

文章编号:0258-7106 (2009) 01-0195-16

密西西比型(MVT)铅锌矿床研究进展*

张长青¹, 余金杰¹, 毛景文^{1, 2}, 芮宗瑶¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国地质大学, 北京 100083)

摘要 密西西比型(MVT)铅锌矿床是全球重要的铅锌矿床类型之一,其铅锌资源量占全球铅锌资源量的20%左右。近几十年来,通过不断的探索,人们在矿床的地质特征、地球化学特征、成矿物质来源、成矿流体运移和沉淀机制、年代厘定以及矿床形成的地球动力学背景等方面取得了重要进展。文章在综合前人工作成果的基础上,就MVT矿床的分布规律、特征、地质背景、矿床地质特征、地球化学特征、成矿模型、控矿因素等方面进行了介绍,并分析了目前成矿模型研究中的各种流体运移机制、金属卸载机制之间的优缺点,探讨了成矿模型研究所面临的问题。同时,将中国典型的MVT矿床纳入到全球MVT矿床的背景之中,进行了相关的讨论。最后,总结对比了主要控矿因素和勘查阶段中物化探方法在找矿过程中的作用。

关键词 地质学;后生;分布;控矿;找矿标志;进展;MVT;综述

中图分类号:P618.42;P618.43 **文献标志码**:A

Advances in the study of Mississippi Valley-type deposits

ZHANG ChangQing¹, YU JinJie¹, MAO JingWen^{1,2} and RUI ZongYao¹

(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2 Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

As one of the most important type of Zn-Pb deposits, the Mississippi Valley-type (MVT) Zn-Pb deposits account for 20% Zn-Pb resources of the world. Such deposits are epigenetic stratabound sulfide Zn-Pb deposits hosted by carbonate rocks. During the past several decades, the authors have made very important progress in the study of MVT deposits, and the advances find expression in such aspects as their geological characteristics, geochemical features and material sources, the migration of ore-forming fluids, the mechanism of precipitation, the age dating, and the formation setting for these MVT deposits in the world. In this paper, the distribution, characteristics, geological setting, geological and geochemical features, isotope chronology, genetic model, and ore-control factors are dealt with in detail, some mechanisms for fluid migration and metal precipitation are comparatively studied, and the problems existent in the construction of the metallogenetic model are pointed out. Three kinds of metal precipitation have been discussed, but we find that one metal precipitation mechanism can only answer for the ore-forming process for one or a few classic deposits, and none of them can explain all MVT deposits in the world. In addition, the MVT deposits in China are discussed in an background of global MVT deposits. The common factors controlling the MVT deposits and the important ore-hunting indicators are also

* 本文受到地质大调查项目(1212010634001)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(K2007-5-6)和国家自然科学基金项目(40572060)的资助

第一作者简介 张长青,男,1975年生,博士,主要从事岩石、矿物、矿床学研究。Tel:010-68999514;Email:zcqchangqing@163.com

收稿日期 2008-11-06; 改回日期 2009-02-16。张绮玲编辑。

summed up in this paper.

Key words: geology, epigenetic, distribution, ore control, ore-hunting indicator, advance, MVT, comprehensive

尽管密西西比河谷型矿床在全球许多地区均有分布,但最典型的矿集区则位于美国中部的密西西比河流域。它以规模大,发现早、研究程度深而著称,故将此类矿床称为“密西西比河谷型”或“密西西比型”矿床(简称“MVT”矿床)。该类矿床在20世纪30~40年代,曾被称作“远温矿床”,20世纪中叶,人们摆脱岩浆热液论的束缚,建立了MVT矿床的分类概念,盆地流体侧向运移机制成为该类矿床形成机制的新论断,但是MVT矿床是一类矿床特征差异很大的矿床,至今还未能建立像斑岩铜矿、块状硫化物矿等矿床那样统一适用的成矿模式。同时,MVT矿床又具有以下基本特点(Leach et al., 1993; 2005):①矿床产出于造山带边缘前陆环境或靠近克拉通一侧的沉积盆地环境;②容矿围岩以白云岩为主,仅有少数矿床产于灰岩中;③矿床具有后生特征,其形成与岩浆活动无直接联系;④可发育层控的、断层控制以及受喀斯特地形控制的矿体,矿体形态变化较大,可以为层状、筒状、透镜状、不规则状等;⑤矿物组合简单,主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿、白云石、方解石和石英,仅在少数矿床/矿区发育重晶石和萤石,个别矿区发育有含银或者含铜的矿物;⑥硫化物通常交代碳酸盐岩或充填开放孔隙空间,组构变化较大,矿石由粗粒到细粒,由块状到浸染状;⑦围岩蚀变主要有白云岩化、方解石化和硅化,主要涉及围岩的溶解作用和重结晶作用等;⑧最重要的控矿因素为断层、破碎带和溶解坍塌角砾岩等;⑨成矿流体为低温中高盐度盆地流体,温度一般为50~250℃,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 一般为10%~30%;⑩金属和硫具有壳源特征。

MVT矿床包括以碳酸盐岩为围岩的后生低温Pb-Zn矿床、交代碳酸盐岩的相对较高温爱尔兰型Pb-Zn矿床、以碳酸盐岩为围岩的萤石-重晶石矿床、与底辟(盐丘)作用有关的矿床以及以砂岩为围岩的Pb-Zn矿床等(Paradis et al., 2005)。

在过去的几十年内,对密西西比河谷型铅锌矿床的研究在以下方面取得了重要进展:①建立了3种驱动流体运移机制;②提出了3种硫化物沉淀模

型^①;③完成了部分矿床的精确定年(Leach et al., 2001);④初步总结了矿床形成的地质背景,把矿床的形成与地壳构造事件联系起来,认为区域构造驱动大规模流体迁移、成矿(Bradley et al., 2003)。

1 MVT矿床的分布

MVT矿床在北美洲最为发育,包括美国田纳西州的Jefferson City、Copper Ridge等矿集区,密苏里州的Old Lead Belt和Viburnum Trend矿集区,俄克拉何马州、堪萨斯州和密苏里州地区的Tri-State矿集区,威斯康星-伊利诺伊州的Upper Mississippi河谷矿集区;加拿大西北地区的Nanisivik、Pine Point、Polaris矿,不列颠哥伦比亚省的Robb Lake、Monarch、Kiching Horse矿,新斯科舍省的Gays River,纽芬兰省的Newfoundland等矿集区或矿床。MVT矿床在欧洲也比较发育,产有波兰的上西里西亚(Upper Silesia),爱尔兰的Navan、Lisheen和Galmoy铅锌矿床等,奥地利的Bleiberg,法国南部Cevennes矿集区,西班牙北部Reocin矿床,南斯拉夫的Mezica和意大利的Raibl矿床;其他大陆也存在一些MVT矿床,例如亚洲伊朗的Medhdiabad和Angouran矿床;大洋洲澳大利亚的Admirals Bay、Sorby Hills、Coxco、Lennard shelf矿集区等;南美洲巴西的Vazante矿床,秘鲁的San Vicente矿床等;非洲纳米比亚的Skorpion矿床,摩洛哥的El Abadekta矿床等(图1)。中国现已发现的MVT矿床主要集中在扬子地台及其周缘地区,包括西缘的川滇黔交界地区(云南会泽、茂租,四川大梁子、天宝山、赤普等)、北缘的秦岭南部地区(陕西马元,湖北竹溪—古城、神农架等矿区)、中部的湘鄂地区(湖南李梅、董家河、白云铺等)、南缘的桂粤地区(广东凡口,广西泗顶、后江桥、北山等),此外,塔里木盆地西南边缘发育有塔木-古兰卡铅锌矿带等。其中的川滇黔交界地区是中国MVT矿床最为集中的地区(图2)。

① 吕志成,主编. 2004. 国内外铅锌矿床成矿理论与找矿方法. 中国地质调查局发展研究中心. 54-91.

2 区域成矿背景

MVT 铅锌矿床形成的有利大地构造环境为俯冲碰撞环境靠近克拉通一侧的部位,通常产于造山带前陆相对平坦的、未发生后期变形的岩石中,位于克拉通边缘沉积盆地内古隆起带之上或附近(距造山带 600 km 以内),与板块俯冲形成的局部伸展环境有关;另有一些矿床产于前陆逆冲推覆带环境,这些矿床的容矿岩石发生了后期变形作用;少数矿床则产于大陆伸展的裂谷或裂谷环境附近(如 Nanisivik、Lennard Shelf、Alpine 矿集区),在这些地区沉积地层受到一期或者多期正断层的控制,表现出一系列的不整合接触。

MVT 铅锌矿的含矿岩系以碳酸盐岩建造为特色,主要为白云岩、交代灰岩或白云岩的白色亮晶白云岩,完全产于灰岩中的矿床相对较少。虽然在部分矿区沉积相(如生物礁相、潮坪相等)控制着矿体的展布,如 Viburnum Trend 和 Pine Point 矿区;但是,也有一些矿床不受这些沉积相的控制,如 Upper Silesia、Lennard shelf、中国川滇黔矿集区等。因此,相对于沉积相而言,围岩地层的岩性(或渗透性)对矿体的

展布起着更为重要的作用。

全球 MVT 矿容矿岩石的时代范围从元古宙到白垩纪,主要形成于古生代的寒武纪—奥陶纪、泥盆纪—石炭纪,少数形成于志留纪和二叠纪,元古代地层中很少发育 MVT 矿床。然而在中国,晚震旦世的地层则是 MVT 矿床较为发育的地层之一。矿床形成于围岩成岩作用之后,为后生矿床,虽然围岩的年龄可以确定,但是矿化的时间却很难肯定,目前仅有少数几个矿床获得了成矿年龄(Leach et al., 2001)。

尽管 Leach 等(2001)总结了全球几个典型矿床的形成时代,主要形成于泥盆纪—三叠纪早期和白垩纪—第三纪 2 个阶段,认为该类矿床和全球大尺度收缩汇聚构造之间存在着直接联系。但是,MVT 矿床形成的构造背景仍存在争议,其原因主要为:① 目前仅有 17 个矿床的成矿时代数据,能否代表该类矿床的成矿时代值得探讨;② 已有年龄数据采用不同的测年方法,除了方法的可靠性外,不同测年方法之间存在测试结果差异,尚不能完全解释其原因;③ 虽然主要年龄数据与全球板块汇聚事件相一致,但就单个矿床或矿集区而言,最重要的控制因素仍是张性断层(正断层、压张性断层和扭断层)。因此,矿床的形成究竟和哪种构造环境相关,还需进一步探讨。

