

贵州普定纳雍枝铅锌矿矿床成因: S 和原位 Pb 同位素证据*

金中国^{1,2} 周家喜^{1**} 黄智龙¹ 罗开^{1,3} 高建国⁴ 彭松² 王兵^{2,4} 陈兴龙²

JIN ZhongGuo^{1,2}, ZHOU JiaXi^{1**}, HUANG ZhiLong¹, LUO Kai^{1,3}, GAO JianGuo⁴, PENG Song², WANG Bing^{2,4} and CHEN XingLong²

1. 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, 贵阳 550081
 2. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵阳 550005
 3. 中国科学院大学, 北京 100049
 4. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093
 1. Stake Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
 2. Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, China
 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
 4. Faculty of Land Resource and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China
- 2016-05-15 收稿, 2016-08-21 改回.

Jin ZG, Zhou JX, Huang ZL, Luo K, Gao JG, Peng S, Wang B and Chen XL. 2016. Ore genesis of the Nayongzhi Pb-Zn deposit, Puding City, Guizhou Province, China: Evidences from S and in situ Pb isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11): 3441–3455

Abstract The Nayongzhi Pb-Zn deposit discovered during 2011 to 2015, in the north-central part of the SE wing Wuzhishan anticline, is located in the western Yangtze Block, Southwest China and is an important component of the NW Guizhou Pb-Zn metallogenic district. In the Nayongzhi mining area, more than twenty Pb-Zn ore bodies have been controlled until now, with more than 1.35 million tones of Zn and Pb metal reserves at grades range from 1.11% to 15.65% Zn and 0.59% to 0.97% Pb, respectively, indicating that the Nayongzhi deposit is the largest Pb-Zn deposit in the Guizhou part of the Sichuan-Yunnan-Guizhou (SYG) Pb-Zn metallogenic province. Ore bodies in this deposit mainly occur as stratiform, stratiform-like, lentoid (scrotiform) and steep veined. Besides the steep veined ore bodies occur along F₇ thrust fault, the other types of ore bodies were hosted by dolostone of Lower Cambrian Qingxudong Formation and Upper Sinian Dengying Formation and had the similar occurrence to that of the ore-hosting strata. Ore bodies are characterized by massive, brecciated, veinlet and disseminated. Ore minerals are given priority to with sphalerite, followed by galena and pyrite. Gangue minerals are mainly calcite and dolomite, with a small amount of quartz and barite. $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ values of sulfide minerals range from 15.94‰ to 25.49‰ (mean 22.41‰, n = 21), of which pyrite has $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ value of 22.06‰, sphalerite has $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ values ranging from 19.37‰ to 25.49‰ (mean 23.17‰, n = 17) and galena has $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ values ranging from 15.94‰ to 19.70‰ (mean 18.23‰, n = 3). The $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrite, sphalerite and galena do not present the feature of $\delta^{34}\text{S}_{\text{pyrite}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{sphalerite}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{galena}}$, suggesting that the sulfur isotope fractionation in hydrothermal system did not reach balance. Together with a small amount of barite in sulfide ores, we believe that the $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ value of hydrothermal fluid was higher than those of sulfide minerals. Therefore, reduced sulfur in the ore-forming fluid was likely the produce of marine sulfate in the ore-hosting Cambrian and Sinian strata by thermal-chemical reduction. In situ Pb isotopes of galena analyzed by fs LA-MC-ICPMS demonstrate that $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.828 \sim 17.860$ (average 17.841), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.648 \sim 15.666$ (average 15.659), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.922 \sim 37.979$ (average 37.960, n = 32). These Pb isotopic data plotted into the average evolution curve of upper crust, indicating a clearly crustal source of Pb and the

* 本文受国家重点基础研究发展规划项目(2014CB440905)、国家自然科学基金重点项目(41430315)和国家自然科学基金项目(41272111)联合资助。

第一作者简介: 金中国, 男, 1965年生, 博士, 研究员, 主要从事矿产普查与勘探及研究, E-mail: gzyjzg@sina.com

** 通讯作者: 周家喜, 男, 1982年生, 博士, 副研究员, 主要从事矿床地球化学研究, E-mail: zhoujiayi@vip.gyig.ac.cn

basement rocks was likely the most sources. Studies on ore deposit geology, mineralogy, S isotopes and in situ Pb isotopes reveal that the Nayongzhi Pb-Zn deposit is a MVT deposit with mixed fluids from basement and wall rocks, respectively, which formed sulfide ores likely during Yanshanian and related to the evolution of the Youjiang basin.

Key words S isotopes; In situ Pb isotopes; Sources of ore-forming mineralized elements; Ore genesis; Nayongzhi Pb-Zn deposit, Guizhou Province

摘要 通过近五年(2011~2015)勘查实现找矿重大突破的贵州普定纳雍枝铅锌矿床,位于扬子陆块西南缘,五指山背斜南东翼北中部,是黔西北铅锌成矿区的重要组成部分。矿区内已发现20余个铅锌矿体,探获铅锌金属资源储量超135万吨,是川滇黔接壤铅锌矿集区贵州境内目前已发现和探明规模最大的铅锌矿床。主矿体多呈层状、似层状、透镜状和陡倾斜脉状产出,除了陡倾斜脉状矿体产于 F_7 断层破碎带,其余(似)层状矿体均产于下寒武统清虚洞组 and 上震旦统灯影组白云岩中,与围岩产状一致,层控特征明显。其矿石类型主要有块状、角砾状、细脉状和浸染状等,矿石矿物以闪锌矿为主,其次为方铅矿和黄铁矿,脉石矿物以方解石、白云石为主,含少量石英,偶见重晶石。本次研究表明,该矿床硫化物 $\delta^{34}S_{\text{CDT}}$ 值介于15.94‰~25.49‰之间,均值为22.41‰($n=21$),其中黄铁矿 $\delta^{34}S_{\text{CDT}}$ 值为22.06‰,闪锌矿 $\delta^{34}S_{\text{CDT}}$ 值为19.37‰~25.49‰,均值为23.17‰($n=17$),方铅矿 $\delta^{34}S_{\text{CDT}}$ 值为15.94‰~19.70‰($n=3$),均值为18.23‰。各类硫化物 $\delta^{34}S$ 值部分重叠,总体上不具有 $\delta^{34}S_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}S_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}S_{\text{方铅矿}}$ 的特征,暗示硫同位素在硫化物矿物间的分馏未达到平衡。此外,矿石存有少量硫酸盐矿物(重晶石),暗示成矿流体的 $\delta^{34}S_{\text{SS}}$ 值应高于硫化物的平均 $\delta^{34}S$ 值(22.41‰),接近赋矿地层中海相硫酸盐岩的 $\delta^{34}S$ 值(22‰~28‰)。因此,成矿流体中的还原硫最可能为海相硫酸盐岩热化学还原的产物,来源于赋矿地层中的蒸发岩。应用飞秒激光剥蚀多接收器等离子体质谱法首次获得了纳雍枝铅锌矿中方铅矿原位Pb同位素数据,结果显示Pb同位素组成非常集中($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.828\sim17.860$,均值17.841, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.648\sim15.666$,均值15.659, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.922\sim37.979$,均值37.960, $n=32$),位于上地壳平均Pb演化曲线上,表明其成矿物质具壳源特征,可能来源于基底岩石。综合矿床地质、矿物学、S和原位Pb同位素数据,本文认为纳雍枝铅锌矿床S主要来源于其赋矿地层,Pb等金属元素主要来源于基底岩石,这两组流体的混合是导致其金属硫化物沉淀成矿的重要机制,成矿流体具后生、低温热液等特征,属于密西西比河谷型(MVT)矿床,很可能形成于燕山期,与右江盆地演化有关。

关键词 硫同位素; 原位铅同位素; 成矿物质来源; 矿床成因; 贵州纳雍枝铅锌矿床

中图法分类号 P597.2; P611; P618.42; P618.43

1 引言

位于扬子陆块西南缘的四川(川)-云南(滇)-贵州(黔)三省接壤区是我国著名的铅锌多金属矿集区(Zheng and Wang, 1991; 柳贺昌和林文达, 1999; Zhou *et al.*, 2001; 黄智龙等, 2004; 金中国, 2008; Zhou *et al.*, 2013a, 2014a)。川滇黔铅锌矿集区内目前已发现铅锌矿床(点)500余处(柳贺昌和林文达(1999)统计为400余处),是华南大面积低温成矿域的重要组成部分之一(Hu and Zhou, 2012; 胡瑞忠等, 2015),也是我国重要的铅锌生产基地之一(黄智龙等, 2004)。与相邻的川西南和滇东北铅锌成矿区“多、富、大”的成矿特征相比,黔西北铅锌成矿区已发现的铅锌矿床,无论是数量、品位还是储量都要逊色得多(王峰等, 2015)。

近年来(2011~2015),在贵州地质科技工作者的共同努力下,在位于黔西北铅锌成矿区东南部的五指山背斜区内实现了重大找矿突破(黄林等, 2006; 谭华, 2007; 陈贤武, 2013; 吴先彪等, 2013; 陈国勇等, 2015; 彭松等, 2016),发现了杜家桥(中型)、纳雍枝(大型)、那润(中型)等多个铅锌矿床(点),其中以纳雍枝铅锌矿床的规模最大、勘探程度最高,提交勘探的铅锌金属资源储量约135万吨(彭松等, 2016),远景资源量超过200万吨(陈国勇等, 2015),是黔西

北铅锌成矿区区内目前已发现和探明规模最大的铅锌矿床。

与找矿勘查已经取得的成果相比,五指山地区的地质研究工作相对滞后,尽管部分学者对区内纳雍枝、杜家桥等代表性矿床进行了较为详细的成矿地质特征、控矿因素和勘查方法与找矿前景分析(黄林等, 2006; 谭华, 2007; 邹建波等, 2009; 黄林和张坤, 2010; 谭华等, 2012; 陈贤武, 2013; 吴先彪等, 2013; 杨晓飞和朱尤青, 2014; 陈国勇等, 2015; 彭松等, 2016),但对有关矿床的成矿物质来源、成矿流体特征、成矿机理等方面的研究还很薄弱,且对矿床类型也存有海底热水喷流沉积(陈国勇等, 2015)、沉积改造(金灿海等, 2015)和MVT矿床(彭松等, 2016)等不同认识。

硫、铅同位素是示踪硫化物矿床成矿流体中硫和金属来源的最直接有效手段之一,广泛应用于各类硫化物矿床成矿物质和流体来源示踪以及矿床成因等的研究(Zhou *et al.*, 2013b, 2014b; 程杨等, 2015; 聂飞等, 2015; 高永宝等, 2016)。以往分析硫化物的硫、铅同位素组成时多采用单矿物粉末样品,很难保证所选单矿物颗粒纯净,使得测试结果常为混合值,这很可能掩盖了一些重要的地质信息。在激光剥蚀技术和质谱仪实现完美结合后,高精度原位测试矿物微观尺度上的元素含量和同位素组成变为现实,并得到了急速发展和广泛应用(Ye *et al.*, 2011; 袁洪林等, 2013, 2015; Bao *et al.*, 2016)。本文在详细的矿床学研究基础上,率先

