

周云, 段其发, 陈毓川, 等. 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[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 597-606.

Zhou Yun, Duan Qifa, Chen Yuchuan, et al. Rb-Sr dating and tracer study of quartz from the Jiangjiaya lead-zinc deposit in western Hunan[J]. Geology in China, 2015, 42(2): 597-606(in Chinese with English abstract).

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

周 云^{1,2} 段其发² 陈毓川³ 唐菊兴³ 曹 亮¹ 甘金木¹

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;
3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 江家垭铅锌矿床位于扬子地台东南缘, 红岩溪背斜轴部, 是湘西—鄂西铅锌成矿带重要的铅锌矿床之一, 铅锌矿体呈似层状和脉状, 受地层与构造的控制, 主要产于下奥陶统南津关组砂屑灰岩中。文章首次采用超低本底石英 Rb-Sr 同位素测年方法, 对湘西龙山江家垭铅锌矿床主成矿期形成的富铅锌石英脉进行了等时线年龄测定, 获得成矿年龄为 (372 ± 9.8) Ma, $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr}) = (0.709409 \pm 0.000058)$ 。通过成矿地质背景探讨, 认为该矿床的形成与晚泥盆世华南地区发生的拉张断陷导致的盆地流体大规模运动有关。锶同位素初始比值测试结果表明江家垭铅锌矿床成矿物质来源可能主要源自围岩碳酸盐岩, 成矿过程中陆壳的影响较为明显。

关键词: Rb-Sr 测年; 石英; 江家垭; 湘西

中图分类号: P597; P618.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)02-0597-10

Rb-Sr dating and tracer study of quartz from the Jiangjiaya lead-zinc deposit in western Hunan

ZHOU Yun^{1,2}, DUAN Qi-fa¹, CHEN Yu-chuan³, TANG Ju-xing³, CAO Liang¹, GAN Jin-mu¹

(1. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Jiangjiaya Pb-Zn deposit, located on the southeastern margin of the Yangtze craton and along the axis of the Hongyanxi anticline, is an important Pb-Zn deposit in the western Hunan-western Hubei metallogenic belt. The orebody exhibits stratabound and veined forms and is controlled by strata and faults, and the deposit occurs in the Ordovician (Early Paleozoic) Nanjinguan Formation. The ultra-low procedural blanks and Rb-Sr dating of quartz separates yielded an isochron age of (372 ± 9.8) Ma, with $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ equal to (0.709409 ± 0.000058) for the deposit, which represents the main stage ore-forming age of the

收稿日期: 2014-03-12; 改回日期: 2014-07-25

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011120790)和国家 973 项目(2011CB403103)联合资助。

作者简介: 周云, 女, 1984 年生, 实习研究员, 博士生, 主要从事成矿规律与成矿预测研究工作; E-mail: zhouyun0910@163.com。

通讯作者: 段其发, 男, 1966 年生, 博士, 教授级高工, 从事区域地质矿产研究工作; E-mail: bohet2007@163.com。

deposit. Geological setting indicates that the formation of the deposit was probably related to the late Devonian mass movement of basin fluids resulting from extensional and fault depression in South China. Initial Sr isotope ratios show that the ore materials of the deposit were derived from the host rocks, and the influence of continental crust was obvious in the ore-forming process.

Key words: Rb-Sr dating; quartz; Jiangjiaya; western Hunan

About the first author: ZHOU Yun, female, born in 1984, doctor candidate, majors in the study of metallogenic regularity and prognosis; E-mail: zhoyun0910@163.com.

About the corresponding author: DUAN Qi-fa, male, born in 1966, professor, doctor, mainly engages in the study of regional geology and mineral resources; E-mail: bohet2007@163.com.

湘西北铅锌矿带,属中国16个重点成矿区带之湘西—鄂西铅锌多金属成矿带的南西段,带内铅锌矿床(点)星罗棋布,由北而南可划分为洛塔、保靖、花垣和凤凰4个矿田^[1],洛塔矿田内有江家垭、姚家垭、木塔、龙泽湖、下光荣和天王庙6个矿床(点),是湖南重要的铅锌矿产资源后备基地。由于该区自然地理及交通条件的限制,铅锌矿床成因等方面的研究程度还较低^[2]。该区铅锌矿与湘西—鄂西铅锌多金属成矿带中的多数较典型的产于碳酸盐岩地层中的铅锌矿床(点)不尽相同^[3-7],其硅化比较发育,铅锌矿化与硅化关系密切,矿床成因与传统的MVT型铅锌矿必然有所区别^[8-14]。确定江家垭铅锌矿床的形成年代,对于理解矿床的形成过程、确定矿床的成因以及对进一步找矿都具有十分重要的意义。

金属矿物的沉淀受生成化学反应环境复杂性的影响,经常没有达到同位素平衡甚至没有达到化学平衡和同位素均一化,而且常受到后期构造-热活动影响造成同位素体系变化^[15-17]。石英由于具有良好的机械强度、高的化学纯度、较好的热稳定性和后生变化微弱等特点,因此,相对于江家垭铅锌矿床中的金属矿物闪锌矿,共生的脉石矿物石英是Rb-Sr法直接测定成矿作用时代的最理想矿物^[18-20]。

近年来,通过测定石英中流体包裹体的Rb-Sr同位素比值来确定金矿床的形成年代的工作已取得良好效果^[21-25],但是由于铅锌矿床中发育共生石英的情况相对较少,通过测定石英中流体包裹体的Rb-Sr同位素比值来确定铅锌矿床的形成年代的相关文献在国内尚未见报道,只有Shepherd等对英国Pennine北部MVT铅锌矿床进行了石英流体包裹体Rb-Sr等时线年龄测定^[19]。本文对江家垭矿床具有代表性的铅锌矿化石英样品进行了流体包裹体的Rb-Sr同位素组成测定,以确定该矿床形成的时代,探讨矿床成因。