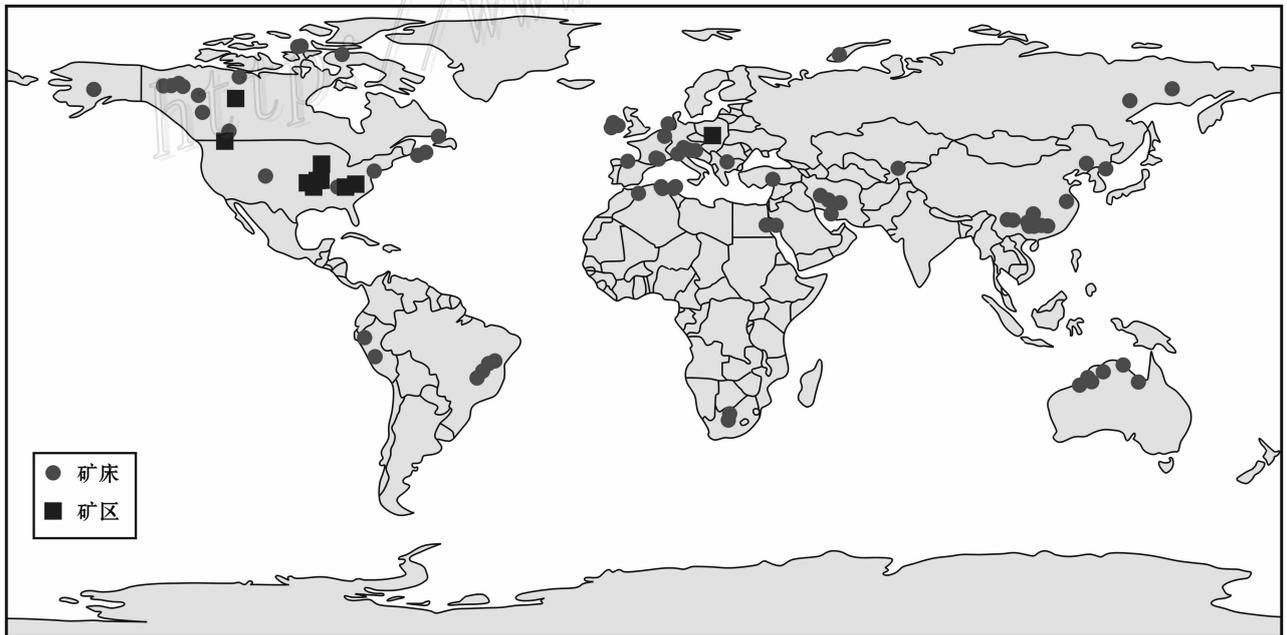


图 1 全球 MVT 矿床分布示意图(据 Leach, 2008 年来华讲学资料^①)

Fig. 1 Distribution of MVT deposits in the world

① Leach D. 2008. Examples of important MVT attributes. Presentation from David Leach, in Xi'an, China. 2008. 08.

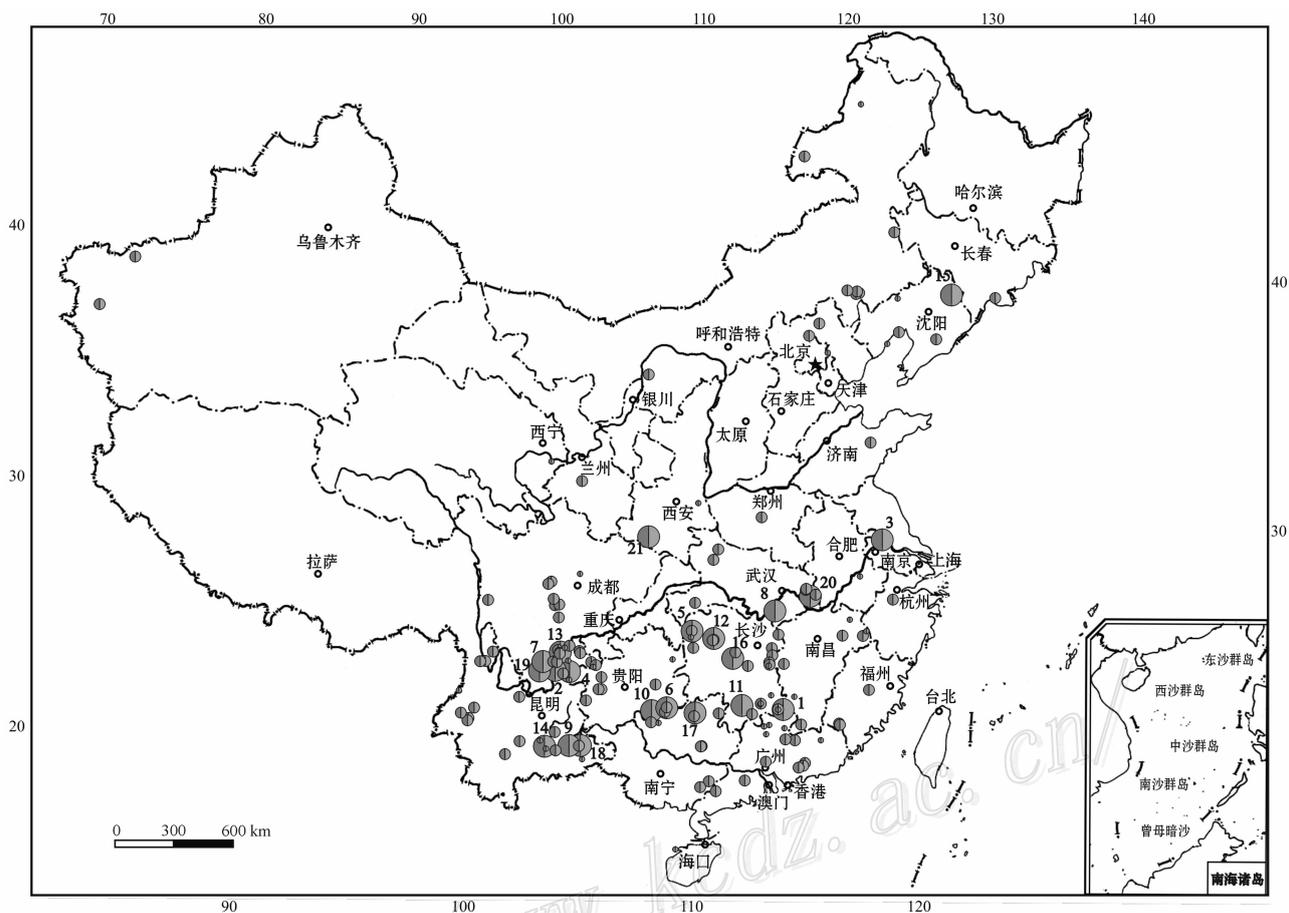


图2 中国MVT矿床分布示意图

图中编号对应矿床如下: 1—仁化凡口铅锌矿; 2—会东大梁子铅锌矿; 3—南京栖霞山铅锌矿; 4—曲靖会泽铅锌矿; 5—花垣李梅锌矿; 6—环江北山铅锌硫铁矿; 7—会理天宝山铅锌矿; 8—临湘桃林铅锌矿; 9—蒙自百牛厂银多金属矿白羊矿段; 10—南丹芒场大山锡多金属矿; 11—道县后江桥铁锰铅锌矿; 12—沅陵董家河黄铁铅锌矿; 13—巧家茂租铅锌矿; 14—建水荒田铅锌矿; 15—开原柴河铅锌矿; 16—新都白云铺铅锌矿; 17—融安泗顶铅锌矿; 18—砚山铅厂铅锌矿; 19—会理小石房铅锌矿; 20—阳新银山铅锌矿; 21—南郑马元铅锌矿

Fig. 2 Distribution of MVT deposits in China

Corresponding ore deposit name of the serial number in the map: 1—Fankou in Renhua; 2—Dalingzi in Huidong; 3—Qixiashan in Nanjing; 4—Huize in Qujing; 5—Limei in Huayuan; 6—Beishan in Huanjiang; 7—Tianbaoshan in Huili; 8—Taolin in Linjiang; 9—Baimiuchang in Mengzi; 10—Dachang in Nandan; 11—Houjiangqiao in Daoxian; 12—Dongjiahe in Ruanling; 13—Maozu in Qiaojia; 14—Huangtian in Jianshui; 15—Chaihe in Kaiyuan; 16—Baiyunpu in Xinshao; 17—Siding in Rong'an; 18—Qianchang in Yanshan; 19—Xiaoshifang in Huili; 20—Yinshan in Yangxin; 21—Mayuan in Nanzheng

3 矿集区规模和多样性

MVT矿床在沉积盆地边缘常呈群分布,形成MVT矿集区,矿集区分布面积一般为数百,甚至数千平方公里(Misra, 1999; Sangster, 2002),例如密苏里南东部矿集区面积为3 000 km²、Tri-State矿集区为1 800 km²、Pine Point矿集区为1 600 km²、阿尔卑斯山地区为10 000 km²、Upper Silesia矿集区为2 800 km²、爱尔兰Midland矿集区为8 000 km²

和Upper Mississippi河谷矿集区为7 800 km²。每个矿集区中又包含有几十至数百个矿床,如Pine Point矿集区包括80多个矿床,单个矿床储量大多变化于20~200万吨,最大的矿床储量为1 800万吨;Upper Mississippi河谷矿集区包括将近400个矿床,单个矿床储量变化于10~50万吨,最大矿床储量可高达300万吨(Leach et al., 2005)。在中国,存在有几个MVT矿集区,每个矿集区含有1到200多个矿床不等,例如在川滇黔交界地区矿集区分布面积达到14.6 km²,包含有40多个铅锌矿床,单

个矿床储量大多变化于 1~200 万吨,最大矿床为会泽铅锌矿,其金属量超过 400 万吨(薛步高,2006)。

在每个矿集区内,各个矿床显示出相似的特征,包括矿物组合、同位素组成以及矿石结构、构造。例如:主要矿石矿物为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿,主要脉石矿物为方解石、白云石等;同位素组成均显示出金属和硫的壳源特征;构造以块状、浸染状、角砾状、网脉状为主,结构以粒状、胶状、交代等为主。同时,不同矿集区之间又存在差异性,主要表现在每个 MVT 地区有着自己独特的矿物共生组合、成矿控制机制、围岩等。如美国的 Old Lead 矿带、Viburnum Trend 地区矿床的矿石矿物以方铅矿为主,铅含量远大于锌的含量;Tri-state 区、北阿肯色州区、密苏里中部地区则以闪锌矿为主,同时方铅矿和重晶石并重;而在密苏里南东部地区则以重晶石和铁硫化物为主(Leach et al., 2005);控矿因素也各不相同,如 Pine Point 矿区,礁组合控制着矿体的展布,Upper Silesia 矿区基底隆起和断裂构造则是最主要的控矿因素,中国的川滇黔地区地层和断裂系统是主要的控矿条件。

