



贵州普定五指山地区铅锌矿床成矿模式^{*}

金中国^{1,2}, 周家喜^{2*}, 郑明泓¹, 彭松¹, 黄智龙², 刘玲¹

(1 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵州 贵阳 550005; 2 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要 黔西北五指山铅锌矿集区是川滇黔接壤铅锌成矿域的重要组成部分之一, 近年已探明多个大中型铅锌矿床, 提交铅锌金属资源储量超 250 万 t, 实现了地质找矿的重大突破。文章对区内典型矿床的地质、地球化学等资料进行综合分析, 并与邻区及 MVT 矿床进行比较。研究结果显示, 本区矿体主要赋存于上震旦统灯影组和下寒武统清虚洞组白云岩中, 呈层状、似层状和陡倾斜脉状产出, 断控和层控特征明显。矿石自然类型为原生硫化矿型, 主要金属矿物由闪锌矿和方铅矿组成。矿床形成受构造、层位及岩性、沉积岩相等因素的约束, 构造是必要条件和主要控矿因素, 灯影组和清虚洞组鲕状白云岩是有利赋矿层位和容矿岩性, 局限-半局限的台地-泻湖相沉积为有利沉积岩相条件。成矿物质具有混合特征, 其中成矿金属 Pb、Zn 等主要来源于基底岩石, 而矿化剂 C 和 S 则分别来自赋矿海相碳酸盐岩及其内的蒸发膏岩。成矿流体属于与右江盆地演化有关的低温中低盐度盆地卤水, 矿体是富金属流体在早燕山期区域挤压向伸展转换的动力学背景下卸载, 与富硫流体混合的产物, 成矿过程与 MVT 矿床相似。五指山地区铅锌矿床成矿模式的建立, 有望推动区内找矿新突破, 并为邻区铅锌成矿预测提供理论指导。

关键词 地质学 成矿地质条件 成矿物质来源 成矿模式 五指山背斜 川滇黔接壤铅锌矿集区

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

Metallogenic model of Pb-Zn deposits in Wuzhishan area, Puding City, Guizhou Province

JIN ZhongGuo^{1,2}, ZHOU JiaXi², ZHENG MingHong¹, PENG Song¹, HUANG ZhiLong² and LIU Ling¹

(1 Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, Guizhou, China;

2 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry,

Chinese Academy Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China)

Abstract

The Wuzhishan Pb-Zn ore concentration area, located in northwestern Guizhou, is an important part of the Sichuan-Yunnan-Guizhou Pb-Zn metallogenic domain. In recent years, numerous large and medium-sized Pb-Zn deposits have been discovered in this area, with more than 2.5 million tons of Pb + Zn metal reserves. Based on geological and geochemical studies and comparative analysis of the typical Pb-Zn deposits, the authors revealed that orebodies in this area are mainly hosted in dolostone of the late Sinian Dengying Formation and early Cambrian Qingxudong Formation. Orebodies occur dominantly in stratiform and steeply dipping veined forms along the faults. The fault control and layer control features are obvious. Ores are predominated by unaltered sulfides,

^{*} 本文受国家重点基础研究发展规划项目(编号:2014CB440905)、国家自然科学基金重点项目(编号:41430315)和国家“十二五”科技支撑重点计划项目(编号:2011BAB04B04)联合资助

第一作者简介 金中国, 男, 1965年生, 博士, 研究员, 主要从事矿产勘查与成矿预测研究工作。Email: gzkyjzg@sina.com

**** 通讯作者** 周家喜, 男, 1982年生, 博士, 副研究员, 主要从事低温热液矿床研究。Email: zhoujiayi@vip.gyig.ac.cn

收稿日期 2016-10-03; **改回日期** 2017-08-22。张绮玲编辑。

and mainly consist of sphalerite and galena in the Wuzhishan area. Pb-Zn mineralization is controlled by tectonics, lithology and sedimentary facies, with the tectonics being the necessary and main ore-controlling factor. The ore-bearing Dengying and Qingxudong Formations are favorable lithologic units and the dolostone is favorable ore-hosting rock. The restricted to semi-restricted platform to lagoon facies are favorable sedimentary lithofacies. Ore-forming Pb, Zn metals were derived from basement rocks, whereas C and S were most likely sourced from the marine carbonate rocks and evaporation gypsum within ore-hosting strata, respectively. The ore-forming fluids belonged to low-temperature medium-to low-salinity basin brine that was related to evolution of Youjiang Basin. Pb-Zn deposits in this area were formed by metal-enriched fluids mixed with S-enriched fluids in the transition environment from collisional to extensional tectonics. The ore-forming process is similar to that of MVT deposits. The establishment of metallogenic model in Wuzhishan area is expected to promote new breakthrough in ore-prospecting in this area and provide theoretical guidance for the adjacent areas.

Key words: geology, metallogenic geological conditions, source of ore-forming materials, metallogenic model, Wuzhishan anticline, Sichuan-Yunnan-Guizhou Pb-Zn metallogenic domain

位于扬子地块西缘的川滇黔接壤区铅锌成矿域(包括川西南铅锌成矿区、滇东北铅锌成矿区和黔西北铅锌成矿区),累计探明铅锌资源储量超过 2000 万 t(柳贺昌等,1999;Zhou et al., 2013a),是中国重要的铅锌锍银生产基地之一(黄智龙等,2004;芮宗瑶等,2004)。普定五指山铅锌矿集区位于该成矿域东侧,即区域性紫云-垭都-纳雍-开阳和安顺-平坝深大断裂所限区域中部(图 1)。至今,在五指山地区内已探明纳雍枝大型矿床(贵州省有色金属和核工业地质勘查局一总队,2015)、屯背后(含芦苇林和玉舍矿区)中型矿床(贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院,2012)和杜家桥中型矿床(含整装勘查在外围提交的预测资源量)以及新麦、那润、嘎补冲和喻家坝等小型矿床(点),提交铅锌金属资源储量超过 250 万 t(贵州省地质矿产勘查开发局 104 地质大队,2014),实现了在贵州探明第一个大型铅锌矿床的地质找矿重大突破。

随着找矿勘查工作的深入,部分学者对该区代表性铅锌矿床(纳雍枝、杜家桥和新麦等)的成矿地质特征、控矿因素、找矿前景及找矿方法应用等进行了研究(邹建波等,2009;谭华等,2012;陈贤武,2013;吴先彪等,2013;陈国勇等,2015;金灿海等,2015;金中国等,2016;彭松等,2016;汪勇等,2016),但对该区铅锌成矿作用的认识存在喷流沉积(陈国勇等,2015)、沉积-改造(金灿海等,2015)和 MVT(彭松等,2016)等不同成因观点。本文在区域构造演化、成矿地质条件和成矿物质来源研究的基础上,通过矿床成因和成矿动力学背景综合分析,探讨研究区内的铅锌成矿作用,建立了“五指山式”铅锌矿

床成矿模式,为研究区及邻区找矿预测提供理论指导和借鉴作用。

1 区域地质及构造演化特征

1.1 区域地质背景

扬子地块由变质基底和沉积盖层组成,其中基底由古太古代—古元古代中深变质杂岩、中元古代变质细碎屑岩夹变质火山沉积岩和新元古代浅变质碎屑岩及碳酸盐岩组成。黔西北地区未见基底地层出露,沉积盖层出露震旦系至白垩系,岩性以碳酸盐岩为主,页岩、砂岩次之,其中以石炭系、二叠系和三叠系出露全、分布广和沉积厚度大为特征(图 1)。上二叠统峨眉山玄武岩在黔西北地区广泛分布,但在五指山地区被剥蚀殆尽。研究区铅锌矿床赋存于上震旦统灯影组至中二叠统茅口组碳酸盐岩中,其中下寒武统清虚洞组和石炭系是主要赋矿层位。

区内构造变形复杂,主体构造呈 NW 向、NNE-NEE 向和 EW 向展布,主要有 NW 向紫云-垭都断层、NEE 向大院和五指山背斜、EW 向纳雍-开阳断层和 NE 向安顺-平坝断层等。紫云-垭都断层是一条深切基底的高角度逆冲断层,走向 NW310°,NW 向进入云南,SE 直抵开远-平塘深大断裂,在贵州境内长约 350 km。该断层始于加里东期的都匀运动,具多期活动特点,影响着晚古生代同沉积活动及其 SW 侧下陷,形成威宁-水城断陷盆地(金中国,2008;贵州省地质调查院,2016);安顺-平坝断层为印江木黄-贵阳-安顺-普安深大隐伏断裂的中段,向南延至云南师宗,向北延到湖南慈利,走向 NE,长 >520 km,

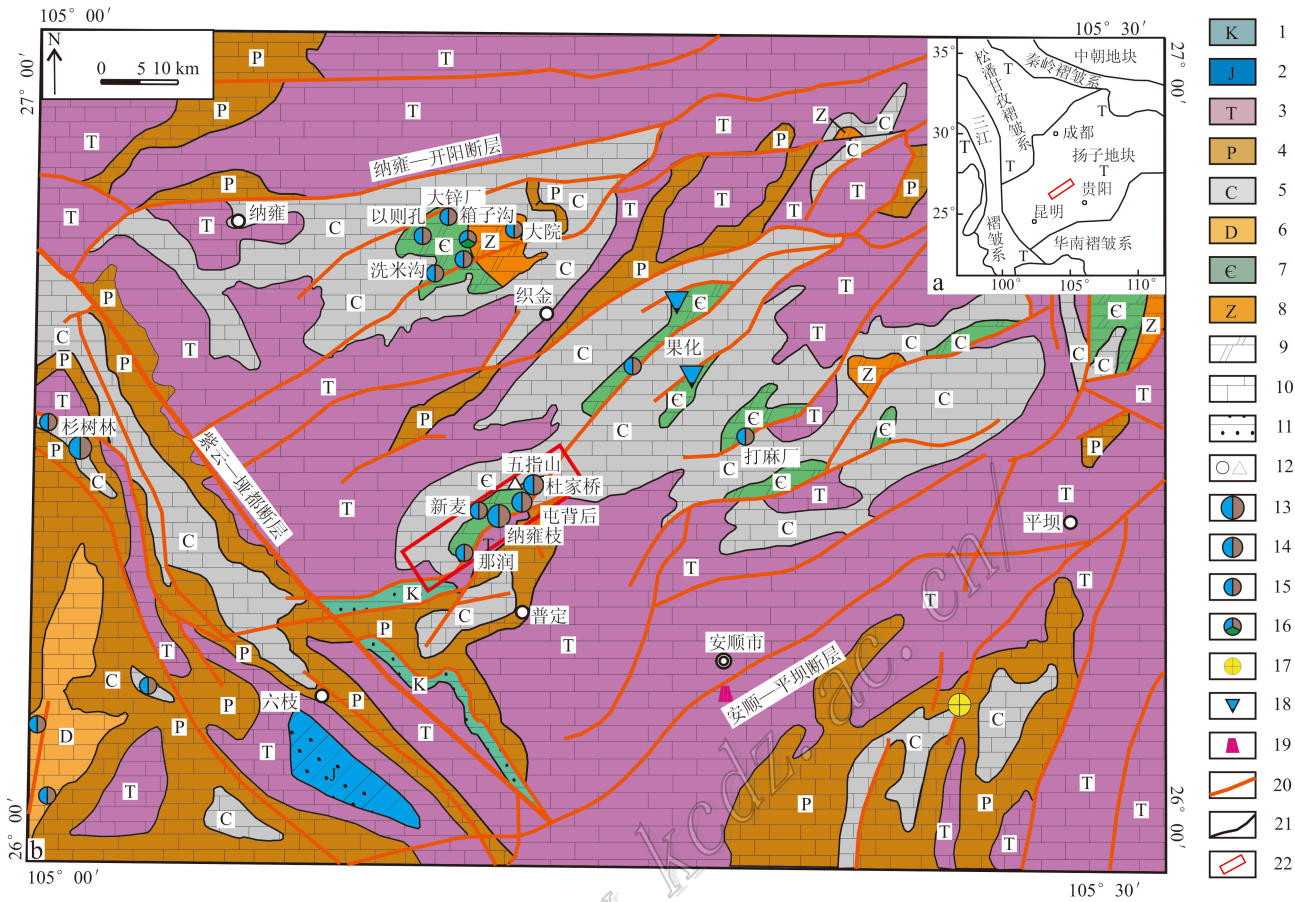


图 1 五指山地区大地构造位置(a)及地质略图(b)

