

文章编号: 1000-4734(2017)06-0585-08

# 黔西北猫榨厂铅锌矿床原位 Pb 同位素地球化学

安琦<sup>1</sup>, 周家喜<sup>2,3\*</sup>, 徐磊<sup>1</sup>, 杨兴玉<sup>1</sup>, 任厚州<sup>1</sup>, 卢贤达<sup>1</sup>

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局 一〇四地质大队, 贵州 都匀 558000; 2. 云南大学 资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650504;  
3. 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:** 猫榨厂(猫猫厂—榨子厂)铅锌矿床是近年来黔西北地区深部找矿的一个成功实例, 该矿床位于扬子陆块西南缘川滇黔铅锌成矿域的中东部贵州省赫章县境内, 毗邻福来厂、天桥和板板桥等铅锌矿床。以往, 该矿床以采地表砂矿和氧化矿为主, 近年新发现的硫化矿体赋存于石炭系碳酸盐岩中, 呈似层状、透镜状或脉状产出, 层控特征明显。本次工作以新发现硫化矿体为研究对象, 在系统矿物学观察的基础上, 借助飞秒激光剥蚀多接收器等离子体质谱仪(fs LA-MC-ICP MS), 开展方铅矿原位 Pb 同位素地球化学研究。结果显示, 方铅矿原位 Pb 同位素组成变化范围较窄,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 18.755~18.775,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 15.780~15.799 和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 39.413~39.477, 暗示成矿金属来源单一或混合流体均一化程度较高。通过与潜在源区岩石 Pb 同位素组成特征对比, 发现猫榨厂铅锌矿床的 Pb 金属主要由基底变质岩和盖层沉积岩共同提供, 但地层沉积岩的贡献程度较基底岩石高。此外, 猫榨厂与福来厂、天桥和板板桥硫化物的 Pb 同位素组成对比, 显示自猫榨厂至板板桥, 硫化物的 Pb 同位素组成逐渐降低, 暗示随着成矿流体的演化或运移, 高 Pb 同位素比值地层沉积岩的贡献比例逐渐减少。由于基底富含丰富的成矿金属, 其贡献程度与矿床规模正相关关系明显。因此, 综合分析认为, 猫榨厂矿区深部和北东至板板桥一带仍有很大找矿潜力。

**关键词:** LA-MC-ICPMS 原位 Pb 同位素; 成矿物质来源; 流体演化; 猫榨厂铅锌矿床; 黔西北铅锌成矿区

**中图分类号:** P597; P618

**文献标识码:** A

**doi:** 10.16461/j.cnki.1000-4734.2018.38.232

**作者简介:** 安琦, 男, 1971 年生, 高级工程师, 从事勘查与找矿研究。E-mail: 100118721@qq.com

## A Study of LA-MC-ICPMS *in-situ* Pb Isotope Geochemistry of the Maozhachang Pb-Zn Deposit, NW Guizhou, China

AN Qi<sup>1</sup>, ZHOU Jia-xi<sup>2,3\*</sup>, XU Lei<sup>1</sup>, YANG Xing-yu<sup>1</sup>, REN Hou-zhou<sup>1</sup>, LU Mao-da<sup>1</sup>

(1. No. 104 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Duyun 558000, China; 2. School of Resource Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming 650504, China; 3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** The discovery of the Maozhachang (Maomaochang-Zhazichang) Pb-Zn deposit is a successful case of deep ore prospecting in NW Guizhou in recent years. The Maozhachang deposit, which is adjacent to the Fulaichang, Tianqiao and Banbanqiao deposits, in Hezhang County, Guizhou Province, is located in the central-eastern part of the Sichuan-Yunnan-Guizhou Pb-Zn metallogenic province in the southwestern Yangtze block. Surface placers and oxidized ores were mined in this deposit in the past years. The newly discovered sulfide ore bodies occurred in Carboniferous carbonate rocks in stratiform, lenticular or veining with obvious strata-bound features. In this work, based on the systematic mineralogical observation, the *in situ* Pb isotopic geochemistry of galena by using femtosecond laser ablation multi receiver plasma mass spectrometer (fs LA-MC-ICP-MS) has been studied. The results show that *in-situ* Pb isotopic

**收稿日期:** 2018-07-25

**基金项目:** 国家重点基础研究计划项目(2014CB440905); 贵州省地矿局地质科研项目(2017[4]; 2016[40]; 2016[09]); 贵州省地矿局科研专项(黔地矿纪要 2015[14]); 云南大学引进人才科研启动项目(YJRC4201804); 云南大学国家自然科学基金优秀青年培育项目(2018YDJQ009)

\* 通讯作者, E-mail: zhoujiayi212@qq.com

compositions of galena are varied within a narrow range, with  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios varying from 18.755 to 17.775,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios varying 15.780 to 15.799, and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios varying from 39.413 to 39.477, respectively, indicating a single source of ore metal or a highly homogenized mixture of ore-forming fluids. By comparing with the Pb isotopic ratios of possible source rocks of the Pb-Zn mineralization, we found that the Pb metal in the Maozhachang Deposit could be mainly sourced from both the basement metamorphic rocks and the cover sedimentary rocks, with the contribution of sedimentary rocks higher than that of the basement rocks. In addition, the comparison among Pb isotopic ratios of sulfides of the Maozhachang and Fulaichang, Tianqiao and Banbanqiao deposits shows that the Pb isotopic ratios are subsequent gradually decreased from the Maozhachang to Banbanqiao, suggesting that with the evolution or transport of ore-forming fluids, the contribution proportion of high Pb isotopic ratios' sediments to the fluids was gradually decreased. Since the basement rocks are rich in ore-forming metals, the degree of their contribution could be positively related to the size of the deposit. Therefore, it is believed that there is still great prospects for prospecting Pb-Zn resources in depth of the Maozhachang deposit and in Maozhachang-Banbanqiao area.