4 矿床地质特征

4.1 围岩地层

MVT 铅锌矿床一般分布于固定的含矿层位,在同一矿集区内,往往出现多个层位的矿化,但是仅有一个或少数几个主要的含矿层位,例如美国三州地区的矿化几乎全部在密西西比系碳酸盐岩中,波兰上西里西亚矿集区主要含矿层位为泥盆纪和三叠纪的碳酸盐岩,中国川滇黔地区则以震旦系灯影组和石炭系为主。含矿建造以发育碳酸盐岩为特征,围岩通常为白云岩,少数情况下为灰岩。地层层序中的下部透水层和上部隔挡层(页岩或灰岩)对矿床的形成起着重要作用,如在中国塔木—卡兰古矿带,3 个含矿层均是由下部含(透)水的碎屑岩或白云岩与上部的灰岩构成,川滇黔矿集区中的茂租、大梁子、赤普矿床,地层层序由下部的含(透)水的白云岩与上部的页岩构成;爱尔兰 Lisheen 矿床的矿体产于 Waulsortian 白云岩化灰岩中,其上则为不透水的 Crosspatrick 暗色燧石泥质灰岩地层;美国 Viburnum Trend 地区矿体产于 Bonnetterre 组白云岩中,其上则为 Davis 组页岩地层。白云岩具有较高的孔隙度或渗透率,这可能是矿体赋存于白云岩的

主要原因,这也可能是导致白云岩中 MVT 矿床规模相对较大,Pb、Zn、Ag 品位较高的原因之一。波兰上西里西亚地区所有的矿石赋存于“含矿白云岩”中,“含矿白云岩”形成于成矿前,或形成于成矿期(Sass-Gustkiewicz et al., 1998; Leach et al., 2003)。在 Viburnum Trend 地区,95% 矿石的围岩是区域白云岩,白云岩形成于成矿前的成岩事件,矿石与白云岩和灰岩过渡带之间的距离不到 2 km(Gerdemann et al., 1972; Lyle, 1977)。中国陕西马元铅锌矿中的金属硫化物充填于白云岩角砾之间,白云岩角砾形成于成矿前(王晓虎等,2008)。但是,大量区域热液白云石的形成比较复杂,白云岩化作用普遍存在于成矿前、成矿期和成矿后。是白云岩控制着矿化作用的发生呢?还是白云岩化为矿化产物呢?这两个问题是目前研究的热点。因此,矿化与白云岩化之间的关系仍需进一步研究。

4.2 矿体形态

就矿集区尺度来看,MVT 铅锌矿床的矿体通常具有层控特征,但是就单个矿床尺度来看,矿体形态极不规则,可为顺层产出的似层状、板状、线状等,亦可以为穿层的筒状、柱状、团块状、脉状、透镜状、不规则状等。受地层控制的矿体在顺层方向可以延伸几十米到几百米,而矿体厚度一般为几分米至几十米,各矿体彼此相连,也可有尖灭再现的特征;受断裂控制的矿体的形态和大小变化很大(Alldrick et al., 2005),可从厚度较小的透镜状、囊状、脉状(陡倾裂隙控制的),到厚度较大的筒状矿体,矿体与围岩之间界线清楚;受古岩溶控制的矿体往往呈不规则状。这 3 种类型的矿体可共存于同一矿区内,如中国川滇黔交界地区铅锌矿体形态大致可分为 3 种(张长青,2008):受地层岩性控制的似层状、透镜状矿体(如茂租、赤普等)、受断层和褶皱构造控制的筒状、脉状矿体(如大梁子、乐红、天宝山等)和受古溶洞控制的不规则状矿体(如麒麟厂等)。

4.3 矿物组合特征

MVT 矿床的矿物组合简单,原生矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿等,脉石矿物主要为白云石、方解石、石英等,一般不含黄铜矿、斑铜矿、自然铜等,在个别矿集区中萤石、重晶石较为发育(Paradis et al., 2005),常伴生有含 Ag、Cd、Ge、Ga、Ni 等元素的矿物。通常银的含量比较低,但个别矿床的银含量可以很高,如中国川滇黔交界地区银厂坡、天宝山、大梁子铅锌矿的银品位分别为 181 g/t、

111 g/t、83 g/t(胡耀国等,2000),乐马厂铅锌矿的银品位最高可达 1 856 g/t(郑明秋,1995),且该矿床银已达到大型规模。

大多数 MVT 矿床金属元素分布形式单一,仅少数矿集区有矿化分带现象。如在 Pine Point 矿床,从柱状矿体向外,Fe/(Fe+Zn+Pb)和 Zn/(Zn+Pb)比值增高(Kyle,1981)。在密苏里南东地区,矿床具由内向外,分布 Pb、Zn、Fe、Cu、Ni 和 Co 的规律(Hagni,1983;Mavrogenes et al.,1992)。乐红铅锌矿床的内带以锌矿物为主,外带渐变为黄铁矿带。

4.4 矿石结构

MVT 矿床中硫化物的沉淀涉及到沉积、溶解、交代、开放空间充填、角砾岩化作用等多种因素。相应的硫化物主要结构有粒状、交代、交代残余、胶状、包含、溶蚀、穿插、草莓状及团粒状等;构造主要有块状、角砾状、浸染状、网脉状、脉状、条带状等。在开放孔隙充填过程中形成的矿石,硫化物和脉石矿物主要以粒状、溶蚀、树枝状和胶状结构形式存在,但其构造有所区别,硫化物以块状、角砾状、网脉状构造为主,脉石矿物以条带状、脉状构造为主,有时粗粒闪锌矿晶体呈层状生长在角砾碎屑的顶部或者附着在晶洞顶板处,形成所谓的“屋顶落雪(snow-on-roof)”构造(Leach et al.,1993;Sangster,1995)。在溶解坍塌角砾岩化过程中形成的矿石,则以溶蚀、交代、穿插结构为主,构造则以角砾状、网脉状、镶嵌状、胶结状、脉状和韵律层构造为主。交代作用是有选择性的,如 Newfoundland 锌矿集区的热液白云岩选择性交代生物扰动灰岩而形成条带状和假角砾岩构造(Lane,1984);在 Pine Point、Robb 湖、Monarch Kicking 和 Pend Oreille 矿床,热液白云岩交代多种原生岩石形成条带状构造(Paradis et al.,2005);天宝山、茂租等矿床热液选择性交代碳酸盐岩形成硅质条带等(柳贺昌等,1991)。沉积作用下形成的粒状结构以及层状和浸染状构造发育,硫化物的粒度变化较大,从细粒到粗粒,沉积顺序通常为黄铁矿(白铁矿)→闪锌矿→方铅矿。

4.5 围岩蚀变

MVT 矿床的围岩蚀变通常与碳酸盐岩的溶解、重结晶、热液交代和角砾岩化作用形成的碳酸盐化有关,此外,还伴有硅化和粘土化。围岩碳酸盐岩的溶解和热液角砾岩化作用为 MVT 矿床最为常见的特征之一,这与生成酸的反应有关,而生酸反应通常

与还原的含硫流体与含金属流体的混合作用有关。热液白云岩是 MVT 矿床的显著特征,通过热液交代作用往往在矿体周围形成明显的白云岩蚀变晕。这种热液白云岩化有 3 种存在形式:①交代围岩碳酸盐岩;②充填晶粒间孔隙;③填充开放孔隙空间。热液白云岩与 MVT 成矿事件之间关系十分复杂,它可以形成于成矿前、成矿中和成矿后等各个阶段,不同矿床的热液白云岩化作用形成阶段各有侧重。

在大多数 MVT 矿床中硅化并不十分发育,硅化的发育与否在很大程度上依赖于矿石沉淀温度和成矿流体规模。矿石沉淀时流体混合作用引起的稀释和冷却作用和低温条件下二氧化硅沉积的动力学抑制作用,阻碍了二氧化硅的沉淀(Plumlee et al.,1994)。但如果稀释流体的温度高于 200℃,二氧化硅沉淀的速度会加快,导致更多硅质的沉淀(Rimstidt,1997)。例如在 Tri-State 地区、阿肯色州地区北部以及中国川滇黔交界地区的赤普矿床等,由于成矿温度较高,硅化(碧玉)广泛发育。

自生粘土矿物有伊利石、绿泥石、白云母、迪开石,另外可能存在高岭石集合体充填孔洞;较少出现自生长石(冰长石),这些蚀变粘土矿物仅在部分矿区的局部地段发育,不能作为 MVT 矿床的标志蚀变矿物。

4.6 控矿因素

矿床的控矿因素涉及到流体的运移、容矿空间的形成、有利的圈闭条件以及成矿后的保存条件等。包括断层和破碎带、岩性边界、溶解坍塌角砾岩、礁组合、基底隆起、不整合面等因素。

断层和破碎带 断层和破碎带是 MVT 地区重要的控矿因素,许多矿体集中产于张性断层带内及其附近,如爱尔兰 Midland (Hitzman,1999)和 Upper Silesia 地区矿石集中于正断层中(Kibitlewski,1991);Viburnum Trend 矿体集中产于与扭性断层有关的张性空间中(Clendenin,1993;Clendenin et al.,1994);密苏里地区矿体集中于张性断层内(Hudson,2000);在 Cevennes 山脉地区,走滑断层之间的张裂带对矿石起着重要控制作用(Bradley et al.,2003);中国川滇黔交界地区的大梁子铅锌矿与地堑构造有关,乐红、毛坪铅锌矿均产于断裂带中(张长青,2008)。

溶解坍塌角砾岩 在大多数的 MVT 矿区内,先存的溶解坍塌角砾岩和与之有关的碳酸盐溶解对矿石的沉淀起着重要控制作用。这些溶解坍塌角砾

岩通常位于不整合面附近,但往往缺乏由地下水活动所形成的喀斯特地形这一特征的存在,表明这些喀斯特地形在成矿前或成矿期被溶解作用破坏(Corbella et al., 2004)。对矿石角砾岩的正确理解将有助于更好地理解成矿流体地球化学过程。含金属的富氯流体与含还原硫流体的混合,单一含金属氯化物流体与含还原硫流体的沉淀作用,都是在酸性条件下发生的(Sverjensky, 1984; Cooke et al., 2000; Emsbo, 2000),均可导致坍塌角砾岩的形成。到目前为止,溶解坍塌角砾岩的形成机制、含矿角砾岩的来源问题仍是 MVT 矿床需研究的问题。

