

# 云南乌蒙山区毛坪铅锌矿矿床特征及成矿模式研究

杨 斌<sup>1)</sup>, 金灿海<sup>1)\*</sup>, 张 珩<sup>1)</sup>, 冀盘龙<sup>2)</sup>, 郭 阳<sup>1)</sup>, 王子正<sup>1)</sup>

1)中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081; 2)成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

**摘 要:** 云南乌蒙山区毛坪铅锌矿床是滇东北铅锌成矿带中重要的矿床之一。2010年以来, 中国地质调查局响应国家“十二五”和“十三五”脱贫规划, 开设了“乌蒙山区地质矿产综合调查”二级项目, 由成都地质调查中心负责实施。大调查的全面实施, 国家公益性基础研究的不断深入和商业性勘查的及时跟进, 使得云南乌蒙山区内实现了真正意义上的找矿突破, 从而助益于地方经济发展和国家脱贫战略目标。论文在前人资料和研究成果综述的基础上, 结合研究团队近年来的研究进展, 以毛坪铅锌矿最新发现的高温热液改造痕迹为契机, 在详细的野外地质工作基础之上, 重新系统总结了毛坪铅锌矿的矿床地质特征, 并借助于年代学、岩石地球化学和同位素地球化学, 从微量元素、H-O 同位素、S 同位素和铅同位素等方面提出成矿物质来源的新证据, 认为其至少存在 2 期成矿期次, 与其中一期成矿时代相近的黄龙组( $C_2h$ )地层为成矿提供了部分物质来源, 在此基础之上总结提出了毛坪铅锌矿的成矿模式。

**关键词:** 矿床特征; 地球化学; 成矿模式; 毛坪铅锌矿; 滇东北

**中图分类号:** P618.4; P59 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2018.073001

## Ore Deposit Characteristics and Metallogenic Model of the Maoping Pb-Zn Deposit in Wumengshan Mountainous Area, Yunnan Province

YANG Bin<sup>1)</sup>, JIN Can-hai<sup>1)\*</sup>, ZHANG Yu<sup>1)</sup>, JI Pan-long<sup>2)</sup>, GUO Yang<sup>1)</sup>, WANG Zi-zheng<sup>1)</sup>

1) Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081;

2) College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059

**Abstract:** The Maoping Pb Zn deposit in the Yunnan mountain area is one of the most important deposits in the northeastern Yunnan Pb Zn metallogenic belt. Since 2010, in response to the national “12th Five-Year” and “13th Five-Year” poverty alleviation plan, China Geological Survey has implemented the project of “comprehensive survey of geology and mineral resources in the Wumengshan mountainous area”, which was carried out by the Chengdu Geological Survey Center. The comprehensive implementation of large-scale investigation, the continuous deepening of the basic research on national public welfare and the timely follow-up of commercial exploration led to the real prospecting breakthrough in the Wumengshan mountainous area, thus helping the development of local economy and the strategic goal of national poverty reduction. On the basis of the summarization of the previous data and research results, and in combination with the research progress of the geological party in recent years, the geological features of the Maoping lead zinc deposit were systematically summarized based on the detailed field geological work, and the geological characteristics of the Maoping lead zinc deposit were systematically summarized with the aid of rock and isotopic geochemistry. The new evidence of metallogenic material sources was put forward from trace elements, H-O isotopes, S isotopes and lead isotopes. It is believed that the Huanglong Formation ( $C_2h$ ), whose formation age is similar to the metallogenic epoch, provided some material sources for mineralization.

**Key words:** deposit characteristics; geochemistry; metallogenic model; Maoping lead zinc deposit; northeastern Yunnan

本文由中国地质调查局地质调查项目“乌蒙山区地质矿产综合调查”(编号: DD20160019)资助。为中国地质调查局、中国地质科学院 2017 年度地质科技十大进展第五名“科技创新引领地质调查精准支撑服务脱贫攻坚成效显著”的成果之一。

收稿日期: 2018-07-07; 改回日期: 2018-07-18; 网络首发日期: 2018-08-01。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 杨斌, 男, 1987 年生。硕士, 工程师。现主要从事矿产勘查与研究工作。E-mail: 316641491@qq.com。

\*通讯作者: 金灿海, 男, 1965 年生。主要从事矿床地质及矿物岩石学研究。E-mail: 909674458@qq.com。

云南乌蒙山区隶属于扬子地块西南缘的滇东北褶皱凹陷带,由于地质历史上的多次构造运动,该区发育了众多深大断裂带,例如南北向的小江深大断裂、曲靖—昭通隐伏断裂和北西向紫云—垭都断裂等,沿着这三条深大断裂,该区内发育了数量巨大且类型繁多的矿床(点),这其中,铅锌类矿产由于储量大、延伸深、经济意义高而尤为引人注目,典型的如会泽铅锌矿、毛坪铅锌矿和茂祖铅锌矿等。其中毛坪铅锌矿作为典型铅锌矿床之一,吸引了众多学者的目光(柳贺昌和林文达, 1999; 韩润生等, 2000, 2010),这其中表现最为突出,研究最为深入的是韩润生老师及其团队,他们对目标矿床的矿床地质(周高明和李本禄, 2005)、地球化学(胡彬和韩润生, 2003; 邹海俊等, 2004)、流体包裹体(Han et al., 2007)等做了全面研究,取得了大量的成果。

随着近年来毛坪铅锌矿勘探工作的逐步深入,毛坪铅锌矿又出现了一些新的特征(如新开采的 670 中段矿石中出现了大量铅石单矿物,并且构造在这里是破矿构造,并非之前一致认为的成矿通道和容矿构造,这意味着毛坪铅锌矿有着至少两期成矿作用的叠加,并且第一期成矿属于中高温流体成矿),已有的研究成果已经不足以全面反映目标矿床的特征。基于此,本文在详细的野外地质工作的基础之上,结合已有研究成果和最新获得的岩石地球化学和同位素证据,对毛坪铅锌矿的矿床特征及成矿模式进行分析、总结和更新,意在为下一步成矿期次的研究打下基础。

## 1 地质特征

### 1.1 地质概况

研究区大地构造位置属于滇东北褶皱凹陷带,南北向小江深大断裂与近南北向的曲靖—昭通隐伏断裂和北西向紫云—垭都断裂的构造复合部位,是川滇黔铅锌成矿域的重要成部分。受区域断裂的影响,毛坪铅锌矿区内主要发育 NE 向和 NW 向两组断裂。其中 NE 向构造主要为放马坝断裂、毛坪断裂和洛泽河断裂, NW 向断裂主要为龙街断裂。放马坝、毛坪和拖姑梅三条断裂由于小江断裂的左行走滑,在 SE—NW 向应力作用下呈叠瓦状展布。其中矿区内控矿的主干构造为石门坎背斜,次为 NE 向和 NW 向断裂构造(图 1)。石门坎背斜 NW 翼地层产状直立或倒转,厚度变化悬殊,是已知铅锌矿体的主要赋存部位;褶皱东翼地层产状平缓,厚度稳定。

矿区出露地层主要是上泥盆统在结山组白云岩( $D_3zj$ )、炎方组( $DCy$ )含燧石条带灰岩、下石炭统

万寿山组页岩( $C_1w$ )、中—上石炭统黄龙组( $C_2h$ )灰岩与白云岩、下二叠统梁山组( $P_2l$ )页岩与灰岩,外围广泛发育晚二叠世峨眉山玄武岩( $P_3e$ )。

### 1.2 矿床地质特征

#### 1.2.1 矿体产出特征

矿体主要产于上泥盆统、石炭统的灰岩与白云岩地层中,与围岩界线非常明显。矿体成群集中分布于石门坎背斜 NW 倒转翼和倾伏端陡倾斜地层的层间断裂带中,每一个矿体都由呈雁列式排布的多个分支矿体组成。矿体呈似层状、扁柱状、扁豆状、柱状、脉状及不规则状产出,沿 NEE—SWW 向大致平行延伸,倾角  $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ,倾向延深大于走向延长。矿区中 NE 向断裂构造与成矿关系密切, I 号矿体和 II 号矿体均沿着 NE 向断裂 F1 展布,矿体产状与 F1 断裂的产状较为一致。同时,矿区内次级断裂为矿质沉淀提供了良好的容矿空间。

矿区内围岩蚀变主要有白云石化、硅化及黄铁矿化,次为重晶石化、方解石化等。不同的围岩蚀变作用形成了一定的分带性:白云石化、方解石化、铁白云石化和铁方解石化常伴随矿体出现,一般矿体都与铁白云石和铁方解石化有关,离矿体越近,碳酸盐矿物结晶颗粒越粗大,其团块或细脉也越发育。黄铁矿化发育范围较大,但在矿体内或近矿强烈蚀变的中-粗晶白云岩中,黄铁矿化明显增强,局部呈斑块状及大脉状,可见其与矿化关系十分密切。

根据毛坪铅锌矿已有的矿物组分、矿化元素、矿化结构构造的分布特点,自矿体向外将蚀变划分为铅锌矿化带-黄铁矿化带-方解石化带。从矿体到围岩,依次形成闪锌矿+方铅矿+黄铁矿—黄铁矿+方解石+硅化—方解石+黄铁矿—白云石+方解石的蚀变分带特征(魏爱英等, 2012)。

I 号矿体控制延长 280~340 m,厚 5~34 m,斜向延深在 800 m 以上;Pb 平均品位 7.5%,Zn 平均品位 13%,伴生 Ag 66~190 g/t。II 号矿体走向延长 20~182 m,垂深约 540 m,平均厚度 22 m,Pb、Zn 平均品位分别为 6%与 16%;III 号矿体走向延长 43~202 m,垂深约 170 m,平均厚度 5 m,Pb、Zn 平均品位分别为 7.6%及 9%。

从铅锌金属储量看,矿体 I > 矿体 II > 矿体 III,三个矿体矿石品位 Pb+Zn > 16%,Pb/Zn 为 12,均显示 Zn > Pb 的特征,同时矿体骤然尖灭或膨缩现象明显,基本与围岩界线截然可分,局部有浸染状过渡的特征。

#### 1.2.2 矿石特征

矿区内的矿石类型,随着深度的增加,从浅到

深依次可分为氧化矿、氧化矿+硫化矿及硫化矿 3 类。根据硫化矿的主要矿物成分, 又可进一步划分为闪锌矿-方铅矿-黄铁矿矿石、闪锌矿-方铅矿矿石及黄铁矿矿石。

矿石中原生金属矿物主要有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿, 氧化矿物主要有白铅矿、铅矾、菱锌矿、水锌矿、异极矿和褐铁矿; 非金属矿物主要有白云石、铁白云石、方解石、石英、重晶石等。

矿石结构主要以粒状、半自形粒状结构为主, 其次还有镶嵌结构、胶状结构、压碎结构、交代结构、残余结构等; 矿石构造主要有块状构造、层状构造、微层状构造、条带状构造、浸染状构造、斑点状构造、角砾状构造和脉状、细脉状和网脉状构造等。

本次工作对毛坪铅锌矿的不同矿石类型分别采样, 并做了镜下的分析鉴定。现分述如下:

①闪锌矿-方铅矿-黄铁矿矿石(图 2): 闪锌矿约 35%; 方铅矿约 10%; 黄铜矿约 2%; 黄铁矿约 50%; 黝铜矿 3%。镜下所见矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿、黝铜矿。