1 地质概况

该矿区位于洛塔矿田的中部,隶属龙山县管辖,处于红岩溪背斜轴部,呈NNE向的长条带状展布(图1)。

矿区出露地层由老至新有:寒武系中上统娄山关群、奥陶系下统南津关组、分乡组、红花园组、大湾组、牯牛潭组、中统宝塔组、临湘组、上统五峰组、志留系下统龙马溪组及第四系地层。本矿区的主要含矿层位为南津关组第一段(O_1n^1),南津关组可分为4个岩性段:

南津关组第一段(O_1n^1):底部为亮晶含砾屑不等粒砂屑灰岩,局部见板状交错层理;下部为灰色厚层亮晶含砾屑不等粒砂屑云质灰岩夹粉—细晶白云岩,为本区重要的含矿层位;中上部为浅灰、灰色厚层含云质泥(粉)晶细—粗砂屑灰岩、含生物屑(藻团粒)泥晶灰岩夹多层叠层石灰岩,在此层的顶部或底部有时发生硅化及铅锌矿化。地层厚度82.74~150 m,与下伏地层呈整合接触。南津关组第二段(O_1n^2):灰色中、厚层泥晶生物屑灰岩,一般为泥、细晶结构,局部重结晶为粗晶结构,其中下部常发生硅化(形成交代硅质岩)和铅锌矿化。为本区主要的含矿层位。该段厚度变化大,最薄处6.29 m(打溪矿段),最厚处29.71 m。南津关组第三段(O_1n^3):浅灰、灰色薄—中厚层网纹状—条带状含泥云质、含生物屑(藻团粒)泥晶灰岩和亮晶中细粒砂屑灰岩,具不规则网纹状构造。中部见硅质条带,团块或薄板。由下至上泥质逐渐减少、云质逐渐增多。该地层厚度较为稳定,为37.14~42.43 m。南津关组第四段(O_1n^4):灰色厚层亮晶细—中粒砂屑灰岩、泥晶含云质藻灰岩、藻层纹石云质灰岩夹中厚层灰质云岩;底部20~30 m发育大型交错层理。顶部见有硅化体及铅锌矿化,为次要含矿层位。地层厚度118.45~150.09 m。

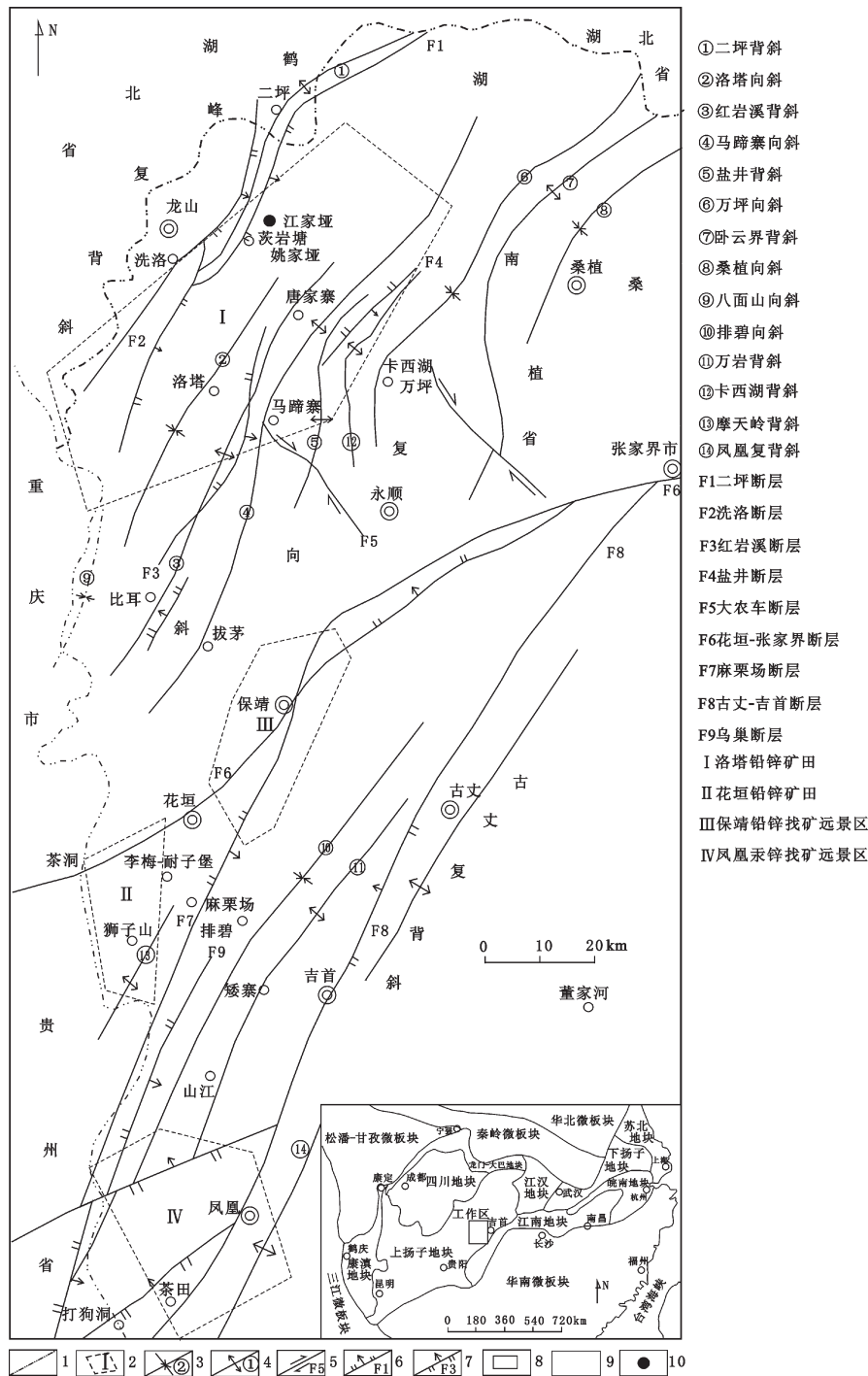


图1 湘西北铅锌矿带区域构造略图(据文献[1]修编)

1—省界; 2—矿田界线; 3—向斜及其编号; 4—背斜及其编号; 5—平移断层及其编号; 6—正断层及其编号; 7—逆断层及其编号; 8—南区斜坡相; 9—北区斜坡相; 10—江家垅铅锌矿床

