

文章编号: 0258-7106(2013)02-0367-13

关于密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床的一些探讨^{*}

甄世民¹, 祝新友^{2*}, 李永胜³, 杜泽忠¹, 巩小栋¹, 公凡影¹, 齐钊宇¹

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 北京矿产地质研究院, 北京 100012;

3 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘 要 密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床是全球最重要的铅锌矿床类型之一, 由于其储量大、开发早, 在成矿规律研究等方面均取得了重要进展。如成矿物质来源、成矿流体的驱动机制、成矿金属的迁移机制和沉淀富集机制、成矿时代、成矿模式等。文章在总结前人研究成果的基础上, 主要从含矿建造和区域盆地卤水活动两个方面对 MVT 矿床的成矿规律进行了系统的总结和综合研究, 厘定了 MVT 矿床的含矿建造, 主要包括特定的含矿岩性组合、盆地中的红层、生烃层等, 分析了区域盆地卤水活动对 MVT 矿床的制约, 主要包括区域白云石化与 MVT 铅锌矿床的空间分布关系、与 MVT 铅锌矿床常伴生的其他类型矿床, 并对 MVT 铅锌矿床的成因进行了初步的探讨。最后, 认为特定的岩性组合(特别是砂岩、碳酸盐岩、泥页岩组合)、含矿岩系下部碎屑岩的褪色蚀变、区域红层盆地的广泛发育、生烃盆地的边缘、区域白云石化的前锋地带等, 是 MVT 矿床及其伴生矿床找矿勘探的重要参考依据。

关键词 地质学; MVT 型铅锌矿; 含矿建造; 岩性组合; 盆地卤水; 白云石化; 成矿规律

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

A tentative discussion on Mississippi Valley-type deposits

ZHEN ShiMin¹, ZHU XinYou², LI YongSheng³, DU ZeZhong¹, GONG XiaoDong¹,
GONG FanYing¹ and QI FanYu¹

(1 Faculty of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Beijing Institute of Geology and Mineral Resources, Beijing 100012, China; 3 Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract

Mississippi Valley-type (MVT) Zn-Pb deposits constitute one of the most important types of Zn-Pb deposits in the world, characterized by large reserves and early exploitation. Significant progress has been made in the study of mineralization regularities of MVT deposits, such as source of ore-forming materials, expulsion of ore-forming fluids, migration and precipitation mechanism of ore-forming metals, ore-forming ages and metallogenetic model. On the basis of comprehensive summarization and review of achievements already made, this paper systematically summarizes the mineralization regularity of MVT deposits in two aspects: ore-bearing formations and regional basin brines. The ore-bearing formations of MVT deposits were determined, which mainly consist of mineral-bearing lithologic association, red-bed basin and hydrocarbon formation. The constraints from regional basin brines were analyzed, which include the relationship between regional dolomitization and the

^{*} 本文得到全国危机矿山找矿专项科研课题“湘南-粤北地区锡钨多金属矿床成矿规律总结研究(20089927)”项目资助

第一作者简介 甄世民, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事矿床学和矿床地球化学研究。Email: zhenshimin0001@163.com

^{**} 通讯作者 祝新友, 男, 1965 年生, 教授级高工, 主要从事矿床学研究。Email: zhuxinyou@gmail.com

收稿日期: 2012-06-14; 改回日期: 2012-12-27。张绮玲编辑。

mineralization regularity of MVT deposits and the other types of deposits associated with MVT Zn-Pb deposits. The origin of MVT Zn-Pb deposits was also preliminarily discussed. It is held that the specific ore-bearing formations (especially the combination of sandstone, carbonatite and mudstone or shale), the decoloration of clastic rocks below ore-bearing formations, the extensive development of red-bed basins, the margin of the hydrocarbon basin and the front of regional dolomitization are important references for the prospecting and exploration of MVT and associated deposits.

Key words: geology, MVT Pb-Zn deposit, ore-bearing formations, lithologic association, basin brines, dolomitization, mineralization regularity

密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床是全球最重要的铅锌矿床类型之一。该类矿床提供了世界上约27%的铅锌资源(Leach et al., 2005)。早在1939年,在美国密西西比河谷地区发现了一系列盆地卤水成因的后生低温热液硫化物矿床,且400多个矿床(点)具有相似的地质地球化学特征,MVT矿床因此而得名。MVT矿床最典型的矿集区位于美国中部的密西西比河流域和加拿大西北地区,包括Upper Mississippi Valley district、Tennessee district、Tri-State district、Pine Point、Polaris等(Rakovan, 2006; Paradis et al., 2007)。该类型矿床在南美、澳大利亚、中欧、中亚、北非等地均有发现。

中国对MVT铅锌矿床的认识经历了较复杂的过程,众多学者在不同时期提出了不同的看法。20世纪五六十年代,MVT矿床被认为属于中低温岩浆热液成因(郭文魁等,1960);70年代末,MVT矿床的概念引入中国,引起我国地质工作者的高度重视;随后,多数学者将MVT矿床理解为同生沉积或沉积-改造矿床(涂光炽,1984;张位及,1984;廖文,1984);进入90年代,大多数学者主张将产于碳酸盐岩中的铅锌矿床归为MVT矿床的范畴(芮宗瑶等,2004)。近年来,在辽宁、新疆、甘肃、川滇黔地区、藏北和藏东等地区,均发现了大规模的MVT铅锌矿床。

MVT铅锌矿床由于储量大、开发早,无论是基础地质工作,还是成矿规律研究均取得了重要进展,如对矿床基础地质特征(Skall, 1975; Rakovan, 2006; Paradis et al., 2007; Leach et al., 2010)、成矿物质来源(LeHuray et al., 1987; Garven et al., 1993; Garven, 1995; 周朝宪等, 1997; Zhou et al., 2001)、成矿流体的驱动机制(Oliver, 1986; Ge et al., 1989; 1992; Garven et al., 1997; Leach et al., 2005)、成矿金属的迁移机制和沉淀富集机制(Jackson, 1966; Beales, 1975; Anderson, 1983; Plumlee et al., 1994;

Leach et al., 2005)、成矿时代(Nakai et al., 1990; 1993; Brannon et al., 1992; Kontak et al., 1994; Leach et al., 2001; 李文博等, 2004; 蒋映德等, 2006; 张长青, 2008)、成矿模式(Sverjensky, 1981; 1986; Bethke, 1986; Hagni, 1995; Kesler, 1996; Garven et al., 1999; Shelton et al., 2009)等方面的研究。

前人更多的是从MVT矿床的一般地质特征和地球化学特征出发,而关于MVT矿床含矿建造、区域性盆地卤水活动的认识,并没有得到人们的足够重视,也从未进行过系统的归纳总结。含矿建造和区域性盆地卤水活动对MVT矿床的形成、演化、区域分布规律等,提供了重要的地质和地球化学限制因素。本文在总结MVT铅锌矿床一般地质特征的基础上,主要从含矿建造和区域盆地卤水活动两个方面对MVT矿床的成矿作用进行了总结和探讨,希望对MVT矿床成矿模型的建立和进一步的找矿勘探实践,提供参考依据。

1 MVT 铅锌矿床的一般地质特征

MVT铅锌矿床一般是指赋存于台地碳酸盐岩中,成因上与岩浆活动无明显直接联系的层控、后生的铅锌矿床,是在中低温条件下由盆地卤水沉淀形成的(Leach et al., 1993)。MVT矿床多数形成于造山带前陆盆地中,少数在逆冲推覆带中,极少数存在于大陆伸展环境中(Leach et al., 1993; Bradley et al., 2003; 刘英超等, 2008)。MVT矿床多具有成群成带分布的特点,矿体一般赋存于某些特定的含矿层位。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形成工业矿体,具有一定的层控性。

MVT矿床的矿体形态变化较大,可以呈似层状、囊状、筒状、透镜状、不规则状等。矿体明显受构造控制,矿体与围岩界线清晰。矿体主要受一定地

层层位控制,产于礁体、岩溶溶洞、岩溶角砾带、不整合面、层间破碎带、多组断裂的交汇部位、裂隙带中。其含矿围岩主要为白云岩或白云质灰岩,仅少数为灰岩。全球 MVT 矿床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(张长青等,2009)。