闪锌矿(Sp): 灰色, 可见红棕色的内反射,

$R=17$ ,  $Hm=3$ , 均质, 多为它形粒状或粒状集合体, 磨光面一般, 粒度大小约为  $400\text{ }\mu\text{m}$ ; Sp 内常见霏细状的(黄铜矿)乳浊体。

方铅矿(Gl): 纯白色,  $R=43$ ,  $Hm=1.5$ , 均质, 多为它形不规则粒状集合体后期灌入 Sp 中, 与 Sp 共生, Gl 磨光面较好, 解理发育, 可见大量三角孔陷穴, 粒度约为  $50\text{ }\mu\text{m}$ (方铅矿主要产于热液型矿床中, 且温度较高)。

黄铜矿(Cp): 黄色,  $R=48.1$ ,  $Hm=3.5$ , 非均性微弱, 多为它形粒状形式零星嵌布在 Py 中, 磨光面很好, 粒度大小约为  $10\text{ }\mu\text{m}$ 。

黄铁矿(Py): 淡黄色,  $R=53$ ,  $Hm=6$ , 均质, 多为半自形-他形粒状的集合体形式出现, 磨光性较差, 常见麻点, Py 的粒度大小约为  $150\text{ }\mu\text{m}$ 。

黝铜矿(Tt): 灰白色微带蓝绿色,  $R=30$ ,  $Hm=4$ , 均质(正交偏光下全消光), 主要为他形粒状集合体呈细脉状分布于矿石中, 磨光面较好。

②闪锌矿-方铅矿

矿石(图 3): 镜下所见矿物 主要为闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿。闪锌矿约 65%, 方铅矿约 20%, 黄铜矿约 5%, 黄铁矿约 10%。

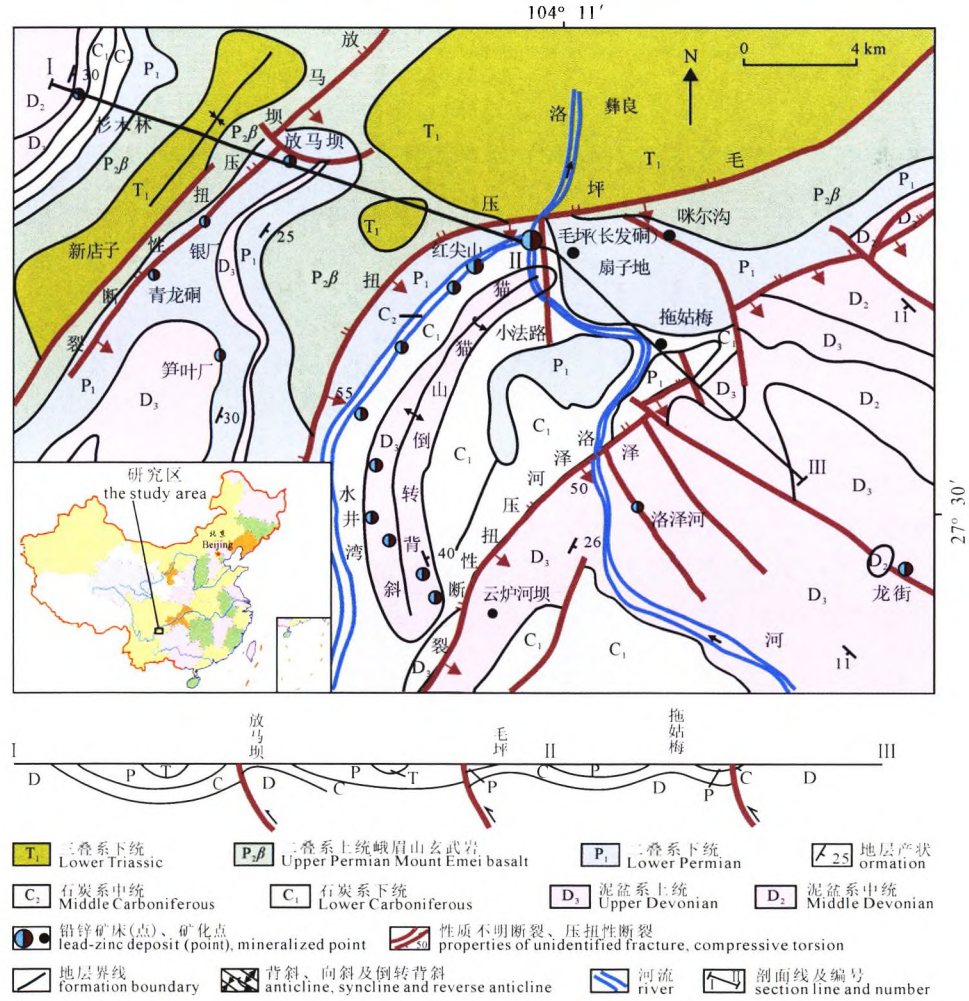


图 1 云南毛坪铅锌矿区域地质简图(据柳贺昌和林文达等, 1999, 有修改)  
Fig. 1 Regional geological map of the Maoping lead-zinc deposit (modified after LIU and LIN, 1999)



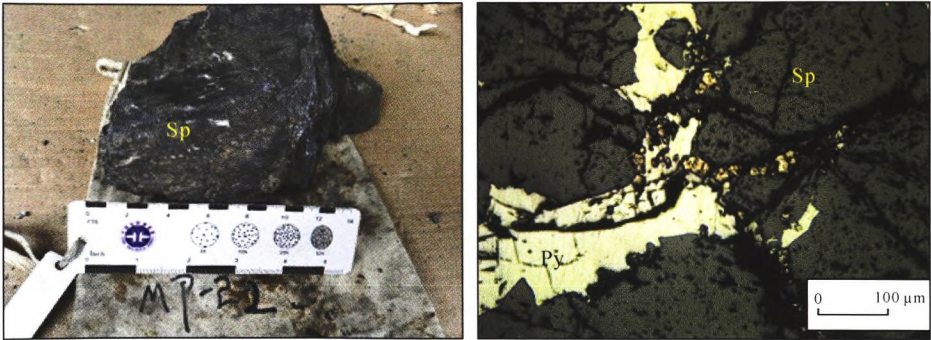


图 2 毛坪铅锌矿典型矿石(闪锌矿-方铅矿-黄铁矿矿石)  
Fig. 2 Typical ore of the Maoping lead-zinc deposit (sphalerite-galena-pyrite ore)  
Sp-闪锌矿; Py-黄铁矿  
Sp-sphalerite; Py-pyrite

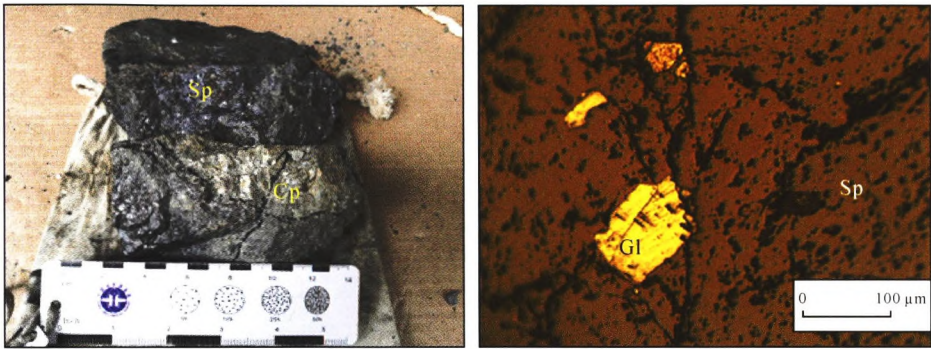


图 3 毛坪铅锌矿典型矿石(闪锌矿-方铅矿矿石)  
Fig. 3 Typical ore (sphalerite-galena ore) in the Maoping Pb Zn deposit  
Sp-闪锌矿; Gl-方铅矿; Cp-黄铜矿  
Sp-sphalerite; Gl-galena; Cp-chalcopyrite

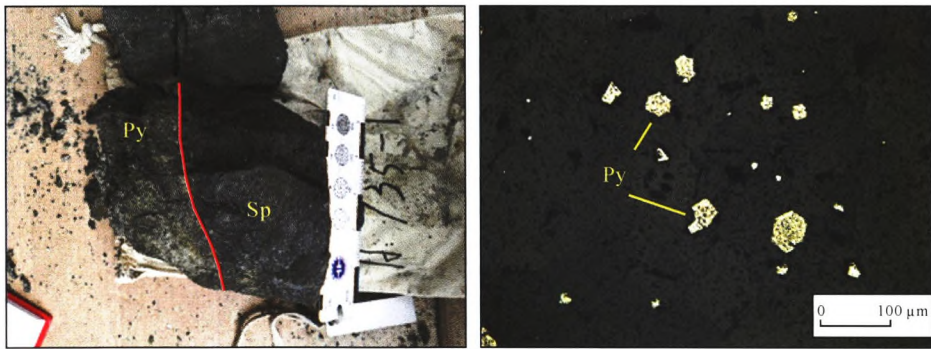


图 4 毛坪铅锌矿典型矿石(黄铁矿矿石)  
Fig. 4 Typical ore (pyrite ore) of the Maoping Pb Zn deposit  
Sp-闪锌矿; Py-黄铁矿  
Sp-sphalerite; Py-pyrite

闪锌矿 (Sp): 灰色, 可见红棕色的内反射,  $R=17$ ,  $Hm=3$ , 均质, 多为它形粒状或粒状集合体, 磨光面一般, 粒度大小约为  $500\ \mu\text{m}$ ; Sp 内常见霏细状的(黄铜矿)乳浊体。

方铅矿 (Gl): 纯白色,  $R=43$ ,  $Hm=1.5$ , 均质, 多为它形不规则粒状集合体, 后期灌入 Sp 中, 与 Sp 及 Py 共生, Gl 磨光面较好, 解理发育, 可见大量三角孔, 三角孔粒度大小约为  $15\ \mu\text{m}$ 。

黄铜矿 (Cp): 黄色,  $R=48.1$ ,  $Hm=3.5$ , 非均性微弱, 多多为它形乳浊体形式嵌布在 Sp 中, 磨光面较

好, 粒度大小约为  $10\ \mu\text{m}$ 。

黄铁矿 (Py): 淡黄色,  $R=53$ ,  $Hm=6$ , 均质, 常呈霉粒状出现, 多为他形粒状嵌布于脉石矿物中呈脉状分布, 磨光性较差, 常见麻点, Py 的粒度大小约为  $50\ \mu\text{m}$ 。

③黄铁矿矿石(图 4): 镜下通常呈淡黄色, 淡黄色,  $R=53$ ,  $Hm=6$ , 均质, 常呈浸染状均匀的分布于脉石矿物中, 部分沿缝隙呈细脉状分布多为半自形-自形的粒状, 大部分隐约可见五角十二面体的自形晶及棱角状碎粒, 磨光性较差, 常见麻点, Py 的

表 1 滇东北铅锌矿床测年结果统计  
Table 1 Annual statistics of Pb-Zn deposits in northeastern Yunnan

| 矿床       | 成矿时代/Ma   | 矿物      | 测试方法  | 资料来源              |
|----------|-----------|---------|-------|-------------------|
| 滇东北毛坪铅锌矿 | 321.7±5.8 | 闪锌矿     | Rb-Sr | 沈战武等, 2016        |
| 滇东北老厂铅锌矿 | 308±25    | 闪锌矿、方铅矿 | Re-Os | 高伟和叶霖, 2014       |
| 滇东北会泽铅锌矿 | 226~225   | 闪锌矿、方解石 | Rb-Sr | 黄智龙等, 2004        |
| 滇东北天桥铅锌矿 | 191.9±6.9 | 闪锌矿、黄铁矿 | Sm-Nd | 李文博等, 2004        |
| 滇东北茂祖铅锌矿 | 196±13    | 方解石     | Rb-Sr | Zhou et al., 2013 |
| 川南跑马铅锌矿  | 200.1±4   | 闪锌矿     | Rb-Sr | 蔺志永等, 2010        |

