

doi: 10.12029/gc20220612

夏杰,程顺波,薛喜林,李剑锋,付建明,卢友月,杨齐智,李雄飞,马丽艳. 2022. 湖南清水塘铅锌矿床成因——来自流体包裹体和石英 Rb-Sr 定年证据[J]. 中国地质, 49(6): 1862-1874.

Xia Jie, Cheng Shunbo, Xue Xilin, Li Jianfeng, Fu Jianming, Lu Youyue, Yang Qizhi, Li Xiongfei, Ma Liyan. 2022. Genesis of Qingshuitang Lead-zinc deposit in Hunan Province: Evidence from fluid inclusions and Rb-Sr dating of quartz[J]. Geology in China, 49(6): 1862-1874(in Chinese with English abstract).

湖南清水塘铅锌矿床成因——来自流体包裹体和石英 Rb-Sr 定年证据

夏杰¹,程顺波^{1,2},薛喜林³,李剑锋^{1,2,4},付建明^{1,2},卢友月^{1,2},

杨齐智⁵,李雄飞³,马丽艳^{1,2}

(1. 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; 2. 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; 3. 湖南金水塘矿业有限责任公司, 湖南 祁东 421613; 4. 辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁 大连 116029; 5. 湖南省有色地质勘查局一总队, 湖南 郴州 423000)

提要:【研究目的】为探讨衡阳盆地及周边地区铅锌矿床的成因问题, 本文对研究程度较高的清水塘铅锌矿床开展工作。【研究方法】通过矿床地质调查, 不同阶段石英、方解石及闪锌矿的流体包裹体研究及石英 Rb-Sr 测年工作, 探讨其成矿流体地球化学特征、演化与成矿过程。【研究结果】根据矿物组合及矿脉之间的穿切关系, 本文将清水塘铅锌矿床成矿作用划分为黄铁矿-石英(I)、石英-方铅矿-闪锌矿(II)和重晶石-方解石(III)3个阶段。流体包裹体研究表明, II 阶段石英、闪锌矿中均发育 L 和 VL 两种类型原生、次生流体包裹体; I 阶段石英、III 阶段方解石主要发育 VL 型原生流体包裹体。测温结果显示: II 阶段石英原生包裹体根据均一温度、盐度可细分为 258~296 °C、8.55%~9.21% NaCl eqv, 260~298 °C、3.61%~4.18% NaCl eqv, 120~160 °C、12.73%~18.22% NaCl eqv 及 145~168 °C、3.06%~3.87% NaCl eqv 4 组, 而闪锌矿均一温度、盐度主要集中于 102~178 °C、10.24%~19.45% NaCl eqv; 成矿流体属中-低温、中盐度的 NaCl-H₂O 体系热液。结合包裹体产状和均一温度可知: II 阶段中盐度、低盐度流体具有不同的来源与演化过程, 前者多成群分布, 应为 I 阶段中温(210~312°C)、中盐度(12.30%~19.30%NaCl eqv)流体演化而来; 后者多沿矿物裂隙产出, 可能为后期低盐度大气降水混合的结果。本文获得 2 组石英 Rb-Sr 等时线年龄分别为(88.8±2.4)Ma 和(17.86±0.42)Ma, 前者代表清水塘铅锌矿床的成矿时代, 后者记录后期构造叠加的时代; 二者均明显晚于矿区附近周家岭花岗岩((203.0±1.4)Ma)及邻区关帝庙岩体((223.4±1.9)Ma)的成岩时代。【结果】考虑到区内铅锌成矿流体与岩浆活动有关, 结合清水塘、留书塘矿区硫化物 S、Pb 同位素组成特点推测矿区深部存在晚白垩世隐伏岩体, 为铅锌成矿提供物质和能量来源。

关键词: 流体包裹体; 石英 Rb-Sr 定年; 矿床成因; 铅锌矿床; 清水塘; 矿产勘查工程; 湖南

创新点: 有效限定了清水塘铅锌矿床的成矿流体特征与成矿时代, 揭示该区存在隐伏岩体及后期叠加改造。

中图分类号: P618.42; P618.43 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)06-1862-13

Genesis of Qingshuitang Lead-zinc deposit in Hunan Province: Evidence from fluid inclusions and Rb-Sr dating of quartz

收稿日期: 2020-12-17; 改回日期: 2021-05-29

基金项目: 中国地质调查局花岗岩成岩成矿研究中心开放基金课题(PMGR2020009, PMGR202108)及中国地质调查局项目(DD20190154, DD20221689) 联合资助。

作者简介: 夏杰, 男, 1980 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩石学与矿床学研究工作; E-mail: 182313011@qq.com。

通讯作者: 李剑锋, 男, 1986 年生, 博士, 助理研究员, 从事花岗岩、矿床学研究工作; E-mail: 317649474@qq.com。

XIA Jie¹, CHENG Shunbo^{1,2}, XUE Xilin³, LI Jianfeng^{1,2,4}, FU Jianming^{1,2}, LU Youyue^{1,2},
YANG Qizhi³, LI Xiongfei³, MA Liyan^{1,2}

(1. Wuhan Center of China Geological Survey(central south China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, CGS, Wuhan 430205, Hubei, China; 3. Hunan Jinchuitang Mining Co., Ltd, Qidong, 421613, Hunan, China; 4. College of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 1160292, Liaoning, China; 5. The First Team of Hunan Nonferrous Geological Prospecting Bureau, Chenzhou 423000, Hunan, China)

Abstract: This paper is the result of the mineral exploration engineering.

[Objective] In order to discuss the genesis of the lead-zinc deposits in Hengyang Basin and its surrounding areas, this paper has carried out work on the highly studied Qingshuitang lead-zinc deposit. **[Methods]** By means of geological survey, fluid inclusion study of quartz, calcite and sphalerite at different stages and Rb-Sr dating of quartz, we discuss the geochemical characteristics, evolution and mineralization processes of ore-forming fluid. **[Results]** Based on the mineral assemblages and the intercutting relationships between veins, this paper classifies the metallogenesis of the Qingshuitang lead-zinc deposit into three stages: pyrite-quartz stage (I), quartz-galena-sphalerite stage (II) and barite-calcite stage(III). The research of fluid inclusions show that both L- and VL-type primary and secondary fluid inclusions occur in quartzs and sphalerites at stage II; VL-type primary fluid inclusions predominantly occurs in quartzs at stage I and calcites at stage III. The measured temperature results show that primary inclusions of quartz formed at stage II can be subdivided into four groups according to the homogeneous temperature and salinity, which are 258–296°C and 8.55%–9.21% NaCl eqv, 260–298°C and 3.61%–4.18% NaCl eqv, 120–160°C and 12.73%–18.22% NaCl eqv, 145–168°C and 3.06%–3.87% NaCl eqv, respectively. By comparison, the homogenization temperature and salinity of sphalerite are mainly concentrated in the range of 102–178°C and 10.24%–19.45%NaCl eqv. The ore-forming fluid belongs to the NaCl-H₂O hydrothermal system of medium-low temperature and medium salinity. Based on occurrence and homogenization temperature of inclusions, the medium and low salinity fluids at stage II may have different sources and evolutionary processes. The former is mostly distributed in groups and might derive from medium temperature (210–312°C) and medium salinity (12.30–19.30%NaCl eqv) fluid at stage I. The latter mostly occurs along mineral fissures, which may be formed by mixing of the late low salinity atmospheric precipitations. In this paper, two quartz Rb-Sr isochron ages are obtained, and they are (88.8±2.4) Ma and (17.86±0.42) Ma, respectively. The former age represents the mineralization age of Qingshuitang lead-zinc deposit, and the latter age records the time of late tectonic superposition. Both of them are significantly later than the diagenetic ages of the Zhoujialing granite ((203.0±1.4) Ma) near the mine site and the adjacent Guandimiao pluton ((223.4±1.9) Ma). **[Conclusions]** Considering that the metallogenic fluids of lead-zinc in the area are related to magmatic activities, it is inferred that there are the Late Cretaceous concealed intrusions in the deep part of the mining area combined with sulfur and lead isotope characteristics of sulfides from the Qingshuitang and Liushutang mining areas, which provide material and energy sources for lead-zinc mineralization.

Key words: fluid inclusions; Rb-Sr dating of quartz; genesis of deposit; lead-zinc deposits; mineral exploration engineering; Qingshuitang; Hunan Province

Highlights: This study effectively defines the characteristics of ore-forming fluid and ore-forming age of the Qingshuitang lead-zinc deposit, and reveals the existence of concealed intrusions and the later superimposed reformation in the area.

About the first author: XIA Jie, male, born in 1980, master, senior engineer, mainly engaged in petrology and mineralogy research; E-mail: 182313011@qq.com

About the corresponding author: LI Jianfeng, male, born in 1986, doctor, assistant researcher, mainly engaged in research of granite and ore deposits; E-mail: 317649474@qq.com.

Fund support: Supported by the Open Fund of the Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey(No.PMGR2020009, No.PMGR202108) and the projects of China Geological Survey (No.DD20190154, No.DD20221689).