岩性边界 页岩不透水层,对流体迁移起到阻挡作用。在美国 Tri-State 地区,Chattanooga 和 Northview 页岩位于主要含矿碳酸盐岩之下,矿化仅发育在 Chattanooga 和 Northview 页岩之上,显示出页岩和 MVT 矿床位置之间的密切关系(Brockie et al., 1968)。在 Viburnum Trend, 矿石发育于白云岩中,矿石离白云岩和含页岩灰岩过渡相达几公里(Leach et al., 2005)。中国川滇黔交界地区茂租、赤普等矿床的矿体均产于震旦系灯影组白云岩和寒武系筇竹寺组泥页岩的界面附近(张长青等,2008)。MVT 矿床也可产于灰岩-白云岩过渡带附近,如 Upper Silesia、Viburnum Trend 和密苏里南部 Old Lead Belt 等(Leach et al., 2005),其原因是过渡带附近渗透率变化较大。

礁组合 礁和障壁沉积是地层层序的一部分,沉积相突然变化产生了强烈的渗透率反差,是导致矿物沉淀的有利条件。在 Viburnum Trend、Old Lead Belt、Pine Point、Lennard Shelf、Gays River 和 Gayna River, 矿体沉淀均与碳酸盐礁杂岩有关,如 Pine Point 矿体位于溶解坍塌角砾岩中,角砾岩发育于生物礁-生物碎屑碳酸盐组合中(Rhodes et al., 1984)。

基底隆起 一些矿床产于基底隆起之上或附近,而基底隆起控制着沉积相、角砾岩化、断裂作用和砂岩含水层的尖灭,如 Viburnum Trend、Old Lead Belt、Pine Point、Upper Silesia 和 Gays River 等(Leach et al., 2005)。中国扬子地台周缘地区产于震旦系灯影组地层中的铅锌矿(如大梁子、天宝山等矿床),分布于滇中古陆东北边缘的川滇碳酸盐岩台地。产于寒武系中的铅锌矿(如李梅、白云铺等)

分布于江南隆起的西北边缘^①。

各种控矿因素之间又相互关联,例如,页岩边界、白云岩-灰岩过渡带和礁组合属沉积相的一部分,均与基底地形或断层有关;基底隆起、不整合面以及溶解坍塌角砾岩等往往成组出现。每个矿区内 MVT 矿床并不受单一因素的控制,几个控矿因素的联合作用对矿石的形成至关重要。

5 地球化学特征

5.1 成矿流体

(1) 温度、盐度

MVT 矿床流体包裹体均一温度范围为 50~250℃,但大多数温度介于 75~150℃(Basuki et al., 2004),国外报道的最高均一温度来自爱尔兰地区和 Rays 河地区(超过 200℃),在中国川滇黔交界地区,流体包裹体的均一温度范围为 170~270℃(张长青, 2008)。许多 MVT 矿区,如爱尔兰 Midland 地区、密苏里地区、上西里西亚地区和 Cevennes 山脉地区,矿床的形成温度超过由地温梯度推算的温度(据埋藏的地层厚度估算),故推断 MVT 矿床可能形成于高地温梯度的环境中,或与盆地深部对流热传递(密苏里地区)或基底岩石中深部循环的上升流体(波兰 Upper Silesia 和爱尔兰 Midland 地区)有关(Leach et al., 2005)。典型的 MVT 矿床大致的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 范围为 15%~30%(Basuki et al., 2004),流体包裹体成分与油田卤水相似,故人们普遍认为 MVT 矿床的流体与盆地流体有关。Basuki 等(2004)研究结果显示,相对于小规模矿集区,规模较大的矿集区的成矿流体盐度 $[w(\text{NaCl}_{\text{eq}})]$ 约 16%~21%稍偏低一些,而成矿流体盐度越高,相对应的矿集区矿石的品位也越高。然而,中国川滇黔交界地区铅锌矿床的情况却相反,该矿集区规模较小,盐度较低,矿石品位却较高,最高品位可达 50%左右(会泽铅锌矿),这一特征可能与该地区的成矿温度普遍高于其他矿集区的温度有关。张长青等(2007)通过赤普铅锌矿床不同阶段石英流体包裹体温度、盐度研究发现,成矿流体温度最高可达 330℃,盐度较低,一般盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 在 8.0%~16.99%之间,具有含金属热液流体与还原流体混合的特征,并且成矿后期阶段有含有机质流体的加入。以上分析

① 吕志成,主编. 2004. 国内外铅锌矿床成矿理论与找矿方法. 中国地质调查局发展研究中心. 412-436.

表明,成矿流体的温度和盐度与矿石的品位之间不存在特定的对应关系。

(2) 流体来源

现代盆地卤水溶质摩尔比被用来判别石盐溶质的源区(Carpenter, 1978; Kharaka et al., 1987)。研究表明,盆地卤水中主要溶质源自海水蒸发或地下蒸发矿物(主要为石盐)的溶解。MVT 矿集区闪锌矿流体包裹体盐水成分与现代卤水(起源于陆下海水蒸发)成分相似(Kesler et al., 1996; Viets et al., 1996),大多数成分靠近海水蒸发线附近。因此,盆地流体成为 MVT 矿床流体的主要起源。流体-岩石相互作用(白云岩化、长石和粘土矿物成岩作用)可能导致流体包裹体成分偏离海水蒸发线。总体来说,MVT 矿床的成矿流体来源具有海水蒸发起源与大气降水或其他水体混合的特征。

5.2 成矿物质

5.2.1 金属来源和运移机制

对于 MVT 矿床,人们认识到流体中的金属来源于沉积盆地或者卤水通过含水层时的淋滤作用。人们认识到金属的溶解度受到温度、压力、流体组分的制约,尤其是受到盆地流体配位体的制约(Basuki et al., 2004)。许多作者,如 Barrett 等(1982)、Anderson(1983)、Sverjensky(1984; 1986)以及 Hanor(1996),认为氯化物的含量和温度、pH 值、元素活性等共同作用对配位体的形成和溶液金属离子能力起着决定性作用(Leach et al., 2005)。尽管硫化物和有机金属络合物均有可能携带金属离子,但硫化物的溶解度小,并且有机质并非在 MVT 矿床中普遍存在。由于流体中氯化物含量高,故金属氯化络合物最有可能搬运流体中的金属。由于成矿流体属低温($<200^{\circ}\text{C}$),变化范围不大,加上围岩碳酸盐岩对流体 pH 值的限制,温度和 pH 值对成矿流体中 Pb、Zn 溶解度的影响远比还原硫活动性的影响小(Plumlee et al., 1994),因此还原硫活动性对成矿流体中 Pb、Zn 含量具有明显的控制作用。现在的油田卤水中金属含量高,卤水 pH 值很少小于 4,大多介于 4.5~6(Emsbo, 2000),卤水中 Pb、Zn 含量可达到 $n \times 10^{-4}$,它们与还原硫含量呈负相关关系。油田卤水符合 MVT 成矿流体的特点,成为 MVT 卤水成矿的有力证据。然而,对于成矿流体运移的途径,流经地层和围岩地层对于成矿的贡献大小仍是难以解答的问题。

5.2.2 同位素特征

硫同位素 全球典型 MVT 矿床的硫同位素值变化较大,但总体表现出壳源特征。就单个矿床或地区而言,硫可能有一个或多个来源,如源自含硫酸盐的蒸发岩、同生海水、成岩期的硫酸盐、含硫有机质、 H_2S 气体储库和盆地缺氧水中的还原硫等。但是硫的主要来源可能还是海水中的硫酸盐(被沉积物包裹在各种矿物中)或同生海水,后来被还原。硫酸盐的还原作用存在 3 种不同机制:① 生物作用还原(BSR)机制;② 有机质中硫的热降解机制;③ 热化学还原(TSR)机制。

MVT 铅锌矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值与同时代围岩的硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}$ 值相接近,一般小于 15‰,但有些矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 $>15\text{‰}$,通常被认为由 TSR 作用所引起(Barnes, 1997)。需要指出的是, $\delta^{34}\text{S}$ 值 $>15\text{‰}$ 的也可由封闭系统中 BSR 引起,或由多个源区还原硫(多种还原作用)的混合引起。考虑到同一特征 $\delta^{34}\text{S}$ 值可有不同成因,MVT 矿床中起决定作用的还原硫机制仍需进一步研究。

铅同位素 Leach 等(2005)通过对 30 个 MVT 矿床中的 570 个方铅矿和闪锌矿样品测试结果进行了统计,结果显示许多 MVT 矿床或者矿集区(包括几个大型的矿集区)的铅具有基底来源特征。例如: Bushy Park、Pering、Gays River、爱尔兰 Midland 矿集区、Lennard Shelf、Upper Mississippi 河谷矿集区、密苏里东南矿集区以及 Tri-State 矿集区等,具有较高的 μ 值,其铅应为上地壳来源。中国川滇黔交界地区铅锌矿床,除产于变质基底中的小石房矿床外,也同样具有上地壳铅源特征(Zhang et al., 2007)。

5.3 有机质与成矿

早在 20 世纪 30 年代,人们就认识到 MVT 矿床与有机质有密切联系(转引自李发源等,2002)。最近二十余年,通过对矿床的生物地球化学和有机地球化学研究,表明生物、有机质、有机流体都能积极地参与某些矿床的形成。随着生物死亡后演变为生物有机质进而再演化为有机流体,生物成矿作用也由生物体的成矿作用发展为有机质的成矿作用,进一步发展为有机流体的成矿作用。随地质作用的发展(沉积→成岩→造山等),构成了生物-有机质-流体成矿系统(殷鸿福等,1994; 谢树成等,1997a; 1997b)。李发源等(2002)认为,油田卤水可能成为铅锌多金属元素迁移的主要载体和成矿流体的重要组成部分,甚至成为形成 MVT 矿床的一种重要的

潜在成矿流体,甲烷在矿床形成晚期充当还原剂。刘文均等(1999)通过对湖南花垣铅锌矿中有机包裹体的研究,认为矿床的沉淀机制可能与含金属流体和古油气藏混合有关,该古油气藏在成矿前已经就位于矿体所在位置及其附近。

许多 MVT 矿床中存在烃类包裹体和固体沥青,是有机质参与成矿的重要证据。一般情况下,在成矿溶液中还原硫很难与金属离子同时搬运,微生物或有机配位体又难以在较高温度条件下存在,然而,当在溶液中有低分子有机物(如轻烃类)存在时,就有可能形成具有较高热稳定性的有机金属络合物,络合物与硫酸盐相遇时将硫酸盐还原为 H_2S ,导致硫化物沉淀。已有实验结果证明,Zn、Pb 元素在油田卤水中的溶解度略高于在 $NaCl-CaCl_2$ 混合溶液中的溶解度(庄汉平等,1996),因此有机络合物迁移和油田卤水成矿,是 MVT 矿床一种可能的运移和成矿方式。此外, Southgate 等(2006)通过对 Lawn 山流体与有机质的研究发现,热液流体与有机质热成熟度存在着密切的联系,并认为热液流体与有机质相互作用产生瞬间微孔隙并被后期硫化物(主要是闪锌矿)所充填。