粒度大小约为 100 μm; 另有部分 Py 呈乳浊状或非细状嵌布在脉石矿物中, 粒度及其细小。

2 地球化学特征

2.1 成矿年龄

滇东北地区的会泽铅锌矿一直被认为是和毛坪铅锌矿同一类型的矿床, 前人对滇东北地区铅锌矿的成矿年龄的研究工作也一直集中于会泽铅锌矿: 管士平和李忠雄(1999)利用 Pb 同位素组成计算出会泽铅锌矿床成矿年龄为 245 Ma; 黄智龙等(2004)测得会泽铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 年龄为(225.6±3.1) Ma 和(223.5±3.9) Ma, 李文博等(2004)用方解石 Sm-Nd 法测得的会泽铅锌矿床(麒麟厂)的成矿年龄(226±15) Ma, 与闪锌矿 Rb-Sr 法测年结果基本吻合; 张长青等(2005)用 K-Ar 法测得蚀变粘土矿物年龄为(176.5±2.5) Ma, 认为矿床形成于特提斯板块向大陆俯冲期(燕山早期), 与峨眉山玄武岩浆活动无直接成因联系。而对于毛坪铅锌矿, 仅沈战武等(2016)以 Rb-Sr 测得同位素等时线年龄(321.7±5.8) Ma (*MSWD*=1.7), 目前为止未见该矿区其他年龄报道(表 1)。这一结果暗示毛坪铅锌矿床主成矿作用发生于石炭纪, 与晚二叠世(~260 Ma)峨眉山大火成岩省玄武岩浆活动无关, 也说明毛坪铅锌矿区别于会泽铅锌, 属于区内成矿较早的一期铅锌矿床。

可见, 在成矿年龄方面, 目标矿床存在年龄数据较少且缺乏高精度的年龄数据的问题, 所以就目前而言, 很难精确地限定毛坪铅锌矿的成矿时代。近年来, 在 Pb-Zn 矿床的成矿年龄研究过程中, 采用 U-Pb 方法测年的铅锌矿床绝大多数是由于矿区中发育有岩浆岩, 所测定的锆石属于岩浆锆石。

从物理学角度上来讲, 存在与岩浆岩共生的铅锌矿床(有岩浆锆石), 必然也就存在与铅锌矿床共生的热液锆石, 一旦热液锆石被准确地认定, 就可以很好地用来进行热液事件的定年(Claoué-Long et al., 1990; Geisler et al., 2002, 2003; Dubinska et al., 2004; Kessel et al., 2005; Lawrie, 2007; Pelleter et al., 2007; Toscano et al., 2014)。并且相比较而言, 热液锆石比岩浆锆石更为接近真实的成矿年龄(Lawrie et al., 2007)。毛坪铅锌矿内已有的包裹体研究证明,

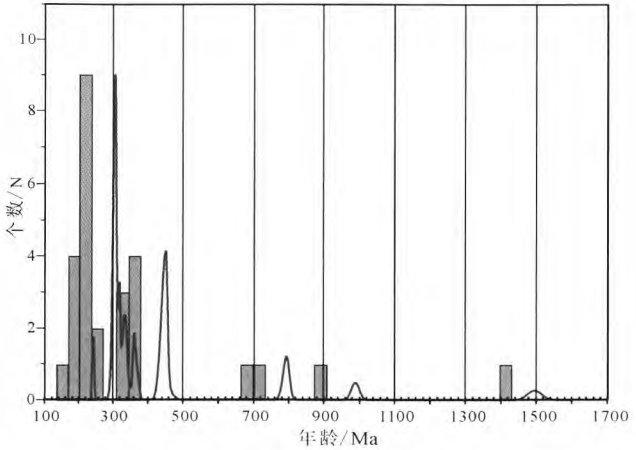


图 5 毛坪铅锌矿矿石锆石同位素 U-Pb 年龄分布图  
Fig. 5 Zircon isotope U-Pb age distribution map of the ore in the Maoping Pb-Zn deposit

其成矿流体是变质水、岩浆水个建造水混合的产物, 它们与沉积作用、昆阳群基底变质及岩浆热液作用有关(Han et al., 2007)。据此, 在毛坪铅锌矿内挑选锆石来进行同位素测年的方法是可行的。

本次从闪锌矿-方铅矿-黄铁矿矿石、闪锌矿-方铅矿矿石及黄铁矿矿石中挑选出了大量锆石, 所挑选的锆石均为不透明-半透明, 具较好自形晶, 经 CL 照片显示锆石具完整环带(王勇等, 2017)。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试在南京聚谱检测科技有限公司完成。1 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统由 Australian Scientific Instruments 制造, 型号为 RESolution LR。四极杆型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)由安捷伦科技(Agilent Technologies)制造, 型号为 Agilent 7700x。准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于锆石表面, 能量密度为 3.5 J/cm<sup>2</sup>, 束斑直径为 33 μm, 频率为 6Hz, 共剥蚀 40 秒, 剥蚀气溶胶由氦气送入 ICP-MS 完成测试。测试过程中以标准锆石 91500 为外标, 校正仪器质量歧视与元素分馏; 以标准锆石 GJ-1 为盲样, 检验 U-Pb 定年数据质量; 以 NIST SRM 610 为外标, 以 Si 为内标 标定锆石中的 Pb 元素含量, 以 Zr 为内标 标定锆石中其余微量元素含量(Liu et al., 2010a)。对均匀锆石颗粒 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb, <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U, <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U 的测试精度均为 2%左右, 对锆石标准的定年精度和准确度在 1%左右。原始的测试数据经



表 2 毛坪铅锌矿锆石 U-Pb 同位素测年结果  
Table 2 Zircon U-Pb isotope dating of the Maoping Pb-Zn deposit