MVT 矿床的矿物组成较为简单,金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等,脉石矿物主要为白云石、方解石,在少数矿床(区)中发育重晶石和萤石,成矿期的石英较少见。矿石多发育在多孔隙和高渗透率的碳酸盐岩中,其组构变化较大。大部分 MVT 矿床和矿区(约 85%)相对富锌, $Zn/(Zn+Pb)$ 比值在 0.5~1.0,通常为 0.8(吕志成等,2004)。在北美的 Appalachia 矿带,甚至出现一些不含铅的锌矿床(Kesler et al.,1994)。闪锌矿的 Fe 含量较低(多在 0.3%~4.5%之间),方铅矿中 Ag 含量低(薛春纪等,2007)。矿石构造主要有块状、角砾状、浸染状、网脉状、条带状等。除块状构造外,角砾状构造是矿石主要的构造类型之一,硫化物常作为胶结物胶结围岩角砾。世界上绝大多数 MVT 矿床都伴有不同程度的角砾岩化(Ohle,1985)。矿石结构主要有粒状、胶状、草莓状、团粒状等。围岩蚀变比较简单,主要为白云石化、方解石化。

大部分 MVT 矿床的矿石的硫、铅同位素组成变化范围都较大(薛春纪等,2007)。硫化物的 $\delta^{34}S$ 与围岩的硫酸盐 $\delta^{34}S$ 值接近,分布较分散,多为正值,富重硫特征。铅同位素常具有较高的 μ 值,放射性铅含量高,具有上地壳来源特征。矿石矿物中流体包裹体成分与油田卤水相似,含矿流体常具低温度和高盐度的特点,盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 一般大于 15%,但几乎不见 NaCl 子晶(卢焕章等,2004)。

2 MVT 铅锌矿床的含矿建造

2.1 特定的含矿岩性组合

对于 MVT 矿化集中区,其主要含矿层位常受特定的岩性组合控制。MVT 矿床的容矿岩层多为白云岩和白云质灰岩,容矿岩层的下部多为相对透水的砂岩、砂砾岩或其他碎屑岩,其上部多为相对不透水的泥页岩(图 1)。MVT 矿床的含矿岩性组合常构成一套完整的海进沉积序列。

美国 Missouri 地区的 Viburnum 铅锌矿带的主要容矿岩层为 Bonnetterre 白云岩组,该组主要由白云岩、页岩、砂质白云岩组成,其下部为 Lamotte 组的红色碎屑岩,主要由分选良好、细—中粒、滚圆的石英质砂岩组成,其上部为 Davis 页岩组(戴自希等,2005)。爱尔兰中部 Navan 铅锌矿的主要容矿岩层为 Navan 群中部的碳酸盐岩,其下部为 Baronstown 组的“老红色砂岩”,其上部为 Navan 群顶部的钙质泥岩和钙屑灰岩(Symons et al.,2002)。秘鲁 Bongara 矿带的主要容矿岩层为上三叠统—下侏罗统 Pucará 群的碳酸盐岩,其下部是 Mitu 群的红色砂砾岩,其上部为中侏罗统 Corontochaca 组的砾岩、砂岩和粉砂岩,以及 Sarayaquillo 组的红色页岩、砂岩和泥灰岩(Basuki et al.,2008)。川滇黔地区的主要容矿岩层为震旦系灯影组和石炭系摆佐组。其中,云南会泽铅锌矿的主要容矿岩层为下石炭统摆佐组和上泥盆统宰格组的粗晶白云岩,其下部为中泥盆统海口组的石英砂岩,其上部为石炭系碳酸盐—泥页岩建造和下二叠统的碳酸盐—细碎屑岩(李文博等,2006;韩润生等,2006)。广东凡口铅锌矿的工业矿体均赋存于中上泥盆统东岗岭组和天子岭组白云质灰岩,其下部为下泥盆统桂头群紫色砂岩,其上部为低缓倾角的细粒泥质物,即“破乱层”(韩英等,2011)。广西泗顶—古丹铅锌矿的主要容矿岩层为中泥盆统东岗岭组白云岩,次为上泥盆统融县组生物碎屑灰岩(谢世业等,2001);东岗岭组角度不整合于寒武系清溪组之上,其下部为滨海相砂砾岩,中部为生物灰岩和白云岩,上部为灰岩夹砂砾岩(覃焕然,1986);从区域上看,东岗岭组覆于莲花山组紫红色砂岩之上,融县组上覆地层为下石炭统岩关阶页岩、碳质页岩(广西壮族自治区地质局,1967)。新疆塔木—卡兰古铅锌矿带的 3 个主要容矿岩层下石炭统克里塔格组白云质灰岩、中泥盆统克孜勒陶组碎屑岩夹碳酸盐岩、下石炭统霍什拉甫组灰岩,都是由下部相对透水的碎屑岩(砂岩)和上覆相对不透水的细碎屑岩或厚层碳酸盐岩组成(祝新友等,1997;1998)。另外,加拿大 Pine Point 铅锌矿床(Rhodes et al.,1984)、美国东田纳西 Mascot-Fefferson 矿床(McCormick et al.,1971;Fulweiler et al.,1971)、秘鲁中部的 San Vicente 地区(Spangenberg et al.,1996)、广西北山铅锌矿(石焕琪等,1988)、湖南后江桥铅锌矿(刘家铎,1982;杨开济,1982)、湘西花垣铅

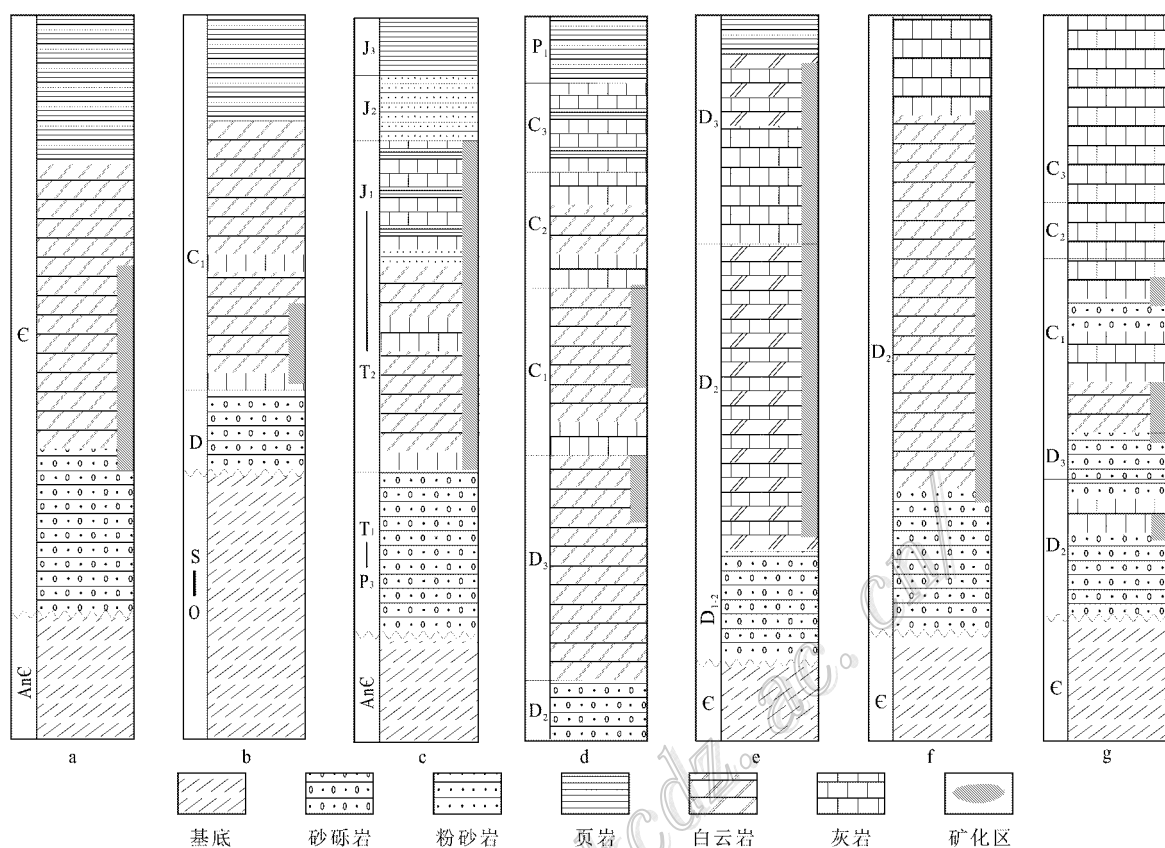


图 1 MVT 矿床柱状剖面对比示意图

a. 美国 Viburnum 铅锌矿(据 Shelton et al. 2009 修编); b. 爱尔兰 Navan 铅锌矿(据 Symons et al. 2002 修编); c. 秘鲁 Bongara 矿带(据 Baski et al. 2008 修编); d. 云南会泽铅锌矿(据李文博等, 2006; 韩润生等, 2006 修编); e. 广东凡口铅锌矿(据韩英等, 2011 修编); f. 广西泗顶-古丹铅锌矿(据覃煥然, 1986 修编); g. 新疆塔木-卡兰古成矿带(据祝新友等, 1998 修编)

