

右江褶皱带东南缘西大明山矿集区铅同位素地球化学特征及其地质意义^{*}

肖昌浩^{1,2}, 刘欢^{3**}, 申玉科¹, 韦昌山¹, 乐兴文⁴, 欧德功², 张亮²

(1 中国地质科学院地质力学研究所 动力成岩成矿实验室, 北京 100081; 2 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

3 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

4 广西壮族自治区第四地质队, 广西 南宁 530031)

摘要 广西西大明山多金属矿集区是右江褶皱带东南缘近年找矿突破的重要地区, 发育凤凰山特大型银矿床、罗维中型钨钼多金属矿床、弄屯大型铅锌矿床及一些中、小型矿床等。其中罗维和弄屯矿床是近年新发现的矿床, 矿体分别呈层状赋存于寒武系碎屑岩和呈脉状赋存于寒武系与泥盆系接触界面附近或断裂破碎带中。笔者对矿集区内层状和脉状矿床矿石硫化物铅同位素进行研究, 并与赋矿围岩、隐伏二长花岗岩进行对比。铅同位素数据显示: 罗维层状矿床矿石硫化物铅同位素组成为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.1320\sim18.5980$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.5920\sim15.7988$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.4041\sim39.0461$; 弄屯脉状矿床矿石硫化物铅同位素组成为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.3240\sim18.5060$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.7321\sim15.9140$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.6511\sim39.2311$; 二者具有相似的同位素组成, 但弄屯矿床矿石硫化物 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值略高于罗维矿床矿石硫化物。罗维矿床矿石硫化物铅同位素组成与深部隐伏二长花岗岩铅同位素组成一致; 而弄屯矿床矿石硫化物 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于二长花岗岩和地层铅同位素组成之间, 且矿石 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值指示矿石铅可能来源于上泥盆统莲花山组碎屑岩与中寒武统黄洞组碎屑岩。录井和大新铅锌矿床显示出异常高的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, 暗示可能还有其他富铀的地质体为成矿提供放射成因铅, 铅同位素特征值(μ 值、 ω 值)揭示矿石硫化物和岩体都具有壳源铅的特征; 从垂向上, 各矿床距罗维隐伏岩体顶界距离增加, 岩浆铅减少, 地层铅增加。综合研究认为, 西大明山多金属矿集区应属于典型的与深部燕山期岩体侵入有关的岩浆热液充填交代型矿床, 成矿物质主要来源于燕山期岩浆和围岩地层。

关键词 地球化学; 铅同位素; 燕山期; 西大明山矿集区; 右江褶皱带东南缘

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

Lead isotope geochemical characteristics of Xidamingshan ore concentration area on the southeastern margin of Youjiang fold belt, and their significance

XIAO ChangHao^{1,2}, LIU Huan³, SHEN YuKe¹, WEI ChangShan¹, LE XingWen⁴, OU DeGong² and ZHANG Liang²

(1 Laboratory of Dynamic Digenesis and Metallogenesis, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4 No.4 Geological Party of Guangxi Zhuang Autonomic Region,

Nanning 530031, Guangxi, China)

^{*} 本文受国家自然科学基金项目(编号:41702095)、中国地质调查项目(编号:DD20160053、DD20160124)和广西找矿突破战略行动方案项目(桂国土资函[2015]480号)联合资助

第一作者简介 肖昌浩,男,1986年生,助理研究员,从事矿床学研究工作。Email: xiaochanghao1986@126.com

^{**} 通讯作者 刘欢,女,1986年生,助理研究员,从事矿床学研究工作。Email: xhhyliuhuan@163.com

收稿日期 2017-07-24; 改回日期 2017-11-20。赵海杰编辑。

Abstract

The Xidamingshan ore concentration area is one of the prospecting breakthrough areas on the southeastern margin of Youjiang fold belt, South China. It consists of the Fenghuangshan large silver deposit, the Luowei middle zinc-tungsten polymetallic deposit, the Nongtun large lead-zinc deposit, and some small ore deposits or ore spots. The Luowei and Nongtun deposits were found in recent years. The stratiform orebodies are hosted in the Cambrian clastic rocks; vein-type orebodies are hosted in the fracture zones and the boundary between the Cambrian and Devonian. In this paper, the Pb isotope compositions of the two types of ores, the Yanshanian monzonitic granite, and strata were studied to investigate the genetic relationship between the two types of ores. It is shown that the sulfides of the Luowei and the Nongtun deposit have the uniform lead isotope compositions, with the data $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.1320\sim18.5980$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.5920\sim15.7988$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.4041\sim39.0461$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.3240\sim18.5060$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.7321\sim15.9140$, and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.6511\sim39.2311$, respectively. The lead isotopic compositions of the Luowei deposit are close to those of the concealed monzonitic granite, but the $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of the Nongtun deposit are higher than those of the Luowei deposit, the lead isotopic compositions of the Nongtun deposit are between that of the monzonitic granite and that of country rocks, and the $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of ores in the Nongtun deposit suggest that the lead was probably mainly derived from the Lower Devonian Lianhuashan Formation and the Middle Cambrian Huangdongkou Formation clastic rocks. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of ores in the Lujing and the Daxin lead-zinc deposit are obviously high, which reveal that there may be another U-bearing geological body which provided radiogenic lead for ores. The values of μ and ω reveal that the lead in ores and the monzonitic granite were crust-derived. In vertical direction, magma-derived lead decreases and the strata-derived lead increases with the distance between the monzonitic granite and ores. The lead isotope results coupled with the evidence of other researches indicate that the Xidamingshan ore concentration area should belong to a magmatic metasomatic-hydrothermal filling deposit related to a Yanshanian concealed monzonitic granite.

Key words: geochemistry, lead isotope, Yanshanian, Xidamingshan ore concentration area, Southeastern margin of Youjiang fold belt

右江褶皱带位于华南板块西南缘,地处几个大的构造单元的交接部位,地质构造复杂,演化历史独特(广西壮族自治区地质矿产局,1985;华仁民等1997;Deng et al.,2014a,2014b)。其西南方向为古特提斯洋的分支洋闭合形成的哀牢山断裂,西北为弥勒-师宗断裂,南东侧为中生代十万大山前陆盆地以及钦防褶皱造山带,北东侧以南丹-宾阳断裂为界(广西壮族自治区地质矿产局,1985;华仁民等,1997)。右江褶皱带以两大成矿系列闻名,即:产于褶皱带周缘深大断裂附近的锡多金属成矿系列和产于褶皱带内部的低温成矿系列(华仁民等1997;陈懋弘等,2012)。已有研究表明,深大断裂附近的锡多金属成矿多与燕山晚期岩浆活动关系密切(毛景文等,2004;2008;王登红等,2004;蔡明海等,2006;Cheng et al.,2008;2016;李水如等,2008;蔺志永等,2008;谭俊等,2008;陈懋弘等,2012;韦昌山等,2015)。

广西西大明山 Pb-Zn-Ag-W 多金属矿集区位于右江褶皱带东南缘,在广西近几年大规模找矿突破工作推动下,新发现了罗维中型层状矽卡岩型锌钨矿床、弄屯大型脉状铅锌矿床等一系列多金属矿床(矿化点)(图1、2a、3a)。层状矿床矿体赋存于寒武系含钙砂岩内,如罗维锌钨矿床(图2);脉状矿床矿体受断裂破碎带控制明显,多赋存于寒武系内的EW向和NE向断裂破碎带及其派生的次级断裂裂隙中,如弄屯铅锌矿床、长屯铅锌矿床、凤凰山银矿床、绿井铅锌矿床等(图1,图2)。对于西大明山矿集区内矿床成因争议较大。主要有以下几种观点:沉积热液改造型(周永章等,2017)、中低温热液(断裂)充填型矿床(陈海等,1997;Tu et al.,2013)、热卤水成矿系列(杨斌等,2007)、与燕山期岩浆有关的热液成矿系统(崔彬等,2000;柴明春等,2015;陆建辉,2015;韦昌山等,2015;张珩清等,2015;肖昌浩等,2018)。

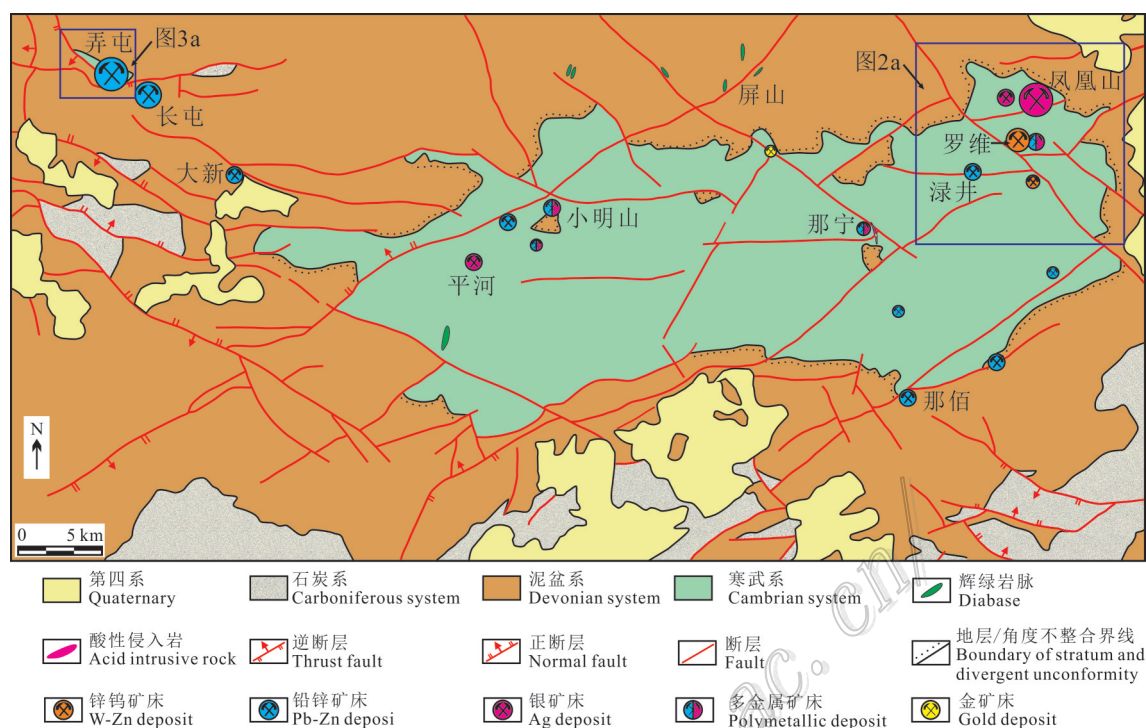


图1 广西西大明山地区地质简图及主要矿床、矿点分布图(据李泽琴等,1998;陆建辉,2015)
Fig. 1 Geological sketch map of Xidamingshan ore concentration area, southeastern margin of Youjiang fold belt, showing the distribution of main ore deposits or spots (after Li et al., 1998; Lu, 2015)