|        | Pb Total/<br>( $\times 10^{-6}$ ) | $^{232}\text{Th}/$<br>( $\times 10^{-6}$ ) | $^{238}\text{U}/$<br>( $\times 10^{-6}$ ) | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$<br>Ratio | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$<br>1sigma | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$<br>Ratio | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$<br>1sigma | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$<br>Ratio | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$<br>1sigma | $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$<br>Ratio | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$<br>Age | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$<br>1sigma | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$<br>Age | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$<br>1sigma | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$<br>Age | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$<br>1sigma |
|--------|-----------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
| MP3-01 | 120.2                             | 296.0                                      | 175.5                                     | 0.058 1                                    | 0.002 1                                     | 0.393 4                                   | 0.014 6                                    | 0.049 1                                   | 0.000 5                                    | 0.45                                      | 600.0                                    | 79.6                                        | 336.8                                   | 10.6                                       | 308.8                                   | 2.9                                        |
| MP3-02 | 80.9                              | 144.8                                      | 218.7                                     | 0.053 1                                    | 0.001 6                                     | 0.420 5                                   | 0.012 8                                    | 0.057 4                                   | 0.000 6                                    | 0.82                                      | 344.5                                    | 66.7                                        | 356.4                                   | 9.1                                        | 360.0                                   | 3.8                                        |
| MP3-03 | 93.5                              | 114.6                                      | 272.4                                     | 0.089 2                                    | 0.126 2                                     | 3.291 5                                   | 2.022 0                                    | 0.298 4                                   | 0.183 8                                    | 1.20                                      | 1 409.3                                  | 1 536.7                                     | 1 479.0                                 | 519.4                                      | 1 683.6                                 | 918.7                                      |
| MP3-04 | 149.6                             | 348.5                                      | 397.5                                     | 0.053 6                                    | 0.001 4                                     | 0.360 4                                   | 0.009 5                                    | 0.048 8                                   | 0.000 5                                    | 0.64                                      | 353.8                                    | 59.3                                        | 312.5                                   | 7.1                                        | 307.2                                   | 2.9                                        |
| MP3-05 | 173.7                             | 285.3                                      | 332.7                                     | 0.057 4                                    | 0.001 6                                     | 0.572 4                                   | 0.017 7                                    | 0.072 3                                   | 0.000 9                                    | 0.65                                      | 505.6                                    | 61.1                                        | 459.6                                   | 11.4                                       | 449.7                                   | 5.3                                        |
| MP3-07 | 156.1                             | 343.3                                      | 374.5                                     | 0.054 7                                    | 0.002 1                                     | 0.363 3                                   | 0.016 9                                    | 0.048 0                                   | 0.001 0                                    | 0.60                                      | 466.7                                    | 82.4                                        | 314.7                                   | 12.6                                       | 302.5                                   | 5.8                                        |
| MP3-08 | 59.8                              | 111.2                                      | 198.6                                     | 0.060 1                                    | 0.002 8                                     | 0.482 5                                   | 0.019 4                                    | 0.058 7                                   | 0.001 0                                    | 0.98                                      | 605.6                                    | 101.8                                       | 399.8                                   | 13.3                                       | 367.8                                   | 6.1                                        |
| MP3-09 | 450.0                             | 184.9                                      | 344.1                                     | 0.101 5                                    | 0.001 4                                     | 3.646 7                                   | 0.057 0                                    | 0.261 1                                   | 0.004 0                                    | 1.03                                      | 1 653.7                                  | 24.8                                        | 1 559.8                                 | 12.4                                       | 1 495.5                                 | 20.5                                       |
| MP3-10 | 84.9                              | 143.5                                      | 141.5                                     | 0.057 8                                    | 0.004 5                                     | 0.581 3                                   | 0.050 4                                    | 0.072 5                                   | 0.002 6                                    | 0.55                                      | 520.4                                    | 170.3                                       | 465.3                                   | 32.4                                       | 451.0                                   | 15.3                                       |
| MP3-11 | 132.4                             | 0.0                                        | 8.1                                       | 1.014 7                                    | 0.157 7                                     | 65.631 6                                  | 28.726 2                                   | 0.359 7                                   | 0.161 6                                    | 84.00                                     | error                                    | error                                       | 4 263.8                                 | 468.4                                      | 1 980.8                                 | 769.8                                      |
| MP3-12 | 122.3                             | 172.2                                      | 157.5                                     | 0.142 5                                    | 0.021 7                                     | 1.395 1                                   | 0.295 4                                    | 0.056 9                                   | 0.003 0                                    | 0.50                                      | 2 257.7                                  | 265.6                                       | 886.9                                   | 125.9                                      | 356.9                                   | 18.3                                       |
| MP3-13 | 201.3                             | 330.5                                      | 325.6                                     | 0.083 0                                    | 0.004 6                                     | 0.616 7                                   | 0.036 6                                    | 0.053 6                                   | 0.000 6                                    | 0.56                                      | 1 269.4                                  | 107.4                                       | 487.8                                   | 23.0                                       | 336.8                                   | 3.6                                        |
| MP3-14 | 266.2                             | 318.2                                      | 314.0                                     | 0.087 2                                    | 0.003 3                                     | 0.924 3                                   | 0.037 4                                    | 0.076 8                                   | 0.000 9                                    | 0.55                                      | 1 364.8                                  | 67.6                                        | 664.6                                   | 19.7                                       | 477.1                                   | 5.2                                        |
| MP3-15 | 202.2                             | 291.6                                      | 240.5                                     | 0.085 9                                    | 0.002 5                                     | 0.847 3                                   | 0.025 2                                    | 0.071 6                                   | 0.000 7                                    | 0.45                                      | 1 400.0                                  | 56.6                                        | 623.2                                   | 13.9                                       | 446.0                                   | 4.2                                        |
| MP3-16 | 173.3                             | 275.7                                      | 315.0                                     | 0.060 1                                    | 0.003 1                                     | 0.596 6                                   | 0.038 4                                    | 0.071 3                                   | 0.000 9                                    | 0.62                                      | 605.6                                    | 111.1                                       | 475.1                                   | 24.4                                       | 444.0                                   | 5.3                                        |
| MP3-17 | 69.3                              | 191.8                                      | 229.4                                     | 0.054 5                                    | 0.002 0                                     | 0.289 7                                   | 0.010 8                                    | 0.038 6                                   | 0.000 5                                    | 0.66                                      | 394.5                                    | 81.5                                        | 258.3                                   | 8.5                                        | 244.0                                   | 2.8                                        |
| MP3-18 | 355.0                             | 543.9                                      | 654.6                                     | 0.125 0                                    | 0.008 7                                     | 1.367 0                                   | 0.181 3                                    | 0.074 0                                   | 0.006 6                                    | 0.66                                      | 2 028.1                                  | 123.5                                       | 874.9                                   | 77.9                                       | 460.2                                   | 39.3                                       |
| MP3-19 | 161.2                             | 370.8                                      | 264.7                                     | 0.059 5                                    | 0.002 1                                     | 0.439 4                                   | 0.016 0                                    | 0.053 6                                   | 0.000 7                                    | 0.40                                      | 587.1                                    | 77.8                                        | 369.8                                   | 11.3                                       | 336.6                                   | 4.0                                        |
| MP3-20 | 102.0                             | 232.0                                      | 283.9                                     | 0.057 3                                    | 0.002 5                                     | 0.398 5                                   | 0.017 6                                    | 0.050 6                                   | 0.000 5                                    | 0.66                                      | 501.9                                    | 65.7                                        | 340.5                                   | 12.8                                       | 318.0                                   | 3.3                                        |
| MP3-21 | 108.0                             | 185.0                                      | 155.4                                     | 0.052 7                                    | 0.002 8                                     | 0.523 9                                   | 0.029 7                                    | 0.072 0                                   | 0.001 3                                    | 0.48                                      | 316.7                                    | 120.4                                       | 427.8                                   | 19.8                                       | 448.2                                   | 7.7                                        |
| MP3-23 | 88.1                              | 114.4                                      | 214.6                                     | 0.074 4                                    | 0.002 7                                     | 0.714 3                                   | 0.026 3                                    | 0.069 7                                   | 0.000 7                                    | 1.02                                      | 1 051.6                                  | 67.6                                        | 547.3                                   | 15.6                                       | 434.3                                   | 4.5                                        |
| MP3-24 | 332.8                             | 564.4                                      | 391.8                                     | 0.066 2                                    | 0.003 0                                     | 0.649 1                                   | 0.031 9                                    | 0.071 0                                   | 0.000 8                                    | 0.40                                      | 813.0                                    | 91.7                                        | 507.9                                   | 19.6                                       | 442.3                                   | 5.0                                        |
| MP3-25 | 131.3                             | 326.2                                      | 229.8                                     | 0.054 4                                    | 0.001 3                                     | 0.364 0                                   | 0.009 4                                    | 0.048 5                                   | 0.000 5                                    | 0.38                                      | 387.1                                    | 47.2                                        | 315.2                                   | 7.0                                        | 305.4                                   | 3.4                                        |
| MP3-26 | 98.3                              | 174.9                                      | 484.5                                     | 0.058 3                                    | 0.001 7                                     | 0.422 9                                   | 0.014 2                                    | 0.052 5                                   | 0.000 6                                    | 2.71                                      | 542.6                                    | 63.0                                        | 358.1                                   | 10.1                                       | 329.6                                   | 3.9                                        |
| MP3-27 | 216.2                             | 349.2                                      | 236.7                                     | 0.061 5                                    | 0.001 7                                     | 0.617 5                                   | 0.018 9                                    | 0.072 7                                   | 0.000 6                                    | 0.36                                      | 657.4                                    | 61.1                                        | 488.3                                   | 11.9                                       | 452.7                                   | 3.8                                        |
| MP3-28 | 271.6                             | 264.0                                      | 123.7                                     | 0.064 1                                    | 0.001 8                                     | 1.143 6                                   | 0.029 0                                    | 0.130 0                                   | 0.001 6                                    | 0.26                                      | 746.3                                    | 61.1                                        | 774.2                                   | 13.7                                       | 787.7                                   | 9.0                                        |
| MP3-29 | 231.8                             | 190.3                                      | 301.3                                     | 0.065 4                                    | 0.001 3                                     | 1.182 6                                   | 0.022 4                                    | 0.131 3                                   | 0.001 3                                    | 0.87                                      | 787.0                                    | 42.6                                        | 792.5                                   | 10.4                                       | 795.4                                   | 7.2                                        |
| MP3-30 | 1 290.2                           | 3 537.3                                    | 1 432.3                                   | 0.356 6                                    | 0.005 3                                     | 1.243 3                                   | 0.020 6                                    | 0.025 3                                   | 0.000 3                                    | 0.22                                      | 3 735.5                                  | 22.8                                        | 820.4                                   | 9.3                                        | 161.1                                   | 1.9                                        |
| MP3-31 | 151.9                             | 228.1                                      | 301.2                                     | 0.070 6                                    | 0.004 8                                     | 0.710 5                                   | 0.064 9                                    | 0.070 4                                   | 0.001 4                                    | 0.70                                      | 946.3                                    | 140.0                                       | 545.1                                   | 38.6                                       | 438.4                                   | 8.5                                        |
| MP3-32 | 490.3                             | 724.8                                      | 620.5                                     | 0.105 1                                    | 0.009 8                                     | 0.863 1                                   | 0.059 4                                    | 0.062 1                                   | 0.001 5                                    | 0.50                                      | 1 716.7                                  | 167.6                                       | 631.8                                   | 32.4                                       | 388.4                                   | 9.4                                        |
| MP3-33 | 84.8                              | 188.8                                      | 184.6                                     | 0.050 5                                    | 0.002 4                                     | 0.372 8                                   | 0.017 7                                    | 0.053 9                                   | 0.001 3                                    | 0.52                                      | 216.7                                    | 109.2                                       | 321.7                                   | 13.1                                       | 338.3                                   | 7.9                                        |
| MP3-34 | 524.9                             | 379.0                                      | 268.7                                     | 0.135 4                                    | 0.003 1                                     | 2.360 8                                   | 0.056 4                                    | 0.127 0                                   | 0.002 6                                    | 0.38                                      | 2 169.4                                  | 40.1                                        | 1 230.8                                 | 17.1                                       | 770.5                                   | 15.0                                       |
| MP3-35 | 99.6                              | 212.3                                      | 302.7                                     | 0.055 9                                    | 0.001 8                                     | 0.367 5                                   | 0.011 4                                    | 0.047 8                                   | 0.000 5                                    | 0.77                                      | 455.6                                    | 74.1                                        | 317.8                                   | 8.5                                        | 301.0                                   | 3.3                                        |
| MP3-36 | 282.4                             | 458.6                                      | 340.3                                     | 0.113 7                                    | 0.023 7                                     | 1.079 4                                   | 0.304 9                                    | 0.054 2                                   | 0.002 9                                    | 0.40                                      | 1 861.1                                  | 383.8                                       | 743.3                                   | 150.0                                      | 340.2                                   | 17.8                                       |
| MP3-37 | 153.3                             | 389.8                                      | 199.9                                     | 0.050 2                                    | 0.002 1                                     | 0.335 6                                   | 0.014 0                                    | 0.048 6                                   | 0.000 6                                    | 0.27                                      | 211.2                                    | 98.1                                        | 293.8                                   | 10.7                                       | 306.0                                   | 4.0                                        |
| MP3-38 | 6.5                               | 0.0                                        | 2.6                                       | 0.992 5                                    | 0.142 5                                     | 176.82 9                                  | 90.553 2                                   | 0.725 9                                   | 0.347 5                                    | 19.84                                     | error                                    | error                                       | 5 260.5                                 | 570.3                                      | 3 518.1                                 | 1 316.1                                    |
| MP3-39 | 180.0                             | 267.1                                      | 266.8                                     | 0.102 7                                    | 0.008 4                                     | 0.888 8                                   | 0.115 0                                    | 0.059 2                                   | 0.001 5                                    | 0.55                                      | 1 673.8                                  | 152.5                                       | 645.7                                   | 61.9                                       | 370.6                                   | 9.0                                        |
| MP3-40 | 388.8                             | 327.9                                      | 293.3                                     | 0.091 2                                    | 0.003 6                                     | 1.585 9                                   | 0.056 8                                    | 0.127 0                                   | 0.002 5                                    | 0.50                                      | 1 451.6                                  | 74.5                                        | 964.7                                   | 22.3                                       | 770.8                                   | 14.2                                       |
| MP3-41 | 62.9                              | 160.4                                      | 117.1                                     | 0.049 5                                    | 0.003 7                                     | 0.323 1                                   | 0.021 2                                    | 0.047 7                                   | 0.000 9                                    | 0.39                                      | 172.3                                    | 172.2                                       | 284.3                                   | 16.2                                       | 300.7                                   | 5.6                                        |
| MP3-42 | 129.8                             | 260.3                                      | 181.0                                     | 0.065 1                                    | 0.002 7                                     | 0.534 3                                   | 0.024 1                                    | 0.059 3                                   | 0.000 7                                    | 0.38                                      | 788.9                                    | 82.4                                        | 434.7                                   | 16.0                                       | 371.3                                   | 4.5                                        |
| MP3-43 | 80.7                              | 159.4                                      | 255.0                                     | 0.058 7                                    | 0.001 9                                     | 0.412 6                                   | 0.015 8                                    | 0.050 7                                   | 0.000 5                                    | 0.85                                      | 566.7                                    | 72.2                                        | 350.7                                   | 11.3                                       | 318.7                                   | 3.3                                        |
| MP3-44 | 59.6                              | 88.5                                       | 166.4                                     | 0.059 3                                    | 0.001 9                                     | 0.573 5                                   | 0.017 9                                    | 0.070 2                                   | 0.001 4                                    | 1.02                                      | 588.9                                    | 73.1                                        | 460.3                                   | 11.6                                       | 437.7                                   | 8.1                                        |
| MP3-45 | 161.5                             | 111.9                                      | 153.7                                     | 0.070 2                                    | 0.001 8                                     | 1.605 3                                   | 0.042 7                                    | 0.165 7                                   | 0.002 0                                    | 0.72                                      | 1 000.0                                  | 51.9                                        | 972.3                                   | 16.6                                       | 988.4                                   | 11.2                                       |
| MP3-46 | 6.1                               | 0.0                                        | 1.6                                       | 0.720 7                                    | 0.093 1                                     | 100.78 0                                  | 48.429 7                                   | 0.635 0                                   | 0.588 3                                    | 8.29                                      | error                                    | error                                       | 4 693.9                                 | 525.5                                      | 3 169.5                                 | 2 428.2                                    |
| MP3-47 | 37.0                              | 79.5                                       | 156.7                                     | 0.054 9                                    | 0.002 3                                     | 0.364 8                                   | 0.014 7                                    | 0.048 4                                   | 0.000 6                                    | 1.05                                      | 409.3                                    | 89.8                                        | 315.8                                   | 11.0                                       | 304.6                                   | 3.4                                        |
| MP3-48 | 270.4                             | 410.5                                      | 372.3                                     | 0.110 3                                    | 0.006 6                                     | 0.801 9                                   | 0.038 9                                    | 0.053 9                                   | 0.001 1                                    | 0.54                                      | 1 805.6                                  | 109.3                                       | 597.9                                   | 21.9                                       | 338.7                                   | 6.9                                        |