1 引 言

清水塘是湘中地区著名的铅锌矿床,至今已有近百年开采历史。矿区主要铅锌矿体呈脉状充填于硅化破碎带内,明显受NE、NNE向断裂控制。前人对其矿床地质、构造地质、岩石地球化学、矿床学及成矿预测等方面进行大量的研究工作,如:黄满湘等(1994)总结了矿区构造地质特征与控矿规律;史国伟和邵拥军(2015)总结了区内燕山期构造控矿规律,并提出矿体沿倾向矿物垂向分带明显,沿走向由北东往南西侧伏的观点;路睿等(2017)通过H-O-S-Pb同位素研究,认为区内成矿物质主要来自地壳,岩浆热液与天水混合作用是成矿的主要机制;史国伟(2018)对区内主要地质体开展系统微量元素地球化学研究,结合资料认为清水塘为与岩浆侵入活动有关的中—低温热液交代充填型铅锌矿床。显然,上述研究成果对清水塘铅锌矿床的基础研究起到一定的促进作用;但到目前为止,对该矿床成矿时代及闪锌矿中流体包裹体尚缺乏系统研究。基于此,本文对矿区不同阶段石英、方解石及典型矿石(Ⅱ阶段)中闪锌矿开展流体包裹体岩相学、显微测温研究,结合石英Rb-Sr测年工作探讨矿床成矿流体地球化学特征、演化与成矿过程,并讨论和总结矿床成因。

2 区域地质背景

清水塘铅锌矿床大地构造位置位于扬子陆块区湘桂、湘东—桂北残余盆地及江南古岛弧结合部位,紫云山—牛头寨—四明山—关帝庙华夏系隆起地带与祁阳弧形断裂带复合地段(图1)。区域早古生代—新生代地层出露较完整,寒武纪—志留纪地层分布于关帝庙穹隆与阳明山穹隆核部,由下往上由黑色炭质板岩、碳酸盐岩、浅变质粉砂质板岩、炭泥质—硅质板岩组成。中泥盆世—新生代地层总厚达3000多米,晚三叠世以前主要为浅海碳酸盐建造夹含铁、煤的滨海砂(页)岩建造,而上三叠统一白垩系以陆源碎屑磨拉石建造为主,不整合于古生代地层之上,反映了本区域陆表浅海由扩张到挤压冲断造陆过程(史国伟和邵拥军,2015)。

区域构造以祁阳弧、关帝庙穹隆构造为主。前者由SN、NE、NW向褶皱及断裂构造所组成;后者

为呈椭圆状、近东西向展布的穹隆,控制一系列次级东西向的背、向斜构造。区内断裂构造主要发育NNE—NE、NW和EW向三组,NNE—NE向断裂主要有受祁阳弧的控制,较具代表性的断层有红旗坑、创天岭、石板桥及黄泥岭断层等,这些断裂多数以压性或压扭性为主,常以平行的断裂带出现;NW向断层主要有杨家洲、青山冲、新开铺、毛冲殿、双凤亭及矿区1号脉断层等,以扭性为主,次为张扭性;EW向断裂以仁凤桥压扭性断层为代表,次为南侧规模较小的系列断层。

区域岩浆活动较强烈,主要为NWW—SEE向展布的关帝庙复式岩体;明显受EW断裂和NW隐伏断裂联合控制,出露面积196 km²;主要岩性为黑云母花岗岩,次为二云母花岗岩,赵增霞等(2015)获得关帝庙岩体锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为(223.4±1.9)Ma,确定其属印支期产物;侵入于穹隆构造中并与寒武纪、奥陶纪、志留纪地层接触。此外,区域内中基性脉岩广泛发育,主要呈NW向展布;一般长为数十米不等,厚度一般为0.1~5 m,倾角较陡;主要分为闪斜、云斜煌斑岩,蚀变较强,伴有黄铁矿化、铅锌矿化。

3 矿床地质特征

3.1 矿区地质

矿区内出露地层有寒武系第三统一芙蓉统、奥陶系下统、志留系、泥盆系中统及第四系(图2)。寒武系第三统一芙蓉统(ϵ_{3-4})为灰黑色斑点状板岩、灰褐色厚层状板岩夹灰褐色透镜状灰岩,厚度>300 m。下奥陶统(O₁)细分为白水溪组和桥亭子组,主要岩性分别为灰—灰黑色粉砂质板岩、硅质板岩夹薄层粉砂岩、细砂岩或灰岩,灰绿色粉砂质板岩、含绢云母粉砂岩等;与下伏地层整合接触。志留系周家溪群灰—深灰色绢云母板岩夹石英长石砂岩,分布于矿区东北部猴子石一带,与下伏地层断层接触。中泥盆统跳马涧组为黄绿色—紫红色细砂至粉砂岩、石英砂砾岩,与下伏地层呈不整合接触,厚15~20 m;棋梓桥组上部为灰黑色灰岩夹薄层炭质、泥质页岩;下部为灰黑色泥灰岩、泥质灰岩夹砂质页岩;底部见厚层状石英砂岩;下伏地层整合接触。第四系由风化板岩碎屑、泥土等组成,分布于矿区低洼部位。

受加里东、印支和燕山期构造活动的影响,区

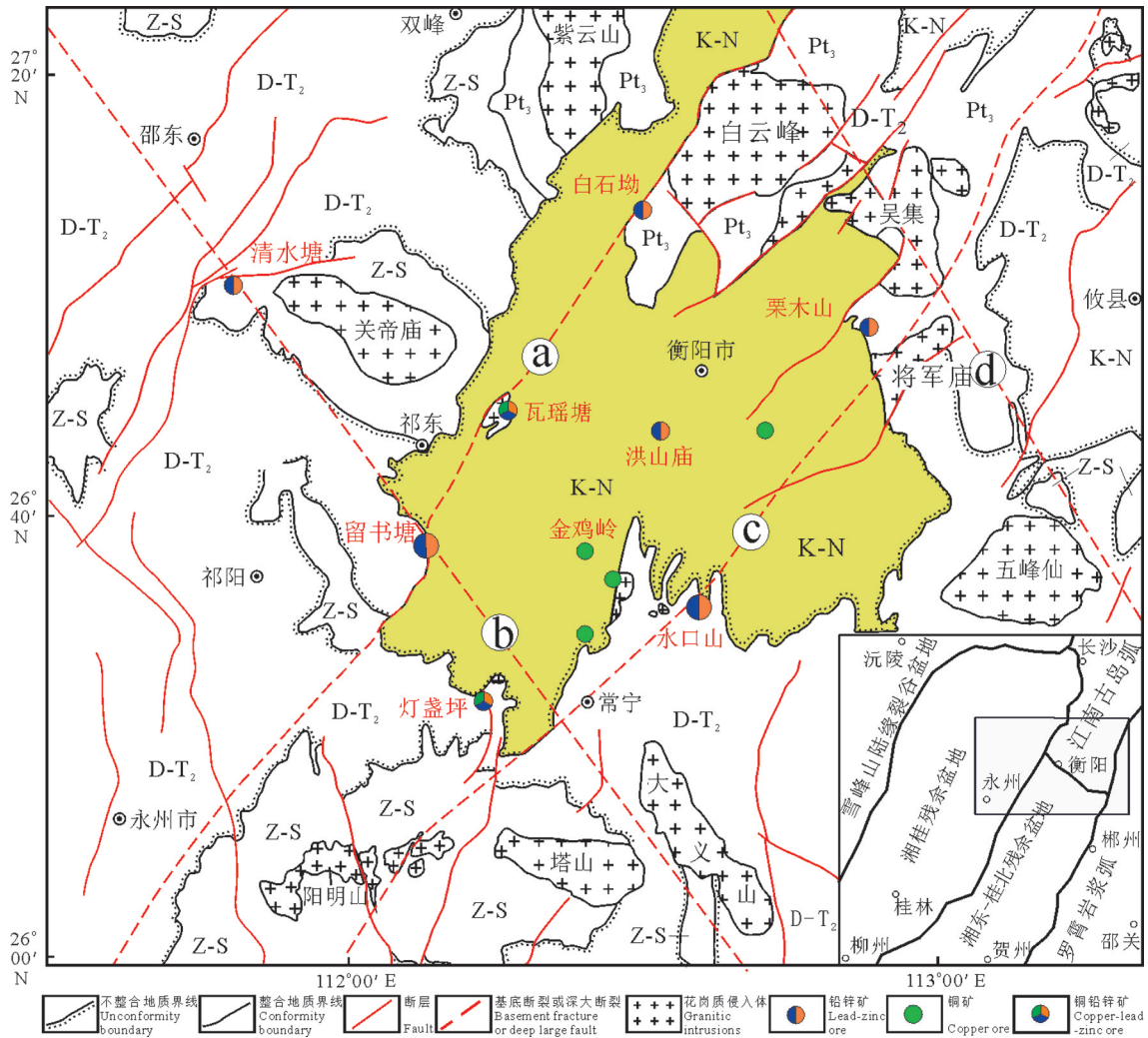


图1 衡阳盆地及周边地区地质矿产简图(据程顺波等,2017)

Pt₃—新元古界;Z-S—震旦系—志留系;D-T₂—泥盆系—中三叠统;K-N—白垩系—新近系;a—株洲—双牌深大断裂带;b—邵阳—郴州基底断裂带;c—醴陵—宁远深大断裂带;d—常德—安仁基底断裂带

Fig. 1 Geological map of Hengyang basin and adjacent areas showing distribution of mineral resources(after Cheng Shunbo et al., 2017)