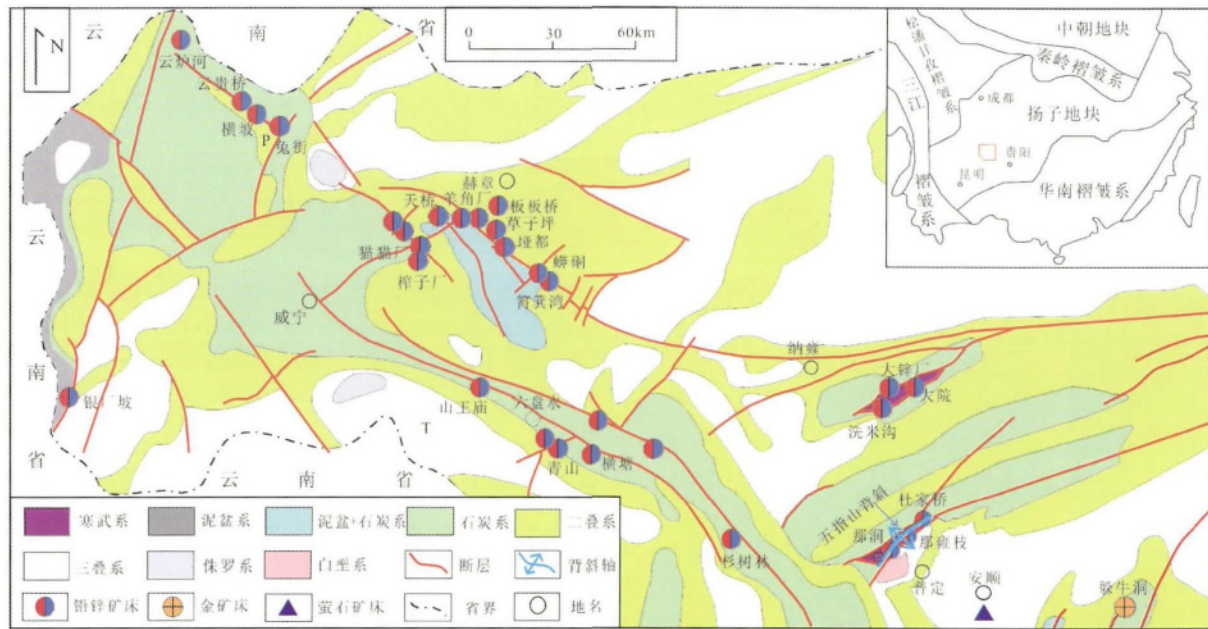


图1 黔西北地区地质略图(据金中国,2008; Zhou *et al.*,2013a 修改)

Fig.1 The geological sketch map of northwest Guizhou Pb-Zn metallogenic district (modified after Jin,2008; Zhou *et al.*,2013a)

报道川滇黔铅锌矿集区内首个飞秒激光剥蚀多接收器等离子体质谱分析方铅矿铅同位素组成研究的成果,并结合矿床学、矿物学及硫化物硫同位素分析资料等,揭示纳雍枝铅锌矿床的成矿物质来源与演化过程,通过比较矿床学分析,探讨矿床的成因类型,为进一步实现黔西北及邻区同类型矿床的重大找矿突破提供理论指导。

2 区域地质背景及矿床地质特征

2.1 区域地质背景

扬子陆块由下部变质基底和上部沉积盖层组成,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地层,其中中-上寒武统、奥陶系、中-上志留统、下泥盆统大部分区域缺失,侏罗系、白垩系零星分布(图1),震旦系灯影组仅在银厂坡和五指山背斜、大院背斜有出露,上二叠统峨眉山玄武岩广泛产出,但在五指山背斜区剥蚀殆尽。研究区经历了古太古代-新元古代基底形成、Rodinia 大陆裂解、寒武纪-石炭纪被动大陆边缘盆地演化、二叠纪-早三叠世陆内裂谷演化、三叠纪古特提斯洋闭合、晚三叠世-白垩纪陆相盆地演化以及古近纪-第四纪印度板块碰撞等一系列重大地质事件,导致构造变形复杂,主体构造呈 NW 向和 NNE-NE 向展布,主要有 NW 向紫云-垭都褶皱带,威宁-水城褶皱带和断陷盆地, NNE 向银厂坡-云炉河褶皱带, NE 向大院背斜和五指山背斜以及 EW 向纳雍-息烽、NE 向普安-贵阳隐伏断裂带等(金中国,2008; Zhou *et al.*,2013a; Li *et al.*,2015)。研究显示区内已发现的 140 余个铅锌矿床(点),主要沿区内构造带成群成带展布,矿体产出受地层(上震旦统-中二叠统,其

中石炭系大蒲组、黄龙组和下寒武统清虚洞组是主要赋矿层位)、岩性(碳酸盐岩,特别是白云岩)、构造(高角度逆冲断层+层间破碎带+层间滑动面)、岩浆岩(辉绿岩旁侧、峨眉山玄武岩之下)、岩相及沉积环境(上泥质(页)岩相+下碳酸盐岩相,封闭、半封闭还原泻湖环境,水下脊状隆起内侧)“五位一体”控制,岩性优于层位,构造是主控因素(金中国,2008; 周家喜等,2010,2012; Zhou *et al.*,2011,2013b,c,d,2015)。

五指山背斜位于黔西北铅锌成矿区东南部(图1),紧邻右江盆地和区域性紫云-垭都深大断裂带(陈国勇等,2015; 金灿海等,2015; 彭松等,2016)。五指山背斜区内出露的地层(图2)主要有上震旦统灯影组,岩性以白云岩为主;下寒武统金顶山组(以粉砂岩和粉砂质粘土岩为主)、清虚洞组(由白云岩、碳泥质白云岩构成);中寒武统陡坡寺组,主要为泥质白云岩、白云质砂岩;中-上寒武统娄山关群,由白云岩、硅质条带白云岩组成;下石炭统祥摆组(以砂岩、泥岩为主)、大蒲组(由泥质白云岩、白云岩、粘土岩构成);下二叠统梁山组,主要为粘土岩、砂岩;上三叠统大冶组,主要为灰岩、泥灰岩、白云岩。铅锌矿体的赋矿地层为寒武系清虚洞组和震旦系灯影组(谭华,2007; 陈国勇等,2015),其中以清虚洞组白云岩为主。

该区构造主要发育 NE 向褶皱以及 NE、SN、NEE 和 NW 向断层(图2)。五指山背斜属于侏罗山式褶皱构造,为一 NE 向不对称倒转背斜,轴部走向 N45°E,长约 16km,宽约 4km,核部地层为震旦系和寒武系,受断层影响,岩层产状变化较大,两翼出露石炭系、二叠系和三叠系,其中北西翼出露石炭系、二叠系,岩层倾角 15°~23°,被杜家桥断层(F₂)破

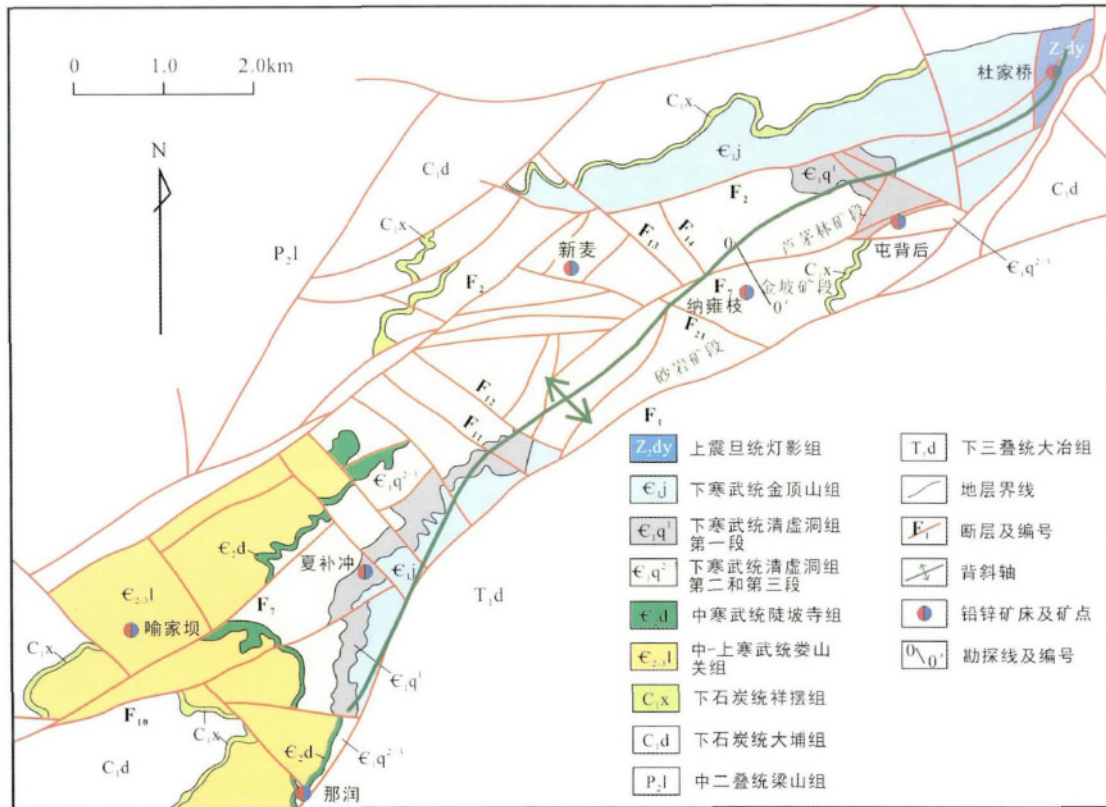


图2 五指山背斜地质略图(据谭华, 2007 修改)

Fig. 2 The geological sketch map of the Wuzhishan anticline (modified after Tan, 2007)

坏,南东翼出露三叠系,岩层倾角 $17^{\circ} \sim 56^{\circ}$,被那润断层(F_1)破坏。五指山背斜定型于燕山期(吴先彪等, 2013; 陈国勇等, 2015)。那润正断层(F_1):走向 NE,倾向 SE,长约 6km,断距大于 500m,NE 段倾角 40° ,中-南段倾角 $60^{\circ} \sim 65^{\circ}$,南西交紫云-垭都断裂;杜家桥逆断层(F_2):走向 $N30^{\circ}E$,倾向 SE,倾角 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$,长约 2.7km,宽约 30m,断距约 100m; F_7 逆断层:倾向 N,倾角 $51^{\circ} \sim 75^{\circ}$,南下盘地层倾角一般为 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$,北上盘地层倾角缓,近于水平,断层破碎带宽 1~10m。五指山背斜及 F_1 、 F_2 和 F_7 等断层对区内铅锌矿床具有明显的控制作用(图 2)。

五指山背斜区未见岩浆岩产出,外围峨眉山玄武岩及同源辉绿岩发育(金中国, 2008)。目前背斜区内由北东向南西依次分布杜家桥、屯背后、纳雍枝、新麦、夏补冲、那润和喻家坝等铅锌矿床(点)(图 2),其中杜家桥和那润为中型,纳雍枝和新麦为大型,以那雍枝铅锌矿床规模大、品位高最具代表。

2.2 矿床地质特征

2.2.1 矿区地层和构造

纳雍枝矿床位于五指山背斜南东翼北中部,矿区出露的地层主要为震旦系灯影组、寒武系金顶山组和清虚洞组(图 3),其中清虚洞组按岩性可进一步分三段,由下至上简述如

下:第一段,总厚度 105~160m,分为 6 个岩性层,由下至上依次为:①灰色中厚层鲕豆状、瘤状白云岩,厚 5~10m;②暗灰色厚层含泥质白云岩,厚 30~50m;③灰色厚层鲕状、瘤状白云岩,厚 20~30m;④灰色厚层粗晶白云岩,晶洞发育,厚 0~10m;⑤灰色厚层含粉砂质中粗晶白云岩,厚 20m;⑥深灰色中至厚层含不规则炭泥质条带细晶白云岩,厚 20~40m。第二段,可分两层,下层为 a 层:中厚层粉-中晶白云岩,间夹泥质条带细晶白云岩,底部 3~5m 含砂泥质较重,厚 60~80m;上层为 b 层:灰色厚层中-细晶白云岩,偶夹鲕粒白云岩、瘤状白云岩,底部 5~8m 含砂泥质较重,厚 70~90m。第三段,由灰色薄层含砂泥质细晶白云岩夹浅灰色细晶白云岩组成,底部 3~6m 含砂泥质较重,厚 40~80m。清虚洞组第一段和第二段 a 层白云岩是那雍枝矿床铅锌矿体的直接赋矿围岩(吴先彪等, 2013; 陈国勇等, 2015; 金灿海等, 2015; 彭松等, 2016)。

