1)五伦铅锌矿床矿体沿 NW 向断裂呈陡倾脉状产出,利用闪锌矿 Rb-Sr 法定年,获得主成矿阶段闪锌矿 Rb-Sr 同位素等时线年龄为  $238.9 \pm 4.5$  Ma,表明矿床形成于中三叠世晚期,该矿床是对早印支运动的成矿响应。

(2)五伦铅锌矿床的成矿物质应主要来源于含矿层之下成矿元素高含量的南华纪—寒武纪早期地层中的碎屑岩系,其较高的闪锌矿的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值 ( $0.710\ 86 \pm 0.000\ 16$ ) 指示成矿过程中陆壳影响

较为明显。

(3)结合前人资料,笔者认为湘西北地区至少存在两期铅锌成矿作用,分别对应于加里东期构造运动后伸展作用和印支早期华南陆块汇聚碰撞形成的局部伸展作用,加里东期似层状矿体与印支期陡倾脉状矿体共同构成“交错型”空间产出关系。

## References

- Bai, D. Y., Zhong, X., Jia, P. Y., et al., 2015. Geological Structure Characteristics of the Northern Segment of Xuefeng Orogen: A Case Study of the Cili-Anhua Corridor. *Journal of Geomechanics*, 21(3): 399—414 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6616.2015.03.011>
- Bartlett, W. L., Friedman, M., Logan, J. M., 1981. Experimental Folding and Faulting of Rocks under Confining Pressure Part IX. Wrench Faults in Limestone Layers. *Tectonophysics*, 79(3—4): 255—277. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90116-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90116-5)
- Bradley, D. C., Leach, D. L., 2003. Tectonic Controls of Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Mineralization in Orogenic Forelands. *Mineralium Deposita*, 38(6): 652—667. <https://doi.org/10.1007/s00126-003-0355-2>
- Brannon, J. C., Podosek, F. A., McLimans, R. K., 1992. Alleghenian Age of the Upper Mississippi Valley Zinc-lead Deposit Determined by Rb-Sr Dating of Sphalerite. *Nature*, 356(6369): 509—511. <https://doi.org/10.1038/356509a0>
- 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., Leigh, K. E., et al., 1995a. Direct Dating of Sulfides by Rb-Sr: A Critical Test Using the Polaris Mississippi Valley-Type Zn-Pb Deposit. *Geochimica 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)
- Christensen, J. N., Halliday, A. N., Vearncombe, J. R., et al., 1995b. Testing Models of Large-Scale Crustal Fluid Flow Using Direct Dating of Sulfides; Rb-Sr Evidence for Early Dewatering and Formation of Mississippi Valley-Type Deposits, Canning Basin, Australia. *Economic Geology*, 90(4): 877—884. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.4.877>
- Denison, R. E., Kirkland, D. W., Evans, R., 1998. Using Strontium Isotopes to Determine the Age and Origin of Gypsum and Anhydrite Beds. *The Journal of Geology*, 106(1): 1—18. <https://doi.org/10.1086/515996>