Fig.1 Regional tectonic sketch map of lead-zinc deposits in northwest Hunan (modified after reference [1])

1-Provincial boundaries; 2-Boundaries of orefield; 3-Syncline and its serial number; 4-Anticline and its serial number; 5-Strike-slip fault and its serial number; 6-Normal fault and its serial number; 7-Reverse fault and its serial number; 8-Southern slope facies; 9-Northern slope facies; 10-Jiangjiayong Pb-Zn deposit

矿区位于红岩溪背斜轴部,背斜轴向NE30°,延伸长度大于10 km,幅宽2~3 km。背斜核部出露寒武系中、上统娄山关组,两翼主要为奥陶系和志留系。SE翼倾向20°~40°,NW翼倾向40°~65°,为一轴面倾向NW的斜歪背斜。矿区断裂构造较发育,以NNE走向为主,断裂破碎带主要由密集剪节理带及硅化灰岩组成,局部可见断层透镜体,多具张扭性正断层性质。另有较多的规模较小的NE向和NW向断裂分布。其中NW向断裂或节理多为矿区脉状矿体的容矿构造。背斜核部的虚脱部位和层间破碎带、滑动面或节理带也是区内矿体主要的容矿构造。矿石矿物成分较简单。氧化矿石中的主要矿石矿物为菱锌矿、异极矿及白铅矿,少量的水锌矿、硅锌矿、褐铁矿、硫镉矿,偶见红锌矿及铜蓝;硫化矿石中的主要矿石矿物为闪锌矿,次为方铅矿,少量的黄铁矿。矿石中的脉石矿物主要为石英、方解石和白云石,次为粘土矿物等。硫化矿石主要具半自形、他形粒状结构、交代结构及包含结构;矿石构造主要为致密块状构造、条带状构造与浸染状构造。矿化以锌为主,铅次之,矿化带受地层与构造的控制而呈NE30°方向延伸。围岩蚀变主要为硅化,次为方解石化。硅化蚀变带呈似层状和脉状2种形态分布,长十几米至数千米不等。硅化的强弱与矿化强度关系密切。矿化分布于硅化带中。

2 样品特征、测试方法及结果

本次工作从江家垭铅锌矿床中采集5件铅锌矿石样品用于测试分析,赋矿地层为南津关组,5件矿石样品均为同期次形成,采集于同一矿脉、不同空间位置。矿石样品为方铅矿化石英脉和闪锌矿化石英脉。样品矿物成分较简单,主要矿石矿物为闪锌矿和方铅矿,矿石中的脉石矿物为石英。矿石主要具半自形、他形粒状结构、交代结构,矿石构造为致密块状构造、脉状构造与浸染状构造。方铅矿呈半自形、他形晶粒状集合体沿硅化带分布,呈团块状、浸染状分布于石英脉中(图2-a,b)。主要矿石矿物闪锌矿在手标本上呈红褐色,在石英脉中浸染状、脉状分布,局部呈斑点至斑块状密集分布,部分闪锌矿沿硅化带或其层面、裂隙进行充填交代时形成条带状构造(图2-c,d)。

闪锌矿(方铅矿)石中的硅化石英脉呈乳白色,

强油脂光泽。石英中的流体包裹体发育,可分为3种类型:Ⅰ类为两相盐水溶液包裹体($L_{H_2O}+V_{H_2O}$),由纯盐水+水蒸气组成的包裹体,占包裹体总量的20%左右, V_{H_2O} 占总($L_{H_2O}+V_{H_2O}$)的5%~20%。 L_{H_2O} 相在透光下为无色—浅粉色,包裹体大小为3~10 μm ,形态多为负晶形、米粒状和椭圆形(图2-e,f)。多呈自由分布或小群状分布,少数沿愈合微裂隙线形分布。Ⅱ类为单相盐水溶液包裹体(L_{H_2O}),由纯盐水组成的包裹体,占包裹体总量的40%左右, L_{H_2O} 相颜色在透光下为无色—浅粉色,包裹体大小为2~5 μm ,形态多为米粒状和椭圆形(图2-g)。多呈小群状分布或在石英颗粒内部愈合微裂隙呈线状分布。Ⅲ类为单相气相包裹体(V_{H_2O}),由气相组成的包裹体,占包裹体总量的40%左右; V_{H_2O} 相在透光下为棕黑色—黑色,包裹体大小为3~7 μm ,形态为椭圆形、近圆形和不规则状(图2-h)。多呈自由分布或小群状分布,少数沿愈合微裂隙线形分布。根据石英流体包裹体样品的均一法测温结果,研究区主成矿期的流体包裹体均一温度为108~197 $^{\circ}\text{C}$ ^[2],盐度范围主要为9%~14% NaCl eq。

先将手标本用水清洗干净,风干,再粗碎,挑选干净的石英。再将样品粉碎至0.2~0.5 mm,在双目镜下人工挑选纯净的石英单矿物样品,石英的纯度近于100%。由中国地质调查局武汉地质矿产研究所同位素开放研究实验室测试,测试方法为:①先将选纯的石英单矿物用6 mol/L超纯HCl加热清洗2次,再用超纯水清洗至中性,烘干;②放入烘箱内,在120~180 $^{\circ}\text{C}$ 爆裂,去除次生包裹体;③用超纯水在超声波清洗机内清洗3~5遍,热烤干备用;④将石英试样加入混合稀释剂,用HF和HClO₄分解全溶,用离子交换法分离和纯化Rb、Sr;⑤用同位素稀释质谱法测定试样中的Rb、Sr含量及Sr同位素比值。整个化学流程的操作均在超净化实验室完成,使用仪器为德国MAT公司生产的MAT-261质谱仪,用标准物质NSB-987、NSB-607和GBW04411分别对分析流程和仪器的工作状态进行监控,NSB-987的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位素组成测定平均值为(0.71024±0.00019)(2 σ),与证书值(0.71024±0.00026)(2 σ)在误差范围内一致。NSB-607的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位素组成测定平均值为(1.20025±0.00004)(2 σ),与证书值(1.20039±0.00020)(2 σ)在误差范围内一致。GBW04411的

