第38卷 第3期
2022年9月

华 南 地 质
South China Geology

Vol.38, No.3, 472-485
Sep., 2022

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.03.009

湘南黄沙坪和宝山铅锌多金属矿床成矿时代及成矿物质来源:来自闪锌矿Rb-Sr同位素的证据

卢友月[1,2],杨长明[3],程顺波[1,2],黄富年[3],李茂平[4],王兀升[4],唐 峰[4],曹荆亚[5],夏 杰[1,2],付建明[1,2],张遵遵[1,2],杨齐智[3]

LU You-Yue[1,2], YANG Chang-Ming[3], CHENG Shun-Bo[1,2], HUANG Fu-Nian[3], LI Mao-Ping[4], WANG Wu-Sheng[4], TANG Feng[4], CAO Jing-Ya[5], XIA Jie[1,2], FU Jian-Ming[1,2], ZHANG Zun-Zun[1,2], YANG Qi-Zhi[3]

1.中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心,湖北 武汉 430205;
2.中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心),湖北 武汉 430205;
3.湖南省矿产资源调查所,湖南 长沙 410100;4. 湖南宝山有色金属矿业有限责任公司,湖南 桂阳 424400;
5.南方海洋科学与工程广东省实验室(广州),广东 广州 511458
1. Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China;
2. Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China;
3. Mineral Resources Investigation Institute of Hunan Province, Changsha 410100, China;
4. Hunan Baoshan nonferrous metals mining Co., Ltd, Guiyang 424400, Hunan, China;
5. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, Guangdong, China

摘要:湘南地区位于EW向南岭成矿带与NE向钦杭成矿带的交汇部位。区内矿床按元素组合及其与相关岩体的关系大致可分为两大类:一类是与酸性岩浆岩有关的钨、锡、铌、钽多金属矿床,另一类是与中酸性岩浆岩有关的铜、钼、铅、锌、金多金属矿床。本文对两类矿床中具有代表性的黄沙坪和宝山大型铅锌多金属矿床的闪锌矿分别进行了Rb-Sr同位素研究,获得它们的闪锌矿Rb-Sr等时线年龄分别为143±1 Ma(MSWD=1.00)和141±4 Ma(MSWD=0.99),表明两矿区存在早白垩世成矿作用;同时获得两个矿床闪锌矿的$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$值分别为0.72521±0.00543和0.70985±0.00013,结合前人研究成果,认为黄沙坪铅锌矿成矿物质主要来源于陆壳,而宝山铅锌矿成矿物质主要为壳幔混合来源。该成果对深化湘南矿集区不同类型矿床年龄谱系、成矿规律和找矿方向提供了数据支持。

关键词: Rb-Sr同位素;闪锌矿;铅锌多金属矿床;黄沙坪;宝山;湘南

中图分类号:P611.1+3,P597+.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2097-0013(2022)03-0472-14

Lu Y Y, Yang C M, Cheng S B, Huang F N, Li M P, Wang W S, Tang F, Cao J Y, Xia J, Fu J M, Zhang Z Z and Yang Q Z. 2022. Metallogenic Ages and Sources of Metallogenic Materials of the Huangshaping and Baoshan Pb-Zn Polymetallic Deposits in Southern Hunan Province: Evidence from Rb-Sr Isotopes of Sphalerite. *South China Geology,* 38(3): 472-485.

Abstract: Southern Hunan Area is located at the intersection of the EW-trending Nanling Metallogenic Belt and the NE-trending Qinhang Metallogenic Belt. The deposits in this area can be roughly divided into two cat-

收稿日期:2022-4-10;**修回日期:**2022-7-8
基金项目:中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心开放基金课题(PMGR202008和PMGR2020009)、中国地质调查局项目(DD20221689和DD20190154)
第一作者:卢友月(1983—),男,高级工程师,主要从事矿床学与同位素地球化学研究工作,E-mail:luyouyue@126.com

egories according to the element associations and their relationships with the related magmatic rocks: one is the W-Sn-Nb-Ta polymetallic deposits related to the acidic magmatic rocks, and the other is the Cu-Mo-Pb-Zn-Au polymetallic deposits related to the intermediate-acidic magmatic rocks. In this study, the Rb-Sr isotope studies of sphalerites from the Huangshaping and Baoshan large-scale Pb-Zn polymetallic deposits have been carried out. The calculated Rb-Sr isochron ages of sphalerites from the Huangshaping and Baoshan are 143 ± 1 Ma (MSWD=1.00) and 141 ± 4 Ma (MSWD=0.99) respectively, indicating that their metallogenic ages are Early Cretaceous. Meanwhile, the obtained $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ values of sphalerites from the two deposits are 0.72521 ± 0.00543 and 0.70985 ± 0.00013, respectively. Combined with the previous research, it is believed that the metallogenic materials of the Huangshaping Pb-Zn ores were mainly derived from the continental crust, while those of Baoshan Pb-Zn ores were mainly derived from the mixed source of crust and mantle. These research results have provided the data support for a deeper understanding of the age spectra, metallogenic regularity and prospecting guideline of different types of deposits in the ore concentration in the southern Hunan Area.

Key words: Rb-Sr isotopes; sphalerite; Pb-Zn polymetallic deposit; Huangshaping; Baoshan; Southern Hunan Area

湘南地区位于EW向南岭成矿带和NE向钦杭成矿带交汇部位,是我国重要的有色、稀有金属矿集区(路远发等,2006;卢友月等,2017)。区内矿床与燕山期岩浆作用关系非常密切,按元素组合及其与相关岩体的关系大致可分为两大类:一类是与酸性岩浆岩(花岗岩类)有关的钨、锡、铌、钽多金属矿床,如柿竹园钨锡铋钼多金属矿床、黄沙坪铅锌多金属矿床、新田岭钨多金属矿床、芙蓉锡多金属矿床、香花岭锡铍多金属矿床等;另一类是与中酸性岩浆岩(花岗闪长岩类)有关的铜、钼、铅、锌、金矿床,如水口山-康家湾铅锌金矿床、宝山铅锌多金属矿床、铜山岭铜铅锌多金属矿床、大坊金银铅锌矿床等(胡永嘉等,1984;姚军明等,2005;路远发等,2006;郭春丽等,2013;卢友月等,2017)(图1)。近年来众多学者对区内主要矿床的成矿时代做了大量的研究工作(路远发等,2006;彭建堂等,2008;付建明等,2011;王志强等,2014;卢友月等,2015,2018;Zhao P L et al.,2018),证实它们的成矿时代主要集中在160 ~ 150 Ma,为南岭成矿带燕山早期成岩成矿爆发期的产物。但测年对象主要集中在钨、锡、铜、钼等矿体中的辉钼矿、云母和锡石等,对区内广泛分布的铅锌矿成矿时代研究仍较为薄弱。

精确的成矿年代学研究是分析矿床成因、阐明成矿规律和理解成矿作用与地球动力学背景的关键。已有的研究表明,闪锌矿 Rb-Sr 同位素定年技术是铅锌矿床较为理想的定年手段(杨红梅等,2017),并且已有大量成功的范例(李文博等,2002;杨红梅等,2012;段其发等,2014;曹亮等,2015;谭娟娟等,2018;王健等,2019;王祥东等,2019)。本文

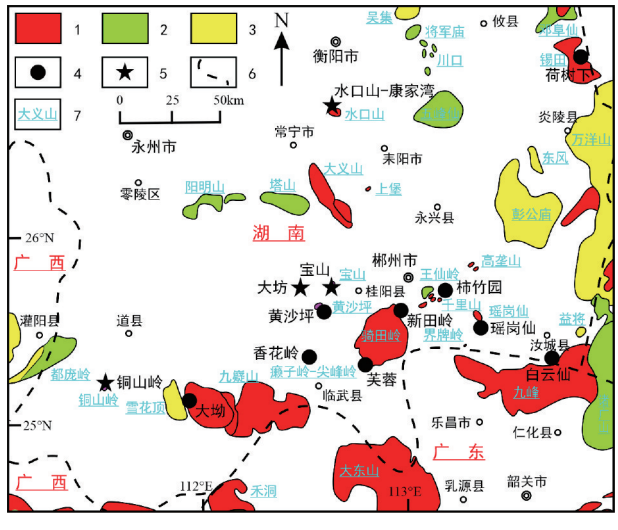

图1 湘南地区岩体和主要矿床分布略图(据卢友月等,2017)

Fig. 1 Distribution map of major plutons and deposits in Southern Hunan province (modified after Lu Y Y et al., 2017)

1. 燕山期岩体;2. 印支期岩体;3. 加里东期岩体;4. 与酸性岩浆岩(花岗岩类)有关的钨、锡、铌、钽多金属矿床;5. 与中酸性岩浆岩(花岗闪长岩类)有关的铜、钼、铅、锌、金矿床;6. 省界;7. 岩体名称

