

doi: 10.12029/gc20190619

黄小东,陈翠华,赖翔,宋志娇,张燕,杨德平,陈宵杰. 2019. 四川盆地北缘马元铅锌矿床与古油藏关系研究[J]. 中国地质, 46(6): 1547-1555.  
Huang Xiaodong, Chen Cuihua, Lai Xiang, Song Zhijiao, Zhang Yan, Yang Deping, Chen Xiaojie. 2019. The genetic relationship between Pb-Zn deposits and paleo-oil reservoirs in Mayuan, northern Sichuan Basin[J]. Geology in China, 46(6): 1547-1555(in Chinese with English abstract).

## 四川盆地北缘马元铅锌矿床与古油藏关系研究

黄小东,陈翠华,赖翔,宋志娇,张燕,杨德平,陈宵杰

(成都理工大学地球科学学院,四川 成都 610059)

**摘要:**马元铅锌矿床是四川盆地北缘重要的铅锌矿床之一,赋矿地层为震旦系灯影组,野外可见大量的沥青与铅锌矿共生/伴生,镜下见早期沥青与闪锌矿、方铅矿共生,沥青的生物标志物与郭家坝组烃源岩极为相似。物质来源方面,铅锌成矿主要的物质来源和两期油气成藏的物质来源均为下寒武统郭家坝组;时间关系方面,铅锌成矿的共生矿物 Rb-Sr 同位素等时线年龄为(486.7±3.1)Ma,仅可能与第一期古油藏形成、破坏有关。闪锌矿和重晶石包裹体中含有 CH<sub>4</sub>和少量 H<sub>2</sub>S、沥青,表明铅锌成矿流体中富含古油藏裂解产物。生烃、排烃、初次运移萃取出“双源层”中的铅锌元素,第一期古油藏裂解和短暂 TSR 作用产生的还原性硫为铅锌络合物沉淀提供了物质基础,第一期古油藏最终完全破坏残留下早期沥青。

**关键词:**马元铅锌矿床;古油藏;物质来源;时间关系;成矿与成藏关系;矿产勘查工程;四川  
中图分类号:P611;P618.13 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2019)06-1547-09

## The genetic relationship between Pb-Zn deposits and paleo-oil reservoirs in Mayuan, northern Sichuan Basin

HUANG Xiaodong<sup>1,2</sup>, CHEN Cuihua<sup>1</sup>, LAI Xiang<sup>1</sup>, SONG Zhijiao<sup>1</sup>,  
ZHANG Yan<sup>1</sup>, YANG Deping<sup>1</sup>, CHEN Xiaojie<sup>1</sup>

(College of Earth Sciences, Chendu University of Technology, Chendu 610059, Sichuan, China)

**Abstract:** Mayuan is one of the important lead-zinc deposits in northern Sichuan Basin, and its mineral formation is Cambrian Dengying Formation. Field and microscope studies revealed early bitumen and sphalerite, with associated galena. The biomarker of bitumen is very similar to that of the source rocks of Gjiaba Formation. The main sources of Pb-Zn deposits and paleo-oil reservoirs are the lower Cambrian Guojiaba Formation. The Rb-Sr isotopic isochron age of lead-zinc mineralization is (486.7 ± 3.1)Ma, probably related to the formation and destruction of the first paleo-oil reservoirs. Sphalerite and barite inclusions contain CH<sub>4</sub> and a small amount of H<sub>2</sub>S, bitumen, whereas lead-zinc mineralization fluids are rich in pyrolysis products of paleo-oil reservoirs. Hydrocarbon generation, hydrocarbon expulsion, the initial transport extraction of "double source layer" in the lead and

收稿日期:2018-09-27;改回日期:2019-05-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41372093)、中国地质调查局项目(12120113036200)及四川省科技计划项目(2018JY0477,2019JY0500)联合资助。

作者简介:黄小东,男,1990年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,从事固体矿产勘查与评价工作;E-mail:934352785@qq.com。

通讯作者:陈翠华,女,1972年生,教授,博士生导师,主要从事矿床学、矿相学、地球化学研究工作;E-mail:1259183068@qq.com。

zinc elements, the first paleo-oil reservoirs and the short-term TSR produced by the reduction of sulfur and lead-zinc complex precipitation all provided the material basis, and the first paleo-oil reservoirs eventually destroyed the residual early bitumen.

**Key words:** Mayuan Pb-Zn deposit; paleo-oil reservoirs; material source; time relationship; coupling of mineralization and accumulation; mineral exploration engineering

**About the first author:** HUANG Xiaodong, male, born in 1990, doctor candidate, majors in mineralogy, petrology, mineral deposit and engages in solid mineral exploration and evaluation of mineral resources; E-mail: 934352785@qq.com.

**About the corresponding author:** CHEN Cuihua, female, born in 1987, professor, supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of ore microscopy, mineral deposits and geochemistry; E-mail: chencuihua@cdut.edu.cn.

**Fund support:** Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41372093), China Geological Survey (No. 12120113036200) and Sichuan Provincial Science and Technology Program(2018JY0477,2019JY0500).