Fig. 1 Stratigraphic section of MVT ore deposits

a. Viburnum Pb-Zn deposit in U.S.A.; b. Navan Pb-Zn deposit in Ireland; c. Bongara Area in Peru; d. Huize Pb-Zn deposit in Yunnan Province; e. Fankou Pb-Zn deposit in Guangdong Province; f. Siding-Gudan Pb-Zn deposit in Guangxi; g. Tamu-Kalangu Pb-Zn belt in Xinjiang

锌矿(刘文均等, 1999)等,都具有相似的岩性组合。总之,国内外绝大多数的 MVT 矿床均具有相似的含矿岩性组合,矿化赋存位置和矿化分布与碳酸盐岩/砂岩界面有直接的关系,铅锌硫化物矿体均赋存于该界面上部的碳酸盐岩中。特定的含矿岩性组合可能制约了 MVT 矿床的产出与发育。

关于含矿岩性组合与 MVT 矿床成矿的关系,前人已有大量的论述。Garven 等(1993)认为,美国中部的 MVT 矿床成矿流体就是以含矿岩系下部的 Lamotte 砂岩为主要通道而进行长距离(达数百千米)大规模的迁移。Garven(1995)和 Goldhaber 等(1995)认为,红色碎屑岩是成矿金属的重要来源,美国中部的大部分矿床主成矿阶段的 Pb、Zn 就来自于 Lamotte 砂岩。Zhou 等(2001)认为,川滇黔地区的 MVT 矿床的成矿金属来自灯影组之下的下震旦统

的火山岩和碎屑岩,当地层中有三价铁存在时,可以抑制成矿流体中 H_2S 的活度,从而增强流体淋滤金属的能力。王奖臻等(2002)认为,当红色碎屑岩中有大量的三价铁存在时,更易于成矿流体对 Pb、Zn 等金属元素的淋滤,并最终利于成矿。祝新友等(2010)认为,新疆乌拉根铅锌矿紫色砂砾岩的褪色是蚀变矿化的结果。韩英等(2011)认为,盆地卤水在凡口铅锌矿底部的紫色砂岩中迁移,交代了砂岩中的碳酸盐胶结物,导致紫色砂岩发生褪色蚀变。总之,特定的含矿岩性组合对于成矿的重要性已经普遍得到了人们的认可,但是其究竟以何种形式参与矿床的形成,还需进一步的探讨。

2.2 红层盆地或膏盐层

国内外的 MVT 铅锌矿床,常与盆地中的红层、膏盐层相伴生。在含矿碳酸盐岩的顶部或更上部,

总是存在一套晚期的陆相红层盆地沉积岩,常赋含有膏盐层。另外,MVT矿床常产于离膏盐层不远的地层中。加拿大Pine Point铅锌矿床的中泥盆世Eifelian阶的地层中,发育膏盐层(戴自希等,2005)。川滇黔地区的灯影组、龙王庙组、摆佐组等层位中,均含有不同厚度的膏盐层(韩润生等,2006)。新疆塔木-卡兰古成矿带和乌拉根铅锌矿的古新世阿尔塔什组主要由膏盐层组成(祝新友等,2010)。广东凡口矿床位于曲仁盆地北缘,而曲仁盆地之主体属于中新世代沉积的陆相紫红色砂砾岩,其中含膏盐层。

关于红层盆地或膏盐层与MVT矿床成因的关系,前人已经做了大量的研究。Sasaki等(1969)通过对Pine Point矿床的闪锌矿和方铅矿的硫同位素研究发现,其与附近泥盆系蒸发岩中硬石膏的硫同位素组成非常相似,认为这套蒸发岩中硫酸盐的还原为成矿作用提供了还原硫。Beales(1975)认为,膏盐层为MVT矿床的形成提供了还原硫,蒸发岩中的硫酸盐在热化学还原作用时可以转化为 H_2S ,当含矿流体与其相遇便沉淀成矿。Powell等(1984)认为,蒸发岩的硫酸盐与 H_2S 反应而发生非生物还原作用,从而产生自然硫,后者与含硫沥青反应,产生了蚀变沥青和额外的 H_2S ,从而导致硫化物矿石的沉淀。Sverjensky等(1986)和Leach等(1993)认为,MVT矿床的硫主要来源于海相蒸发岩,如膏盐层。Chetty等(2000)认为,含矿岩系中的石盐和石膏层为MVT矿床的形成提供了矿化剂。王奖臻等(2002)认为,MVT矿床必需的高盐度卤水都与膏盐层的形成和存在有关,它由蒸发浓缩的海水演化而成,或者由大气降水淋滤蒸发岩中的盐类离子而形成。韩润生等(2006)认为,云南会泽铅锌矿床的部分硫来自于蒸发岩。祝新友等(2010)认为,新疆乌拉根铅锌矿床的原岩石膏全部或部分被成矿热液溶解,卤水中的金属物质与来自膏盐层溶解并经生物还原提供的低价态硫的混合导致硫化物的沉淀。另外,Leach等(2005)认为,MVT矿床的成矿流体与近地面海水蒸发得到的现代卤水的组分基本一致,卤水主要为海水蒸发形成。从区域上看,强氧化干燥环境下形成的红色盆地群,可能为高盐度浓缩的盆地卤水的形成提供了前提条件,而其中的膏盐层可能为矿床提供了重要的硫源。

2.3 生烃层或有机质

生烃层是MVT铅锌矿床重要的含矿建造之

一。MVT矿床大多分布于生烃盆地的周边,其岩性组合中或矿床附近常发育有烃源岩。在秘鲁北部的Bongara矿带,上三叠统一下侏罗统Pucará群的Aramachay组为含沥青质的泥灰岩和页岩建造(Basuki et al., 2008)。在新疆塔木-卡兰古成矿带,下石炭统和中、下侏罗统是喀什凹陷目前发现的最为重要的烃源岩,该区最有利的储层为下白垩统克孜勒苏群粗碎屑岩(赵孟军等,2005)。在中国南方,下石炭统测水组和上二叠统龙潭组是最重要的含煤地层。凡口铅锌矿东南的麻塘煤矿属上二叠统龙潭组煤系(广东省地质局,1982)。云南会泽铅锌矿的周边也分布有上二叠统龙潭组的煤矿(云南省地质局,1982)。另外,美国Viburnum成矿带、加拿大Pine Point矿床、秘鲁San Vicente地区、四川赤普铅锌矿床、湖南花垣铅锌矿床的周边均发育有生烃层,而且这些矿床中均发育有含沥青或有机质的包裹体。

早在20世纪30年代,人们就认识到MVT矿床与生烃层和有机质有密切联系(李发源等,2002)。Anderson(1979;1991)详细讨论了有机质参与成矿的5种可能方式。Sverjensky(1984)经过研究发现,北美MVT成矿流体与油田卤水有亲缘关系,但同时也指出,成矿流体中有机质作为配合剂携带金属的量微乎其微,可以忽略。周朝宪等(1997)认为,许多MVT矿床中有机质成熟度过低,基本不能与金属形成可溶络合物,也不能满足还原硫酸盐形成大量还原态硫的需要。刘文均等(2000)认为,湖南花垣铅锌矿床的成矿过程中,有大量有机质存在并参与成矿作用,这些不同来源的有机质参与成矿的主要方式包括轻烷烃的硫酸盐热化学还原反应和热降解作用,它们共同为硫化物矿石的沉淀提供了丰富的 H_2S 来源。李发源等(2002)认为,有机质及其演化产物在层控铅锌矿床形成过程中起了积极的作用,主要表现在对成矿元素沉淀过程的控制作用,如还原、吸附及水溶有机质成分,以及石油液体对金属元素的迁移和富集作用,如甲烷在矿床形成晚期充当还原剂。张长青等(2009)认为,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发育沥青或者有机包裹体。因此,有机质成矿机制可能并非适用于所有的MVT矿床。

3 区域性盆地卤水活动与MVT铅锌矿床的关系

由于MVT矿床流体包裹体的化学组分和同位

素组成与油田卤水的相似性,故导致 MVT 铅锌矿床盆地卤水起源的概念被广为接受(吕志成等, 2004)。随着对 MVT 矿床成因的深入研究,人们也逐渐意识到大规模热卤水定向运移的重要性(Cathles et al., 1983; Sverjensky, 1984, 1986; Viets et al., 1990; Bethke et al., 1990; Garven et al., 1993)。区域盆地卤水运移的驱动机制也得到了更加深入的研究,目前主要存在 3 种流体运移模式(Adams, 2001; Hannigan, 2005),即地形或重力驱动模式、沉积和压实作用模式、热-盐对流循环模式。前人已对流体运移模式做了大量的总结(刘英超等, 2008; 张长青等, 2009),本文不再赘述。