选取与酸性岩浆岩(花岗岩类)有关的黄沙坪铅锌多金属矿床和与中酸性岩浆岩(花岗闪长岩类)有关的宝山铅锌多金属矿床为研究对象,两个矿床规模均为大型,且在危机矿山接替资源勘查项目(2006-2010年)中取得了重大找矿突破(吕志成等,2013),近年来在深部又发现了厚大的铅锌矿富矿体,两者直线距离仅7 km,具有很强的代表性。选取两个矿床中-低热液型铅锌矿石中的闪锌矿开展Rb-Sr同位素研究,对比两个矿床的铅锌矿成矿时代和物质来源,该成果对深化湘南矿集区不同类型矿床年龄谱系、成矿规律和找矿方向提供了数据支持。

1 区域地质背景

湘南地区位于扬子陆块区与武夷-云开造山系的结合部位,主体属于湘东-桂北残余盆地和罗霄岩浆弧2个三级构造单元。加里东期为区域构造格架形成的主要奠基期;中生代构造体制转换的动力学背景对本区成岩、成矿起到了决定性的作用,奠定了本区现有的构造格架;新生代在太平洋板块、菲律宾海板块及印支板块的联合作用下,以升降运动为主,表现为深大断裂发育以及被其切割而形成的隆起、拗陷(付建明等,2017)。区内地层发育较全,除志留系缺失外,从青白口系到第四系均有出露。青白口系出露较少,主要为含碳质板岩、白云质板岩;震旦系主要为砂岩、石英砂岩和板岩;寒武系主要为一套浅变质碎屑岩;奥陶系主要是泥、砂质沉积形成的类复理石建造;泥盆系广泛分布,为陆相至滨海相沉积碎屑岩、砂页岩和碳酸盐岩,是区内重要的含矿层位;石炭系主要为浅海相碳酸盐岩沉积;三叠系在区内出露很少,主要为碳酸盐岩、页岩;侏罗系在区内分布广泛,主要为陆相-海相交互沉积;白垩纪在区内出露较少,主要为陆相沉积。区内主要经历了加里东运动、印支运动和燕山运动等几次大的构造事件,由此形成了由断裂、褶皱、构造盆地等组成的较为复杂的变形格架。区域主干断裂有NE-NEE向和NW向两组,NE-NEE向主干断裂主要有茶陵-郴州断裂、桂东-汝城断裂等,断裂大多倾向SE,少数倾向NW,并以压(扭)性或逆冲为主;断裂常控制了燕山期陆相盆地的发育。NW向主干断裂主要有郴州-邵阳断裂、香花岭-阳明山断裂等,断裂地表形迹不太清楚,主要表现为隐伏性质,属基底走滑断裂。区内岩浆岩分布较为广泛,岩石类型复杂,从酸性至基性、超基性均有出露,以酸性岩最为发育,占岩体出露总面积的90%以上,绝大部分为侵入岩,喷出岩极少。侵入岩按时代由老至新可划分为加里东期、印支期、燕山早期、燕山晚期。加里东期岩石类型主要为花岗闪长岩、二长花岗岩、辉石闪长岩、英云闪长岩,代表岩体有彭公庙、万洋山、东风、雪花顶、益将;印支期岩石类型主要有二长花岗岩、花岗闪长岩等,代表岩体有五峰仙、塔山-阳明山、川口、诸广山、王仙岭;燕山早期岩浆活动最为强烈,区内广泛发育,岩性主要为黑云母花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩等,代表岩体有锡田、大义山、骑田岭、千里山、九峰、癞子岭、尖峰岭、九嶷山、铜山岭、水口山、宝山、黄沙坪、瑶岗仙等;燕山晚期仅见少量的花岗斑岩,呈岩株及岩脉产出,代表岩体有上堡、界牌岭(图1)。区内矿产资源丰富,主要矿床成因类型有热液脉型、接触交代型、花岗岩型、沉积型、风化淋滤型等,以有色金属矿产为主,特别是热液脉型与接触交代型钨、锡、铋、钼、铜、铅、锌、金等矿床规模大、品位高,最具工业价值。代表矿床有黄沙坪铅锌多金属矿、宝山铅锌多金属矿、柿竹园钨锡铋钼多金属矿、新田岭钨多金属矿、芙蓉锡多金属矿、香花岭锡铍多金属矿、大坳锡矿、荷树下钨锡矿、瑶岗仙钨矿、白云仙钨矿、水口山-康家湾铅锌金矿、铜山岭铜铅锌多金属矿等,形成了坪宝、东坡、骑田岭、香花岭、九嶷山、锡田、瑶岗仙、白云仙、水口山、铜山岭等重要矿田(彭建堂等,2008;付建明等,2011;卢友月等,2013)。

2 矿床地质特征

2.1 黄沙坪铅锌多金属矿床

矿床位于桂阳县城西南约9 km的黄沙坪镇,大地构造位置处于南岭EW向复式构造带中段北缘与耒阳-临武SN向构造带的复合部位,是湘南地区最大的铅锌开采矿山。矿区内矿种繁多,已查明可利用的金属矿种有Pb、Zn、Cu、Fe、W、Mo、Bi、

Sn,可综合利用的伴生贵金属、稀散金属矿种有Ag、Cd、Ga、In、Ge,非金属矿种有F、As。已圈定铅锌、铜矿体五百余个,铁、钨钼矿体几十个,探明Pb+Zn资源量200余万吨(许以明等,2007)。另外全国危机矿山接替资源找矿专项在区内探获并评审备案资源量:WO_3 13.04万吨,Sn 13.08万吨,Mo 3.78万吨,Bi 为3.98万吨,Cu 2.68万吨,Pb+Zn 51.40万吨,铁矿石29680万吨,CaF_2 731万吨(吕志成等,2013)。

区内出露地层以泥盆-石炭系碳酸盐岩为主,由下至上为上泥盆统余田桥组(D_3s)灰岩、锡矿山组(D_3x)白云质灰岩,下石炭统孟公坳组(C_1m)灰岩、石磴子组(C_1sh)灰岩、测水组(C_1c)砂页岩、梓门桥组(C_1z)白云岩。其中石磴子组灰岩是区内最有利的赋矿地层,测水组钙质砂页岩是良好的遮挡层,当石磴子组处于背斜轴部,其上有测水组构成穹状"帽盖"时,成矿最为有利。矿区主干构造为SN向,有东倾的F_1、F_2、F_3三条推覆大断裂与向西倒转的观音打坐-宝岭复式背斜,另有一组以F_0、F_6、F_9为主的近EW向构造,它们与SN向断裂一起将矿区分割成"井"字型。区内次级褶皱、断裂也十分发育,这些断裂构造与倒转背斜控制了岩体的侵位,因而也是矿区的控矿构造。矿区岩浆岩十分发育,岩体成群分布,岩石类型包括花岗斑岩、英安斑岩、石英斑岩、花斑岩,均为浅成-超浅成酸性侵入体。主要岩体一是隐伏于倒转背斜核部的花岗斑岩、花斑岩,二是沿断裂侵入呈漏斗状的英安斑岩,石英斑岩仅零星分布(图2a)。岩体高精度同位素年龄为161 ~ 150 Ma(姚军明等,2005;雷泽恒等,2010;艾昊,2013;原垭斌等,2014),为晚侏罗世产物。

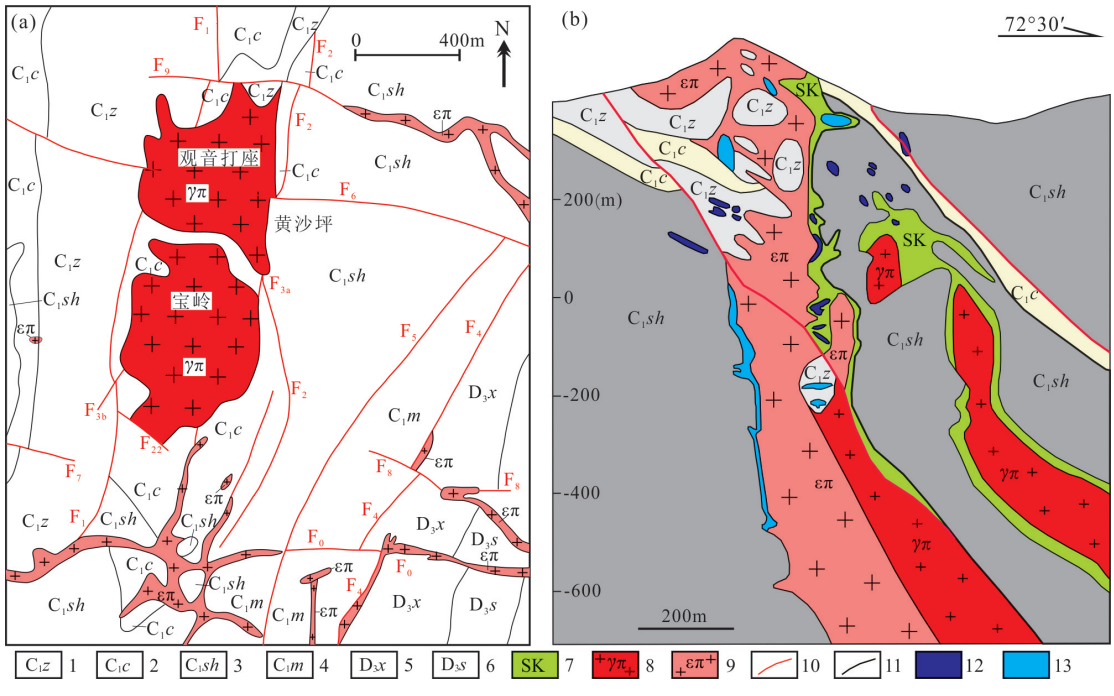

图2 黄沙坪铅锌多金属矿床地质图(a)及16号勘探线剖面图(b)(据祝新友等,2012)