1—白垩系；2—侏罗系；3—三叠系；4—二叠系；5—石炭系；6—泥盆系；7—寒武系；8—震旦系；9—白云岩；10—灰岩；11—砂岩；
12—地名；13—大型铅锌矿床；14—中型铅锌矿床；15—小型铅锌矿床(点)；16—小型铅锌铜矿床；17—金矿点；18—大型磷矿床；
19—中型萤石矿床；20—断层；21—地质界线；22—研究区位置

Fig. 1 The tectonic position (a) and geological sketch map (b) of Wuzhishan area

1—Cretaceous; 2—Jurassic; 3—Triassic; 4—Permian; 5—Carboniferous; 6—Devonian; 7—Cambrian; 8—Sinian; 9—Dolomite; 10—Lime-
stone; 11—Sandstone; 12—Toponymy; 13—Large-sized Pb-Zn deposit; 14—Medium-sized Pb-Zb deposit; 15—Small-sized Pb-Zn deposit (ore
spot); 16—Small-sized Pb-Zn-Cu deposit; 17—Au ore spot; 18—Large-sized P deposit; 19—Medium-sized fluorite deposit; 20—Fault;
21—Geological boundary; 22—Study area

推测其为隐伏的岩石圈深大断裂，主要活动时间为新元古代、晚古生代及其后，在中段也为三叠系沉积岩相急变带，对燕山期变形有一定制约；纳雍-开阳断层为纳雍-开阳-余庆深大隐伏断裂的西段，东、西两端分别与玉屏-施洞-三都和垭都-紫云构造带交汇，走向近 EW，长约 290 km，其活动时期主要为燕山期，性质主要为左行走滑，喜马拉雅期和新构造期又有复活（贵州省地质调查院；2016）。乐光禹等（1994）认为紫云-垭都和安顺-平坝构造带是区域十分重要的古断裂构造线。褶皱为背斜紧闭、向斜宽阔的侏罗山隔档式褶皱组合，其中五指山背斜是研究区主要褶皱，构造方向总体呈 NE40°~50°展布，轴

面倾向 NW，轴向长约 14 km，宽 5 km。背斜核部主要出露寒武系，上震旦统灯影组零星分布，两翼依次为石炭系、二叠系、三叠系及白垩系，其中上震旦统灯影组、下寒武统清虚洞组、中上寒武统娄山关组为赋矿层位，岩性主要为蚀变白云岩。背斜 NW 翼地层倾向 NW，倾角 8°~25°；SE 翼地层倾向 SE，倾角 10°~35°。背斜内 NE-NEE 向和 NW 向断层发育（图 2），NE-NEE 向断层以 F₁、F₂ 为主。F₁ 呈 NE-SW 向分布于五指山背斜南东翼，走向长约 50 km，倾向 SE，倾角 57°~60°，断层破碎带宽 20~30 m，断距 500~800 m，为一条成矿边界正断层，SW 向交紫云-垭都断裂；F₂ 走向 N30°E，倾向 SE，倾角 60°~

70°,长 45 km,破碎带宽约 30 m,断距约 400~700 m,为正断层;NW 向断层主要是形成相对晚、规模相对小的次级逆冲断层。背斜内已探明纳雍枝、杜家桥等多个中大型铅锌矿床,外围有铜、磷、萤石等矿产。

五指山地区未见岩浆岩产出(图 2),外围峨眉山玄武岩及同源辉绿岩发育(金中国,2008)。

1.2 区域构造演化

研究区属扬子地块组成部分,区域构造演化经历了武陵至喜马拉雅多次构造运动。

(1) 青白口纪中期末(870~820 Ma),武陵运动使扬子地块与华夏地块汇聚碰撞,在陆内造山环境形成华南陆块和隆起的褶皱基底,导致梵净山群、四堡群变形变质并遭受长期侵蚀-剥蚀(毛景文等,2005;贵州省地质调查院,2016);

(2) 青白口纪晚期(820~780 Ma),雪峰运动使华南陆块发生裂解,在大陆裂谷盆地环境沉积了下江群、丹洲群陆源碎屑、火山碎屑浊积岩,区域性印江木黄-贵阳-安顺-普安深大断层初步形成;

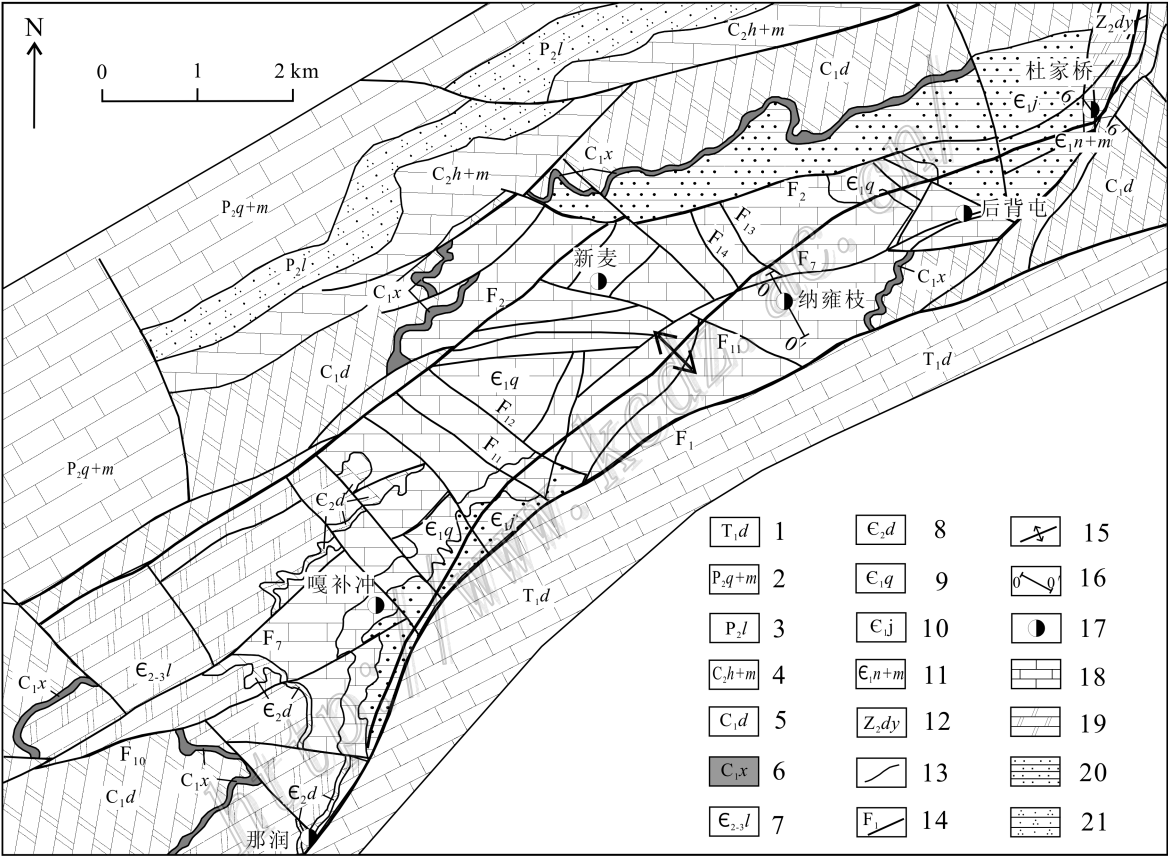


图 2 五指山背斜地质略图(据谭华等, 2012 修改)

1—下三叠统大冶组; 2—上二叠统栖霞+茅口组; 3—中二叠统梁山组; 4—上石炭统黄龙+马平组; 5—下石炭统大埔组; 6—下石炭统祥摆组; 7—中-上寒武统娄山关组; 8—中寒武统陡坡寺组; 9—下寒武统清虚洞组; 10—下寒武统金顶山组; 11—下寒武统明心寺组+牛蹄塘组; 12—上震旦统灯影组; 13—地层界线; 14—断层及编号; 15—背斜轴; 16—勘探线及编号; 17—铅锌矿床(点); 18—灰岩; 19—白云岩; 20—粉砂岩; 21—石英砂岩

Fig. 2 Sketch geological map of the Wuzhishan anticline (modified after Tan et al., 2012)

1—Lower Triassic Daye Formation; 2—Middle Permian Qixia + Maokou Formation; 3—Middle Permian Liangshan Formation; 4—Upper Carboniferous Huanglong + Maping Formation; 5—Lower Carboniferous Dapu Formation; 6—Lower Carboniferous Xiangbai Formation; 7—Middle-Upper Cambrian Loushanguan Formation; 8—Middle Cambrian Douposi Formation; 9—Lower Cambrian Qingxudong Formation; 10—Lower Cambrian Jindingshan Formation; 11—Lower Cambrian Mingxinsi + Niutitang Formation; 12—Upper Sinian Dengying Formation; 13—Stratigraphic boundary; 14—Fault and its serial number; 15—Anticline axis; 16—Cross section and its serial number; 17—Pb-Zn deposit (ore spot); 18—Limestone; 19—Dolomite; 20—Siltstone; 21—Quartz sandstone

(3) 南华纪—奥陶纪(780~438 Ma),裂陷盆地陆相、台地相沉积环境沉积了巨厚的碳酸盐岩和碎屑岩;志留纪(438~410 Ma),碰撞造山背景下前陆盆地的潮坪-泻湖相沉积环境沉积了碎屑岩,偶见碳酸盐岩;加里东运动升降作用强烈,形成一系列褶皱、断层(紫云-垭都断层初步形成)和黔中古陆,导致扬子古陆与华夏古陆再次汇聚碰撞形成华南陆块,南华裂谷海槽萎缩、消亡(万天丰, 2004; 贵州省地质调查院, 2016);