Pt₃—Neoproterozoic;Z-S—Sinian—Silurian;D-T₂—Devonian—Middle Triassic;K-N—Cretaceous—Neogene;a—Zhuzhou—Shuangpai deep large fault;b—Shaoyang—Chenzhou basement fracture;c—Liling—Ningyuan deep large fault;d—Changde—Anren basement fault

内早期构造形迹以EW、NWW向为主,晚期构造形迹以NE向为主。区内主体构造为延伸达2.5 km、轴向NWW的清水塘复式背斜,向西倾伏变窄、向东开阔,通过红旗坑断层(F₂₀)与关帝庙复式背斜连接;核部由寒武系第三统一芙蓉统板岩、灰岩构成,两翼为下奥陶统粉砂质板岩;由于后期断裂多次破坏致使构造形态不完整,地层走向以NNE—SSW向为主,南翼地层南倾、倾角20~40°,局部大于50°;北翼地层北倾、倾角30~60°,背斜轴面南倾,倾伏端地层倾角为20~30°。断裂构造成矿期前主要为NW—

NWW向,多由煌斑岩脉所充填;成矿期为NNE—NE向,发育密集,主要为矿脉充填;成矿期后主要为NNE—NE向,沿矿脉壁产出,少数斜切矿脉^①。

区内岩浆岩以东北部周家岭花岗岩为主,沿NNE向F₂₀断层侵入于下奥陶统(O₁),下盘受断层控制;露面积约0.15 km²。岩石具细粒结构、块状构造,主要由斜长石(30%~35%)、钾长石(35%±)、石英(20%~25%)及黑云母(5%±)矿物组成。斜长石呈自形—半自形板状,可见少量聚片双晶,粒径以1~2 mm为主;钾长石为他形板状,常见条纹构造,

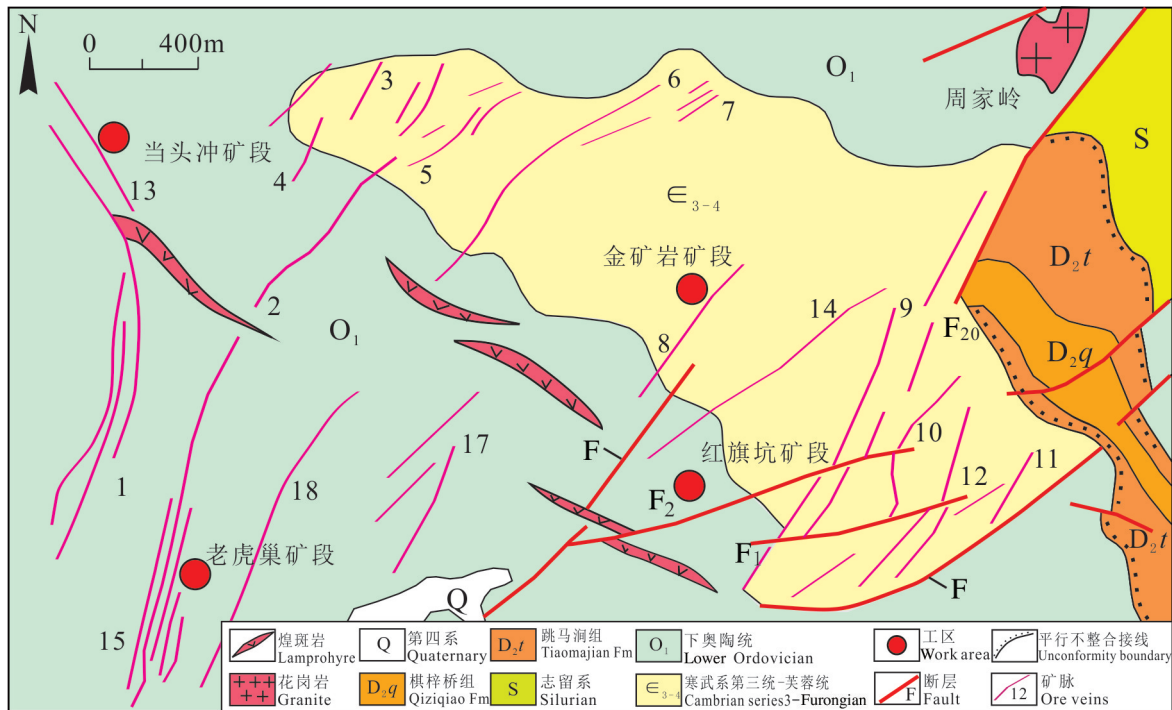


图2 清水塘矿区地质简图(据李石锦和彭恩生,1999)

Fig.2 Geological sketch map of the Qingshitang ore field(after Li Shijin and Peng Ensheng, 1999)

粒径0.5~1 mm;石英呈他形粒状,粒径以0.5~1 mm;黑云母自形片状,多已绿泥石化、绢云母化,粒径以0.5 mm居多;副矿物以锆石、磷灰石和榍石为主。矿区南东侧陈家台、尚家冲、红旗坑一带有少量煌斑岩脉出露,煌斑结构、块状构造,新鲜面为灰褐—灰黑色,斑晶矿物主要为黑云母(20%~30%),辉石(5%~10%),基质主要为钾长石(30%~40%)、黑云母(10%~15%)和斜长石(10%~15%),基质粒度为0.01~0.02 mm;副矿物有磷灰石、榍石。暗色矿物多被绢云母、绿泥石交代;其中铅、锌、铜、银含量比周家岭花岗岩高出4倍。

3.2 矿化特征

目前,矿区控制工业铅锌矿体共计20个,集中分布于矿区东南部红旗坑工区的响水岩—金矿岩一带;矿脉延伸方向为NNE、NNW、NEE三组,互相交替产出;以NNE向为主,NNW向次之。矿体主要赋存于寒武纪和奥陶纪地层的硅化破碎带中,其形态、产状与硅化破碎带基本一致;如遇两组断裂相交处,则脉体膨大且愈富集;主要呈脉状、透镜状沿走向或倾向常呈雁形或“多”、“S”或反“S”形排列。单个矿体一般长40~200 m,最长421 m,短者仅十余米;厚度一般1~2 m,最厚达11 m;由地表到深部矿

体厚度有逐渐变厚、品位变高的趋势,厚度变化系数为51%~65%。区内铅锌品位较富,开采矿体一般品位为Pb 3.5%,Zn 6%~7%,富集于矿脉交叉、复合部位。

矿区矿化蚀变主要有硅化、重晶石化、碳酸盐化、角岩化、绢云母化、绿泥石化及矽卡岩化等,以硅化、重晶石化与成矿关系最为密切。硅化分早、晚两期,前者以胶状石英为主,致密坚硬,透明度差,呈脉状、网脉状充填或胶结破碎板岩角砾,使断裂破碎带成为硅化破碎带,不含铅锌矿化;后者为乳白色—无色透明石英,呈粗晶状、梳状、放射状,含铅锌等金属矿。重晶石化为含矿热液再次沿硅化破碎带充填、胶结板岩或石英角砾,重晶石呈板状、板柱状、脉状产出,重晶石发育地段往往为铅锌矿化富集地段。

矿石类型可细分为石英铅锌矿型,重晶石—石英铅锌矿型和白云石—方解石铅锌矿型3种,以前两类型为主。矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿,其次为黄铜矿、黄铁矿、毒砂、辉银矿、黝铜矿、斑铜矿、黝锡矿、车轮矿、辉银矿、自然金等;地表因风化作用见有少量的铅矾、铋华、孔雀石、菱锌矿等。脉石矿物主要为石英、重晶石,次为白云石、方解石、萤