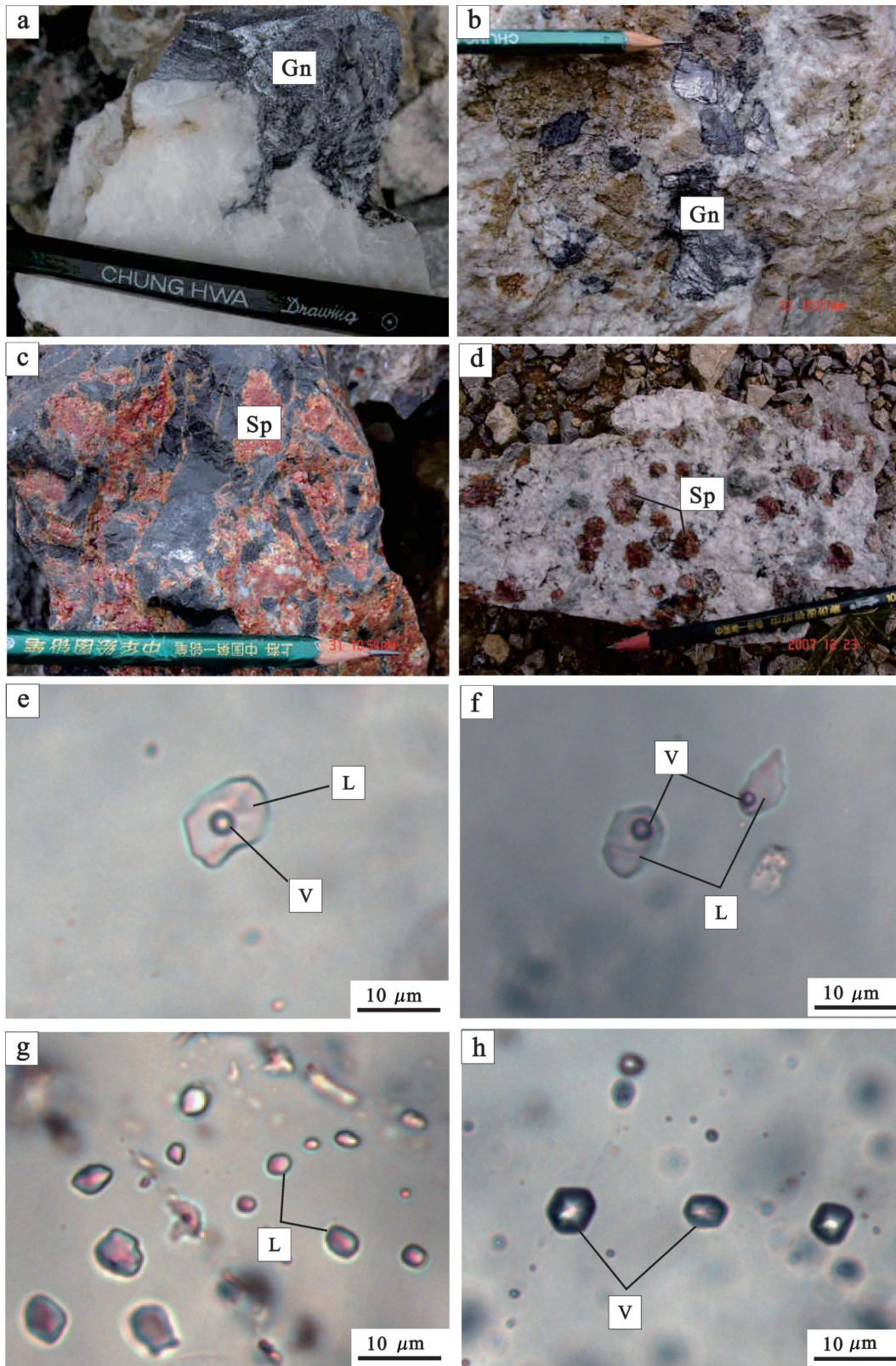


图2 江家垅铅锌矿床矿石及流体包裹体照片

Gn—方铅矿; Sp—闪锌矿; L—流体包裹体液相; V—流体包裹体气相

Fig.2 Ore and fluid inclusion photographs of the Jiangjiaya lead-zinc deposit

Gn—Galena; Sp—Sphalerite; L—Liquid phase of fluid inclusion; V—Gas phase of fluid inclusion

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素组成测定平均值为 (0.75981 ± 0.00004) (2σ), 与证书值 (0.75999 ± 0.00020) (2σ) 在误差范围内一致。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空白本底均为 1×10^{-10} g, 对所有样品均进行了本底校正。

江家垭铅锌矿的铅锌矿石中所有5个石英样品Rb、Sr同位素测定结果见表1, 石英中Rb的含量变化范围为 $0.10850\times 10^{-6}\sim 0.23170\times 10^{-6}$, Sr的含量变化范围为 $0.8404\times 10^{-6}\sim 2.0200\times 10^{-6}$, $n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ 的变化范围为 $0.2797\sim 0.7953$, $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 变化范围为 $(0.71089\pm 0.00007)\sim (0.71270\pm 0.00002)$ 。对该样品先后进行了2次测试, 两次测试结果吻合, 显示出测试仪器的稳定性和方法的可靠性。年龄计算的数据拟合采用ISOPLOT软件^[26-27]。

3 讨 论

3.1 年代分析

5个铅锌矿化石英脉样品(09JJY-2、09JJY-4、09JJY-8、09JJY-9、09JJY-18)测点的Rb-Sr年龄计算结果如图3, 样品相关系数为0.93, 等时线的斜率为 (0.005296 ± 0.000072) , 截距为 (0.709409 ± 0.000058) , 衰变常数 $\lambda^{87}\text{Sr}$ 为 $1.42\times 10^{-11}\text{a}^{-1}$ 。获得的等时线年龄为 (372 ± 9.8) Ma, $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 初始比值为 (0.709409 ± 0.000058) (1σ), MSWD=1.01。显示了该闪锌矿样品 $n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})-n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 图表现出较好的线性关系, 该等时线具有实际地质意义, 等时线年龄可代表成矿阶段的年龄。江家垭铅锌矿床等时线年龄为 (372 ± 9.8) Ma, 即成矿地质时代为晚泥盆世, 其赋矿地层为下奥陶统南津关组, 成矿地质时代晚于赋矿地层年代, 成矿可能与晚泥盆世华南地区发生的拉张断陷导致的盆地流体大规模运动有关。