过 ICP-MS Data Cal 软件离线处理完成(Liu et al., 2010a, b)。锆石测年结果如表 2 和图 5 所示。在所得的 48 个测点年龄值中, 有效年龄值为 45 个, 锆石的 Th/U 比值大于 0.1(表 2), 表现出了与岩浆锆石相符的同位素地球化学特征。其分布特征如图 5 所示。其中最老的锆石年龄为 1 500 Ma, 最新的锆石年龄为 161 Ma, 年龄分布主要集中于 2 个峰值, 即 300 Ma 左右和 450 Ma 左右。剔除由于铅丢失而导致谐和率不高的点, 毛坪铅锌矿岩浆-热液锆石 LA-ICP-MS U-Pb 得到 2 期谐和年龄为(448±4) Ma (MSWD=0.85)和(305±3) Ma(MSWD=0.64)(图 6)。

2.2 岩石地球化学

2.2.1 容矿围岩地球化学

成矿年龄的研究显示毛坪铅锌矿成矿热液高峰期大致在 305 Ma 和 448 Ma, 后者的年龄在区内尚属首次发现。而前者与沈战武等(2016)所测结果近似, 其时代属于 C<sub>2-3</sub>。因此矿区内发育的黄龙组(C<sub>2h</sub>)地层或与成矿有密切的关系。本次工作对矿区黄龙组地层中的灰岩、白云岩取样进行了化学分析, 为了尽量避免和减少后期热液活动对岩石化学成分的影响, 在充分考虑了样品的空间分布情况下, 本次岩石地球化学样品尽量挑选了无后期热液脉体穿插的黄龙组灰岩、白云岩。经过手标本和光薄片鉴

定, 最终每类型岩性选择了 2 块(共计 8 块)样品进行微量的测试。

样品处理时将表皮切除, 取中心新鲜区域无污染粉碎至 200 目以下, 同一岩性样品粉末均匀混合后进行测试。测试均在国家测试中心完成。16 个主次成分量测定仪器为 X 荧光光谱仪(2100), 检测依据为 GB/T14506, 28-2010《硅酸盐岩石化学分析方法》第 28 部分; 氧化亚铁量测定则依据 GB/T14506.14-2010《硅酸盐岩石化学分析方法》第 14 部分。测试温度为 20℃, 测试的相对湿度为 30%。微量稀土测试仪器为 ELEMENT 等离子体质谱分析仪(X-SERIES), 检测依据为 DZ/T0223-2001《电感耦合等离子体质谱分析方法通则》, 测试温度为 20℃, 测试的相对湿度为 30%, 分析结果见表 3。

分析结果显示、这些岩石中的 Pb, Zn, Au, Ag, Ge, In, Cd, Hg, Sb, As, Sn 含量较普通的灰岩和白云岩偏高, 其 Co/Ni, Sb/Bi 分别为 2.29 和 7.32, Ga, B, Ni, Cr 等元素含量低于世界碳酸盐岩的丰度值。这些特征可能暗示黄龙组地层为成矿提供了部分物质来源, 成矿热液运移时热液改造作用将这些元素从岩石中带出, 在流体中富集。

2.2.2 同位素地球化学

Han 等(2007)对毛坪铅锌矿内的流体包裹体及

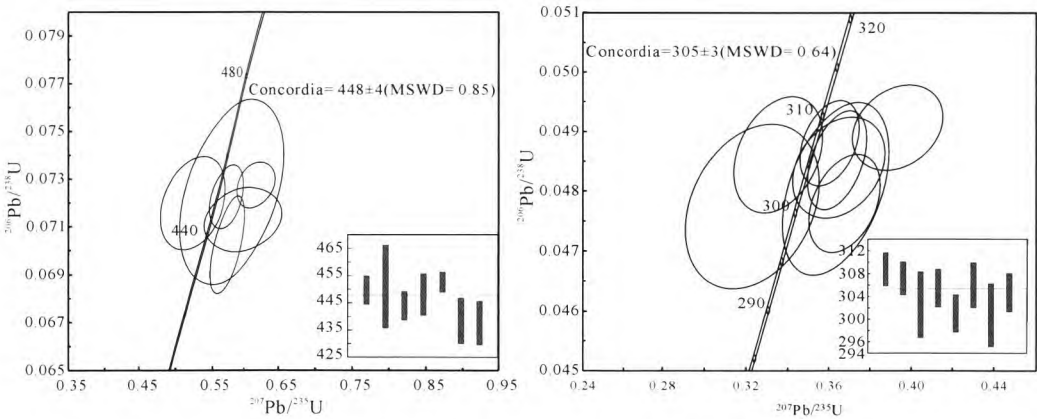


图 6 毛坪铅锌矿岩浆-热液锆石谐和年龄图  
Fig. 6 Magmatic hydrothermal zircon concordant age map of the Maoping Pb Zn deposit

表 3 毛坪铅锌矿下石炭统含矿地层微量元素分析结果(×10<sup>-6</sup>)  
Table 3 Trace element analyses of Lower Carboniferous ore-bearing strata in the Maoping Pb-Zn deposit (×10<sup>-6</sup>)

| 岩性    | Ge    | Pb     | Tl   | In    | Bi    | Sn    | Ag    | Zn    | Hg     | Ga   | As    |
|-------|-------|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|-------|
| 灰岩    | 0.39  | 610    | 0.16 | <0.10 | 0.26  | 2.20  | 2.60  | 800   | 2.80   | 1.1  | 8.5   |
| 白云岩   | 0.56  | 80     | 0.25 | <0.10 | 0.82  | 0.10  | 0.60  | 65    | <0.10  | 7.0  | 8.8   |
| 含矿白云岩 | 4.00  | 610    | 0.10 | 0.13  | 0.82  | 40.00 | 4.40  | 195   | 110.00 | 0.4  | 105.0 |
| 碳酸盐岩  | 0.20  | 9      | 0.01 | 0.01  | —     | 0.20  | 0.01  | 20    | 0.04   | 4.0  | 1.0   |
| 岩性    | Sb    | Cd     | Au   | B     | Cr    | Ni    | Co    | Mn    | V      | Mo   | Cu    |
| 灰岩    | <0.30 | 2.80   | 0.00 | <1.00 | <1.00 | <1.00 | <1.00 | 125   | <1.00  | <1.0 | 4.0   |
| 白云岩   | <0.30 | 1.50   | 0.00 | 42.00 | 2.30  | 5.20  | <1.00 | 660   | 2.00   | 1.0  | <1.0  |
| 含矿白云岩 | 6.00  | 165.00 | 0.04 | <1.00 | 1.00  | 10.50 | 24.00 | 6 500 | 25.00  | 11.0 | 50.0  |
| 碳酸盐岩  | 0.20  | 0.03   | 0.00 | 20.00 | 11.00 | 20.00 | 0.10  | 1 100 | 20.00  | 0.40 | 4.0   |

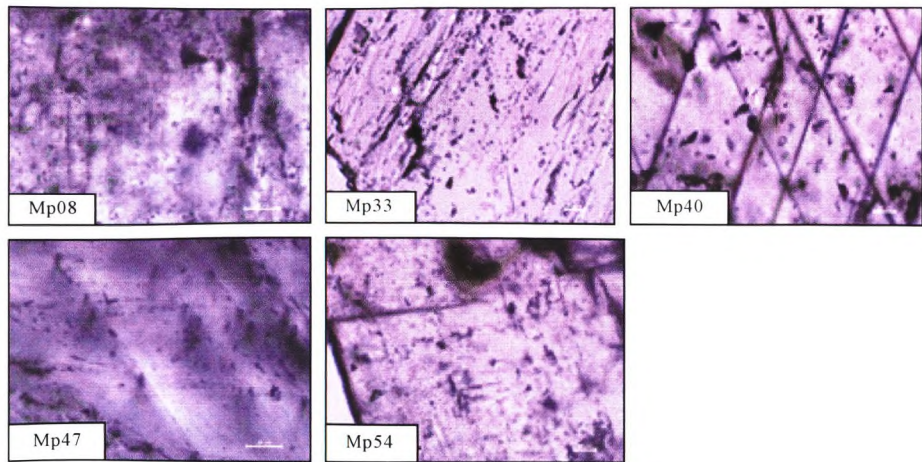


图 7 毛坪各类型铅锌矿石中的流体包裹体

Fig. 7 Fluid inclusions in various types of lead-zinc ores in Maoping

表 4 毛坪铅锌矿床的流体包裹体测温结果

Table 4 Temperature measurement results of fluid inclusions in the Maoping Pb Zn deposit

| 样品号  | 测定矿物 | 包裹体类型 | 气相比例   | 冰点温度/℃<br>(包裹体个数) | 均一温度/℃<br>(包裹体个数) | 盐度/(wt%NaCl)<br>(包裹体个数) | 均一相态 |
|------|------|-------|--------|-------------------|-------------------|-------------------------|------|
| MP08 | 白云石  | 气液包裹体 | 5%~10% | -2.2~-4.5(4)      | 117~188(4)        | 3.71~7.17(4)            | 液相   |
| MP33 | 方解石  | 气液包裹体 | 5%~20% | -10.3~-17.4(12)   | 152.2~294(12)     | 14.25~20.52(12)         | 液相   |
| MP40 | 方解石  | 气液包裹体 | 5%~20% | -0.1~-0.9(10)     | 108.1~236.5(11)   | 0.18~1.57(10)           | 液相   |
| MP47 | 方解石  | 气液包裹体 | 5%~20% | -0.3~-14(4)       | 120.3~173.1(9)    | 0.53~17.79(4)           | 液相   |
| MP54 | 方解石  | 气液包裹体 | 5%~20% | -4~-13.7(6)       | 102.5~144.5(8)    | 6.45~17.52(6)           | 液相   |

成矿流体组成进行了较为系统和详细的研究,本次工作选取了毛坪矿的闪锌矿-方铅矿-黄铁矿矿石中的包含在白云石和方解石内包裹体对成矿流体进行研究。白云石和方解石中的包裹体为两相气液水包裹体(图 7),包裹体大小变化不均匀,长轴主要在 1~12 μm 之间。气液相包裹体中的气液比多介于 5%~20%之间,少量气液比高达 40%。包裹体主要为星点状分布,次为独立分布,包裹体形态以椭圆形、不规则形为主。

流体包裹体测温实验在国土资源部西南矿产资源监督检测中心完成,测试仪器为 LINKAM THMS600 型冷热台,测温范围为-196~600℃,均一法测温精度为±1℃,冷冻法的精度为±0.1℃。选用较大的流体包裹体进行测试,一般直径大于 4 μm,包裹体通过加热测得了气液相均一温度、冰点温度。流体包裹体的水溶液冰点测定时,升温速度由开始时的 10℃/min 逐渐降低为 5℃/min、2℃/min,临近相变点时降到 1℃/min。均一温度测定时,开始时的升温速率为 20℃/min,临近相变时降到 2℃(表 4)。