西大明山多金属矿集区内发育层状和脉状2种不同类型矿床,是探讨右江褶皱带内层状和脉状矿床成因联系的天然实验室。本文对罗维层状锌钨矿床和弄屯脉状铅锌矿床金属硫化物Pb同位素组成进行研究,并对比矿集区内其他矿床及隐伏岩体和地层Pb同位素组成特征,探讨其相互之间的成因联系,试图构建一个与深部隐伏岩体有关的岩浆热液成矿系统,为区内找矿突破提供理论支撑。

1 区域地质背景

右江褶皱带位于特提斯构造域与太平洋构造域的结合部分,其构造演化过程复杂以及中生代岩浆-构造-成矿记录完整保存的等特性,是研究区域岩浆成矿的理想场所,因此受到国内外大量学者的青睐(Deng et al., 2014a, b)。该区域自晚古生代以来受古特提斯洋俯冲与闭合、峨眉山幔柱活动、古太平洋板块俯冲及青藏高原隆升等构造复合叠加,存在多期构造-岩浆活动(广西壮族自治区地质矿产局,1985)。区

域内大断裂主要有北西向的南丹-宾阳断裂、右江断裂、富宁-凭祥断裂及北东向下雷-灵马断裂、凭祥-南宁断裂、钦州断裂。褶皱带内主要地层为上泥盆统至下三叠统碳酸盐岩和中三叠统浊流沉积岩(乔龙,2016),褶皱带南缘出露呈东西向展布的寒武系碎屑岩。岩浆-火山活动强烈,加里东期主要分布于褶皱带南缘。印支期主要分布于褶皱带内及其西侧。燕山期岩浆主要分布于丹池-宾阳断裂带上,少量分布于褶皱带内(陈懋弘等,2012;肖昌浩等,2018)。目前较为一致的认识即印支期至燕山期,受古特提斯洋演化影响,成岩成矿是古特提斯洋闭合、碰撞的反映(Deng et al., 2014a; 2014b; Liu et al., 2017)。进入燕山早期,受太平洋板块俯冲影响,至燕山晚期开始,中国东部经历大规模地壳岩石圈伸展减薄,发生大规模成岩成矿作用(Lapierre et al., 1997; 毛景文等, 2004; 2011; 周永章等, 2015)。广西西大明山多金属矿集区位于右江褶皱带东南缘西大明山背斜内(图1),经历了上述构造岩浆活动。

西大明山矿集区整体呈一核部为寒武系、两翼为泥盆系的短轴复式背斜(图1)。地层主要为一套

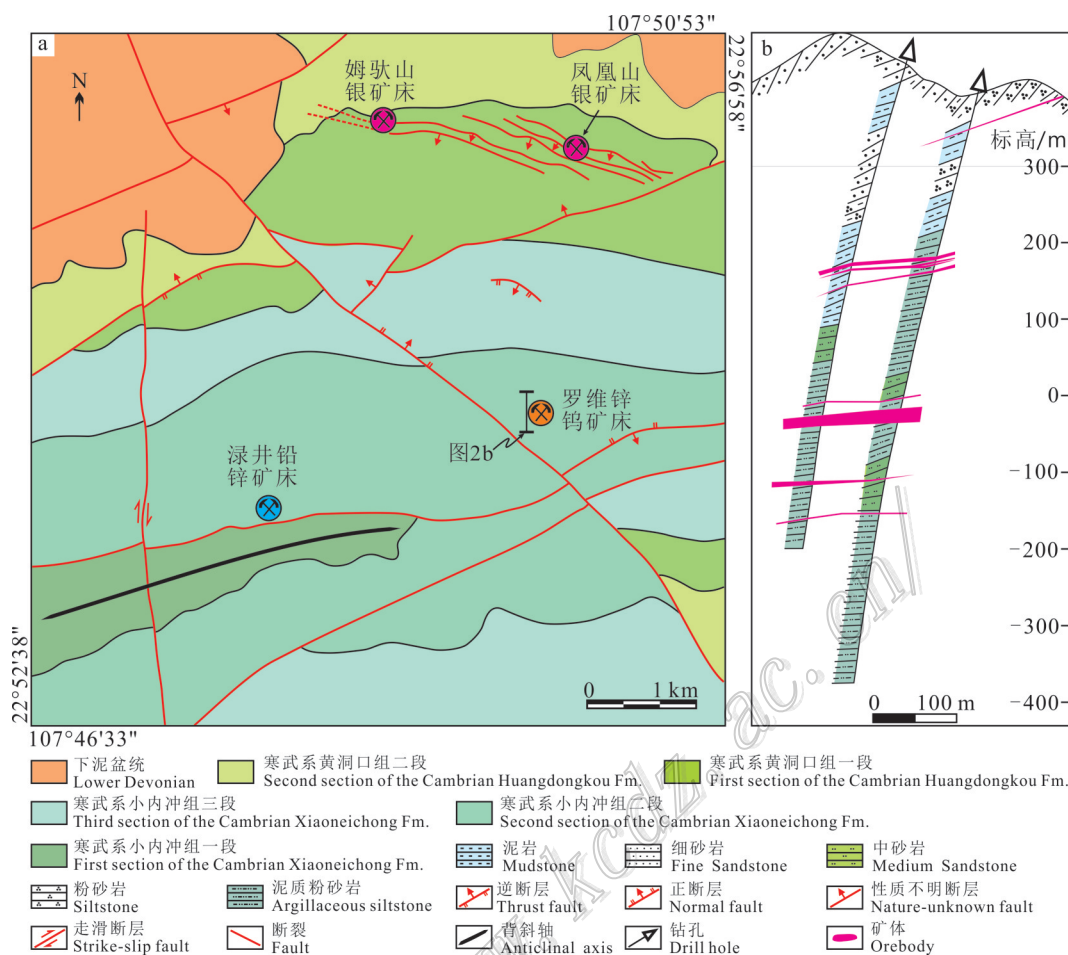


图2 西大明山矿集区罗维矿床地质图(a, 据张珩清等, 2015)和罗维矿区400勘探线剖面图(b, 据广西壮族自治区第四地质队, 2011)

Fig. 2 Geological map of the Luowei deposit, Xidamingshan ore concentration area (a, after Zhang et al., 2015) and drill section (line 400) in the Luowei ore deposit (b, after No. 4 Geological Party of Guangxi Zhuang Autonomic Region, 2011)

浅变质的半深海相砂泥岩复理石建造。西大明山复式背斜由一系列次级的、呈紧密排列的线状背、向斜组成, 总体构造线呈近EW向, 枢纽向东、西两端倾伏。区内断裂构造以EW向和NNE向为主, 并与NE向、SN向和NW向断裂交织, 形成错综复杂的断裂网络系统。区内地表仅有少量零星分布的酸性岩脉及少量岩沿NE向和NW向断裂侵入的辉绿岩脉(图1)。已有资料显示地表那宁山顶石英斑岩脉成岩时代为93 Ma左右(韦昌山等, 2015; 肖昌浩等, 2018)。

研究区矿产资源较丰富(图1), 以内生矿产为主, 目前已探明大型矿床两处(凤凰山银矿、弄屯铅锌矿), 中型矿床两处(长屯铅锌矿、罗维钨锌矿), 小型矿床多处(淥井铅锌矿、平何银矿、那佰铅锌矿、小明山铅锌矿等)。

2 矿床地质特征

2.1 罗维钨锌矿床

罗维钨锌矿床位于西大明山矿集区北东部, 矿区出露地层主要为寒武系小内冲组长石石英杂砂岩、长石石英砂岩、细砂岩、泥质粉砂岩夹泥岩和砂岩与泥岩互层、黄洞口组砂泥岩组成的复理石建造和泥盆系莲花山组细粒石英砂岩。其中小内冲组为主要的赋矿层位。矿区内断裂构造发育, 主要为EW向、NE向、NW向3组, 其中NW向展布的罗维断层与成矿关系密切(图2)。矿区未见岩浆岩出露, 仅在矿区西侧那宁山顶出露少量石英斑岩脉及在屏山乡出露少量辉绿岩脉(图1)。2013年底, 广西壮族自治区第四地质队在罗维矿区有2个钻孔揭露了隐伏