- Du, Y.S., Xu, Y.J., 2012. A Preliminary Study on Caledonian Event in South China. *Geological Science and Technology Information*, 31(5): 43—49 (in Chinese with English abstract).
- 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—986, 999 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.089>
- Hou, M.L., Jiang S.Y., Jiang, Y.H., et al., 2006. S-Pb Isotope geochemistry and Rb-Sr Geochronology of the Penglai Gold Field in the Eastern Shangdong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2525—2533 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0569.2006.10.013>
- Hu, Q.Q., Wang, Y.T., Wang, R.T., et al., 2012. Ore-Forming Time of the Erlihe Pb-Zn Deposit in the Fengxian-Taibai Ore Concentration Area, Shaanxi Province: Evidence from the Rb-Sr Isotopic Dating of Sphalerites. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 258—266 (in Chinese with English abstract).
- Huang, H., Zhang, C.Q., Zhou, Y.M., et al., 2014. Rb-Sr Isochron Age of Jinchanghe Fe-Cu-Pb-Zn Polymetallic Deposit in Yunnan Province and Its Geological Significance. *Mineral Deposits*, 33(1): 123—136 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7106.2014.01.008>
- Huang, S.J., Liu, S.G., Li, G.R., et al., 2004. Strontium Isotope Composition of Marine Carbonate and the Influence of Diagenetic Fluid on It in Ordovician. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(1): 1—7 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-9727.2004.01.001>
- Huang, S.J., Shi, H., Mao, X.D., et al., 2002. Evolution of Sr Isotopes of the Cambrian Sections in Xiushan, Chongqing and Related Global Correlation. *Geological Review*, 48(5): 509—516 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2002.05.011>
- Kong, H., Zhao, J.J., Xu, M.Z., et al., 2015. Analysing on the Metallogenic Structures of Huayuan Lead-Zinc Ore Field in Western Hunan. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(Suppl. 1): 1013— (in Chinese). <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2015.s1.732>
- 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>
- Leach, D.L., Bradley, D., Lewchuk, M.T., et al., 2001. Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Deposits through Geological Time: Implications from Recent Age-Dating Research. *Mineralium Deposita*, 36(8): 711—740. <https://doi.org/10.1007/s001260100208>
- 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 Metallogenia*, 26(4): 436—441 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2002.04.015>
- Li, W.B., Huang, Z.L., Chen, J., et al., 2004. Rb-Sr Dating of Mineral Assemblage from the Huize Giant Zn-Pb Deposit, Yunnan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(2): 112—116 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2004.02.003>
- Li, Z.F., 1991. A Preliminary Discussion on the Origin of Pb-Zn Ore Deposits in Western Hunan and Eastern Guizhou. *Geology of Guizhou*, 8(4): 363—371 (in Chinese with English abstract).
- Liang, E.Y., Liu, W., Peng, N.L., et al., 2015. Geochemistry Characteristics of Lead-Zinc Mineralized Wall-Rock for Ordovician in the Northwest of Hunan. *Journal of Guilin University of Technology*, 35(4): 694—700 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9057.2015.04.006>
- Liao, Z.W., Wang, S.W., Sun, X.M., et al., 2015. Rb-Sr Dating of Sphalerites from MVT Pb-Zn Deposits in Northeastern Guizhou Province and Its Geological implications. *Mineral Deposits*, 34(4): 769—785 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2015.04.008>
- Lin, Z.Y., Wang, D.H., Zhang, C.Q., 2010. Rb-Sr Isotopic Age of Sphalerite from the Paoma Lead-Zinc Deposit in Sichuan Province and Its implications. *Geology in China*, 37(2): 488—494 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3657.2010.02.023>
- Liu, B.J., Wang, J., 1990. The Characteristics of the Limei Paleokarst in Western Hunan Province, China, with Particular Reference to Its Genesis. *Geotectonica et Metallogenia*, 14(1): 57—67 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.1990.01.007>
- Liu, J.S., Zou, X.W., Tang, C.Y., et al., 2012. The Sedimentary Environment and Lead-Zinc Mineralization of Lower Cambrian Qingxudong Formation in Songtao-Heku Area. *Mineral Deposits*, 31(Suppl. 1): 19—20 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2012.01.001>