对研究区铅锌矿石中的白云石和方解石的包裹体分别进行均一法和冷冻法测温,获得两相气液水包裹体的均一温度范围为 102.5~294℃(图 8),与胡彬(2004)测得的 193~247℃,170~197℃及 165~203℃的温度范围较为接近。测温结果显示包

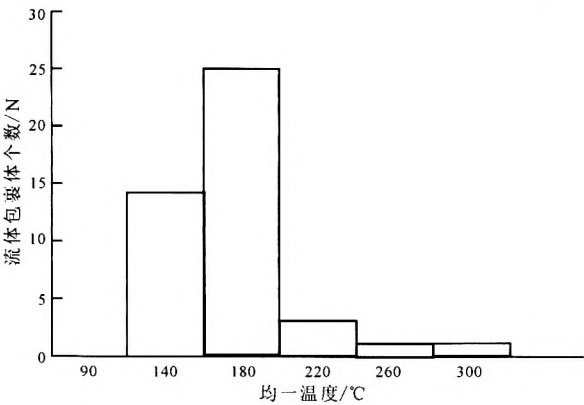


图 8 毛坪铅锌矿床流体包裹体均一温度直方图

Fig. 8 Uniform temperature histogram of fluid inclusion in the Maoping Pb Zn deposit

裹体的均一温度分布较集中,存在一个明显的温度区间,气液相流体包裹体的冷冻温度-17.4~-0.1℃,盐度变化范围较大,为 0.18 wt%~20.52 wt%。这说明毛坪的流体包裹体大多形成于中低温流体,是变质水、岩浆水个建造水混合的产物(Han et al., 2007)。

从包裹体成分来看(表 4),包裹体在成分上差异不明显,但方解石内所含的包裹体大致可分为 2 类:一类是以 MP33 为代表的高盐度包裹体,均一温度稍高;另一类则以低盐度,低温度为特征,如 MP47 和 MP54。



利用流体包裹体, 运用邵洁莲(1990)计算流体压力的经验公式  $P=P_0T_h/T_0$ (其中  $P_0=219+26.20w$ ,  $T_0=374+9.20w$ )计算出他们的压力值。经计算, 毛坪铅锌矿的流体包裹体的捕获压强为  $385\times10^5\sim647\times10^5$  Pa, 平均  $516\times10^5$  Pa, 与 Han 等(2007)所得到的  $406\times10^5\sim570\times10^5$  Pa 较为接近。再根据流体包裹体捕获的压力可以流体的成矿深度。对于受断裂控制的脉状热液矿床而言, 其成矿流体系统可为静岩压力, 也可为静水压力, 抑或二者交替的临界状态(即断层阀模式, Sibson et al., 1988; 祁进平等, 2007; 侯林等, 2013b)。该状态下流体以脉动的形式间歇性喷出, 导致流体压力不断变化于静岩和静水之间。当断层阀开启, 流体系统处于静水系统下, 压力较低; 当断层阀关闭, 流体系统处于静岩系统下, 压力较高。利用压力与深度关系的通式  $P=H\rho g$ , 当流体处于静岩压力系统下时, 取  $\rho$  为大陆平均岩石密度  $2.7\text{ g/cm}^3$ , 当流体处于静水压力系统下时, 取  $\rho$  为各类型包裹体当时计算得到的密度, 取  $g$  为重力加速度  $0.098\text{ g}$ , 计算出毛坪铅锌矿包裹体流体深度在  $1\,472.42\sim2\,303.02\text{ m}$  之间, 平均  $1\,887.72\text{ m}$ 。

稳定同位素是成岩成矿过程中物质来源、物理化学条件、作用机制和演化历史的有效指示剂(杨耀民等, 2005)。依据同位素效应和同位素分馏的基本理论, 通过同位素组成及其时空变化特征的定性比较和定量评价, 将能获得大量关于岩石和成矿形成条件和成因机制的直接信息(Ohmoto, 1972)。本次也对毛坪铅锌矿矿石中的硫同位素和铅同位素组成进行了测定(表 4, 5), 结果显示不同矿物的  $\delta^{34}\text{S}$  组成各不相同, 其中黄铁矿  $12.15\%\sim15.67\%$ , 平均  $14.42\%$ ; 闪锌矿  $9.62\%\sim19.30\%$ , 平均  $12.93\%$ ; 方铅矿  $7.96\%\sim9.13\%$ , 平均  $8.50\%$ 。硫同位素的组成以富重硫为特征(表 5)。 $\delta^{34}\text{S}$ (黄铁矿) $>\delta^{34}\text{S}$ (闪锌

矿) $>\delta^{34}\text{S}$ (方铅矿), 属正常分馏, 表明它们的同位素组成已达到平衡。同时也说明成矿期的热水沉积系统属于一个相对比较开放的系统。黄铁矿、闪锌矿和方铅矿的  $\delta^{34}\text{S}$  均为正值, 其变化范围在  $7.96\%\sim19.30\%$  之间, 平均值为  $12.03\%$ , 硫同位素组成既不同于幔源硫, 也不同于海水硫, 而是幔源硫与海水硫混合后的混合硫(王超伟等, 2009)。

Taylor(1975)根据世界上不同地质环境中来源的铅同位素组成总结了不同来源铅同位素组成特点。化学沉积物富铀铅而贫钍铅; 浅变质岩富集钍铅; 上地壳富铀, 且具有高的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和高  $\mu$  值; 而下地壳中富钍, 伴随低的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  高  $\omega$  值; 造山带是二者的混合区域。方铅矿和闪锌矿的铅同位素测定结果显示  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  在  $18.340\sim18.564$  之间,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  在  $15.40\sim15.742$  之间,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  在  $38.561\sim39.149$  之间, 其组成较为稳定、变化范围不大, 与近代太平洋海泥中铅同位素组成( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.773$ ;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.681$ ;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.736$ )较为相近(表 5)。另外采用 Petersen(1979)参数计算的方铅矿和闪锌矿的源区特征值  $\mu$  为  $9.07\sim9.72$ ; 平均值为  $9.38$ 。其特征值与地幔( $\mu=7.8$ )和上地壳( $\mu=11.3$ )均不相同, 而与现代海洋沉积系统( $\mu\approx9.81$ )较为近似。由此推断矿石中的铅由幔源铅与洋壳铅混合组成(表 6)。

3 问题与讨论

3.1 有关于成矿流体的讨论

毛坪铅锌矿属典型的后生矿床, 多期成矿是其最典型的特征, 但已知的成矿时代仅有一期, 大致是  $322\text{ Ma}$  左右(沈战武等, 2016), 本次在铅锌矿石中挑选锆石得到的另外一组年龄( $448\pm4$ ) Ma 在区内尚属首次, 其具体地质意义将另文撰述。

表 5 毛坪铅锌矿矿石矿物硫同位素组成  
Table 5 Sulfur isotope composition of ore minerals in the Maoping lead-zinc deposit

| 矿物名称                     | 方铅矿  |      |      |      | 闪锌矿  |       | 闪锌矿   |       |       | 黄铁矿   |       | 黄铁矿   |       |
|--------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\delta^{34}\text{S}/\%$ | 8.36 | 9.13 | 8.55 | 7.96 | 9.85 | 15.33 | 9.62  | 10.55 | 19.30 | 14.80 | 15.67 | 12.15 | 15.06 |
| 均值/ $\%$                 | 8.50 |      |      |      |      |       | 12.93 |       |       | 14.42 |       |       |       |

注: 实验数据由中国地质科学院宜昌地质矿产研究所测定。

表 6 毛坪铅锌矿矿物铅同位素组成  
Table 6 Lead isotopic composition of minerals in the Maoping lead-zinc deposit

| 矿物名称                              | 方铅矿    |        |        | 闪锌矿    | 方铅矿    | 闪锌矿    | 黄铁矿    |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | 18.412 | 18.564 | 18.340 | 18.562 | 18.723 | 18.622 | 18.595 |
| $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | 15.593 | 15.563 | 15.400 | 15.742 | 15.724 | 15.712 | 15.727 |
| $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | 38.561 | 39.149 | 38.790 | 39.020 | 39.041 | 39.099 | 39.159 |
| $\mu$                             | 9.370  | 9.370  | 9.070  | 9.720  | 9.660  | 9.660  | 9.690  |

注: 实验数据由中国地质科学院宜昌地质矿产研究所测定。

毛坪铅锌矿内的矿石内含有大量的岩浆和热液形态锆石,代表其曾经受过中-高温热液的改造,而根据已有的包裹体研究成果,毛坪铅锌矿的成矿流体是有岩浆水(中高温)参与的,这是二者的共同点。但已有的研究显示区内大部分流体包裹体却属于中低温下形成的低盐度包裹体(胡彬, 2004; Han et al., 2007)。仔细分析区内已有的包裹体  $\delta^{18}\text{O}$  同位素数据(图 9)不难看出,包裹体的流体来源大致能分为 3 类: I 类是发育在脉石矿物方解石中的包裹体,  $\delta^{18}\text{O}$  显示其来源于原生岩浆水; II 类是矿石矿物闪锌矿、方铅矿内的包裹体(虚线方框内),  $\delta^{18}\text{O}$  显示其来源于岩浆水和地表水的混合; III 类则是次生的黄铁矿,  $\delta^{18}\text{O}$  显示其来源较接近于大气降水。从脉石矿物→矿石矿物→次生矿物,  $\delta^{18}\text{O}$  指示的包裹体流体来源也从岩浆水→混合水→大气降水。据此笔者认为已有的本区包裹体数据(成分, 盐度, 均一温度)很有可能是成矿晚期或者次生的包裹体,其特征只能代表成矿末期(岩浆水与地表水混合)或者成矿期后(无限接近地表水)的流体特征,而区内成矿期成矿流体的特征应该是与脉石矿物方解石中所含包裹体(图 9 中黄色圆点)成分较为接近。

3.2 成矿物质来源的探讨

胡彬(2004)根据所测定的硫、铅同位素证据认为毛坪铅锌矿成矿物质主要来源于上地壳,峨眉山玄武岩可能为毛坪铅锌矿提供了部分物质来源。但依据目前得到的成矿年龄数据来看,两者年龄差距过大,显然峨眉山玄武岩(260 Ma)与毛坪铅锌矿((448±4) Ma; (305±3) Ma 和 (322±6) Ma)的成矿没有必然的联系。但是不可否认的是,毛坪铅锌矿矿石的 S、Pb 同位素组成确实与峨眉山玄武岩较为接近(表 7)。笔者认为,由于毛坪铅锌矿矿体的产出严格受褶皱及断裂构造的控制。对毛坪铅锌矿而言,构造对其影响作用更大。胡彬(2004)在研究毛坪铅锌

矿不同矿化程度的矿石时发现,从矿石-弱矿化构造岩-强矿化构造岩,成矿流体中的 Sr、Ba、Sc、Hf、Zr 等元素与强矿化构造岩中的 LREE、HREE 以类质同象进行了置换, R 型聚类分析显示成矿与构造的相关因子较高。邹海俊等(2004)以毛坪 910 和 846 中段 NE 向断裂为例研究提出矿区内铅锌主要来源于沿断裂构造灌入的流体。从金属硫化物 Pb 同位素组成看,铅源主要来自幔源和洋壳混合, S 同位素示踪表明,毛坪铅锌矿硫化物与混合相硫具有相似性。所有的同位素化学证据指向均一致,因此本文认为毛坪铅锌矿成矿物质的初始来源应该是和峨眉山玄武岩是同源的,在成矿过程中沿构造薄弱位置有变质水、建造水、大气降水以及周围地层物质的加入,使得流体的温度不断降低,相应的同位素也表现出混染的特征,最终成矿元素析出沉淀在构造有利部位成矿(唐菊兴等, 2017)。