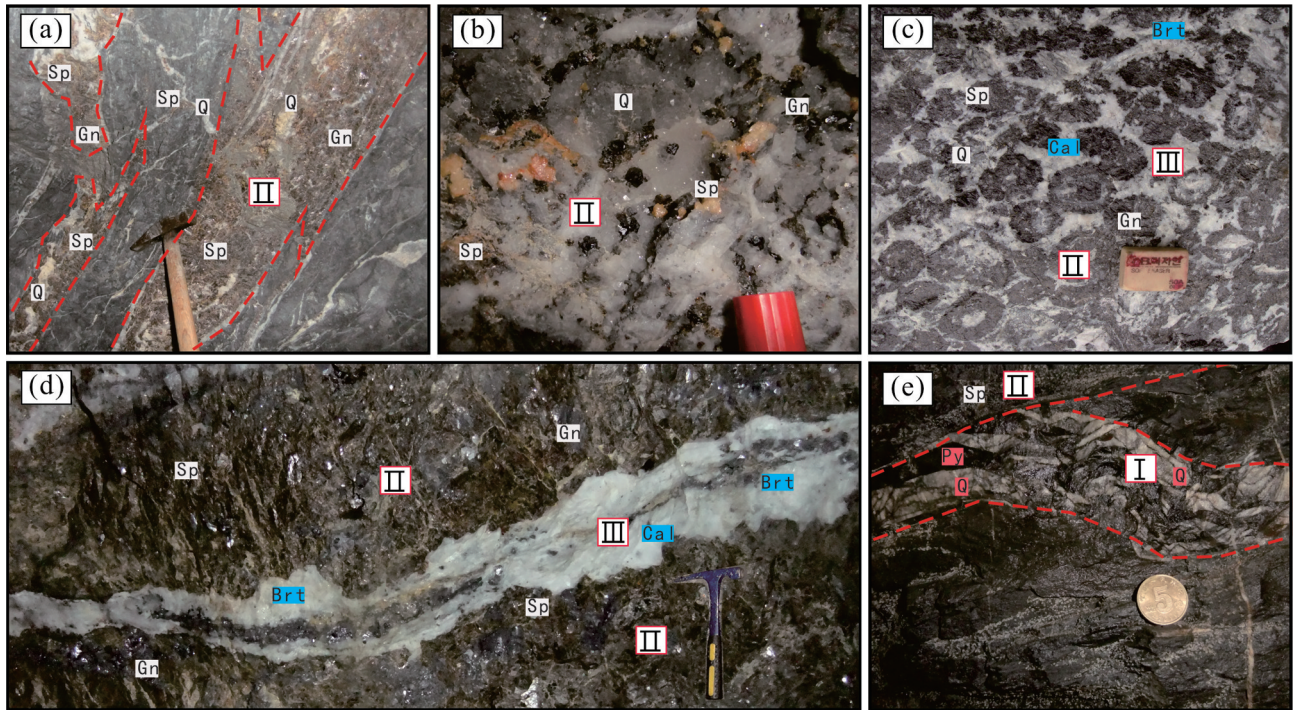


图3 清水塘铅锌矿床不同成矿阶段矿脉穿切关系

a、b—II阶段石英-方铅矿-闪锌矿；c—III阶段重晶石-方解石胶结II阶段石英-方铅矿-闪锌矿；d—III阶段重晶石-方解石脉穿切II阶段石英-方铅矿-闪锌矿脉；e—II阶段石英-方铅矿-闪锌矿脉穿切I阶段黄铁矿-石英脉；Sp—闪锌矿；Gn—方铅矿；Py—黄铁矿；Q—石英；Cal—方解石；Brt—重晶石

Fig.3 Ore vein penetration of different mineralization stages from the Qingsuitang Pb-Zn deposit

a,b—Stage II quartz-galena-sphalerite; c—Barite-calcite at stage III cemented quartz-galena-sphalerite at stage II; d—Barite-calcite veins at stage III penetration cut quartz-galena-sphalerite veins at stage II; e—Quartz-galena-sphalerite veins at stage II penetration cut pyrite-quartz veins at stage I; Sp—Sphalerite; Gn—Galena; Py—Pyrite; Q—Quartz; Cal—Calcite; Brt—Barite

石、长石、冰长石等。矿石结构以自形—半自形—他形粒状结构、交代残余结构、乳浊状结构、压碎结构、揉皱状结构为主；矿石构造主要有块状构造、脉状构造、条带状构造、浸染状构造、环带状构造及角砾状构造等。根据矿物共生组合及矿脉之间的穿切关系，结合资料可将清水塘铅锌矿床成矿作用划分为黄铁矿—石英阶段（I）、石英—方铅矿—闪锌矿阶段（II）和重晶石—方解石阶段（III），其中，II阶段为主成矿阶段（图3）。

4 流体包裹体研究

本次工作选取典型矿石样品磨制成厚约0.2 mm的测温片，对I阶段石英（样品编号14D01-1、14D01-2）、II阶段石英和闪锌矿（样品编号14D02-2、14D03-2、14D03-4）及III阶段方解石（样品编号14D04-1、14D04-2）中发育的流体包裹体特征进行系统研究。包裹体岩相学及显微测温工作在自然资源部中南矿产资源监督检测中心地质流体实验

室完成，使用仪器为英国Linkam THMS-600型冷热两用台，测温精度<31℃时为±0.1℃，>31℃时为±2℃。

4.1 流体包裹体岩相学

镜下观测表明，本次样品中流体包裹体较为发育，依室温下的相态特征可划分为2种类型，即：L型（液相）和VL型（液相+气相）（图4a-f）；L型包裹体主要分布于II阶段石英、III阶段方解石之中，而VL型在不同阶段测试矿物均有产出（表1）。L型流体包裹体形态多为四边形、米粒状和不规则状，多为小群定向分布或随机分布；大小为2~20 μm，以5~10 μm为主，占包裹体总量的50%~70%。VL型流体包裹体形态多为四边形、长方形和米粒状等，多为随机分布或沿愈合裂隙、小群定向分布；大小通常为2~25 μm，以5~15 μm居多，占包裹体总量的30%~50%，液相的充填度一般大于80%。

4.2 流体包裹体显微测温

根据Roedder(1992)提出的包裹体成因类型判

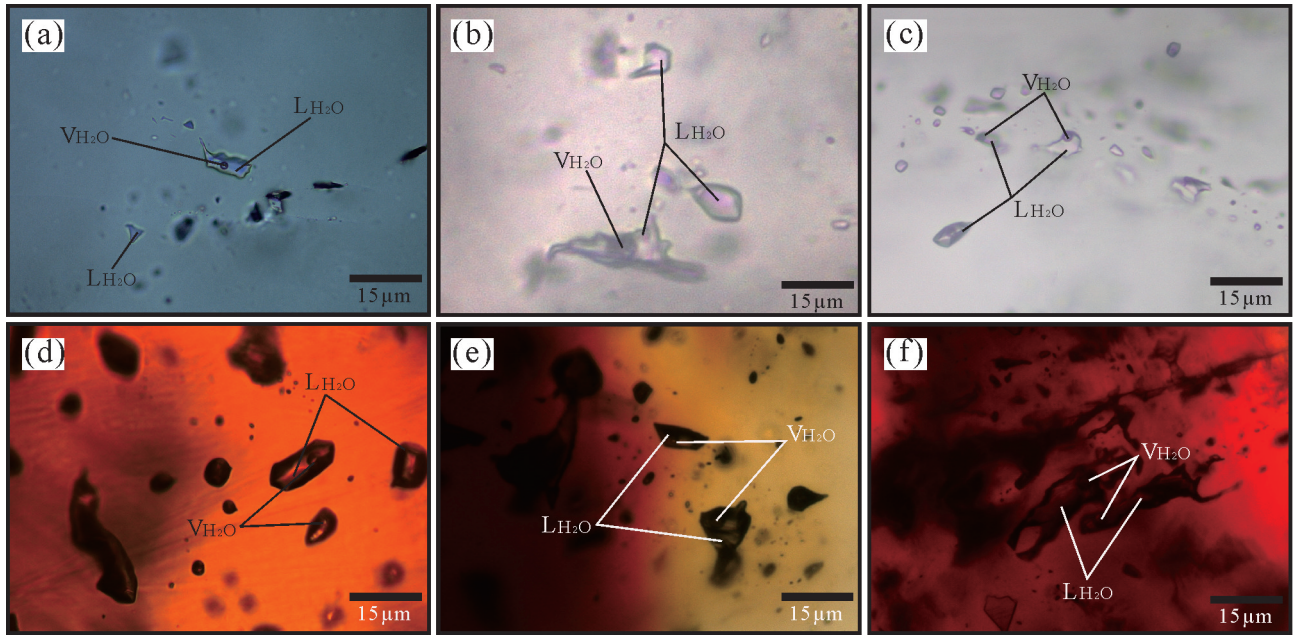


图4 清水塘铅锌矿床流体包裹体显微照片

L_{H₂O}—液态水;V_{H₂O}—气态水;a—Ⅰ阶段石英;b—Ⅱ阶段石英;c—Ⅲ阶段方解石;d-f—Ⅱ阶段闪锌矿

Fig.4 Photomicrographs of fluid inclusions in Qingshuitang Pb-Zn deposit

L_{H₂O}—Liquid water;V_{H₂O}—Vapor water;a—Stage I quartz;b— Stage II quartz;c— Stage III calcite;d-f— Stage II sphalerite

别标准,清水塘铅锌矿床3个阶段测试矿物中均发育原生及次生包裹体。VL型包裹体冰点温度的获得方式为:将温度迅速降低至 -100°C ,直至包裹体完全冻结;然后缓慢加热回温至最后一块冰融化而获得。包裹体测温数据处理利用MacFlinconr计算程序完成(Brown and Hagemann, 1995);测试及数据处理结果见表1和图5。

Ⅰ阶段石英VL型包裹体在冷冻—升温过程中,测得冰点温度分别为 -8.5°C ~ -12.2°C 、 -9.0°C ~ -15.6°C ,据此计算相应的盐度为12.30%~16.24%、12.88%~19.30% NaCl eqv;均一温度依次为 210°C ~ 305°C 、 237°C ~ 312°C ,据均一温度及盐度值计算流体密度为 $0.878\sim 0.948$ 、 $0.902\sim 0.924\text{ g/cm}^3$ 。

Ⅱ阶段石英样品中L型包裹体在冷冻—升温过程中,测得冰点温度分别为 -1.2°C ~ -1.8°C 、 -8.0°C ~ -9.0°C 、 -8.5°C ~ -12.0°C ,据此计算盐度值为2.07%~3.06%、12.62%~12.85%、12.28%~15.96% NaCl eqv。VL型包裹体在冷冻—升温过程中,测得冰点温度分别为 -1.8°C ~ -2.3°C 、 -1.8°C ~ -2.5°C 、 -9.8°C ~ -11.0°C 、 -5.5°C ~ -6.0°C 、 -8.9°C ~ -14.5°C ,据此计算相应的盐度值为3.06%~3.87%、3.61%~4.18%、13.72%~14.97%、8.55%~9.21%、12.73%~18.22% NaCl eqv;均一温度