MVT 铅锌矿床的金属来源于沉积盆地或者卤水对通过含水层的淋滤的认识,已经被普遍接受。但是,只有当流体达到一定的盐度才能有效地从围岩中淋滤出成矿物质,因此,成矿流体的形成至少经历了卤水的形成和成矿金属的获得两个阶段(王奖臻等, 2002)。绝大多数的 MVT 矿床(区)均发育有大面积的热液蚀变,即白云石化。MVT 矿集区大量发育穿插此类白云石化的脉状矿石,说明这类白云石化明显早于成矿期,所以早期形成的卤水可能导致了区域白云石化。Lyle(1977)认为,白云石化大量切穿容矿围岩,白云石化是成岩后的产物。另外,白云岩中大量存在的灰岩角砾也在一定方面说明了其为成岩后的产物。Leach 等(2005)详细对比了世界上主要 MVT 铅锌矿床的闪锌矿流体包裹体组分后,认为盆地卤水主要为海水蒸发形成。海水富含的大量镁质,可能为区域白云石化提供了镁源。虽然关于白云岩的成因,目前还存在较大的争议。但是考虑到大规模的热液蚀变往往是大规模热液活动的结果,本文暂将区域白云石化归为区域性盆地卤水活动产物的范畴。MVT 矿床在空间分布上,与区域白云石化常存在一定的耦合关系,其常发育于区域白云石化的前锋地带。另外,区域性盆地卤水活动可能形成与 MVT 铅锌矿床相伴生的其他矿床,这些矿床常与 MVT 矿床存在一定的成因关系。

3.1 区域白云石化与 MVT 铅锌矿床的空间分布关系

在所有 MVT 矿床分布区,均存在大范围而广泛的白云石化现象。有关区域白云石化与 MVT 矿床的空间分布关系,前人已经进行了大量的研究和总结。Lea 等(1968)认为,美国 Balmat-Edwards 锌

矿赋存于元古代碳酸盐岩区域白云石化的边界。Brown(1968)认为,美国 Austinville-Ivanhoe 锌矿与寒武纪 Shady 白云岩组的区域白云石化的边界有关。McConnel 等(1968)和 Fyles(1970)认为,北美 Kootenay arc 铅锌矿带与寒武系碳酸盐岩区域白云石化的前锋地带有关。Fulweiler 等(1971)和 McCormick 等(1971)对美国 East Tennessee 地区的矿化与白云石化的关系进行了阐述。Davis(1977)认为,美国 Viburnum 地区的矿化主要发生在 Bonnetterre 组白云石化的边界。DeVot(1983)和 Horton 等(1990)认为,美国 Leadville-Gilman 铅锌矿带在空间上与 Mississippian 系碳酸盐岩区域白云石化有关,其矿化主要发生在 Leadwood 组区域白云石化的边界。Hitzman 等(1995, 1998)认为,爱尔兰 Lisheen 和 Galmoy 铅锌矿床与 Waulsortian 灰岩区域白云石化的边界存在着空间耦合的关系。Powell 等(2006)认为,加拿大 Monarch 和 Kicking Horse 矿床赋存于中寒武世 Cathedral 组的区域白云石化的前锋地带。Rhodes 等(1984)和 Hannigan(2007)认为,加拿大 Pine Point 铅锌矿在空间分布上与泥盆系 Presqu'île 礁区域白云石化的前锋地带有关。Harper 等(2007)利用大量的钻孔数据和专题地图,提出白云石化前锋(Dolomite Front)的概念,北美地区的 Viburnum Trend、Old Lead 等铅锌矿田分布于 Bonnetterre 组白云岩向北部逐渐消失变为灰岩的地区(图 2),与此相似的还包括 Knox 群含矿层($E_3 \sim O_1$),其大规模的白云石化在南部和西部的前锋地带分布着 Middle Tennessee、East Tennessee、Timberville Zinc、Sinking Valley、Freidensville Zinc 等大型铅锌矿床和矿田(图 3)。

MVT 矿床起源于北美的 Missouri 地区。中国的 MVT 矿床虽然与北美 Missouri 地区的 MVT 矿床存在一定的差异性,颇具争议。但是,中国所谓的 MVT 矿床在大地构造位置、赋矿地层层序、矿体形态、矿石组构等方面都与世界上的 MVT 矿床较为相似,故并不妨碍对其尝试性的探索。虽然 MVT 矿床与区域白云石化的空间分布关系在国外已有大量的报道,但在国内研究中从未得到人们的足够重视。笔者曾在华南、新疆等地区做过大量的工作,从中国 MVT 矿床的分布来看,区域白云石化与 MVT 矿床也存在着相似的空间分布关系。首先,在中国 MVT 矿床的分布区,均存在大范围的区域白云石化现象,如新疆塔木-卡兰古地区的下石炭统克里塔克

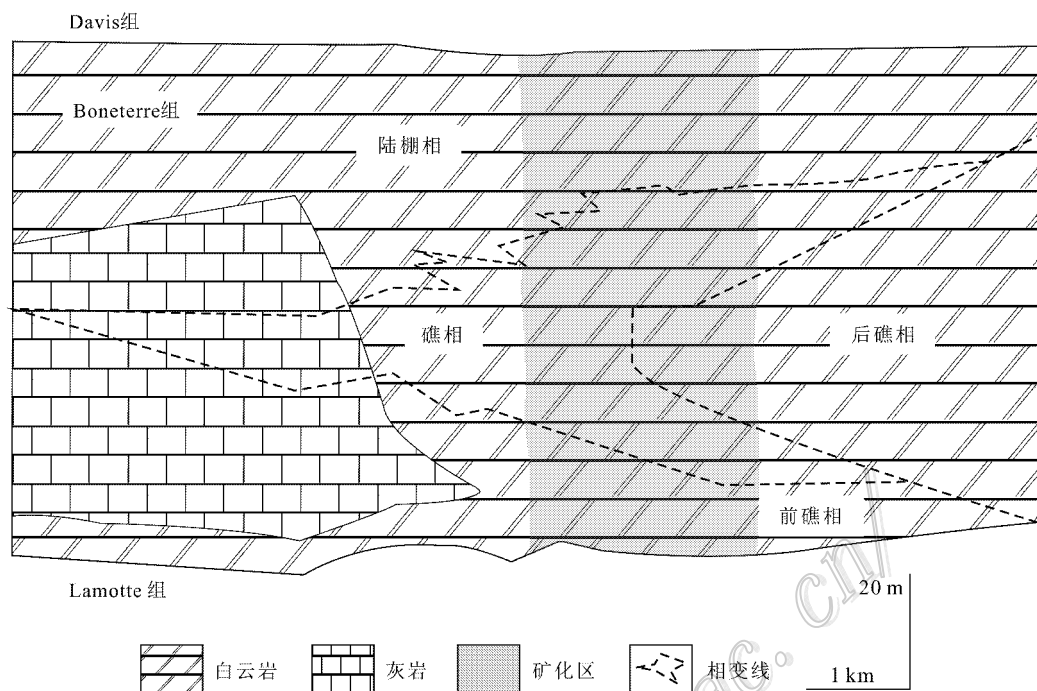


图 2 美国 Viburnum 地区东北-西南剖面图 (Lyle, 1977; Sverjensky, 1981; Harper et al., 2007)

Fig. 2 Cross section from southwest to northeast across the Viburnum Trend, U. S. A.