岩体的存在,岩性为二长花岗岩和黑云母花岗岩,其成岩时代为93 Ma左右(韦昌山等,2015;肖昌浩等,2018)。

矿体总体受层位和断裂控制,走向近EW,倾角较小,呈层状、脉状产出。总体而言下部为层状矽卡岩型矿体,上部为石英脉型矿体(图2b)。层状矽卡岩矿体并非发育在岩体与地层接触带,而是分布在远离隐伏岩体400~550 m的寒武系小内冲组钙质粉砂岩内(张珩倩等,2015)。矿石主要呈块状、浸染状和脉状构造。矿石矿物主要为白钨矿、闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿及少量方铅矿、黄铜矿和辉钼矿。主要脉石矿物为石榴子石、透辉石、绿帘石、绿泥石等。矿石结构自形粒状结构、交代状结构等。围岩蚀变强烈,主要为矽卡岩化、硅化、绿泥石化和碳酸盐化,局部可见云英岩化,其中矽卡岩化与矿化关系最密切。

2.2 弄屯铅锌矿床

弄屯铅锌矿床位于西大明山矿集区西北缘(图1b),矿区出露地层主要为中上寒武统边溪组中厚层状不等粒砂岩夹少量泥岩和下泥盆统莲花山组细粒石英砂岩、那高岭组砂质泥岩、郁江组中薄层细砂岩和粉砂岩和中泥盆统东岗岭组灰岩夹钙质白云岩(陆建辉,2014)。矿区主要构造为近EW古雾岭背斜,其核部为边溪组,两翼为泥盆系。背斜被近EW向和NW向断裂切割。区内断裂主要有EW向、NE向、NW向和SN向4组。其中EW向和NE向断裂是主要的控矿断裂(图3)。矿区暂无岩浆出露。

钻孔资料显示,目前发现的矿体主要产于其中EW向和NE向断裂内,矿体产状严格受断裂破碎带控制,呈似层状、脉状产出,沿走向和倾向具有分支复合现象(图3b)(陆建辉,2014;柴明春等,2015)。围岩蚀变主要为硅化、褐铁矿化、绿泥石化、绢云母化和碳酸盐化。矿石构造主要呈脉状、网脉状、角砾状、浸染状等,矿石结构以自形-半自形粒状结构、交代结构等为主。金属矿物主要有闪锌矿、黄铁矿、方铅矿及少量黄铜矿等,脉石矿物主要有石英、方解石等。

3 铅同位素地球化学特征研究

3.1 样品采集及分析方法

本次研究共选取矿石硫化物样品15件(表1)。其中罗维矿床选取层状矿体中1件闪锌矿和3件黄

铁矿,弄屯从脉状矿体选取了6件闪锌矿、2件方铅矿和3件黄铁矿。

将矿石样品破碎后过筛,在双目镜下挑选出单矿物,单矿物纯度>98%。硫化物首先通过0.15 mol/L HCL和高纯水清晰,然后在玛瑙研钵中研磨到60~80目。接着称取适量样品后,用HBr和HCL对Pb进行分离,具体流程见李磊等(2013)。硫化物铅同位素分析由中国地质科学院地质研究所同位素实验室检测完成,铅同位素比值用多接收器等离子体质谱法(MC-ICPMS)测定,所用仪器为英国Nu Plasma HR,仪器的质量分馏以Tl同位素外标校正(何学贤等,2005),样品中Tl的加入量约为铅含量的1/2。用标样NBS 981控制质谱计中的质量分馏,国际标样NBS 981的测定值为 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=2.16736\pm 0.00066$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.91488\pm 0.00028$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.9386\pm 0.0131$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.4968\pm 0.0107$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.7119\pm 0.0331(\pm 2\sigma)$ 。

3.2 结果

分析结果及按H-H单阶段演化模式(Faure, 1986)计算的模式年龄、 μ 、 ω 和Th/U值见表1(表中同时收集了西大明山矿集区现有的前人测试结果,后文一并讨论)。本次测试结果显示,罗维和弄屯铅锌矿床矿石硫化物的铅同位素的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别介于18.4153~18.6060、15.7594~15.8691和38.8190~39.1100之间,平均值分别为18.4435、15.8140和38.9421。罗维矿床闪锌矿Pb同位素的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的平均值分别为18.4623、15.7988和38.9970;黄铁矿Pb同位素的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的平均值分别为18.4461、15.7733和38.8898。弄屯矿床闪锌矿Pb同位素的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的平均值分别为18.4527、15.8336和38.9826;方铅矿Pb同位素的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的平均值分别为18.4263、15.8171和38.9111;黄铁矿Pb同位素的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的平均值分别为18.4276、15.8184和38.9159。由此可见,罗维矿床和弄屯矿床中各硫化物之间Pb同位素组成较为一致,两个矿床硫化物Pb同位素组成变化较小。

4 讨论

4.1 成矿物质来源

矿石铅与岩石铅的深入研究表明,钍铅的变化

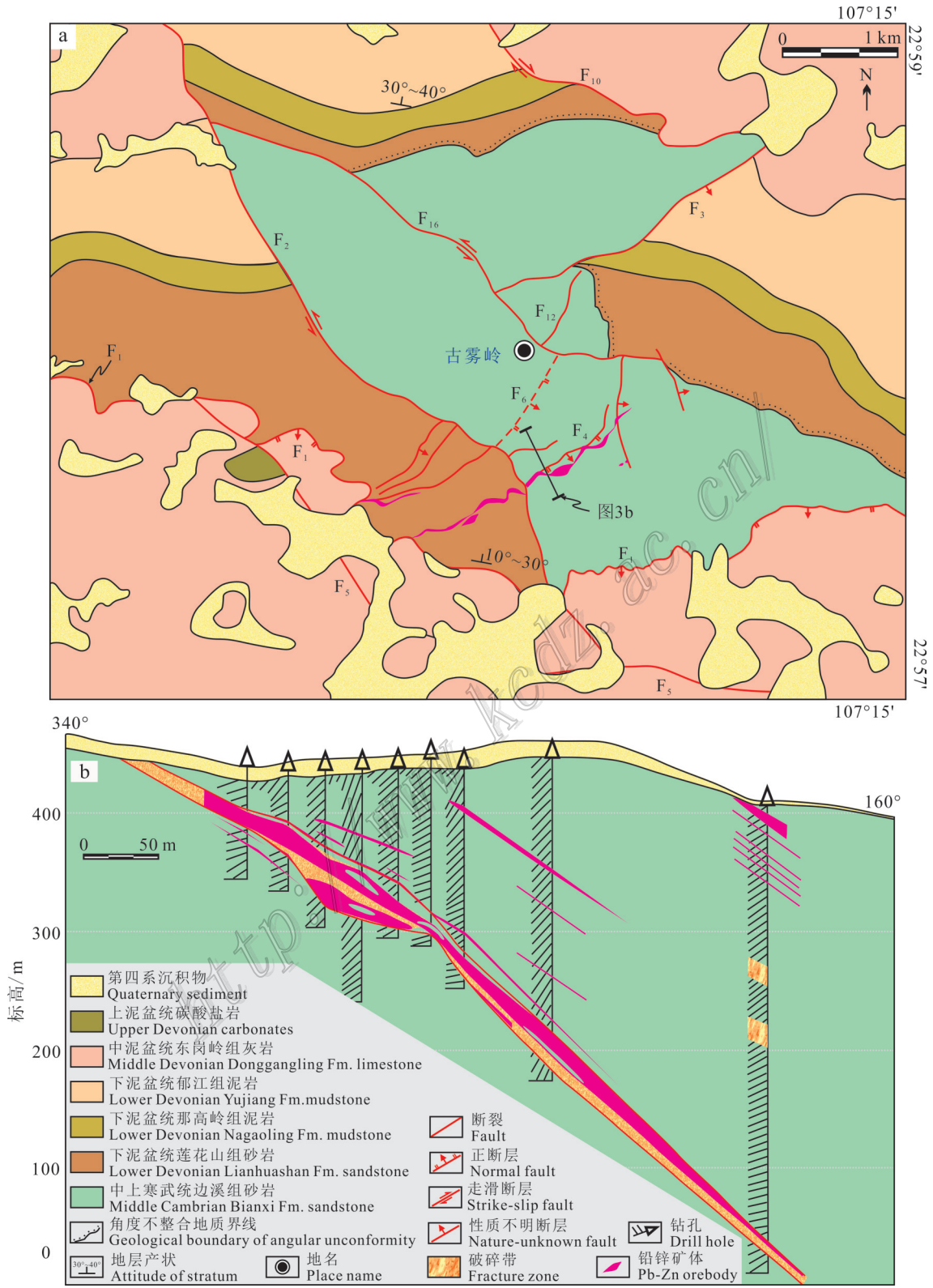


图3 西大明山矿集区弄屯矿床地质图(a,据柴明春等,2015)和罗屯矿区255勘探线剖面图(b,据广西壮族自治区第四地质队,2015)

Fig. 3 Geological map of the Nongtun Pb-Zn ore deposit, Xidamingshan ore concentration area (a, after Chai et al., 2015) and drill section (line 255) in the Nongtun ore deposit (b, after No. 4 Geological Party of Guangxi Zhuang Autonomic Region, 2015)

表 1 西大明山矿集区主要矿床矿石硫化物、二长花岗岩、地层铅同位素组成

Table 1 Lead isotope composition of the sulfides from different ore deposits, monzonitic granite and strata in the Xidamingshan ore concentration area, southeastern margin of Youjiang fold belt, South China