依次为 $145\sim 168^{\circ}\text{C}$ 、 $260\sim 298^{\circ}\text{C}$ 、 $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ 、 $120\sim 160^{\circ}\text{C}$ 、 $258\sim 296^{\circ}\text{C}$,据均一温度及盐度值计算流体密度为 $0.926\sim 0.946$ 、 $0.749\sim 0.823$ 、 $1.023\sim 1.051$ 、 $0.812\sim 0.865$ 、 $1.004\sim 1.072\text{ g/cm}^3$ 。

Ⅱ阶段闪锌矿样品中L型包裹体在冷冻—升温过程中,测得冰点温度分别为 -9.9°C ~ -11.0°C 、 -10.3°C ~ -10.5°C 、 -10.3°C ~ -12.5°C ,据此计算盐度(NaCl eqv)值为13.83%~14.97%、14.25%~14.46%、14.25%~16.43%。VL型包裹体在冷冻—升温过程中,测得冰点温度分别为 -9.8°C ~ -12.0°C 、 -6.8°C ~ -7.2°C 、 -1.5°C ~ -1.8°C 、 -10.5°C ~ -11.8°C 、 -12.0°C ~ -16.0°C ,据此计算相应的盐度(NaCl eqv)值为13.72%~15.96%、10.24%~10.73%、2.57%~3.06%、14.46%~15.76%、15.96%~19.45%;均一温度依次为 $102\sim 150^{\circ}\text{C}$ 、 $150\sim 160^{\circ}\text{C}$ 、 $160\sim 170^{\circ}\text{C}$ 、 $140\sim 160^{\circ}\text{C}$ 、 $140\sim 178^{\circ}\text{C}$,据均一温度及盐度值,计算流体密度为 $1.017\sim 1.071$ 、 $0.982\sim 0.992$ 、 $0.729\sim 0.816$ 、 $1.015\sim 1.040$ 、 $1.037\sim 1.062\text{ g/cm}^3$ 。

Ⅲ阶段方解石VL型包裹体在冷冻—升温过程中,测得冰点温度分别为 -1.3°C ~ -1.9°C 、 -1.2°C ~ -1.7°C ,据此计算相应盐度值(NaCl eqv)为2.23%~3.21%、2.06%~2.89%;均一温度依次为 $116\sim 128^{\circ}\text{C}$ 、

表 1 清水塘铅锌矿流体包裹体测温结果

Table 1 The microthermometric results of fluid inclusions in Qingshuitang lead-zinc deposit

样号	矿物	成矿阶段	包裹体类型(数量)	产状	大小/ μm	气液比/%	冰点温度/ $^{\circ}\text{C}$	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	盐度 /%NaCl eqv	密度 /(g/cm^3)	压力 /(10^6 Pa)
14D01-1	石英	I 阶段	VL (35)	群状	4~22	10~25	-8.5~-12.2	210~305	12.30~16.24	0.878~0.948	233~376
14D01-2			VL (29)	群状	5~20	10~20	-9.0~-15.6	237~312	12.88~19.30	0.902~0.924	268~410
14D02-2	石英	I 阶段	L (6)	群状	2~9	0	-1.2~-1.8		2.07~3.06		
			VL (21)	微裂隙	5~25	15~20	-1.8~-2.3	145~168	3.06~3.87	0.926~0.946	378~440
			VL (21)	群状	5~20	15~20	-1.8~-2.5	260~298	3.61~4.18	0.749~0.823	688~770
	闪锌矿	II 阶段	L (5)	愈合裂隙	2~15	0	-9.9~-11.0		13.83~14.97		
			VL (19)	微裂隙	3~25	15~20	-9.8~-12.0	102~150	13.72~15.96	1.017~1.071	285~418
			VL (11)	群状	5~20	15~20	-6.8~-7.2	150~160	10.24~10.73	0.982~0.992	414~441
14D03-2	石英	II 阶段	VL (9)	群状	2~10	0	-8.9~-9.0		12.62~12.85		
			VL (14)	群状	3~12	15~20	-9.8~-11.0	120~150	13.72~14.97	1.023~1.051	335~418
			L (10)	微裂隙	3~20	0	-10.3~-10.5		14.25~14.46		
14D03-4	闪锌矿	III 阶段	VL (24)	微裂隙/群状	5月25日	10~15	-10.5~-11.8	140~160	14.46~15.76	1.015~1.040	391~460
			L (10)	群状	2~10	0	-8.5~-12.0		12.28~15.96		
			VL (17)	群状	3~12	15~20	-8.9~-14.5	120~160	12.73~18.22	1.004~1.072	336~445
14D04-1	方解石	III 阶段	VL (12)	群状	3~20	15~20	-5.5~-6.0	258~296	8.55~9.21	0.812~0.865	708~813
			L (15)	愈合裂隙	2~14	0	-10.3~-12.5		14.25~16.43		
			VL (47)	群状	5~18	10~15	-12.0~-16.0	140~178	15.96~19.45	1.037~1.062	391~499
14D04-2			VL (31)	群状	3~15	10~15	-1.3~-1.9	116~128	2.23~3.21	0.960~0.971	182~196
14D04-2			VL (27)	群状	3~17	10~15	-1.2~-1.7	104~139	2.06~2.89	0.948~0.965	171~202

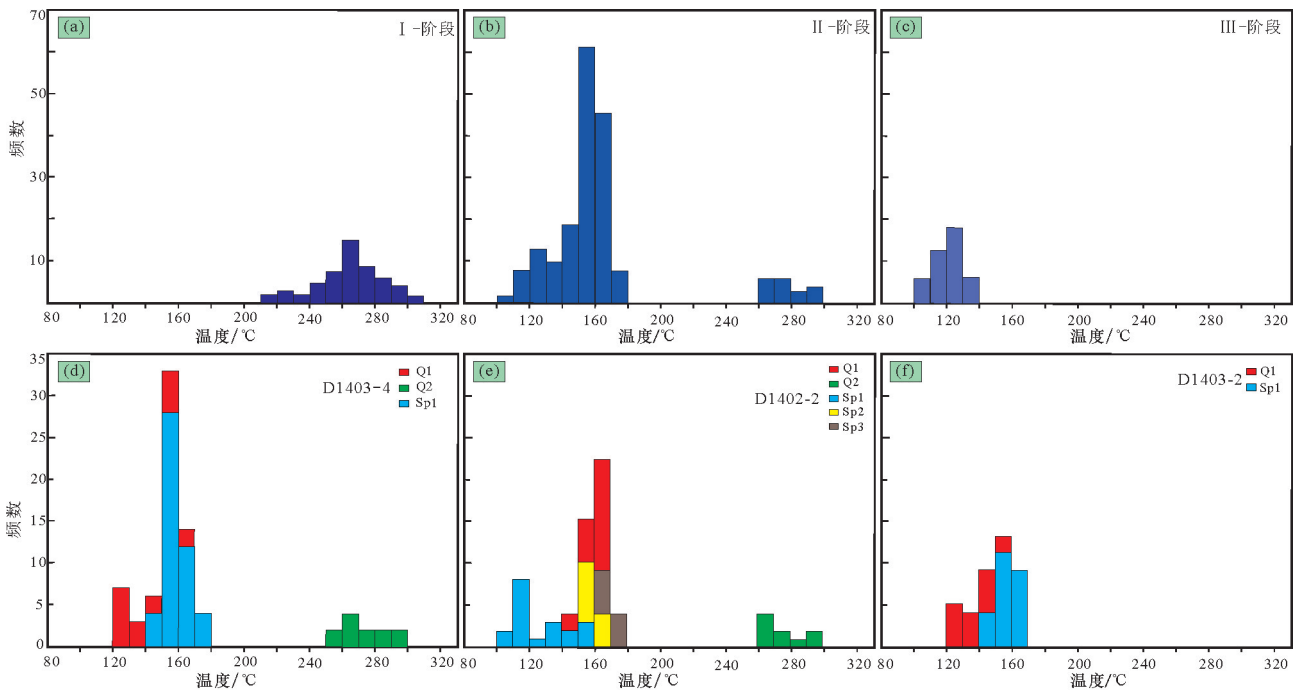


图 5 清水塘铅锌矿流体包裹体均一温度直方图

Fig.5 Histograms of homogeneous temperature of fluid inclusions in Qingshuitang lead-zinc deposit

104~139℃, 据均一温度及盐度值计算流体密度为0.960~0.971、0.948~0.965 g/cm³。

4.3 石英包裹体 Rb-Sr 定年

为获得清水塘铅锌矿床成矿时代, 本文在自然资源部中南矿产资源监督检测中心同位素实验室完成石英包裹体 Rb-Sr 测年工作。测试仪器采用 MAT-261 多接收质谱仪, 具体试验流程见文献(蔡明海等, 2006; 孙敬博等, 2013); 同位素分析采用 GBW04411、NBS607、NBS978 标准物质分别对分析流程和仪器进行监控。分析结果显示, 2组 10 件样品 Rb(10⁻⁶)、Sr(10⁻⁶) 含量分别为 0.546~2.062、0.918~2.171、0.496~28.192、1.226~7.913; ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 值变化范围较大, 介于 0.012~3.723、0.335~2.758; ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(1σ) 值较集中, 为 0.72645~0.72738、0.72655~0.72962。14D02-1~5 获得的等时线年龄为(17.86±0.42)Ma (MSWD=1.8), ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始比值为 0.726431; 14D03-1~5 获得的等时线年龄为(88.8±2.4)Ma (MSWD=0.082), ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始比值为 0.726135(表 2, 图 6)。