**Keywords:** fs LA-MC-ICPMS *in-situ* Pb isotopes; source of ore-forming elements; evolution of hydrothermal fluids; the Maozhachang Pb-Zn deposit; the NW Guizhou Pb-Zn metallogenic district

贵州省境内的铅锌矿床主要分布在黔西北铅锌成矿区和黔东—湘西铅锌成矿带内<sup>[1]</sup>,前者是著名的川滇黔铅锌成矿域重要组成部分之一<sup>[2]</sup>,铅锌矿化强烈,但长期面临“只见星星、不见月亮”的尴尬处境<sup>[3]</sup>。近年来,在广大地质工作者的共同努力下,黔西北铅锌成矿区内已实现多处找矿突破<sup>[4-5]</sup>,其中猫榨厂(猫猫厂—榨子厂)铅锌矿床是近年来研究区深部找矿突破的一个典型案例<sup>[6]</sup>,该矿床之前开采地表砂矿和氧化矿<sup>[3]</sup>。以往对黔西北地区的铅锌矿床,开展了较为系统的研究工作,取得了诸多重要成果<sup>[7-14]</sup>,尽管认为矿化剂元素 S 主要来源于赋矿地层中的蒸发膏岩层<sup>[1,3,7-8,14]</sup>,但对成矿金属元素的来源有不同观点,如基底岩石<sup>[8]</sup>、赋矿沉积岩<sup>[1]</sup>或峨眉山玄武岩<sup>[2]</sup>。由于研究区多数矿床已开采殆尽,猫榨厂深部新发现的原生硫化矿体,成为解决这一科学问题的理想研究对象。

已有研究显示,黔西北地区原生铅锌矿体主要由硫化物和碳酸盐矿物组成<sup>[2]</sup>。虽然矿物组成简单,但是这些矿物共生、包裹、穿插、交代等现象非常普遍<sup>[1-3]</sup>,所以很难分选出 100%纯净的单矿物,这导致传统法获得的地球化学数据很可能为混合值,故可能掩盖一些重要的成矿信息<sup>[8]</sup>。随着飞秒激光剥蚀多接收器等离子体质谱(fs LA-MC-ICP MS)在矿物微区原位同位素组成分析方面的应用<sup>[15-17]</sup>,快速精准地分析方铅矿原位微区的 Pb 同位素组成变为可能,并得到广泛推广和应用<sup>[15-17]</sup>。本研究利用 fs LA-MC-ICP MS 对猫榨厂铅锌矿床深部新发现原生硫化矿石中的方铅矿,进行微区原位 Pb 同位素组成分析,探讨该矿床成矿物质的来源,并与邻区矿床进行比较,以期揭示该矿床成因及其成矿流体的演化或迁移过程,为认识黔西北地区铅锌成矿物质的来源和找矿预测提供新的地球化学依据。

## 1 区域和矿床地质特征

### 1.1 区域地质概况

黔西北地区出露地层包括自震旦系至白垩系,侏罗系和白垩系地层在该区零星分布<sup>[6-14]</sup>,其岩性以碳酸盐岩为主,砂岩、泥页岩和黏土岩次之。研究区内的构造行迹以 NW 和 NNE-NE 向为主,推覆挤压特征明显,其中 NW 向垭都—紫云断裂-褶皱带是本区最重要的构造体系。黔西北地区除峨眉山玄武岩及其同源辉绿(长)岩分布外,尚未见其它岩浆岩石出露<sup>[6-14]</sup>。该区铅锌矿床赋存于上震旦统灯影组至中二叠统栖霞-茅口组碳酸盐岩中,分布于 NW、NNE 和 NE 向构造带内,与峨眉山玄武岩及其同源辉绿岩空间关系密切。前人对黔西北地区的地质背景、沉积特征、构造演化以及成矿作用类型等进行了较多阐释<sup>[6-14]</sup>,在此不再赘述。

### 1.2 矿床地质特征

猫榨厂铅锌矿床的地质研究程度相对较低,主要原因是之前未发现硫化矿体<sup>[6]</sup>。该矿区出露地层由上至下包括上石炭统黄龙组、下石炭统摆佐组、下石炭统上司组和下石炭统旧司组(图 1),以石炭系