矿区内无岩浆岩出露,构造形迹为一单斜构造,发育的主要构造有 NE 向 F_1 、 F_7 断层和 NW 向 F_{21} 断层等(图 2),其中 NW 向构造对纳雍枝铅锌矿体具有明显的控制作用(图 2、图 4)。

2.2.2 矿体特征

纳雍枝矿床由芦茅林、金坡和砂岩三个矿段组成(图 2),属同矿(层)体,矿段划分是探矿权设置所致。芦茅林矿

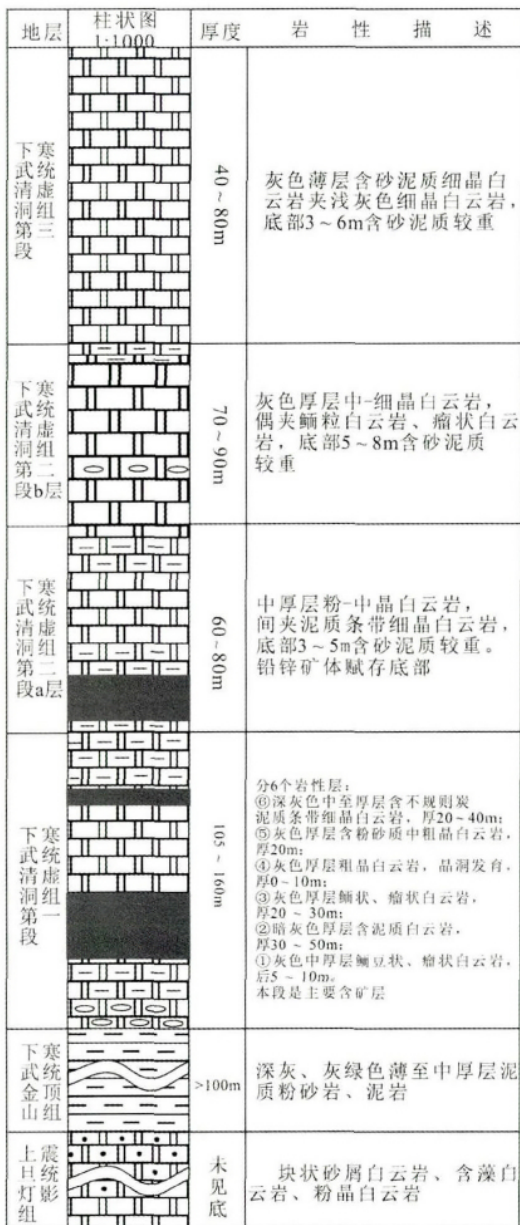


图3 纳雍枝铅锌矿床地层柱状图

Fig. 3 The stratigraphic column of the Nayongzhi Pb-Zn deposit

段位于矿区北东部,矿体长 50 ~ 1034m,宽 60 ~ 730m,厚 0.35 ~ 11.5m,Zn 平均品位 4.0%,Pb 平均品位 0.60%。提交勘探的铅锌金属量约 38 万吨;金坡矿段位于矿区中部,矿体长 50 ~ 1266m,宽 30 ~ 375m,厚 1.0 ~ 21.3m,Zn 平均品位 5.60%,Pb 平均品位 0.64%。提交勘探的铅锌金属量超 44 万吨;砂岩矿段位于矿区西南部,矿体长 40 ~ 980m,厚 0.75 ~ 13.5m,Zn 平均品位 5.62%,Pb 平均品位 0.99%。提交勘探的铅锌金属量超 53 万吨。三个矿段提交勘探的铅锌金属总资源储量超 135 万吨,达到大型铅锌矿床规模(彭松等, 2016)。

纳雍枝铅锌矿床三个矿段控制的矿层(体)多达 9 个,揭露的矿体 20 余个,这些矿层(体)的地质特征基本相似,均分布于断层 F₁ 与 F₇ 的断夹块之间,其中(似)层状矿体的产状平缓,倾向 SE。按照产状和空间关系,可将(似)层状由下至上合并为 I、II 和 III 三个含矿层(图 4)。

I 含矿层产于清虚洞组第一段第三层瘤状白云岩中,见少量细粒黄铁矿,矿层顶、底板均为含泥质白云岩。矿体呈似层状产出,产状与围岩基本一致。矿体走向 NE,长约 1200m,倾向 SE,倾斜控制宽 320m,倾角 8° ~ 20°,厚度 0.5 ~ 11m,平均为 3.95m,Zn 品位 1.04% ~ 11.84%,平均为 3.97%;II 含矿层分布在清虚洞组第一段第五层白云岩中,矿石中细粒黄铁矿发育,矿层直接顶板为含炭泥质白云岩,底板距 I 含矿层顶部 20 ~ 25m。矿体呈似层状产出,产状与 I 含矿层一致。该矿层较为稳定,是区内的主含矿层,主矿体走向 NE,最大延伸 2725m,倾向 SE,倾斜控制宽度 250 ~ 775m,厚度 1.0 ~ 29.6m,平均为 7.12m,Zn 品位 0.5% ~ 36.63%,平均为 4.03%,Pb 品位 0.04% ~ 4.05%,平均为 0.45%。圈定锌铅资源储量超 50 万吨,为矿区最大规模矿体;III 含矿层圈定矿体产于清虚洞组第二段 a 层细晶白云岩中,矿体呈层状产出,产状与 I、II 含矿层一致。矿体厚度 1 ~ 7.5m,平均为 3.47m,Zn 品位 0.49% ~ 4.82%,平均为 2.72%。矿体走向延伸约 1200m,倾斜延伸约 400m。陡倾斜脉状产于 F₇ 断层破碎带中,控制延深超 200m,矿体厚度与断层破碎带宽带一致,矿石中 Zn 品位较高,一般大于 10%,并常见方铅矿呈团块分布。

2.2.3 矿石结构构造

矿石自然类型属于原生硫化物矿石,矿物组成较简单,金属矿物主要见米黄色、棕红(黄)色、棕褐色闪锌矿,方铅矿和黄铁矿次之。非金属矿物主要为白云石和方解石,石英次之,见少量重晶石。矿区主要发育块状、角砾状、细脉状和浸染状矿石(图 5)。

矿石构造主要有:脉状、角砾状、块状和浸染状构造(图 5)。脉状构造:包括细脉状和网脉状,硫化物(主要为闪锌矿)矿脉沿围岩裂隙充填并局部交代围岩(图 5a-d, f, i)。角砾状构造:硫化物(主要为闪锌矿)矿脉中胶结围岩碎块角砾(图 5b, c, e, f, h, i)。块状构造:硫化物(主要为闪锌矿)集合体呈致密均匀分布状(图 5g)。浸染状构造:硫化物(主要为闪锌矿)集合体呈斑点状不均匀分布于围岩中,并局部交代围岩(图 5a, e, h)。

矿石结构主要见自形-半自形粒状、半自形-他形粒状、碎裂结构,局部可见交代残余结构(图 6)。自形-半自形粒状结构:闪锌矿呈自形粒状赋存于白云石中(图 6a),闪锌矿呈半自形粒状与半自形粒状方解石共生(图 6b)。半自形-他形粒状结构:黄铁矿呈他形分布于半自形-他形闪锌矿和方解石中(图 6c)。碎裂结构:由于矿石受到构造应力作用而发生破碎,表现为闪锌矿集合体碎裂形成细小颗粒(图 6d)。

2.2.4 矿物生成顺序及围岩蚀变

在野外观察和室内显微观测的基础上,根据矿物共生组

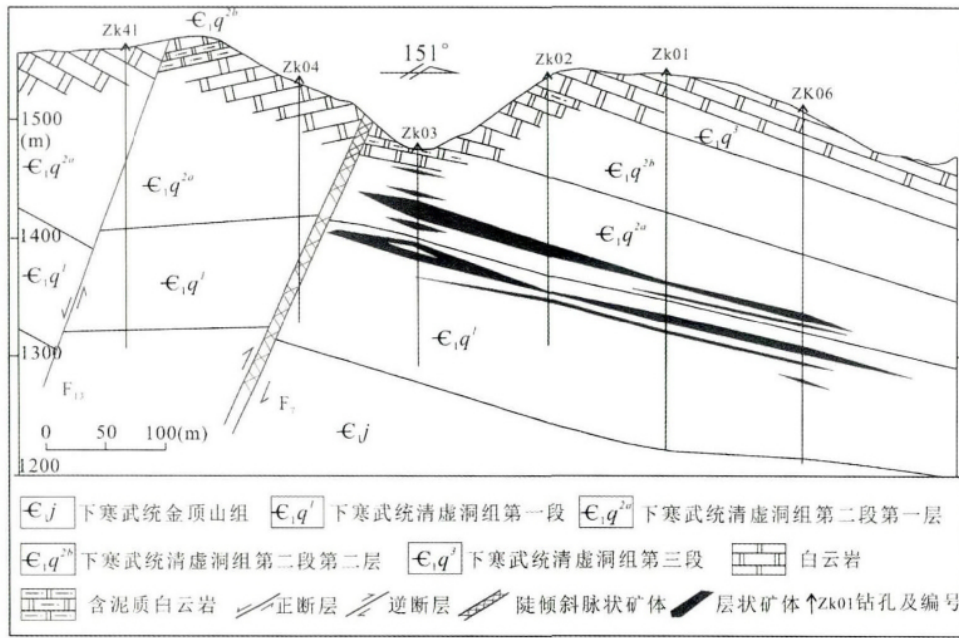


图4 纳雍枝铅锌矿床0号勘探线剖面图
Fig. 4 No. 0 prospecting line profile map of the Nayongzhi Pb-Zn deposit

表1 纳雍枝铅锌矿床矿物共生次序
Table 1 Mineral paragenesis of the Nayongzhi Zn-Pb deposit

成矿期	成岩期	热液期		表生期
成矿阶段	Py + Dol	Sul + Cal/Dol ± Qtz ± Bar	Cal/Dol ± Qtz	氧化矿物
黄铁矿	—	██████████		
闪锌矿		██████████		
方铅矿		██████████		
方解石		██████████	██████████	
白云石	██████████	██████████	██████████	
石英		██████████	██████████	
重晶石		██████████		
菱锌矿				—
褐铁矿				—
白铅矿				—

注：一少，多。Sul-硫化物；Py-黄铁矿；Cal-方解石；Dol-白云石；Qtz-石英；Bar-重晶石

合特点(图5)及矿物集合体相互穿插关系(图6)将纳雍枝铅锌矿床成矿期分为成岩期、热液期和表生氧化期(表1),其中热液期又可分为硫化物+方解石和/或白云石±石英和方解石和/或白云石±石英两个阶段。在硫化物+方解石和/或白云石±石英阶段,矿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。

矿区围岩蚀变现象普遍存在,蚀变类型简单,主要见白云石化、方解石化、黄铁矿化,局部见硅化。白云石化:普遍存在,局部较为强烈。多数矿体展布方向延伸,蚀变白云石结晶粗大,主要表现为由白云石组成的细脉、团块、条带