关于有机质与金属沉淀的问题则与金属的运移状态相关,当金属与有机质同时迁移时, SO_4^{2-} 的加入将导致金属以硫化物形式沉淀;而当金属与 SO_4^{2-} 一起运移时,与有机质相遇,同样也可能使金属沉淀。

另一方面,有机质并非存在于所有 MVT 矿床中,世界上著名的 MVT 矿床只有少数一些矿床,如法国的 Trèves 和 Les Malines、加拿大 Polaris、Pine Point 和 Gays River、秘鲁 San Vicente,美国 Viburnum Trend 和 Upper Mississippi 河谷等矿集区内发育沥青或者有机包裹体。中国川滇黔交界地区 5 个大型 MVT 铅锌矿中,除赤普铅锌矿内见一些沥青以及含甲烷的包裹体和大梁子铅锌矿床发育“黑破带”碳质外,其余 3 个大型矿床均未见到有机质的存在。因此,有机质成矿机制并非适用于所有的 MVT 矿床。

5.4 成矿时代

一直以来,研究 MVT 铅锌矿床成因的最大障碍是缺乏精确的成矿年代信息。最近几年,随着高精度古地磁和放射性同位素测年技术(方解石 Re-Os 法, U-Pb 法, U-Th 法, 闪锌矿 Rb-Sr 法, 云母类、长石类或粘土矿物的 Ar-Ar 和 K-Ar 法)的应用,对 MVT 矿床的认识起到了极大的推动作用。Leach

等(2005)统计了世界上 19 个 MVT 地区的古地磁和放射性定年结果,发现仅部分 MVT 矿床的古地磁和放射性测年结果具有较好的一致性,其中有 4 个古地磁和放射性定年结果不一致(Nanisivik 矿床、Pine Point、东田纳西和上西里西亚)。这两种测年手段的测试结果在一定程度上可以代表 MVT 矿床的真实成矿年龄。但同时,这些测年方法仍然存在一些问题,主要原因在于:①部分矿床古地磁测年结果与放射性同位素测年结果不符;②一些定年结果,特别是古地磁测年结果,存在很大的误差,有的误差达到 10~20 Ma;③部分测年结果与地质特征所约束的成矿时代不符。例如 Heijlen 等(2003)获得 Rb-Sr 法年龄为早白垩世,而 Sass-Gustkiewicz 等(2005)根据地质特征获得的成矿时代为早侏罗世;Bradley 等(2004)通过对闪锌矿的扫描电镜研究认为,上西里西亚地区闪锌矿 Rb-Sr 定年结果可能代表成矿后期蚀变年龄,因为对测年起重要作用的粘土矿物附着在闪锌矿颗粒表面,可能是后期裂隙充填产物。古地磁和放射性同位素测年结果不一致的原因是什么?哪一种方法能够代表真实成矿年龄?目前尚不能断言。

现有测年数据表明,典型 MVT 矿床形成与地球演化历史中强烈的挤压构造事件密切相关(Bradley et al., 2003)。例如,发生于泥盆纪到二叠纪时期的泛大陆(Pangea)汇聚,这一时期是地质历史上 MVT 矿床形成的最为重要的时期,有 75% 的 MVT 矿床形成于泛大陆汇聚时期。另一个重要成矿期为白垩纪到第三纪,这一时期美洲大陆和非洲-亚欧大陆受到微板块汇聚作用的影响(Leach et al., 2001)。

6 成矿模式

控制矿床形成的主要因素有金属来源、流体携带金属离子的能力、流体的规模、围岩容矿能力、流体的运移方式以及有效的金属沉淀机制等(Basuki et al., 2004)。到目前为止,人们仅对 MVT 矿床的金属来源为壳源的认识比较一致。对于流体携带金属的能力,涉及到如前所述的氯化物的含量和温度、pH 值、元素活性等诸多因素;围岩容矿能力涉及到容矿岩石的孔隙度、渗透率、碳酸盐岩的溶解、断层和沉积盖层的发育等因素;控制流体规模和流体运移的作用力涉及到地层压力、毛细管力和浮力等,以

及与之相关的区域构造、地形起伏、流体密度变化、压实作用、重力、裂隙发育情况等因素。目前,随着对地壳规模流体活动认识的不断深入,以及对 MVT 铅锌矿集区地质地球化学研究程度不断深入,人们认识到许多 MVT 铅锌矿是区域性或陆块规模热液流体活动的产物。成矿流体为高盐度的热卤水(类似于油田卤水),该热卤水从沉积盆地排出,经过含水地层,到达盆地边缘进入台地碳酸盐岩地层中沉淀成矿。

6.1 流体运移模式

涉及大规模流体运移的驱动机制有多种,在盆地演化的不同阶段,区域流体运移的方式不同,目前存在以下 3 种流体运移模式(Adams, 2001; Hammigan, 2005),可分别解释部分矿床的形成机制。

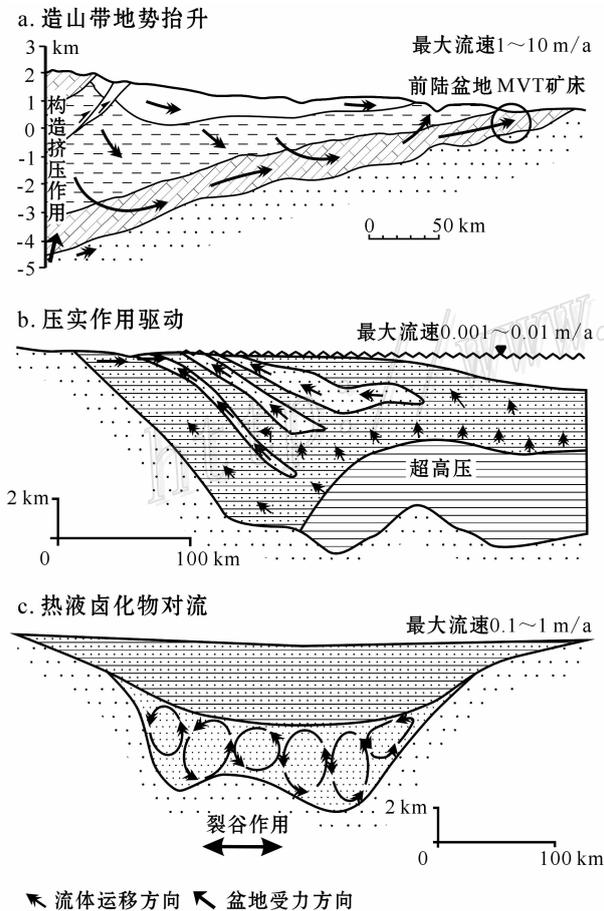


图 3 MVT 铅锌矿床流体运移模式

(据 Garven, 1995 修改)

Fig. 3 Fluid flow model of MVT Pb-Zn deposits

(modified from Garven, 1995)

第一,地形或重力驱动模式(Garven et al., 1984):其过程为流体在重力的驱动下,在盆地边缘造山隆起区,在页岩地层的阻隔下,沿碳酸盐岩或砂岩等透水层运移(图 3a)。运移流体自盆地深部沿透水层运移过程中获得热量和溶质组分,在盆地克拉通边缘以大规模的热液形式卸载。导致流体运移的原动力为造山活动引起地形变化。该模式可以很好地解释北美地区的 Pine Point 矿床流体沿 Slave 湖剪切带运移的过程(Hitchon, 1993)。Bethke 等(1988)模拟了 Ouachita 造山带流体从 Arkoma 盆地边缘隆起部位流动的过程,很好的解释了浅部地层经历高温和岩石中具有较高水岩比值的特征。

第二,沉积和压实作用模式(Jackson et al., 1967):驱使流体发生运移的原动力为沉积压实作用和成岩过程中孔隙度变化引起的压力梯度(图 3b)。热卤水由完全压实的沉积层向孔隙度高的未完全压实层流动,这一过程与油气由生油层沿渗透层向不同类型的圈闭构造移动过程十分相似。流体在运移过程中淋滤和萃取地层中的金属离子,并以金属络合物或者有机质络合物的形式进行搬运,一旦与硫化氢相遇即沉淀成矿。然而,单纯靠静水压力所释放的热能很难使得容矿围岩的流体包裹体温度达到现有温度值(Cathles et al., 1983; Bethke, 1985),为了解决这一问题,Cathles 等(1983)用超高压带来解释,认为沉积盆地发生快速沉积和压实作用,在上覆地层压力和侧向应力存在的情况下,流体迅速转移,在矿集区内形成异常高压,因此流体包裹体温度通常超过正常压力梯度下的温度。在沉积盆地中,通常在盆地沉积的初始阶段能够产生这样的条件。

第三,热-盐对流循环模式,主要是盐度、温度差异导致的对流循环(图 3c)。热-盐对流循环形成于伸展环境下的流体温度和盐度的增高(Person et al., 1994),裂谷盆地形成阶段是重力驱动流体系统向热-盐对流循环系统转化的开始。长时间的小规模对流循环可以形成大面积的碳酸盐化作用(Morrow, 1998),同时也可以导致中-小规模矿化的发生。Russell (1986)提出密度驱动是爱尔兰 Midland 地区主要的流体运移机制,最终导致矿体主要沿后期活化的加里东构造带分布,该模式也可用于解释非层控铀矿的流体运移机制(Raffensperger et al., 1995)。

6.2 金属沉淀机制

金属硫化物沉淀机制的建立取决于含金属和含硫的流体性质、运移能力和流动方式(Anderson et al., 1982),这涉及到金属和硫的运移方式问题。目前存在 3 种流体卸载模式^①:

还原硫模式 金属离子和还原硫共存于同一流体体系,这一低 pH 值流体如在运移过程中发生物理化学条件改变(如碳酸盐岩的溶解可以导致溶液 pH 值的升高),则会发生金属沉淀。这一沉淀机制的前提条件是存在理想的地质条件(pH 值范围在 4~5 或者更高一点),并且 Zn 和 Pb 的浓度很低(只有这样才能达到金属和还原硫的共存),但这一前提决定了这种流体很难形成大型的、高品位的铅锌矿床。此外,这一模式的理想条件不仅需要存在卤族元素的络合物,同时还需要存在有机络合物来携带金属离子。