组,川滇黔地区的石炭系黄龙组、摆佐组等,南岭地区的泥盆系东岗岭组、天子岭组,桂中北地区的东岗岭组、融县组,湘中地区泥盆系的棋梓桥组等。而广东凡口铅锌矿、湖南后江桥铅锌矿、广西泗顶铅锌矿、广西北山铅锌矿等正好位于华南中上泥盆统大范围白云石化的南部边缘地带,新疆塔木-卡兰古矿带处于下石炭统白云石化的西南缘。

综上所述,区域白云石化与 MVT 铅锌矿床的空间分布存在着必然的耦合关系。MVT 矿床往往赋存于区域白云石化与未蚀变灰岩的过渡部位,即区域白云石化的前锋地带。区域白云石化可能与含矿溶液区域性的迁移活动有关,含矿溶液沿着相对透水的碎屑岩迁移,其迁移距离可达上百公里,造成岩石的某些成分发生规律性的变化,如岩石 Br/Cl 比值随远离矿床而降低 (Gregg, 1985)。这种区域性流动的流体与上部的碳酸盐岩发生较广泛的化学反应,即白云石化,因体积减小导致角砾岩化,从而在碳酸盐岩底部形成厚度不等的白云石化岩层,并普遍具有角砾状构造。这种早期卤水形成的区域白云石化,可能阻隔了后续卤水与上部灰岩的接触,保证了卤水成分的稳定和长远的运移。虽然关于区域白云石化与 MVT 矿床成因联系的基础理论研究较

少,但是大量的地质事实充分说明了区域白云石化与 MVT 矿床在空间分布上的必然联系 (Lyle, 1977; Sverjensky, 1981; Harper et al., 2007)。总之,区域性盆地卤水活动可能导致了区域白云石化,而区域白云石化的前锋地带则为 MVT 矿床金属物质的沉淀和富集提供了必要的前提条件。

3.2 与 MVT 铅锌矿床常伴生的其他类型矿床

在 MVT 矿集区及其附近常伴生其他类型的矿床,如硫铁矿、砂岩型铜矿、砂岩型铅锌矿、砂岩型铀矿等。这些矿床成因上与盆地卤水活动密切相关,且在大地构造背景、含矿建造、矿体形态等方面,都与 MVT 铅锌矿床具有一定的相似性。MVT 矿床盆地卤水起源的概念,来源于其流体包裹体的化学组分和同位素组成与油田卤水的相似性。油田卤水往往出现 Au 、 Ag 、 As 、 Sb 、 Hg 、 Cu 、 Pb 、 Zn 、 Ni 、 V 、 Fe 等成矿元素的高度浓集 (Carpenter et al., 1974; Sverjensky, 1984; 涂光炽, 1994)。一些低温热液金属矿床的形成常与油田卤水表现出密切的内在联系,而 MVT 矿床常与这些低温热液矿床伴生。特别是 Au 、 As 、 Hg 、 Sb 、 Tl 矿床,常与大量油气热演化的残余沥青质和烃类有机质共生或伴生,热液矿物流体包裹体中常含丰富的气态烃类、液相有机质

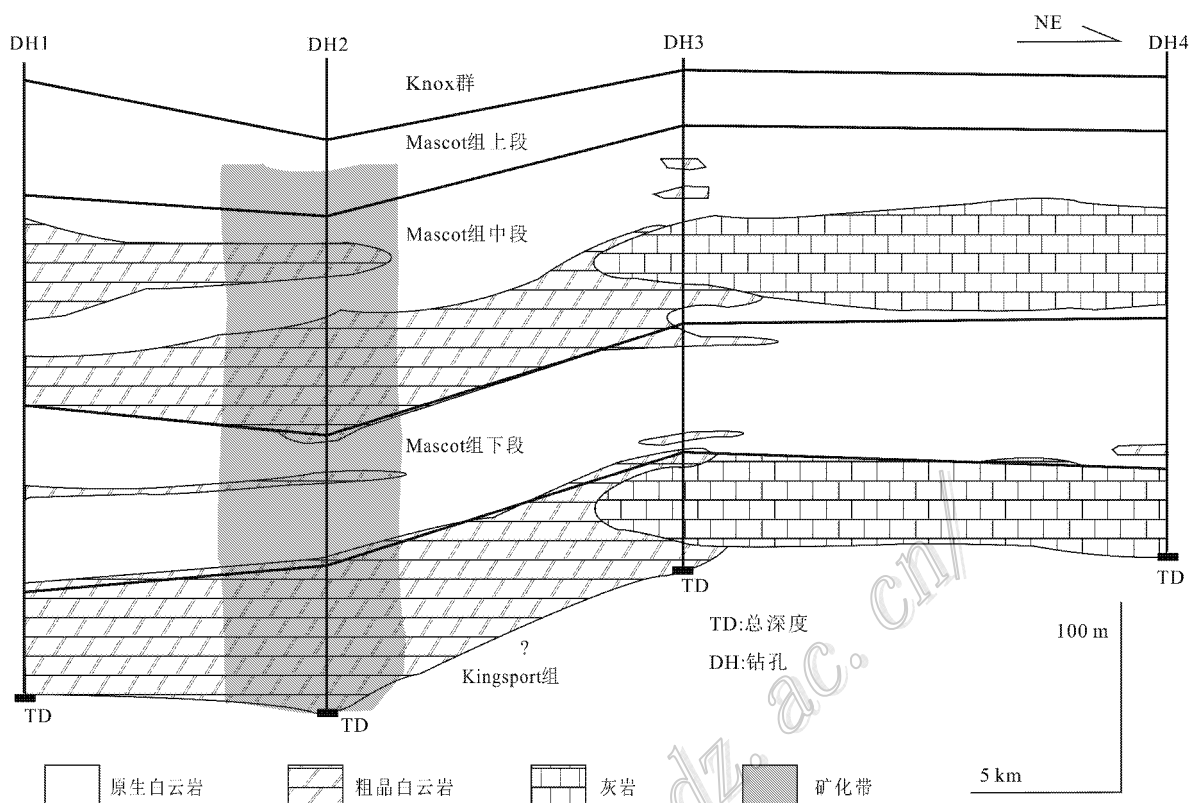


图 3 美国 Tennessee 成矿带 Burkesville 锌矿剖面图(Harper et al. 2007)

Fig. 3 Cross sections through the Burkesville zinc deposit in the Middle Tennessee zinc district, U. S. A.
(after Harper et al. 2007)

和固态沥青,都与油气表现出同源、同运、同聚的耦合关系(顾雪祥等 2010)。因此,这些低温热液金属矿床与油气成藏经历了相似的形成与演化过程,都是盆地流体活动的产物。

砂岩型铀矿床与盆地卤水及油气的密切关系,逐渐受到人们的重视(张景廉等,2006;刘池洋,2008)。世界已探明的砂岩型铀矿床逾 82% 与已生产的油气田或煤田同盆共存。铀主成矿期的区域动力学环境演化与所在盆地油气的成藏定位时期基本一致,表明其间有着密切的内在联系和统一的地球动力学背景(刘池洋 2008)。另外,铀矿石与石油中的微量元素(特别是 Re、Ni、V 等)的共生关系,以及含矿砂体中油气包裹体和甲烷气体包裹体的大量出现(张景廉等,2006)均表明砂岩型铀矿与盆地卤水的密切关系。同时,MVT 铅锌矿床中常伴生有铀矿,如广东凡口铅锌矿(凡口铅锌矿,1971)、广西泗顶铅锌矿(尹汉辉等,1980)、新疆塔木-卡兰古成矿带(祝新友等 2008),而铀矿中也常伴生不同程度的铅锌矿化(闵茂中,1997)。所以不难想象,MVT 铅

锌矿与铀矿存在着一定的成因联系。

MVT 矿床主要成矿元素为铅锌,部分矿床出现铜,甚至出现独立铜矿床。有关铅锌矿与铜矿间的关系,甚至这些铜矿的确切类型,目前还不十分清楚,如塔木-卡兰古矿带出现阿帕列克小型铜矿、乌拉根-江结尔矿带出现萨热克中型铜矿等(祝新友等,1997)。根据 Sverjensky(1981)的观点,当直接围岩为碳酸盐岩时,成矿元素以锌为主,多为以锌为主的铅锌矿,在 Appalachia 矿带,甚至出现一些不含铅的锌矿床(Kesler et al., 1994);当围岩为灰白色砂岩或砂砾岩时,成矿元素以铅为主,而当围岩为紫色砂砾岩时,成矿元素以铜为主。在乌拉根-江结尔矿带,由于上盘碳酸盐岩厚度很薄,大规模的铅锌矿化赋存于下部的砂砾岩中(祝新友等,1997)。部分学者认为,砂砾岩型铜矿、砂岩型铅锌矿等与盆地卤水活动关系密切,如云南中部的砂岩铜矿(陈根文等,2002)、新疆乌拉根砂岩铅锌矿(祝新友等,2010)、新疆萨热克砂岩铜矿(祝新友等,2011)等。

另外,大多数 MVT 铅锌矿带或矿化区,在成矿

前常出现一期黄铁矿化,呈不规则脉状分布于碳酸盐岩底部,这种块状黄铁矿常呈草莓状、胶状结构。在曲仁盆地周边地区的古生代沉积层中,除发育有广东凡口铅锌矿外,还发育有大量的硫铁矿,如红岩硫铁矿、马口硫铁矿、犁树下硫铁矿等(曾允孚等,1987)。在广西泗顶—古丹铅锌矿田,除分布有中型铅锌矿床 2 处外,还发育铅锌矿、黄铁铅锌矿、黄铁矿(褐铁矿)等矿点约 20 多处(杨楚雄等,1985)。另外,美国 Missouri 地区(Sverjensky,1981)、新疆塔木-卡兰古矿带(祝新友等,1997;1998)、云南会泽铅锌矿等,也存在铅锌矿成矿前的大规模硫铁矿。这些矿床在含矿建造、矿体形态等方面,都与 MVT 铅锌矿床具有一定的相似性,可能均为大规模盆地卤水活动的产物。