为主。其中上石炭统黄龙组, 厚 349~422 m, 可分 5 个岩性段: 第 5 段为灰-浅灰色薄层灰岩, 具波状层理; 第 4 段为灰色厚层致密块状灰岩; 第 3 段为浅灰色厚层致密灰岩、风化石呈皱纹状; 第 2 段为灰色薄层致密灰岩, 含燧石结核; 第 1 段为灰色-灰白色厚层细粒灰岩, 具规则贝壳状断口。沿 F<sub>1</sub> 断层常出现铁锰碳酸盐化和白云石化, 底部有白云石条带和团块, 与下伏大埔组呈渐变关系。下石炭统大埔组, 为浅灰-深灰色细至粗粒厚层白云岩, 顶部为层纹状白云岩, 之下普遍含重晶石团块, 为矿区铅锌矿的赋矿地层, 与下伏上司组呈整合接触, 厚 345 m。下石炭统上司组, 厚 57~205 m, 可分为 3 个岩性段: 第 3 段为浅灰-深灰色厚层致密灰岩, 顶部常有 0~8 m 黄褐色页岩; 第 2 段为中厚层至薄层致密灰岩夹黑色页岩产贵州珊瑚; 第 1 段为深灰色角砾状灰岩。下石炭统旧司组, 为泥质灰岩夹页岩和砂岩, 厚度大于 300 m。

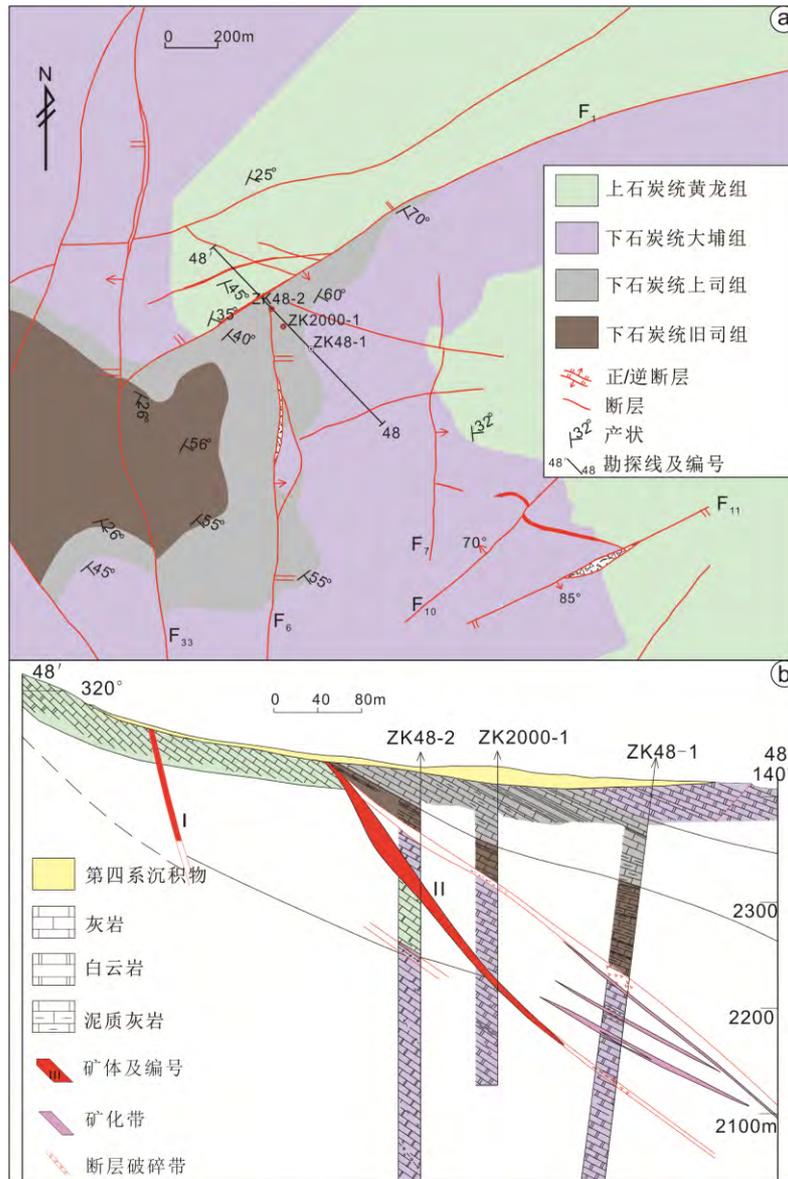


图 1 猫榨厂铅锌矿床地质略图 (a) 和典型剖面图 (b) (据文献[1-2]修改)  
 Fig. 1. Geological sketch map (a) and typical profile (b) for the Maozhachang Pb-Zn deposit.