0258-7106.2012.s1.012

- Liu, T. G., Ye L., 2000. Geological-Geochemical Characteristics of Niujiaotang Independent Cadmium Deposit. *Acta Mineralogica Sinica*, 20(3): 279—285 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2000.03.011>
- Liu, W. J., Zheng, R. C., Li, Y. L., et al., 1999. Study of Bitumen in the Huayuan Lead-Zinc Deposit—Organic Geochemistry Study of MVT Lead-Zinc Deposit. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(1): 19—23 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0550.1999.01.003>
- Long, B. L., Liu, Z. M., 2005. Basic Characteristics and Prognosis of Pb-Zn Deposits in the Western Hubei Province. *Geology and Prospecting*, 41(3): 16—21 (in Chinese with English abstract).
- Long, B. L., Liu, Z. M., 2005. Basic Characteristics and Prognosis of Pb-Zn Deposits in the Western Hubei Province. *Geology and Prospecting*, 41(3): 16—21 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.0495-5331.2005.03.004>
- Ludwig, K. R., 2001. Users Manual for Isoplot/ Ex Version 2.49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- 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 Northwestern Hunan Province. *Geological Survey and Research*, 32(3): 194—202 (in Chinese with English abstract).
- McArthur, J. M., 1994. Recent Trends in Strontium Isotope Stratigraphy. *Terra Nova*, 6(4): 331—358. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1994.tb00507.x>
- McArthur, J. M., Howarth, R. J., Shields, G. A., 2012. The Geologic Time Scale. *Elsevier, Boston*, 127—144. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00007-X>
- McArthur, J. M., Kennedy, W. J., Chen, M., et al., 1994. Strontium Isotope Stratigraphy for Late Cretaceous Time: Direct Numerical Calibration of the Sr Isotope Curve Based on the US Western Interior. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 108(1—2): 95—119. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(94\)90024-8](https://doi.org/10.1016/0031-0182(94)90024-8)
- 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>
- Nakai, S., Halliday, A. N., Kesler, S. E., et al., 1993. Rb-Sr Dating of Sphalerites from Mississippi Valley-Type (MVT) Ore Deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(2): 417—427. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90440-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90440-8)
- Palmer, M. R., Edmond, J. M., 1989. The Strontium Isotope Budget of the Modern Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 92(1): 11—26. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(89\)90017-4](https://doi.org/10.1016/0012-821x(89)90017-4)
- Petke, T., Diamond, L. W., 1996. Rb-Sr Dating of Sphalerite Based on Fluid Inclusion-Host Mineral Isochrons; A Clarification of Why it Works. *Economic Geology*, 91(5): 951—956. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.91.5.951>
- Qing, H. R., Barnes, C. R., Buhl, D., et al., 1998. The Strontium Isotopic Composition of Ordovician and Silurian Brachiopods and Conodonts; Relationships to Geological Events and Implications for Coeval Seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(10): 1721—1733. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(98\)00104-5](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(98)00104-5)
- Rui, Z. Y., Ye, J. H., Zhang, L. S., et al., 2004. Pb-Zn Deposits on the Perimeter of the Yangtze Craton and the Margins of Its Uplifts. *Geology in China*, 31(4): 337—346 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3657.2004.04.001>
- Shu, J. W., Peng, G. Z., 1986. Application of Metallogeny of Diagenesis (Geodepression) Theory to Prospecting for Rich Ore in the Yutang Lead-Zinc Sulfide Deposit. *Geotectonica et Metallogenia*, 10(4): 359—367 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.1986.04.012>
- Sun, Y. X., Lin, W. Q., Zhou, Z. D., 1985. Algae Fossil Assemblage, Sedimentary Environment and Mineralization of Lower Cambrian Qingxudong Formation, Yutang, Huayuan, Hunan. *Journal of Chengdu College of Geology*, 12(1): 52—60, 111—112 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., Wu, G. G., Wang, C. M., et al., 2013. Rb-Sr Dating of Sphalerites from the Lengshuikeng Ag-Pb-Zn Deposit, Jiangxi, and Its Geological Significances. *Acta Geologica Sinica*, 87(5): 621—633 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.0001-5717.2013.05.003>
- Yang, S. X., Lao, K. T., 2007a. A Tentative Discussion on Genesis of Lead-Zinc Deposits in Northwest Hunan. *Mineral Deposits*, 26(3): 330—340 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7106.2007.03.010>
- Yang, S. X., Lao, K. T., 2007b. 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). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-2552.2007.07.015>