Fig. 2 Geological map (a) and the section of line 16(b) of Huangshaping Pb-Zn polymetallic deposit (modified after Zhu X Y et al., 2012)

1. 下石炭统梓门桥组;2. 下石炭统测水组;3. 下石炭统石磴子组;4. 下石炭统孟公坳组;5. 上泥盆统锡矿山组;6. 上泥盆统余田桥组;7. 矽卡岩;8. 花岗斑岩;9. 英安斑岩;10. 断层;11. 地质界线;12. 铅锌银矿体;13. 钨锡矿体

矿体形态十分复杂,一般受岩体接触带及断裂构造控制,主要呈脉状、透镜状、扁豆状、似层状和环带状产出(图2b)。根据矿物共生组合及成因类型等,将矿石划分为两类:(1)矽卡岩型钨锡钼铋铁硫矿石,分布于矿区南部,主要矿物有矽卡岩矿物(石榴子石、透辉石、符山石、阳起石、绿帘石等)以

及白钨矿、锡石、辉铜矿、辉铋矿、磁铁矿等，含少量黄铜矿、铁闪锌矿等；(2)中-低温热液型铅锌矿石，分布于矿区中、北部和东部，主要矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、碲化物、银矿物以及石英、方解石等(陈小文等，2008；王俊霖等，2020)。

矿石结构主要有自形、半自形晶粒结构、包含结构、填隙结构、放射状结构、镶边结构、草莓状结构(黄铁矿)、溶蚀结构、渗透交代结构、交代残余结构、反应边结构、乳浊状结构、格状结构、文象及蠕虫状结构、压碎结构、揉皱结构等。矿石构造主要有块状、浸染状、条纹状、条带状、变胶状、角砾状、细脉状、细脉浸染状、晶洞等构造(马丽艳等，2007；雷泽恒等，2010)。

矿区围岩蚀变发育，主要蚀变类型有矽卡岩化、硅化、钾长石化、萤石化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化、黑云母-金云母化、铁白云石化、方解石化、高岭石化、菱铁-菱锰矿化、大理岩化和灰岩重结晶等，它们主要以两个系列产出：一是绢云母化、高岭石化-矽卡岩化-萤石化-碳酸盐化-金属矿化；二是绢云母化、碳酸盐化-金属矿化。矽卡岩化与钨、锡、铁矿化关系密切，硅化与铅、锌、银矿化关系密切。

2.2 宝山铅锌多金属矿床

矿床紧邻桂阳县城西部，大地构造位置处于南岭EW向复式构造带中段北缘与耒阳-临武SN向构造带的复合部位，黄沙坪-宝山SN向复式向斜北部。矿床是一个以铅、锌为主，伴有铜、银、钼、铋、金的多金属矿床，主要由中部铜钼矿区、东部铅锌银矿区、北部财神庙铅锌银矿区和西部铅锌银矿区组成。矿区2006年前已探获资源量：Pb 76.36万吨，Zn 81.29万吨，Cu 8.56万吨，WO_3 9540吨，Mo 14200吨，Bi 4710吨，Ag 1837吨。2006-2010年全国危机矿山接替资源找矿项目“湖南省桂阳县宝山铅锌银矿接替资源勘查”在区内探获控制资源量：Pb 38.7万吨，Zn 42.9万吨，Cu 9.7万吨，Mo 0.24万吨，Ag 827吨，伴生Au 14.22吨，Cd 3160吨，S 259.4万吨(湖南省有色地质勘查局一总队，2010)。

区内出露地层以泥盆-石炭系碳酸盐岩为主，由下至上为泥盆系锡矿山组(D_3x)白云质灰岩，石炭系孟公坳组(C_1m)白云质灰岩、石磴子组(C_1sh)灰岩、测水组(C_1c)砂页岩、梓门桥组(C_1z)白云岩，上石炭统-下二叠统壶天群(C_2P_1H)白云岩(图3a)。梓门桥组白云岩、测水组砂页岩和石磴子组灰岩是主要的赋矿层位。矿区总体上受宝岭倒转背斜控制，其中铜、钼、钨、铋矿体分布在倒转背斜顶部，钼、钨、铋矿体在靠近顶部的两翼，铜矿体在倒转背斜上部矽卡岩中，铅、锌矿体分布在两翼灰岩中。断裂构造十分发育，其中NW向断裂为导矿构造，NNW向断裂为容矿构造。区内岩浆活动频繁，岩石类型主要有：花岗闪长斑岩、微粒花岗闪长斑岩、石英斑岩、英安质凝灰角砾岩、辉绿玢岩，其中以微粒花岗闪长斑岩为主，多为岩墙、岩脉，深部呈小岩株状产出，且成群成带分布。由北向南可分成三个NWW向的岩带：东塔岭-财神庙-苗圃花岗闪长斑岩和花岗斑岩带；八角井-宝岭-竹子岭(隐伏)花岗闪长斑岩带；狮子岭-杨梅冲英安质凝灰角砾岩、英安质流纹斑岩带。主要岩体高精度同位素年龄为181～155 Ma(伍光英，2005；路远发等，2006；全铁军等，2012；谢银财等，2013)，为中晚侏罗世产物。

矿体多呈脉状、似层状、囊状、透镜状、楔状产出(图3b)。根据矿物共生组合及矿床成因等，将矿石划分为两类：(1)矽卡岩型铜钼矿石，分布于矿区中部，金属矿物主要为黄铜矿、辉铜矿、辉钼矿、辉铋矿、白钨矿；非金属矿物主要有石榴子石、方解石、石英、透闪石、绿泥石、绿帘石、绢云母、萤石、磷灰石等，矿石呈他形-半自形细粒结构、交代结构，细脉浸染状、致密块状构造、角砾状构造。(2)中-低温热液型铅锌矿石，分布于矿区东部、北部和西部。金属矿物主要为方铅矿、闪锌矿、铁闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿；非金属矿物主要有石英、方解石、白云石、长石、绢云母、萤石，矿石呈自形、半自形粒状结构、交代结构，致密块状构造、浸染状构造、角砾状构造。

矿区围岩蚀变发育，主要蚀变类型有矽卡岩化、大理岩化、长石化、硅化、绢云母化、绿泥石化、萤石化、碳酸盐化、黄铁矿化等。其中以矽卡岩化、绿泥石化、碳酸盐化与矿化关系密切。围岩蚀变具有良好的分带性，从内到外依次为透辉石、石榴子石矽卡岩-石榴子石矽卡岩-大理岩(或白云质大理岩)-结晶灰岩(或白云质结晶灰岩、结晶白云岩)-灰岩(白云质灰岩、白云岩)(路远发等，2006；湖南省有色地质勘查局一总队，2010)。