4 关于 MVT 铅锌矿床成因的探讨

关于 MVT 矿床的“流体的运移模式”和“金属的沉淀机制”,前人已经做了大量的论述和总结(刘英超等,2008;张长青等,2009),本文不再赘述。本文主要围绕“含矿建造”和“盆地卤水活动”,对 MVT 矿床的成因机制进行论述和探讨。

世界上大部分的 MVT 矿床都与特殊的含矿建造密切相关,如特定的含矿岩性组合、红层盆地或膏盐层、生烃层或有机质等,且大型 MVT 矿床含矿岩性组合的底部常见不整合面。从区域上看,强氧化干燥环境下形成的红色盆地群,可能为高盐度浓缩的盆地卤水的形成提供了前提条件。卤水在下渗过程中可能与上部的地层发生反应,如膏盐层,从中获得 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等离子。随着卤水下降深度增大,离子浓度将大大增加,特别是 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 增加更快,这有利于高盐度卤水的形成。区域白云石化显示卤水巨量的 Mg^{2+} 来源,可能与红层干旱盆地中的浓缩卤水有密切的关系。

区域盆地卤水可能沿碳酸盐岩下部的砂砾岩进行了长距离的运移,并在碳酸盐岩底部形成大规模、广泛的白云石化,同时导致含矿建造底部紫红色碎屑砂岩的褪色蚀变。由于白云石交代方解石过程中体积缩小,出现孔隙并发生广泛的角砾岩化,这有利于含矿卤水及油气的运移与贮存(叶德胜,1989;赵雪凤等,2007;张学丰等,2010)。另外,成矿卤水长距离的迁移可能淋滤出地层中以及深部的成矿物质,使成矿物质来源更加复杂。同时,紫红色砂岩较

高的氧逸度,可能保证了成矿卤水对金属物质的长距离迁移。MVT 矿床的含矿层位上部为相对不透水的泥页岩,可能更有利于形成岩性盖层,防止了成矿热液的散失,为矿体的就位提供了前提条件。有些 MVT 矿集区的矿化层位较多,矿体的穿时性现象明显,这可能受多组岩性组合以及区域断裂构造的影响,如川滇黔地区、新疆塔木-卡兰古地区等。有机质及微生物对硫酸盐的还原形成了 H_2S 、 HS^- 等,则为金属物质沉淀富集提供了重要前提。封存于盆地中的富含 SO_4^{2-} 卤水和红层盆地中富含的膏盐层则提供了成矿所需要的硫源。另外,地壳(包括基底、风化层、盆地砂岩和碳酸盐岩含水层等各种组分)则提供了必要的金属来源(Leach et al., 2005)。

早期盆地卤水形成的区域白云石化,可能阻隔了后续卤水与上部灰岩的接触,保证了卤水成分的稳定和长远的运移。最终,在区域白云石化逐渐消失变为灰岩的前锋地带,形成了 MVT 铅锌矿。区域盆地卤水活动控制了 MVT 铅锌矿在空间上的总体分布。而局部不同的成矿地质背景导致了 MVT 铅锌矿及其伴生矿床的产出与发育。碳酸盐岩及其上部的不整合面附近、沉积岩相变带、断层两侧的裂隙与层面构造、多组断裂的交汇部位、古岩溶等,最终为金属物质的沉淀和富集提供了场所。这些矿体在空间上往往是彼此连接贯通的。

总之,特定的含矿建造控制了区域性盆地卤水活动,区域性盆地卤水活动导致了区域白云石化和 MVT 矿床成群成带的出现,区域白云石化的前锋地带则为 MVT 矿床的形成提供了必要的前提条件。最终,区域性盆地卤水经大范围长期的运移和对地层中金属元素的淬取,在不同的成矿地质背景下,形成了 MVT 铅锌矿床及其伴生矿床。

5 结 论

综上所述,含矿建造和区域性盆地卤水活动对 MVT 矿床的形成、演化、区域分布规律,提供了重要的地质和地球化学限制因素。在今后 MVT 矿床及其伴生矿床的找矿勘探实践中,以下几点应予考虑,可能提供重要的帮助:

- (1) 特定的岩性组合,主要是砂砾岩(特别是碎屑岩的褪色蚀变)、碳酸盐岩、泥页岩组合;
- (2) 特定的岩性组合底部的不整合面;
- (3) 区域上红层盆地的广泛发育;

(4) 生烃层,如煤层、生气(油)层等,特别是生烃盆地的边缘;

(5) 区域白云石化的前锋地带。

从 20 世纪 30~40 年代的“远温(Telethermal)矿床”到近代的“盆地卤水侧向运移成矿论”,MVT 铅锌矿床的成矿模式演化了近一个世纪。尽管已经进行了大量的基础地质研究工作,获得了大量的测试数据,但是关于 MVT 矿床的一些基础性的问题仍未解决,如成矿金属来源、硫的来源、沉淀机制等。MVT 矿床至今还未能建立像斑岩型矿床、块状硫化物矿床等那样统一适用的成矿模式(Leach et al., 2005)。造成的原因可能是,成矿物质经过了远距离的运移,成分比较复杂,成矿过程相当的漫长,且一般缺少适用于同位素测年的矿物,成矿时代不能得到准确的厘定。

特殊的含矿建造和区域白云石化前锋成矿不能彻底解决上述的所有问题。MVT 矿床更倾向发育于白云岩中的原因、区域白云石化与成矿卤水的时间关系、MVT 矿床与区域白云石化空间上存在耦合关系的原因、MVT 矿床与其伴生矿床的成矿流体的差异性和成因关系、成矿流体的运移机制和沉积机制、有机质参与成矿的方式、成矿年龄的获得等等,这些都是在今后需要继续关注和探索的问题。

志 谢 感谢中国地质调查局发展研究中心叶天竺教授、严光生教授、吕志成研究员、赵财胜副研究员、张志博士、中国地质科学院矿产资源研究所的张长青博士、中国地质大学(北京)姚晓峰博士、贾德龙博士、何鹏硕士等在论文撰写期间给予的指导和帮助,使作者受益匪浅,在此一并表示真挚的谢意!

参考文献/References

- 陈根文,夏斌,钟志洪,王国强. 2002. 滇中地区砂岩铜矿矿物分带特征及其成因意义[J]. 地质地球化学, 30(1): 41-45.
- 戴自希,盛继福,白冶,等. 2005. 世界铅锌资源的分布与潜力[M]. 北京:地震出版社. 73-86.
- 凡口铅锌矿. 1971. 凡口矿区铀矿地质调查小结[R]. 内部资料.
- 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. 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.
- 广东省地质局. 1982. 中华人民共和国 1:20 万区域地质调查报告(韶关幅)[R]. 内部资料.
- 广西壮族自治区地质局. 1967. 中华人民共和国 1:20 万区域地质调