5 矿床成因讨论

5.1 成矿流体性质

流体包裹体岩相学及显微测温研究结果显示(表 1, 图 5), 清水塘铅锌矿床 I 阶段石英整体为中温、中盐度热液; II 阶段石英、闪锌矿中均发育 L、VL 两种类型的原生流体包裹体(图 4); 而 III 阶段为低温、低盐度的 NaCl-H₂O 体系流体。统计显示, II 阶段闪锌矿均一温度集中于 102~178℃; 而 II 阶段石英中原生包裹体均一温度有中温、低温两个区

域, 分别为 258~298℃、120~168℃; 较低的均一温度区间则与闪锌矿较吻合。闪锌矿包裹体绝大多数盐度集中于 10.24%~19.45% NaCl eqv, 只有一组低盐度数据为 2.57%~3.06% NaCl eqv; II 阶段石英包裹体的盐度分布于中、低盐度两个区间, 分别为 8.55%~15.96%、2.07%~4.18% NaCl eqv。整体而言, 主成矿(II)阶段石英包裹体可分为中温-中盐度、中温-低盐度、低温-中盐度和低温-低盐度 4 类, 闪锌矿中包裹体可分为中温-中盐度和低温-低盐度 2 类; 且 I 阶段、II 阶段石英包裹体测温结果反映二者不具简单的连续演化关系, 暗示成矿过程的复杂性。鉴于清水塘铅锌矿床不同成矿阶段包裹体产状和均一温度特点, 不难判断 II 阶段中盐度与低盐度流体具有不同的来源与演化过程: 前者多成群分布, 继承 I 阶段流体特点; 后者多沿矿物裂隙产出, 暗示后期低盐度大气降水的混入。无独有偶, 徐兆文等(2017)报道了大量 III 阶段方解石、重晶石中包裹体资料, 测温结果显示其均一温度、盐度分别为 144~362℃、149~221℃, 0.18%~7.31% NaCl eqv、0.18%~1.57% NaCl eqv; 同样反映出热液体系叠加大气降水的趋势。

众所周知, C-H-O 同位素是研究地质流体来源与演化的重要手段(郑永飞和陈江峰, 2000; Deng et al., 2009)。前人获得清水塘铅锌矿床中含矿石英的 δD_{SMOW} 值分布于 -79.3‰~-98.9‰, 随着包裹体均一温度的降低, 成矿流体 δD_{SMOW} 值具有降低的趋势; 其原因可能与水-岩作用、围岩中有机质及压力变化分馏有关(Driesner, 1997; Horita et al., 1999; 郑永飞和陈江峰, 2000; 杨利亚等, 2013)。经换算, δ¹⁸O_{H₂O-SMOW} 值介于 -8.10~0.63, 整体具随均一温度降低愈靠近大气降水线的趋势; 上述分析结果表明清水塘铅锌矿床的成矿流体可能源于由岩浆水与大气降水两个端元组成的混合流体。目前, 多数学者认为热液中 CO₂ 有 3 种来源: 岩浆来源或地幔射气、沉积碳酸盐岩和地层有机质, 其 δ¹³C_{PDB} 值变化范围分别是 -3‰~-9‰、-5‰~-7‰、0.5‰和 -27‰。路睿等(2017)测得清水塘矿区含矿方解石、围岩灰岩的 δ¹³C_{PDB} 值分别为 -4.6‰~-5.3‰、0.9‰~2.6‰, δ¹⁸O_{SMOW} 分别为 12.30‰~13.48‰、21.86‰~23.39‰; 上述数据暗示两者碳来自不同的源区, 前者碳源自花岗岩的低温蚀变, 后者则与原始海相沉积有关。总之, 包裹体 C-H-O 同位素组成支持流体包裹体

表 2 清水塘铅锌矿石英包裹体 Rb-Sr 定年结果
Table 2 Rb-Sr dating results of quartz inclusions in
Qingshuitang lead-zinc deposit

样号	成矿年龄/Ma	Rb/10 ⁻⁶	Sr/10 ⁻⁶	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(1σ)
14D02-1		0.640	0.496	3.723	0.72738±0.00006
14D02-2		2.062	2.646	2.251	0.72701±0.00006
14D02-3	17.86±0.42	0.546	28.192	0.335	0.72650±0.00003
14D02-4		1.235	1.008	2.962	0.72718±0.00007
14D02-5		0.796	18.771	0.012	0.72645±0.00004
14D03-1		0.918	7.913	0.335	0.72655±0.00004
14D03-2		1.097	3.807	0.833	0.72720±0.00002
14D03-3	88.8±2.4	2.171	3.233	1.940	0.72858±0.00006
14D03-4		1.726	2.722	1.832	0.72844±0.00007
14D03-5		1.171	1.226	2.758	0.72962±0.00007

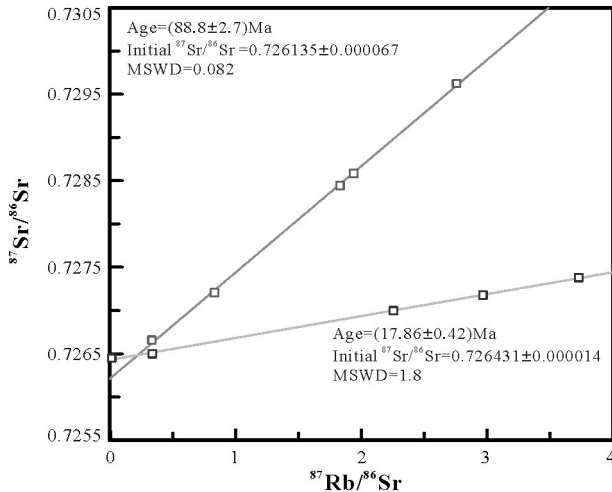


图6 清水塘铅锌矿床石英包裹体Rb-Sr等时线
Fig.6 Rb-Sr isochron of quartz inclusions from
Qingshitang lead-zinc deposit

测试结果。

5.2 成矿时代

目前,清水塘铅锌矿床尚无确切的成矿年代学资料,湘中地区亦未见相关高质量定年工作;原因是产于碳酸盐岩地层中的铅锌矿床成矿年龄的直接测定一直是科学难题,即便是全球研究程度最高的MVT矿床也是如此(段其发等, 2014)。实践表明,闪锌矿Rb-Sr等时线法解决了很多铅锌矿床的形成时代归属问题;略显遗憾的是,本文送出的闪锌矿样品未获得可靠的等时线年龄。鉴于闪锌矿和石英包裹体Rb-Sr等时线法具有相似的定年原理,因此,二者如果伴生产出应具有相同的形成年龄;但考虑到石英的形成温度区间大于闪锌矿,意味着前者可能记录更多的信息而获得无实际地质意义年龄。本文获得2组10件有效石英包裹体Rb-Sr等时线年龄分别为(88.8±2.4)Ma和(17.86±0.42)Ma,结合区域成矿事件本文认为前者代表清水塘铅锌矿床的成矿时代;鉴于二者相差年龄巨大,后者显然与铅锌成矿过程无关,可能记录后期构造活动的叠加时代或无地质意义,有待进一步研究。饶有趣味的是,两组年龄均明显晚于矿区附近周家岭花岗岩(203.0±1.4)Ma及邻区关帝庙岩体(223.4±1.9)Ma的成岩时代(缪柏虎, 2014; 赵增霞等, 2015),据此证实区内铅锌矿化与印支期花岗岩无成因联系。考虑到区内铅锌成矿流体主要与岩浆活动有关,结合清水塘、留书塘矿区硫化物S、Pb同位素组

成特点(程顺波等, 2017; 路睿等, 2017),推测矿区深部有晚白垩世隐伏岩体存在,为铅锌成矿提供物质和能量来源。

高精度地质年代学资料显示,华南西部在燕山晚期(85~106 Ma)发生一次较大规模成岩成矿事件(卢友月等, 2016),除前文提及的留书塘铅锌矿外,较具代表性的实例有:湘南界牌岭锡多金属矿床花岗斑岩锆石SHRIMP U-Pb年龄为(92.0±1.6)Ma(卢友月等, 2013),矿石黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar坪年龄为(91.1±1.1)Ma(毛景文等, 2007);大明山钨矿辉钼矿Re-Os年龄、白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar坪年龄分别为(94.05~99.95)Ma、(97.1±0.86)Ma(李水如等, 2008; 杨锋等, 2011);广西珊瑚钨锡矿区成矿花岗岩锆石U-Pb年龄为(106±13)Ma(李晓峰等, 2012),矿石白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar、石英Rb-Sr年龄分别为(101.7±0.7)Ma和(106.4±3.5)Ma(卢友月等, 2016);昆仑关岩体古民单元锆石U-Pb年龄为(93±1)Ma(谭俊等, 2008);广西大厂锡多金属矿床成岩、成矿年龄分别为85.1~103.8 Ma、90~98 Ma(王新宇等, 2015);广西龙头山金矿花岗斑岩、流纹斑岩锆石SHRIMP U-Pb年龄分别为(100.3±1.4)Ma、(103.3±2.4)Ma(陈富文等, 2008)等。研究表明,该期成矿岩体在空间上具有规模较小、星散分布的特点,在时间上属华南燕山晚期大规模成岩成矿作用高峰期80~134 Ma的一部分(毛景文等, 2007, 2008; 付建明等, 2011);岩浆热液成矿事件的矿床分布明显受同期构造格局控制(柏道远, 2022);其构造背景与华南板块于90~130 Ma受到古太平洋板块沿NNE走滑引起岩石圈局部伸展有关(毛景文等, 2007, 2008)。