## 1 引 言

越来越多的研究表明,在沉积盆地中油气成藏与金属成矿密切相关,特别是以碳酸盐岩为容矿空间的密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床。在宏观或微观特征上表现为古油气藏的残留物天然沥青与铅锌矿共生/伴生现象(顾雪祥等,2010;王国芝等,2013),古油气藏为铅锌成矿提供还原性硫(Wilson and Zentilli,2006;顾雪祥等,2010)或二者具有同源特征(Gu et al.,2007;顾雪祥等,2010)。沥青是复杂的碳氢化合物与其非金属衍生物组成的混合物,具有很大的表面积,能够与吸附质以分子间的作用力相互吸引(刘武生等,2017)。四川盆地北缘马元铅锌矿属于MVT型铅锌矿床,震旦系灯影组角砾状白云岩为赋矿围岩,矿床中普遍见古油气藏的残留物天然沥青与铅锌矿共生/伴生,铅锌矿与油气藏具有明显的成因关系。前人仅通过传统研究金属矿床的手段对马元铅锌矿床的矿床地质特征(侯满堂等,2007)、矿床地球化学特征(王晓虎等,2008;刘淑文等,2012)、成矿物质来源(李厚民等,2007;毛秀丽,2015)、成矿流体特征(薛春纪等,2007)、成矿时代(李厚民等,2007;尹力,2016)、角砾岩成因(韩一筱等,2015)等方面做了大量的研究工作,但是对铅锌矿床中共生/伴生的天然沥青研究十分薄弱,很大程度上制约了对铅锌成矿与油气成藏过程的全面认识。本文通过铅锌矿和油气藏物质来源、时间关系,并结合矿物学特征对马元铅锌矿床进行全面分析,探讨铅锌成矿与油气成藏关系。

## 2 地质背景

研究区位于扬子板块北缘,秦岭造山带南侧,

龙门山一大巴山冲断带南部,米仓山构造带东南侧,碑坝穹隆构造南部(图1)。区域地层经历了漫长而又复杂的地质构造演化过程,形成了由结晶基底和沉积盖层组成的“双层”结构特征,结晶基底由中、新元古界火地垭群组成,岩性主要为中、深变质火山-碎屑岩系;沉积盖层由震旦-三叠系碎屑岩组成。四川盆地周缘震旦系灯影组中广泛发育有天然沥青,部分地区产出铅锌矿,而下寒武统郭家坝组呈区域性分布的烃源岩,岩性为一套富含有机质的黑色炭质页岩、炭质板岩。

## 3 矿床地质特征

研究区内铅锌矿化带可以划分为北、东、南铅锌矿(化)带,其总长度大于60 km,宽度10~200 m,赋矿围岩均为上震旦统灯影组角砾状白云岩。南矿带是马元铅锌矿床重要组成部分,矿体整体受控于灯影组地层,主要发育在断层形成的破碎带中,矿体形态明显呈层状、似层状以及透镜体状顺层产出,虽然受后期构造作用破坏,但矿体在地层走向和倾向上连续性较好。

马元铅锌矿床的矿物组成十分简单,矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿和少量的黄铁矿(图2 a、b),还含有极少量的菱锌矿、白铅矿、异极矿等表生矿物;脉石矿物主要为白云石、石英、重晶石以及天然沥青,其次为方解石和极少量的萤石等。通过野外观察和室内分析等过程来看,天然沥青主要分为早晚两期,晚期沥青含量明显大于早期沥青,早期沥青颗粒细小与闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等矿物有密切关系(图2c);晚期沥青颗粒较大,在显微镜下表现为自形程度较高的浑圆状、月牙状(图2 d),或不规则状,与成矿没有直接关系。

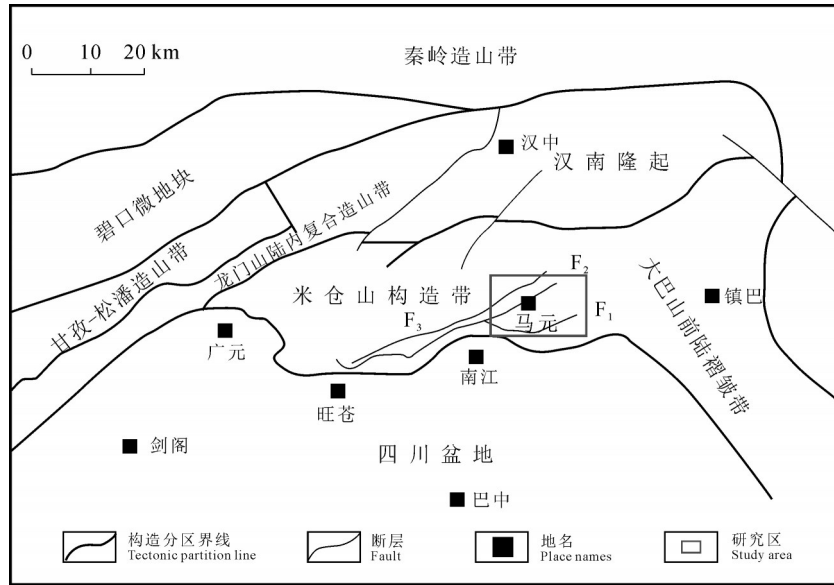


图1 研究区大地构造位置(据刘伟,2015修改)

Fig.1 Geological location of the study area(modified after Liu Wei, 2015)