(条纹)。方解石化:普遍存在,多呈脉状、团块状,沿白云岩晶洞裂隙充填。黄铁矿化:较为普遍,表现为黄铁矿呈粉晶结构,星点状、浸染状分布于白云岩中。在矿石中常与闪锌矿形成致密块状、浸染状矿石、细脉状矿石。硅化:局部发育,表现为硅化白云岩,使白云岩硬度增强。

3 样品和分析方法

样品采自纳雍枝铅锌矿床主要探、采矿工程揭露的主矿体,并对不同类型矿石进行了系统采集,样品分布在宏泰采场、金坡采场、主要岩脉和穿脉以及代表性钻孔,涵盖金坡和砂岩两个矿段,能够代表纳雍枝铅锌矿床的主体。在手标本拍照和构造特征观察后,进行样品粉碎至40~60目,在双目镜下反复挑选出纯度大于98%的黄铁矿、闪锌矿和方铅矿,其中闪锌矿裸眼区别出棕褐色、棕黄色、棕红色、米黄色等四种。挑选后的硫化物进行超声清洗,以备测试其硫同位素组成。选择方铅矿较为发育的样品进行薄片磨制和镜下观察,圈定合适的部分以备原位测试铅同位素组成。

3.1 硫同位素

将清洗干净后的硫化物用玛瑙研钵研磨至200目,称取适量的粉末样品,在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MAT-253气体质谱仪上完成硫同位素组成分析。以Vienna Canyon Diablo Troilite(V-CDT)作为参照标准,以STD-1(-0.22‰)、STD-2(22.57‰)、STD-3(-32.53‰)为标样校正,测试误差±0.10‰。

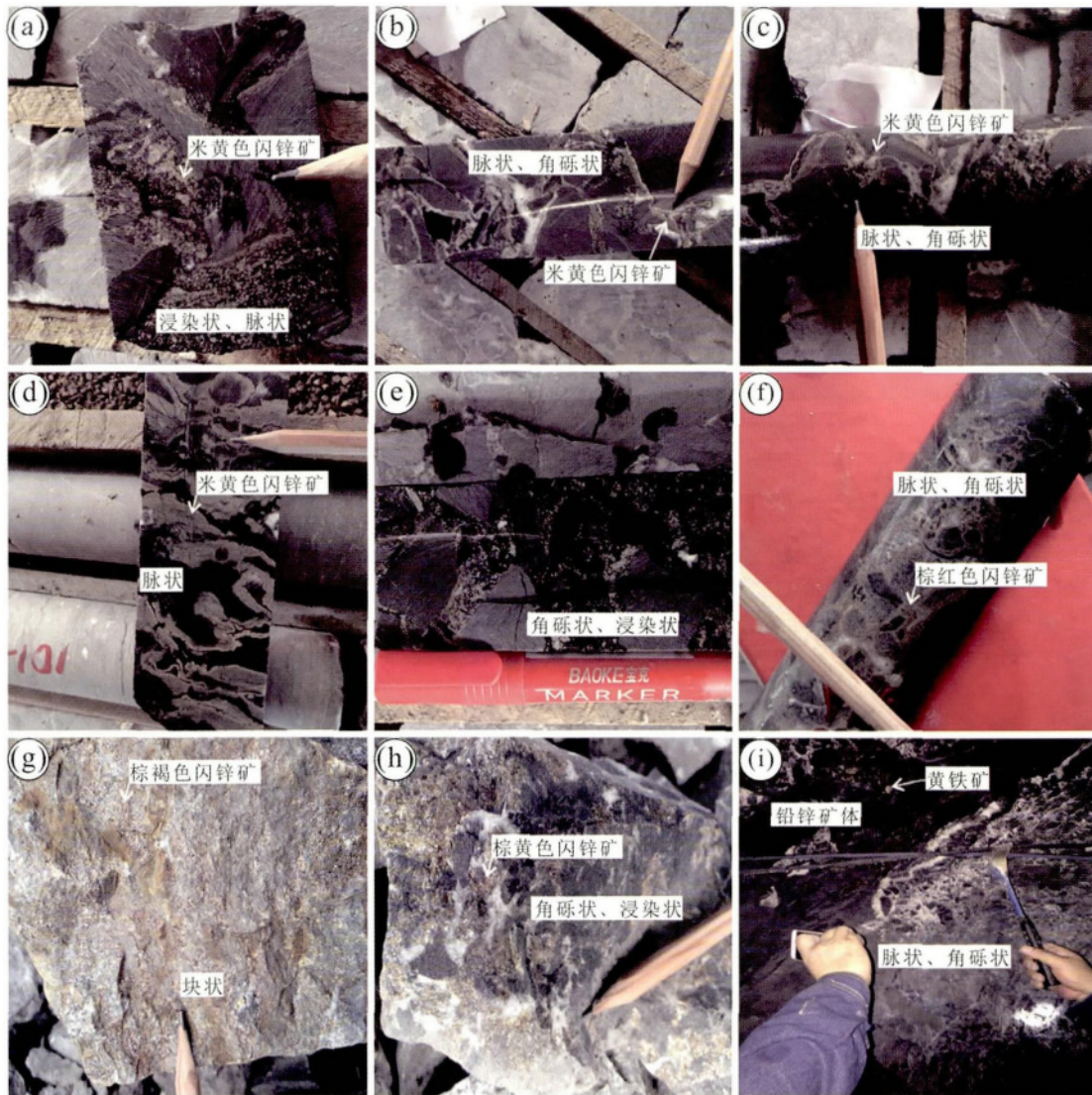


图5 纳雍枝铅锌矿床矿石构造特征

(a) 浸染状、脉状矿石, 闪锌矿呈米黄色; (b) 脉状、角砾状矿石, 闪锌矿呈米黄色, 方解石呈脉状充填; (c) 脉状、角砾状矿石, 闪锌矿呈米黄色, 方解石呈团块或脉状; (d) 脉状矿石, 闪锌矿呈米黄色; (e) 角砾状、浸染状矿石, 方解石呈团斑状; (f) 脉状、角砾状矿石, 闪锌矿呈棕红色; (g) 块状矿石, 闪锌矿呈棕褐色; (h) 角砾状、浸染状矿石, 闪锌矿呈棕黄色; (i) 脉状、角砾状矿石, 铅锌矿体与围岩界线

Fig. 5 The structural feature of ores in the Nayongzhi Pb-Zn deposit

(a) disseminated and veinlet ores, sphalerite has beige color; (b) veinlet and brecciated ores, sphalerite is beige in color and calcite occurs as veinlet fill into the fracture wall rocks; (c) veinlet and brecciated ores, sphalerite is beige in color and calcite occurs as block mass and veinlet; (d) veinlet ores, sphalerite has beige color; (e) brecciated and disseminated ores, calcite occurs as sporadophytic; (f) veinlet and brecciated ores, sphalerite is red-brown; (g) massive ores, sphalerite is brown; (h) brecciated and disseminated ores, sphalerite is claybank; (i) veinlet and brecciated ores, the boundary of ore body and wall rocks

3.2 原位 Pb 同位素

用 2% HNO₃ 超声整个样品靶(5s) 并用超纯水淋洗以去除可能存在于样品及样品靶表面的污染物, 以高纯 Ar 或 N₂ 气枪吹干样品, 待上机分析。激光剥蚀微区分析实验在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 采用飞秒激光剥蚀(fs LA)-多接收器等离子体质谱(MC-ICP-MS) 进行。其中飞秒激光剥蚀系统为 266 nm NWR UP Femto(ESI, USA), 多接

收器等离子体质谱为 Nu Instruments 公司的 Nu Plasma II 型 MC-ICP-MS。该仪器的激光器型号为 Quantronix Integra-HE Ti: sapphire 3 倍频, 输出波长 266nm, 剥蚀束斑 15 ~ 65μm, 激光频率 5 ~ 50Hz, 剥蚀方式为 3μm/s 线扫描, He 气为 0.7L/min。仪器的详细描述及分析方法和数据处理过程见有关文献(袁洪林等, 2013, 2015; Chen *et al.*, 2014; Bao *et al.*, 2016)。NIST 610 作为标样, 其分析结果为 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 17.052 ± 0.003, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.515 ± 0.003, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb =

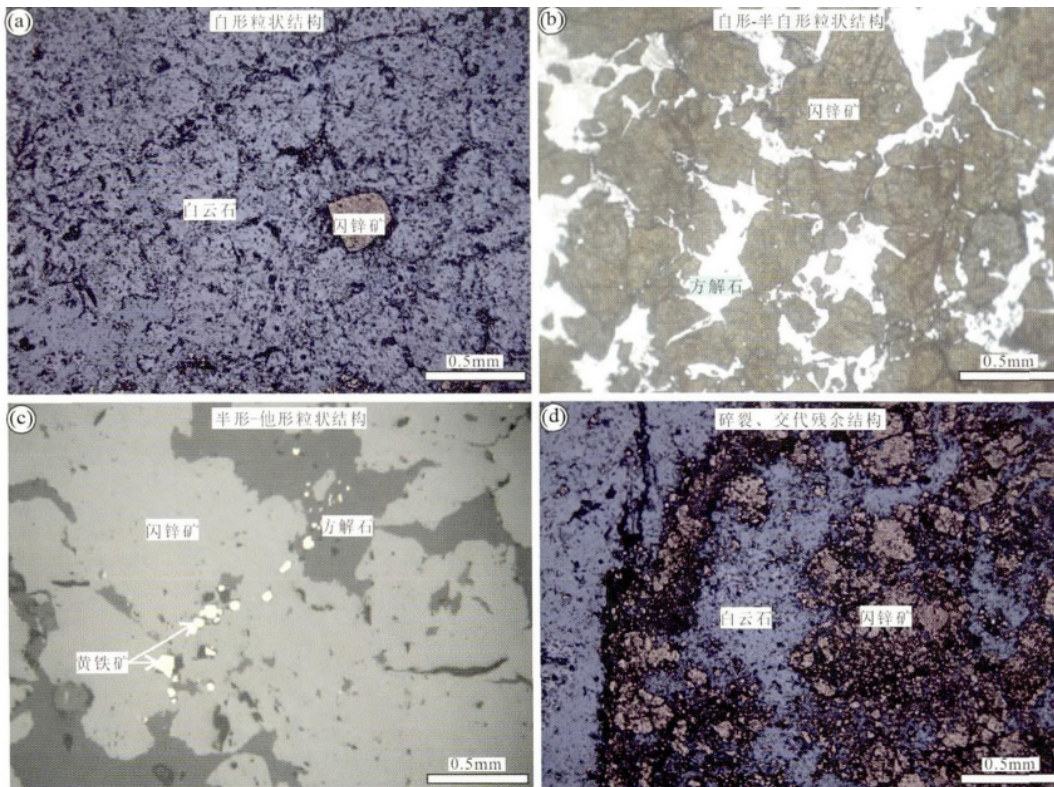


图6 纳雍枝铅锌矿床矿石结构特征

(a) 自形粒状闪锌矿分布在白云石中; (b) 自形-半自形粒状闪锌矿被他形方解石充填或包裹; (c) 半自形-他形粒状黄铁矿分布在他形闪锌矿和方解石中; (d) 碎裂、交代残余闪锌矿分布在白云石中

Fig. 6 The textural feature of ores in the Nayongzhi Pb-Zn deposit

(a) euhedral granular sphalerite in dolomite; (b) euhedral-subhedral granular sphalerite is enclosed or filled by xenomorphic calcite; (c) subhedral-xenomorphic granular pyrite in xenomorphic sphalerite and calcite; (d) cataclastic and metasomatic relict sphalerite in dolomite