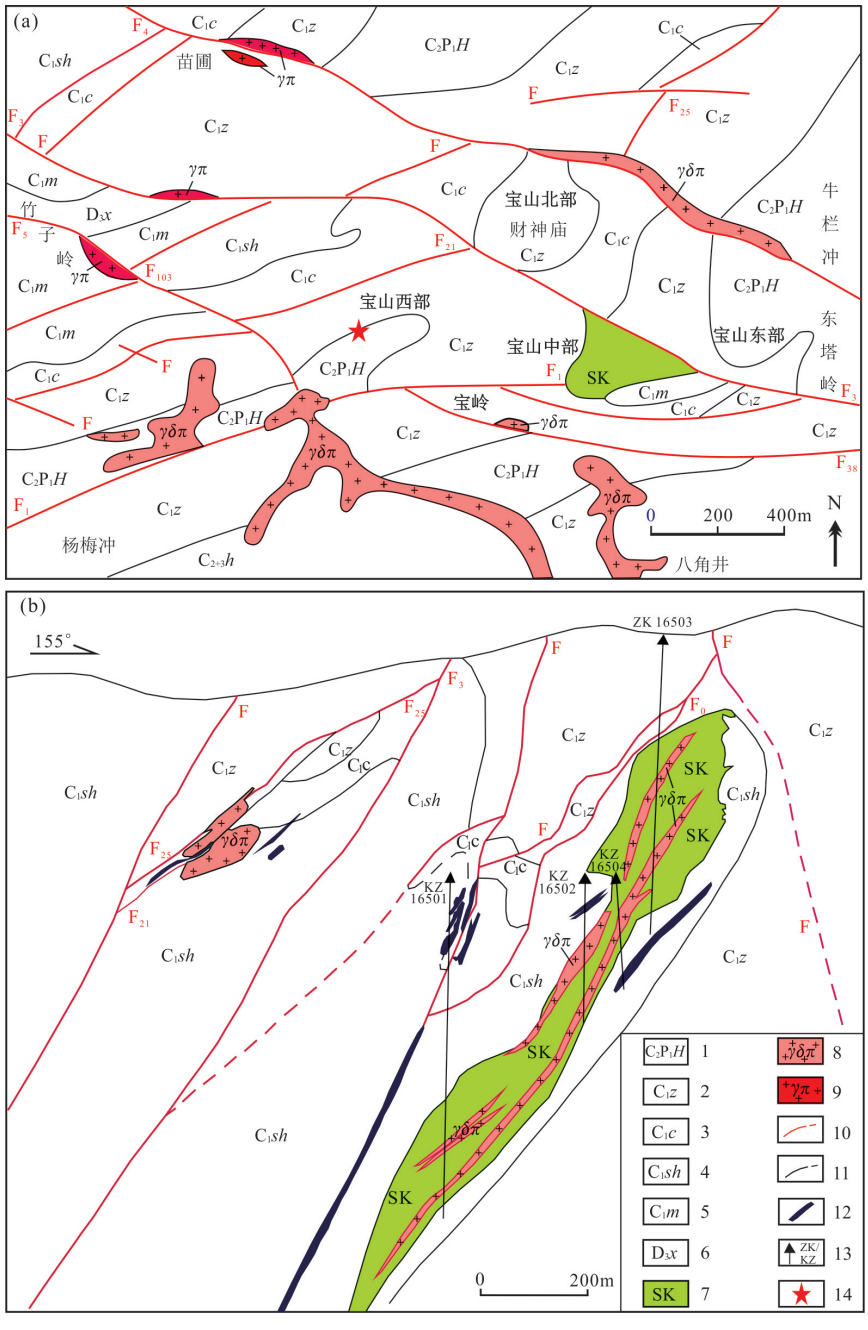

图3 宝山铅锌多金属矿床地质图(a)及165号勘探线剖面图(b)(据湖南省有色地质勘查局一总队,2010修改)

Fig.3 Geological map (a) and the section of line 165(b) of Baoshan Pb-Zn polymetallic deposit (modified after The First Team of Hunan Nonferrous Geological Prospecting Bureau,2010)

1. 上石炭统-下二叠统壶天群;2. 下石炭统梓门桥组;3. 下石炭统测水组;4. 下石炭统石磴子组;5. 下石炭统孟公坳组;6. 上泥盆统锡矿山组;7. 矽卡岩;8. 花岗闪长斑岩;9. 花岗斑岩;10. 实、推测断层;11. 实、推测地层界线;12. 铅锌矿体;13. 钻孔;14. 采样位置

3 样品采集及测试方法

3.1 样品采集及处理

测试样品分别采自黄沙坪铅锌多金属矿床56 m中段石门19穿6、宝山铅锌多金属矿床110 m中段153北穿,沿铅锌矿脉每隔5~8 m采一个样品,样品均为坑道内新鲜开采面中未穿插后期石英、方解石脉的块状铅锌矿矿石(图4a、c),矿石类型属于中-低温热液型。黄沙坪矿床样品编号为:10D6-1~

10D6-7，样品中闪锌矿呈它形粒状，大小一般0.2~0.5 mm，部分0.5~2 mm，镶嵌状分布，为矿石之主体部分，呈尖角状、蚕蚀状交代毒砂、磁黄铁矿；矿物生成顺序为：毒砂→磁黄铁矿→(白铁矿)→方铅矿→闪锌矿→黄铜矿(图4b)。宝山矿床样品编号为：10D15-1~10D15-7，样品中闪锌矿呈它形粒状，大小一般0.1~0.5 mm，部分0.5~1 mm，常沿黄铁矿边部、网状裂隙充填交代，裂隙内常见黄铁矿小包体，局部有黄铜矿出溶；矿物生成顺序为：黄铁矿→闪锌矿、黄铜矿→方铅矿(图4d)。

闪锌矿单矿物挑选在廊坊市峰泽源岩矿检测技术有限公司完成，对所获得的样品粉碎至40~60目，在二次蒸馏水中多次清洗后晾干，然后在双目镜下挑选闪锌矿单矿物，纯度大于98%，以供分析(样品10D15-5未挑得足够的闪锌矿，未参与测试)。

3.2 测试方法

测试工作在自然资源部中南矿产资源监督检测中心完成，测试方法如下：将已挑纯的闪锌矿样品放入超纯水中用超声波机清洗3~5遍，烘干备用；称取适量闪锌矿单矿物样品，加入$^{85}Rb+^{84}Sr$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；用热电离质谱仪Triton分析Rb、Sr同位素组成，用同位素稀释法计算试样中的Rb、Sr含量及Sr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$^{87}Sr/^{86}Sr$同位素组成测定值为0.71031±0.00004(2σ)，与其证书值0.71024±0.00026(2σ)在误差范围内一致；NBS607的Rb、Sr含量与$^{87}Sr/^{86}Sr$比值分别为Rb=523.60×10^{-6}，Sr=65.27×10^{-6}和$^{87}Sr/^{86}Sr$=1.20048 ± 0.00012(2σ)，与其证书值(523.90±1.01、65.485±0.30、1.20039±0.00020(2σ))在误差范围内一致；GBW04411的Rb、Sr含量与$^{87}Sr/^{86}Sr$比值分别为Rb=249.20×10^{-6}、Sr=158.60×10^{-6}和$^{87}Sr/^{86}Sr$=0.75995±0.00005(2σ)，与其证书值(249.47±

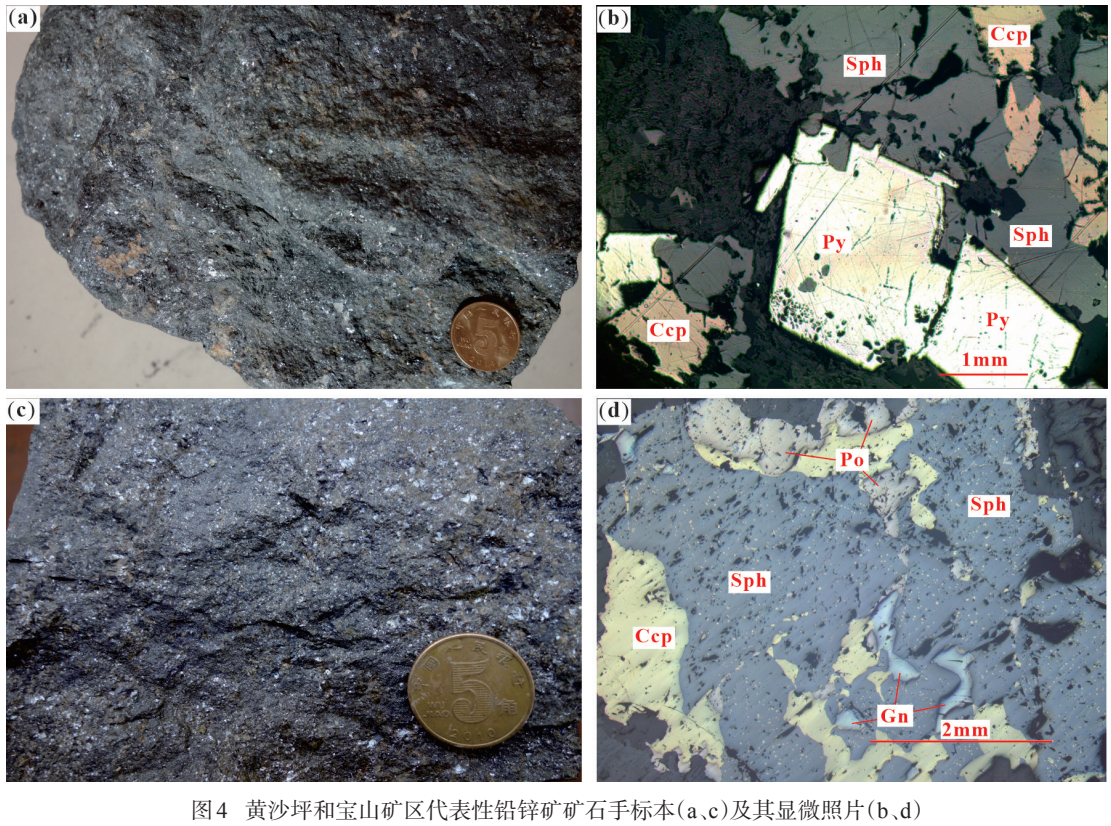

图4 黄沙坪和宝山矿区代表性铅锌矿矿石手标本(a、c)及其显微照片(b、d)

Fig. 4 Photos (a, c) and microphotos (b, d) of Pb-Zn samples from Huangshaping and Baoshan Lead-Zinc polymetallic deposits

Ccp-黄铜矿，Gn-方铅矿，Po-磁黄铁矿，Py-黄铁矿，Sph-闪锌矿

1.04、158.92±0.70、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空白分别为1×10^{-10}和2×10^{-10}(段其发等,2014;曹亮等,2015)。