矿床/岩体/地层	样品号	测试对象	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	ω	Th/U	t/Ma	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	资料来源
罗维锌钨多金属矿床	LW01	闪锌矿	18.4623	15.7988	38.9970	9.85	40.46	3.98	368	70.79	30.7	44.79	本文
	LW02	黄铁矿	18.4559	15.7890	38.9372	9.83	40.15	3.95	362	70.42	30.06	43.18	
	LW03	黄铁矿	18.4524	15.7715	38.9132	9.8	39.89	3.94	344	70.22	28.92	42.54	
	LW04	黄铁矿	18.4301	15.7594	38.8190	9.78	39.51	3.91	345	68.93	28.13	40.02	
	ZK41502-2K-a	黄铜矿	18.5450	15.7051	38.8511	9.66	38.46	3.85	200	75.59	24.58	40.88	冯佐海等,2015
	ZK41502-2K-b	磁黄铁矿	18.5160	15.6700	38.8121	9.59	38.12	3.85	177	73.91	22.3	39.83	
	ZK41502-1H	磁黄铁矿	18.2710	15.5920	38.4491	9.46	37.26	3.81	258	59.7	17.21	30.11	
	ZK40004-23	磁黄铁矿	18.4940	15.6730	38.8061	9.6	38.25	3.86	197	72.63	22.49	39.67	
	ZK40004-32	磁黄铁矿	18.5440	15.6930	38.9271	9.63	38.66	3.89	186	75.53	23.8	42.91	
	ZK40004-39	磁黄铁矿	18.5370	15.7170	38.9071	9.68	38.85	3.88	220	75.13	25.36	42.38	
弄屯铅锌矿床	ZK31901-15	磁黄铁矿	18.1320	15.6050	38.4041	9.51	37.99	3.87	374	51.64	18.06	28.9	本文
	ZK41502-2H	闪锌矿	18.5980	15.7661	39.0461	9.77	39.55	3.92	236	78.66	28.56	46.1	
	NT01	闪锌矿	18.4751	15.8308	39.0142	9.91	40.78	3.98	396	71.54	32.79	45.25	
	NT02	闪锌矿	18.4718	15.8489	39.0006	9.95	40.92	3.98	419	71.35	33.97	44.88	
	NT03	闪锌矿	18.4176	15.8179	38.9204	9.90	40.59	3.97	421	68.20	31.94	42.73	
	NT04	闪锌矿	18.4302	15.8232	38.9332	9.90	40.62	3.97	418	68.93	32.29	43.08	
	NT05	闪锌矿	18.5060	15.8691	39.1100	9.99	41.38	4.01	418	73.33	35.28	47.81	冯佐海等,2015
	NT06	闪锌矿	18.4153	15.8114	38.9169	9.88	40.53	3.97	415	68.07	31.52	42.64	
	ZK25501-3-1	闪锌矿	18.4670	15.9140	39.2311	10.08	42.61	4.09	494	71.07	38.22	51.06	
	ZK25505-3	闪锌矿	18.3950	15.8220	38.9221	9.91	40.78	3.98	441	66.89	32.21	42.78	
	ZK25507-8	闪锌矿	18.4080	15.8420	38.9961	9.95	41.22	4.01	454	67.65	33.52	44.76	
	ZK0802-2	闪锌矿	18.3570	15.7460	38.6951	9.76	39.28	3.89	381	64.69	27.26	36.7	本文
	ZK23203-12	闪锌矿	18.3240	15.7321	38.6511	9.74	39.15	3.89	387	62.77	26.34	35.52	
	ZK25502-1-b	闪锌矿	18.3490	15.7580	38.7301	9.78	39.59	3.92	400	64.22	28.04	37.63	
	NT07	方铅矿	18.4290	15.8179	38.9140	9.89	40.5	3.96	413	68.86	31.94	42.56	
	NT08	方铅矿	18.4235	15.8163	38.9082	9.89	40.49	3.96	415	68.54	31.84	42.41	
	ZK25502-1-c	方铅矿	18.3530	15.7690	38.7671	9.81	39.84	3.93	410	64.46	28.76	38.63	冯佐海等,2015
	NT09	黄铁矿	18.4242	15.8171	38.9086	9.89	40.49	3.96	415	68.58	31.89	42.42	
	NT10	黄铁矿	18.4295	15.8191	38.9175	9.9	40.52	3.96	414	68.89	32.02	42.66	
	NT11	黄铁矿	18.4291	15.8189	38.9216	9.9	40.54	3.96	414	68.87	32.01	42.77	
	ZK25504-1	黄铁矿	18.4220	15.8280	38.9521	9.91	40.8	3.98	429	68.46	32.61	43.58	
凤凰山银矿床	Pb-23	闪锌矿	18.9420	16.0560	39.8170	10.31	43.63	4.1	334	98.62	47.48	66.76	李泽琴等,1998
	Pb-7	方铅矿	18.9040	15.9490	39.7910	10.1	42.66	4.09	239	96.41	40.5	66.06	
	Pb-8	方铅矿	18.6250	15.8990	39.3480	10.03	41.98	4.05	371	80.23	37.24	54.19	
	Pb-9	方铅矿	18.5320	15.7930	39.0190	9.83	40.08	3.95	313	74.84	30.32	45.38	
	Pb-3	黄铁矿	18.7790	15.8180	39.4120	9.85	40.52	3.98	171	89.16	31.95	55.9	
	Pb-4	黄铁矿	18.6970	15.7850	39.2110	9.8	39.84	3.93	189	84.41	29.8	50.52	
	Pb-5	黄铁矿	18.7760	15.8160	39.3710	9.85	40.35	3.96	170	88.99	31.82	54.81	
	Pb-6	黄铁矿	18.7660	15.8040	39.3460	9.83	40.19	3.96	163	88.41	31.04	54.14	
	Pb-1	硫锰矿	18.7710	15.8140	39.3690	9.85	40.35	3.96	172	88.7	31.69	54.75	
	Pb-2	硫锰矿	18.7130	15.7560	39.1720	9.74	39.31	3.91	142	85.33	27.91	49.47	
大新铅锌矿床	Pb-10	石英	18.7490	15.8160	39.3440	9.85	40.39	3.97	189	87.42	31.82	54.08	李泽琴等,1998
	Pb-22	闪锌矿	18.7250	16.1570	39.6320	10.54	45.24	4.15	582	86.03	54.07	61.8	

续表1
Continued Table 1

矿床/岩体/地层	样品号	测试对象	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	ω	Th/U	t/Ma	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	资料来源
涿井铅锌矿床	Pb-18	闪锌矿	18.8120	16.1340	39.7150	10.48	44.8	4.14	503	91.08	52.57	64.02	李泽琴等, 1998
	Pb-19	方铅矿	18.5280	15.9090	39.1480	10.06	41.81	4.02	448	74.61	37.89	48.83	
罗维二长花岗岩体	ZK40004-2	长石	18.5370	15.7130	38.9451	9.67	38.97	3.9		75.13	25.1	43.4	冯佐海等, 2015
	ZK40004-4	长石	18.5270	15.6880	38.8730	9.62	38.48	3.87		74.55	23.47	41.47	
	ZK31901-3	长石	18.4540	15.6580	38.7930	9.57	38.28	3.87		70.31	21.51	39.32	
	ZK31901-4	长石	18.4980	15.6610	38.8131	9.57	38.14	3.86		72.87	21.71	39.86	
地层	D_1l	灰岩	18.6390	15.8210	39.1480	9.87	40.27	3.95		95.18	32.95	56.8	李泽琴等, 1998
		砂岩	18.5930	15.8560	39.0790	9.95	40.6	3.95		98.39	35.6	58.2	
	C_{1x}	泥岩	19.6390	15.8600	40.5750	9.86	40.65	3.99		131.6	34.32	82.85	
		砂岩	19.3370	15.8340	40.3160	9.83	41.07	4.04		114.2	32.63	75.94	
		泥岩	18.9040	15.8070	39.4360	9.82	39.8	3.92		94.55	31.14	55.49	
		含泥粉砂岩	18.9530	15.8270	39.5370	9.85	40.12	3.94		96.61	32.4	57.75	
		泥岩	19.0530	15.8280	39.7760	9.85	40.51	3.98		97.84	32.24	61.52	
		泥岩	18.8620	15.8090	39.3310	9.83	39.63	3.9		94.62	31.4	54.1	
	C_2h	灰色砂岩	18.7190	15.7860	39.2430	9.8	39.86	3.94		92.04	30.21	54.98	
		中细粒砂岩	18.7130	15.7890	39.2590	9.8	39.99	3.95		92.31	30.44	55.76	
		泥岩	18.6860	15.8330	39.2890	9.89	40.7	3.98		96.44	33.64	59.77	

以及钍铅与铀铅同位素组成的相互关系对于地质过程与物质来源能提供更丰富的信息。矿集区内矿石硫化物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围很窄,均不超过0.05%,按单阶段演化模式计算的 μ 值也较为一致,为9.46~10.54; $\omega=37.26\sim45.24$,平均值为40.44。罗维矿床矿石样品 μ 值为9.46~9.85,平均值为9.68; $\omega=37.26\sim40.46$,平均值为38.93。与罗维隐伏岩体 μ 值(9.57~9.67,平均值=9.61)和 ω 值(38.14~38.97,平均值为38.49)基本一致,且与围岩铅差别较大(μ 平均值=9.84、 ω 平均值=40.26);弄屯矿床矿石样品 μ 值为9.74~10.08,平均值为9.89; $\omega=39.15\sim42.61$,平均值为40.56;其 μ 值和 ω 值高于罗维岩体,略低于地层铅。同时,相比较而言硫化物的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值较大,表现出钍放射成因 ^{208}Pb 相对富集且变化范围较大,计算的 ω 值介于37.26~45.24,明显高于平均地壳铅的 ω 值(36.84);矿石硫化物Th/U比值介于3.81~4.47,高于地幔值3.45,与地壳的Th/U比值(约为4)相当(Stacey et al., 1975)。表明,该矿床铅等成矿物质源区显示铅源的物质成熟度较高的地壳或沉积岩的特征。从图4a可见仅罗维岩体和罗维矿床磁黄铁矿样品投点落入上地壳与造山带演化线靠近上地壳一侧。Zartman等(1981)的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位