(4) 泥盆纪—二叠纪(410~250 Ma),古特提斯洋海相沉积,海西运动继续以升降运动为主,在晚二叠世发生大规模玄武岩浆喷发(258~260 Ma; Zhou et al., 2001; 范蔚茗等, 2004),同时,由于陆内板块伸展、拉张、区域断层继承发展活动,形成一系列断陷盆地(如威宁-水城断陷盆地);

(5) 三叠纪(250~205 Ma),印支期本区及周边发生大规模碰撞造山事件,形成强烈的构造推覆和冲断褶皱,在中三叠世末期古特提斯洋闭合转为陆相盆地沉积;

(6) 燕山—喜马拉雅期,构造运动引起地层褶皱和断裂,产生大规模走滑、推覆。

研究区在加里东期早震旦世洋水期台地相浅滩、礁滩沉积环境下,形成大型-超大型磷(稀土)矿床;在印支晚期-燕山期陆内造山挤压向板内伸展转换背景下,形成了低温热液铅锌矿床(Zhou et al., 2013a; 2013b; 2015; 张长青等, 2014; 叶霖等, 2016)和部分卡林型金矿床(陈懋弘等, 2007; Chen et al., 2015)。

2 典型矿床地质特征

2.1 纳雍枝大型铅锌矿床

纳雍枝大型铅锌矿床位于五指山背斜 NE 段的 SE 翼,矿区主要出露有下寒武统金顶山组至下三叠统大冶组(图 3)。铅锌矿产于下寒武统清虚洞组中,厚度 215~330 m。依据岩性组合特征,清虚洞组可进一步划分为 3 个岩性段,其中第一段和第二段第一层为赋矿层位,岩性主要为泥质白云岩、泥质条带细晶白云岩、鲕状白云岩、层纹状白云岩(金中国等, 2016)。矿区 NE 向和 NW 向断层发育,NE 向断层多为高角度断层,主要有 F₁、F₂、F₇ 等。NW 向断层为一组倾向 NE,倾角较陡的正断层。F₁、F₂(特征前

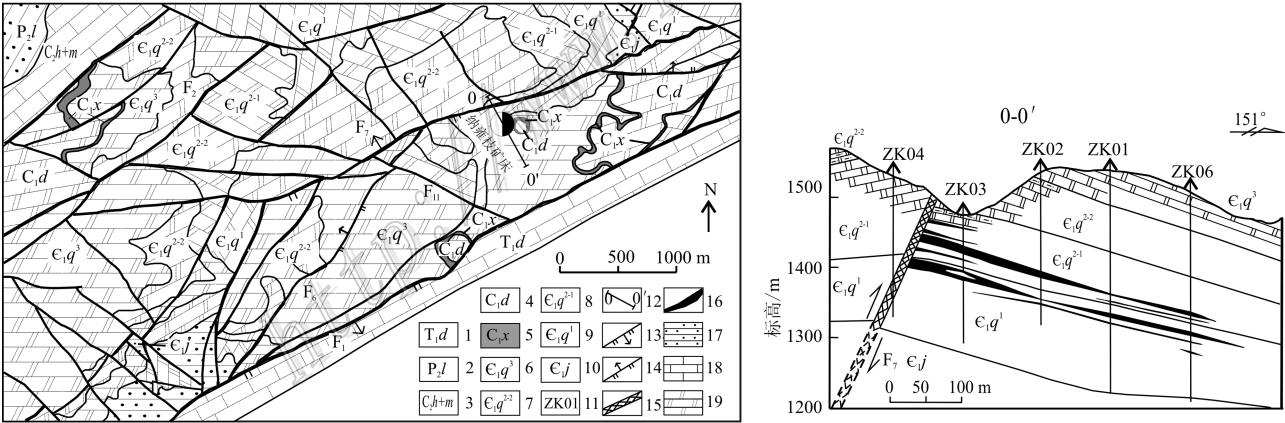


图 3 那雍枝矿床地质及 0 号剖面图

1—下三叠统大冶组; 2—中二叠统梁山组; 3—上石炭统黄龙组+马平组; 4—下石炭统大埔组; 5—下石炭统祥摆组; 6—下寒武统清虚洞组第三段; 7—下寒武统清虚洞组第二段第二层; 8—下寒武统清虚洞组第二段第一层; 9—下寒武统清虚洞组第一段; 10—下寒武统金顶山组; 11—钻孔及编号; 12—剖面位置及编号; 13—正断层; 14—逆断层; 15—陡脉状矿体; 16—层状矿体; 17—粉砂岩; 18—灰岩; 19—白云岩

Fig. 3 Geological map and geological section along No. 0 line of the Nayongzhi Pb-Zn deposit

1—Lower Triassic Daye Formation; 2—Middle Permian Liangshan Formation; 3—Upper Carboniferous Huanglong + Maping Formation; 4—Lower Carboniferous Dapu Formation; 5—Lower Carboniferous Xiangbai Formation; 6—Third section of the lower Cambrian Qingxudong Formation; 7—Second layer of second section of the lower Cambrian Qingxudong Formation; 8—First layer of the second section of the lower Cambrian Qingxudong Formation; 9—First section of the Lower Cambrian Qingxudong Formation; 10—Lower Cambrian Jindingshan Formation; 11—Drill hole and its serial number; 12—Cross section and its serial number; 13—Normal fault; 14—Thrust fault; 15—Steep veined orebody; 16—Stratiform orebody; 17—Siltstone; 18—Limestone; 19—Dolomite

述)是研究区主要的导矿构造,F₇ 呈 NE-SW 向沿背斜轴部展布,倾向 NNW,倾角 51°~75°,为逆断层。断层破碎带宽 1~10 m,断层上盘地层产状平缓,下盘地层倾角较陡,该断层是区内主要的导矿、控矿断层。

纳雍枝矿床铅锌矿体有 2 种产出类型:一种是呈层状、似层状、透镜状产于 F₇ 下盘的清虚洞组白云岩、鲕状白云岩中,产状与地层一致,空间展布从下至上主要划分为 I、II 和 III 层矿(图 3),各层矿顶、底板均有含碳、泥质白云岩产出,是矿层分界标志;另一种是陡倾斜脉状,产于 F₇ 断层破碎带中(图 3)。已有研究认为两种类型铅锌矿体是同一成矿流体在不同空间形成的产物(金中国等 2016)。矿石自然类型属于原生硫化矿物矿石,组成较简单,金属矿物主要见闪锌矿,方铅矿、黄铁矿次之。热液成矿期矿石、脉石矿物生成顺序为细粒黄铁矿—粗粒棕色(棕褐色、棕黄色和棕红色)闪锌矿—粗粒方铅矿—细粒米黄色闪锌矿—细粒方铅矿—大量白云石-方解石—少量石英-重晶石(金中国等 2016)。矿石构造有块状、浸染状、网脉状、角砾状等;矿石结构具他形-自形粒状结构、碎裂结构、交代残余结构等。围岩蚀

变主要见白云石化、方解石化、黄铁矿化,局部见硅化,白云石化、硅化与矿化关系密切,常沿矿体延伸方向展布,形成蚀变白云岩、硅质白云岩。

2.2 杜家桥矿床

矿区位于五指山背斜的北东端轴部,出露地层有上震旦统灯影组,下寒武统牛蹄塘组、明心寺组、金顶山组,下石炭统祥摆组、大浦组。铅锌矿产于上震旦统灯影组地层中,岩性以白云岩为主。受区域大断裂的影响,NE 向、NW 向断裂构造发育,NE 向组以 F₁₋₁ 为代表,总体倾向 SE,倾角 60°~80°,断层性质为正断层,破碎带宽 20~50 m,具有多期活动特点,破碎带中白云石化强烈。该断层旁侧常见铅锌矿(化)体,是区内主要控矿和导矿构造。NW 向组是区内较为发育的一组断层,倾向 SW,倾角 70°~80°,主要表现为正断层,部分断层可见铅锌(化)体。

矿体呈似层状、透镜状产于上震旦统灯影组白云岩中,根据矿体分布的上下位置关系,分为 C₁~C₉ 9 个含矿层(图 4),其中 C₁ 含矿层中的矿体最为稳定,规模最大,全区可见,该矿体倾向 290°~340°,倾角 15°~35°,走向长 1800 m,倾向延深 600 m。矿体厚度一般为 0.41~2.47 m,最厚达 10.78 m,平均厚

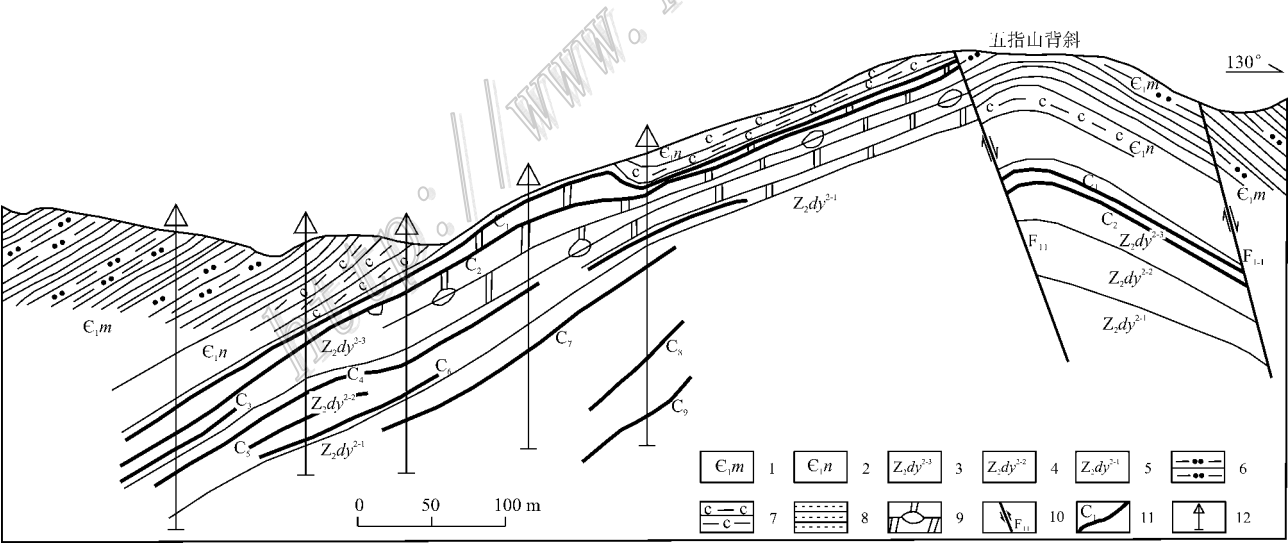


图 4 杜家桥铅锌矿床 6 号勘探线剖面图(据谭华等, 2012 修改)

1—下寒武统明心寺组;2—下寒武统牛蹄塘组;3—上震旦统灯影组第二段第三层;4—上震旦统灯影组第二段第二层;5—上震旦统灯影组第二段第一层;6—泥质粉砂岩;7—含碳质泥岩;8—泥岩;9—含燧石团块白云岩;10—正断层及编号;11—矿层及编号;12—钻孔

Fig. 4 Geological section along No. 6 exploration line of the Dujiabiao Pb-Zn deposit (modified after Tan et al., 2012)