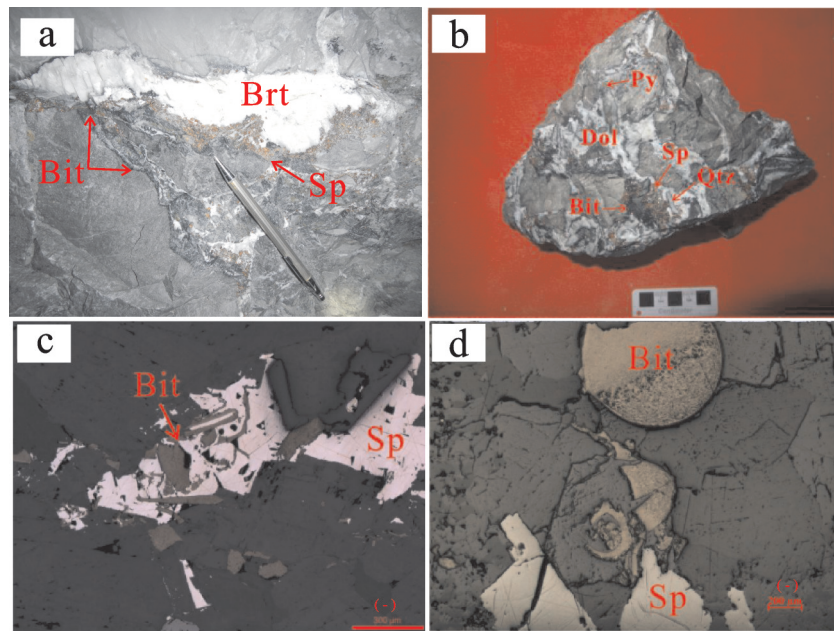


图2 沥青与铅锌矿密切共生/伴生关系

Sp—闪锌矿;Bit—沥青;Qtz—石英;Dol—白云石;Brt—重晶石;Py—黄铁矿

Fig.2 Relationship between bitumen and lead - zinc deposit

Sp-Sphalerite;Bit-Bitumen;Qtz-Quartz;Dol-Dolomite;Brt-Barite;Py-Pyrite;

## 4 铅锌成矿及油气藏成藏物质来源

### 4.1 铅锌成矿物质来源

刘淑文等(2012)通过对马元铅锌矿床中的方解石和白云石两种脉石矿物碳、氧同位素研究认为铅锌成矿物质来源于地壳;对闪锌矿、方铅矿、黄铁

矿和重晶石的硫同位素研究表明硫同位素与当时古海水硫酸盐的硫同位素数值大致相同,认为铅锌成矿所需的还原硫主要来源于封存于地层中海水硫酸盐 TSR 反应形成的还原硫;铅同位素组成表明震旦—志留纪沉积地层是物质来源地;与成矿关系密切的石英包裹体中氢、氧同位素研究表明成矿流

体主要以大气降水为主,另外一种可能为海水、变质水与有机质混合发生反应的结果;对锶同位素组成研究表明成矿流体可能与基底地层进行同位素交换,导致闪锌矿、方铅矿等硫化物中锶同位素比容矿角砾状白云岩略高。

毛秀丽(2015)通过对研究区内基底岩石、灯影组白云岩和郭家坝组炭质板岩微量元素研究表明:郭家坝组炭质板岩成矿元素背景含量较高,灯影组白云岩含量较低,基底岩石中锌元素背景含量较高;郭家坝地层与基底岩石在物质成分上具有一定的相关性,并结合研究区Pb、Sr、S同位素组成特征,认为马元地区铅锌矿床的成矿物质主要来源于下寒武统郭家坝组地层,其次为基底岩石。通过系统的对研究区基底火地垭群、灯影组白云岩和郭家坝组炭质板岩进行研究表明,郭家坝组地层是重要的铅锌物质来源地之一。

#### 4.2 油气成藏物质来源

本次对马元矿区灯影组白云岩(955-CM21-33)、含矿白云岩(955-CM21-43)、脉状沥青(955-CM21-25)、球颗状沥青(871-JK)、寒武系郭家坝组炭质板岩(955-CM21-19)共5件样品送至中国石油勘探开发研究院石油地质实验中心进行GC-MS和碳同位素测试,通过天然沥青-烃源岩生物标志物对比研究发现:

脉状和球颗状沥青与下寒武统郭家坝组炭质板岩正构烷烃特征非常相似,在质量色谱图上均表现为主要以低碳数为主,曲线为前峰型,具有明显偶数碳优势特征,基线有隆升现象(图3),直接表明有机质曾经遭受过热裂解作用,而生物降解作用不

明显或者较少。灯影组白云岩的正构烷烃质量色谱图与沥青和郭家坝组炭质板岩略有不同(图4),表明灯影组中沥青与下寒武统郭家坝组烃源岩具有亲源性。脉状和球颗状沥青Pr/Ph均小于1,沥青有机质的原始沉积为缺氧还原环境,与郭家坝组地层沉积环境有良好的相似性。

天然沥青与烃源岩的甾烷质量色谱图上C<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub>规则甾烷的构型均为不对称的“V”字型,天然沥青与下寒武统郭家坝组烃源岩的“V”字型大致相同;规则甾烷分布图上天然沥青与下寒武统郭家坝组烃源岩的组成更为相似(图5),表明沥青有机质更可能来源于下寒武统郭家坝组炭质板岩。

马元铅锌矿床中天然沥青和烃源岩样品 $\delta^{13}C$ 的值均有较大的负值(表1),为-34.8‰~-30.7‰,有机质主要以藻类生物组合来源为主;而天然沥青碳同位素最小值为-34.2‰,最大值为-33.0‰,与区域上四川盆地下寒武统郭家坝组烃源岩干酪根同位素具有很好的相似性,揭示出马元矿区中天然沥青更可能来源于下寒武统郭家坝组炭质板岩。

## 5 铅锌成矿和油气成藏时间

### 5.1 铅锌成矿时代

李厚民等(2007)对马元地区铅锌矿床中的矿石矿物闪锌矿样品进行Rb-Sr同位素等时线年龄测定,通过对7件闪锌矿样品确定铅锌矿床的成矿年龄为(486±28)Ma。