5.3 矿床成因

Webster (2004)认为贫CO₂及SO₂、富H₂O和Cl的中酸性熔浆体系里,岩浆结晶作用主要分异出富Cl流体,分异流体性质则取决于原始熔浆的成分、初始的Cl/H₂O比值、流体分异时间、流体分异时熔浆结晶程度及所处深度等因素。岩浆结晶作用可直接分异出高盐度流体(Webster, 2004; Yang and Bodnar, 2004)、中等盐度的超临界流体或在NaCl-H₂O体系两相区内分异出高盐度卤水及共存的低盐度、低密度蒸气相(Roedder, 1992; Kamenetsky et al., 1999, 2002a, 2002b; Webster, 2004)。Baker et al. (2004)在研究墨西哥Bismark矽卡岩型矿床时发现

岩浆热液相分离形成中盐度VL型包裹体中Pb、Zn的浓度较高,而低盐度VL型包裹体中Cu、Zn、Pb的浓度较低。由此可见,清水塘铅锌矿床成矿阶段低温、中盐度流体可直接由岩浆分异演化而来。需要补充的是,本文研究显示后期加入的流体具有低温、低盐度特征,并非盆地热卤水;这一认识可以从已有的C-H-O-S-Pb同位素证据得到支持(路睿等, 2017; 徐兆文等, 2017)。

结合前文将清水塘铅锌矿床的成因机制总结如下:受燕山晚期NNE向断裂控制的隐伏花岗岩体侵位于地壳较浅部位,随着结晶作用分异出NaCl-H₂O体系流体;在熔体流体相分离的过程中,Cu、Fe、Zn、Pb等元素优先进入卤水相(肖庆辉等, 2002; Heinrich, 2007; 冷成彪等, 2009),出熔的流体渐变为富含有益元素的成矿流体,演化至低温阶段随着成矿物质过饱和而依次结晶成矿;大气降水混合则明显降低了体系的盐度,因改变了热液体系的物理化学性质益于成矿物质的沉淀。

6 结 论

(1) 区内闪锌矿主要发育L、VL两种原生流体包裹体,系统流体包裹体研究结合已有稳定同位素资料判断清水塘铅锌矿床成矿流体为中—低温、中等盐度NaCl-H₂O体系热液,成矿后期有大气降水的加入。

(2) 石英Rb-Sr定年结果显示清水塘铅锌矿床成矿时代为(88.8±2.4)Ma,证实其铅锌矿化与印支期花岗岩无成因联系。

致谢:感谢匿名审稿人的建议,提升了本文的讨论深度和质量。

注释

①湖南省地质矿产勘查开发局417队. 2009. 湖南省祁东县清水塘矿区清水塘矿段清水塘铅锌矿资源储量核实报告[R].

References

Bai Daoyuan, Tang Fenpei, Li Bin, Zeng Guangqian, Li Yinmin, Jiang Wen. 2022. Summary of main mineralization events in Hunan Province[J]. *Geology in China*, 49(1): 151–180(in Chinese with English abstract).

Baker T, Achterberg E V, Ryan C G, Lang J R. 2004. Composition and evolution of ore fluids in a magmatic–hydrothermal skarn deposit[J]. *Geology*, 32(2): 117–120.

Brown P E, Hagemann S G. 1995. MacFlinCor and its application to fluids in Archean lode–gold deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(19): 3943–3952.

Cai Minghai, Chen Kaixu, Qu Wenjun, Liu Guoqing, Fu Jianming, Yin Jianping. 2006. Geological characteristics and Re–Os dating of molybdenites in Hehuaping tin–polymetallic deposit, southern Hunan Province[J]. *Mineral Deposit*, 25(3): 263–268(in Chinese with English abstract).

Chen Fuwen, Li Huaqin, Mei Yuping. 2008. Zircon SHRIMP U–Pb chronology of diagenetic mineralization of the Longtoushan porphyry gold orefield, Gui County, Guangxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 921–926(in Chinese with English abstract).

Cheng Shunbo, Wu Zhihua, Liu Zhongpeng, Liu Asui, Ma Liyan, Lu Youyue. 2017. Sulfur and lead isotope geochemistry of the Liushutang lead–zinc deposit in Hu'nan Province and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(5): 846–856(in Chinese with English abstract).

Deng Jun, Yang Liqiang, Gao Bangfei, Sun Zhongshi, Guo Chunying, Wang Qingfei, Wang Jianping. 2009. Fluid evolution and metallogenic dynamics during tectonic regime transition: Example from the Jiapigou Gold Belt in Northeast China[J]. *Resource Geology*, 59(2): 140–152.

Driesner T. 1997. The effect of pressure on deuterium–hydrogen fractionation in high–temperature water[J]. *Science*, 277(5327): 91–794.

Duan Qifa, Cao Liang, Zeng Jiankang, Zhou Yun, Tang Zhaoyang, Li Kun. 2014. Rb–Sr dating of sphalerites from Shizishan Pb–Zn Deposit in Huayuan Ore Concentration Area, Western Hunan, and its geological significance[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(8): 977–986(in Chinese with English abstract).

Fu Jianming, Xu deming, Yang Xiaojun, Ma Liyan, Cai Minghai, Liu Yunhua, Wei Junqi, Liu Guoqing, Wei Daofang, Chen Xiqing, Cheng Shunbo, Mei Yuping. 2011. Tin Deposits in Nanling Range[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1–252.

Heinrich C A. 2007. Fluid–fluid interactions in magmatic–hydrothermal ore formation[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 65: 1–363.

Horita J. 1999. Pressure effect on hydrogen isotope fractionation between brucite and water at elevated temperatures[J]. *Science*, 286(5444): 1545–1547.

Huang Manxang, Yue Dongsheng, Liu Shinian. 1994. Geological structure characteristics of Qingshitang Pb–Zn ore field in Hunan Province and its control on mineralization[J]. *Mineral Deposit*, 13(supp.): 109–111.

Kamenetsky V S, Wolfe R C, Eggins S M, Mernagh T P, Bastrakov E. 1999. Volatile exsolution at the Dinkidi Cu–Au porphyry deposit, Philippines: A melt–inclusion record of the initial ore–forming process[J]. *Geology*, 27(8): 691–694.