36.980 ± 0.007 ($n = 183$)。

4 分析结果

4.1 硫同位素

本次共测试了21件硫化物的硫同位素组成,分析结果列于表2。

矿床中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值介于15.94‰~25.49‰,均值为22.41‰,其中1件黄铁矿样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值为22.06‰,17件闪锌矿样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值为19.37‰~25.49‰,均值为23.17‰,3件方铅矿样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值为15.94‰~19.70‰,均值为18.23‰。全部硫化物样品明显富集重硫同位素,且其 $\delta^{34}\text{S}$ 值部分重叠,总体上闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值较黄铁矿,特别是方铅矿高,不具有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ 的特征。此外,不同采样位置(矿段)硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值不存在显著差别。

6件米黄色闪锌矿样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值为19.37‰~25.22‰,均值为23.50‰,6件棕黄色闪锌矿样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$

值为21.24‰~25.49‰,均值为23.21‰,2件棕红色闪锌矿样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值为22.64‰~24.00‰,均值为23.32‰,3件棕褐色闪锌矿样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值为21.92‰~22.68‰,均值为22.35‰。可见,本矿床不同颜色闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值没有明显差别。

4.2 原位铅同位素

本研究共测试了2件方铅矿样品(金坡的块状矿石和砂岩的脉状矿石)32个测点的原位Pb同位素组成,分析结果列于表3。全部方铅矿测点的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.828 \sim 17.860$,均值17.841, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.648 \sim 15.666$,均值15.659, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.922 \sim 37.979$,均值37.960,全部测点的 μ 值介于9.64~9.67,变化范围很窄,数据非常集中,暗示成矿物质来源单一或均一化程度高。值得注意的是,金坡矿段自形-半自形集合体状粗粒方铅矿($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.837 \sim 17.860$,均值17.848, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.651 \sim 15.666$,均值15.661, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.934 \sim 37.979$,均值37.963)较砂岩矿段半自形-他形脉状细粒方铅矿($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.828 \sim 17.841$,均值17.833, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.648 \sim 15.666$,均值

表 2 纳雍枝铅锌矿床硫化物 S 同位素组成

Table 2 S isotopic compositions of sulfides from the Nayongzhi Pb-Zn deposit

样品号	测试对象	采样位置	$\delta^{34}S_{CDT}(\%)$
2015HT-2	黄铁矿	砂岩矿段、宏泰采场	22.06
2015HT-2	方铅矿		19.04
2015HT-5	方铅矿		19.70
2013JP-3	方铅矿	金坡矿段、金坡采场	15.94
2015JP-1	米黄色闪锌矿		25.22
2015JP-2-1	米黄色闪锌矿		25.15
2015JP-2-1p	米黄色闪锌矿		24.78
2015JP-2-2	棕黄色闪锌矿		25.49
1270V-5-1	米黄色闪锌矿	砂岩矿段、1270m 中段 4	24.74
1270V-5-2	棕黄色闪锌矿		24.87
1270V-5-3	棕红色闪锌矿		24.00
1290IV-7-1	棕红色闪锌矿	砂岩矿段、1290m 中段 2	22.64
1290IV-7-2	棕黄色闪锌矿		22.30
1290IV-7-2p	棕黄色闪锌矿		23.11
1270K-7-1	米黄色闪锌矿	砂岩矿段、1270m 中段 6 号斜井车场与主运输道交叉处	21.71
1270K-7-2	棕黄色闪锌矿		21.24
1270K-7-3	棕褐色闪锌矿		21.92
1270K-6-1	米黄色闪锌矿		19.37
1270K-6-2	棕黄色闪锌矿		22.23
1270K-6-3	棕褐色闪锌矿		22.68
1270K-6-3p	棕褐色闪锌矿		22.45

15.657, $^{208}Pb/^{204}Pb = 37.922 \sim 37.971$ (均值 37.948) 富集放射性成因 Pb。

5 讨论

5.1 成矿物质来源

5.1.1 还原硫的来源及形成机制

矿物学研究表明纳雍枝铅锌矿床富硫矿物以闪锌矿为主,黄铁矿和方铅矿次之,偶见硫酸盐矿物(重晶石)。硫化物硫同位素组成不具有明显的 $\delta^{34}S_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}S_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}S_{\text{方铅矿}}$ 的特征(表 2) 表明硫同位素在硫化物矿物间的分馏未达到平衡。可见,该矿床硫化物的 $\delta^{34}S$ 值不能近似代表成矿流体的 $\delta^{34}S_{\Sigma S}$ 值,而要比成矿流体的 $\delta^{34}S_{\Sigma S}$ 值明显低得多(Ohmoto and Goldhaber, 1997)。因此,纳雍枝铅锌矿床成矿流体的 $\delta^{34}S_{\Sigma S}$ 值应高于硫化物的平均 $\delta^{34}S$ 值(22.41‰)。显然,成矿流体的 $\delta^{34}S_{\Sigma S}$ 值远高于幔源岩浆硫的 $\delta^{34}S$ 值($0 \pm 3\%$; Chaussidon et al., 1989) 这排除了岩浆提供大量 S 源的可能性 这与区内未见岩浆岩出露的地质背景吻合。黔西北地区沉积地层中蒸发膏盐层较为发育,其中富含石膏和重晶石等海相硫酸盐矿物,它们的 $\delta^{34}S$ 值介于 22‰ ~ 28‰(图 7; 金中国, 2008; Zhou et al., 2013a) 与震旦-寒武纪海水的 $\delta^{34}S$ 值相近(24‰ ~ 32‰; Claypool et al., 1980)。故纳雍枝铅锌矿床成矿流体中的还原 S 可能主要来自赋矿地层中的蒸发岩,这与邻区赋存于石炭系碳酸盐岩中的杉树林、青山、筲箕湾

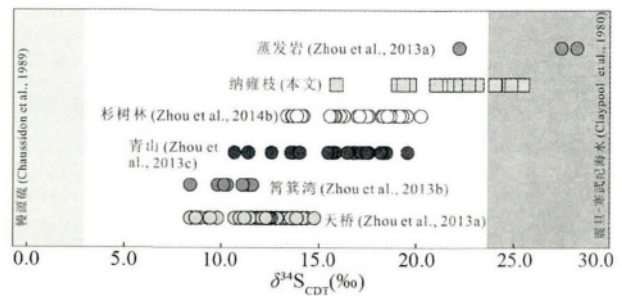


图 7 纳雍枝铅锌矿床硫同位素组成及其与邻区矿床、蒸发岩、海相硫酸盐及幔源硫的对比

Fig. 7 S isotopic compositions of sulfide minerals from the Nayongzhi Pb-Zn deposit and the comparison among adjacent Pb-Zn deposits, evaporates, marine sulfate and mantle sulfur

和天桥铅锌矿床成矿流体中的 S 来源于对应赋矿沉积地层蒸发岩的认识是一致的(图 7; Zhou et al., 2013a, b, c, 2014b)。纳雍枝铅锌矿床硫化物 $\delta^{34}S$ 值较杉树林、青山、筲箕湾和天桥等矿床硫化物 $\delta^{34}S$ 值高(图 7), 也与震旦-寒武纪海水 $\delta^{34}S$ 值($\delta^{34}S = 24\% \sim 32\%$; Claypool et al., 1980) 较石炭纪海水 $\delta^{34}S$ 值($\delta^{34}S = 16\% \sim 24\%$; Claypool et al., 1980) 高是相互吻合的。

热化学硫酸盐岩还原作用(TSR)和细菌硫酸盐岩还原作用(BSR)通常被用来解释 SO_4^{2-} 形成 S^{2-} 的过程。TSR 发生在温度较高的条件下($> 120^\circ C$),能快速产生大量 S^{2-} 且形成 S^{2-} 的 $\delta^{34}S$ 值相对稳定(Ohmoto, 1972)。BSR 则发生在相对低温的条件下($< 120^\circ C$),快速形成大量 S^{2-} 的可能性较小且形成 S^{2-} 的 $\delta^{34}S$ 值具有较大变化范围,可以高达 40‰(Jørgenson et al., 1992; Basuki et al., 2008)。纳雍枝铅锌矿床硫化物的 $\delta^{34}S$ 值集中在 15‰ ~ 25‰之间,金属资源储量超过 135 万吨,成矿温度约 120 ~ 200℃(苏文超 私人通信),这些均表明 TSR 在纳雍枝铅锌矿床成矿流体中还原硫的形成过程中起到了决定性作用。因此,纳雍枝铅锌矿床成矿流体中的还原态硫(S^{2-})最可能是其赋矿地层蒸发岩中海相硫酸盐矿物 TSR 的产物,且寒武系地层中富集的有机质起到了还原剂的作用(周家喜等, 2010; Zhou et al., 2013d)。

5.1.2 成矿金属的来源

已有研究表明,硫化物中(特别是方铅矿)的 U 和 Th 含量较低,其铅同位素组成无需进行年龄校正亦能够代表成矿流体的初始铅同位素组成(Carr et al., 1995; Zhou et al., 2013a)。本研究获得的方铅矿原位 Pb 同位素组成变化范围很窄,暗示成矿物质来源单一或均一化程度很高(如黄智龙等, 2004)。以往有学者依据纳雍枝铅锌矿床铅锌矿石 Eu 正异常特征,认为与岩浆有关的深源热流体加入了成矿作用(陈国勇等, 2015) 而依据热液白云石的 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值(19‰ ~ 24‰) 则认为成矿流体/物质来源于深部变质岩(陈国勇等, 2015)。也有学者依据硫化物粉末样品 TIMS 溶液法获得的

表3 纳雍枝铅锌矿床方铅矿原位 Pb 同位素组成

Table 3 In situ Pb isotopic compositions of galena from the Nayongzhi Pb-Zn deposit

测点号	测试对象	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1s	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1s	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1s	μ
1390-JP-12-01		17.851	0.002	15.662	0.002	37.970	0.006	9.66
1390-JP-12-02		17.848	0.003	15.659	0.003	37.962	0.008	9.66
1390-JP-12-03		17.843	0.003	15.657	0.003	37.951	0.007	9.65
1390-JP-12-04		17.840	0.002	15.651	0.002	37.934	0.006	9.64
1390-JP-12-05		17.853	0.003	15.662	0.003	37.968	0.008	9.66
1390-JP-12-06		17.844	0.003	15.660	0.003	37.959	0.008	9.66
1390-JP-12-07	金坡矿段、块状 矿石、自形-半 自形集合体状 粗粒方铅矿	17.851	0.003	15.662	0.003	37.968	0.007	9.66
1390-JP-12-08		17.853	0.003	15.662	0.003	37.974	0.007	9.66
1390-JP-12-09		17.848	0.003	15.660	0.003	37.961	0.008	9.66
1390-JP-12-10		17.857	0.003	15.666	0.003	37.979	0.007	9.67
1390-JP-12-11		17.846	0.002	15.660	0.002	37.960	0.007	9.66
1390-JP-12-12		17.837	0.002	15.659	0.003	37.951	0.007	9.66
1390-JP-12-13		17.838	0.003	15.661	0.003	37.955	0.008	9.66
1390-JP-12-14		17.860	0.002	15.662	0.003	37.976	0.007	9.66
1390-JP-12-15		17.849	0.002	15.663	0.003	37.968	0.007	9.66
1390-JP-12-16		17.857	0.003	15.662	0.003	37.975	0.008	9.66
K-2-01	砂岩矿段、脉状 矿石、半自形- 他形脉状细粒 方铅矿	17.830	0.002	15.654	0.003	37.934	0.007	9.65
K-2-02		17.833	0.003	15.656	0.003	37.949	0.008	9.65
K-2-03		17.829	0.002	15.654	0.003	37.935	0.007	9.65
K-2-04		17.828	0.002	15.648	0.003	37.922	0.007	9.64
K-2-05		17.831	0.003	15.655	0.003	37.941	0.009	9.65
K-2-06		17.828	0.002	15.649	0.002	37.926	0.007	9.64
K-2-07		17.834	0.003	15.657	0.003	37.946	0.008	9.65
K-2-08		17.838	0.003	15.661	0.003	37.958	0.009	9.66
K-2-09		17.837	0.003	15.663	0.003	37.968	0.009	9.67
K-2-10		17.828	0.003	15.654	0.003	37.939	0.008	9.65
K-2-11		17.835	0.003	15.661	0.003	37.959	0.008	9.66
K-2-12		17.839	0.003	15.664	0.003	37.963	0.008	9.67
K-2-13		17.833	0.003	15.658	0.003	37.952	0.009	9.66
K-2-14		17.835	0.003	15.659	0.003	37.953	0.008	9.66
K-2-15		17.841	0.003	15.666	0.003	37.971	0.009	9.67
K-2-16		17.832	0.003	15.657	0.004	37.951	0.010	9.65