尹力(2016)为了避免测年矿物数量较少和种类单一的缺点,选择马元铅锌矿床中闪锌矿和方铅矿共生矿物组合进行Rb-Sr同位素等时线法对成

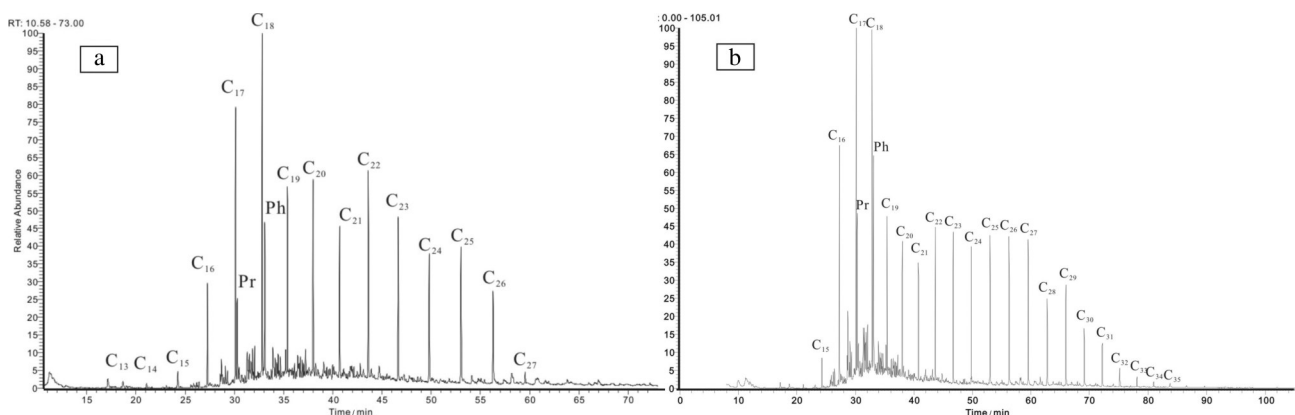


图3 沥青正构烷烃质量色谱图a—871-JK;b—955-CM21-25

Fig.3 Bitumen n-alkanes mass chromatogram

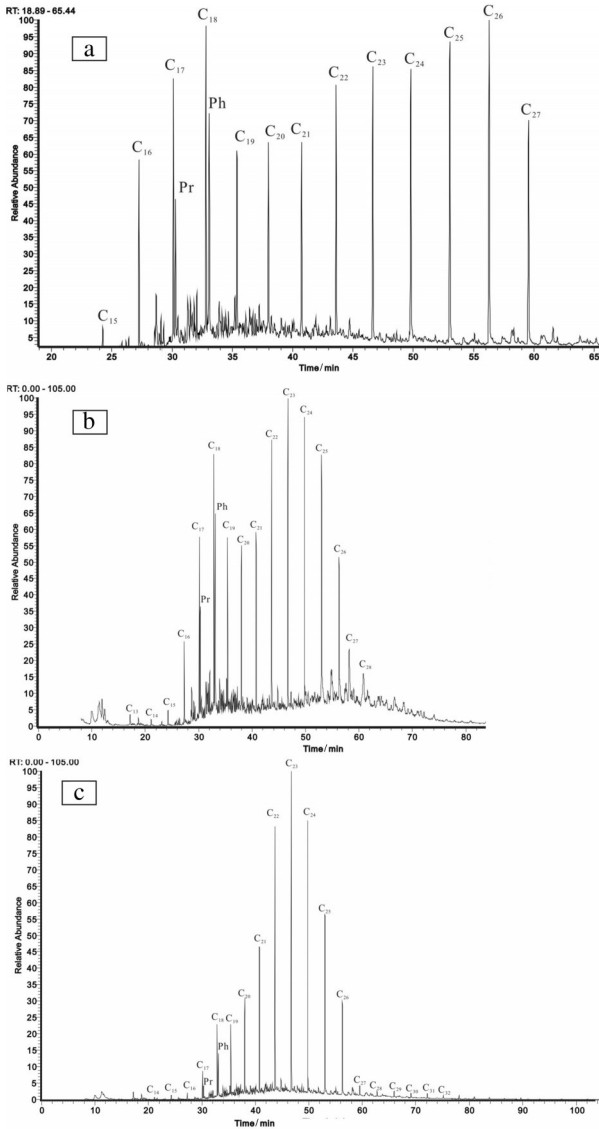


图4 烃源岩正构烷烃质量色谱图(a—955-CM21-19;b—955-CM21-33;c—955-CM21-43)

Fig.4 Source rock n-alkanes mass chromatogram

矿年龄测定,其中拟合程度最高的7件样品(5件闪锌矿,2件方铅矿)的等时线年龄为(486.7±3.1)Ma,初始铷同位素  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}=0.710521\pm 0.00087$ ,等时线平均标准偏差(MSWD)=1.11,认为马元铅锌矿床主要成矿时间介于晚寒武世末至早奥陶世初期。

### 5.2 油气成藏期次

研究区震旦系灯影组地层内发育有两期沥青,两期天然沥青均不同时间形成的古油藏热裂解产物,第二期热裂解沥青含量明显大于第一期热解沥青,它们的烃源岩均是上覆下寒武统郭家坝组地

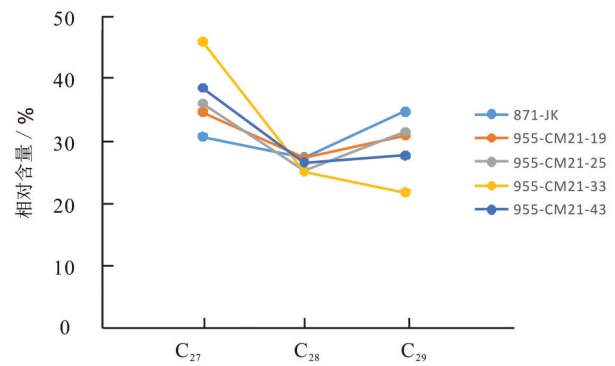


图5 沥青及烃源岩规则甾烷分布图

Fig.5 Bitumen and source rock regular sterane distribution

表1 马元铅锌矿床中沥青及烃源岩碳同位素组成  
Table 1 Carbon isotope composition of bitumen and source rocks in the Mayuan Pb-Zn deposit