素模式和构造环境图解(图4)中,矿石、岩体及地层大部分投点均落入上地壳演化线之上,仅少量点落入上地壳与造山带演化线靠近上地壳一侧(图4)。综上,表明西大明山矿集区罗维层状矿体与罗维岩体具有一致的铅来源,即以上地壳铅为主,可能混有少量幔源铅;弄屯及其他脉状矿床的铅来源以上地壳为主。

为进一步确定西大明山矿集区罗维和弄屯矿床矿石的铅源区的构造环境,查明成矿物质来自何种构造单元,本次对研究区内不同类型矿体矿石、赋矿围岩及深部隐伏岩浆岩等有关地质体的铅同位素共同投图,发现:

(1) 从 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投图(图4)上看,罗维矿床、弄屯矿床矿石硫化物铅及罗维岩体铅均呈线性分布,且斜率一致,表明两矿床具有铅同位素亲缘关系。相比较而言,罗维矿床和罗维岩体铅同位素分布范围相对较小,而弄屯矿床铅同位素分布范围呈线形拉长状,表明罗维矿床铅与罗维岩体关系密切、弄屯矿床铅同位素组成具有不同来源混合铅的特征。罗维矿床黄铜矿和磁黄铁矿铅同位素与岩浆铅同位素投点完全重合,表明罗维矿床砂卡岩中黄铜矿和磁黄铁矿的铅来源与岩浆。两件闪锌矿中,样品ZK41502-2H投点与黄铜矿和磁黄铁矿及罗维岩体铅同位素投点呈线性关

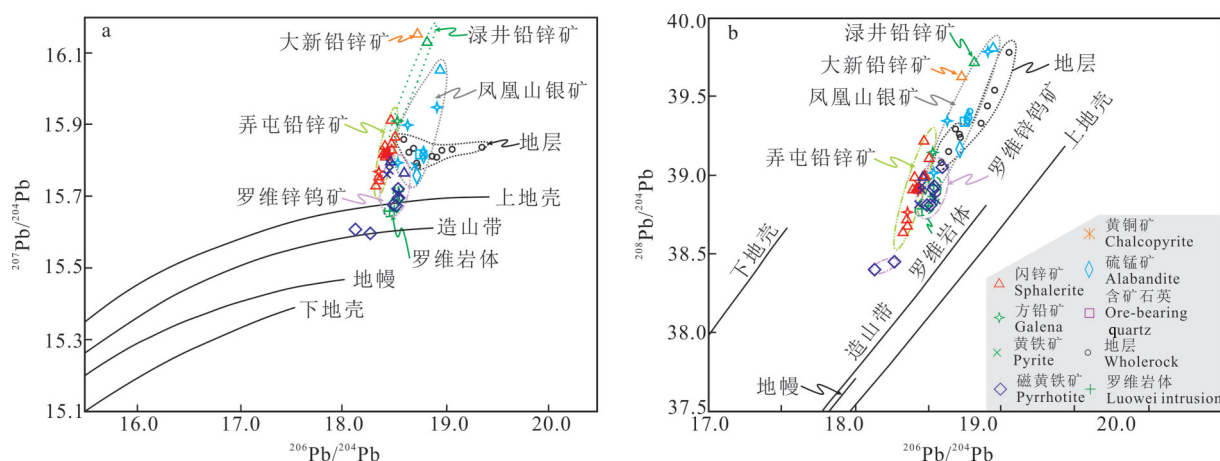


图4 广西西大明山地区不同矿床硫化物和其他地质体铅同位素组成图解(底图据 Zartman et al., 1981)

Fig. 4 Lead isotopes of sulfides from different ore deposits and other geological bodies of Xidamingshan ore concentration area, southeastern margin of Youjiang fold belt (base map after Zartman et al., 1981)

系,表明该闪锌矿与罗维岩体可能存在亲缘关系。另外一件闪锌矿(LW01)与3件黄铁矿铅同位素呈线性关系,且与弄屯铅锌矿床中硫化物铅同位素投点落在一条斜率线上,可能暗示罗维矿床闪锌矿-黄铁矿与弄屯铅锌矿床硫化物铅具有成因联系。罗维矿床矿相学显示磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿呈共生关系(图6);尤其图6b可明显可见磁黄铁矿与闪锌矿呈斑杂状共生关系。因此,推测罗维矿床矿石硫化物铅主要来自深部罗维岩体,但有部分放射成因铅的混合。弄屯矿床矿石硫化物相对富 ^{207}Pb ,甚至部分矿石 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 明显高于地层铅,可能是大气降水沿着断层裂隙向下淋滤渗透过程中,放射成因铅优先进入成矿热液的结果,因此,弄屯矿床矿石铅可能来自富矿围岩。通过对地层铅按时代分类进行 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投点,显示上泥盆统莲花山组碎屑岩与中寒武统黄洞口组碎屑岩5件样品呈线性关系,表明该5件样品可能具有放射成因铅的积累,若对该5件样品全岩铅进行校正后可能会与罗维矿床闪锌矿及弄屯矿床部分闪锌矿重叠,尤其上泥盆统莲花山组地层铅会与两矿床矿石铅投点重合。因此,推测上泥盆统莲花山组碎屑岩与中寒武统黄洞口组可能为两个矿床的闪锌矿提供铅来源。寒武系小内冲组以泥质岩石为主,地层岩石本身渗透率低,成矿热液难于在其中渗透、运移及萃取矿质。而以砂岩为主的寒武系黄洞口组 and 上泥盆统莲花山组岩石具有较高的渗透率,有利于热液获取其中的矿质。赋矿围岩及隐伏罗维岩体微量元

素含量也证实了该结论。从表2可见,西大明山地区寒武系—泥盆系及罗维岩体的 $w(\text{Pb})$ 为 $10.49 \times 10^{-6} \sim 55.76 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Zn})$ 为 $15.9 \times 10^{-6} \sim 106.88 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Ag})$ 为 $0.07 \times 10^{-6} \sim 0.50 \times 10^{-6}$,Pb、Zn含量是中国上地壳丰度值的1~3倍,Ag含量是地壳丰度值的1~10倍;总体而言,矿石硫化物和岩体均具有高的 μ 值,表明其铅来源于U、Th相对富集的源区,整体具有壳源铅的特征(Zartman et al., 1981;吴开兴等,2002);

(2) 在矿石铅同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解中(图

表2 西大明山矿集区赋矿地层及罗维岩体微量元素含量($w(\text{B})/10^{-6}$)

Table 2 Trace elements of the whole-rocks and Luowei granites ($w(\text{B})/10^{-6}$) in the Xidamingshan ore concentration area

层位/岩性	样品数量	Pb	Zn	Ag	资料来源
D ₂ d	54	10.49	56.72	0.50	广西壮族 自治区第 四地质队, 1996
D ₁ y	26	19.89	71.98	0.33	
D ₁ n	18	25.23	80.27	0.19	
D ₁ l	34	21.09	56.09	0.18	
C ₂ x	38	37.32	79.26	0.25	
C ₂ h	26	55.76	106.88	0.26	韦昌山等, 2015
ZK001	1	15.7	63.9	0.43	
ZK003A	1	31.7	173	0.43	
ZK003B	1	25.4	79	0.07	
ZK004	1	15.9	36	0.33	
ZK015	1	20.8	56.2	0.31	黎彤,1999
中国上地壳 元素丰度		19	51	0.054	

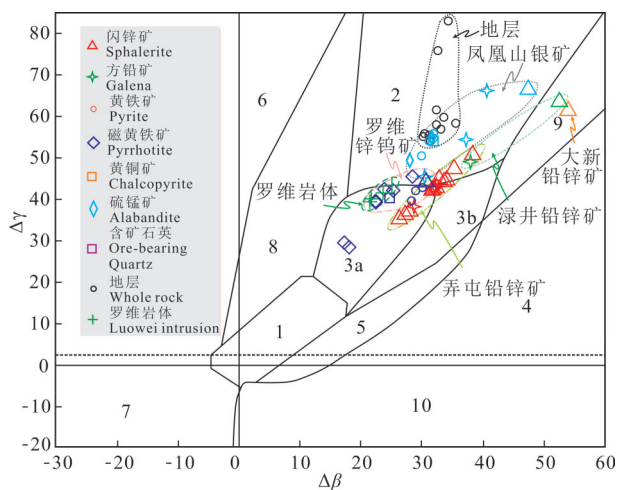


图5 广西西大明山地区不同矿床硫化物和其他地质体的铅同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解(底图据朱炳泉, 1998)

1—地幔铅源; 2—上地壳铅源; 3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a. 岩浆作用; 3b. 沉积作用); 4—化学沉积铅; 5—海底热水作用铅; 6—中深变质作用铅; 7—深变质下地壳铅; 8—造山带铅; 9—古老页岩上地壳铅; 10—退变质铅

Fig. 5 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ genetic classification diagram showing lead isotopic distribution of sulfides from different ore deposits and other geological bodies in the Xidamingshan ore concentration area, southeastern margin of Youjiang fold belt (base map after Zhu et al., 1998)

1—Mantle lead; 2—Supracrustal lead; 3—Mixed supracrustal and mantle lead (3a. Magmatism; 3b. Sedimentation); 4—Chemical deposit lead; 5—Submarine hydrothermal lead; 6—Mid-deep metamorphic lead; 7—Deep metamorphic lower crust lead; 8—Orogenic belt lead; 9—Supracrustal ancient shale lead; 10—Retrograde metamorphic lead

5), 除地层铅投点外所有投点具有良好的线性分布。罗维层状矿体与罗维岩体投点极为一致, 大部分点落入壳幔混合的俯冲带岩浆作用成因铅源区与上地壳铅源区结合处; 弄屯脉状矿床铅投点落入壳幔混合的俯冲带岩浆作用成因铅、上地壳铅与沉积作用3个源区结合处; 其他脉状矿床铅投点大部分落入上地壳源铅区。