硫酸盐还原模式 成矿流体中的硫酸盐在成矿地点经还原剂的还原作用(比如有机质)转变为 HS⁻ 或 H₂S,再与成矿流体中的金属离子发生反应,沉淀成矿。该模式要求溶液中存在大量高浓度的金属离子,且矿源层中存在足够量的硫酸盐,在遇到能导致含矿流体还原的地层时很可能形成铅锌矿床。Anderson(1991)曾将烃-氧化物-硫酸盐模式应用于 Palaris 铅锌矿床,他指出携带大量金属离子和硫酸盐的成矿流体当遇到富含有机质的碳酸盐岩地层时,发生了成矿作用,流体中“氧化物”的存在,主要因为多数矿床中存在大量的 CO₂ 包裹体这一地质事实。成矿流体所携带的热量能够产生烃类气体,烃类气体与硫酸盐在卤水中发生反应,从而导致硫化物的沉淀。但是,这一模式难以解释部分 MVT 矿床存在的某些地质特征,如碳酸盐的溶解和胶状闪锌矿的形成等。Plumlee 等(1994)的化学反应过程模拟试验也表明,当溶液中存在较高含量的 CO₂ 时,烃类-氧化物-硫酸盐反应过程将不能使白云岩大规模溶解;Kaiser 等(1987)通过热液化学硫酸盐反应速度试验验证了在烃类-氧化物-硫酸盐反应中不易形成胶状的闪锌矿。

流体混合模式 含有金属和还原硫的流体各自按照不同的途径运移至成矿地点混合成矿(Jackson et al., 1967; Anderson, 1975)。该模式可以很好地解释胶状闪锌矿的形成,是含金属离子的流体与含还原硫的流体快速混合形成高度过饱和流体而发生迅速沉淀的结果。矿体与围岩的截然接触关系以

及大量白云岩的溶解也可以用快速混合、沉淀来解释。同时,这一模式支持流体包裹体中有机质较低和含盐度变化不大的特点。Plumlee 等(1994)曾经对 MVT 矿床利用不同浓度的含还原硫的流体与含金属离子流体进行了混合成矿模拟试验,试验产生的矿物组合与 MVT 矿床十分吻合。Corbella 等(2004)通过对后期溶洞孔隙充填方式形成的 MVT 矿床中碳酸盐岩的溶解、硫化物的形成以及后期碳酸盐岩的形成等现象的观察,对混合模式做了适当的修改,提出了两种化学性质不同、但方解石含量均饱和的热液流体,在具有开放空间的溶洞内混合而成矿的模式。

Charles 等(1995)总结了几种成矿机制的优缺点,他认为在模式一中,冷却的确可以形成矿石中的大多数矿物组合,但流体包裹体数据显示,在许多矿床中流体温度并没有明显下降的迹象,模式二可以解释有机质与黄铁矿的存在,但是它又难以解释其形成的动力学机制,并且不能解释硫化物的反复沉淀和溶解的过程;模式三虽然可以解释大多数矿物组合的形成,但由于不同 MVT 矿床之间矿物组合变化很大,每一组成矿流体混合仅能形成一组矿物组合,因而,不同的矿物组合需要由不同性质的流体混合模式来解释。另外,该模式不能解释许多矿床中普遍存在有机质和黄铁矿的氧化产物。对此,Charles 等(1995)提出了含硫代硫酸盐的溶液通过各种途径与有机质在成矿地点发生反应沉淀成矿的观点。其中的有机质作为矿化不同阶段的还原剂及二氧化碳和有机酸的来源,同时,有机质还起到为硫代硫酸盐发生细菌代谢提供催化酶的作用。因此,有机质的存在是关键因素,有机质与各个成矿阶段都有着密切关系。但是,有机质的存在并非 MVT 矿床的普遍现象,因此,有机质对 MVT 矿床形成的贡献仍难以准确判定。

综上所述,尽管近几十年来对 MVT 矿床的研究从未间断,但对导致其形成的主控因素,人们的认识仅限于少数几个方面,如热卤水、金属来源、硫的海水来源、在构造隆起时期的大面积的成矿作用等。事实上,该类型矿床涉及的地质因素千变万化,不同矿床之间差异明显。关于成矿流体源区、运移过程和卸载机制等的讨论涉及多种地质和地球化学过程。目前人们掌握的 MVT 矿床中具有普遍意义的地化参数非常少,对成矿流体的化学性质(包括 pH 值)、沉淀机理、有机物的作用、硫的氧化态以及含矿角砾岩的形成机制仍然不能确定。尽管目前已经对少数 MVT 矿

床进行了古地磁法和放射性同位素的年龄测定,但大多数 MVT 铅锌矿床仍未获得一致的年龄数据。因此,只有在这些问题全面解决后,才能建立起较为完善的矿床成因模型。

7 找矿标志

在众多特征中,最为重要的找矿标志为构造、溶解坍塌角砾岩、地层和岩性等,这些标志对于 MVT 矿床的控制作用的影响随矿床的不同有所侧重,但

又紧密相关(见表 1)。

7.1 构造标志

断裂构造对成矿的控制作用表现在多个方面,从矿集区角度来说,深大断裂往往控制矿床的分布;角砾岩和矿化角砾岩多沿断裂构造分布;如波兰上西里西亚矿集区主要矿床均产于 Kracow-Lubin 断裂带西南侧,中国塔木-卡兰古矿带的主要矿床总体上都在台缘大断裂的碳酸盐岩一侧;川滇黔交界地区大部分铅锌矿床在安宁河线性断裂带以东的台缘凹陷带中聚集,而在安宁河-绿汁江断裂的西侧,铅

表 1 全球部分 MVT 矿床控矿因素统计表

Table 1 Statistics of ore control factors for some MVT ore deposits in the world

矿床或矿集区	国家	页岩边界	灰岩/白云岩	礁/角砾岩杂岩	溶解坍塌角砾岩	基底隆起	断层和裂隙	矿前溶解特征
Viburnum Trend	美国	***	***	***	***	***	***	
Old Lead Belt	美国	***	***	***		***	***	
Tri-State	美国	***	*	**	***		***	
阿肯色州北部	美国	***	*		***		***	
田纳西州中部	美国		*		***		*	**
杰克逊城(东田纳西州)	美国		*		***		*	
Austinville	美国	*					***	
Metaline	美国	**	**		***		***	**
Upper Mississippi 河谷	美国		*				***	
Gays River	加拿大			*		***	***	
丹尼尔港	加拿大		***		**		***	***
Nanisivik	加拿大				***		***	
Polaris	加拿大	***	***		***			
Pine Point	加拿大	***	***	***	***		**	**
Gayna River	加拿大				***			
阿尔卑斯	加拿大	***	*	***	***		***	
Robb 湖	加拿大	***	*		***		**	
Monarch-Kiching Horse	加拿大	***	*		**			*
上西里西亚	波兰	***	***		***	**	***	*
Lennard Shelf	澳大利亚	*	*		**	***	***	
Coxco	澳大利亚				**		***	
爱尔兰 Midland	爱尔兰		*		*		***	*
赛文山	法国		*		***	**	***	*
Bushy Park	南非				***		*	***
Pering	南非				***		**	***
Reocin	西班牙				***		***	*
会泽	中国	*	***		***		**	
大梁子	中国	**			***	**	***	
天宝山	中国	**	***			**	**	
赤普	中国	***			**		**	
毛坪	中国	***	**				***	
茂租	中国	***			*		**	
乐红	中国	**	**		**		***	
马元	中国	*		***		*	***	
李梅	中国			***	**		**	***
凡口	中国	**	***				***	

注:*** 主要控矿因素;** 次要控矿因素;* 最小控矿因素(据 Leach et al., 2005 修改)。

锌矿床(点)非常少,迄今为止没有发现成型的矿床。铅锌矿床的空间分布格局明显受区域构造格局的严格控制。从矿床角度讲,富矿体受多组断裂的共同控制,断裂交汇处往往是矿体富集的有利地段,如爱尔兰 Lisheen 矿区内有两条北至北北东向大断裂(Killoran 和 Derryville 断裂),矿体发育于断裂附近且越靠近断裂,硫化物品位越高,说明断层可能是该矿区矿液的通道;中国川滇黔交界地区不同性质、方向、级别的构造,分别控制着不同级别、方向及几何形态的矿带、矿床及矿体,是构造分级控矿的结果。受控于石棉-小江断裂的南北向矿带及北东向、北西向断裂的铅锌矿带,其线性分布较明显,而在近东西向构造矿带中则以分散状分布,这可能是由于铅锌矿主要是在不同方向褶皱、断裂的交汇部位及近南北向与近东西向构造的交汇点富集形成的,如会泽铅锌矿中的矿山厂、麒麟厂分别处于北东向矿山厂、麒麟厂断裂和北(北)西向次级断裂的交汇处。

7.2 地层标志

矿体明显受地层控制,同一矿区中矿化主要发生于一个或者少数几个层位中。这种含矿地层的共同特征是下部为孔隙度和渗透率较大的碎屑岩或白云岩,上部则为相对不透水的页岩、蒸发岩或者致密灰岩地层,例如川滇黔交界地区茂租和赤普铅锌矿床,含矿层上覆地层均为寒武系页岩层。区域性白云岩化是 MVT 矿床形成的必要条件,这种白云岩化呈层状或似层状,在白云岩化蚀变强烈的地段,若一些成矿元素强烈富集,则可成为含矿的有利地段。

7.3 角砾岩标志

矿化往往产于角砾岩中,因此,角砾岩成为重要的找矿标志。如果角砾岩中的胶结物硫化物已经流失,则孔洞痕迹可评价其含矿性。由于大多数角砾岩中铅、锌硫化物含量很低,并且闪锌矿颜色较浅,常不易辨别,因此要特别注意氧化后残留的孔洞。角砾岩形态变化较大,一般,沿层或近于顺层展布的角砾岩矿化较好。

7.4 有机质标志

根据有机质及其演化物对部分矿床的成矿元素活化、迁移、富集有重要作用这一事实,它可作为找矿的重要标志。有机碳含量高、沥青质大量存在或包裹体中富含烃类、 CO_2 、 H_2S 的地区,是成矿有利地段;基于有机质与金属成矿的关系,有机烃气可作为寻找隐伏金属矿床的有效指标。

7.5 化探标志

MVT 矿床富集元素 Pb、Zn、As、Sb、Ag、Co、Ni、Ge 等,在地表所形成的地球化学异常是找矿标志。可通过水系沉积物取样、分析或土壤元素分析等确定化探异常,圈定预测靶区。但是,由于 MVT 矿床成矿温度低,围岩蚀变影响范围小,所形成的化探异常,尤其是原生晕范围较小,地球化学异常分带不明显。在低密度或甚低密度化探扫面中,当矿体处于隐伏-半隐伏状态时,化探取样达不到预期效果。