样品编号	地层	岩性	干酪根 $\delta^{13}\text{C}/\%$ (VPDB)	来源
871-JK	灯影组	球颗状沥青	-34.3	
955-CM21-8	郭家坝组	炭质板岩	-30.7	
955-CM21-19	郭家坝组	炭质板岩	-32.1	
955-CM21-23/29	灯影组	白云岩	-32.9	
955-CM21-25	灯影组	脉状沥青	-33.2	本文
955-CM21-33	灯影组	含沥青白云岩	-34.8	
955-CM21-43	灯影组	含矿白云岩	-34.1	
913-JK-1	灯影组	脉状沥青	-33.8	
913-JK-2	灯影组	球颗状沥青	-34.0	
MAYUAN-2	灯影组	沥青	-33.0	李厚民等,
MAYUAN-3	灯影组	沥青	-33.4	2007
MAYUAN-8	灯影组	沥青	-32.1	

层。研究区内郭家坝组烃源岩从震旦纪以来经历了3个持续埋深阶段(图6):早—中寒武世、奥陶纪至中志留世和早二叠—晚侏罗世(黄盛,2013)。第一期古油藏是由于郭家坝组烃源岩在晚寒武—早奥陶世生物降解作用形成,第一期古油藏在寒武纪末期受构造隆升(南郑上升)逐渐破坏,最终在地层中残留早期沥青;第二期古油藏在早二叠—晚二叠世沉积地层埋深过程中形成,受到地层温度持续升高,古油藏热裂解产生晚期沥青。

## 6 讨论

流体包裹体作为成矿流体残留在原生矿物中的保真样品,在矿床学中广泛应用(薛伟等,2010;

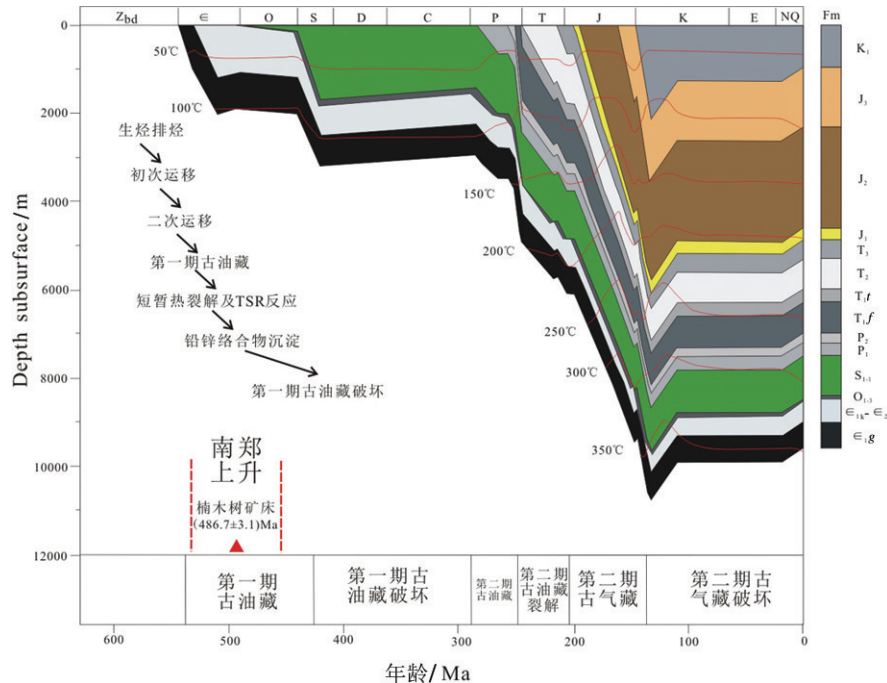


图6 米仓山南缘地区埋藏史与成矿年龄(据黄盛,2013修改)

Fig.6 Burial history and mineralization age of the southern margin of Micangshan (modified from Huang, 2013)

韩润生等,2016)。熊索菲(2015)发现马元铅锌矿床中脉石矿物方解石和石英中均含有甲烷( $\text{CH}_4$ )组分。马元铅锌矿床中闪锌矿中铁元素含量较少为半透明矿物,有利于包裹体的观察和分析测试。闪锌矿中包裹体发育良好,大小介于 $5 \sim 12 \mu\text{m}$ ,主要呈椭圆状、不规则状,在 $20^\circ\text{C}$ 条件下主要为气液两相(L+V)型包裹体。本次对闪锌矿以及成矿密切相关的重晶石包裹体进行激光拉曼分析发现(图7):包裹体中液态组分主要为 $\text{H}_2\text{O}$ ,气态组分主要为 $\text{CH}_4$ 及少量 $\text{H}_2\text{S}$ ,固态组分为少量的沥青,指示出铅锌成矿流体中富含 $\text{CH}_4$ 有机质,说明铅锌成矿与油气成藏具有成因联系。

通过对马元铅锌矿床成矿物质来源和油气成藏物质来源研究表明:研究区内下寒武统郭家坝组炭质板岩既是铅锌矿床成矿物质的重要来源地之一,又是震旦系灯影组白云岩中天然沥青的生油母岩。因此,下寒武统郭家坝组炭质板岩为“双源层”。通过对研究区铅锌成矿时代和古油藏成藏与破坏时间研究表明:马元铅锌矿床的主要成矿时间与第一期古油藏形成、破坏时间具有明显相关性,虽然第二期古油藏热解成因沥青的含量比早期形成的天然沥青多,但是它们在时间上没有直接联系。

据前人研究表明,尽管MVT型铅锌矿床的成

矿机制与油气成藏的机制略有不同,但是铅锌成矿和油气成藏均是将成矿或者成藏物质搬运至适宜的部位卸载富集成矿床或者油气藏(Plumlee et al., 1994;刘伟,2015)。流体是铅锌成矿与油气成藏的纽带和桥梁,同时油气藏裂解产生的还原性 $\text{H}_2\text{S}$ 能为铅锌络合物沉淀提供硫源。