- Yang, Y. C., Guo, W. J., Wang, Y. J., et al., 2015. Rb-Sr Dating of Sphalerites from Dongjun Pb-Zn-Ag Deposit, Inner Mongolia and Its Geological Significance. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 348—356 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13745/j.esf.2015.03.030>
- Yu, W. C., Du, Y. S., Zhou, Q., et al., 2016. Provenance of Nanhuan Datangpo Formation Manganese Mn Deposit in Songtao Area, East Guizhou Province: Evidence from Sr Isotope. *Earth Science*, 41(7): 1110—1120 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.092>
- Zhang, C. Q., Li, X. H., Yu, J. J., et al., 2008. Rb-Sr Dating of Single Sphalerites from the Daliangzi Pb-Zn Deposit, Sichuan, and Its Geological Significances. *Geological Review*, 54(4): 532—538 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2008.04.006>
- Zhang, C. Q., Yu, J. J., Mao, J. W., et al., 2009. Advances in the Study of Mississippi Valley-Type Deposits. *Mineral Deposits*, 28(2): 195—210 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7106.2009.02.008>
- Zhang, Y. Q., Xu, X. B., Jia, D., et al., 2009. Deformation Record of the Change from Indosinian Collision-Related Tectonic System to Yanshanian Subduction-Related tectonic System in South China During the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234—247 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. X., Wu, Y., Tian, G., et al., 2014. Mineralization Age and the Source of Ore-Forming Material at Lehong Pb-Zn Deposit, Yunnan Province: Constraints from Rb-Sr and S Isotopes System. *Acta Mineralogica Sinica*, 34(3): 305—311. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2014.03.002>
- Zheng, W., Chen, M. H., Xu, L. G., et al., 2013. Rb-Sr Isochron Age of Tiantang Cu-Pb-Zn Polymetallic Deposit in Guangdong Province and Its Geological Significance. *Mineral Deposits*, 32(2): 259—272 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2013.02.003>
- Zhou, Y., Duan, Q. F., Peng, S. G., et al., 2011. Discussion on the Metallogenic Regularity and Genesis of Lead-Zinc Deposits in Huayuan Area, West Hunan. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(Suppl.1): 234—235 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2011.s1.085>
- Zhou, Y., Duan, Q. F., Chen, Y. C., et al., 2015. Rb-Sr Dating and Tracer Study of Quartz from the Jiangjiaya Lead-Zinc Deposit in Western Hunan. *Geology in China*, 42(2): 597—606 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3657.2015.02.018>
- ### 附中文参考文献
- 柏道远, 钟响, 贾朋远, 等, 2015. 雪峰造山带北段地质构造特征——以慈利—安化走廊剖面为例. *地质力学学报*, 21(3): 399—414.
- 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.
- 杜远生, 徐亚军, 2012. 华南加里东运动初探. *地质科技情报*, 31(5): 43—49.
- 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—986, 999.
- 侯明兰, 蒋少涌, 姜耀辉, 等, 2006. 胶东蓬莱金成矿区的 S-Pb 同位素地球化学和 Rb-Sr 同位素年代学研究. *岩石学报*, 22(10): 2525—2533.
- 胡乔青, 王义天, 王瑞廷, 等, 2012. 陕西省凤太矿集区二里河铅锌矿床的成矿时代: 来自闪锌矿 Rb-Sr 同位素年龄的证据. *岩石学报*, 28(1): 258—266.
- 黄华, 张长青, 周云满, 等, 2014. 云南保山金厂河铁铜铅锌多金属矿床 Rb-Sr 等时线测年及其地质意义. *矿床地质*, 33(1): 123—136.
- 黄思静, 刘树根, 李国蓉, 等, 2004. 奥陶系海相碳酸盐锶同位素组成及受成岩流体的影响. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 31(1): 1—7.
- 黄思静, 石和, 毛晓冬, 等, 2002. 重庆秀山寒武系锶同位素演化曲线及全球对比. *地质论评*, 48(5): 509—516.
- 孔华, 赵佳进, 许明珠, 等, 2015. 湘西花垣铅锌矿田成矿构造浅析. *矿物学报*, 35(S1): 1013.
- 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.
- 李文博, 黄智龙, 陈进, 等, 2004. 会泽超大型铅锌矿床成矿时代研究. *矿物学报*, 24(2): 112—116.
- 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): 436—441.
- 李宗发, 1991. 湘西黔东南地区铅锌矿成因初步探讨. *贵州地质*, 8(4): 363—371.
- 梁恩云, 刘伟, 彭能立, 等, 2015. 湘西北地区奥陶系铅锌矿化围岩的地球化学特征. *桂林理工大学学报*, 35(4): 694—700.
- 廖震文, 王生伟, 孙晓明, 等, 2015. 黔东南地区 MVT 型铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 定年及其地质意义. *矿床地质*, 34(4): 769—785.
- 蔺志永, 王登红, 张长青, 2010. 四川宁南跑马铅锌矿床的成矿时代及其地质意义. *中国地质*, 37(2): 488—494.
- 刘宝郡, 王剑, 1990. 湘西花垣李梅铅锌矿区古热液卡斯特特征及其成因研究. *大地构造与成矿学*, 14(1): 57—67.
- 刘劲松, 邹先武, 汤朝阳, 等, 2012. 松桃—禾库地区早寒武世