泥盆纪是华南盆地演化的萌芽及发展阶段。中国南方的大地构造演化、泥盆纪古构造格局及同沉积断裂带与泥盆纪沉积作用、岩相古地理以及泥盆纪层控矿床的展布有着紧密的联系^[28]。中国南方泥盆纪古构造格局是在加里东旋回末期扬子陆块与华夏陆块碰撞形成的统一的华南大陆, 进入海西旋回早期, 处于松弛拉张的构造背景下形成的^[29]。早泥盆世开始, 海水由南循北东、北西方向侵入本区, 至晚泥盆世余田桥期(弗拉斯期)达到高潮。海

表1 江家垭铅锌矿石英Rb、Sr同位素组成

Table1 Rb-Sr isotopic data of quartz from the Jiangjiaya lead-zinc deposit

序号	样品编号	样品名称	Rb / 10^6	Sr / 10^6	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(2\sigma)$
1	09JJY-2	石英	0.11410	1.0860	0.3028	0.71102±0.00002
2	09JJY-4	石英	0.20930	0.9605	0.6287	0.71270±0.00002
3	09JJY-8	石英	0.23170	0.8404	0.7953	0.71199±0.00009
4	09JJY-9	石英	0.19590	2.0200	0.2797	0.71089±0.00007
5	09JJY-18	石英	0.10850	0.9950	0.3144	0.71107±0.00002

注: 由中国地质调查局武汉地质矿产研究所同位素开放研究实验室测试。

侵范围主要包括扬子陆块南缘的右江地区, 以及桂、湘、鄂地区, 下扬子及闽、粤部分地区亦有陆相碎屑沉积出现; 而扬子陆块及华夏陆块的大部分地区, 依然保持隆起剥蚀状态。在南部海相的沉积区内, 从早泥盆世四排期开始, 由于NE、NW向基底断裂的拉张作用, 出现了由硅-泥质岩组成的欠补偿的深水台盆, 它们大都具有线状分布、不对称结构, 边缘部分多具碳酸盐斜坡滑塌沉积, 并与孤立的碳酸盐台地组成相间分布、相互包围的古地理景观, 成为华南晚古生代最显著的沉积特色。华南地区海西-印支期的上述沉积作用特点, 是在伸展构造背景下形成的, 华南板内的拉张活动是十分强烈的, 甚至可能有大洋型沉积物出现^[30]。在华南泥盆纪沉积盆地的演化过程中, 海平面升降、盆地分异以及各种沉积事件之间, 有着明显的同步关系。成矿作用和它们之间也有着显著的时空一致性。在早泥盆世晚期和中泥盆世晚期到晚泥盆世早期, 华南沉积盆地正处于构造活跃时期, 其主要表现为NW向及NE向同生断裂的拉张(走滑)作用, 造成NW及NE向的地堑式或半地堑式线型盆地, 形成不同的古地理单元和沉积体系, 导致沉积盆地的分异。盆地演化过程中的构造活跃时期, 也是地热异常时期, 无论是成岩压实成因的含矿热液, 或渗滤循环形成的含矿热液, 都有可能在这个时期由于泵吸作用沿同生断裂上升, 在有利的岩相带中, 充填交代形成受层位限制的“后生-同生矿床”, 也有部分后生矿床是在同生断裂的后期继承性活动中, 由于深部渗流循环热液活动而在有利的相带中形成,

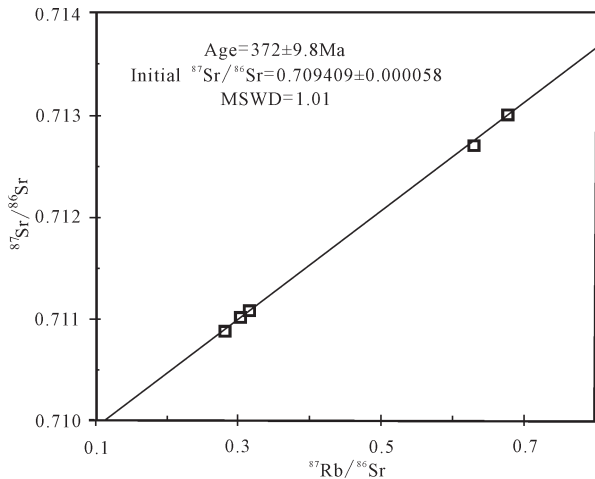


图3 江家垭铅锌矿床石英Rb-Sr同位素等时线
Fig.3 Rb-Sr isochron of quartz from the Jiangjiaya lead-zinc deposit

或者是经“活化改造”或叠加后形成。但无论是哪种情况,成矿期可能和构造期一致(同生的),或者成矿溶液在有利的岩相带中就位成矿,而在空间上和构造-岩相带一致(后生的)^[31]。

曾允孚等根据基底和同生断裂的活动形式、距离板块边缘的位置、地壳类型、沉积建造以及盆地形成的地球动力作用等,将华南地区泥盆纪的沉积盆地划分为8种类型:下扬子陆内走滑断陷盆地、鄂西陆内凹陷盆地、滇-黔陆内断陷盆地、南秦岭陆缘断拗盆地、龙门山陆缘断块盆地、右江陆缘裂谷盆地、南岭陆缘走滑盆地和哀牢山陆间盆地^[32]。鄂西-湘西北成矿区位于鄂西陆内凹陷盆地,江家垭铅锌矿床的形成和矿石特征与泥盆纪该区古地理环境密切相关,矿床的沉积环境主要为扬子板块的被动大陆边缘浅海环境,其中陆内凹陷盆地及封闭的浅水泻湖环境对成矿最为有利。