矿区内有 2 条背斜和 4 条主要断层, 它们构成矿区主体构造轮廓 (图 1a)。江子山背斜位于矿区西侧, 轴向 310°, 北西经江子山, 南东经大坪子, 轴部为旧司组、上司组和大埔组地层, 两翼为上石炭统黄龙组、马平组及二叠系地层<sup>[6,18-19]</sup>。褶皱形态平缓开阔, 两翼地层倾角 10°~30°, 局部 50°左右, 在五里坪—长坪子一带在背斜纵向断层中产有小型铅锌矿。白泥寨背斜, 位于矿区猫猫厂矿段, 轴向

北东  $40^\circ$ ，长约 10 km，轴部地层为下石炭统旧司组、上司组、大埔组地层，两翼为上石炭统黄龙组、马平组地层及二叠系地层，地层倾角  $20^\circ\sim 80^\circ$ ，背斜轴部被  $F_1$  断层破坏并控制矿段铅锌矿的产出。 $F_1$  断层（猫猫厂—耗子洞断层，图 1a）是矿区主干断层，控制猫猫厂多个铅锌矿体的展布<sup>[6,18-19]</sup>，走向北东  $40^\circ\sim 80^\circ$ ，倾向南东倾角  $85^\circ$ ，属于高角度冲断层，上盘地层有旧司组、大埔组和黄龙组；下盘地层为黄龙组，断距 160~300 m。

猫榨厂矿区地表分布大面积砂矿，浅部为铅锌氧化矿，这类氧化矿呈脉状沿断裂带产出，部分沿层间剥离构造带呈似层状产出，氧化矿体较大的有 4 个。其中，I 号氧化矿体位于猫猫厂矿段，产于  $F_1$  断层下盘黄龙组灰岩和白云岩中，矿体走向北东至近东西向，总体倾向北，倾角  $65^\circ\sim 70^\circ$ ，呈透镜状（图 1b），略向东侧伏，控制矿体长 100 m，倾向最大控制埋深 181 m，平均品位 Pb 0.77%，Zn 6.27%。II 号矿体位于 I 号矿体南西侧，产于  $F_1$  断层破碎带上盘大埔组白云岩中，呈脉状，走向近东西，倾向南东，倾角  $75^\circ$ ，矿体长 120 m，倾向延深最大控制埋深 216 m，平均品位 Pb 0.83%，Zn 9.18%。近年来，在矿区深部发现较好的原生硫化矿体，已控制 3 个，以下主要介绍 V 和 VI 号硫化矿体。V 号矿体沿  $F_1$  下盘层间破碎带产出，埋深 520~550 m，倾向南东，倾角  $23^\circ$ ，推断矿体走向长 100 m，倾向延深 100 m，厚度 2.10 m，平均品位 Pb 2.11%~3.91%，Zn 10.05%。VI 号矿体沿  $F_1$  下盘层间破碎带产出，埋深 530~570 m，位于 V 号矿体之下，与之大致平行，距 V 号矿体垂高 11 m，推测矿体走向长 100 m，倾向延深 100 m，平均品位 Pb 2.32%，Zn 17.75%。

猫榨厂铅锌矿床主要由地表砂矿、浅部氧化矿和深部原生硫化物矿石组成，其中原生矿石硫化物主要为闪锌矿，黄铁矿和方铅矿次之，脉石矿物主要为碳酸盐矿物（方解石/白云石），石英、萤石和重晶石偶见。原生矿石主要具有块状和脉状等构造（图 2a-d）。硫化物矿物自形、半自形粒状结构和交代结构（图 2e,f）。根据矿石组构特征、矿物共生关系等，可将猫榨厂铅锌矿床的成矿热液期划分为 2 个主要阶段，即硫化物-白云石阶段和方解石-石英-萤石-重晶石阶段。矿区围岩蚀变现象普遍存在，但蚀变类型简单，主要见碳酸盐化（白云石化、方解石化和铁锰碳酸盐化）和黄铁矿化，局部见硅化<sup>[6,18-19]</sup>。

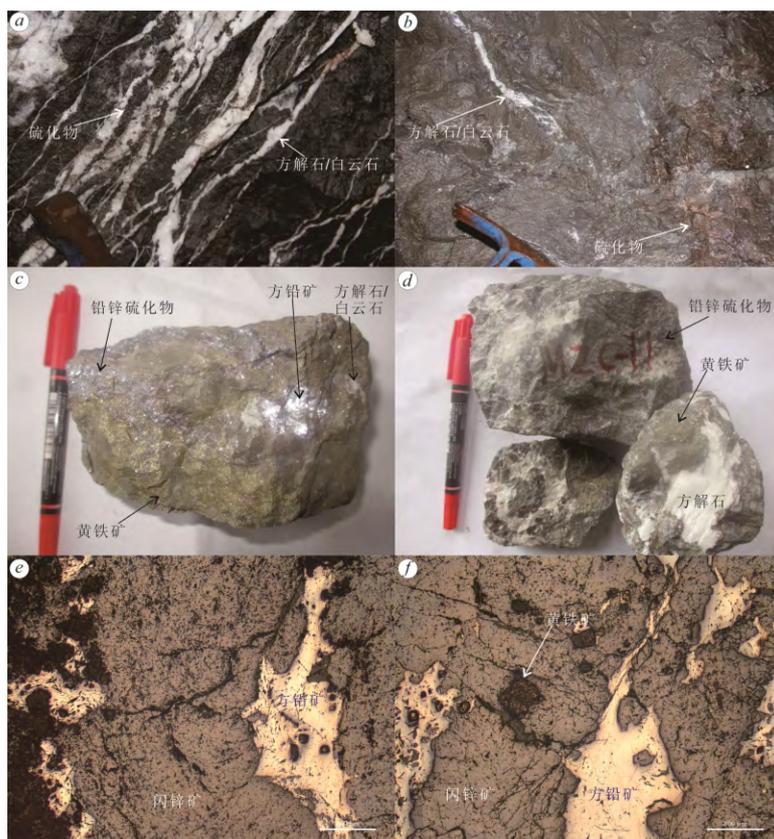


图 2 猫榨厂铅锌矿床典型矿石类型及镜下照片

Fig. 2. Photos and micrographs for typical ores and minerals from the Maozhachang Pb-Zn deposit.