根据西大明山地区1:5万布格重力异常图显示, 西大明山矿集区罗维岩体与小明山岩体在深部大约13 km处开始相连(杨富强等, 2017)。三维反演的深度显示, 已有钻孔揭露显示, 罗维岩体距地表顶界约为580 m; 凤凰山地区深部隐伏小岩体顶界距地表约600 m, 而那宁深部隐伏小岩体顶界距地表约800 m。表明深部隐伏岩体自西向东, 埋藏深度逐渐变浅。罗维矿区层状矽卡岩矿体距罗维岩体为400~

550 m, 而凤凰山银矿矿区暂未见岩体出露, 根据重力反演解译显示凤凰山银矿据深部岩体至少600 m。图4a可见, 凤凰山银矿矿石硫化物和含矿石英脉 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投点横跨了地层铅范围, 个别少量点与罗维矿床矿石铅区域重合, 表明该矿床铅具有多源性。而远离罗维隐伏岩体的绿井和大新铅锌矿床显示出异常高的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 特征, 表明矿区除泥盆系和寒武系、罗维岩体外, 可能还有其他富U的地质体为成矿提供了放射成因铅或大气降水沿裂隙向下淋滤围岩过程中, 放射成因铅优先进入成矿热液, 导致矿床矿石铅比矿源铅更富集放射成因铅。结合前人流体C、H、O同位素研究, 后者的可能性更大。 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投图(图4b)显示, 罗维矿床矿石铅主要来自罗维岩体, 可能有少量地层铅的加入; 弄屯铅锌矿床矿石铅可能更多的来自泥盆系和寒武系; 而凤凰山银矿床、绿井和大新铅锌矿床矿石铅主要来自泥盆系和寒武系。

4.2 矿床成因

关于右江褶皱带内层控和脉状铅锌多金属矿床的成因争议较多。越来越多证据表明, 西大明山矿集区为一个与燕山期岩浆侵入有关的成矿系统(柴明春等, 2015; 韦昌山等, 2015; 张珩清等, 2015)。区内成岩成矿时代显示, 罗维钨矿床与罗维隐伏岩体形成时代一致, 为晚白垩世(93~95 Ma)(韦昌山等, 2015)。C、H、O同位素组成显示, 罗维层状矿体成矿流体以岩浆流体为主, 后期有大气降水混入; 弄屯脉状矿床以岩浆-大气降水混合流体为主(柴明春等, 2015; 冯佐海等, 2015)。S同位素显示, 罗维矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化较小, 与幔源硫和岩浆熔体硫相近; 弄屯矿床硫同位素组成显示岩浆硫与地层硫的混合特征(冯佐海等, 2015)。此外, 钨矿床、铅矿床、银矿床与侵入岩的空间展布关系也十分规律: 纵向上, 围绕已知石英斑岩和隐伏岩体往外, 主要发育层控矽卡岩型钨矿床和石英脉型钨矿(钼)矿化; 在远离岩体外围的断裂带中发育热液脉型铅锌银矿床(矿化)。水平上, 隐伏岩体至围岩发生黄铁绢英岩化→云英岩化→角闪岩化→矽卡岩化→硅化矿化蚀变。综上所述, 结合本次Pb同位素研究, 西大明山矿集区层状钨矿和脉状铅锌银矿的形成与区内燕山期岩浆的侵入关系密切。矿床的形成可能在燕山期区域伸展过程中, 由于应力释放导致地壳发生部分熔融, 形成上地壳重熔型岩浆沿断裂侵位至浅

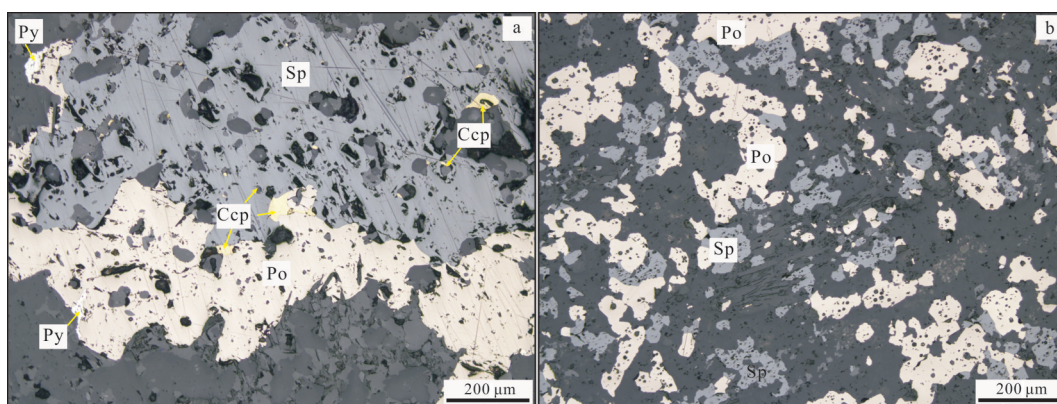


图 6 罗维矿床矽卡岩型矿石金属矿物组合特征

Po—磁黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Sp—闪锌矿; Py—黄铁矿

Fig. 6 Mineral assemblages of skarn ores in the Luowei deposit

Po—Pyrrhotite; Ccp—Chalcocopyrite; Sp—Sphalerite; Py—Pyrite

部形成隐伏岩体、石英斑岩脉等,与岩体有关流体在岩体顶部或沿浅表构造裂隙向上运移至寒武系钙质粉砂岩地层中发生侧向交代,导致岩体局部黄铁绢英岩化、云英岩化和围岩矽卡岩化、角岩化等,形成罗维层状矽卡岩型钨锌矿床。在岩浆热动力驱动下,含矿热液沿构造裂隙发生迁移并活化萃取地层中 Pb、Zn、Ag 等成矿物质,在近地表与下渗的大气降水发生混合,在破碎带中形成热液脉型 Pb-Zn-Ag 矿床,如弄屯 Pb-Zn 矿床、凤凰山 Ag 矿床等(图 7)。

4.3 区域找矿指示意义

目前,越来越多的高精度测年数据表明,右江褶

皱带周缘及其带内广泛出露燕山晚期岩浆活动及与之有关的 Sn-W-Pb-Zn-Ag 等多金属成矿作用(王登红等,2004;蔡明海等,2006;李水如等,2008;蔺志永等,2008;谭俊等,2008;Cheng et al., 2010;陈懋弘等,2012;韦昌山等,2015;Cheng et al., 2016)。目前已发现的中大型矿床多分布于东西两侧的深大断裂附近,如大厂、个旧、白牛厂、都龙等著名锡多金属矿床,成矿作用均与出露地表的岩体有关。叶霖等(2017)通过闪锌矿微量元素地球化学特征,指出都龙锡锌多金属矿床属于燕山晚期花岗岩有关的矽卡岩型多金属矿床,其中层状矽卡岩应为顺层交代的

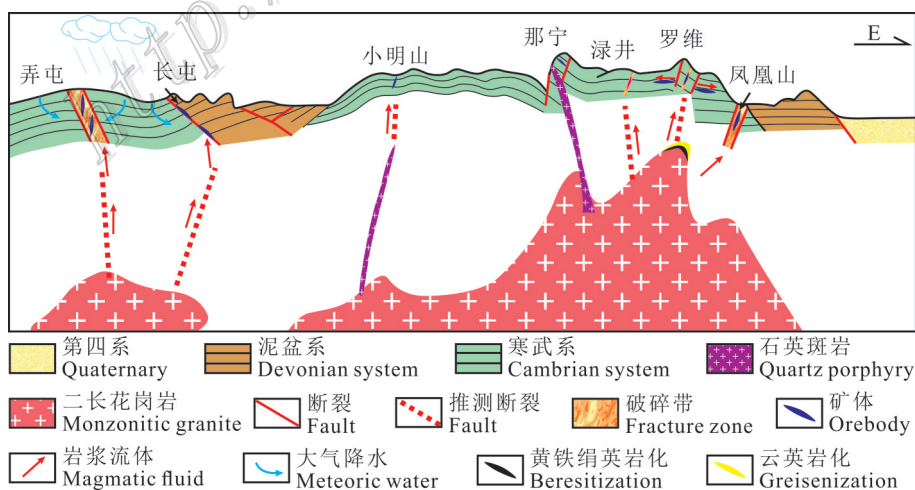


图 7 华南右江褶皱带南缘西大明山地区成矿模式图

Fig. 7 Metallogenic model for the Xidamingshan ore concentration area, southern margin of Youjiang fold belt, South China

结果。且前人通过 S-Pb 同位素及矿山采矿揭露,显示白牛厂多金属矿床层状矿体受顺层断裂控制,来自岩浆的成矿流体沿断裂顺层充填交代形成(李开文等,2013)。韦昌山等(2015)获得拉么矿床层状矿体和脉状矿体中辉钼矿 Re-Os 年龄为 (91.55 ± 0.67) Ma, 研究显示二者成矿时代一致,且与笼箱盖岩体成岩时代 $(91.63 \pm 0.28 \text{ Ma})$ 一致,为晚白垩世的产物。结合坑道调查显示,拉么矿床不同类型矿体应为同一成矿体系的产物,即:成矿流体沿断裂垂向运移,沿层间断裂侧向交代而成。Romer 等(2016)指出东南亚燕山晚期 W-Sn 多金属成矿作用多产于汇聚板块边缘且与燕山期岩浆关系密切。而本次研究的西大明山矿集区是产于近 EW 向西大明山向褶皱带内的与深部燕山晚期隐伏岩体有关的 W-Zn-Pb-Ag 多金属矿集区。其矿体产出样式与上述矿床具有相似的特征,且成岩成矿时代完全一致,均为晚白垩世。另外,航空磁测资料显示,褶皱带内深部可能存在巨大的隐伏岩体;桂西北一带的重磁资料也证实区内存在数条 NW 向隐伏花岗岩带(陈懋弘等,2012)。陈懋弘等(2012)认为右江褶皱带燕山晚期的岩浆活动是相当广泛的,只是褶皱带内部剥蚀较浅,地表出露不多而已。尽管目前沿着褶皱带东,西两侧深大断裂附近发现一批超大型-大型矿床,但是右江褶皱带内深大断裂附近同样具有寻找与深部燕山期隐伏岩体有关的上脉下层的多金属矿产的前景,尤其是右江褶皱带东南缘西大明山矿集区的突破,为深入研究右江褶皱燕山期大规模钨锡多金属的成矿动力学背景及区域找矿评价起到积极的推动作用。