3.2 成矿物质来源

江家垭铅锌矿体的主要赋存层位为奥陶系下统南津关组的砂屑灰岩、生物碎屑灰岩和白云质灰岩等^[2]。全球早奥陶世海水的锶同位素⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值大于0.70788(图4), Qing et al.和 Denison et al.测试的锶同位素⁸⁷Sr/⁸⁶Sr数据的平均值为0.708737^[33-34](表2),从 McArthur et al.拟合曲线数据化的数据中早奥陶世的锶同位素⁸⁷Sr/⁸⁶Sr平均值为0.708988^[35](表2),早奥陶世早期的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值大于0.7091^[36-37](图3)。江家垭铅锌矿床矿石(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)值为(0.709409±

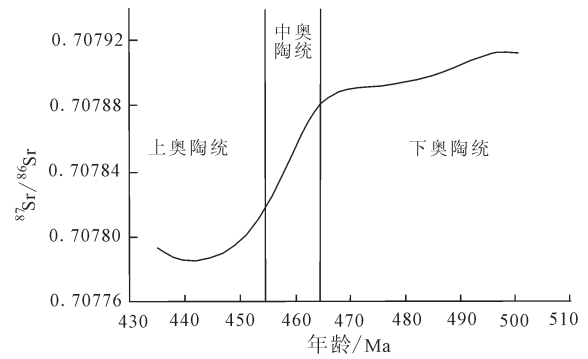


图4 奥陶纪海水锶同位素演化曲线^[36]
Fig.4 Strontium isotope curve for Ordovician sea water^[36]

表2 奥陶系及其上、中、下统的锶同位素⁸⁷Sr/⁸⁶Sr平均值
Table 2 Average ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr values for Ordovician and upper, middle and lower Ordovician strata

地层	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr 比值		数据频数
	Qing et al.(1998)和 Denison et al.(1998) ^[33-34]	McArthur et al.(2001) ^[35]	
上奥陶统	0.707970	0.707961	65
中奥陶统	0.708061	0.708505	22
下奥陶统	0.708737	0.708988	157
奥陶系平均值	0.708472	0.708537	244

0.000058),稍大于同期海相碳酸盐⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值,表明本区的成矿物质可能主要源自围岩碳酸盐岩地层^[38],但同时有流体带来的高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值的壳源锶的加入^[36],从表1也可以看出,所有样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值均大于0.71,是目前湘西-鄂西地区已知⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值的铅锌矿床中最高的,表明成矿过程中陆壳影响较为明显。

江家垭铅锌矿床石英Rb-Sr同位素组成及等时线年龄的获得,也为龙山铅锌矿带铅锌矿床找矿部署提供了理论依据。江家垭铅锌矿床SE向约20 km处的唐家寨铅锌矿床,位于龙山铅锌矿带中部(图1),矿床地质特征非常相似,其含矿层位也为南津关组灰色厚层不等粒砂屑灰岩、含生物屑泥晶灰岩,石英Rb-Sr同位素测年结果显示唐家寨铅锌矿床成矿时代与江家垭矿床同样为晚古生代泥盆纪(段其发等未发表资料),表明在龙山铅锌矿带中,江家垭与其周缘赋存于同一层位的铅锌矿床(点)可能受控于相同的动力学背景,晚泥盆世华南地区发生

的拉张断陷导致的盆地流体大规模运动,在该区形成了一系列赋存于相同层位的铅锌矿床(点)。龙山铅锌矿带诸铅锌矿床属于热水沉积矿床范畴。从根本上讲,含矿的热水沉积是盆地热水系统发展和演化达到相当阶段的产物,热水活动规模大,在其运移过程中溶解围岩和携带的成矿物质更丰富,通过化学和生物化学作用而沉积形成的似层状—透镜状矿床,规模可观^[39]。龙山江家垭—洛塔—红岩溪铅锌矿找矿区位于矿带中南部,长60 km,宽10 km,已知有江家垭等小而富的铅锌矿床,唐家寨、姚家垭、红岩溪等铅锌矿床(点),地表氧化锌化及硅化岩分布广泛,是探查奥陶系下统南津关组层状、似层状铅锌矿,包括次生富集的氧化锌矿的有利地区,找矿潜力较大。

4 结 论

本次研究对江家垭铅锌矿床石英进行了Rb—Sr同位素,精确厘定出成矿年龄为(372±9.8) Ma, 锶同位素初始比值(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i为(0.709409±0.000058),该研究方法为低温矿床成因研究提供了有效方法。研究结果表明江家垭铅锌矿床成矿时代应为晚古生代泥盆纪,成矿可能与晚泥盆世华南地区发生的拉张断陷导致的盆地流体大规模运动有关。成矿物质可能主要源自围岩碳酸盐岩地层,成矿过程中陆壳影响较为明显。