3.3 成矿模式探讨

结合已有的资料和研究成果,可以初步把毛坪

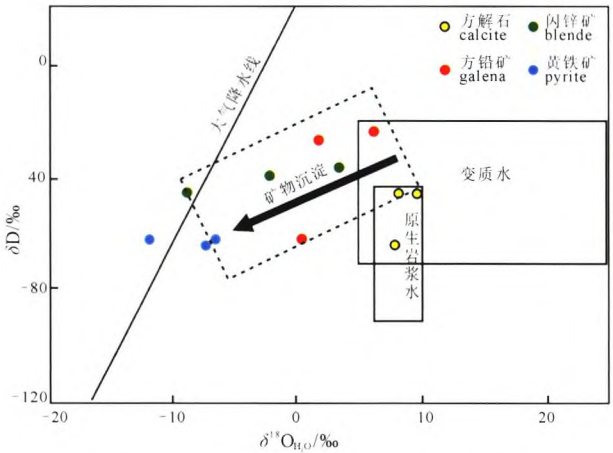


图 9 铅锌矿流体包裹体  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  图解  
(据 Han et al., 2007, 有修改)

Fig. 9 Graphical solution of delta  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  fluid inclusions in the Maoping lead-zinc deposit (modified after Han et al., 2007)

表 7 毛坪铅锌矿与峨眉山玄武岩 S-Pb 同位素对比  
Table 7 Comparison of S-Pb isotopes between the Emeishan basalt and the basalt of the Maoping Pb-Zn deposit

| 矿物名称(样品件数)         | 同位素比值                             |                                   |                                   |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                    | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ |
| 方铅矿(本文)            | 18.723                            | 15.724                            | 39.041                            |
| 方铅矿(胡彬, 2004)      | 18.537~18.914                     | 15.702~15.746                     | 38.905~39.176                     |
| 方铅矿(柳贺昌和林开达, 1999) | 18.412                            | 15.593                            | 38.561                            |
| 方铅矿(柳贺昌和林开达, 1999) | 18.564                            | 15.563                            | 39.149                            |
| 方铅矿(柳贺昌和林开达, 1999) | 18.46                             | 15.51                             | 38.94                             |
| 闪锌矿(本文)            | 18.622                            | 15.712                            | 15.727                            |
| 闪锌矿(胡彬, 2004)      | 18.565~18.679                     | 15.695~15.728                     | 39.030~39.168                     |
| 闪锌矿(柳贺昌和林开达, 1999) | 18.562                            | 15.742                            | 39.02                             |
| 黄铁矿(柳贺昌和林开达, 1999) | 18.458~18.732                     | 15.657~15.796                     | 38.845~39.473                     |
| 玄武岩(韩润生等, 2010)    | 18.371                            | 15.662                            | 38.666                            |
| 玄武岩(韩润生等, 2010)    | 18.175                            | 15.629                            | 38.38                             |



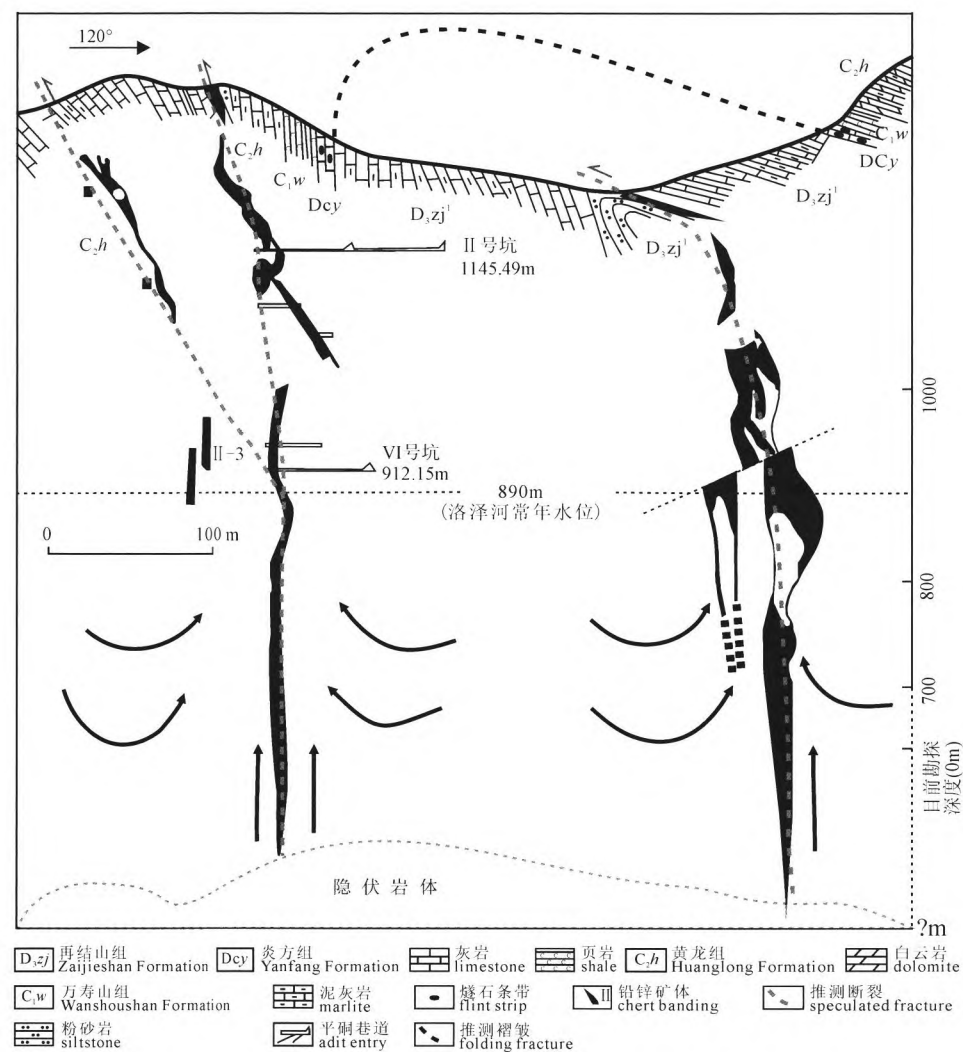


图 10 毛坪铅锌矿沉积-热液改造成矿模式图(据胡彬, 2004, 有修改)  
Fig. 10 Metallogenic model of sedimentary hydrothermal alteration in the Maoping Pb-Zn deposit (modified after HU, 2004)

铅锌矿床的形成归结为沉积—热液改造成矿模式(图 10)。首先是沉积期: 自泥盆纪直至中石炭世末, 本区表现为海进过程, 矿区周围不断接受陆源碎屑物的沉积, 在生物分解出还原态硫的条件下, 使古海水及沉积物中部分 Pb、Zn 离子得以初步富集。然后热液改造期, 由于区域构造的作用, 在区内形成了 3 条压扭性断裂和断裂带间褶皱。该过程产生的断裂为深部和地表流体的对流循环提供了通道, 而褶皱则为成矿流体的富集提供了储存空间。成矿流体多次沿构造通道上移成矿, 这个过程中集中于 448 Ma 与 305 Ma 两个时期发生。成矿流体运移时与地表水及围岩间发生物质交换, 从而在氧化与还原过渡带、岩相过渡带及出现成矿流体地球化学障下部有利空间沉淀。

4 结论

(1) 锆石 U-Pb 同位素数据表明毛坪铅锌矿存在 2 个热液作用高峰期: (448±4) Ma 与 (305±3) Ma, 这

很可能代表着毛坪铅锌矿 2 个成矿期次。  
(2) 毛坪的原生矿石可分为闪锌矿-方铅矿-黄铁矿矿石、闪锌矿-方铅矿矿石及黄铁矿矿石 3 类, 矿石经历过高温热液改造, 同位素年龄证据表明毛坪铅锌矿与峨眉山玄武岩无关, 但有可能与其来自同一源区。  
(3) S、Pb 同位素证据显示本区上地壳及矿体周边地层为成矿提供了部分物质来源, 其中岩石地球化学证据显示黄龙组(C<sub>2</sub>h)地层可能为 305 Ma 时期的成矿提供了主要物质来源。  
(4) 综合各方面证据, 暂将毛坪铅锌矿的成矿模式定为沉积-流体改造模式。

致谢: 本文作为展示“中国地质调查局、中国地质科学院 2017 年度地质科技十大进展”的一个小窗口, 是成都地质调查中心“乌蒙山区地质矿产综合调查”项目全体成员集体智慧的结晶。文中涉及较多未公开出版的地质报告和潜力评价资料, 在此对相关人员进行深表谢意!

## Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20160019).

## 参考文献:

- 高伟, 叶霖. 2014. 云南澜沧老厂铅锌多金属矿床中玄武岩岩石球化学特征及锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年[J]. 矿床地质, 33(S1): 193-194.
- 管士平, 李忠雄. 1999. 康滇地轴东缘铅锌矿床铅硫同位素地球化学研究[J]. 地质地球化学, (4): 45-54.
- 韩润生, 刘丛强, 黄智龙, 李元, 陈进. 2000. 云南会泽铅锌矿床构造控矿及断裂构造岩稀土元素组成特征[J]. 矿物岩石, 20(4): 11-18.
- 韩润生, 王峰, 赵高山, 王进, 周高明, 王学琨. 2010. 滇北东矿集区昭通毛坪铅锌矿床深部找矿新进展[J]. 地学前缘, 17(3): 275-275.
- 侯林, 丁俊, 王长明, 廖震文, 郭阳, 王生伟, 王子正. 2013. 云南武定迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床成矿流体特征与成矿作用[J]. 岩石学报, 29(4): 1187-1202.
- 胡彬, 韩润生. 2003. 毛坪铅锌矿构造控矿及找矿方向[J]. 云南地质, 22(3): 295-303.
- 胡彬. 2004. 云南昭通毛坪铅锌矿床地质地球化学特征及隐伏矿预测[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 黄智龙, 李文博, 张振亮, 韩润生, 陈进. 2004. 云南会泽超大型铅锌矿床成因研究中的几个问题[J]. 矿物学报, 24(2): 105-111.
- 李文博, 黄智龙, 陈进, 韩润生, 张振亮, 许成. 2004. 会泽超大型铅锌矿床成矿时代研究[J]. 矿物学报, 24(2): 112-116.
- 蒯志永, 王登红, 张长青. 2010. 四川宁南跑马铅锌矿床的成矿时代及其地质意义[J]. 中国地质, 37(2): 488-494.
- 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: 129-131.
- 祁进平, 陈衍景, 倪培, 赖勇, 丁俊英, 宋要武, 唐国军. 2007. 河南冷水北沟铅锌银矿床流体包裹体研究及矿床成因[J]. 岩石学报, 23(9): 2119-2130.
- 邵洁连. 1990. 金矿找矿矿物学[M]. 北京: 中国地质大学出版社.
- 沈战武, 金灿海, 代堰铭, 张珂, 张海. 2016. 滇东北毛坪铅锌矿床的成矿时代: 闪锌矿 Rb-Sr 定年[J]. 高校地质学报, 22(2): 213-218.
- 唐菊兴, 王勤, 杨欢欢, 高昕, 张泽斌, 邹兵. 2017. 西藏斑岩-砂卡岩-浅成低温热液铜多金属矿成矿作用、勘查方向与资源潜力[J]. 地球学报, 38(5): 571-614.
- 王超伟, 李元, 罗海燕, 刘学龙. 2009. 云南毛坪铅锌矿床的成因探讨[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 34(1): 7-11.
- 王勇, 王立强, 旦真王修, 李壮, 李申. 2017. 西藏班公湖—怒江结合带南缘革吉地区晚侏罗世流纹斑岩的成因——锆石 U-Pb 定年、地球化学和 Hf 同位素约束[J]. 地球学报, 38(5): 723-733.
- 魏爱英, 薛传东, 洪托, 罗大锋, 李炼然, 王锋, 周高明, 刘星. 2012. 滇东北毛坪铅锌矿床的蚀变-矿化分带模式——蚀变-岩相填图证据[J]. 岩石矿物学杂志, 31(5): 723-735.
- 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠, 石学法. 2005. 武定迤纳厂 Fe-Cu-REE 矿床 Sm-Nd 同位素年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 50(12): 1253-1258.
- 张长青, 毛景文, 刘峰, 李厚民. 2005. 云南会泽铅锌矿床粘土矿物 K-Ar 测年及其地质意义[J]. 矿床地质, 24(3): 317-324.
- 周高明, 李本禄. 2005. 云南毛坪铅锌矿床地质特征及成因初

探[J]. 西部探矿工程, 17(3): 75-77.