- 查报告(融安幅)[R]. 内部资料.
- 郭文魁,张玉华. 1960. 1:300 万中国铅锌矿成矿规律略图简要说明[J]. 地质论评, 20(1): 17-21.
- 韩润生,陈进,黄智龙,马德云,薛传东,李元,等. 2006. 构造成矿动力学及隐伏矿定位预测——以云南会泽超大型铅锌(银、锗)矿床为例[M]. 北京:科学出版社. 16-73.
- 韩英,王京彬,祝新友,郭宁宁,李顺庭,王艳丽. 2011. 广东凡口铅锌矿碳、氧同位素地球化学特征及其地质意义[J]. 地质与勘探, 47(4): 642-648.
- 蒋映德,邱华宁,肖慧娟. 2006. 闪锌矿流体包裹体⁴⁰Ar-³⁹Ar法定年探讨:以广东凡口铅锌矿为例[J]. 岩石学报, 22(10): 2425-2430.
- 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.
- 李文博,黄智龙,王银喜,陈进,韩润生,许成,管涛,尹牡丹. 2004. 会泽超大型铅锌矿田方解石 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 2(2): 89-196.
- 李文博,黄智龙,张冠. 2006. 云南会泽铅锌矿田成矿物质来源: Pb、S、C、H、O、Sr 同位素制约[J]. 岩石学报, 22(10): 2567-2580.
- 廖文. 1984. 滇东滇西 Pb-Zn 金属区 S、Pb 同位素组成特征与成矿模式探讨[J]. 地质与勘探, 1(1): 1-6.
- 刘池洋. 2008. 沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统[J]. 地球科学与环境学报, 1(30): 1-23.
- 刘家铎. 1982. 湖南道县后江桥层控铅锌菱铁矿床成因的研究[J]. 成都地质学院学报, 4(4): 33-44.
- 刘文均,郑荣才,郑元林,高玲. 1999. 花垣铅锌矿床中沥青的初步研究——MVT 铅锌矿床有机地化研究(I)[J]. 沉积学报, 17(1): 19-23.
- 刘文均,郑荣才. 2000. 硫酸盐热化学还原反应与花垣铅锌矿床[J]. 中国科学(D 辑), 30(5): 456-464.
- 刘英超,侯增谦,杨竹森,田世洪,宋玉财,杨志明,王召林,李政. 2008. 密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床:认识与进展[J]. 矿床地质, 27(2): 253-263.
- 卢焕章,范宏瑞,倪培,等. 2004. 流体包裹体[M]. 科学出版社. 331-335.
- 吕志成,等. 2004. 国内外铅锌矿床成矿理论与找矿方法[R]. 内部资料.
- 闵茂中. 1997. 华南古岩溶砾岩中铀矿床与密西西比河谷型铅锌矿床特征对比研究[J]. 中国岩溶, 16(2): 154-160.
- 芮宗瑶,叶锦华,张立生,王龙生,梅燕雄. 2004. 扬子克拉通周边及其隆起边缘的铅锌矿床[J]. 中国地质, 31(4): 337-346.
- 石焕琪,王香成. 1988. 层、相、位对广西北山银、锌、镉、黄铁矿床的控制作用探讨[J]. 岩相古地理, 3(37): 9-14.
- 覃焕然. 1986. 试论广西泗顶-古丹层控型铅锌矿床成矿富集特征[J]. 广西地质, 2(2): 51-62.
- 涂光炽,等. 1984. 中国层控矿床地球化学(第一卷)[M]. 北京:科学出版社. 1-70.
- 涂光炽. 1994. 成煤、成油、成气、成岩和金属之间的内在联系[J]. 有色金属矿产与勘探, 3(1): 1-3.
- 王奖臻,李朝阳,李泽琴,李葆华,刘文周. 2002. 川滇黔交界地区密西西比河谷型铅锌矿床与美国同类矿床的对比[J]. 矿物岩石地

- 球化学通报 21(2):128-132.
- 谢世业, 黄有德, 张国林, 何国朝. 2001. 广西泗顶-古丹铅锌矿田地质特征成矿规律及找矿标志[J]. 地质找矿论丛, 16(1):38-41.
- 薛春纪, 祁思敬, 魏合明, 等. 2007. 基础矿床学[M]. 北京: 地质出版社. 150-161.
- 杨楚雄, 扶同逸, 覃焕然. 1985. 广西泗顶-古丹铅锌矿田中-上泥盆统碳酸盐相的特征与成矿关系的探讨[J]. 沉积学报, 3(2):98-108.
- 杨开济. 1982. 后江桥生物礁与矿床成因[J]. 地质与勘探(7):15-24.
- 叶德胜. 1989. 白云石及白云石化作用研究的新进展[J]. 岩相古地理(2):34-43.
- 尹汉辉, 李锡林, 喻茨玫, 张国新. 1980. 南方两类铅锌矿床的若干特征[J]. 地质与勘探(8):1-6.
- 云南省地质局. 1982. 中华人民共和国1:20万区域地质调查报告(曲靖县幅)[R]. 内部资料.
- 曾允孚, 沈德麒, 张锦泉, 池三川, 葛朝华, 刘文均, 徐新煌, 等. 1987. 南岭泥盆系层控矿床[M]. 北京: 地质出版社. 175-179.
- 张长青. 2008. 中国川滇黔交界地区密西西比型(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. 12-58.
- 张长青, 余金杰, 毛景文, 芮宗瑶. 2009. 密西西比型(MVT)铅锌矿床研究进展[J]. 矿床地质, 28(2):195-210.
- 张景廉, 卫平生, 张虎权, 陈启林. 2006. 再论石油与砂岩型铀矿床的相互关系——四论油气与金属(非金属)矿床的相互关系[J]. 新疆石油地质, 27(4):493-497.
- 张位及. 1984. 试论滇东北Pb-Zn矿床的沉积成因和成矿规律[J]. 地质与勘探(7):11-16.
- 张学丰, 刘波, 蔡忠贤, 胡文瑄. 2010. 白云岩化作用与碳酸盐岩储层物性[J]. 地质科技情报, 29(3):79-85.
- 赵孟军, 王招明, 宋岩, 张水昌, 肖中尧, 王清华, 秦胜飞. 2005. 塔里木盆地喀什凹陷油气来源及其成藏过程[J]. 石油勘探与开发, 32(2):40-54.
- 赵雪凤, 朱光有, 刘钦甫, 张水昌. 2007. 深部海相碳酸盐岩储层孔隙发育的主控因素研究[J]. 天然气地球科学, 18(4):514-521.
- 周朝宪, 魏春生, 叶造军. 1997. 密西西比河谷型铅锌矿床[J]. 地质地球化学(1):65-75.
- 祝新友, 汪东波, 王书来. 1997. 新疆塔木-卡兰古MVT铅锌矿带地质特征[J]. 有色金属矿产与勘查, 4(4):202-207.
- 祝新友, 汪东波, 王书来. 1998. 新疆阿克陶县塔木-卡兰古铅锌矿带矿床地质和硫同位素特征[J]. 矿床地质, 17(3):204-214.
- 祝新友, 王京彬, 等. 2008. 新疆塔里木盆地西南缘大型贱金属矿床成矿规律研究与找矿预测[R]. 内部资料.
- 祝新友, 王京彬, 刘增仁, 方同辉. 2010. 新疆乌拉根铅锌矿床地质特征与成因[J]. 地质学报, 84(5):694-702.
- 祝新友, 王京彬, 王玉杰, 刘增仁, 方同辉, 王艳莉. 2011. 新疆萨热克铜矿——与盆地卤水作用有关的大型矿床[J]. 矿产勘查, 2(1):28-35.
- 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.
- Anderson G M. 1979. Mississippi Valley Type ore deposit[R]. Ore Deposit Workshop. 1-13.
- 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(5):909-926.
- Basuki N I, Taylor B E and Spooner E T C. 2008. Sulfur isotope evidence for thermochemical reduction of dissolved sulfate in Mississippi Valley-Type zinc-lead mineralization, Bongara Area, Northern Peru[J]. Econ. Geol., 103:783-799.
- Beales F W. 1975. Precipitation mechanisms for Mississippi Valley-Type ore deposit[J]. Econ. Geol., 70:943-948.
- Bethke C M. 1986. Hydrologic constraints on the genesis of the upper Mississippi Valley mineral district from Illinois basin brines[J]. Econ. Geol., 81:233-249.
- Bethke C M and Marshak S. 1990. Brine migrations across North America—the plate tectonics of grand water[J]. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 18:287-315.
- Bradley D C and Leach D L. 2003. Tectonic controls of Mississippi Valley-type lead-zinc mineralization in orogenic foreland[J]. Mineralium Deposita, 38:652-667.
- Brammon J C, Podosek F A and McLimans R K. 1992. A Permian Rb-Sr age for sphalerite from the Upper Mississippi Valley zinc-lead district, southwest Wisconsin[J]. Nature, 356:509-511.
- Brown W H. 1968. Geology of the Austinville-Ivanhoe district, Virginia[A]. In: Graton-Sales ore deposits of the U.S. 1933-1937[C]. NY, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. 169-186.
- Carpenter A B, Trout M L and Pickett E E. 1974. Preliminary report on the origin and chemical evolution of lead-and zinc-rich oil field brines in Central Mississippi[J]. Econ. Geol., 69:1191-1206.
- 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., 78:983-1002.
- Chetty D and Frimmel H E. 2000. The role of evaporates in the genesis of base metal sulphide mineralisation in the North Platform of the Pan-African Damara Belt, Namibia: Geochemical and fluid inclusion evidence from carbonate wall rock alteration[J]. Mineralium Deposita, 35:364-376.
- Davis J H. 1977. Genesis of the SE Missouri lead deposits[J]. Econ. Geol., 72:443-450.
- DeVoto R H. 1983. Central Colorado karst-controlled lead-zinc-silver deposits(Leadville, Gilman, Aspen, and others), A late Paleozoic MVT district[A]. In: International conference on MVT lead-zinc deposits[C]. Proceedings Volume, University of Missouri-Rolla, Missouri. 459-485.
- Fulweiler R E and McDougal S E. 1971. Bedded-ore structures, Jefferson city mine, Jefferson City, Tennessee[J]. Econ. Geol., 66:

763-769.