致谢: 审稿过程中,评审专家和编辑部杨艳老师对本文提出了诸多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 杨绍祥, 劳可通. 湘西北铅锌矿床碳氢氧同位素特征及成矿环境分析[J]. 矿床地质, 2007, 26(3): 330–340.
Yang Shaoxiang, Lao Ketong. A tentative discussion on genesis of lead–zinc deposits in northwest Hunan[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(3): 330–340(in Chinese with English abstract).
- [2] 匡文龙, 刘新华, 陈年生, 等. 湘西北下光荣矿区铅锌矿床主要地球化学特征[J]. 地质科学, 2008, 43(3): 685–694.
Kuang Wenlong, Liu Xinhua, Chen Niansheng, et al. Main geochemical characteristics of lead–zinc deposits in Xiaguangrong ore district, northwestern Hunan[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(4): 685–694(in Chinese with English abstract).
- [3] 汤朝阳, 邓峰, 李堃, 等. 湘西—黔东南地区寒武系清虚洞组地层特征与铅锌成矿关系[J]. 中国地质, 2012, 39(4): 1034–1041.
Tang Zhaoyang, Deng Feng, Li Kun, et al. Stratigraphic characteristics of the Cambrian Qingxudong Formation in relation to lead–zinc mineralization in western Hunan–eastern Guizhou area[J]. Geology in China, 2012, 39(4): 1034–1041(in Chinese with English abstract).
- [4] Lin Ye, Nigel J C, Cristiana L C, et al. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA–ICPMS study[J]. Ore Geology Reviews, 39(4): 188–217.
- [5] 李堃, 刘凯, 汤朝阳, 等. 湘西黔东南地区Zn地球化学块体特征及锌资源潜力估算[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1270–1277.
Li Kun, Liu Kai, Tang Chaoyang, et al. Characteristics of zinc geochemical blocks and assessment of zinc resource potential in western Hunan and eastern Guizhou Province[J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1270–1277(in Chinese with English abstract).
- [6] 庞维华, 丁孝忠, 高林志, 等. 湖南下寒武统层序地层特征与古环境演化变迁[J]. 中国地质, 2011, 38(3): 560–576.
Pang Weihua, Ding Xiaozhong, Gao Linzhi, et al. Characteristics of sequence stratigraphy and palaeoenvironmental evolution of lower Cambrian strata in Hunan Province[J]. Geology in China, 2011, 38(3): 560–576(in Chinese with English abstract).
- [7] Jiayi Zhou, Zhilong Huang, Meifu Zhou, et al. Constraints of C–O–S–Pb isotope compositions and Rb–Sr isotopic age on the origin of the Tianqiao carbonate–hosted Pb–Zn deposit, SW China[J]. Ore Geology Reviews, 53: 77–92.
- [8] 张长青, 芮宗瑶, 陈毓川, 等. 中国铅锌矿资源潜力和主要战略接续区[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 248–272.
Zhang Changqing, Rui Zongyao, Chen Yuchuan, et al. The main successive strategic bases of resources for Pb–Zn deposits in China[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 248–272(in Chinese with English abstract).
- [9] Miles F, Fiona W, Cathy H. Fluid expulsion from overpressured basins: Implications for Pb–Zn mineralisation and dolomitisation of the East Midlands platform, northern England[J]. Marine and Petroleum Geology, 55: 68–86.
- [10] Bazargani K G, Rabiei M B. Effects of host rock mineralogical composition and sedimentary facies on development of geochemical halos in Shahmirzad Pb–Zn deposits, central Alborz, Iran[J]. Journal of Geochemical Exploration, 124: 155–165.
- [11] Jemmali N, Souissi F, John E M, et al. Sulfur and lead isotopes of Guern Halfaya and Bou Grine deposits (Domes zone, northern Tunisia): Implications for sources of metals and timing of mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 54: 17–28.
- [12] Jaloul B, Salah B, Esteve C, et al. Mineralization and fluid inclusion studies of the Aptian carbonate–hosted Pb–Zn–Ba ore deposits at Jebel Hamra, Central Tunisia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 128: 136–146.
- [13] Katharina P, Alan K, Thomas W, et al. Trace and minor element variations and sulfur isotopes in crystalline and colloform ZnS: Incorporation mechanisms and implications for their genesis[J].

- Chemical Geology, 286(3): 118–134.
- [14] Santoro L M, Boni R H, Clegg A. The Hakkari nonsulfide Zn–Pb deposit in the context of other nonsulfide Zn–Pb deposits in the Tethyan Metallogenic Belt of Turkey[J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 244–260.
- [15] 徐贻赣, 吴淦国, 王长明, 等. 江西冷水坑银铅锌矿田闪锌矿铷-锶测年及地质意义[J]. *地质学报*, 2013, 87(5): 621–633.
Xu Yishan, Wu Ganguo, Wang Changming, et al. Rb–Sr dating of sphalerites from the Lengshuikeng Ag–Pb–Zn deposit, Jiangxi, and its geological significances. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(5): 621–633 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李紫焯, 刘晓雨, 李随民, 等. 承德牛圈银金多金属矿床硫化物Rb–Sr年龄和成矿物质来源分析[J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 951–960.
Li Ziyue, Liu Xiaoyu, Li Suimin, et al. An analysis of geological age and materials source of the Niujuan Ag–Au polymetallic deposit in Chengde[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 951–960 (in Chinese with English abstract).
- [17] 李随民, 魏明辉, 李森文, 等. 张家口梁家沟铅锌银矿床Rb–Sr和Sm–Nd等时线年龄及其地质意义[J]. *中国地质*, 2014, 41(2): 529–539.
Li Suimin, Wei Minghui, Li Senwen, et al. Rb–Sr and Sm–Nd isochron ages of the Liangjiagou Pb–Zn–Ag ore deposit in Chicheng County of Zhangjiakou City and their geological implications [J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 529–539 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李华芹, 刘家齐, 魏林. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 109–114.
Li Huaqin, Liu Jiaqi, Wei Lin. *Research of Fluid Inclusion Chronology and its Geology Application on Hydrothermal Deposit*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 109–114 (in Chinese).
- [19] Shepherd T J, Darbyshire D P F, Moore G R. Rare element and isotopic geochemistry of the North Pennine ore deposits[J]. *Bulletin Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 1982, 11: 371–377.
- [20] 孙敬博, 张立明, 陈文, 等. 东天山红石金矿床石英Rb–Sr同位素定年[J]. *地质论评*, 2013, 59(2): 382–388.
Sun Jingbo, Zhang Liming, Chen Wen, et al. Quartz Rb–Sr isotopic dating of Hongshi gold deposit in East Tianshan Mountains[J]. *Geological Review*, 2013, 59(2): 382–388 (in Chinese with English abstract).
- [21] 魏俊浩, 刘从强, 李志德, 等. 论金矿床成矿年代的确定——以丹东地区成岩成矿Rb–Sr、U–Pb同位素年代为例[J]. *地质学报*, 2003, 77(1): 113–119.
Wei Junhao, Liu Congqiang, Li Zhide, et al. U–Pb, Rb–Sr isotopic dating of the diagenesis and mineralization of gold deposits in the Dandong area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(1): 113–119 (in Chinese with English abstract).
- [22] 付绍洪, 顾雪祥, 王莘. 川西北马脑壳金矿床流体包裹体Rb–Sr同位素组成: 对矿床成因的制约[J]. *地球化学*, 2004, 33(1): 94–98.
Fu Shaohong, Gu Xuexiang, Wang Ping. Rb–Sr isotopic composition of fluid inclusions in the Manaoke gold deposit, northwest Sichuan province: Constraint for the ore genesis[J]. *Geochimica*, 2004, 31(1): 94–98 (in Chinese with English abstract).
- [23] 翟伟, 李兆麟, 黄栋林, 等. 粤西河台金矿床富硫化物石英脉Rb–Sr等时线年龄讨论[J]. *地球学报*, 2004, 25(2): 243–247.
Zhai Wei, Li Zhaolin, Huang Donglin, et al. Rb–Sr isochron age of sulfide–rich quartz veins in the Hetai gold deposit, western Guangdong[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, 25(2): 243–247 (in Chinese with English abstract).
- [24] 郑培玺, 周燕, 王铁夫, 等. 山东招远灵雀山金矿床富石英脉铷-锶等时线年龄讨论[J]. *岩矿测试*, 2007, 26(5): 356–358.
Zheng Peixi, Zhou Yan, Wang Tiefu, et al. Rb–Sr Isochron age of sulfide–rich quartz veins in Lingqueshan gold deposit from Zhaoyuan of Shandong Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2007, 26(5): 356–358 (in Chinese with English abstract).
- [25] 毛光周, 华仁民, 龙光明, 等. 江西金山金矿成矿时代探讨——来自石英流体包裹体Rb–Sr年龄的证据[J]. *地质学报*, 2008, 82(4): 532–539.
Mao Guangzhou, Hua Renmin, Long Guangming, et al. Discussion on the mineralogenetic epoch of the Jinshan gold deposit, Jiang xi Province—based on the quartz Fluids Inclusion Rb–Sr Dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(4): 532–539 (in Chinese with English abstract).
- [26] Ludwing K R. User's Manual for Isoplot/Exversion 2.49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2001, 1, 1–55.
- [27] 路远发. GeoKit: 一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 459–464.
Lu Yuanfa. Geokit –A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. *Geochimica*, 2004, 33(5): 459–464 (in Chinese with English abstract).
- [28] 董榕生. 中国南方大地构造演化及泥盆纪古构造格局[J]. *成都地质学院学报*, 1992, 19(2): 58–63.
Dong Rongsheng. Geotectonic evolution and Devonian palaeotectonic framework in South China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1992, 19(2): 58–63 (in Chinese with English abstract).
- [29] 周家云, 郑荣才, 张裕书, 等. 华南泥盆纪古地理环境对宁乡式铁矿床时空分布、矿石特征的制约[J]. *地质科技情报*, 2009, 28(1): 93–98.
Zhou Jiayun, Zheng Rongcai, Zhang Yushu, et al. Constraints of South China Devonian Ningxiang palaeogeography on the temporal and spatial distribution of iron ore deposits and their characteristics[J]. *Geological Science and Technology*