Pb 同位素指示成矿物质来源于上震旦统灯影组地层(金灿海等, 2015)。本次获得的原位 Pb 同位素组成研究结果表明, 所有方铅矿测点的 μ 值(9.64~9.67) 高于上地壳值($\mu = 9.58$), 表明其成矿物质具有壳源特征, 在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (图 8a) 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (图 8b) 图解上, 全部测点数据投影于上地壳 Pb 平均演化线上, 这进一步显示成矿物质的壳源特征。

之前有学者对黔西北杉树林等铅锌矿床成矿物质来源的研究(金中国, 2008; Zhou *et al.*, 2013a, b, c, 2014b) 表明上震旦-中二叠统沉积岩和元古界基底岩石共同为黔西北地区铅锌矿床的形成提供了成矿物质。将纳雍枝铅锌矿床方铅矿原位 Pb 同位素组成与潜在的源区地层沉积岩和基底岩石以及川滇黔矿集区典型矿床(会泽和天桥) 进行比较(图 9), 不难发现纳雍枝铅锌矿床 Pb 同位素投影区与峨眉山玄武岩、灯影组白云岩、泥盆-二叠系沉积岩以及会泽和天桥铅锌矿床均不同, 而与基底昆阳群和会理群岩石分布范围

重叠, 表明可基本排除峨眉山玄武岩作为主要物源的可能性, 该矿床的成矿物质主要来源于基底岩石。

值得一提的是, 本次原位分析方铅矿的 Pb 同位素组成, 不仅得到变化范围极窄的数据, 而且发现不同类型方铅矿的 Pb 同位素组成存在微小差异, 选自金坡矿段脉状矿石的自形-半自形集合体状粗粒方铅矿较选自砂岩矿段块状矿石的半自形-他形脉状细粒方铅矿富集放射性成因 Pb(图 10)。对此, 有两种解释: (1) 粗粒方铅矿和细粒方铅矿不同成矿阶段, 成矿流体中的铅同位素组成已有差异, 这与采样位置及矿石特征的实际吻合(表 3); (2) 粗粒方铅矿的 ^{238}U 较细粒方铅矿 ^{238}U 含量高, 但实际上 LA-ICPMS 原位方铅矿微量元素分析结果显示(叶霖, 私人通信), 粗粒和细粒方铅矿间 ^{238}U 含量没有明显差别。因此, 本文认为第一种解释较为合理。

5.2 矿床成因及动力学背景

纳雍枝铅锌矿床由于层控特征明显而被认为属于海底

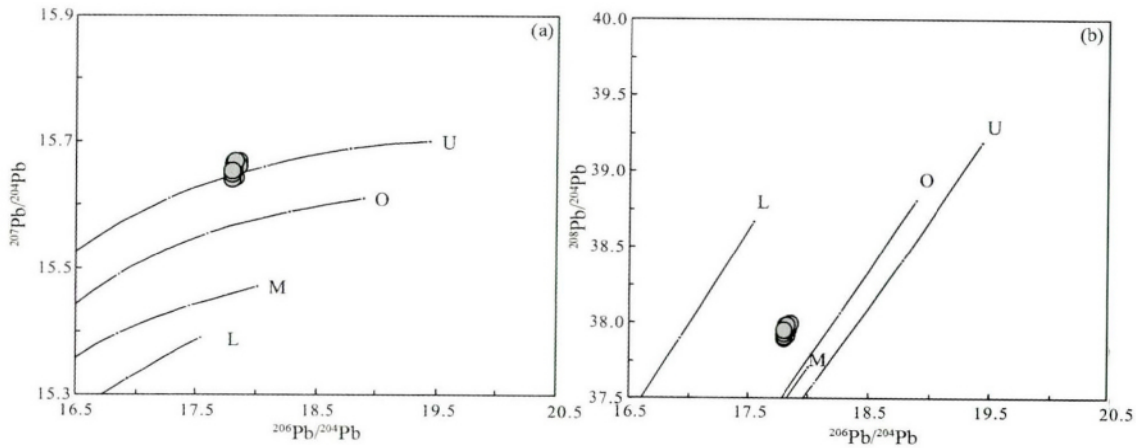


图 8 纳雍枝铅锌矿床 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解 (b) (据 Zartman and Doe, 1981) 上地壳(U)、造山带(O)、地幔(M)和下地壳(L)

Fig. 8 Plots of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) (after Zartman and Doe, 1981) Upper Crust (U), Orogen Belt (O), Mantle (M) and Lower Crust (L)

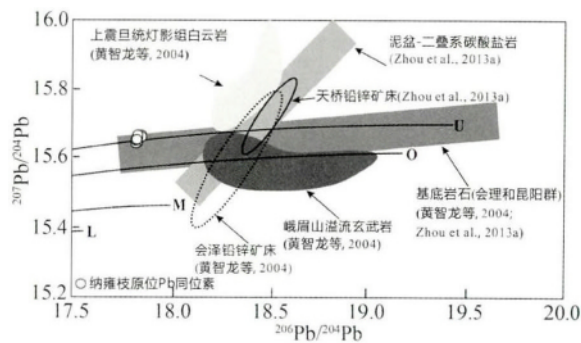


图 9 纳雍枝铅锌矿床与地层沉积岩和基底岩石以及川滇黔矿集区典型矿床(会泽和天桥)的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对比图解(据 Zartman and Doe, 1981) 上地壳(U)、造山带(O)、地幔(M)和下地壳(L)

Fig. 9 The comparison plot of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ among the Nayongzhi, dolostone of Sinian Dengying Formation, carbonate rocks of Devonian to Permian, basement rocks (Huili and Kunyang groups), Huize and Tianqiao deposits (after Zartman and Doe, 1981) Upper Crust (U), Orogen Belt (O), Mantle (M) and Lower Crust (L)

热水喷流沉积(陈国勇等, 2015)。事实上矿区除发育层状、似层状铅锌矿外,陡倾斜脉状矿体也很发育(图 4)。亦有学者依据此将其归为沉积-改造(金灿海等, 2015)矿床范畴。纳雍枝铅锌矿床的矿石构造多为角砾状、脉状和浸染状(图 5),具有明显的后生成矿特征。因此,可以基本排除原生沉积成矿主导的可能性。纳雍枝铅锌矿床是否与邻区的天桥和会泽等“SYG 型”矿床相似(黄智龙等, 2004; Zhou et al., 2013a) 还是属于 MVT 矿床(Leach et al., 2005, 2010)。比较矿床学分析将有助于进一步认识纳雍枝铅锌矿床的成因类型。表 4 给出纳雍枝铅锌矿床与天桥、会泽和 MVT 矿床

在地质和矿床地球化学方面的详细对比,不难发现纳雍枝铅锌矿床在地质背景(右江盆地边缘)、控矿因素(张性构造控矿)、成矿条件(中低温、中高盐度)、矿床地球化学(接近同期海水 S 同位素组成, Pb 同位素组成较为均一但呈由南西砂岩矿段向北东金坡矿段放射性 Pb 增加趋势)等方面,与天桥、会泽等川滇黔接壤区铅锌矿床(扬子陆块西南缘,逆冲褶皱构造控矿,中高温、中低盐度, S 同位素组成低, Pb 同位素组成均一)不同(黄智龙等, 2004; Zhou et al., 2013a),而与 MVT 矿床(前陆盆地,伸展构造控矿,低温高盐度盆地卤水,古海水 $\delta^{34}\text{S}$ 值, Pb 同位素分带性)相似(Leach et al., 2005, 2010)。因此,本文认为纳雍枝铅锌矿床属于 MVT 矿床。

地质和同位素地质年代学研究表明(黄智龙等, 2004; Zhou et al., 2013a, e, 2015),以天桥、会泽等为代表的川滇黔接壤区铅锌矿床主要形成于晚三叠-早侏罗世(226 ~ 192Ma),即印支晚期,与导致古特提斯洋闭合的印支造山作用有关,形成于挤压向伸展转换的动力学背景下。而纳雍枝铅锌矿床位于黔中古陆西南缘,右江盆地北缘,该盆地的演化经历了泥盆纪-早二叠世被动大陆边缘裂谷盆地阶段、晚二叠世-早三叠世弧后盆地阶段和中三叠世-晚三叠世早期挤压拗陷盆地阶段,在晚三叠世后陆内挤压褶皱隆升成陆。随后燕山期盆地耦合作用,定型了研究区内的控矿构造样式(五指山背斜)(吴先彪等, 2013; 陈国勇等, 2015),加之其张性构造虚脱空间容矿特征明显(图 2、图 4),成矿温度低且流体包裹体中富含 Au、As 等成矿元素(苏文超, 私人通信),且本区铅锌矿床和卡林型金矿床空间上分布在垭都-紫云南大断裂带的两侧,均受 NE 向构造控制(图 1)。

因此,本文推测纳雍枝铅锌矿床的成矿年龄与形成于燕山期的右江盆地内卡林型金矿床形成年龄相近(Su et al., 2009),它们可能存在某种内在的成因联系且均与右江盆地