清虚洞期沉积环境与铅锌成矿.矿床地质,31(S1): 19—20.

刘铁庚,叶霖,2000.都匀牛角塘大型独立镉矿床的地质地球化学特征.矿物学报,20(3): 279—285.

刘文均,郑荣才,李元林,等,1999.花垣铅锌矿床中沥青的初步研究——MVT 铅锌矿床有机地化研究(I).沉积学报,17(1): 19—23.

龙宝林,刘忠明,2005.鄂西地区铅锌矿基本特征与找矿方向.地质与勘探,41(3): 16—21.

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,32(3): 194—202.

芮宗瑶,叶锦华,张立生,等,2004.扬子克拉通周边及其隆起边缘的铅锌矿床.中国地质,31(4): 337—346.

舒见闻,彭国忠,1986.湖南花垣县渔塘铅锌矿床运用地洼学说成矿学找寻富矿的体会.大地构造与成矿学,10(4): 359—367.

孙玉娴,林文球,周振冬,1985.湖南花垣早寒武世清虚洞期的藻化石、沉积环境及与成矿的关系.成都地质学院学报,12(1): 52—60, 111—112.

徐贻赣,吴淦国,王长明,等,2013.江西冷水坑银铅锌矿田闪锌矿铷—锶测年及地质意义.地质学报,87(5): 621—633.

杨绍祥,劳可通,2007a.湘西北铅锌矿床碳氢氧同位素特征及成矿环境分析.矿床地质,26(3): 330—340.

杨绍祥,劳可通,2007b.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.

杨郢城,郭万军,王亚君,等,2015.内蒙古东珙铅锌银矿床闪锌矿 Rb-Sr 定年及其地质意义.地质前缘,22(3): 348—356.

余文超,杜远生,周琦,等,2016.黔东南桃南华系大塘坡组锰矿层物源:来自 Sr 同位素的证据.地球科学,41(7): 1110—1120.

张岳桥,徐先兵,贾东,等,2009.华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录.地质前缘,16(1): 234—247.

张云新,吴越,田广,等,2014.云南乐红铅锌矿床成矿时代与成矿物质来源:Rb-Sr 和 S 同位素制约.矿物学报,34(3): 305—311.

张长青,李向辉,余金杰,等,2008.四川大梁子铅锌矿床单颗粒闪锌矿铷—锶测年及地质意义.地质论评,54(4): 532—538.

张长青,余金杰,毛景文,等,2009.密西西比型(MVT)铅锌矿床研究进展.矿床地质,28(2): 195—210.

郑伟,陈懋弘,徐林刚,等,2013.广东天堂铜铅锌多金属矿床 Rb-Sr 等时线年龄及其地质意义.矿床地质,32(2): 259—272.

周云,段其发,陈毓川,等,2015.湘西龙山江家垭铅锌矿床石英 Rb-Sr 同位素测年与示踪研究.中国地质,42(2): 597—606.

周云,段其发,彭三国,等,2011.湘西花垣地区铅锌成矿规律及矿床成因探讨.矿物学报,31(S1): 234—235.