下寒武统郭家坝组炭质板岩是富含有机质和铅锌成矿元素的“双源层”(图8a),沉积地层中保存有寒武世时期的古海水,富含铅锌成矿物质和有机质的炭质板岩在达到生烃门限就逐渐开始生烃,烃类物质从地层排出进入裂隙、孔隙中,沿着层间裂隙、风化壳侧向迁移进入灯影组白云岩中(初次运移),在初次运移的过程中同时通过配合、吸附以及阳离子交换作用萃取出郭家坝组地层中的Pb、Zn成矿元素,富含Pb、Zn成矿元素的有机流体与地层水(含有寒武世时期的海水)汇聚,Pb、Zn等成矿元素主要以络合物的形式存在于地层水中(图8b),此时由于地层埋深较浅和温度相对较低,烃类物质无法裂解产生还原性硫,铅锌络合物因缺少还原硫无法发生沉淀。

油气初次运移后在局部地方聚集,而富含大量的金属元素的成矿流体则暂时未运移或少部分发生短距离运移,烃类物质由于自身特征沿着古风化壳通道进行二次运移(龙腾,2016),含矿流体同

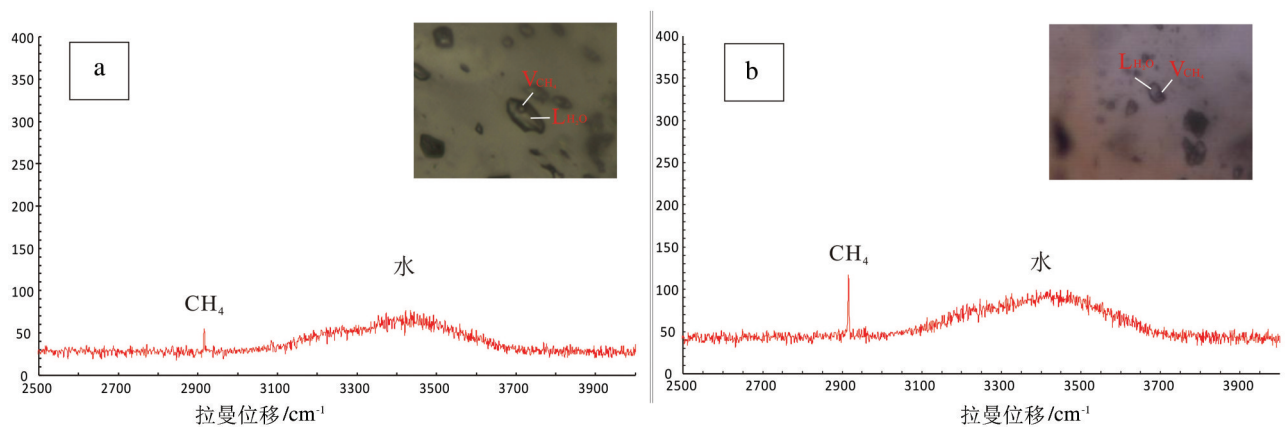


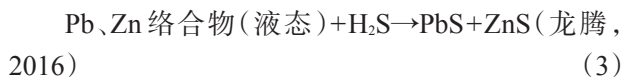
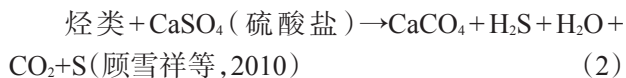
图7 马元铅锌矿床中包裹体拉曼光谱图

a—主矿物为重晶石;b—主矿物为闪锌矿

Fig.7 Raman spectra of inclusions in the Mayuan lead-zinc deposit

a—Main mineral: barite; b—Main mineral: sphalerite

时或者先后运移,当大量烃类运移到成藏区域后形成第一期古油藏(图8c),由于成矿流体密度大于油田卤水密度,成矿流体富集在油气藏的下部(图8d)。晚寒武世—早奥陶世初,南郑上升活动较强烈,地层温度、压力增大,郭家坝组停止生烃/排烃,铅锌成矿流体温度升高,烃类物质由于成矿流体带来的热量发生短暂热裂解(反应式1)和TSR反应(反应式2)产生 $\text{CH}_4$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ ,在油气藏与成矿流体(油田水)接触面附近,还原性 $\text{H}_2\text{S}$ 与Pb、Zn络合物反应产生大量的闪锌矿和少量的方铅矿(反应式3;图8d),产生的金属矿物由于密度较大向下沉聚集成矿。由于第一期古油藏形成的量较少,再加上烃类仅仅发生短暂的裂解作用(龙腾,2016),所以闪锌矿包裹体中有机质主要为 $\text{CH}_4$ ,沥青含量较少,铅锌络合物沉淀主要集中在成矿流体与油气藏界面的接触面附近。中志留世后期受到强烈的构造隆升和地层剥蚀作用,第一期古油藏遭受破坏,烃类物质完全裂解,灯影组白云岩储层中仅残留少量的早期天然沥青。



二叠世烃源岩经过生烃、排烃,油气初次运移、二次运移后形成第二期古油藏,其规模远大于第一期古油藏,两期古油藏无明显界限,晚二叠世—晚三叠世

第二期古油藏破坏发生热裂解作用,产生大量晚期沥青和古气藏,至白垩世早期古气藏受构造运动完全破坏,残留下大量晚期天然沥青。晚期沥青与铅锌成矿的主成矿期无明显关系,可能是由于大量的Pb、Zn络合物在第一期古油藏裂解过程中完全沉淀。