- Fyles J T. 1970. Geologic setting of the lead-zinc deposits in the Kootenay Lake and Salmo areas of British Columbia, in lead-zinc deposits, in Weissenborn, A. E., Armstrong, F. C. J. Washington Division of Mines and Geology Bulletin, 61 : 41-53.
- Garven G, Person M A and Sverjensky D A. 1993. Genesis of Stratabound ore deposits in the mid-continent basins of north America: The role of regional groundwater flow [J]. American Journal of Science, 293 : 497-568.
- Garven G. 1995. Continental-scale groundwater flow and geological processes [J]. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 23 : 89-117.
- Garven G and Kaffensperger J P. 1997. Hydrogeology and geochemistry of ore genesis in sedimentary basins [A]. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits [C]. New York: Wiley. 125-189.
- Garven G, Appold M S, Toptygina V I and Hazlett T J. 1999. Hydrogeologic modeling of the genesis of carbonate-hosted lead-zinc ores [J]. Hydrogeology Journal, 7 : 108-126.
- Ge S and Garven G. 1989. Tectonically induced transient groundwater flow in the foreland basins [A]. In: Price R A, ed. Origin and evolution of sedimentary basins and their energy and mineral resources, Geophysical Monograph 48 [C]. IUGG, 3. 145-158.
- Ge S and Garven G. 1992. Hydromechanical modeling of tectonically-driven groundwater flow with application to the Arkoma basin [J]. J. Geophys. Res., 97 : 9119-9144.
- Goldhaber M B, Church S E, Doe B R, Aleinikoff J N, Brannon J C, Podosek F A, Mosier E L, Taylor C D and Gent C A. 1995. Lead and sulfur isotope investigation of the United States: Implications for paleohydrology and ore genesis of the Southeast Missouri lead belts [J]. Econ. Geol., 90 : 1875-1910.
- Gregg J M. 1985. Regional epigenetic dolomitization in the Bonnetterre Dolomite (Cambrian), southeastern Missouri [J]. Geology, 13 : 503-506.
- Hagni R D. 1995. The southeast Missouri lead district [J]. Society of Economic Geologists Guidebook Series, 22 : 44-78.
- 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.
- Hannigan P K. 2007. Metallogeny of the Pine Point Mississippi Valley-type zinc-lead district, southern Northwest Territories [J]. Geological Association of Canada Special Publication, 5 : 609-632.
- Harper D D and Borrok D M. 2007. Dolomite fronts and associated zinc-lead Mineralization [J]. Econ. Geol., 102 (7): 1345-1352.
- Hitzman M W. 1995. Mineralization in the Irish Zn-Pb (Ba-Ag) orefield [J]. Society of Economic Geologists Guidebook Series, 21 : 25-61.
- Hitzman M W, Allan J R and Beaty D W. 1998. Regional dolomitization of the Waulsortian limestone in southeastern Ireland: evidence of large-scale fluid flow driven by the Hercynian orogeny [J]. Geology, 26 : 547-550.
- Horton, Jr R A and DeVoto R H. 1990. Dolomitization and diagenesis of the Leadville Limestone (Mississippian), central Colorado [J]. Economic Geology Monograph, 7 : 86-107.
- Jackson S A. 1966. Precipitation of lead-zinc ores in carbonate reservoirs as illustrated by Pine Point ore field, Canada [J]. TMM, 75 : 278-285.
- Kesler S E and Cumming G L. 1994. Lead isotope geochemistry of Mississippi valley-type deposits of the southern Appalachians [J]. Econ. Geol., 89 : 307-321.
- Kesler S E. 1996. Appalachian Mississippi Valley-type deposits: Paleoaquifers and brine provinces [J]. Society of Economic Geologists Special Publication, 4 : 29-57.
- Kontak D J, McBride S and Farrer E. 1994. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of fluid migration in a Mississippi Valley-type deposit: Gays River Zn-Pb deposit, Nova Scotia [J]. Econ. Geol., 89 : 1501-1517.
- Lea E R and Dill D B. 1968. Zinc deposits of the Balmat-Edwards district, New York: Graton-Sales ore deposits of the U. S. [A]. In: 1933-1937 [C]. NY, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers : 20-48.
- Leach D L and Sangster D F. 1993. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits [J]. Geological Association of Canada Special Paper, 40 : 289-314.
- Leach D L, Bradley D C, Lewchuk M T, Symons D T A and Brannon J. 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, Sangster D F, Kelley K D, Large R R, Garven G, Allen C R, Gatzmer J and Wallters S. 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective [J]. Economic Geology 100th Anniversary Volume : 561-607.
- Leach D L, Bradley D C, Huston D, Pisarevsky S A, Taylor R D and Gardoll S J. 2010. Sediment-hosted lead-zinc deposits in earth history [J]. Econ. Geol., 105 : 593-625.
- LeHuray A P, Caulfield J B D, Rye D M and Dixon P R. 1987. Basement controls on sediment hosted Zn-Pb deposits: A Pb isotope study of carboniferous mineralization in central Ireland [J]. Economic Geology, 82 : 1695-1709.
- 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.
- McConnel R H and Anderson R A. 1968. The Metaline district, Washington: Graton-Sales ore deposits of the U. S. 1933-1937 [C]. NY, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. 1460-1480.
- McCormick J E, Evans L L, Palmer R A and Ransick F D. 1971. Environment of the zinc deposits of the Mascot-Jefferson city district, Tennessee [J]. Econ. Geol., 66 : 757-762.
- Nakai S, Halliday A N, Kesler S F, Halliday A N and Jones H D. 1990. Rb-Sr dating of sphalerites from Tennessee and the genesis of Mississippi Valley-type ore deposits [J]. Nature, 346 : 354-357.
- Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, Jones H D, Kyle J R and Lane T E. 1993. Rb-Sr dating of sphalerites from Mississippi Valley-type

- (MVT) ore deposits [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57 : 417-427.
- Ohle E L. 1985. Breccias in Mississippi Valley-type deposits [J]. *Economic Geology*, 80 : 1736-1752.
- Oliver J. 1986. Fluids expelled tectonically from orogenic belts : Their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena [J]. *Geology*, 14 : 99-102.
- Paradis S, Hannigan P and Dewing K. 2007. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits [J]. *Mineral Deposits of Canada*, 5 : 185-203.
- 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.
- Powell T G and MacQueen R W. 1984. Precipitation of sulfide ores and organic matter : Sulfate reactions at Pine Point, Canada [J]. *Science*, 224 : 63-66.
- Powell W G, Johnston P A, Collom C J and Johnston K J. 2006. Middle Cambrian brine seeps on the Kicking Horse rim and their relationship to talc and magnesite mineralization and associated dolomitization, British Columbia, Canada [J]. *Econ. Geol.*, 101 : 431-451.
- Rakovan J. 2006. Mississippi Valley-type deposits [J]. *Rocks & Minerals*, 81 : 69-71.
- 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.
- Sasaki A and Krouse H R. 1969. Sulfur isotopes and the Pine Point lead-zinc mineralization [J]. *Econ. Geol.*, 64 : 718-730.
- Shelton K L, Gregg J M and Johnson A W. 2009. Replacement dolomites and ore sulfides as recorders of multiple fluids and fluid sources in the southeast Missouri Mississippi Valley-Type district : halogen- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{34}\text{S}$ systematics in the Bonnetterre Dolomite [J]. *Econ. Geol.*, 104 : 733-748.
- Skall H. 1975. The paleoenvironment of the Pine Point lead-zinc district [J]. *Econ. Geol.*, 70 : 22-47.
- Spangenberg J, Fontbote L, Sharp Z D and Hunziker J. 1996. Carbon and oxygen isotope study of hydrothermal carbonates in the zinc-lead deposits of the San Vicente district, central Peru : a quantitative modeling on mixing processes and CO_2 degassing [J]. *Chemical Geology*, 133 : 289-315.
- Sverjensky D A. 1981. The origin of a Mississippi Valley-type deposit in the Viburnum Trend, southeast Missouri [J]. *Econ. Geol.*, 76 : 1848-1872.
- 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.
- Symons D T A, Smethurst M T and Ashton J H. 2002. Paleomagnetism of the Nayan Zn-Pb deposit, Ireland [J]. *Econ. Geol.*, 97 : 997-1012.
- Viets J G and Leach D L. 1990. Genetic implications of regional and temporal trends in ore fluid geochemistry of Mississippi Valley-type deposits in the Ozark region [J]. *Econ. Geol.*, 85 : 842-861.
- Zhou C X, Wei C S, Guo J Y and Li C Y. 2001. The source of metals in the Qilinchang Zn-Pb deposit, Northeastern Yunnan, China : Pb-Sr isotope constraints [J]. *Econ. Geol.*, 96 : 583-598.