1—Lower Cambrian Mingxinsi Formation;2—Lower Cambrian Niutitang Formation;3—Third layer of second section of the Upper Sinian Dengying Formation;4—Second layer of second section of the Upper Sinian Dengying Formation;5—First layer of second section of the Upper Sinian Dengying Formation;6—Argillaceous siltstone;7—Carbonaceous within mudstone;8—Mudstone;9—Dolomite containing flint briquette;

10—Normal fault and its serial number;11—Ore horizon and its serial number;12—Drill hole

表 1 新麦、那润、喻家坝矿床(点)特征

Table 1 The characteristics of Xinmai,Narun and Yujiaba Pb-Zn deposits(ore spots)

矿床	位置	主要地质特征	矿石品位
那润	位于 F ₂ 上盘	矿体呈透镜体赋存于下寒武统清虚洞组第二段第一层细晶白云岩、瘤状白云岩中,长 82.00 m,厚 1.75~6.53 m,均后 4.14 m。矿石中主要见闪锌矿	Zn 1.74%~2.02%,平均 1.80% ;Pb 含量较低,一般<0.10%
喻家坝	位于 F ₁ 与 F ₂ 断层之间	铅锌矿体呈囊状、透镜状产于中上寒武统娄山关组白云岩中,产状与围岩一致。矿体长 120 m,厚 0.2~0.91 m	Pb 1.09%~1.92%,Zn 0.87%~8.20%
新麦	位于 F ₂ 上盘	现圈定 4 个铅锌矿体,呈似层状、透镜状产于下寒武统清虚洞组第一段和第二段第一层细晶白云岩、瘤状白云岩中,产状与围岩基本一致,主矿体走向长 1000 m,宽 210~310 m,平均厚度 5.33 m。坑道控制最厚 18.53 m	Zn3.50%~17.71%,Pb 0.04%~0.72%

资料来源：贵州省地质矿产勘查开发局 104 地质大队，2014；王勇等，2016。

3.26 m,Pb 0.50%~2.12%,平均 1.27%。矿区矿石组成简单,矿石自然类型主要为硫化矿,其次为硫化矿与氧化矿混合矿石和氧化矿石,金属矿物主要为方铅矿,次为闪锌矿;脉石矿物主要为白云石、石英,次为重晶石、方解石。矿石结构主要有自形-半自形-他形粒状结构、碎裂结构及溶蚀交代结构。矿石构造则以角砾状构造、脉状构造、浸染状构造为主。围岩蚀变主要为白云石化、硅化,次为重晶石化、黄铁矿化(贵州省地质矿产勘查开发局 104 地质大队,2014)。矿化与白云石化、硅化强弱呈正相关关系,重晶石化、黄铁矿化仅在少部分样品中见到(谭华等,2012)。

2.3 其他矿床(点)

研究区还有新麦、那润、喻家坝等矿床(点)(图 2),主要地质特征如表 1 所示。这些矿床的矿石自然类型均主要为硫化矿石,矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿;脉石矿物主要为白云石、方解石、石英等。矿石主要见碎裂结构及自形-半自形-他形粒状结构,矿石具角砾状、脉状、浸染状、细脉状、网脉状、团块状等构造(贵州省地质矿产勘查开发局 104 地质大队,2014;王勇等,2016)。

3 成矿地质条件分析

3.1 构造条件

以往研究显示黔西北地区构造与铅锌成矿密切相关,构造是铅锌成矿的必要条件和主要控矿因素(金中国,2008;Zhou et al.,2014a)。五指山地区的构造特征如下:

(1)五指山背斜构造发育,控制矿床分布。现已发现和探明的铅锌矿床(点)均沿背斜轴部呈 NE-SW 展布,与背斜轴向大致平行产出的 F₁ 和 F₂ 控制了该区浅表的成矿边界(图 2);

(2)背斜轴部、近轴部的导矿、控矿断层控制矿

床主矿体产出。F₇ 既是导矿断层,也是含矿断层。在纳雍枝-屯背后地段,无论地表或深部,F₇ 断层破碎带中铅锌矿化强烈,矿体产状与断层产状一致,矿体厚度与断层宽度成正相关关系,是研究区陡脉状矿体产出的典型代表,矿石品位高。层间断层控制的层状、似层状矿体,越靠近 F₇ 断层,矿石品位越高,厚度大,揭示断层应是该矿区成矿流体运移的通道和储矿空间;

(3)背斜轴部次级褶曲、主干断层旁侧次级断层、层间破碎带是控制层状、似层状铅锌矿产出的主要构造,矿体主要分布于主断层下盘 800 m 以内,距离导矿、控矿断层越远、铅锌矿化变弱或无矿化,热液成矿受构造控矿明显。因此,五指山地区构造条件满足成矿流体运移和圈闭条件。

3.2 地层、岩性条件

研究区铅锌矿赋矿层位为下寒武统清虚洞组和上震旦统灯影组,层位控矿特征明显。区域上清虚洞组为局限台地相沉积的灰-深灰色薄-厚层灰岩、白云质灰岩、白云岩、鲕粒灰岩等碳酸盐岩组成,背斜区从下至上 3 个铅锌矿层分别产于以薄层砂泥质白云岩为分界的 3 段白云岩中。例如,纳雍枝 I 矿层容矿岩石为中-厚层颗粒白云岩,II 矿层容矿岩石为瘤状细晶白云岩,III 矿层容矿岩石为中-厚层瘤状白云岩(图 3)。可见与铅锌产出密切相关的容矿岩石为粗晶白云岩、角砾状白云岩和含燧石团块白云岩(图 4)。

研究表明,热液白云石化越强,孔隙度越大,越有利于成矿流体卸载成矿(金中国,2008;甄世民等,2013;Zhou et al.,2014b)。因此,铅锌矿化对层位和岩性具有选择性。

3.3 沉积相条件

武陵运动使基底褶皱隆起,长期遭受侵蚀/剥蚀,风化壳中大量相对活泼的碱金属、碱土金属元素和非金属元素流失,而相对惰性的 Pb 元素在表生作

用下易被风化物中黏土富集,而 Zn 被胶体、黏土矿物、Fe、Mn 的氢氧化物胶体等吸附(刘英俊等,1986) 南华纪至奥陶纪在离散-汇聚背景下,形成裂谷拉张深水盆地-被动大陆边缘盆地沉积环境,初步富集于古风化壳中的 Pb、Zn、Ag 等矿质元素带入盆地沉积,形成初始矿源层;雪峰期火山岩、流纹岩中 Pb、Zn 丰度值较高,分别为 $450 \times 10^{-6} \sim 650 \times 10^{-6}$ 和 $100 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$ (沈苏,1988);汨罗塘期出现的次级裂隙,在缺氧滞流、富含有机质的强还原环境,促进 Pb、Zn、Ag、S 等成矿元素的富集;陡山沱期—二叠纪茅口期主要为台地-潮坪泻湖相碳酸盐岩沉积环境,其中晚震旦世灯影期、早寒武世清虚洞期均为台地边缘浅滩相环境,氧气和光照充足,藻类等生物发育。模拟实验表明(林丽等,2002),藻类对 Pb、Zn 都有较强的富集作用,富集系数为 30~45,从而使自身成为 Pb、Zn 的富集体,形成较高的地球化学背景。此外,五指山铅锌矿集区呈 NE 向带状围绕黔中古陆西缘、右江盆地北缘分布,体现出古隆起边缘、盆地边缘控矿特征。

矿石中同时发现与铅锌矿共生的脉状重晶石和呈晶间粒状及鳞片状产出的石墨矿物,它们的形成可能是碳酸盐岩中的有机质在成矿早期的白云岩化过程中,在较封闭的还原环境中被排挤到白云石或

闪锌矿晶间后形成的,推测研究区闪锌矿的形成与含碳较高的成矿流体有关;重晶石的形成反映了后期较开放的氧化环境,也是该区成矿过程中发生热化学还原反应的显示,暗示成矿的多期多阶段特点,与湖南花垣铅锌矿床具有相似性(刘文均等,2001)。此外,祝新友等(2013)认为 MVT 矿床常产于红层盆地边缘,其形成可能与区域陆相盆地发育、演化有关。研究区及外围,晚三叠世—白垩纪陆相红层盆地局部发育,这是否与铅锌成矿有关还有待进一步研究。

4 矿质来源与成矿时代

4.1 微量元素约束

本次研究系统采集了 34 件围岩(白云岩和灰岩)、蚀变围岩(重结晶白云岩)、断层角砾岩(碳酸盐岩)和硫化物矿石进行微量和稀土元素分析,从表 2 可知,矿石中除富集 Pb、Zn、Ag、As 和 Sb 等外,其余元素均贫化,显示明显的低温成矿元素组合。在断层角砾岩和蚀变围岩中,Pb、Zn、Ag、As 和 Sb 的富集程度也较高,且从矿层→断层角砾岩→蚀变围岩→围岩,这些元素含量逐渐降低,暗示富低温成矿元素组合的成矿流体与围岩发生了显著的水/岩相互作用。

表 2 微量元素含量表($w(B)/10^{-6}$)
Table 2 The contents of trace elements ($w(B)/10^{-6}$)

岩性/数量	Zn	Pb	Ag	Ge	Ga	Cu	In	V	Cr	Co
矿石/8	411~6940 (3511)	40.3~1240 (3329)	0.12~0.54 (0.26)	1.37~12.27 (4.74)	16.7~272.87 (7.6)	4.75~34.8 (13.12)	0.01~0.09 (0.07)	10.6~118 (40.61)	3.11~71.20 (28.67)	54~19.7 (12.79)
断层角砾岩/3	78.7~1340 (836)	62.7~188 (118)	0.09~0.39 (0.28)	1.86~4.42 (2.91)	4.34~22.3 (14.12)	8.53~13.9 (10.42)	0.03~0.14 (0.09)	23.3~113 (72.37)	15.0~97.2 (56.43)	14.5~25.0 (20.2)
蚀变围岩/3	415~1070 (669)	116~295 (203.33)	0.09~0.39 (0.28)	0.97~1.42 (1.18)	1.10~10.8 (5.31)	3.37~16.1 (9.47)	0.03 (1件检出)	7.82~57.5 (31.11)	3.21~39.6 (18.74)	12.6~21.1 (15.63)
围岩/20	15.8~458 (117)	3.0~65.9 (22.92)	0.04 (1件检出)	0.11~2.27 (0.88)	0.32~25.9 (7.71)	1.61~176 (7.1)	0.02~0.10 (0.06)	1.12~157 (41.09)	0.32~106 (35.02)	7.60~193 (32.7)
地壳丰度	70	12.5	0.07	1.5	15	55	0.10	135	100	25
岩性/数量	Ni	As	Sb	Mo	Rb	Cs	Zr	Nb	Sr	Ba
矿石/8	9.77~34.1 (19.69)	4.51~78.8 (22.17)	1.81~8.83 (5.15)	0.79~5.35 (2.60)	1.91~94.5 (37.73)	0.15~8.86 (2.77)	6.04~156 (62.77)	0.54~12.79 (5.23)	47.1~143 (70.51)	27.5~342 (135)
断层角砾岩/3	15.4~41.9 (28.93)	13.3~16.5 (14.87)	3.47~11.1 (7.56)	0.21~1.32 (0.85)	14.1~129 (68.03)	0.82~8.08 (4.52)	74.2~232 (168)	4.75~18.7 (11.91)	37.9~66.6 (50.73)	47.4~468 (228.13)
蚀变围岩/3	13.6~28.9 (7.14)	8.92~27.7 (16.37)	1.65~7.17 (4.65)	1.04~2.46 (1.95)	4.33~61.3 (28.74)	0.19~2.76 (1.33)	11.1~145 (67.33)	1.06~10.28 (4.92)	62.2~87.4 (73.1)	12.2~218 (98.63)
围岩/20	8.97~47.9 (18.67)	1.1~4.71 (2.68)	0.33~8.65 (1.24)	0.16~3.91 (0.70)	0.63~188 (49.27)	0.02~14.0 (3.39)	1.26~344 (90.60)	1.07~19.07 (5.52)	23.3~152 (84.23)	3.07~742 (196.20)
地壳丰度	75	1.8	0.20	1.5	90	3.0	165	6.0	375	425