8 小 结

上述资料表明,对 MVT 矿床的研究,在成矿的地质特征(地层、构造、矿物组构等)、地球化学特征(铅、硫同位素、有机质)、成矿时代、流体运移机制、硫化物沉淀机制等方面取得了较大进展。该类矿床的地质地球化学特征、部分矿床成矿时代的测定及流体运移和硫化物沉淀的模式,为该类矿床的成因机制研究提供了重要依据。然而,由于 MVT 矿床所涉及的地质因素较多,不同矿集区之间存在差异,因此,在不同矿床成矿机制建立方面仍存在很大的争议,如目前的 3 种不同的沉淀机制,每种机制的适用性有限,尚无一种模式能解释所有 MVT 矿床的形成过程,每一种流体运移机制仅能解释少数几个代表性矿床的流体运移方式。成矿时代的确定是解决矿床成因问题的关键因素。因此,在今后的研究过程中,应注意运用和建立新的测年方法来解决低温铅锌矿床的成矿时代问题。由于“MVT”这一概念所包含的矿床共性较少,很难用一二种成矿机制来解释,在今后的研究过程中可以考虑尝试建立或分解出一种或几种新的分类标准,尽量涵盖同类矿床的更多共性特征,从而为建立更加适用的成矿模式提供前提。

References

- Adams J J. 2001. Numerical modeling of regional gravity-driven flow systems in the Alberta basin (Master of Science) [D]. Supervisor: Rostron B J and Mendoza. Canada: University of Alberta. 15-23.
- Alldrick D and Sangster D, Fonseca A and Bradshaw G. 2005. Mississippi Valley-type (MVT) Pb-Zn. Yukon Mineral Deposits Profiles, YGS Open File, 2005 [EB]. http://geology.yk.net/metallogeny/mineral_deposit_profiles/of_2005_5/e12_mississippi_valley_type_pb_zn.pdf. 1-8.

- Anderson G M. 1975. Precipitation of Mississippi Valley-type ores[J]. *Econ. Geol.*, 70: 937-942.
- Anderson G M. 1983. Some geochemical aspects of sulfide precipitation in carbonate rocks[A]. In: Kisvarsanyi, et al. ed. International conference on Mississippi Valley type lead-zinc deposits [C]. proceedings volume. 61-76.
- Anderson G M. 1991. Organic maturation and ore precipitation in Southeast Missouri[J]. *Econ. Geol.*, 86: 909-926.
- Barnes H L. 1997. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*[M]. New York: John Wiley and Sons Inc. 517-600.
- Barrett T J and Anderson G M. 1982. The solubility of sphalerite and galena in NaCl brines[J]. *Econ. Geol.*, 77: 1923-1933
- Basuki N I and Spooner E T C. 2004. A review of fluid inclusion temperatures and salinities in Mississippi Valley-type Zn-Pb deposits: Identifying thresholds for metal transport[J]. *Exploration and Mining Geology*, 11(1-4): 1-17.
- Bethke C M. 1985. A numerical model of compaction-driven groundwater flow and heat transfer and its application to the paleohydrology of intracratonic sedimentary basins [J]. *Journal of Geophysical Research*, 90: 6817-6828.
- Bradley D C. 1993. Role of lithospheric flexure and plate convergence in the genesis of some Appalachian zinc deposits[J]. *U. S. Geological Survey Bulletin*, 2039: 35-43.
- Bradley D C and Leach D L. 2003. Tectonic controls of Mississippi Valley-type lead-zinc mineralization in orogenic forelands [J]. *Mineralium Deposita*, 38: 652-667.
- Bradley D C, Leach, D L, Symons D, Emsbo P, Premo W, Breit G and Sangster D F. 2004. Reply to discussion on "Tectonic controls of Mississippi Valley-type lead-zinc mineralization in orogenic forelands" by Kesler S E, Christensen J T, Hagni R D, Heijlen W, Kyle J R, Misra K C, Muchez P and Voo R van der[J]. *Mineralium Deposita*, 39: 515-519.
- Brockie D C, Hare E H Jr and Dingess P R. 1968. The geology and ore deposits of the Tri-State district of Missouri, Kansas, and Oklahoma[A]. In: Ridge J D, ed. *Ore deposits of the United States, 1933-1967*[C]. New York: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. 400-430.
- Carpenter A B. 1978. Origin and chemical evolution of brines in sedimentary basins[A]. In: Johnson K S and Russell J R, ed. 13th industrial minerals forum[C]. *Oklahoma Geological Survey Circular* 79:60-77.
- Cathles L M and Smith A T. 1983. Thermal constraints on the formation of Mississippi Valley-type lead-zinc deposits, and their implications for episodic dewatering and deposit genesis[J]. *Econ. Geol.*, 78: 948-956.
- Charles S S and Allen V H. 1995. Evaluation of proposed precipitation mechanisms for Mississippi Valley-type deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 10: 1-17.
- Chen Y C, et al. 2006. Chinese mineralization system and assessment of regional mineralization[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 623-817 (in Chinese with English abstract).
- Clendenin C W, Niewendrop C A, Duane M J and Lowell G R. 1994. The paleohydrology of southeast Missouri Mississippi Valley-type deposits, interplay of faults, fluids, and adjoining lithologies[J]. *Econ. Geol.*, 89:322-332.
- Clendenin C W. 1993. Faults, fluids, and southeast Missouri MVT deposits [J]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 25(3):12.
- Cooke D R, Bull S W, Large R R and McGoldrick P J. 2000. The importance of oxidized brines for the formation of Australian Proterozoic stratiform sediment-hosted Pb-Zn (Sedex) deposits[J]. *Econ. Geol.*, 95: 1-18.
- Corbella M, Ayora C and Cardellach E. 2004. Hydrothermal mixing, carbonate dissolution and sulfide precipitation in Mississippi Valley-type deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 39: 344-357.
- Emsbo P. 2000. Gold in Sedex deposits [J]. *Society of Economic Geologists Reviews*, 13:427-437.
- Garven G and Freeze R A. 1984. Theoretical analysis of the role of groundwater flow in the genesis of strata-bound ore deposits. 1. Mathematical and numerical model; 2. Quantitative results[J]. *American Journal of Science*, 284: 1085-1174.
- Garven G. 1995. Continental-scale groundwater flow and geologic processes[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 23: 89-117.
- Gerdemann P E and Meyers H E. 1972. Relationships of carbonate facies patterns to ore distribution and to ore genesis in the Southeast Missouri lead district[J]. *Econ. Geol.*, 67: 426-433.
- Hagni R D. 1983. Minor elements in Mississippi Valley-type ore deposits [A]. In: Shanks W C, ed. *Cameron volume on unconventional mineral deposits*[C]. Society of Economic Geology and Society of Mining Engineers. AIME. New York. 44-88.
- Hannigan P K. 2005. Metallogeny of the Pine Point Mississippi Valley-type zinc-lead district, southern northwest territories[EB]. http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/metallogeny/mvt/pine/index_e.php. 1-28.
- Hanor J S. 1996. Controls on the solubilization of lead and zinc in basin brines[M]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 4: 483-500
- Heijlen W, Muchez P, Banks D A, Schneider J, Kucha H and Keppens E. 2003. Carbonate hosted Zn Pb deposits in Upper Silesia, Poland: Origin and evolution of mineralizing fluids and constraints on genetic models[J]. *Econ. Geol.*, 98:911-932.
- Hitchon B. 1993. Geochemistry of formation water, northern Alberta, Canada: Their relation to the Pint Point ore deposit, Edmonton[C]. *Alberta Geological Survey, Open File Report*, 1993-14: 99.
- Hitzman M W. 1999. Extensional faults that localized syndiagenetic Zn-Pb deposits and their reactivation during Variscan compression[M]. *Geological Society of London Special Publication* 155. 233-245.
- Hu Y G, Li C Y, Wen H J and Huang Z L. 2000. The characteristics of the silver minerals in the Pb-Zn-Ag deposits in the boundaries of Sichuan, Guizhou and Yunnan[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 318-320(in Chinese).
- Hudson M R. 2000. Coordinated strike-slip and normal faulting in the southern Ozark dome of northern Arkansas: Deformation in a late Paleozoic foreland[J]. *Geology*, 28: 511-514.
- Jackson S A and Beales F W. 1967. An aspect of sedimentary basin evolution: the concentration of Mississippi Valley-type ores during late stages of diagenesis [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum*