- Information, 2009, 28(1): 93–98(in Chinese with English abstract).
- [30] 刘文均. 海西—印支期华南板块的沉积特点[J]. 成都理工学院学报, 1998, 25(2): 328–336.
Liu Wenjun. Evolution of sedimentation of South China plate in the Hercynian–Indosinian stage[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1998, 25(2): 328–336(in Chinese with English abstract).
- [31] 刘文均, 张锦泉. 华南泥盆纪的沉积盆地特征、沉积作用和成矿作用[J]. 地质学报, 1993, 67(3): 244–254.
Liu Wenjun, Zhang Jinquan. Geological features of Devonian sedimentary basins in South China and their deposition and mineralization[J]. Acta Geologica Sinica, 1993, 67(3): 244–254 (in Chinese with English abstract).
- [32] 曾允孚, 陈洪德, 张锦泉, 等. 华南泥盆纪沉积盆地类型和主要特征[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 104–112.
Zeng Yunfu, Chen Hongde, Zhang Jinquan, et al. Types and main characteristics of Devonian sedimentary basin in South China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(3): 104–112(in Chinese with English abstract).
- [33] Qing H, Barnes C R, Buhl D. The strontium isotopic composition of Ordovician and Silurian brachiopods and conodonts: Relationships to geological events and implications for coeval seawater[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(10): 1721–1733.
- [34] Denison R E, Kirkland D W, Evans R. Using strontium isotopes to determine the age and origin of gypsum and anhydrite beds[J]. Journal of Geology, 1998, 106: 1–17.
- [35] McArthur J M, Kennedy W J, Chen M. Strontium isotope stratigraphy for the Late Cretaceous: direct numerical age calibration age calibration of the Sr–isotope curve for the U. S. Western interior Seaway[J]. Palaeogeogr Palaeoclim Palaeoecol, 2001, 8: 95–119.
- [36] 黄思静, 刘树根, 李国蓉, 等. 奥陶系海相碳酸盐锶同位素组成及受成岩流体的影响[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(1): 1–7.
Huang Sijing, Liu Shugen, Li Guorong, et al. Strontium isotope composition of marine carbonate and the influence of diagenetic fluid on it in Ordovician[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31(1): 1–7(in Chinese with English abstract).
- [37] 黄思静, 石和, 张萌, 等. 锶同位素地层学在奥陶系海相地层定年中的应用——以塔里木盆地塔中12井为例[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 1–5.
Huang Sijing, Shi He, Zhang Meng, et al. Strontium isotope composition of marine carbonate and the influence of diagenetic fluid on it in Ordovician[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 1–5(in Chinese with English abstract).
- [38] 张长青, 李向辉, 余金杰, 等. 四川大梁子铅锌矿床单颗粒闪锌矿铷–锶测年及地质意义[J]. 地质论评, 2008, 54(4): 532–538.
Zhang Changqing, Li Xianghui, Yu Jinjie, et al. Rb–Sr dating of single sphalerites from the Daliangzi Pb–Zn deposit, Sichuan, and its geological significances[J]. Geological Review, 2008, 54: 532–538(in Chinese with English abstract).
- [39] 陈明辉, 孙际茂, 付益平, 等. 湘西龙山铅锌矿带地质地球化学及其找矿前景[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(2): 151–158.
Chen Minghui, Sun Jimao, Fu Yiping, et al. Geology and geochemistry of lead–zinc ore zone and prospecting potential in Longshan county, western Hunan[J]. Resources Environment & Engineering, 2008, 22(2): 151–158(in Chinese with English abstract).