注:括号中数字为平均值,测试单位:中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室,2015 年 10 月。地壳丰度为刘英俊等,1986。

表 3 稀土元素特征值表
Table 3 The characteristic values of rare earth elements

岩性/数量	ΣREE/10 ⁻⁶	LREE/10 ⁻⁶	HREE/10 ⁻⁶	LREE/HREE	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	(La/Yb) _N	δEu	δCe
矿石/8	23.5~162 (70.8)	16.8~137 (57.7)	6.17~25.1 (13.11)	2.52~5.46 (3.87)	2.99~5.09 (4.50)	0.96~1.88 (1.36)	5.78~14.09 (9.36)	0.46~0.86 (0.65)	1.00~1.04 (1.02)
蚀变围岩/3	21.8~39.3 (29.3)	15.4~29.6 (21.44)	6.40~9.71 (7.88)	2.56~3.05 (2.67)	2.77~4.47 (3.63)	1.36~1.92 (1.57)	5.98~8.60 (7.08)	0.65~0.79 (0.70)	1.04~1.16 (1.09)
断层角砾岩/3	104~186 (145)	79.1~148 (113.26)	24.7~37.8 (31.47)	3.20~3.92 (3.54)	3.42~4.54 (3.86)	1.31~1.57 (1.43)	7.70~8.91 (8.48)	0.52~0.66 (0.59)	1.04~1.05 (1.04)
围岩/20	12.2~283 (94.4)	9.3~222 (71.55)	2.73~79.0 (22.8)	1.54~4.37 (3.11)	2.02~6.51 (4.30)	0.93~4.63 (1.77)	3.74~28.6 (10.79)	0.56~0.92 (0.67)	0.98~1.17 (1.06)

注：括号中数字为平均值 测试单位 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室,2015 年 10 月。

用,导致了这些成矿元素在断层角砾岩和蚀变围岩中富集。此外,各类样品中 Cs、Co 含量均与地壳丰度值(刘英俊等, 1986)接近,显示成矿流体并非来自富 Cs、Co 的源区。微量元素组成特征显示后生低温热液成矿特点。

4.2 稀土元素指示信息

34 件围岩(白云岩和灰岩)、蚀变围岩(重结晶白云岩)、断层角砾岩(碳酸盐岩)和硫化物矿石稀土元素特征如表 3 所示：

(1) ΣREE 为 $12.2 \times 10^{-6} \sim 283 \times 10^{-6}$, 含量变化大, 总体显示断层角砾岩含量相对高, 蚀变围岩相对低, 可能与其含泥质、碳质多少有关, 泥质、碳质(有机质)含量越多, 对稀土元素吸附性越强；

(2) 不同性质的样品具有 LREE 富集和 HREE 相对贫化特征, 反映了壳源属性 δEu 呈中等负异常-弱负异常, δCe 呈无-弱正异常, 反映了成矿环境为还原环境, 这与大量硫化物存在是吻合的；

(3) 稀土元素配分模式显示, 矿石与围岩具有相似特征(图 5), 且与相邻的天桥、青山矿床的稀土元素组成特征具相似性(金中国, 2008 ;周家喜等, 2010 2012), 表明成矿流体中的 REE 可能是通过水/岩相互作用继承围岩。

4.3 成矿流体中还原硫的来源及形成机制

硫化物 δ³⁴S 值介于 15.94‰~25.49‰(表 4, 图 6), 均值为 22.41‰, 与花垣铅锌矿床硫化物 δ³⁴S 均值 26.63‰相近(刘文均等, 2001), 显示本区及邻区硫化物均富集重硫同位素。总体上闪锌矿 δ³⁴S 值(19.37‰~25.49‰, 均值 23.17‰)较黄铁矿(δ³⁴S = 22.06‰)和方铅矿高(δ³⁴S = 15.94‰~19.70‰, 均值 18.23‰), 不具有 δ³⁴S_{黄铁矿} > δ³⁴S_{闪锌矿} > δ³⁴S_{方铅矿} 的特征, 暗示硫同位素在硫化矿物间的分馏未达到平衡。加之该矿床中存有少量重晶石, 故而

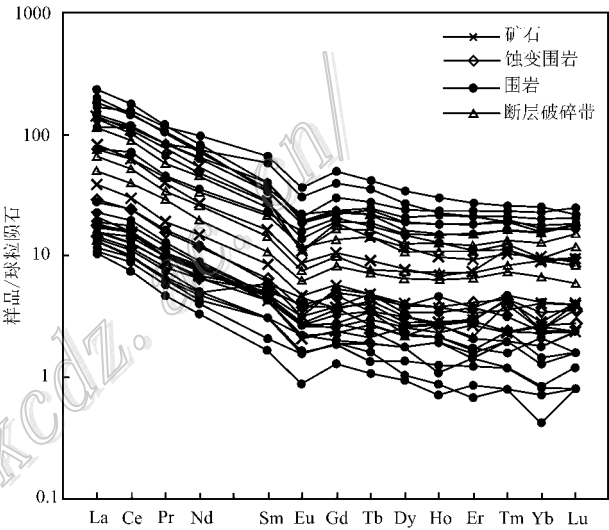


图 5 纳雍枝矿床稀土元素配分模式图

Fig. 5 Distribution pattern of rare earth elements from the Nayongzhi Pb-Zn deposit

硫化物 δ³⁴S 值(平均 22.41‰)不能近似代表成矿流体 δ³⁴S_{SS} 值, 而是比其低(Ohmoto et al., 1997)。

黔西北地区沉积地层中蒸发膏岩层较为发育, 其中富含石膏和重晶石等海相硫酸盐矿物, 其 δ³⁴S 值介于 22‰~28‰(金中国, 2008 ;Zhou et al., 2013a 2014a), 与寒武纪同期海水硫酸盐 δ³⁴S 值接近(27‰~32‰ ;Claypool et al., 1980), 也与硫化物硫同位素组成相近(15‰~25‰)。因此, 成矿流体中硫最可能来源于赋矿地层中的蒸发膏岩, 是海相硫酸盐热化学还原作用的产物(周家喜等, 2010 ; Zhou et al., 2013a), 而区域上下寒武统牛蹄塘组、上震旦统一寒武统过渡层老堡组黑色页岩中有机质丰度高(1%~13%) (贵州省地质调查院, 2016), 其可能在热化学还原过程中起到了还原剂作用。

表 4 纳雍枝铅锌矿床硫同位素组成

Table 4 Sulfur isotopic compositions of the sulfide minerals from the Nayongzhi Pb-Zn deposit

矿物	样品数/件	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 范围/‰	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 平均值/‰
方铅矿	3	15.94~19.70	18.23
闪锌矿	17	19.37~25.49	23.17
黄铁矿	1		22.06

测试者：中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室,2015 年 10 月。

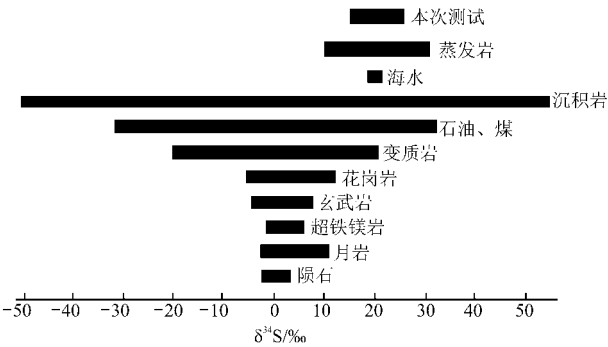


图 6 纳雍枝铅锌矿床硫化矿石硫同位素组成直方图

Fig. 6 Histogram of S-isotopic composition of the sulfides ores from the Nayongzhi Zn-Pb deposit

4.4 碳、氧同位素约束

陈国勇等(2015)研究显示矿石中白云石脉的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-1.02\text{‰} \sim -0.26\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 $19.42\text{‰} \sim 24.89\text{‰}$,围岩中白云石脉的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 -0.21‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 25.80‰ ,二者颇为相似。在 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 图(图 7)中,围岩中的白云石样品落入海相碳酸盐岩范围内,而矿石中的白云石样品点落入或者靠近海相沉积碳酸盐岩区,表明无论是围岩还是矿石,其中的白云石脉的 C 均来自海相碳酸盐岩(赋矿围岩),是其溶解作用的结果。此外,

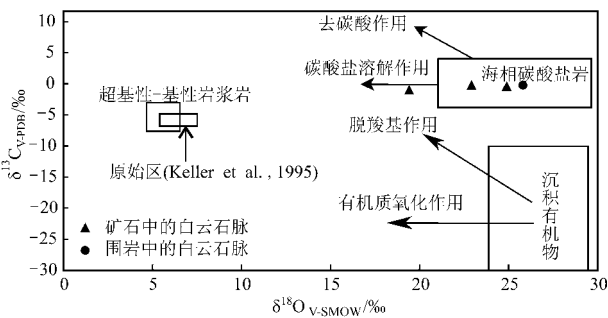


图 7 纳雍枝铅锌矿床 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 图解(底图据袁波等,2014 修改 数据来源陈国勇等,2015)

Fig. 7 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ versus $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ diagram of the Nayongzhi Zn-Pb deposit (modified after Yuan et al., 2014; data from Chen et al., 2015)

矿石中的白云石相比围岩中的白云石亏 ^{18}O ,表明亏 ^{18}O 的流体与围岩的水/岩相互作用是导致矿石中白云石相比亏 ^{18}O 的主要原因,而亏 ^{18}O 的流体很可能为受到变质流体影响的盆地卤水。这与杉树林、天桥、筲箕湾和金沙厂等矿床得到的认识是一致的(金中国等,2007;周家喜等,2012;Zhou et al., 2013a;2013b;2014b;2015)。