- Geology, 15; 383-433.
- Kaiser Charles J and Ohmoto H. 1987. The kinetics of sulfate reduction by organic matter under hydrothermal conditions[A]. Geological society of America, annual meeting and exposition, Dickinson[C]. Geological Society of America, 19(7); 721.
- Kesler S E. 1996. Appalachian Mississippi Valley-type deposits: Paleoaquifers and brine provinces [M]. Society of Economic Geologists Special Publication 4. 29-57.
- Kharaka Y K, Maest A S, Carothers W W, Law L M, Lamothe P J and Fries T L. 1987. Geochemistry of metal-rich brines from central Mississippi Salt Dome basin, U S A [A]. In: Jeffrey S H, Yousif K K and Lynton S L. Geochemistry of waters in deep sedimentary basins[C]. Penrose conference, 1987. Oxnard, CA, United States; Pergamon. 2(5-6); 543-561.
- Kibitlewski S. 1991. Tectonic control of the origin of the Zn-Pb deposits in the Chrzanow region, Poland[J]. Geological Quarterly, 37; 229-240.
- Kyle J R. 1981. Geology of the Pine Point lead-zinc district[A]. In: Wold K H, ed. Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits[C]. New York; Elsevier. 9; 643-741.
- Lane T E. 1984. Preliminary classification of carbonate breccias, Newfoundland Zinc Mines, Daniel's Harbour, Newfoundland[J]. Geological Survey of Canada, 84-1A; 505-512.
- Leach D L and Sangster D F. 1993. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits[M]. Geological Association of Canada Special Paper, 40. 289-314.
- Leach D L, Bradley D C, Lewchuk M, Symons D T A, Brannon J and de Marsily G. 2001. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time; Implications from recent age-dating research[J]. Mineralium Deposita, 36; 711-740.
- Leach D L, Bechstadt T, Boni M and Zeeh S. 2003. Triassic-hosted MVT Zn-Pb ores of Poland, Austria, Slovenia and Italy[A]. In: Kelly J G, Andrew C J, Ashton J H, Boland M B, Earls G, Fuscuardi L and Stanley G, eds. Europe's major base metal deposits [C]. IAEG millennium Conference in 2000, 2003. Dublin: Irish Association for Economic Geology. 169-214.
- Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, Large R R, Garven G, Allen C R, Gutzmer J and Walters S. 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective [C]. Economic Geology 100th Anniversary Volume. 561-607.
- Li F Y, Gu X X, Fu S H and Zhang M. 2002. The role of organic matter in the formation of MVT Pb-Zn deposit[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 21 (4); 272-276 (in Chinese with English abstract).
- Liu H C and Lin W D. 1999. Study on metallogenetic laws of lead-zinc-silver deposits in Northeastern Yunnan [M]. Kunming; Yunnan University Pub. House. 1-419(in Chinese).
- Liu W J and Zheng R C. 1999. Research of fluid inclusion gas composition in Huayuan lead-zinc deposits—organic-mineralization study of MVT lead-zinc deposits (II) [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 17(4); 608-614(in Chinese with English abstract).
- Lyle J R. 1977. Petrography and carbonate diagenesis of the Bonnetterre Formation in the Viburnum Trend area, southeast Missouri[J]. Econ. Geol., 72; 420-434.
- Mavrogenes J A, Hagni R D and Dingess P R. 1992. Mineralogy, paragenesis, and mineral zoning of the West Fork mine, Viburnum Trend, southeast Missouri[J]. Econ. Geol., 87; 113-124.
- Misra K C. 1999. Understanding mineral deposits[M]. Boston, Ma; Kluwer Academic Publishers. 1-845.
- Morrow D. 1998. Regional subsurface dolomitization, models and constraints[J]. Geoscience Canada, 25(2); 57-70.
- Paradis S, Hannigan P and Dewing K. 2005. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits (MVT)[EB]. http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/mvt/index_e.php. 1-15.
- Person M A and Garven G. 1994. A sensitivity study of the driving forces on fluid flow during continental rift evolution[J]. Geological Society of America Bulletin, 106; 461-475.
- Plumlee G S, Leach D L, Hofstra A H, Landis G P, Rowan E L and Viets J G. 1994. Chemical reaction path modeling of ore deposition in Mississippi Valley-type deposits of the Ozark region, U. S. Midcontinent[J]. Econ. Geol., 89; 1361-1383.
- Raffensperger J P and Garven G. 1995. The formation of unconformity-type uranium ore deposits 1. coupled groundwater flow and heat transport modeling[J]. American Journal of Science, 295; 581-636.
- Rhodes D, Lantos E A, Lantos J A, Webb R J and Owen D C. 1984. Pine Point orebodies and their relationship to the stratigraphy, structure, dolomitization, and karstification of the Middle Devonian barrier complex[J]. Econ. Geol., 79; 991-1055.
- Rimstidt J D. 1997. Gangue mineral transport and deposition[A]. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits[M]. New York; John Wiley and Sons Inc. 487-516.
- Russell M J. 1986. Extension and convection: A genetic model for the Irish Carboniferous base metal and barite deposits. In: Andrew C J, Crowe R W A, Finlay S, Pennell W M and Pyne J, ed. Geology and genesis of mineral deposits in Ireland. Dublin, Irish Association for Economic Geology, 545-554.
- Sangster D F. 1995. Mississippi Valley-Type lead-zinc [A]. In: Eckstrand O R, Sinclair W D and Thorpe R I, eds. Geology of Canadian Mineral Deposit Types[C]. Geological Survey of Canada, Geology of Canada, No. 8; 253-261.
- Sangster D F. 2002. The role of dense brines in the formation of vent-distal sedimentary-exhalative (SEDEX) lead-zinc deposits: field and laboratory evidence[J]. Mineralium Deposita, 37; 149-157.
- Sass-Gustkiewicz M and Dzylinski S. 1998. On the origin of strata-bound ores in the Upper Silesia, Poland [J]. Annales Societatis Geologorum Poloniae, 68; 267-278.
- Sass-Gustkiewicz Maria and Kucha H enryk. 2005. Zinc-lead deposits, Upper Silesia, Poland Upper Silesian district; Lat. 50 16'N, Long. 19 30'E[J]. Ore Geology Reviews, 27 (1-4); 269.
- Southgate P N, Kyser T K, Scott D L, Large R R, Golding S D and Polito P A. 2006. A basin system and fluid-flow analysis of the Zn-Pb-Ag Mount Isa-type deposits of Northern Australia; Identifying metal source, basinal brine reservoirs, times of fluid expulsion, and organic matter reactions[J]. Econ. Geol., 101(6); 1103-1115.
- Sverjensky D A. 1984. Oil field brines as ore-forming solution[J]. Econ. Geol., 79; 23-37.
- Sverjensky D A. 1986. Genesis of Mississippi Valley-type lead-zinc deposits[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 14;

177-199.

- Viets J G, Hofstra A H, Emsbo P and Kozłowski A. 1996. The composition of fluid inclusions in ore and gangue minerals from Mississippi Valley type Zn-Pb deposits of the Cracow-Silesia region of southern Poland; Genetic and environmental implications[A]. In: Gorecka E and Leach D L, ed. Carbonate-hosted zinc-lead deposits in the Silesian-Cracow area Poland[C]. Warsaw, Poland: Prace Państwowego Instytutu Geologicznego. 85-104.
- Wang X H, Xue C J, Li Z M, Li Q and Yang J R. 2008. Geological and geochemical characteristics of Mayuan Pb-Zn ore deposit on northern margin of Yangtze landmas [J]. Mineral Deposits, 27(1): 37-48(in Chinese with English abstract).
- Xie S C and Yin H F. 1997a. Biology-organic matter-fluid ore forming system[M]. Wuhan: China University of Geosciences Pub. House. 1-131(in Chinese).
- Xie S C, Yin H F, Wang H M and Zhou X G. 1997b. Organic ore-forming process in the Qixiashan polymetallic deposit, Nanjing city, Jiangsu Province[J]. Mineral Deposits, 16(4): 289-297(in Chinese with English abstract).
- Xue B G. 2006. The composite genesis of Huize super-large Pb-Zn deposit rich in Ge [J]. Yunnan Geology, 25(2): 143-159(in Chinese with English abstract).
- Yin H F and Xie S C. 1994. Advances and trends on the study of microbial merallogenesis[J]. Earth Science Frontiers, 1(4): 148-156(in Chinese with English abstract).
- Zhang C Q. 2005. Distribution, characteristics and genesis of Mississippi Valley-type lead-zinc deposits in Sichuan-Yunnan-Guizhou triangle area(dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Mao J W. Beijing: China University of Geoscience. 54p (in Chinese with English abstract).
- Zhang C Q, Mao J W, Yu J J and Li H M. 2007. The study on fluid inclusion and the mineralization mechanism of Chipu Pb-Zn deposit in Sichuan, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2541-2552 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C Q, Yu J J and Mao J W. 2008. The genetic model for Zn-Pb deposits in the boundaries of Sichuan, Guizhou and Yunnan province [A]. In: Chen Y C, et al, ed. Symposium of the 9th National Conference on Mineral Resources of China[C]. The 9th National Conference on Mineral Resources of China, 2008. Beijing: Geol. Pub. House. 623-817(in Chinese).
- Zhang C Q. 2008. The genetic model of Mississippi Valley-type deposits in the boundary area of Sichuan, Yunnan and Guizhou provinces, China(dissertation for Doctor degree)[D]. Supervisor: Mao J W and Yu J J. Beijing: Chinese Academy of geological Sciences. 1-165 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C Q, Mao J W, Yu J J, Liu J, Li L and Li H M. 2007. Lead isotope variation of lead-zinc deposits across Sichuan-Yunnan-Guizhou boundaries, China [A]. In: Andrew C J, et al. ed. Digging Deeper[C]. The 9th biennial SGA meeting, 2007. Dublin, Ireland; Irish Association for Economic Geology. Vol 2: 1287-1290.
- Zheng M Q. 1995. The pilot study on mineral component and the characteristics of silver for Lemachang silver deposit in Ludian county[J]. Yunnan Geology, 14(1): 28-38(in Chinese).
- Zhuang H P and Lu J L. 1996. Organic matter in ore deposits; Characteristics classification and analytical methods[J]. Advance in Earth Sciences, 11(4): 372-377(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈毓川, 等. 2006. 中国成矿体系与区域成矿评价[M]. 北京: 地质出版社. 623-817.
- 胡耀国, 李朝阳, 温汉捷, 黄智龙. 2000. 川滇黔接壤处铅锌银矿床中银矿物特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 19(4): 318-320.
- 李发源, 顾雪祥, 付绍洪, 章明. 2002. 有机质在MVT铅锌矿床形成中的作用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 21(4): 272-276.
- 柳贺昌, 林文达. 1999. 滇东北铅锌银矿床规律研究[M]. 昆明: 云南大学出版社. 1-419.
- 刘文均, 郑荣才. 1999. 花垣铅锌矿床包裹体气相组份研究——MVT矿床有机成矿作用(II)[J]. 沉积学报, 17(4): 608-614.
- 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.
- 谢树成, 殷鸿福. 1997a. 生物-有机质-流体成矿系统[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 1-131.
- 谢树成, 殷鸿福, 王红梅, 周修高. 1997b. 南京栖霞山多金属矿床的有机成矿作用[J]. 矿床地质, 16(4): 289-297.
- 薛步高. 2006. 超大型会泽富锗铅锌矿复合成因[J]. 云南地质, 25(2): 143-159.
- 殷鸿福, 谢树成. 1994. 微生物成矿研究的新进展和新动向[J]. 地学前缘, 1(4): 148-156.
- 张长青. 2005. 川滇黔地区MVT铅锌矿床分布、特征及成因研究(硕士论文)[D]. 导师: 毛景文. 北京: 中国地质大学. 54页.
- 张长青, 毛景文, 余金杰, 李厚民. 2007. 四川甘洛赤普铅锌矿床流体包裹体特征及成矿机制初步探讨[J]. 岩石学报, 23(10): 2541-2552.
- 张长青, 余金杰, 毛景文. 2008. 川滇黔交界地区铅锌矿床成矿模型[A]. 见: 陈毓川, 等. 第九届全国矿床会议论文集[C]. 第九届全国矿床会, 2008. 北京: 地质出版社. 799-801.
- 张长青. 2008. 中国川滇黔交界地区MVT铅锌矿床成矿模型(博士论文)[D]. 导师: 毛景文, 余金杰. 北京: 中国地质科学院. 1-165.
- 郑明秋. 1995. 鲁甸乐马厂银矿床矿石物质组分及赋银特征初步研究[J]. 云南地质, 14(1): 28-38.
- 庄汉平, 卢家烂. 1996. 金属矿床中的有机物质: 特征、分类方案和研究方法. [J] 地球科学进展, 11(4): 372-377.