## 2 样品采集与分析方法

样品采自猫榨厂铅锌矿床深部新发现原生硫化矿体, 为主成矿阶段的硫化矿石(图 2a-d)。矿石中方铅矿主要呈它形粒状, 与闪锌矿共生或充填闪锌矿裂隙(图 2e,f)。方铅矿微区原位 Pb 同位素组成分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 分析误差 $\pm 0.003$  ( $1\sigma$ ), 采用的仪器型号为详细仪器参数和实验流程见相应文献<sup>[8-10]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 Pb 同位素分析结果

本次方铅矿 fs LA-MC-ICPMS 原位 Pb 同位素组成分析结果见表 1 和图 3。方铅矿原位  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 18.755~18.775,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 15.780~15.799 和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 39.413~39.477。可见方铅矿原位 Pb 同位素组成非常均一。与邻区福来厂<sup>[20]</sup>、天桥<sup>[2,7]</sup>和板板桥<sup>[2,21-22]</sup>硫化物 Pb 同位素比值相比, 猫榨厂方铅矿原位 Pb 同位素组成更为集中, 且更富放射性成因 Pb(图 3 和图 4)。

表 1 猫榨厂铅锌矿床方铅矿 fs LA-MC-ICPMS 原位 Pb 同位素组成

Table 1. The fs LA-MC-ICPMS in situ Pb isotopic compositions of galena grains from the Maozhachang Pb-Zn deposit

测点编号	矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	测点编号	矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
MZC-1-01	Galena	18.774	15.796	39.413	MZC-20-05	Galena	18.767	15.789	39.454
MZC-1-02	Galena	18.773	15.792	39.424	MZC-20-06	Galena	18.768	15.79	39.455
MZC-1-03	Galena	18.772	15.791	39.427	MZC-20-07	Galena	18.767	15.789	39.455
MZC-1-04	Galena	18.771	15.791	39.428	MZC-20-08	Galena	18.767	15.789	39.455
MZC-1-05	Galena	18.769	15.789	39.429	MZC-20-09	Galena	18.763	15.786	39.456
MZC-1-06	Galena	18.764	15.783	39.43	MZC-3-01	Galena	18.758	15.784	39.456
MZC-1-07	Galena	18.773	15.793	39.431	MZC-3-02	Galena	18.759	15.786	39.456
MZC-1-08	Galena	18.767	15.79	39.432	MZC-3-03	Galena	18.755	15.78	39.457
MZC-1-09	Galena	18.775	15.795	39.435	MZC-3-04	Galena	18.764	15.786	39.457
MZC-1-10	Galena	18.77	15.789	39.437	MZC-3-05	Galena	18.761	15.789	39.457
MZC-14-01	Galena	18.766	15.789	39.437	MZC-3-06	Galena	18.766	15.789	39.458
MZC-14-02	Galena	18.763	15.788	39.438	MZC-3-07	Galena	18.759	15.784	39.458
MZC-14-03	Galena	18.769	15.793	39.439	MZC-3-08	Galena	18.76	15.784	39.461
MZC-14-04	Galena	18.759	15.782	39.441	MZC-3-09	Galena	18.756	15.783	39.464
MZC-14-05	Galena	18.758	15.781	39.442	MZC-4-01	Galena	18.756	15.794	39.464
MZC-14-06	Galena	18.77	15.793	39.445	MZC-4-02	Galena	18.767	15.795	39.465
MZC-14-07	Galena	18.766	15.79	39.446	MZC-4-03	Galena	18.769	15.793	39.465
MZC-14-08	Galena	18.766	15.79	39.446	MZC-4-04	Galena	18.769	15.791	39.466
MZC-14-09	Galena	18.766	15.792	39.449	MZC-4-05	Galena	18.759	15.794	39.469
MZC-20-01	Galena	18.768	15.791	39.452	MZC-4-06	Galena	18.769	15.799	39.471
MZC-20-02	Galena	18.762	15.784	39.452	MZC-4-07	Galena	18.763	15.786	39.472
MZC-20-03	Galena	18.759	15.782	39.453	MZC-4-08	Galena	18.765	15.789	39.475
MZC-20-04	Galena	18.768	15.791	39.453	MZC-4-09	Galena	18.768	15.791	39.477