## 7 结论

(1)震旦系灯影组中大量发育天然沥青,且与铅锌矿密切共生/伴生在一起,沥青和郭家坝组烃源岩生物标志物有良好的相似性,早晚两期天然沥青的烃源岩为寒武系郭家坝组。

(2)方解石和闪锌矿包裹体中含有 $\text{CH}_4$ ,表明有机质与铅锌成矿具有密不可分的联系。

(3)物质来源方面,郭家坝组既是矿源层,又是烃源岩,即为“双源层”;时间关系上,铅锌成矿仅与第一期古油藏有密切联系。

(4)郭家坝组是富含有机质和成矿元素的“双源层”,在持续埋深过程中,有机质达到生烃门限就开始生烃、排烃,油气初次运移过程萃取出大量的Pb、Zn等成矿元素,烃类二次运移至白云岩储层中形成第一期古油藏,含矿流体同时或者分先后迁移,晚寒武世—早奥陶世初,南郑上升活动强烈,地层温度、压力增大,含矿流体带来的热量使烃类发生短暂热裂解作用和TSR反应,还原性 $\text{H}_2\text{S}$ 使Pb、Zn络合物沉淀形成铅锌矿。第二期古油藏规模远大于第一期古油藏,但是与铅锌成矿无直接关系,二者最终均演化成天然沥青。

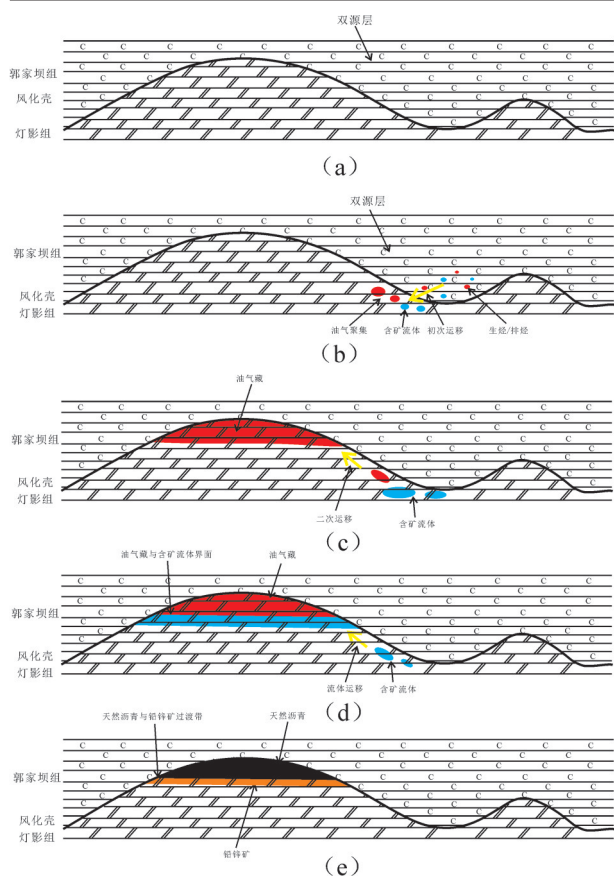


图8 铅锌成矿与油气成藏耦合关系

Fig.8 The coupling relationship between lead and zinc mineralization and hydrocarbon accumulation

**致谢:**感谢论文撰写过程中孙玮老师及同门师兄们的热心帮助,同时感谢审稿专家及编辑部老师提出的建设性意见。

## References

- Gu X X, Li, B H, Xu S H, Fu S H, Dong S Y. 2007. Characteristics of hydrocarbon-bearing ore-forming fluids in the Youjiang Basin, South China: Implications for hydrocarbon accumulation and ore mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5):133-146.
- Gu Xuexiang, Zhang Yongmei, Li Baohua, Xue Chunji, Dong Shuyi, Fu Shaohong, Cheng Wenbin, Liu Li, Wu Chengyun. 2010. The coupling relationship between metallization and hydrocarbon accumulation in sedimentary basins[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2):83-105 (in Chinese with English abstract).
- Han Runsheng, Liu Congqiang, Huang Zhilong, Chen Jin, Ma Deyun, Li Yuan. 2001. Genesis modeling of Huize lead-zinc ore deposit in Yunnan [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(4):674-680 (in Chinese with English abstract).
- Han Yixiao, Liu Yunhua, Liu Shuwen, Lei Wanbin, Li Zhen, Li Yuntao, Li Xing. 2016. Origin of the breccia and metallogenic geological background of Mayuan Pb-Zn deposit[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(4):94-101 (in Chinese with English abstract).
- Hou Mantang, Wang Dangguo, Deng Shengbo, Yang Zongrang. 2007. Geology and genesis of the Mayuan lead-zinc mineralization belt in Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 40(1):42-60 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sheng. 2013. Study on the Multi-phase Fluid Activities of Dengying Formation and Tectonic Uplift of Micang Mountain Area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Li Houming, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Li Xueqin. 2007. Geochemistry and mineralization age of the Mayuan zinc deposit, Nanzheng, southern Shaanxi, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 26(5):546-552 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen, Liu Lingfang, Gao Yongbao, Ge Xiaohong, Zheng Xuzhong, Zhang Haidong, Wang Liang. 2012. Sources of metallogenic materials for Mayuan Pb-Zn deposit on northern margin of Yangtze Plate: Evidence from C, O, H, S, Pb and Sr isotope geochemistry[J]. *Mineral Deposits*, 31(3):545-554 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wei. 2015. The Formation and Evolution of Hydrothermal Fluids in the MVT Lead-Zinc Deposits in Northern Margin of Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Liu Wusheng, Zhao Xingqi, Shi Qingping, Zhang Zinan. 2017. Research on relationship of oil-gas and sandstone-type uranium mineralization of northern China[J]. *Geology in China*, 44(2): 279-287 (in Chinese with English abstract).
- Long Teng, Wang Guozhi, Xu Peng, Yang Minghui. 2015. Geological geochemical characteristics of asphalt in MVT lead and zinc mine in the northern margin of Sichuan basin[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (S1):320-320 (in Chinese).
- Long Teng. 2016. Studies on the Coupling Relationship of the MVT Lead-zinc Deposits and the Ancient Oil (Gas) Reservoir in the Northern Margin of the Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Mao Xiuli. 2015. Studies on the Ore-forming Material Sources of the MVT Lead-zinc Deposits Occured in Dengying Formation in the Northern Margin of the Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Plumlee G S, Leach D L, Hofstra A H, Landis G P, Rowan E L, Viets J G. 1994. Chemical reaction path modeling of ore deposition in Mississippi Valley-type Pb-Zn deposits of the Ozark region, US midcontinent[J]. *Economic Geology*, 90(5):1346-1349.
- Sun Dong. 2011. The Structural Character and Meso-Cenozoic Evolution of Micang Mountain Structural Zone, Northern Sichuan Basin, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).