4.5 成矿金属来源

以往对黔西北地区铅锌矿床成矿金属来源的研究,表明峨眉山玄武岩、各时代赋矿地层和基底岩石均可能为本区铅锌矿床提供成矿金属(金中国,2008;Zhou et al., 2010;2013a;2013b;2014a;2014b)。五指山铅锌矿集区是黔西北铅锌成矿区的重要组成部分之一,其成矿金属是否具有多来源特征?金灿海等(2015)通过 Pb 同位素研究认为,金坡和屯背后铅锌矿床成矿金属具有壳源特征,主要由下伏震旦系沉积岩提供。笔者通过飞秒激光多接收器等离子体质谱分析首次获得的不同类型(期次)方铅矿原位 Pb 同位素组成(金中国等,2016),显示其组成变化范围非常窄,且明显不同于黔西北典型铅锌矿床和会泽铅锌矿床,也不同于震旦系白云岩和峨眉山玄武岩,而与基底岩石的 Pb 同位素组成重叠(图 8)。因此,笔者认为尽管不能排除其他地质体为本区铅锌矿床提供成矿金属,但基底岩石具有显著贡献。

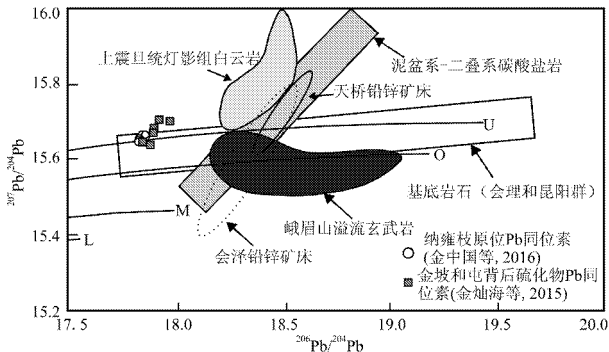


图 8 五指山地区铅锌矿床与地层沉积岩和基底岩石以及会泽和天桥的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对比图解(据金中国等,2016 修改)上地壳(U)、造山带(O)、地幔(M)和下地壳(L)

Fig. 8 Plot of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ among the deposits in Wuzhishan, dolostone of Sinian Dengying Formation, carbonate rocks of Devonian to Permian, basement rocks (Huili and Kunyang Groups), and Huize and Tianqiao deposits (modified after Jin et al., 2016) Upper Crust (U), Orogen Belt (O), Mantle (M) and Lower Crust (L)

4.6 成矿流体性质

根据中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室对杜家桥铅锌矿的流体包裹体测试资料(贵州省有色金属和核工业地质勘查局一总队,2015),石英包裹体直径为 $1\sim6\mu\text{m}$,多为 $2\sim4\mu\text{m}$,较小,主要为椭圆形和长条形,大多数具有布朗运动,部分成群产出,由气相、液相组成,气相分数 $5\%\sim25\%$,集中在 $10\%\sim20\%$ 范围。均一温度为 $98.3\sim227.2^\circ\text{C}$,集中在 $135\sim200^\circ\text{C}$,属于低温,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $1.4\%\sim20.3\%$,集中在 $6\%\sim14\%$,属于中低盐度。纳雍枝铅锌矿床石英中发育气液两相包裹体和液体 $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ 单相包裹体(朱路艳等,2016),其中前者均一温度为 $113\sim232^\circ\text{C}$,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $0.8\%\sim15.17\%$,集中在 $10\%\sim12\%$ 。

杜家桥和纳雍枝铅锌矿床石英流体包裹体均一温度,与花垣($87\sim193^\circ\text{C}$;刘文均等,2001)、大梁子($140\sim230^\circ\text{C}$;芮宗瑶等,2004)和老堡($115\sim270^\circ\text{C}$;梁金城等,2009)、凡口(方解石,主要集中在 $180\sim240^\circ\text{C}$;韩英等,2013)等铅锌矿床相似,均具有低温中低盐度的盆地卤水特征。沉积物厚度达 6000 m 的盆地中,有 $70\%\sim80\%$ 的水通过成岩压实作用排放出来。随着深度增加,温度和盐度均会增加(芮宗瑶等,2004)。研究区自青白口纪—志留纪(至广西运动前)以裂谷盆地沉积为主,沉积物厚度超 2 km ,压实作用明显,为成矿流体及盆地卤水形成提供了丰富的水源。

4.7 成矿时代

五指山地区铅锌矿体具有明显的层控和断控特征,脉状、角砾状矿石发育,矿石、断层角砾岩和蚀变围岩中低温组合元素明显富集,成矿金属主要来自基底,成矿流体属于低温中低盐度卤水,这些均表明该区矿床属于后生成矿,其形成年龄要晚于早寒武世。已有研究表明控矿的五指山背斜断层构造体系定型于早燕山期,表明矿体很可能形成于早侏罗世。区域成矿年代学研究表明,川滇黔接壤区铅锌矿床主要形成于 $226\sim192\text{ Ma}$ (Zhou et al., 2013a; 2013b; 2015; 张长青等, 2014; 叶霖等, 2016),而右江盆地部分卡林型金矿床形成于 $235\sim193\text{ Ma}$ (陈懋弘等, 2007; Chen et al., 2015),即二者均形成于晚三叠世—早侏罗世,对应晚印支期向早燕山期挤压向伸展转换的动力学背景。五指山背斜地区位于右江盆地北缘,川滇黔接壤铅锌成矿域东南部,是二者的过渡地区。因此,推测五指山地

区铅锌矿床最可能形成于早侏罗世,是燕山期盆地耦合作用的产物。

5 成矿模式

通过对比研究,建立了本区铅锌矿床的成矿模式(图9)。

武陵运动使富含Pb、Zn等成矿元素的基底褶皱隆起,长期遭受剥蚀,为沉积盖层准备了丰富物源;青白口纪形成了富含Pb、Zn等成矿元素的火山碎屑岩、陆源碎屑岩和碳酸盐岩建造,其中晚震旦世灯影期、早寒武世清虚洞期均为台地边缘浅滩相环境,有利于Pb、Zn等成矿元素的进一步富集(图9a);印支期—燕山期南盘江—右江造山事件促使本区发生强烈的构造推覆和冲断褶皱,同时诱发区域性深大断层的复活和继承性活动,促使基底变质流体向上迁移与流经地层发生水/岩反应(图9b),淋滤、萃取部分成矿金属(周家喜等,2010; Zhou et al., 2013c);循环形成中低温度、中低盐度、富 CO_2 酸性流体,在迁移过程中通过减压去气、中和反应等作用,产生大规模白云岩化,并形成富含Pb、Zn等成矿元素(以 Pb-Cl_2 、 Zn-Cl_2 等络合物形式存在)的富矿流体(柳贺昌等,1999;黄智龙等,2004;周家喜等,2010; Zhou et al., 2013a; 2013b; 朱路艳等,2016);受印支期向燕山期过渡动力学背景由挤压向伸展转换的影响,在构造-岩性-流体耦合作用下,成矿流体发生卸载(图9c),并与圈闭在赋矿地层中富硫低温流体发生混合作用,启动硫酸盐热化学还原作用产生还原硫,随着温度降低、pH值升高和氧逸度降低,在断层旁侧的次级虚脱空间、层间破碎带内形成层状、似层状矿体(图9d),在导矿断层中形成脉状铅锌矿体。随着成矿混合流体的演化,在纳雍枝形成以锌为主的矿体,而在杜家桥形成以铅为主的矿体。

6 结 论

五指山地区铅锌成矿与区域构造及其演化、矿田构造、赋矿岩性及沉积环境密切相关。构造是铅锌成矿的必要条件和主要控矿因素,鲕状白云岩是有利岩性,局限-半局限的台地-泻湖相沉积为有利岩相古地理条件。成矿物质来源于基底岩石和赋矿地层,矿体形成于早燕山期,是挤压向伸展转换的成矿动力学背景下流体混合成矿的产物。通过与MVT

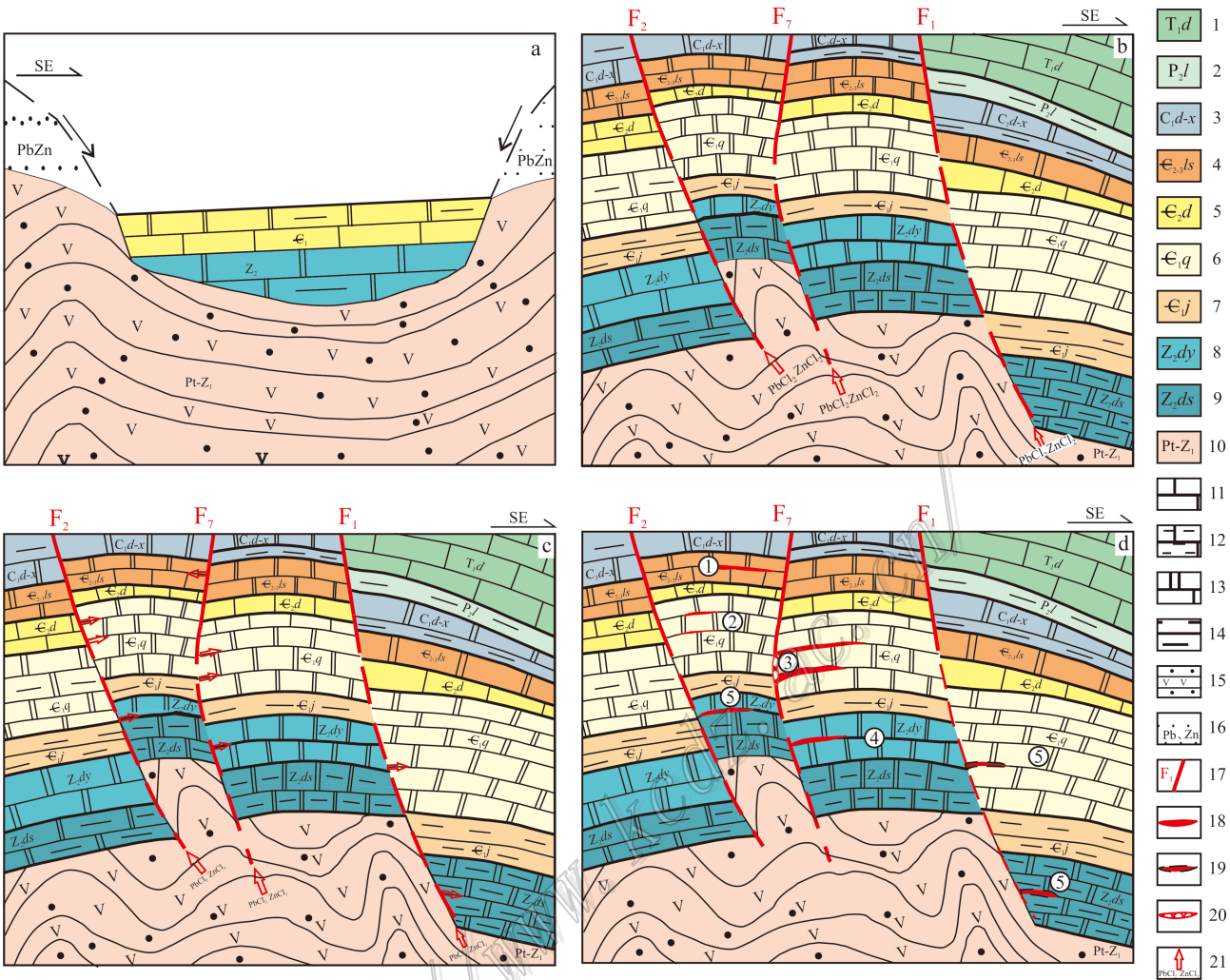


图 9 五指山背斜铅锌成矿模式

a. 基底隆起, 风化剥蚀, Z_2-E_1 沉积形成; b. 构造推覆引起基底流体向上运移; c. 流体沿区域构造及层间裂隙运移, 气液分异; d. 流体卸载, 富集成矿