4 测试结果

闪锌矿 Rb-Sr 同位素分析结果见表1。黄沙坪矿床样品Rb含量为6.39×10^{-6}~60.61×10^{-6},Sr含量为0.1606×10^{-6}~0.5085×10^{-6},$^{87}Rb/^{86}Sr$比值变化较大,在55.50~467.81之间,$^{87}Sr/^{86}Sr$比值为0.84071~1.69311。宝山矿床样品Rb含量为0.10×10^{-6}~0.96×10^{-6},Sr含量为0.3329×10^{-6}~0.6415×10^{-6},$^{87}Rb/^{86}Sr$比值变化较小,在0.760~4.323之间,$^{87}Sr/^{86}Sr$比值为0.71129~0.71860。测试结果采用Isoplot3.xla软件进行处理(Ludwig,2003),误差为95%置信度(1σ);等时线计算时设定的不确定度:$^{87}Rb/^{86}Sr$为3%,$^{87}Sr/^{86}Sr$为0.01%;所选衰变常数为$^{87}Rb=1.42\times10^{-11}a^{-1}$。获得黄沙坪、宝山矿床闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄分别为143±1 Ma(MSWD=1.00)(表1,图5a)和141±4 Ma(MSWD=0.99)(表1,图5b),线性关系极好,表明测试结果可靠;获得Sr初始值$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$(据路远发和李文霞,2021测算)分别为0.72521±0.00543和0.70985±0.00013(表1)。

表1 黄沙坪和宝山矿床闪锌矿 Rb–Sr 同位素分析结果

Table 1 Rb–Sr isotopic data of sphalerites from the deposits of Huangshaping and Baoshan

样号	矿床	Rb($\times10^{-6}$)	Sr($\times10^{-6}$)	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	±1σ	年龄
10D6-1	黄沙坪	26.00	0.2129	379.60	1.50519	0.00001	Age=143±1 Ma $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ =0.72521±0.00543 MSWD=1.00
10D6-2		6.60	0.3473	55.50	0.84071	0.00001	
10D6-3		12.09	0.5085	69.62	0.86989	0.00005	
10D6-4		45.09	0.4235	328.30	1.42033	0.00005	
10D6-5		6.39	0.1606	115.05	0.96393	0.00010	
10D6-6		60.61	0.4466	467.81	1.69311	0.00010	
10D6-7		14.64	0.2219	198.00	1.12894	0.00013	
10D15-1	宝山	0.24	0.3329	2.111	0.71383	0.00012	Age=141±4 Ma $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ =0.70985±0.00013 MSWD=0.99
10D15-2		0.96	0.6415	4.323	0.71860	0.00005	
10D15-3		0.31	0.3762	2.355	0.71449	0.00008	
10D15-4		0.23	0.6153	1.060	0.71231	0.00012	
10D15-6		0.17	0.5008	0.963	0.71191	0.00006	
10D15-7		0.10	0.3945	0.760	0.71129	0.00001	

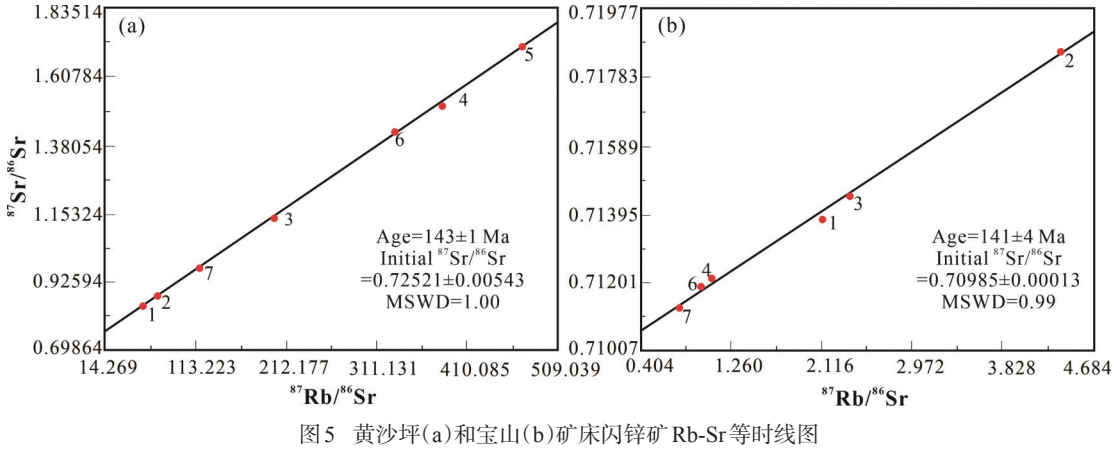

图5 黄沙坪(a)和宝山(b)矿床闪锌矿 Rb-Sr 等时线图

Fig. 5 Rb-Sr isochron age of sphalerites from the deposits of Huangshaping and Baoshan

5 讨论

5.1 矿床成矿时代

闪锌矿 Rb-Sr 同位素定年是限定热液硫化物矿床形成时代的一种有效且直接的方法，但其同位素的均一和平衡往往会受到后期复杂水岩反应和相互作用的影响(张瑞斌等，2008)。为保证闪锌矿 Rb-Sr 同位素定年的可靠，必须满足以下 3 个基本条件：(1)闪锌矿要有相同的来源并且近同时沉淀；(2)闪锌矿形成以后$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$封闭且不变；(3)样品中 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 比值是可变化的(李文博等，2002；Hu Q Q et al.，2015；王祥东等，2019)。本文研究的两个矿床均选择铅锌矿体中未见裂隙，结晶较好的致密块状矿石为研究对象，分别采自同一矿体局部较小的范围内，且闪锌矿纯度高，最大程度满足了 Rb-Sr 同位素测年的前提条件。测试结果中 1/Rb 和 $^{87}Rb/^{86}Sr$，1/Sr 和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 之间不存在明显协变关系(图 6)，暗示闪锌矿同位素体系是相对封闭和均一的，说明闪锌矿生长期间$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$基本上保持不变，因此该等时线年龄具有实际地质意义，表明两个矿床铅锌矿的成矿时代均为早白垩世。

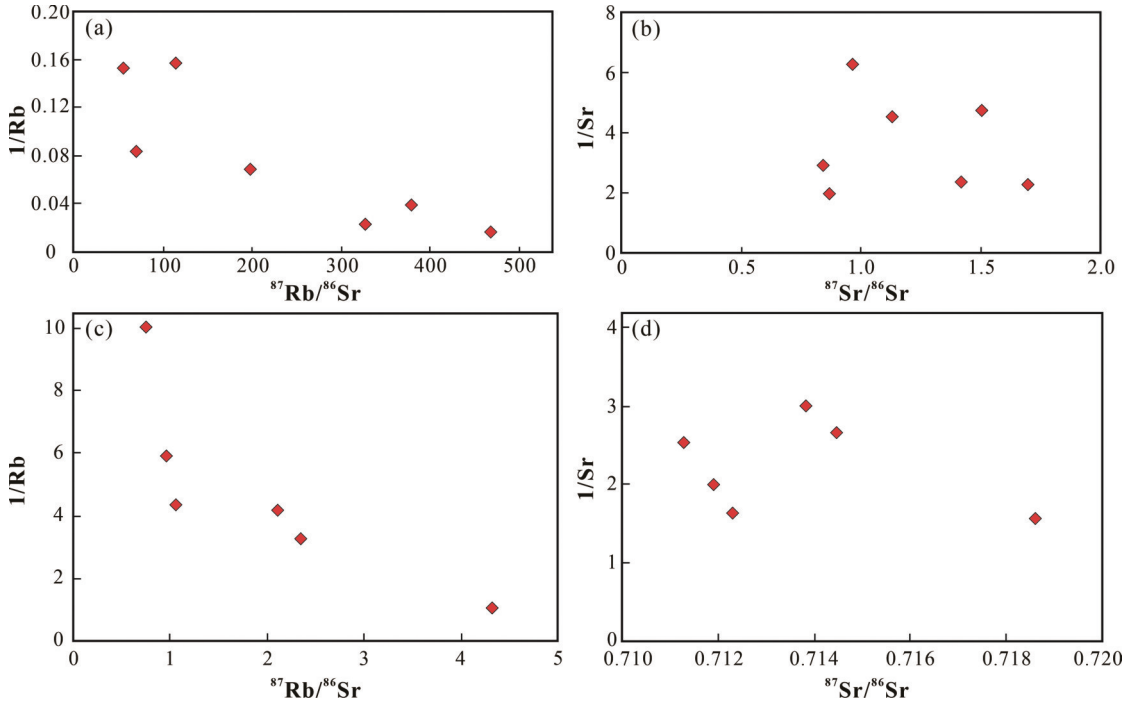

图 6 黄沙坪(a、b)和宝山(c、d)矿床闪锌矿 1/Rb-$^{87}Rb/^{86}Sr$ 和 1/Sr-$^{87}Sr/^{86}Sr$ 关系图

Fig. 6 Diagrams of 1/Rb vs. $^{87}Rb/^{86}Sr$ and 1/Sr vs. $^{87}Sr/^{86}Sr$ of mineral sphalerites and its residues from the deposits of Huangshaping (a, b) and Baoshan (c, d)