表4 纳雍枝铅锌矿床与天桥、会泽及 MVT 矿床的对比

Table 4 The comparison among the Nayongzhi, Tianqiao, Huize and MVT deposits

矿床	MVT 矿床	会泽超大型铅锌矿床	天桥铅锌矿床	纳雍枝铅锌矿床
品位	Pb + Zn 多小于 10% ,Zn/(Zn + Pb) 多为 0.8 ±	Pb + Zn 平均 35% ,Zn/(Zn + Pb) 为 0.9 ±	Pb + Zn 为 6.92% ~ 20.51% ,Zn/(Zn + Pb) 为 0.75 ±	Pb + Zn 为 1.71% ~ 16.76% ,Zn/(Zn + Pb) 为 0.9 ±
规模	单个矿体 Pb + Zn 金属量常小于 10 万吨	1、6、8、10 矿体 Pb + Zn 金属量都接近 100 万吨	II + III 矿体 Pb + Zn 金属量大于 20 万吨	II 含矿层圈定矿体 Pb + Zn 金属量大于 50 万吨,总储量 135 万吨
矿化范围	常集中出现在同一地区,面积数百平方千米	会泽铅锌矿床所在川滇黔矿集区面积约 17 万平方千米	天桥铅锌矿床所在川滇黔矿集区面积约 17 万平方千米	纳雍枝铅锌矿床所在五指山背斜区面积约 20km ²
赋矿地层和岩性	石炭-寒武系碳酸盐岩,矿体产于白云岩和交代灰岩中	下石炭统摆佐组灰白色、肉红色、米黄色粗晶白云岩	中-下石炭统粗晶白云岩	下寒武统清虚洞组和上震旦统灯影组白云岩
矿体埋深	多小于 600m,最大不超过 1500m	大于 2000m	大于 400m	小于 400m
构造背景	沉积盆地边缘的抬升部位,或者古老克拉通的边缘	扬子陆块西南缘,小江断裂带和昭通-曲靖隐伏断裂带的复合部位	扬子陆块西南缘,NW 岫都-紫云构造带之天桥背斜	扬子陆块西南缘,黔中隆起西南缘,右江盆地北缘,五指山背斜
与岩浆活动的关系	在时间和空间上一般与岩浆岩没有直接成因联系	与峨眉山玄武岩岩浆活动存在密切联系	矿区外围分布有大面积峨眉山玄武岩,矿体常与辉绿岩共生	与岩浆岩无直接的成因联系
控矿因素	主要受构造、地层和岩性控制,构造多为缓倾张性断层	受逆冲褶皱构造、石炭系地层和粗晶白云岩控制	受逆冲褶皱构造、石炭系地层和粗晶白云岩控制	受构造、地层和岩性控制,构造为褶皱虚脱层间断层
成矿时代	元古代到白垩纪,主要为泥盆纪到晚二叠纪,其次是白垩纪至第三纪	222 ~ 226Ma	192Ma	控矿构造定型于燕山期,结合区域成矿系列特征,认为可能形成于燕山期
矿石结构、构造	浸染状、细粒状、树枝状、胶状和块状构造,主要为胶状、骸状粗晶结构	块状构造为主,细、中、粗晶结构	块状构造为主,细、中、粗晶结构	角砾状、脉状、浸染状构造为主,半自形-他形、碎裂结构
矿物组合	矿石矿物: 主要为闪锌矿、方铅矿,次要为黄铁矿、黄铜矿和白铁矿,脉石矿物: 主要为重晶石、萤石、方解石和白云石等	矿石矿物: 闪锌矿、方铅矿和黄铁矿,脉石矿物: 最主要为方解石	矿石矿物: 闪锌矿、方铅矿和黄铁矿,脉石矿物: 最主要为方解石	矿石矿物: 闪锌矿为主,方铅矿和黄铁矿次之,脉石矿物: 最主要为方解石和白云石
包裹体	盐度: 10wt% ~ 30wt% NaCleqv,成分: 主要为 Cl, Na, Ca, K 和 Mg,均一温度: 一般为 50 ~ 200℃	盐度: < 10wt% NaCleqv,成分: 主要为 Cl, Na, Ca, F 和 SO ₄ ²⁻ ,均一温度: 一般为 150 ~ 250℃	盐度: < 10wt% NaCleqv,成分: 主要为 Cl, Na, Ca, F 和 SO ₄ ²⁻ ,均一温度: 一般为 150 ~ 350℃	盐度: > 10wt% NaCleqv,均一温度: 一般为 120 ~ 200℃
伴生元素	大部分矿床有 Ag 异常,有的具有 Cu 异常	Ag、Ge、Cd、Ga 都具有工业价值	Ag、Ge、Cd、Ga 都具有工业价值	Ag、As 异常
硫同位素	δ ³⁴ S 多在 10‰ ~ 25‰ 之间	δ ³⁴ S 多在 11‰ ~ 17‰ 之间	δ ³⁴ S 多在 8‰ ~ 15‰ 之间	δ ³⁴ S 多在 15‰ ~ 25‰ 之间
铅同位素	铅同位素组成比较复杂,区域上具有分带性	铅同位素组成均一,主要为正常铅	铅同位素组成均一,主要为正常铅	铅同位素组成均一,主要为正常铅,有一定分带性
资料来源	Leach <i>et al.</i> , 2005, 2010	黄智龙等, 2004; 李文博等, 2006	金中国, 2008; Zhou <i>et al.</i> , 2013a, 2014a	陈国勇等, 2015; 金灿海等, 2015; 本文

演化有关,是盆山耦合作用的产物,形成于伸展背景下,为受构造应力驱动富含金属盆地卤水运移至张性构造空间与富硫流体混合沉淀成矿的结果。

6 结论

(1) 本矿床硫化物以富集重硫为特征,接近寒武纪古海

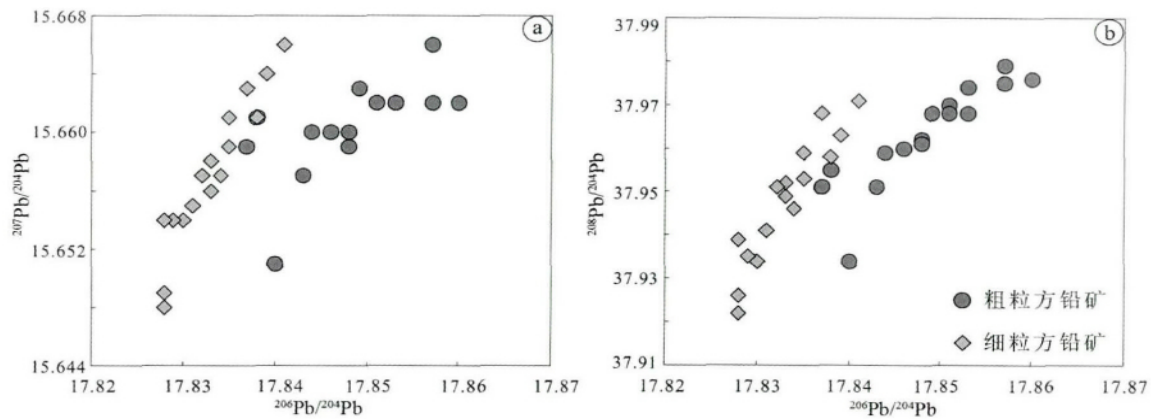


图 10 粗粒、细粒方铅矿的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) 对比

Fig. 10 Plots of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) between coarse-grain and fine-grain galena

水值,方铅矿铅同位素具上地壳铅特征。成矿流体中 S 来源于赋矿沉积地层,是海相蒸发硫酸盐矿物热化学还原的产物;成矿金属的壳源特征明显,主要由区域基底岩石提供;富成矿金属的成矿流体受构造应力驱动,在合适的构造空间与富硫流体发生混合作用,启动 TSR 并沉淀成矿。

(2) 纳雍枝铅锌矿床赋存于寒武系清虚洞组 and 上震旦统灯影组白云岩中,主要矿体呈似层状、透镜状产出,主要矿石类型有块状、角砾状、细脉状和浸染状,矿物类型、组合特征以及围岩蚀变等简单,属于典型的后生层控型矿床,与 MVT 矿床相似,而与邻区杉树林、青山、天桥、会泽等铅锌矿床的成矿特征不同。纳雍枝铅锌矿床可能形成于燕山期,与右江盆地演化有关,是盆山耦合作用的产物。

致谢 本文野外工作得到贵州省有色金属和核工业地质勘查局一总队和地质勘查院有关同志的帮助以及矿山企业领导及相关人员的大力支持;实验过程得到中国科学院地球化学研究所谷静博士和西北大学地质系袁洪林教授及包志安博士的帮助;成文过程与中国科学院地球化学研究所的温汉捷研究员和樊海峰副研究员进行了有益的讨论,并参照了诸多学者的研究资料;审稿人和胡瑞忠研究员提出了诸多富有建设性的修改意见和建议;对上述单位及个人表示衷心的感谢!

References

Bao ZA, Yuan WT, Yuan HL, Liu X, Chen KY and Zong CL. 2016. Non-matrix-matched determination of lead isotope ratios in ancient bronze artifacts by femtosecond laser ablation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *International Journal of Mass Spectrometry*, 402: 12 - 19

Basuki NI, Taylor BE and Spooner ETC. 2008. Sulfur isotope evidence for thermochemical reduction of dissolved sulfate in Mississippi valley-type zinc-lead mineralization, Bongara area, northern Peru. *Economic Geology*, 103(4): 783 - 799

Carr GR, Dean JA, Suppel DW and Heithersay PS. 1995. Precise lead

isotope fingerprinting of hydrothermal activity associated with Ordovician to Carboniferous metallogenic events in the Lachlan fold belt of New South Wales. *Economic Geology*, 90(6): 1467 - 1505

Chaussidon M, Albarède F and Sheppard SMF. 1989. Sulphur isotope variations in the mantle from ion microprobe analyses of micro-sulphide inclusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 92(2): 144 - 156

Chen GY, Wang L, Fan YM and Zheng W. 2015. Ore-search prospect of the deep subsurface in the Wuzhishan Pb-Zn orefield, Guizhou Province. *Geology and Exploration*, 51(5): 859 - 869 (in Chinese with English abstract)

Chen KY, Yuan HL, Bao ZA, Zong CL and Dai MN. 2014. Precise and accurate in situ determination of lead isotope ratios in NIST, USGS, MPI-DING and CGSG glass reference materials using femtosecond laser ablation MC-ICP-MS. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 38(1): 5 - 21

Chen XW. 2013. The application of induced polarization method in lead-zinc deposit exploitation of Nayongzhi area of Puding, Guizhou. *Guizhou Geology*, 30(1): 22 - 27 (in Chinese with English abstract)

Cheng Y, Song YC, Hou ZQ, Xue CD, Huang SQ, Han CH and Zhuang LL. 2015. Fluid inclusions and stable isotopes study of Maocaoping vein Cu deposit in Lanping basin, western Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3363 - 3379 (in Chinese with English abstract)

Claypool GE, Holser WT, Kaplan IR, Sakai H and Zak I. 1980. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. *Chemical Geology*, 28: 199 - 260

Gao YB, Li K, Qian B, Li WY, Zheng MC and Zhang CG. 2016. Trace elements, S, Pb, He, Ar and C isotopes of sphalerite in the Mayuan Pb-Zn deposit, at the northern margin of the Yangtze plate, China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(1): 251 - 263 (in Chinese with English abstract)

Hu RZ and Zhou MF. 2012. Multiple Mesozoic mineralization events in South China: An introduction to the thematic issue. *Mineralium Deposita*, 47(6): 579 - 588

Hu RZ, Mao JW, Hua RM and Fan WM. 2015. Intra-Continental Mineralization of South China Craton. Beijing: Science Press, 387 - 592 (in Chinese)

Huang L, Zhao Z, Liu JH and Lin QH. 2006. Metallogenic prospecting of Pb-Zn deposits in ore-concentrating zones of the Wuzhishan anticline, western Guizhou. *Guizhou Geology*, 23(3): 203 - 205, 210 (in Chinese with English abstract)

Huang L and Zhang K. 2010. Analysis on the ore control factors, metallogenic regulation and prospecting direction of Shuidong-Wuzhushan lead-zinc deposit of Northwest Guizhou. *Guizhou Geology*, 27(3): 202 - 207 (in Chinese with English abstract)