5 结 论

(1) 罗维矿床和弄屯矿床铅同位素组成分别为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.1320\sim 18.5980$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.5920\sim 15.7988$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.4041\sim 39.0461$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.3240\sim 18.5060$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.732\sim 15.9140$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.6511\sim 39.2311$ 。罗维矿床与深部罗维隐伏岩体铅同位素组成基本一致,而弄屯矿床铅同位素组成略高于罗维岩体,但低于矿区围岩,表明罗维矿床层状矿体成矿物质主要来自深部隐伏岩体,而弄屯矿床脉状矿体成矿物质来自深部隐伏岩体和矿区围岩的双重贡献。

(2) 西大明山矿集区应属于典型的与深部燕山

期隐伏岩体有关的层状矽卡岩型-热液脉型 W-Zn-Pb-Ag 多金属成矿系统。在岩浆顶部及周缘寒武系钙质粉砂岩地层中形成层状矽卡岩型钨锌矿床,而在远端构造破碎带中形成热液脉型 Pb-Zn-Ag 矿。

(3) 西大明山矿集区具有寻找深部隐伏岩体有关的云英岩型(蚀变岩型)-层状矽卡岩型-热液脉型成矿系统的潜力。

志 谢 野外工作得到了广西壮族自治区第四地质队岳小军等相关人员的帮助和支持;同位素实验工作得到了中国地质科学院地质研究所相关工作人员的协助;研究生田杰鹏、李扬、苏晓凯等参与了野外工作,在此一并志以特别感谢。

References

- Cai M H, He L Q, Liu G Q, Wu D C and Huang H M. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating of the intrusive rocks in the Dachang tin-polymetallic ore field, Guangxi and their geological significance[J]. Geological Review, 52(3): 409-414(in Chinese with English abstract).
- Chai C M, Fu W, Feng Z H, Xu W Z, Le X W, Li S S, Lu J H, Liu W W and Pang Y Q. 2015. Characteristics of ore-forming fluids of Nongtun Pb-Zn deposit in Xidaming Mountain of Guangxi and their implications for ore genesis[J]. Mineral Deposits, 34(5): 948-964(in Chinese with English abstract).
- Chen H and Deng Q H. 1997. Genesis of Guangxi Fenghuangshan silver deposit[J]. Guangxi Geology, 10(2): 37-44(in Chinese with English abstract).
- Chen M H, Lu G and Li X H. 2012. Muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the quartz porphyry veins from northwest Guangxi, China, and its geological significance[J]. Geological Journal of China Universities, 18(1): 106-116(in Chinese with English abstract).
- Cheng Y B, Mao J W, Xie G Q, Chen M H, Zhao C S, Yang Z X, Zhao H J and Li X Q. 2008. Petrogenesis of the Laochang-Kafang granite in the Gejiu Area, Yunnan Province: Constraints from geochemistry and zircon U-Pb dating[J]. Acta Geological Sinica, 82(11): 1478-1493 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Y B, Mao J W. 2010. Age and geochemistry of granites in Gejiu area, Yunnan Province, SW China: Constraints on their petrogenesis and tectonic setting[J]. Lithos, 120: 258-276.
- Cheng Y B, Mao J W and Liu P. 2016. Geodynamic setting of late Cretaceous Sn-W mineralization in southeastern Yunnan and northeastern Vietnam[J]. Solid Earth Sciences, 1: 79-88.

- Cui B, Zhai Y S, Meng Y F, Huang F F, Shu G and Liu G H. 2000. Au-Ag ore-forming system in Dayaoshan-Xidamingshan, Guangxi, China[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 25(4):352-355+396 (in Chinese with English abstract).
- Deng J, Wang Q F, Li G J and Santosh M. 2014a. Cenozoic tectonomagmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China[J]. *Earth-Science Reviews*, 138:168-299.
- Deng J, Wang Q F, Li G J, Li C S and Wang C M. 2014b. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China[J]. *Gondwana Research*, 26:419-437.
- Faure G. 1986. *Principles of isotope geology*, 2nd Edition[M]. New York: Wiley, 1-609.
- Feng Z H, Fu W, Li S S, Lü Y Z, Bai L A, Jia Z Q, Le X W, Pang Y Q, Long M Z, Yan X D, Xu W Z, Lu J F, Peng Z Y, Liu W W and Lu G. 2015. Metallogenetic regularities and metallogenic prediction of Xidamingshan Ag-Pb-Zn polymetallic deposit, Guangxi Province[R]. Guilin: Guilin University of Technology. 1-267(in Chinese).
- Geological Team No. 4 of Guangxi Zhuang Autonomic Region. 1996. Regional geological survey of Pingshan street (1:50000) [R]. Geological Team No. 4 of Guangxi Zhuang Autonomic Region. 1-208 (in Chinese).
- Geological Team No. 4 of Guangxi Zhuang Autonomic Region. 2011. Mineral survey report of Luowei Ag-Pb-Zn polymetallic deposit in Fusui County, Guangxi Province [R]. Geological Team No. 4 of Guangxi Zhuang Autonomic Region. 1-85(in Chinese).
- Geological Team No. 4 of Guangxi Zhuang Autonomic Region. 2015. Prospecting report of Nongtun Pb-Zn deposit in Daxin County, Guangxi Province[R]. Geological Team No. 4 of Guangxi Zhuang Autonomic Region. 1-262(in Chinese).
- Guangxi Bureau of Geology and Mineral Prospection and Exploitation. 1985. Regional geological survey of Guangxi [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-853 (in Chinese).
- He X X, Zhu X K, Yang C and Tang S H. 2005. High-precision analysis of Pb Isotope ratios using MC-ICP-MS[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(s1):19-22 (in Chinese with English abstract).
- Hua R M, Zhu J C, Zhao Y J, Zhou J P, Wu Y Y and Chen X D. 1997. Preliminary study on metallogenetic series of nonferrous metal deposits in Youjiang fold belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 3(2): 183-191.
- Lapierre H, Jahn B M, Charvet J and Yu Y W. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with the tectonic activity in southeastern china[J]. *Tectonophysics*, 274(4), 321-338.
- Li L, Sun W Z, Meng X F, Yang X F, Zhang D T and Feng J Z. 2013. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of the granitoids of Xiaoshan Mountain area on the southern margin of North China Block and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8): 2635-2652(in Chinese with English abstract).
- Li K W, Zhang Q, Wang D P, Cai Y and Liu Y P. 2013. LA-MC-ICP-MS U-Pb geochronology of Cassiterite from the Bainiuchang polymetallic deposit, Yunnan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 3(2):523-528.
- Li S R, Wang D H, Liang T, Qu W J and Ying L J. 2008. Metallogenic epochs of the Damingshan tungsten deposit in Guangxi and its prospecting potential[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(07): 873-879 (in Chinese with English abstract).
- Li T, Yuan H Y, Wu S X, Cheng X F. 1999. Regional element abundances of the continental crustobodies in China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(2): 101-107 (in Chinese).
- Li Z Q, Dong B L, Lei Y P, Cheng H and Lin D. 1998. Lead isotope geochemistry of turbidite-type silver deposit at Fenghuangshan, Guangxi, China[J]. *Journal of minerals*, 18(4): 473-482 (in Chinese with English abstract).
- Lin Z Y, Wang D H and Li S R. 2008. Re-Os isotopic age of molybdenite from the Wangshe copper-tungsten deposit in Guangxi Province and their implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(11):1565-1571 (in Chinese with English abstract).
- Liu X F, Wang Q F, Zhang Q Z, Yang S J, Zhang Y, Liang Y Y and Qing C. 2017. Transformation from Permian to Quaternary bauxite southwestern South China Block driven by superimposed orogeny: A case study from Sanhe ore deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 90:998-1017.
- Lu J H. 2014. Geological characteristics, metallogenic regularities and prospecting direction of Nongtun Pb-Zn deposit in Daxin of Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 28(4): 487-491(in Chinese with English abstract).
- Lu J H. 2015. Geological characteristics, metallogenic regularity and metallogenic model of Xidamingshan Ag-Pb-Zn-Au-W-Bi deposit[J]. *Mineral Resources and Geology*, 29(5): 560-567(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Li X F, Zhang C Q and Mei Y X. 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1):45-55(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Guo C L, Yuan S D, Cheng Y B and Chen Y C. 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).
- Mao J W, Chen M H, Yuan S D and Guo C L. 2011. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636-658 (in Chinese with English abstract).
- Qiao L. 2016. Tectonic evolution and bauxite metallogenesis in the Youjiang basin and adjacent area[D]. Supervisor: Wang Q F. Beijing. China University of Geoscience. 1-165 (in Chinese).
- Romer R L and Kroner U. 2016. Phanerozoic tin and tungsten mineralization-Tectonic controls on the distribution of enriched protoliths and heat sources for crustal melting[J]. *Gondwana Research*, 31: 60-95.
- Stacey J S and Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 26(2): 207-221.
- Tan J, Wei J H, Li S R, Wang Z M, Fu L B and Zhang K Q. 2008. Geochemical characteristics and tectonic significance of Kunlun A-type granite, Guangxi[J]. *Earth Science*, 33(6):743-754(in Chinese with English abstract).
- Tu W, Du Y S, Wang G W and Lei Y P. 2013. Cordilleran vein type Pb-Zn-polymetallic deposits of the Xidamingshan district, Guangxi, SW China: Fluid inclusion and geochemical studies[J]. *Geology of Ore Deposits*, 55(6):494-502.
- Wang D H, Chen Y C, Chen W, Sang H Q, Li H Q, Lu Y F, Chen K L and Lin Z M. 2004. Dating the Dachang giant tin-polymetallic deposit in Nandan, Guangxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 132-138+146 (in Chinese with English abstract).
- Wei C S, Le X W, Xiao C H, Lu G Q, Hu X Y, Zhang L, Cai J H, Long M Z, Luo W, Huang H, Xiang L, Shen Y K, Li X D, Lu S W, Cai H Q, Lai R R, Xiong Q, Tian J P, Li Y and Su X K. 2015. Methods of structure and alteration survey and establishment of prediction model[R]. Beijing: Institute of Geomechanics, CAGS. 1-264 (in Chinese).
- Wu K X, Hu R Z, Bi X W, Peng J T and Tang Q L. 2002. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: A Review[J]. *Geology-Geochemistry*, 30(3): 73-81 (in Chinese with English abstract).
- Xiao C H, Shen Y K, Wei C S, Su X K, Le X W and Zhang L. 2018. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, Hf isotopic composition and Ce^{4+}/Ce^{3+} characteristics of the Yanshanian acid magma in the Xidamingshan cluster, Southeastern margin of Youjiang fold belt, Guangxi[J]. *Geoscience*, 32(2): 289-304(in Chinese with English abstract).
- Yang B, Peng S L, Li S R and Zhang Q Z. 2007. Metallogenic series and metallogenic belt of nonferrous metals in Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 21(1): 8-11 (in Chinese with English abstract).
- Yang F Q, Lu S H, Li H L, Zhu G Q, Lv C L and Shi W M. 2017. On the spatial form of concealed rock mass in Xidamingshan area of Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 31(6): 1133-1140 (in Chinese with English abstract).
- Ye L, Liu Y P, Zhang Q, Bao T, He F, Wang X J, Wang D P and Lan J B. 2017. Trace and rare earth elements characteristics of sphalerites in Dulong super large Sn-Zn polymetallic ore deposit, Yunnan Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(3): 734-750.
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics the model[J]. *Tectonophysics*, 75:135-162.
- Zaw K, Peters S G, Cromie P, Burrett C and Hou Z Q. 2007. Nature, diversity of deposit types and metallogenic relations of South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 31(1-4): 3-47.
- Zhang H Q, Fu W, Feng Z H, Long M Z, Li Y B, Li W, Yue X J, Zheng J F, Li S S, Li C and Wen S M. 2015. Discovery of strata-bound skarns and mineralization significance in Luowei mining area, Xidamingshan, Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 35(4):712-720 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Y Z, Li X Y, Zheng Y, Shen W J, He J G, Yu P P, Niu J and Zeng C Y. 2017. Geological settings and metallogenesis of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay orogenic juncture belt, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 776-681(in Chinese with English abstract).
- Zhou Y Z, Zheng Y, Zeng C Y and Liang J. 2015. On the understanding of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay metallogenic belt, South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(02):1-6(in Chinese with English abstract).
- Zhu B Q. 1998. Theory and application of isotope systematics in earth sciences [M]. Beijing: Science Press, 300 (in Chinese).