前人对黄沙坪、宝山两个矿床成岩成矿做了大量的研究工作，使用了大部分的放射性同位素定年方法，如 K-Ar、Ar-Ar、常规锆石 U-Pb、单颗粒锆石 U-Pb、锆石 LA-ICP-MS U-Pb、锆石 SHRIMP U-Pb 和黄铁矿包裹体 Rb-Sr 等时线、辉钼矿 Re-Os 等方法，积累了丰富的同位素年龄数据。但同一研究对象采用相同或不同的测年方法(主要有 K-Ar 法、Rb-Sr 法、U-Pb 法)测年结果却相差较大，这种情况的出现除测年误差外，还与测试方法本身存在局限性有关(伍光英等，2005)。从近二十余年发表的锆石 LA-ICP-MS U-Pb、锆石 SHRIMP U-Pb、辉钼矿 Re-Os、单矿物 Rb-Sr 测年数据(表 2)可见，黄沙坪、宝山两个矿床高精度成岩、成矿年龄分别为 161~150 Ma、159~143 Ma 和 181~155 Ma、174~141 Ma，同一矿床成岩、成矿年龄存在 11~33Ma 的时间差。这一现象在湘南地区柿竹

园、芙蓉、铜山岭等大型-超大型矿床中也普遍存在(表2)。对此主要有以下3种观点:(1)湘南地区大规模成矿作用主要发生在160~150 Ma(第一期)和145~130 Ma(第二期),第一期以钨锡矿化为主,铜铅锌金银铀矿化次之,第二期主要表现为钨锡矿化的继续和铜铅锌矿化的增强(毛景文等,1995;付建明等,2004;马丽艳等,2007)。(2)145 ~ 130 Ma成矿年龄主要通过矿物Rb-Sr、Sm-Nd等方法获得,数据可信度不高(袁顺达等,2012;王志强等,2014)。(3)矿物Rb-Sr、Sm-Nd年龄代表矿床晚期阶段矿化,说明了矿化的持续时间长,大型-超大型矿床的形成与长时间多阶段的矿化有关(徐贻赣等,2013)。近年来,随着高精度测年技术的发展,湘南及其邻区145~130 Ma成矿年龄数据(表2)陆续发表,另外江西大吉山钨矿床2个云母 ^{40}Ar-^{39}Ar 坪年龄144 Ma、147 Ma(张文兰等,2006)和广东锯板坑钨锡多金属矿床云母 ^{40}Ar-^{39}Ar 坪年龄139 Ma(付建明等,2009),也属这一时期。Xiong Y Q et al.(2020)认为湘东钨锡矿可能存在两期W-Sn成矿事件,一期与二云母花岗岩有关,成矿时代为~152 Ma;另一期与区内白云母花岗岩有关,成矿时代为~140 Ma。上述两期矿化的时间与毛景文等(2004)提出的华南地区中生代大规模成矿作用的时间段(170~150 Ma和140~125 Ma)高度一致;也与付建明等(2011)划分的南岭成矿带160~150 Ma成矿高峰期和140~130 Ma成矿次高峰期相吻合。因此,本文认为湘南地区燕山期存在两期或多期成岩与成矿作用,它们的叠加与改造可能是区内矿床巨量金属富集的重要因素之一(蔡明海等,2016)。

表2 湘南地区燕山期钨锡铅锌多金属矿床及相关岩体年龄统计

Table 2 Ages of Mineralization and granites related to W–Sn–Pb–Zn polymetallic deposits in the Southern Hunan province in Yanshanian

矿床/岩体	测试样品	年龄(Ma)	测试方法	数据来源
黄沙坪铅锌多金属矿床	石英斑岩	152±3	锆石 SHRIMP U-Pb	雷泽恒等,2010
	英安斑岩	159±1	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	
	石英斑岩	155±1	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	原垭斌等,2014
	二长花岗斑岩	161±1	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	
	辉钼矿	159±8	辉钼矿 Re-Os	马丽艳等,2007
	辉钼矿	155±2	辉钼矿 Re-Os	姚军明等,2007
	辉钼矿	158±2~159±3	辉钼矿 Re-Os	雷泽恒等,2010
	辉钼矿	158±1	辉钼矿 Re-Os	齐钒宇等,2012
	铅锌矿	143±1	闪锌矿 Rb-Sr	本文
宝山铅锌多金属矿床	花岗闪长斑岩	162±2	锆石 SHRIMP U-Pb	伍光英等,2005
	花岗闪长质角砾岩	164±2	锆石 SHRIMP U-Pb	
	花岗闪长斑岩	158±2	锆石 SHRIMP U-Pb	路远发等,2006
	花岗闪长斑岩	157±1	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	
	花岗闪长斑岩	158±1	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	谢银财等,2013
	暗色包体	155±1	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	
	花岗斑岩	165±3	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	全铁军等,2012
	花岗闪长斑岩	181±2	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	
	辉钼矿	160±2	辉钼矿 Re-Os	路远发等,2006
	黄铁矿	174±7	黄铁矿 Rb-Sr	姚军明等,2006
	铅锌矿	141±4	闪锌矿 Rb-Sr	本文
柿竹园钨锡钼铋钼多金属矿床	黑云母二长花岗岩	154±1~158±2	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	Chen Y X et al.,2016
	花岗斑岩	157±2~158±2	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	
	黑云母二长花岗岩	153±1~156±1	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	Zhao P L et al.,2018
	黑云母	153±0	云母 Ar-Ar	毛景文等,2004
	黑云母	134±2	云母 Ar-Ar	
	石榴子石、萤石、黑钨矿	149±2	矿物 Sm-Nd	Li X H et al.,2004

续表2

矿床/岩体	测试样品	年龄(Ma)	测试方法	数据来源
金船塘锡铋矿床	黑云母	151±1~157±1	云母 Ar-Ar	Zhao P L et al.,2018
	辉钼矿	160±3	辉钼矿 Re-Os	刘晓菲等,2012
	含矿石英脉	133±6	石英 Rb-Sr	马丽艳等,2010
	矽卡岩矿石	141±11	矿物 Sm-Nd	
红旗岭锡多金属矿床	白云母	153±1	云母 Ar-Ar	袁顺达等,2012
	含矿石英脉	143±8	石英 Rb-Sr	马丽艳等,2010
荷花坪锡多金属矿床	白云母	152±2	云母 Ar-Ar	蔡明海等,2016
	石英	155±7~157±2	石英 Ar-Ar	
	含矿花岗斑岩	142±2	锆石 SHRIMP U-Pb	Wei D F et al., 2007
骑田岭岩体	角闪石黑云母二长花岗岩	160±2	锆石 SHRIMP U-Pb	付建明等,2004
	骑田岭岩体	146±5~163±2	锆石 SHRIMP U-Pb	朱金初等,2009
	弱蚀变花岗岩	155±6	锆石 SHRIMP U-Pb	李华芹等,2006
	蚀变矿化花岗岩	156±5	锆石 SHRIMP U-Pb	
	含矿花岗斑岩	146±5	锆石 SHRIMP U-Pb	
芙蓉锡多金属矿床	金云母	151±1~157±1	云母 Ar-Ar	彭建堂等,2007
	锡矿石	160±2	锡石 LA-ICP-MS U-Pb	Yuan S D et al.,2008
	锡矿石	158±1	锡石 TIMS	
	锡矿石	157±4	锡石 LA-ICP-MS U-Pb	王志强等,2014
	矽卡岩矿石	133±15	矿物 Sm-Nd	李华芹等,2006
	蚀变花岗岩矿石	137±5	矿石 Rb-Sr	
铜山岭铜铅锌多金属矿床	花岗闪长斑岩	148±1~167±1	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	全铁军等,2013
	花岗闪长斑岩	157±2	锆石 SHRIMP U-Pb	卢友月等,2015
	辉钼矿	155±3~161±1	辉钼矿 Re-Os	
	矽卡岩矿石	155±8	石榴子石 Sm-Nd	
	矽卡岩矿石	173±3	石榴子石 Sm-Nd	王云峰等,2017
	铅锌矿矿石	146±8	闪锌矿 Rb-Sr	杨红梅等,未发表

5.2 成岩成矿物质来源对比

湘南地区与燕山期岩浆作用有关的两类矿床岩浆岩物质来源存在明显的差异已得到证实:胡永嘉等(1984)对花岗岩类和花岗闪长岩类进行系统的对比,其中 Rb/Sr 值(88.20 和 0.50)、$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值(0.725~0.746 和 0.707)均有明显的差别。郭春丽等(2013)对两个系列成矿花岗质母岩的空间分布、年代、岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素特征进行了系统对比,发现它们之间均存在明显的差异;并认为与酸性岩(花岗岩类)有关的矿床可能是由于古太平洋俯冲板片沿钦杭断裂带发生局部重熔形成的,与中酸性岩(花岗闪长岩类)有关矿床形成于华南岩石圈大规模伸展减薄的环境。黄沙坪铅锌多金属矿区花岗岩类 Sr 同位素初始值[$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ =0.7157](童潜明等,1995)、Nd 同位素[$\varepsilon_{Nd}(t)$=-5.6](伍光英,2005)、岩石地球化学特征(姚军明等,2005)、Hf 同位素[ε_{Hf} (t)= -3.2 ~-7.6](原垭斌等,2014)等指示成岩物质主要来源于地壳;宝山铅锌多金属矿区花岗闪长岩类 Sr 同位素初始值[$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ =0.7071 ~ 0.7078](杨世义等,1986)、Nd 同位素[$\varepsilon_{Nd}(t)$=-6.4](伍光英等,2005)、岩石地球化学特征(路远发等,2006)、Hf 同位素[ε_{Hf} (t)= -8.65 ~-19.43](弥佳茹等,2018)等指示有幔源物质参与了成岩作用。