- Huang ZL, Chen J, Han RS, Li WB, Liu CQ, Zhang ZL, Ma DY, Gao DR and Yang HL. 2004. Geochemistry and Ore-Formation of the Huize Giant Lead-Zinc Deposit, Yunnan Province, China: Discussion on the Relationship between the Emeishan Flood Basalts and Lead-Zinc Mineralization. Beijing: Geological Publishing House, 1–214 (in Chinese)
- Jin CH, Li K, Huang L, Zhang Y and Shen ZW. 2015. Characteristics of sulfur and lead isotope composition and metallogenic material source of the Nayongzhi Pb-Zn deposit, northwestern Guizhou Province. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 35(3): 81–88 (in Chinese with English abstract)
- Jin ZG. 2008. The Ore-Control Factors, Ore-Forming Regularity and Forecasting of Pb-Zn Deposit, in Northwestern Guizhou Province. Beijing: Engine Industry Press, 1–105 (in Chinese)
- Jørgenson BB, Isaksen MF and Jannasch HW. 1992. Bacterial sulfate reduction above 100°C in deep-sea hydrothermal vent sediments. *Science*, 258(5089): 1756–1757
- Leach DL, Sangster DF, Kelley KD, Large RR, Garven G, Allen CR, Gutzmer J and Walters SG. 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective. *Economic Geology*, 100: 561–607
- Leach DL, Bradley DC, Huston D, Pisarevsky SA, Taylor RD and Gardoll SJ. 2010. Sediment-hosted lead-zinc deposits in Earth history. *Economic Geology*, 105(3): 593–625
- Li B, Zhou JX, Huang ZL, Yan ZF, Bao GP and Sun HR. 2015. Geological, rare earth elemental and isotopic constraints on the origin of the Banbanqiao Zn-Pb deposit, Southwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 100–112
- Li WB, Huang ZL and Zhang G. 2006. Sources of the ore metals of the Huize ore field in Yunnan Province: Constraints from Pb, S, C, H, O and Sr isotope geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 2567–2580 (in Chinese with English abstract)
- Liu HC and Lin WD. 1999. Regularity Research of Ag, Zn, Pb Ore Deposits Northeast Yunnan Province. Kunming: Yunnan University Press, 1–468 (in Chinese)
- Nie F, Dong GC, Mo XX, Zhao ZD, Wang P, Cui ZL, Fan WY and Liu SS. 2015. The characteristics of sulfur and lead isotopic compositions of the Xiyi Pb-Zn deposit in Baoshan Block, western Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1327–1334 (in Chinese with English abstract)
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 67(5): 551–578
- Ohmoto H and Goldhaber MB. 1997. Sulfur and carbon isotopes. In: Barnes HL (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 3rd Edition. New York: Wiley, 517–611
- Peng S, Jin ZG, Lin GS, Zhu YQ and Wang B. 2016. Analysis of ore-controlling factors and metallogenic model of Wuzhishan lead-zinc deposit, Guizhou: A case study of Nayongzhi deposit. *Mineral Exploration*, 7(3): 463–470 (in Chinese with English abstract)
- Su WC, Hu RZ, Xia B, Xia Y and Liu YP. 2009. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China. *Chemical Geology*, 258(3–4): 269–274
- Tan H. 2007. Geological characteristics and analysis on prospecting for lead-zinc deposits, Wuzhishan area, Guizhou. *Guizhou Geology*, 24(4): 253–257 (in Chinese with English abstract)
- Tan H, Wang GR and Lan AP. 2012. Geologic features and metallogenic regularity of Dujiqiao lead-zinc deposit of Zhijin, Guizhou. *Guizhou Geology*, 29(3): 169–172, 239 (in Chinese with English abstract)
- Wang F, Chen J and Luo DF. 2015. The Resources Potential and Prospecting Pattern Analysis of Pb-Zn Minerals in the Sichuan-Yunnan-Guizhou Contiguous Area. Beijing: Science Press, 1–329 (in Chinese)
- Wu XB, Zhu YQ, Liao SH and Suo RQ. 2013. Geological characteristics and prospecting potential of Nayongzhi Pb-Zn deposit in Wuzhishan anticline. *Mineral Resources and Geology*, 27(1): 26–31, 44 (in Chinese with English abstract)
- Yang XF and Zhu YQ. 2014. Mineralization process of Nayongzhi Pb-Zn deposit in Wuzhishan of Guizhou. *Mineral Resources and Geology*, 28(4): 417–421, 448 (in Chinese with English abstract)
- Ye L, Cook NJ, Ciobanu CL, Liu YP, Zhang Q, Liu TG, Gao W, Yang YL and Danyushevskiy L. 2011. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study. *Ore Geology Review*, 39(4): 188–217
- Yuan HL, Chen KY, Bao ZA, Zong CL, Dai MN, Fan C and Yin C. 2013. Determination of lead isotope compositions of geological samples using femtosecond laser ablation MC-ICPMS. *Chinese Science Bulletin*, 58(32): 3914–3921
- Yuan HL, Yin C, Liu X, Chen KY, Bao ZA, Zong CL, Dai MN, Lai SC, Wang R and Jiang SY. 2015. High precision in-situ Pb isotopic analysis of sulfide minerals by femtosecond laser ablation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Science China (Earth Sciences)*, 58(10): 1713–1721
- Zartman RE and Doe BR. 1981. Plumbotectonics—the model. *Tectonophysics*, 75(1–2): 135–162
- Zheng MH and Wang XC. 1991. Ore genesis of the Daliangzi Pb-Zn deposit in Sichuan, China. *Economic Geology*, 86(4): 831–846
- Zhou CX, Wei CS, Guo JY and Li CY. 2001. The source of metals in the Qilinchang Zn-Pb deposit, northeastern Yunnan, China: Pb-Sr isotope constraints. *Economic Geology*, 96(3): 583–598
- Zhou JX, Huang ZL, Zhou GF, Jin ZG, Li XB, 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. *Geological Review*, 56(4): 513–524 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JX, Huang ZL, Zhou GF, Li XB, Ding W and Bao GP. 2011. Trace elements and rare earth elements of sulfide minerals in the Tianqiao Pb-Zn ore deposit, Guizhou Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 85(1): 189–199
- Zhou JX, Huang ZL, Zhou GF and Zeng QS. 2012. C, O isotope and REE geochemistry of the hydrothermal calcites from the Tianqiao Pb-Zn ore deposit in NW Guizhou Province, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(1): 93–101 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JX, Huang ZL, Zhou MF, Li XB and Jin ZG. 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. *Ore Geology Reviews*, 53: 77–92
- Zhou JX, Huang ZL and Bao GP. 2013b. Geological and sulfur-lead-strontium isotopic studies of the Shaojiwan Pb-Zn deposit, Southwest China: Implications for the origin of hydrothermal fluids. *Journal of Geochemical Exploration*, 128: 51–61
- Zhou JX, Huang ZL, Gao JG and Yan ZF. 2013c. Geological and C-O-S-Pb-Sr isotopic constraints on the origin of the Qingshan carbonate-hosted Pb-Zn deposit, Southwest China. *International Geology Review*, 55(7): 904–916
- Zhou JX, Huang ZL, Bao GP and Gao JG. 2013d. Sources and thermochemical sulfate reduction for reduced sulfur in the hydrothermal fluids, southeastern SYG Pb-Zn metallogenic province, SW China. *Journal of Earth Sciences*, 24(5): 759–771
- Zhou JX, Huang ZL and Yan ZF. 2013e. The origin of the Maozu carbonate-hosted Pb-Zn deposit, Southwest China: Constrained by C-O-S-Pb isotopic compositions and Sm-Nd isotopic age. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73: 39–47
- Zhou JX, Huang ZL, Zhou MF, Zhu XK and Muecher P. 2014a. Zinc, sulfur and lead isotopic variations in carbonate-hosted Pb-Zn sulfide deposits, Southwest China. *Ore Geology Reviews*, 58: 41–54
- Zhou JX, Huang ZL, Lv ZC, Zhu XK, Gao JG and Mirnejad H. 2014b. Geology, isotope geochemistry and ore genesis of the Shanshulin carbonate-hosted Pb-Zn deposit, Southwest China. *Ore Geology Reviews*, 63: 209–225
- Zhou JX, Bai JH, Huang ZL, Zhu D, Yan ZF and Lv ZC. 2015. Geology, isotope geochemistry and geochronology of the Jinshachang carbonate-hosted Pb-Zn deposit, Southwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98: 272–284
- Zou JB, Xiao K and Li K. 2009. Geologic characters and control factors of lead-zinc deposit in Wuzhishan, Guizhou. *Guizhou Geology*, 26(2): 101–105, 121 (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. 地质与勘探, 51(5): 859-869
- 陈贤武. 2013. 激发极化法在贵州普定县那雍枝地区铅锌矿勘查中的应用. 贵州地质, 30(1): 22-27
- 程杨, 宋玉财, 侯增谦, 薛传东, 黄世强, 韩朝辉, 庄亮亮. 2015. 滇西兰坪盆地茅草坪脉状 Cu 矿床流体包裹体和稳定同位素地球化学研究. 岩石学报, 31(11): 3363-3379
- 高永宝, 李侃, 钱兵, 李文渊, 郑敏昌, Zhang CG. 2016. 扬子北缘马元铅锌矿床闪锌矿微量元素及 S-Pb-He-Ar-C 同位素地球化学研究. 岩石学报, 32(1): 251-263
- 胡瑞忠, 毛景文, 华仁民, 范蔚茗. 2015. 华南陆块陆内成矿作用. 北京: 科学出版社, 387-592
- 黄林, 赵征, 刘金海, 林权华. 2006. 黔西北五指山背斜矿集区铅锌矿成矿远景浅析. 贵州地质, 23(3): 203-205, 210
- 黄林, 张坤. 2010. 浅析黔西北水东-五指山地区铅锌矿控矿因素、成矿规律及找矿方向. 贵州地质, 27(3): 202-207
- 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. 北京: 地质出版社, 1-214
- 金灿海, 李坤, 黄林, 张琦, 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. 矿物岩石, 35(3): 81-88
- 李文博, 黄智龙, 张冠. 2006. 云南会泽铅锌矿田成矿物质来源: Pb、S、C、H、O、Sr 同位素制约. 岩石学报, 22(10): 2567-2580
- 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. 北京: 冶金工业出版社, 1-105
- 柳贺昌, 林文达. 1999. 滇东北铅锌银矿床规律研究. 昆明: 云南大学出版社, 1-468
- 聂飞, 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 王鹏, 崔子良, 范文玉, 刘书生. 2015. 云南保山西邑铅锌矿床硫铅同位素地球化学特征研究. 岩石学报, 31(5): 1327-1334
- 彭松, 金中国, 林贵生, 朱尤青, 王兵. 2016. 贵州五指山铅锌矿控矿因素及成矿模式研究——以纳雍枝矿床为例. 矿产勘查, 7(3): 463-470
- 谭华. 2007. 贵州五指山地区铅锌矿地质特征及找矿远景. 贵州地质, 24(4): 253-257
- 谭华, 王国荣, 兰安平. 2012. 贵州省织金县杜家桥铅锌矿床地质特征及成矿规律浅析. 贵州地质, 29(3): 169-172, 239
- 王峰, 陈进, 罗大锋. 2015. 川滇黔接壤区铅锌矿产资源潜力与找矿规律分析. 北京: 科学出版社, 1-329
- 吴先彪, 朱尤青, 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. 矿产与地质, 27(1): 26-31, 44
- 杨晓飞, 朱尤青. 2014. 贵州省五指山那雍枝铅锌矿成矿过程浅析. 矿产与地质, 28(4): 417-421, 448
- 袁洪林, 陈开运, 包志安, 宗春蕾, 戴梦宁, 范超, 殷琮. 2013. 飞秒激光剥蚀多接收等离子体质谱准确分析地质样品中的铅同位素组成. 科学通报, 58(33): 3440-3449
- 袁洪林, 殷琮, 刘旭, 陈开运, 包志安, 宗春蕾, 戴梦宁, 赖绍聪, 王蓉, 蒋少涌. 2015. 飞秒激光剥蚀多接收等离子体质谱分析硫化物中 Pb 同位素组成研究. 中国科学(地球科学), 45(9): 1285-1293
- 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. 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. 大地构造与成矿学, 36(1): 93-101
- 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矿因素. 贵州地质, 26(2): 101-105, 121