附中文参考文献

- 蔡明海, 何龙清, 刘国庆, 吴德成, 黄惠明. 2006. 广西大厂锡矿田侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. *地质论评*, 52(3): 409-414.
- 柴明春, 付伟, 冯佐海, 徐文忠, 乐兴文, 李赛赛, 陆建辉, 刘武文, 庞运权. 2015. 广西西大明山弄屯铅锌矿床的成矿流体特征及矿床成因指示意义[J]. *矿床地质*, 34(5): 948-964.
- 陈海, 邓琼慧. 1997. 广西凤凰山银矿床成因探讨[J]. *南方国土资源*, 10(2): 37-44.

- 陈懋弘,陆刚,李新华. 2012. 桂西北地区石英斑岩脉白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 高校地质学报,18(1):106-116.
- 崔彬,翟裕生,蒙义峰,黄方方,树皋,刘光华. 2000. 广西大瑶山-西大明山金银成矿系统研究[J]. 地球科学,25(4):352-355+396.
- 冯佐海,付伟,李赛赛,吕玉增,白令安,贾志强,乐兴文,庞运权,龙明周,颜小东,徐文忠,陆建辉,彭志勇,刘武文,陆刚. 2015. 广西西大明山银铅锌多金属矿成矿规律与成矿预测[R]. 1-267.
- 广西壮族自治区地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社. 1-853.
- 广西壮族自治区第四地质队. 1996. 1:5万屏山街幅区调报告[R]. 广西壮族自治区第四地质队. 1-208.
- 广西壮族自治区第四地质队. 2011. 广西扶绥县罗维矿区银铅锌多金属矿普查报告[R]. 广西壮族自治区第四地质队. 1-85.
- 广西壮族自治区第四地质队. 2015. 广西大新县弄屯矿区铅锌矿勘探报告[R]. 广西壮族自治区第四地质队. 1-262.
- 何学贤,朱祥坤,杨淳. 2005. 多接收器等离子体质谱(MC-ICP-MS)Pb同位素高精度研究[J]. 地球学报,26(b9):19-22.
- 华仁民,朱金初,赵一英,周建平,吴燕玉,陈晓东. 1997. 右江褶皱带有色金属矿床成矿系列初步研究[J]. 高校地质学报,3(2):183-191.
- 黎彤,袁坏雨,吴胜昔,程先富. 1999. 中国大陆地壳体的区域元素丰度[J]. 大地构造与成矿学,23(2):101-107.
- 李开文,张乾,王大鹏,蔡伊,刘玉平. 2013. 云南蒙自白牛厂多金属矿床锡石原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年代学[J]. 矿物学报,3(2):523-528.
- 李磊,孙卫志,孟宪锋,杨小芬,张灯堂,冯建之. 2013. 华北陆块南缘崑山地区燕山期花岗岩类地球化学、Sr-Nd-Pb同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报,29(8):2635-2652.
- 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.
- 李泽琴,董宝林,雷英凭,陈海,林德. 1998. 广西凤凰山浊积岩型银矿床铅同位素地球化学——成矿物质来源[J]. 矿物学报,18(4):473-482.
- 蒯志永,王登红,李水如. 2008. 广西王社铜钨矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报,82(11):1565-1571.
- 陆建辉. 2014. 广西大新县弄屯铅锌矿地质特征、成矿规律及找矿方向分析[J]. 矿产与地质,28(4):487-491.
- 陆建辉. 2015. 西大明山银铅锌金钨铋矿地质特征、成矿规律及成矿模式[J]. 矿产与地质,29(5):560-567.
- 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.
- 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.
- 毛景文,陈懋弘,袁顺达,郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报,85(5):636-658.
- 乔龙. 2016. 右江盆地及其周缘地区构造演化及铝土矿成矿作用[D]. 导师:王庆飞. 北京:中国地质大学. 1-165.
- 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.
- 王登红,陈毓川,陈文,桑海清,李华芹,路远发,陈开礼,林枝茂. 2004. 广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代[J]. 地质学报,78(1):132-138+146.
- 韦昌山,乐兴文,肖昌浩,陆干强,胡鑫垚,张亮,蔡锦辉,龙明周,罗薇,黄恒,向磊,申玉科,黎修旦,陆少文,蔡贺清,赖润宁,熊琦,田杰鹏,李扬,苏晓凯. 2015. 广西西大明山地区构造-蚀变调查方法总结及找矿预测地质模型构建项目报告[R]. 北京:中国科学院地质力学研究所. 264页.
- 吴开兴,胡瑞忠,毕献武,彭建堂,唐群力. 2002. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学,30(3):73-81.
- 肖昌浩,申玉科,韦昌山,苏晓凯,乐兴文,张亮. 2018. 广西右江褶皱带东南缘西大明山矿集区燕山期酸性岩浆锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和 Ce(IV)/Ce(III)特征[J]. 现代地质,32(2):289-304.
- 杨斌,彭省临,李水如,张起钻. 2007. 广西有色金属成矿系列与成矿区带[J]. 矿产与地质,21(1):8-11.
- 杨富强,卢胜辉,黎海龙,朱国器,吕昶良,石伟民. 2017. 广西西大明山隐伏岩体空间形态研究[J]. 矿产与地质,31(6):1133-1140.
- 叶霖,刘玉平,张乾,鲍谈,何芳,王小娟,王大鹏,蓝江波. 2017. 云南都龙超大型锡锌多金属矿床中闪锌矿微量及稀土元素地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版),47(3):734-750.
- 张珩清,付伟,冯佐海,龙明周,李源宾,李伟,岳小军,郑剑锋,李赛赛,李程,文仕明. 2015. 广西西大明山罗维矿区层状矽卡岩的发现及成矿意义[J]. 桂林理工大学学报,35(4):712-720.
- 周永章,郑义,曾长育,梁锦. 2015. 关于钦-杭成矿带的若干认识[J]. 地学前缘,22(2):1-6.
- 周永章,李兴远,郑义,沈文杰,何俊国,虞鹏鹏,牛佳,曾长育. 2017. 钦杭结合带成矿地质背景及成矿规律[J]. 岩石学报,33(3):667-681.
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用:兼论中国大陆壳幔演化[M]. 科学出版社. 330页.