1—下三叠统大冶组; 2—中二叠统梁山组; 3—下石炭统大埔组—一样摆组; 4—中-上寒武统娄山关组; 5—中寒武统陡坡寺组; 6—下寒武统清虚洞组; 7—下寒武统金顶山组; 8—上震旦统灯影组; 9—上震旦统陡山沱组; 10—新元古界-下震旦统; 11—灰岩; 12—泥质灰岩; 13—白云岩; 14—泥岩; 15—底砾岩; 16—富 Pb、Zn 风化物; 17—断层; 18—层状矿体; 19—预测矿体; 20—断层中脉状矿体; 21—流体运移方向; 矿体类型: ①—喻家坝型; ②—新麦型; ③—纳雍组型; ④—杜家桥型; ⑤—预测矿体

Fig. 9 Metallogenic model of Pb-Zn deposits in Wuzhishan anticline

a. Basement uplift, weathering and denudation, Z_2-E_1 formed by sedimentation; b. The basal fluid moving upward caused by tectonic thrust; c. The fluid flowing along the regional tectonics and gas-liquid differentiation; d. The fluid unloaded and enriched to form orebody

1—Lower Triassic Daye Group; 2—Middle Permian Liangshan Group; 3—Low Carbonic Dapu Group-Xiangbai Group; 4—Middle and Upper Cambrian Loushanguan Group; 5—Middle Cambrian Douposi Group; 6—Lower Cambrian Qingxudong Group; 7—Low Cambrian Jindingshan Group; 8—Upper Sinian Dengying Group; 9—Upper Sinian Doushantuo Group; 10—Neoproterozoic-Lower Sinian; 11—Limestone; 12—Argillaceous limestone; 13—Dolomite; 14—Mudstone; 15—Basal conglomerate; 16—Efflorescence rich in Pb and Zn; 17—Fold; 18—Stratified orebody; 19—Predicted stratified orebody; 20—Vein orebodies in fold; 21—Fluid migration direction; Orebody type: ①—Yujia type; ②—Xinmai type; ③—Nayongzh type; ④—Dujiqiao type; ⑤—Predicted orebody

矿床对比, 建立的五指山地区铅锌矿床成矿模式, 有望为研究区深部及邻区成矿预测提供理论指导。

志 谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见和多家勘查单位的基础资料!

References

- Chen G Y, Wang L, Fan Y M and Zheng W. 2015. Ore-search prospect of the deep subsurface in the Wuzhishan Pb-Zn ore field, Guizhou Province[J]. *Geology and Exploration*, 51(5) : 859-869 (in Chinese with English abstract).
- Chen M H, Mao J W, Qu W J, Wu L L, Phillip J U, Tony N, Zheng J M and Qin Y Z. 2007. Re-Os dating of arsenianpyrite from the Lannigou gold deposit, Zhenfeng, Guizhou Province, and its geological significances[J]. *Geology Review*, 53(3) : 371-383(in Chinese with English abstract).
- Chen M, Mao J, Li C, Zhang Z and Dang Y. 2015. Re-Os isochron ages for arsenopyrite from Carlin-like gold deposits in the Yunnan-Guizhou-Guangxi "golden triangle", southwestern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 64 : 316-327.
- Chen X W. 2013. The application of induced polarization method in lead-zinc deposit exploration of Nayongzhi area of Puding, Guizhou Province[J]. *Guizhou Geology*, 30(1) : 23-27 (in Chinese with English abstract).
- Claypool G E, Holser W T, Kaplan I R, Sakai H and Zak I. 1980. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation[J]. *Chemical Geology*, 28 : 199-260.
- Fan W M, Wang Y J, Peng T P, Miao L C and Guo F. 2004. Ar-Ar and U-Pb geochronology of Late Paleozoic basalts in western Guangxi and its constraints on the eruption age of Emeishan basalt magmatism[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(21) : 2318-2327 (in Chinese with English abstract).
- Guizhou Geological Survey. 2016. Regional geological records of Guizhou[M]. China Geological Survey, in press (in Chinese).
- Han Y, Wang J B, Zhu X Y, Wang L J, Wang Y L and Li S T. 2013. The characteristics and its geological significance of the fluid inclusion in the Fankou Pb-Zn deposit, Guangdong[J]. *Bulletin Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(1) : 81-86 (in Chinese with English abstract).
- Huang Z L, Chen J, Han R S, Li W B, Liu C Q, Zhang Z L, Ma D Y, Gao D R and Yang H L. 2004. The ore geochemistry and its ore genesis of Huize super large-scale Pb-Zn deposit : Discussion on the relationship between Pb-Zn mineralization and Emeishan basalt[M]. Beijing : Geological Publishing House. 1-187 (in Chinese).
- Institute of Geological Mineral Exploration, Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou. 2012. Resource reserve verification and exploration report of Lumaolin and Jinpo Pb-Zn ore deposits, Puding City, Guizhou Province[R]. (in Chinese).
- Jin C H, Li K, Huang L, Zhang Y and Shen Z W. 2015. Characteristics of sulfur and lead isotope composition and metallogenic material source of the Nayongzhi Pb-Zn deposit, northwestern Guizhou Province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 35(3) : 81-88 (in Chinese with English abstract).
- Jin Z G, Zhang L W and Ye J. 2007. Ore-forming material source of lead-zinc deposits in the northwestern Guizhou Province [J]. *Geology and Exploration*, 43(6) : 32-35 (in Chinese with English abstract).
- Jin Z G. 2008. The ore-control factors, ore-forming regularity and forecasting of Pb-Zn deposit, in northwestern Guizhou Province[M]. Beijing : Engine Industry Press. 1-105 (in Chinese).
- Jin Z G, Zhou J X, Huang Z L, Luo K, Gao J G, Peng S, Wang B and Chen X L. 2016. Ore genesis of the Nayongzhi Pb-Zn deposit, Puding City, Guizhou Province, China : Evidences from S and in situ Pb isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11) : 3441-3455 (in Chinese with English abstract).
- Keller J and Hoefs J. 1995. Stable isotope characteristics of recent natro-carbonatites from Oldoinyo Lengai [M]. *Carbonatite Volcanism* : Springer Berlin Heidelberg. 113-123.
- Liang J C, Liu Z K, Li X F, Lu X P, Meng L H and Li W J. 2009. Genesis of Laobao Pb-Zn deposit in North Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 29(2) : 161-169 (in Chinese with English abstract).
- Lin L, Zhu L D, Pang Y C, Xiong Y Z and Fu X G. 2002. Simulation experiment research on biomineralization of Xicheng lead and zinc deposit, Qinling[J]. *Mineral deposits*, 21(S1) : 423-426 (in Chinese with English abstract).
- Liu H C and Lin W D. 1999. Study on metallogenic laws of lead-zinc-silver deposits in northeastern Yunnan[M]. Kunming : Yunnan University Publication House. 1-426 (in Chinese).
- Liu W J and Zheng R C. 2000. Thermochemical sulphate reduction and Huayuan lead-zinc ore deposit in Hunan, China[J]. *Science in China (Series D : Earth Sciences)*, 30(5) : 456-464 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Cao L M, Li Z L, Wang H N, Chu T Q and Zhang J R. 1986. Geochemistry of elements [M]. Beijing : Science Press. 283-336 (in Chinese).
- Mao J W, Xie G Q, Li X F, Zhang Z H, Wang Y T, Wang Z L, Zhao C S, Yang F Q and Li H M. 2005. Geodynamic process and metallogeny : History and present research trend, with a special discussion on continental accretion and related metallogeny throughout geological history in South China [J]. *Mineral Deposits*, 24(3) : 193-205 (in Chinese with English abstract).

- No. 1 Geological Team, Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou. 2015. Resource reserve verification and exploration report of Shayan Pb-Zn ore deposit, Puding City, Guizhou Province[R]. (in Chinese).
- No. 104 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development Guizhou Province. 2014. Reconnaissance report of Pb-Zn ore deposits in the Wuzhishan area, Guizhou Province[R]. (in Chinese).
- Ohmoto H and Goldhaber M B. 1997. Sulfur and carbon isotopes[A]. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits[M]. 3rd edition. New York: Wiley. 517-611.
- Peng S, Jin Z G, Lin G S, Zhu Y Q and Wang B. 2016. Analysis of ore-controlling factors and metallogenic model of Wuzhishan lead-zinc deposit, Guizhou: A case study of Nayongzhi deposit [J]. Mineral Exploration, 7(3): 463-470 (in Chinese with English abstract).
- Rui Z Y, Ye J H, Zhang L S, Wang L S and Mei Y X. 2004. Pb-Zn deposits on the perimeter of the Yangtze craton and on the margins of its uplifts [J]. Chinese Geology, 31(4): 337-346 (in Chinese with English abstract).
- Shen S, Jin M X and Lu Y F. 1988. Mineralization law and prospect for main ore deposits in the Xichang-Central Yunnan area [M]. Chongqing Publish House. 1-276 (in Chinese).
- Tan H, Wang G R and Lan A P. 2012. Geologic features and metallogenic regularity of Dujiacao lead-zinc deposit of Zhijin, Guizhou [J]. Guizhou Geology, 29(3): 169-172 (in Chinese with English abstract).
- Wang T F. 2004. Geotectonic program of China [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-287 (in Chinese).
- Wang Y, Lin F C, Jin C H, Li K and Mi X. 2016. The geological characteristics prospecting marks of the Xinmai Pb-Zn deposit, Wuzhishan ore concentration area, Guizhou Province [J]. World Nonferrous Metals, 10: 99-102 (in Chinese with English abstract).
- Wu X B, Zhu Y Q, Liao S H and Suo R Q. 2013. Geological characteristics and prospecting potential of Nayongzhi Pb-Zn deposit in Wuzhishan anticline [J]. Mineral Resources and Geology, 27(1): 26-31 (in Chinese with English abstract).
- Ye L, Li Z L, Hu Y S, Huang Z L, Zhou J X, Fan H F and Danyushevskiy L. 2016. Trace elements in sulfide from the Tianbaoshan Pb-Zn deposit, Sichuan Province, China: A LA-ICPMS study [J]. Acta Petrologica Sinica, 32(11): 3377-3393 (in Chinese with English abstract).
- Yuan B, Mao J W, Yan X H, Wu Y, Zhang F and Zhao L L. 2014. Sources of metallogenic materials and metallogenic mechanism of Daliangzi ore field in Sichuan Province: Constraints from geochemistry of S, C, H, O, Sr isotope and trace element in sphalerite [J]. Acta Petrologica Sinica, 30(1): 209-220 (in Chinese with English abstract).
- Yue G Y, Zhang S J and Yang W N. 1994. Structural deformation patterns and tectonic stress field in west-central Guizhou [J]. Scientia Geologica Sinica, 29(1): 10-18 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C Q, Wu Y, Wang D H, Rui Z Y, Lou D B and Chen Z H. 2014. Brief introduction on metallogeny of Pb-Zn deposits in China [J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2252-2268 (in Chinese with English abstract).
- Zhen S M, Zhu X Y, Li Y S, Du Z Z, Gong X D, Gong F Y and Qi F Y. 2013. A tentative discussion on Mississippi valley-type deposits [J]. Mineral Deposits, 32(2): 367-379 (in Chinese with English abstract).
- Zhou C X, Wei C S, Guo J Y and Li C Y. 2001. The source of metals in the Qilinchang Zn-Pb deposit, northeastern Yunnan, China: Pb-Sr isotope constraints [J]. Econ. Geol., 96(3): 583-598.
- Zhou J X, Huang Z L, Zhou G F, Jin Z G, Li X B, Ding W and Gu J. 2010. Sources of the ore metals of the Tianqiao Pb-Zn deposit in northwestern Guizhou province: Constraints from S, Pb isotope and REE geochemistry [J]. Geological Review, 56(4): 513-524 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J X, Huang Z L, Zhou G F and Zeng Q S. 2012. C, O isotope and REE geochemistry of the hydrothermal calcites from the Tianqiao Pb-Zn ore deposit in NW Guizhou province, China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 36(1): 93-101 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J X, Huang Z L, Zhou M F, Li X B and Jin Z G. 2013a. Constraints of C-O-S-Pb isotope compositions and Rb-Sr isotopic age on the origin of the Tianqiao carbonate-hosted Pb-Zn deposit, SW China [J]. Ore Geology Reviews, 53: 77-92.
- Zhou J X, Huang Z L and Bao G P. 2013b. Geological and sulfur-lead-strontium isotopic studies of the Shaojiwan Pb-Zn deposit, southwest China: Implications for the origin of hydrothermal fluids [J]. Journal of Geochemical Exploration, 128: 51-61.
- Zhou J X, Huang Z L, Bao G P and Gao J G. 2013c. Sources and thermo-chemical sulfate reduction for reduced sulfur in the hydrothermal fluids, southeastern SYG Pb-Zn metallogenic province, SW China [J]. Journal of Earth Sciences, 24: 759-771.
- Zhou J X, Huang Z L, Zhou M F, Zhu X K and Muchez P. 2014a. Zinc, sulfur and lead isotopic variations in carbonate-hosted Pb-Zn sulfide deposits, southwest China [J]. Ore Geology Reviews, 58: 41-54.
- Zhou J X, Huang Z L, Lü Z C, Zhu X K, Gao J G and Mirnejad H.