成矿物质来源差异研究方面:祝新友等(2012)通过比较黄沙坪、宝山矿床的 S、Pb 同位素组成,在矿石铅同位素值-$\delta^{34}S$ 图解中,二者分布特点、位置完全不同,显示出两个矿床完全不同的岩石成因、成矿物质来源;并认为黄沙坪矿床成矿岩体与南岭钨多金属矿区花岗岩相似,具有陆壳重熔花岗岩的特点,成矿矿种为 W-Mo-Bi-Pb-Zn 及萤石等;宝山矿床花岗闪长斑岩具有 I 型花岗岩特点,成矿矿种为 Cu-Mo-Pb-Zn。Sr 同位素初始值$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$是示踪

成矿物质和成矿流体来源的有效途径之一(Bell et a1., 1989)。姚军明等(2006)获得宝山矿床黄铁矿 Sr 同位素初始值($^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ =0.70912±0.00016,指示其成矿物质为壳幔混合来源。本文获得黄沙坪、宝山矿床闪锌矿($^{87}Sr/^{86}Sr)_i$分别为 0.72521±0.00543 和 0.70985±0.00013,也指示黄沙坪铅锌矿成矿物质可能主要来源于地壳,而宝山铅锌矿成矿物质主要为壳幔混合来源;同时闪锌矿 Rb-Sr 同位素各项测试结果(表 1)明显的差异也表明两个矿床铅锌矿具有不同的成矿物质来源。

6 结论

(1)黄沙坪、宝山矿床闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄分别为 143±1 Ma 和 141±4 Ma,表明两个矿床铅锌矿成矿时代均为早白垩世。结合区域成岩成矿年代学研究成果,认为湘南地区包括黄沙坪、宝山矿床在内的与燕山期岩浆作用有关的两类矿床可能大部分存在 160 ~150 Ma 和 145 ~ 130 Ma 两期成矿作用,两期或多期成岩与成矿作用的叠加与改造可能是区内矿床巨量金属富集的重要因素之一。

(2)黄沙坪、宝山矿床闪锌矿($^{87}Sr/^{86}Sr)_i$分别为 0.72521±0.00543 和 0.70985±0.00013,指示黄沙坪铅锌矿成矿物质可能主要来源于地壳,而宝山铅锌矿成矿物质主要为壳幔混合来源。

野外工作得到了湖南有色金属有限公司黄沙坪矿业分公司、湖南宝山有色金属矿业有限责任公司的帮助,两位审稿专家和责任编辑提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心感谢!

参考文献:

艾 昊. 2013. 湖南黄沙坪多金属矿床成矿斑岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素制约 [J]. 矿床地质, 32(3):545-563.

曹 亮, 段其发, 周 云. 2015. 湖北凹子岗锌矿床 Rb-Sr 同位素测年及其地质意义 [J]. 中国地质, 42(1):235-247.

蔡明海, 张文兵, 彭振安, 刘虎, 郭腾飞, 谭泽模, 唐龙飞. 2016. 湘南荷花坪锡多金属矿床成矿年代研究 [J]. 岩石学报, 32(7):2111-2123.

陈小文, 伍建柏, 息朝庄. 2008. 湖南黄沙坪铅锌多金属矿床地质特征及成因探讨 [J]. 国土资源导刊, 5(4):45-48.

段其发, 曹亮, 曾健康, 周云, 汤朝阳, 李 堃. 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 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 39(8):977-986+999.

付建明, 马昌前, 谢才富, 张业明, 彭松柏. 2004. 湖南骑田岭岩体东缘菜岭岩体的锆石 SHRIMP 定年及其意义 [J]. 中国地质, 31(1):96-100.

付建明, 李祥能, 程顺波, 徐德明, 马丽艳, 陈希清. 2009. 粤北连平地区钨锡多金属矿床成矿时代研究 [J]. 中国地质, 36(6):1331-1339.

付建明, 徐德明, 杨晓君, 马丽艳, 蔡明海, 刘云华, 魏君奇, 刘国庆, 魏道芳, 陈希清, 程顺波, 梅玉萍. 2011. 南岭锡矿 [M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1-241.

付建明, 卢友月, 牛志军, 程顺波, 谢新泉, 陈希清, 王晓地, 罗士新, 赵小明, 雷天赐, 贾小辉, 杨文强, 马丽艳, 刘慧, 秦拯纬, 唐分配, 邓 蕾, 王瑞湖, 邓 宾, 肖光铭, 武国忠, 楼法生, 罗春林. 2017. 中国重要成矿区带成矿特征、资源潜力和选区部署——南岭成矿带 [M]. 北京:中国原子能出版社, 1-309.

郭春丽, 许以明, 楼法生, 郑佳浩. 2013. 钦杭带侏罗纪与铜和锡矿有关的两类花岗岩对比及动力学背景探讨 [J]. 岩石矿物学杂志, 32(4):463-484.

湖南省有色地质勘查局一总队. 2010. 湖南省桂阳县宝山铅锌银矿接替资源勘查报告 [R].

胡永嘉, 黄日明, 龚茂杨. 1984. 湘南两个内生金属成矿系列的铅锌矿床 [J]. 湖南地质, 3(1):1-13.

雷泽恒, 陈富文, 陈郑辉, 许以明, 龚述清, 李华芹, 梅玉萍, 屈文俊, 王登红. 2010. 黄沙坪铅锌多金属矿成岩成矿年龄测定及地质意义 [J]. 地球学报, 31(4):532-540.

李华芹, 路远发, 王登红, 陈毓川, 杨红梅, 郭敬, 谢才富, 梅玉萍, 马丽艳. 2006. 湖南骑田岭芙蓉矿田成岩成矿时代的厘定及其地质意义 [J]. 地质论评, 52(1):113-121.

李文博, 黄智龙, 许德如, 陈 进, 许 成, 管 涛. 2002. 铅锌矿床 Rb-Sr 定年研究综述 [J]. 大地构造与成矿学, 26(4):436-441.

刘晓菲, 袁顺达, 吴胜华. 2012. 湖南金船塘锡铋矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义 [J]. 岩石学报, 28(1):39-51.

卢友月, 付建明, 程顺波, 马丽艳, 张 鲲. 2013. 湘南界牌岭锡多金属矿床含矿花岗斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究 [J]. 华南地质与矿产, 29(3):199-206.

卢友月, 付建明, 程顺波, 刘树生, 黎传标, 张利国, 马丽艳. 2015. 湘南铜山岭铜多金属矿田成岩成矿作用年代学研究 [J]. 大地构造与成矿学, 39(6):1061-1071.

卢友月, 付建明, 谭仕敏, 程顺波, 郭赵扬, 秦拯纬, 刘邦定, 马丽艳. 2017. 湘南大坊金银铅锌矿床花岗闪长斑岩锆石U-Pb定年、Hf同位素组成及其找矿指示意义 [J]. 华南地质与矿产, 33(3):262-274.

卢友月, 付建明, 黎传标, 程顺波, 陈希清, 马丽艳. 2018. 湘南桂汝地区青石岭和大岭背钨矿成矿时代及其找矿指示意义 [J]. 桂林理工大学学报, 38(1):14-23.

路远发, 马丽艳, 屈文俊, 梅玉萍, 陈希清. 2006. 湖南宝山铜-钼多金属矿床成岩成矿的U-Pb和Re-Os同位素定年研究 [J]. 岩石学报, 22(10):2483-2492.

路远发, 李文霞. 2021. Pb-Sr-Nd-Hf同位素参数计算及程序设计 [J]. 华南地质, 37(2):233-245.

吕志成, 张 志, 李永胜, 刘 鹏, 甄世军, 姚 磊, 张明超. 2013. 南岭成矿地区矿山深部找矿新进展 [J]. 高校地质学报, 19(2):175-181.

马丽艳, 路远发, 屈文俊, 付建明. 2007. 湖南黄沙坪铅锌多金属矿床的Re-Os同位素等时线年龄及其地质意义 [J]. 矿床地质, 26(4):425-431.

马丽艳, 路远发, 付建明, 陈希清, 程顺波. 2010. 湖南东坡矿田金船塘、红旗岭锡多金属矿床Rb-Sr、Sm-Nd同位素年代学研究 [J]. 华南地质与矿产, 26(4):23-29.

毛景文, 李红艳, 裴荣富. 1995. 湖南千里山花岗岩体的Nd-Sr同位素及岩石成因研究 [J]. 矿床地质, 14(3):235-242.

毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展 [J]. 地学前缘, 11(1):45-55.

弥佳茹, 袁顺达, 轩一撒, 张东亮. 2018. 湖南宝山-大坊矿区成矿花岗闪长斑岩的锆石U-Pb年龄、Hf同位素及微量元素组成对区域成矿作用的指示 [J]. 岩石学报, 34(9), 2548-2564.

彭建堂, 胡瑞忠, 毕献武, 戴橦谟, 李兆丽, 李晓敏, 双燕, 袁顺达, 刘世荣. 2007. 湖南芙蓉锡矿床$^{40}Ar/^{39}Ar$同位素年龄及地质意义 [J]. 矿床地质, 26(3):237-248.