### 3.2 讨论

#### 3.2.1 成矿金属来源

前人对黔西北地区铅锌矿床成矿物质来源主要有以下 4 种观点: 1) 成矿金属主要由基底岩石提供<sup>[8]</sup>; 2) 主要来源于各时代地层沉积岩<sup>[1]</sup>; 3) 可能与峨眉山幔柱及玄武岩有关<sup>[2]</sup>; 4) 是由基底岩石、沉积岩和玄武岩三者共同提供<sup>[7,12]</sup>。Pb 同位素是示踪铅锌矿床中金属来源的最直接手段之一<sup>[2,16-17,21-22]</sup>, 由于方铅矿中的 U 和 Pb 含量较低, 所以其 Pb 同位素比值可以直接代表成矿流体的 Pb 同位素组成<sup>[21-22]</sup>, 而上述这些潜在源区岩石需要对其 Pb 同位素比值进行成矿年龄校正。尽管对包括黔西北铅锌成矿区在内的川滇黔铅锌成矿域成矿时代还有不同认识<sup>[2]</sup>, 但大量的地质和同位素年代学研究表明, 本区铅锌矿

床很可能形成于 200~230 Ma<sup>[23-27]</sup>。因此, 200 Ma 用于校正各类潜在源区岩石成矿时的 Pb 同位素比值是合理的。通过对比发现(图 3a), 猫榨厂铅锌矿床方铅矿的 Pb 同位素比值与峨眉山玄武岩显著不同, 也与上震旦统沉积岩有所差异, 位于泥盆-二叠系沉积岩和基底岩石之间, 介于上地壳和下地壳端元的现代 Pb 同位素组成范围间(图 3a,b), 但更靠近区域地层沉积岩(图 3a)。因此, 本文认为猫榨厂铅锌矿床的成矿金属是由基底岩石和地层沉积岩共同提供的, 这与前人认识相似<sup>[12]</sup>, 但是猫榨厂矿床成矿流体中金属元素更多的来自于沉积岩(图 3a), 即地层沉积岩的贡献程度要明显高于基底岩石和其它潜在源区岩石。

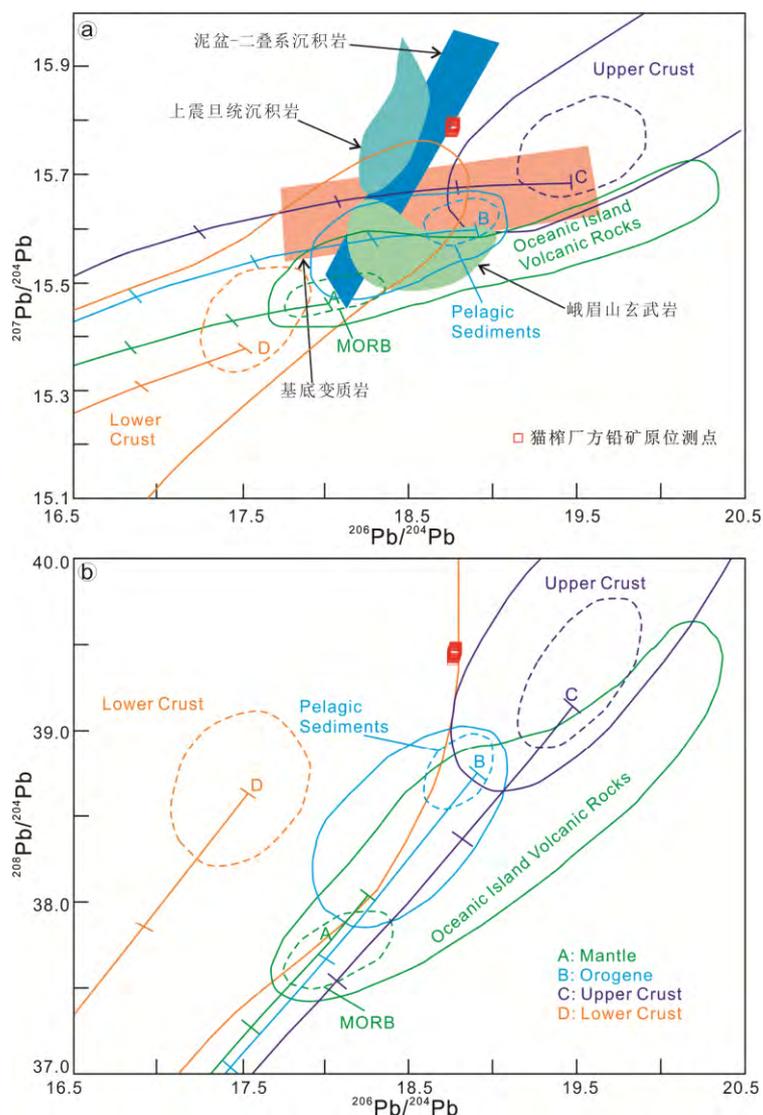


图 3 猫榨厂铅锌矿床方铅矿原位 Pb 同位素组成构造模式图(转引自文献[2])

Fig. 3. Plots for  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (a) and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (b) of galena grains from the Maozhachang Pb-Zn deposits.