- Kamenetsky V S, Davidson P, Mernagh T P, Crawford A J, Gemmill J B, Portnyagin M V, Shinjo R. 2002a. Fluid bubbles in melt inclusions and pillow-rim glasses: High-temperature precursors to hydrothermal fluids[J]. *Chemical Geology*, 183(1/4): 349–364.
- Kamenetsky V S, Achterbergh E V, Ryan C G, Naumov V B, Mernagh T P, Davidson P. 2002b. Extreme chemical heterogeneity of granite-derived hydrothermal fluids: An example from inclusions in a single crystal of miarolitic quartz[J]. *Geology*, 30(5): 459–462.
- Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, Wang Shouxu, Qin Chaojian, Wu Kongwen, Ren Tao. 2009. Advances of researches on the evolution of ore-forming fluids and the vapor transport of metals in magmatic-hydrothermal systems[J]. *Geological Review*, 55(1): 101–109(in Chinese with English abstract).
- Li Shijin, Peng Eengsheng. 1999. Study on fracture structure and ore fluid fracturing metallogenesis in the Qingshuitang ore field[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(4): 328–333(in Chinese with English abstract).
- Li Shuiru, Wang Denghong, Liang Ting, Qu Wenjun, Ying Lijuan. 2008. Metallogenic epochs of the Damingshan Tungsten Deposit in Guangxi and its prospecting potential[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 873–879(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Feng Zuohai, Xiao Rong, Song Cian, Yang Feng, Wang Cuiyun, Kang Zhiqiang, Mao Wei. 2012. Spatial and temporal distributions and the geological setting of the W-Sn-Mo-Nb-Ta deposits at the Northeast Guangxi, South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(11): 1713–1725(in Chinese with English abstract).
- Lu Rui, Miao Baihu, Xu Zhaowen, Lu Jianjun, Wang Rucheng, Zuo Changhu, Qu Jinbao, Zhao Zengxia. 2017. Isotopic tracer of ore-forming material source from the Qingshuitang Lead-Zinc deposit, Qidong County, Hunan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(6): 1285–1298(in Chinese with English abstract).
- Lu Youyue, Fu Jianming, Cheng Shunbo, Ma Liyan, Huang Zhenbiao, Bi Yiqin. 2016. Ore-forming age of the Shanhu Tungsten-Tin deposit in Guangxi Province and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(5): 939–948(in Chinese with English abstract).
- Lu Youyue, Fu Jianming, Cheng Shunbo, Ma Liyan, Zhang Kun. 2013. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the ore-bearing granite porphyry in the Jiepailing Tin-polymetallic deposit, Southern Hunan Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 29(3): 199–206(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, Chen Yuchuan. 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329–2338(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, Yuan Shunda, Cheng Yanbo, Chen Yuchuan. 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510–526(in Chinese with English abstract).
- Miao Baihu, Zuo Changhu, Zhao Zengxia, Xu Zhaowen, Lu Jianjun, Lu Rui, Chen Jinquan. 2014. Forming age and material source of the Zhoujialing granite in Qingshuitang orefield, Qidong County, Hunan Province[J]. *Geological Review*, 60(3): 611–623(in Chinese with English abstract).
- Roedder E. 1992. Fluid inclusion evidence for immiscibility in magmatic differentiation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(1): 5–20.
- Shi Guowei, Shao Yongjun. 2015. Geological characteristics and metallogenic regularity of qingshuitang Pb-Zn deposit in qidong of Hunan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 29(5): 624–629(in Chinese with English abstract).
- Shi Guowei. 2018. Geochemical characteristics and genesis analysis of Qingshuitang lead-zinc deposit in Hunan Province[J]. *Mineral Resources and Geology*, 32(4): 635–640(in Chinese with English abstract).
- Sun Jingbo, Zhang Liming, Chen Wen, Li Huaqin, Zhang Yan, Liu Xinyu, Li Jie, Zhang Bin. 2013. Quartz Rb-Sr isotopic dating of Hongshi gold deposit in East Tianshan Mountains[J]. *Geological Review*, 59(2): 382–388(in Chinese with English abstract).
- Tan Jun, Wei Junhao, Li Shuiru, Wang Zhongming, Fu Lebing, Zhang Keqing. 2008. Geochemical characteristics and tectonic significance of Kunlun A-type granite, Guangxi[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 743–754(in Chinese with English abstract).
- Wang Xinyu, Huang Hongwei, Chen Nengsong, Huang Xiqiang, Wu Xiangke, Hao Shuang, Li Huimin. 2015. In-situ LA-MC-ICPMS U-Pb geochronology of cassiterite from Changpo-Tongkeng Tin-polymetallic deposits, Dachang Orefield, Guangxi[J]. *Geological Review*, 61(4): 892–900(in Chinese with English abstract).
- Webster J D. 2004. The exsolution of magmatic hydrosaline chloride liquids[J]. *Chemical Geology*, 210(1/4): 33–48.
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Dashuan, Hong Dawei, Mo Xuanxue, Lu Xinxiang, Li Zhichang, Wang Xiongwu, Ma Changqian, Wu Fuyuan, Luo Zhaohua, Wang Tao. 2002. The Ways of Investigation on Granitoids[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–294(in Chinese).
- Xu Zhaowen, Miao Baihu, Zuo Changhu, Qu Jinbao, Zhao Zengxia, Lu Rui, Wang Shaohua. 2017. Study of the fluid inclusions from the Qingshuitang Pb-Zn deposit, Qidong County, Hunan Province[J]. *Geological Review*, 63(1): 207–218(in Chinese with English abstract).
- Yang Feng, Feng Zuohai, Kang Zhiqiang, Xiao Rong. 2011. Muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the Damingshan tungsten deposit in central Guangxi and its geological significance[J]. *Geological*

- Bulletin of China, 30(9): 1429–1433(in Chinese with English abstract).
- Yang Liya, Yang Liqiang, Yuan Wanming, Zhang Chuang, Zhao Kai, Yu Haijun. 2013. Origin and evolution of ore fluid for orogenic gold traced by D–O isotopes: A case from the Jiapigou gold belt, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(11): 4025–4035(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zengxia, Xu Zhaowen, Miao Baihu, Zuo Changhu, Lu Jianjun, Lu Rui, Chen Jinquan. 2015. Diagenetic age and material source of the Guandimiao granitic batholith, Hengyang City, Hunan Province[J]. Acta Geologica Sinica, 89(7): 1219–1230(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Cheng Jiangfeng. 2000. Stable Isotope Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1–323.
- ### 附中文参考文献
- 柏道远, 唐分配, 李彬, 曾广乾, 李银敏, 姜文. 2022. 湖南省成矿地质事件纲要[J]. 中国地质, 49(1): 151–180.
- 蔡明海, 陈开旭, 屈文俊, 刘国庆, 付建明, 印建平. 2006. 湘南荷花坪锡多金属矿床地质特征及辉钼矿 Re–Os 测年[J]. 矿床地质, 25(3): 263–268.
- 陈富文, 李华芹, 梅玉萍. 2008. 广西龙头山斑岩型金矿成岩成矿锆石 SHRIMP U–Pb 年代学研究[J]. 地质学报, 82(7): 921–926.
- 段其发, 曹亮, 曾健康, 周云, 汤朝阳, 李塍. 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.
- 程顺波, 吴志华, 刘重瓦, 刘阿睢, 马丽艳, 卢友月. 2017. 湖南省留书塘铅锌矿床 S、Pb 同位素特征及意义[J]. 地质通报, 36(5): 846–856.
- 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, 1–252.
- 黄满湘, 岳东生, 刘石年. 1994. 湖南清水塘铅锌矿田地质构造特征及其对成矿的控制[J]. 矿床地质, 13(增刊): 109–111.
- 史国伟, 邵拥军. 2015. 湖南祁东清水塘铅锌矿地质特征与成矿规律[J]. 矿产与地质, 29(5): 624–629.
- 史国伟. 2018. 湖南清水塘铅锌矿床地球化学特征与成因分析[J]. 矿产与地质, 32(4): 635–640.
- 孙敬博, 张立明, 陈文, 李华芹, 张彦, 刘新宇, 李洁, 张斌. 2013. 东天山红石金矿床石英 Rb–Sr 同位素定年[J]. 地质论评, 59(2): 382–388.
- 李晶, 陈衍景, 李强之, 张闯, 赵凯, 于海军. 2007. 甘肃阳山金矿流体包裹体地球化学和矿床成因类型[J]. 岩石学报, 23(9): 2144–2154.
- 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 秦朝建, 吴孔文, 任涛. 2009. 岩浆–热液体系成矿流体演化及其金属元素气相迁移研究进展[J]. 地质论评, 55(1): 101–109.
- 李石锦, 彭恩生. 1999. 清水塘矿田断裂构造与矿液致裂成矿浅析[J]. 大地构造与成矿学, 28(4): 328–333.
- 李水如, 王登红, 梁婷, 屈文俊, 应立娟. 2008. 广西大明山钨矿区成矿时代及其找矿前景分析[J]. 地质学报, 82(7): 873–879.
- 李晓峰, 冯佐海, 肖荣, 宋慈安, 杨锋, 王翠云, 康志强, 毛伟. 2012. 桂东北锡钨稀有金属矿床的成矿类型、成矿时代及其地质背景[J]. 地质学报, 86(11): 1713–1725.
- 路睿, 缪柏虎, 徐兆文, 陆建军, 王汝成, 左昌虎, 屈金宝, 赵增霞. 2017. 湖南祁东清水塘铅锌矿床成矿物质来源同位素示踪[J]. 地质学报, 91(6): 1285–1298.
- 卢友月, 付建明, 程顺波, 马丽艳, 黄振标, 闭义钦. 2016. 广西珊瑚钨锡矿床成矿年代学研究及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 40(5): 939–948.
- 卢友月, 付建明, 程顺波, 马丽艳, 张颀. 2013. 湘南界牌岭锡多金属矿床含花岗岩斑岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年代学研究[J]. 华南地质与矿产, 29(3): 199–206.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(10): 2329–2338.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 14(4): 510–526.
- 缪柏虎, 左昌虎, 赵增霞, 徐兆文, 陆建军, 路睿, 陈进全. 2014. 祁东县清水塘矿区周家岭花岗岩形成时代及物质来源[J]. 地质论评, 60(3): 611–623.
- 谭俊, 魏俊浩, 李水如, 王忠铭, 付乐兵, 张可清. 2008. 广西昆仑关 A 型花岗岩地球化学特征及构造意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 33(6): 743–754.
- 王新宇, 黄宏伟, 陈能松, 黄锡强, 吴祥珂, 郝爽, 李惠民. 2015. 广西大厂矿田长坡—铜坑锡多金属矿床锡石 LA–MC–ICP–MSU–Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 61(4): 892–900.
- 徐兆文, 缪柏虎, 左昌虎, 屈金宝, 赵增霞, 路睿, 王少华. 2017. 湖南祁东清水塘铅锌矿床流体包裹体研究[J]. 地质论评, 63(1): 207–218.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 洪大卫, 莫宣学, 卢欣祥, 李志昌, 汪雄武, 马昌前, 吴福元, 罗照华, 王涛. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1–294.
- 杨锋, 冯佐海, 康志强, 肖荣. 2011. 广西中部大明山钨矿白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 30(9): 1429–1433.
- 杨利亚, 杨立强, 袁万明, 张闯, 赵凯, 于海军. 2013. 造山型金矿成矿流体来源与演化的氢–氧同位素示踪: 夹皮沟金矿带例析[J]. 岩石学报, 29(11): 4025–4035.
- 赵增霞, 徐兆文, 缪柏虎, 左昌虎, 陆建军, 路睿, 陈进全. 2015. 湖南衡阳关帝庙花岗岩岩基形成时代及物质来源探讨[J]. 地质学报, 89(7): 1219–1230.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1–323.