- Wang Guozhi, Liu Shugen, Chen Cuihua, Wang Dong, Sun Wei. 2013. The genetic relationship between MVT Pb-Zn deposits and paleo-oil/gas reservoirs at Heba, Southeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 20(1):107-116 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaohu, Xue Chunji, Li Zhiming, Li Qiang, Yang rongjin. 2008. Geological and geochemical characteristics of Mayuan Pb-Zn ore deposit on northern margin of Yangtze landmass[J]. Mineral Deposits, 27(1):37-48(in Chinese with English abstract).
- Wilson N S F, Zentilli M. 2006. Association of pyrobitumen with copper mineralization from the Uchumi and Talcuna districts, central Chile[J]. International Journal of Coal Geology, 65(1/2): 158-169.
- Xiong Suofei. 2015. Ore-Forming Fluids of the Pb-Zn Deposits Hosted in the Sinian System, Margin of the Up-Middle Yangtze[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Wang Xiaohu, Li Zhiming, Yang rongjin. 2007. Study on metallogenic model of lead and zinc deposit in hanzhong, Shaanxi Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 26 (S1):337-338(in Chinese with English abstract).
- Xue Wei, Xue Chunji, Chi Guoxiang, Shi Haigang, Gao Bingyu, Yang Shoufa. 2010. Study on the fluid inclusions of Baiyangping poly-metallic deposit in Lanping Basin, northwestern Yunnan, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(6):1773-1784 (in Chinese with English abstract).
- Yin Li. 2016. Mineralogical Characteristics and Significance of Mayuan Pb-Zn Deposit[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shaoni. 2013. The Characteristics of Natural Bitumen and Analysis of Source Rock of Lead-zinc Deposit of Deying Formation in North Sichuan basin[D]. Xi'an: Changan University (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 顾雪祥, 章永梅, 李葆华, 薛春纪, 董树义, 付绍洪, 程文斌, 刘丽, 吴程赞. 2010. 沉积盆地中金属成矿与油气成藏的耦合关系[J]. 地学前缘, 17(2):83-105.
- 韩润生, 刘丛强, 黄智龙, 陈进, 马德云, 李元. 2001. 论云南会泽富铅锌矿床成矿模式[J]. 矿物学报, 21(4):674-680.
- 韩一筱, 刘云华, 刘淑文, 雷万杉, 李真, 李云涛, 李兴. 2016. 马元铅锌矿床角砾岩成因及成矿地质背景[J]. 地学前缘, 23(4):94-101.
- 侯满堂, 王党国, 邓胜波, 杨宗让. 2007. 陕西马元地区铅锌矿地质特征及矿床类型[J]. 西北地质, 40(1):42-60.
- 黄盛. 2013. 米仓山地区构造隆升与灯影组多期流体活动研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 李厚民, 陈毓川, 王登红, 李华芹. 2007. 陕西南郑地区马元锌矿的地球化学特征及成矿时代[J]. 地质通报, 26(5):546-552.
- 刘淑文, 刘玲芳, 高永宝, 戈晓红, 郑绪忠, 张海东, 王亮. 2012. 扬子陆块北缘马元铅锌矿床成矿物质来源探讨:来自C、O、H、S、Pb、Sr同位素地球化学的证据[J]. 矿床地质, 31(3):545-554.
- 刘伟. 2015. 四川盆地北缘MVT型铅锌矿床中热液流体的形成与演化[D]. 成都: 成都理工大学.
- 刘武生, 赵兴齐, 史清平, 张梓楠. 2017. 中国北方砂岩型铀矿成矿作用与油气关系研究[J]. 中国地质, 44(2): 279-287.
- 龙腾, 王国芝, 许鹏, 唐鑫, 杨明辉. 2015. 四川盆地北缘MVT铅锌矿中沥青的地质地球化学特征[J]. 矿物学报, (S1):320-320.
- 龙腾. 2016. 四川盆地北缘MVT铅锌矿床与古油(气)藏耦合关系研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 毛秀丽. 2015. 四川盆地北缘灯影组MVT铅锌矿成矿物质来源研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 孙东. 2011. 米仓山构造带构造特征及中—新生代构造演化[D]. 成都: 成都理工大学.
- 王国芝, 刘树根, 陈翠华, 王东, 孙玮. 2013. 四川盆地东南缘河坝MVT铅锌矿与古油气藏的成生关系[J]. 地学前缘, 20(1):107-116.
- 王晓虎, 薛春纪, 李智明, 李强, 杨荣进. 2008. 扬子陆块北缘马元铅锌矿床地质和地球化学特征[J]. 矿床地质, 27(1):37-48.
- 熊索菲. 2015. 中上扬子地块周缘赋存于震旦系的铅锌矿成矿流体研究[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 薛春纪, 王晓虎, 李智明, 杨荣进. 2007. 陕西汉中马元铅锌矿床成矿模式探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 26(s1):337-338.
- 薛伟, 薛春纪, 池国祥, 石海岗, 高炳宇, 杨寿发. 2010. 滇西北兰坪盆地白秧坪多金属矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 26(6):1773-1784.
- 尹力. 2016. 陕西马元地区楠木树铅锌矿床矿物学特征[D]. 成都: 成都理工大学.
- 张少妮. 2013. 四川盆地北缘灯影组铅锌矿天然沥青特征及其源岩分析[D]. 西安: 长安大学.