- 2014b. Geology, isotope geochemistry and ore genesis of the Shanshulin carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China [J]. *Ore Geology Reviews*, 63 :209-225.
- Zhou J X, Bai J H, Huang Z L, Zhu D, Yan Z F and Lü Z C. 2015. Geology, isotope geochemistry and geochronology of the Jinshachang carbonate-hosted Pb-Zn deposit, South China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98 :272-284.
- Zhu L Y, Su W C, Shen N P, Dong W D, Cai J L, Zhang Z W, Zhao H and Xie T. 2016. Fluid inclusion and sulfur isotopic studies of lead-zinc deposits, northwestern Guizhou, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32 (11) :3431-3440 (in Chinese with English abstract).
- Zhu X Y, Wang J B, Liu S B, Wang Y L, Han Y, Zhen S M and Guo N N. 2013. Metallogenic age of MVT Pb-Zn deposit in Fankou Guangdong: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon dating diatase [J]. *Acta Geologica Sinica* 87 (2) :167-176 (in Chinese with English abstract).
- Zou J B, Xiao K and Li K. 2009. Geologic characters and control factors of lead-zinc deposit in Wuzhishan, Guizhou [J]. *Guizhou Geology*, 26(2) :101-104 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈国勇, 王亮, 范玉梅, 郑伟. 2015. 贵州五指山铅锌矿田深部找矿远景分析 [J]. *地质与勘探*, 51(5) :859-869.
- 陈懋弘, 毛景文, 屈文俊, 吴六灵, Phillip J UTTLEY, Tony NORMAN, 郑建民, 秦运忠. 2007. 贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿床含铀黄铁矿 Re-Os 同位素测年及地质意义 [J]. *地质论评*, 53 (3) :371-383.
- 陈贤武. 2013. 激发极化法在贵州普定县纳雍枝地区铅锌矿勘查中的应用 [J]. *贵州地质*, 30(1) :23-27.
- 范蔚茗, 王岳军, 彭头平, 苗来成, 郭峰. 2004. 桂西晚古生代玄武岩 Ar-Ar 和 U-Pb 年代学及其对峨眉山玄武岩省喷发时代的约束 [J]. *科学通报*, 49(18) :1892-1900.
- 贵州省有色金属和核工业地质勘查局一总队. 2015. 贵州省普定县砂岩铅锌矿资源储量核实及勘探报告 [R].
- 贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院. 2012. 贵州省普定县芦茅林-金坡铅锌矿资源储量核实及勘探报告 [R].
- 贵州省地质矿产勘查开发局 104 地质大队. 2014. 贵州省五指山地区铅锌矿整装勘查报告 [R].
- 贵州省地质调查院. 2016. 贵州区域地质志 [M]. 中国地质调查局. 待出版.
- 韩英, 王京彬, 祝新友, 王莉娟, 王艳丽, 李顺庭. 2013. 广东凡口铅锌矿床流体包裹体特征及地质意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 32(1) :81-86.
- 黄智龙, 陈进, 韩润生, 李文博, 刘丛强, 张振亮, 马德云, 高德荣, 杨海林. 2004. 云南会泽超大型铅锌矿床地球化学及成因——兼论峨眉山玄武岩与铅锌成矿的关系 [M]. 北京:地质出版社. 1-187.
- 金灿海, 李坤, 黄林, 张●, 沈战武. 2015. 黔西北纳雍枝铅锌矿硫铅同位素组成特征及成矿物质来源 [J]. *矿物岩石*, 35(3) :81-88.
- 金中国, 张伦尉, 叶静. 2007. 黔西北地区铅锌矿床成矿物质来源探讨 [J]. *地质与勘探*, 43(6) :32-35.
- 金中国. 2008. 黔西北地区铅锌矿控矿因素、成矿规律与找矿预测 [M]. 北京:冶金工业出版社. 1-105.
- 金中国, 周家喜, 黄智龙, 罗开, 高建国, 彭松, 王兵, 陈兴龙. 2016. 贵州普定纳雍枝铅锌矿床成因:S 和原位 Pb 同位素证据 [J]. *岩石学报*, 32(11) :3441-3455.
- 梁金城, 刘之葵, 李晓峰, 陆小平, 蒙龙华, 李文杰. 2009. 桂北老堡铅锌矿床的成因研究 [J]. *桂林工学院学报*, 29(2) :161-168.
- 林丽, 朱立东, 庞艳春, 熊永驻, 付修根. 2002. 西成铅锌矿床的生物成矿模拟实验研究 [J]. *矿床地质*, 21(增刊) :423-426.
- 刘文均, 郑荣才. 2001. 硫酸盐热化学还原反应与花垣铅锌矿床 [J]. *中国科学(地球科学)*, 30(5) :456-464.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1986. 元素地球化学 [M]. 北京:科学出版社. 283-336.
- 柳贺昌, 林文达. 1999. 滇东北铅锌银矿床规律研究 [M]. 昆明:云南大学出版社. 1-426.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张作衡, 王义天, 王志良, 赵财胜, 杨富全, 李厚民. 2005. 大陆动力学演化与成矿研究:历史与现状——兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用 [J]. *矿床地质*, 24(3) :193-205.
- 彭松, 金中国, 林贵生, 朱尤青, 王兵. 2016. 贵州五指山铅锌矿区控矿因素及成矿模式研究——以纳雍枝矿床为例 [J]. *矿产勘查*, 7 (3) :463-470.
- 芮宗瑶, 叶锦华, 张立生, 王龙生, 梅燕雄. 2004. 扬子克拉通周边及其隆起边缘的铅锌矿床 [J]. *中国地质*, 31(4) :337-346.
- 沈苏, 金明霞, 陆元法. 1988. 西昌-滇中地区主要矿产成矿规律及找矿方向 [M]. 重庆:重庆出版社. 1-276.
- 谭华, 王国荣, 兰安平. 2012. 贵州省金县杜家桥铅锌矿床地质特征及成矿规律浅析 [J]. *贵州地质*, 29(3) :169-172.
- 万天丰. 2004. 中国大地构造学纲要 [M]. 北京:地质出版社. 1-287.
- 王勇, 林方成, 金灿海, 李坤, 秘贤. 2016. 贵州省五指山矿集区新麦铅锌矿床地质特征与找矿标志 [J]. *世界有色金属*, 10 :99-102.
- 吴先彪, 朱尤清, 廖树衡, 锁瑞强. 2013. 五指山背斜纳雍枝铅锌矿地质特征及找矿前景分析 [J]. *矿产与地质*, 27(1) :26-31.
- 叶霖, 李珍立, 胡宇思, 黄智龙, 周家喜, 樊海峰, Danyushevskiy

- Leonid. 2016. 四川天宝山铅锌矿床硫化物微量元素组成: LA-ICPMS 研究[J]. 岩石学报, 32(11): 3377-3393.
- 袁波, 毛景文, 闫兴虎, 吴越, 张锋, 赵亮亮. 2014. 四川大梁子铅锌矿成矿物质来源与成矿机制: 硫、碳、氢、氧、锶同位素及闪锌矿微量元素制约[J]. 岩石学报, 30(1): 209-220.
- 乐光禹, 张时俊, 杨武年. 1994. 贵州中西部的构造格局与构造应力场[J]. 地质科学, 29(1): 10-18.
- 张长青, 吴越, 王登红, 芮宗瑶, 姜德波, 陈郑辉. 2014. 中国铅锌矿床成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12): 2252-2268.
- 甄世民, 祝新友, 李永胜, 杜泽忠, 巩小栋, 公凡影, 齐钊宇. 2013. 关于密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床的一些探讨[J]. 矿床地质, 32(2): 367-379.
- 周家喜, 黄智龙, 周国富, 金中国, 李晓彪, 丁伟, 谷静. 2010. 黔西北赫章天桥铅锌矿床成矿物质来源: S、Pb 同位素和 REE 制约[J]. 地质论评, 56(4): 513-524.
- 周家喜, 黄智龙, 周国富, 曾乔松. 2012. 黔西北天桥铅锌矿床热液方解石 C-O 同位素和 REE 地球化学[J]. 大地构造与成矿学, 36(1): 93-101.
- 朱路艳, 苏文超, 沈能平, 董文斗, 蔡佳丽, 张正伟, 赵海, 谢鹏. 2016. 黔西北地区铅锌矿床流体包裹体与硫同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 32(11): 3431-3440.
- 祝新友, 王京彬, 刘慎波, 王艳丽, 韩英, 甄世民, 郭宁宁. 2013. 广东凡口 MVT 铅锌矿床成矿年代——来自辉绿岩锆石 SHRIMP 定年证据[J]. 地质学报, 87(2): 167-176.
- 邹建波, 肖凯, 李坤. 2009. 贵州五指山地区铅锌矿床地质特征及其控制因素[J]. 贵州地质, 26(2): 101-104.