### 3.2.2 对成矿流体演化或迁移的约束

以往对黔西北地区铅锌矿床 Pb 同位素地球化学研究显示, 本区至少存在 2 个成矿金属元素的源区端元<sup>[12]</sup>。为了探讨区内成矿流体的演化或迁移方向, 对沿着北东东向猫榨厂—板板桥断裂 4 个典型矿床(即猫榨厂、福来厂<sup>[20]</sup>、天桥<sup>[2,7]</sup>和板板桥<sup>[2,21-22]</sup>)的 Pb 同位素组成进行了比较, 结果显示, 它们的 Pb 同位素组成在  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解上明显分为 2 组(图 4a), 这与以往研究结果相一致<sup>[12]</sup>, 而在  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解上(图 4a), 它们有呈很明显的线性关系。这暗示 4 个矿床成矿流体中的

成矿金属元素确实存在 2 个源区端元, 且不同源区端元的贡献比例随着成矿流体的演化或迁移可能发生变化。例如, 北东部的板板桥矿床, 其成矿金属主要来自基底岩石, 而南西部的猫榨厂矿床, 富放射性成因 Pb 的地层沉积岩提供了更多成矿金属。因此, 本文推测起源于地层沉积岩的富放射性成因 Pb 的成矿流体由南西向北东演化或迁移, 而起源于基底贫放射性成因 Pb 的成矿流体由北东向南西演化或迁移, 二者在不同位置发生不同程度流体混合, 其中部猪拱塘一带是成矿流体汇聚混合的中心部位, 具有良好的找矿潜力。

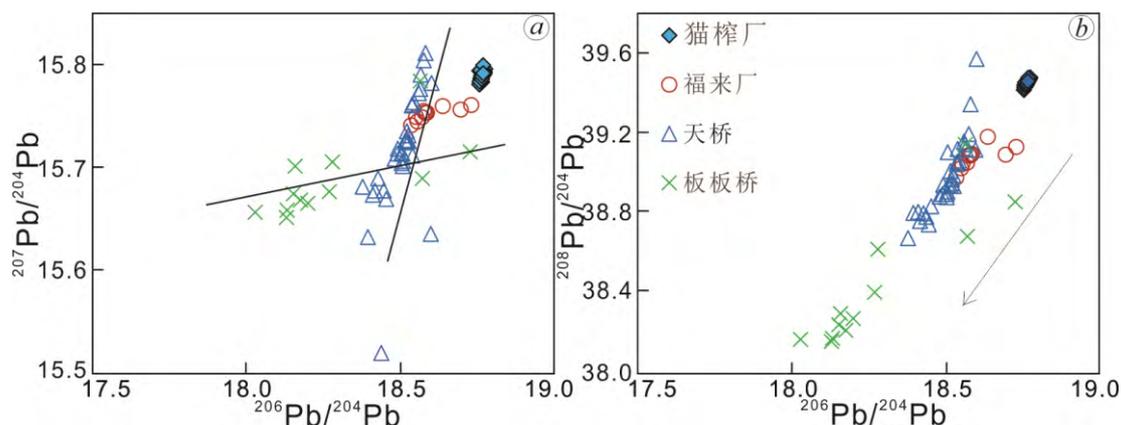


图4 猫榨厂、福来厂、天桥和板板桥 Pb 同位素组成对比 (福来厂、天桥和板板桥数据引自文献[2, 7, 20-22])  
Fig. 4. Comparison of Pb isotopic ratios among the Maozhachang, Fulaichang, Tianqiao and Banbanqiao deposits.

### 3.2.3 对矿床成因的指示意义

由于猫榨厂矿区之前以地表砂矿和浅部氧化矿为开采对象, 以往研究对该矿床成因的理解还停留在表生成矿认识上<sup>[18-19]</sup>。随着矿区深部硫化矿的找矿突破, 一些学者通过对硫化矿体的地质研究, 提出该矿床与邻区的天桥、杉树林以及会泽等均相似, 均为后生成矿<sup>[6]</sup>。本次工作通过对新发现硫化矿石中方铅矿的原位 Pb 同位素组成分析, 显示该矿床成矿金属主要由基底变质岩和地层沉积岩共同, 其中沉积岩的贡献程度较基底岩石高 (图 3)。因此, 流体混合是导致猫榨厂矿床形成的基本事实<sup>[28]</sup>。至于猫榨厂铅锌矿床的成因类型, 尽管研究薄弱, 但与邻区矿床成矿特征的对比显示<sup>[6, 18-19]</sup>, 它们具有相似的成矿地质背景、控矿地质条件、赋矿地层和岩性以及矿体形态、组构等, 是否同属于沉积-改造<sup>[11]</sup>、MVT<sup>[25, 29]</sup>或者独特类型<sup>[2, 23, 30]</sup>, 还需要进一步深入研究。

## 4 结论

黔西北地区猫榨厂铅锌矿床原位 Pb 同位素地球化学研究结果表明, 该矿床成矿金属元素主要由地层沉积岩和基底变质岩共同提供, 且地层沉积岩贡献比例明显高于基底变质岩。此外, 起源于沉积地层的富金属流体有自猫榨厂向板板桥演化或运移的趋势, 而起源于基底岩石的富金属流体, 其演化或运移方向则相反, 黔西北中部猪拱塘—朱砂厂—羊角厂一带可能是 2 种成矿流体汇聚混合的中心部位, 应具有良好的找矿潜力。