邹海俊, 韩润生, 胡彬, 刘鸿. 2004. 云南昭通毛坪铅锌矿床成矿物质来源的新证据——NE 向断裂构造岩微量元素 R 型因子分析结果[J]. 地质与勘探, 40(5): 43-48.

## References:

- CLAOUÉ-LONG J C, KING R W, KERRICH R. 1990. Archaean hydrothermal zircon in the Abitibi greenstone belt: Constraints on the timing of gold mineralisation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 98(1): 109-128.
- DUBINSKA E, BYLINA P, KOZŁOWSKI A, DORR W, NEJBERT K, SCHASTOK J, KULICKI C. 2004. U-Pb dating of serpentinization: hydrothermal zircon from a metasomatic rodingite shell (Sudetic ophiolite, SW Poland)[J]. Chemical Geology, 203: 183-203.
- PELLETER E, CHEILLETZ A, GASQUET D, MOUTTAQI A, ANNICH M, HAKOUR A E, DELOULE E, FÉRAUD G. 2007. Hydrothermal zircons: A tool for ion microprobe U-Pb dating of gold mineralization (Tamlalt-Menhouhou gold deposit-Morocco)[J]. Chemical Geology, 245(3-4): 135-161.
- GAO Wei, YE Lin. 2014. Characteristics of basalt and its zircon SHRIMP U-Pb isotopic dating in the Laochang Pb Zn polymetallic deposit, Lancang, Yunnan[J]. Mineral Deposits, 33(S1): 193-194(in Chinese with English abstract).
- GEISLER T, PIDGEON R T, BRONSWIJK W V, KURTZ R. 2002. Transport of uranium, thorium, and lead in metamict zircon under low-temperature hydrothermal conditions[J]. Chemical Geology, 191: 141-154.
- GEISLER T, PIDGEON R T, KURTZ R, BRONSWIJK W V, SCHLEICHER H. 2003. Experimental hydrothermal alteration of partially metamict zircon[J]. American Mineralogist, 88(10): 1496-1513.
- GUAN Shi-ping, LI Zhong-xiong. 1999. Lead-Sulfur isotope study of Carbonate-Hosted Lead-Zinc deposits at the eastern margin of the Kangdian Axis[J]. Geology-Geochemistry, (4): 45-54(in Chinese with English abstract).
- HAN Run-sheng, LIU Cong-qiang, HUANG Zhi-long, LI Yuan, CHEN Jin. 2000. Characteristics of Ore-controlling structures and REE composition of fault rocks in Hui-Ze lead-zinc deposit, Yunnan[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 20(4): 11-18(in Chinese with English abstract).
- HAN Run-sheng, WANG Feng, ZHAO Gao-shan, WANG Jin, ZHOU Gao-ming, WANG Xue-kun. 2010. New progress in deep prospecting in the Zhaotong Maoping Pb Zn deposit, East Yunnan ore concentration area[J]. Earth Science Frontiers, 17(3): 275-275(in Chinese with English abstract).
- HAN Run-sheng, ZHOU Hai-jun, HU bin, HU Yi-zhao, XUE Chuan-dong. 2007. Features of fluid inclusions and sources of ore-forming fluid in the Maoping carbonate-hosted Zn-Pb-(Ag-Ge) deposit, Yunnan, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(9): 2109-2118.
- HOU Lin, DING Jun, WANG Chang-ming, LIAO Zhen-wen, GUO Yang, WANG Sheng-wei, WANG Zi-zheng. 2013. Ore-forming fluid and metallogenesis of the Yinchang Fe-Cu-Au-REE deposit, Wuding, Yunnan Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(4): 1187-1202(in Chinese with English abstract).
- HU Bin, HAN Run-sheng. 2003. The Ore-Controlling Structure and Ore-Prospecting Direction of Maoping Lead-zinc de-



- posit[J]. *Yunnan Geology*, 22(3): 295-303(in Chinese with English abstract).
- HU Bin. 2004. Features of Geology-geochemistry and Prognosis of Concealed Bodies for Mao Ping Zinc-Lead deposit at Zhaotong, Yunnan[D]. Kunming: Kunming University Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- HUANG Zhi-long, LI Wen-bo, ZHANG Zheng-liang, HAN Run-shen, CHEN Jin. 2004. Several Problems involved in genetic studies on Huize Superlarge Pb-Zn deposit, Yunnan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(2): 105-111(in Chinese with English abstract).
- KESSEL R, ULMER P, PETTKE T, SCHMIDT M W, THOMPSON A B. 2005. The water-basalt system at 4 to 6 GPa: Phase relations and second critical endpoint in a K-free eclogite at 700 to 1400 °C[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(3): 873-892.
- LAWRIE K C, MEMAGH T P, RYAN C G, ACHTERBERGH E V, BLACK L P. 2007. Chemical fingerprinting of hydrothermal zircons: an example from the Gidginbung high sulphidation Au-Ag-(Cu) deposit, New South Wales, Australia[J]. *Proceedings of the Geologists Association*, 118(1): 37-46.
- LI Wen-bo, HUANG Zhi-long, CHEN Jin, HAN Run-sheng, ZHANG Zhen-liang, XU Cheng. 2004. Rb-Sr dating of mineral assemblage from the Huize giant Zn-Pb deposit, Yunnan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(2): 112-116(in Chinese with English abstract).
- LIN Zhi-yong, WANG Deng-hong, ZHANG Chang-qing. 2010. Rb-Sr isotopic age of sphalerite from the Paoma lead-zinc deposit in Sichuan Province and its implications[J]. *Geology in China*, 37(2): 488-494(in Chinese with English abstract).
- LIU He-chang, LIN Wen-da. 1999. Study on the deposits of Pb-Zn-Ag in northeastern Yunnan[M]. Kunming: Yunnan University Press: 129-131(in Chinese).
- LIU Yong-sheng, GAO Shan, HU Zhao-chu, GAO Chang-gui, ZONG Ke-qing, WANG Dong-bing. 2010a. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571.
- LIU Yong-sheng, HU Zhao-chu, ZONG Ke-qing, GAO Chang-gui, GAO Shan, XU Juan, CHEN Hai-hong. 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535-1546.
- OHMOTO H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotope in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 67(5): 551-578.
- PETERSEN U. 1979. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*[M]. USA: Wiley.
- QI Jin-ping, CHEN Yan-jing, NI Pei, LAI Yong, DING Jun-ying, Song Yao-wu, TANG Guo-jun. 2007. Henan cold water north gully lead zinc silver deposit fluid inclusion study and ore genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2119-2130(in Chinese with English abstract).
- SHAO Lian-jie. 1990. *Prospecting mineralogy of gold ore*[M]. Beijing: China University of Geoscience Press(in Chinese).
- SHENG Zhan-wu, JIN Can-hai, DAI Yan-pei, ZHANG Yu, ZHANG Hai. 2016. Mineralization Age of the Maoping Pb-Zn Deposit in the Northeastern Yunnan Province: Evidence from Rb-Sr Isotopic Dating of Sphalerites[J]. *Geological Journal of China Universities*, 22(2): 213-218(in Chinese with English abstract).
- SIBSON R H, ROBERT F, POULSEN K H. 1988. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits[J]. *Geology*, 16(6): 551-555.
- TANG Ju-xing, WANG Qin, YANG Huan-huan, GAO Xin, ZHANG Ze-bin, ZOU Bing. 2017. Mineralization, Exploration and Resource Potential of Porphyry-skarn-epithermal Copper Polymetallic Deposits in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(5): 571-614(in Chinese with English abstract).
- TAYLOR S R. 1975. Stable isotope geochemistry[J]. *Reviews of Geophysics*, 17(4): 839-850.
- TOSCANO M, PASCUAL E, NESBITT R W, ALMODÓVAR G R, SÁEZ R, DONAIRE T. 2014. Geochemical discrimination of hydrothermal and igneous zircon in the Iberian Pyrite Belt, Spain Research article[J]. *Ore Geology Reviews*, 56(1): 301-311.
- WANG Chao-wei, LI Yuan, LUO Hai-yan, LIU Xue-Long. 2009. Genesis of Maoping Pb-Zn Deposit in Yunnan Province[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology)*, 34(1): 7-11(in Chinese with English abstract).
- WANG Yong, WANG Li-qiang, DANZHEN Wang-xiu, LI Zhuang, LI Shen. 2017. The Discovery of Late Jurassic Rhyolite Porphyry in Geji Area, Southern Bangong Co-Nujiang Suture Zone, Tibet: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopes[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(5): 723-733(in Chinese with English abstract).
- WEI Ai-yin, XUE Chuan-dong, HONG Tuo, LUO Da-feng, LI Lian-ran, WANG Feng, ZHOU Gao-ming, LIU Xing. 2012. The alteration -mineralization zoning model for the Maoping lead -zinc deposit, northeastern Yunnan Province: Evidence from alternation - lithofacies mapping[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(5): 723-735(in Chinese with English abstract).
- YANG Yao-min, TU Guang-chi, HU Rui-zhong, SHI Xue-fa. 2005. Sm-Nd isotope geochronology and its geological significance of the Fe-Cu-REE deposit in the Nilaichang, Wuding[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(12): 1253-1258(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Chang-qing, MAO Jing-wen, LIU Feng, LI Hou-min. 2005. K-Ar dating of altered clay minerals from Hui Ze Pb-Zn deposit in Yunnan Province and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 24(3): 317-324(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Gao-ming, LI Ben-lu. 2005. Geological Characteristics and Original Discussion on Genesis of the Lead-zinc Deposit of Maoping in Yunnan Province[J]. *West-China Exploration Engineering*, 17(3): 75-77(in Chinese with English abstract).
- ZHOU J, HUANG Z, YAN Z. 2013. 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*, 73(5): 39-47.
- ZOU Hai-jun, HAN Run-sheng, HU Bin, LIU Hong. 2004. New Evidences of Origin of metallogenic materials in the Maoping Pb-Zn ore deposit, Zhaotong, Yunnan: R-Factor analysis results of trace elements[J]. *Geology and Prospecting*, 40(5): 43-48(in Chinese with English abstract).