彭建堂, 胡瑞忠, 袁顺达, 毕献武, 沈能平. 2008. 湘南中生代花岗质岩石成岩成矿的时限 [J]. 地质论评, 54(5):617-625.

齐钒宇, 张 志, 祝新友, 李永胜, 甄世民, 公凡影, 巩小栋, 何鹏. 2012. 湖南黄沙坪钨钼多金属矿床矽卡岩地球化学特征及其地质意义 [J]. 中国地质, 39(2):338-348.

全铁军, 孔 华, 费利东, 王 高, 李 欢, 吴城明. 2012. 宝山花岗闪长斑岩的岩石成因:地球化学、锆石U-Pb年代学和Hf同位素制约 [J]. 中国有色金属学报, 22(3):611-621.

全铁军, 王 高, 钟江临, 费利东, 孔华, 刘仕杰, 赵志强, 郭碧莹. 2013. 湖南铜山岭矿区花岗闪长岩岩石成因:岩石地球化学、U-Pb年代学及Hf同位素制约 [J]. 矿物岩石, 33(1):43-52.

谭娟娟, 刘重芃, 杨红梅, 蔡应雄, 卢山松. 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 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 43(7):2438-2448.

童潜明, 伍仁和, 彭奇来. 1995. 郴桂地区钨锡铅锌金银矿床成矿规律 [M]. 北京:地质出版社, 1-98.

王 健, 张 均, 张晓军, 刘文浩, 仲文斌, 杨 清, 刘重芃. 2019. 四川天宝山矿床闪锌矿Rb-Sr年代学、稳定同位素及地质意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 44(9):3026-3041.

王俊霖, 邓安平, 张 宇, 邵拥军, 李宏斌. 2020. 湖南黄沙坪多金属矿床闪锌矿对Cu-Pb-Zn和W-Mo-Pb-Zn成矿系统环境的指示 [J]. 矿产与地质, 34(1):56-63.

王祥东, 徐德明, 吕新彪, 王邵斌. 2019. 内蒙古白音诺尔锌铅矿床中侏罗世成矿事件:来自闪锌矿Rb-Sr等时线年龄的证据 [J]. 矿产勘查, 10(4):791-800.

王云峰, 杨红梅, 张利国, 卢山松, 杨泽飞, 邱啸飞, 刘重芃. 2017. 湘东南铜山岭铅锌多金属矿床成矿时代与成矿物质来源—Sm-Nd等时线年龄和Pb同位素证据 [J]. 地质通报, 36(5):875-884.

王志强, 陈 斌, 马星华. 2014. 南岭芙蓉锡矿田锡石原位LA-ICP-MSU-Pb年代学及地球化学研究:对成矿流体来源和演化的意义 [J]. 科学通报, 59(25):2505-2519.

伍光英, 马铁球, 柏道远, 李金冬, 车勤建, 王先辉. 2005. 湖南宝山花岗闪长质隐爆角砾岩的岩石学、地球化学特征及锆石SHRIMP定年 [J]. 现代地质, 19(2):198-204.

谢银财, 陆建军, 马东升, 章荣清, 高剑峰, 姚 远. 2013. 湘南宝山铅锌多金属矿区花岗闪长斑岩及其暗色包体成因:锆石U-Pb年代学、岩石地球化学和Sr-Nd-Hf同位素制约 [J]. 岩石学报, 29(12):4186-4214.

许以明, 龚述清, 江元成, 雷泽恒, 李玉生. 2007. 湖南黄沙坪铅锌矿深边部找矿前景分析 [J]. 地质与勘探, 43(1):38-43.

徐贻赣, 吴淦国, 王长明, 张 达, 张垚垚. 2013. 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, 87(5):621-633.

杨红梅, 蔡红, 段瑞春, 刘重芃, 张利国, 梅玉萍, 段桂玲. 2012. 硫化物Rb-Sr同位素定年研究进展 [J]. 地球科学进展, 27(4):379-385.

杨红梅, 刘重芃, 蔡红, 段瑞春, 蔡应雄, 卢山松, 谭娟娟, 张利国, 李华芹. 2017. 闪锌矿分相Rb-Sr体系定年机理初探 [J]. 华南地质与矿产, 33(4):344-353.

杨世义, 刘姤群, 张秀兰, 陈长江. 1986. 湘南坪宝地区两类斑岩及其成矿作用研究 [A]. //见:南岭地质矿产文集. 第2辑 [M]. 北京:地质出版社, 157-167.

姚军明, 华仁民, 林锦富. 2005. 湘东南黄沙坪花岗岩 LA-ICPMS锆石U-Pb定年及岩石地球化学特征 [J]. 岩石学报, 21(3):688-696.

姚军明, 华仁民, 林锦富. 2006. 湘南宝山矿床REE、Pb-S同位素地球化学及黄铁矿 Rb-Sr同位素定年 [J]. 地质学报, 80(7):1045-1054.

姚军明, 华仁民, 屈文俊, 戚华文, 林锦富, 杜安道. 2007. 湘南黄沙坪铅锌钨钼多金属矿床辉钼矿的Re-Os同位素定年及其意义 [J]. 中国科学:地球科学, 37(4):471-477.

袁顺达, 刘晓菲, 王旭东, 吴胜华, 原垭斌, 李雪凯, 王铁柱. 2012. 湘南红旗岭锡多金属矿床地质特征及Ar-Ar同位素年代学研究 [J]. 岩石学报, 28(12):3787-3797.

原垭斌, 袁顺达, 陈长江, 霍 然. 2014. 黄沙坪矿区花岗岩类的锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成及其地质意义 [J]. 岩石学报, 30(1):64-78.

张瑞斌, 刘建明, 叶 杰, 陈福坤. 2008. 河北寿王坟铜矿黄铜矿铷锶同位素年龄测定及其成矿意义 [J]. 岩石学报, 24(6):1353-1358.

张文兰, 华仁民, 王汝成, 陈培荣, 李惠民. 2006. 赣南大吉山花岗岩成岩与钨矿成矿年龄的研究 [J]. 地质学报, 80 (7):956-962.

朱金初, 王汝成, 张佩华, 谢才富, 张文兰, 赵葵东, 谢 磊, 杨策, 车旭东, 于阿朋, 王禄彬. 2009. 南岭中段骑田岭花岗岩基的锆石U-Pb年代学格架 [J]. 中国科学:地球科学, 39(8):1112-1127.

祝新友, 王京彬, 王艳丽, 程细音, 傅其斌. 2012. 湖南黄沙坪W-Mo-Bi-Pb-Zn多金属矿床硫铅同位素地球化学研究 [J]. 岩石学报, 28(12):3809-3822.

Bell K, Anglin C D, Franklin J M. 1989. Sm-Nd and Rb-Sr isotope systematics of scheelites: Possible implications for the age and genesis of vein-hosted gold deposits [J]. Geology, 17: 500-504.

Chen Y X, Li H, Sun W D, Ireland T, Tian X F, Hu Y B, Yang W B, Chen C, Xu D R. 2016. Generation of Late Mesozoic Qianlishan A_2–type granite in Nanling Range, South China: implications for Shizhuyuan W-Sn mineralization and tectonic evolution [J]. Lithos, 266-267:435-452.

Hu Q Q, Wang Y T, Mao J W, Wei R, Liu S Y, Ye D J, Yuan Q H, Dou P. 2015. Timing of the formation of the Changba-Lijiagou Pb-Zn ore deposit, Gansu Province, China: evidence from Rb-Sr isotopic dating of sulfides [J]. Journal of Asian Earth Science, 103:350-359.

Li X H, Liu D Y, Sun M, Li W X, Liang X R, Liu Y. 2004. Precise Sm-Nd and U-Pb isotopic dating of the supergiant Shizhuyuan polymetallic deposit and its host granite, SE China [J]. Geological Magazine, 141(2):225-231.

Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 1-39.

Wei D F, Bao Z Y, Fu J M, Cai M H. 2007. Diagenetic and mineralization age of the Hehuaping tin-polymetallic orefield, Hunan Province [J]. Acta Geologica Sinica, 81(2) : 244-252.

Xiong Y Q, Shao Y J, Cheng Y B, Jiang S Y. 2020. Discrete Jurassic and cretaceous Mineralization events at the Xiangdong W(-Sn)Deposit, Nanling Range. South China [J]. Economic Geology, 115 (2):385-413.

Yuan S D, Peng J T, Hu R Z, Bi X W, Qi L, Li Z L, Li X M, Shuang Y. 2008. Characteristics of rare-earth elements (REE), strontium and neodymium isotopes in hydrothermal fluorites from the Bailashui tin deposit in the Furong ore field, Southern Hunan Province, China [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 27:342-350.

Zhao P L, Yuan S D, Mao J W, Yuan Y B, Zhao H J, Zhang D L, Shuang Y. 2018. Constraints on the timing and genetic link of the large-scale accumulation of proximal W-Sn-Mo-Bi and distal Pb-Zn-Ag mineralization of the world-class Dongpo orefield, Nanling Range, South China [J]. Ore Geology Reviews, 95: 1140-1160.