**致谢:** 野外工作得到队上同仁的大力支持, 实验测试工作得到西北大学袁洪林教授和包志安工程师等的帮助, 成文过程与中国科学院地球化学研究所叶霖研究员和黄智龙研究员等进行了有益的讨论, 对他们表示衷心的感谢!

## 参 考 文 献:

- [1] 王华云. 贵州铅锌矿的地球化学特征[J]. 贵州地质, 1993, 10(4): 272-290.
- [2] Zhou JX, Xiang ZZ, Zhou MF. The giant Upper Yangtze Pb-Zn province in SW China: Reviews, new advances and a new genetic model [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154: 280-315.
- [3] 金中国. 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, 2008, 1-105.
- [4] 陈国勇, 王亮, 范玉梅, 等. 贵州五指山铅锌矿田深部找矿远景分析[J]. 地质与勘探, 2015, 51(5): 859-869.
- [5] 温汉捷, 周正兵, 刘灵, 等. 贵州天柱大河边铅锌矿床的发现及其意义[J]. 地质通报, 2017, 36(7): 1288-1293.
- [6] 刘幼平, 张伦尉, 杭家华. 黔西北猫猫厂—榨子厂铅锌矿床深部找矿潜力分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(2): 163-168.
- [7] 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 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, 2010, 56(4): 513-524.
- [8] 金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 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, 2016, 32(11): 3441-3455.
- [9] 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 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, 2012, 36(1): 93-101.
- [10] 朱路艳, 苏文超, 沈能平, 等. 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, 2016, 32(11): 3431-3440.
- [11] 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 贵州天桥铅锌矿床分散元素赋存状态及规律[J]. 矿物学报, 2009, 29(4): 471-480.
- [12] 熊伟, 程鹏林, 周高, 等. 黔西北铅锌成矿区成矿金属来源的铅同位素示踪[J]. 矿物学报, 2015, 35(4): 425-429.
- [13] 肖宪国, 黄智龙, 周家喜, 等. 黔西北铅锌矿床成因研究中的几个问题[J]. 矿物学报, 2011, 31(3): 419-424.
- [14] 程鹏林, 熊伟, 周高, 等. 黔西北地区铅锌矿床成矿流体起源与运移方向初探[J]. 矿物学报, 2015, 35(4): 509-514.
- [15] Bao Z, Yuan W, Yuan H, et al. Non-matrix-matched determination of lead isotope ratios in ancient bronze artifacts by femtosecond laser ablation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2016, 402: 12-19.
- [16] Zhou JX, Luo K, Wang XC, et al. Ore genesis of the Fule Pb-Zn deposit and its relationship with the Emeishan Large Igneous Province: Evidence from mineralogy, bulk C-O-S and in situ S-Pb isotopes [J]. *Gondwana Research*, 2018, 54: 161-179.
- [17] Zhou JX, Wang XC, Wilde SA, et al. New insights into the metallogeny of MVT Zn-Pb deposits: A case study from the Nayongzhi in South China, using field data, fluid compositions, and in situ S-Pb isotopes [J]. *American Mineralogist*, 2018, 103(1): 91-108.
- [18] 董家龙. 黔西北猫猫厂—榨子厂铅锌矿区地质特征及找矿方向[J]. 矿产与地质, 2005, 19(1): 29-33.
- [19] 曾道国, 张应文, 刘开坤. 对黔西北猫猫厂—榨子厂铅锌矿区地质特征及找矿方向的几点不同认识[J]. 矿产与地质, 2007, 21(4): 410-414.
- [20] 汤世凯, 马筱, 李学刚, 等. 黔西北福来厂铅锌矿床 Pb 同位素研究及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(4): 549-558.
- [21] Zhou JX, Huang ZL, Zhou MF, et al. Zinc, sulfur and lead isotopic variations in carbonate-hosted Pb-Zn sulfide deposits, southwest China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 58: 41-54.
- [22] Li B, Zhou JX, Huang ZL, et al. Geological, rare earth elemental and isotopic constraints on the origin of the Banbanqiao Zn-Pb deposit, southwest China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 111: 100-112.
- [23] Zhou J, Huang Z, Zhou M, et al. 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*, 2013, 53: 77-92.
- [24] Zhou J, Huang Z, Yan Z. 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 [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 73: 39-47.
- [25] Zhang C, Wu Y, Hou L, et al. Geodynamic setting of mineralization of Mississippi Valley-type deposits in world-class Sichuan-Yunnan-Guizhou Zn-Pb triangle, southwest China: Implications from age-dating studies in the past decade and the Sm-Nd age of Jinshachang deposit [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 103: 103-114.
- [26] Zhou JX, Bai JH, Huang ZL, et al. Geology, isotope geochemistry and geochronology of the Jinshachang carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 98: 272-284.
- [27] 毛景文, 周振华, 丰成友, 等. 初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1437-1471.
- [28] 周家喜, 黄智龙, 高建国, 等. 滇东北茂租大型铅锌矿床成矿物质来源及成矿机制[J]. 矿物岩石, 2012, 32(3): 62-69.
- [29] 金中国, 周家喜, 郑明泓, 等. 贵州普定五指山地区铅锌矿床成矿模式[J]. 矿床地质, 2017, 36(5): 1169-1184.
- [30] 崔银亮, 周家喜, 黄智龙, 等. 云南富乐铅锌矿床地质、地球化学及成因[J]. 岩石学报, 2018, 34(1): 194-206.