

滇东北MVT铅锌矿床地质特征与S源

杨光树¹, 燕永锋¹, 温汉捷², 胡瑞忠², 张军伟¹

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明 650500;

2. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

川-滇-黔接壤地区(SYG)位于扬子地块西南缘,是我国西南大面积低温成矿域的重要组成部分(涂光炽,2002)。区域构造复杂,成矿条件优越,集中产出了400多个以碳酸盐岩为围岩的铅锌矿床(点),是我国“十一五”以来的重点找矿区带之一,现已成为我国重要的铅、锌(银、锗)资源基地。滇东北地区位于SYG中南部,构造上处于SN向小江深断裂带、NW向紫云-垭都深断裂带和NE向弥勒-师宗深断裂带所围成的三角区域内(韩润生等,2012),是SYG铅锌矿集区的重要组成部分之一。区内发育了包括会泽超大型铅锌(-银-锗)矿床在内的220多个特征类似的铅锌矿床(点),与密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床(Leach et al., 2010)具有许多相似性,可能是大规模流体活动的结果,但对于成矿流体、成矿物质的来源与演化过程认识仍存在较大争议(柳贺昌等,1999;黄智龙等,2004;张长青等,2005;Han et al., 2007;陈大,2015)。

1 矿床地质特征

滇东北地区铅锌矿床具有以下主要特征:

(1) 矿床受“构造+岩性”双重控制。区域上,矿床(点)的分布受区域性断裂及其派生构造控制,具线性分布特征;矿区内,矿体(群)主要产于褶皱和断裂的复合部位,就位于次生构造滑脱带或层间破碎带内,矿体形态受构造和岩相控制。区域上,震旦系-二叠系的蚀变白云岩和白云质化灰岩为主要赋矿围岩,其中上震旦统灯影组(Z_2dn)和下石炭统摆佐组(C_1b)白云岩集中了SYG地区当前探明铅锌金属量的80%(陈大,2015)。空间上,由南东到北西,赋矿地层具有由新变老的趋势。

(2) 矿床平均品位高,伴生可综合利用组分多。大型矿床Pb+Zn平均品位>10%,远高于其它类型和其它地区典型MVT矿床(4%~10%)。部分矿床如会泽矿床平均品位 $\geq 25\%$,局部高达50%,毛坪矿床平均品位>15%。资源分布集中,会泽、毛坪铅锌矿床部分单矿体可达大型(韩润生等,2012)。伴生富集Ag、Ge、Ga、Cd等多种可综合利用元素,规模可达大型。

(3) 矿体具有后成充填特征,与围岩关系截然。铅锌矿体多呈似层状、囊状、扁柱状、透镜状、网脉状等充填于构造破碎带和蚀变白云岩层间断裂带中,与围岩呈突变关系,界线清楚,具有典型后成充填特征。产状缓时,矿体沿走向连续性好(会泽矿山厂、巧家茂租、永善金沙厂);产状较陡时,矿体沿倾向延伸性好(会泽麒麟厂、彝良毛坪、鲁甸乐红、巧家松梁),其中会泽和毛坪铅锌矿床部分陡倾矿体垂向延伸超过1500 m,且深部找矿前景较好。

(4) 矿石矿物组合简单,多具分带性。多数矿床矿浅部为氧化矿石,以白铅矿、菱锌矿为主;中深部主矿体为原生硫化矿石,以闪锌矿、方铅矿、黄铁矿为主,多具有自-半自形粒状、交代结构,块状、浸染状和网脉状构造。脉石矿物以(铁)白云石、(铁)方解石和石英为主,部分矿床有萤石和重晶石。会泽、毛坪等矿床从矿体底板到顶板大致具有块状(深色闪锌矿为主)-浸染状(浅色闪锌矿为主)-脉状(浅色闪锌矿或散砂状黄铁矿)的分带特征。

(5) 围岩蚀变较简单,以碳酸盐化为主。多数矿床围岩蚀变类型较简单,以碳酸盐化、黄铁矿化和硅化为主,部分矿床有重晶石化、萤石化等。碳酸盐化以重结晶的粗晶蚀变(铁)白云岩化、产于矿体和围岩中的团块或脉状(铁)方解石化等为特征(如会泽、毛坪、茂租等),与成矿关系密切,发

基金项目:国家自然科学基金项目(批准号:41103026;41373050);校企合作项目(6193-20100117)

作者简介:杨光树,男,1980年生,副教授,主要从事矿床地球化学研究。E-mail: ygs0080009@163.com

育范围与断层或矿化规模关系成正相关。黄铁矿化表现为细晶黄铁矿呈砂状、浸染状产于矿体顶底板，或呈星点状、浸染状、结晶粒状等产于近矿蚀变白云岩孔洞中（如会泽 8 号矿体、毛坪 I、II、III 号矿带等）。硅化主要发育于赋存在下古生界地层的铅锌矿床中，表现为浅灰色石英细脉穿插于白云岩及锌矿物中，或以石英团块、晶洞等形式出现在矿体及边缘的围岩中，局部因硅质充填-交代形成硅化白云岩（如茂租、乐红、金沙厂、五星厂等）。硅化蚀变与下古生界地层中铅锌矿化关系较密切，且从下古生界到上古生界，赋矿围岩中的硅化蚀变逐渐减弱。

2 矿床 S 源与演化机制

从滇东北地区典型 MVT 铅锌矿床已有的 S 同位素数据(表 1)中可见，所有矿床矿石硫化物都以富重硫为特征，矿床间 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化较大，总范围为 1.1~28.6‰，极差 27.5‰，平均值为 14.6‰，众数在 11~18‰间。主要矿床 S 同位素组成与该区各含矿地层中广泛发育的石膏和重晶石 $\delta^{34}\text{S}$ 值 15~30‰ (Zhou et al., 2013)一致或略低，也在全球震旦-二叠纪海相硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 10.5~35‰ (Claypool et al., 1980) 范围内，明显高于区域内广泛分布于各矿区外围的峨眉山玄武岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值(0~3‰)，表明该区 MVT 铅锌矿床的硫主要来源于含矿地层中的海相硫酸盐。金沙厂矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值主要集中在 1~7‰之间，低于与区内多数 MVT 铅锌矿床，与岩浆热液相似；但据刘文周 (1989) 研究，该矿床 S/Se 值>20000，比典型岩浆热液型矿床低 1~3 个数量级；吴越 (2013) 研究发现成矿流体中富 SO_4^{2-} ，且其他元素和同位素组成与外围的岩浆岩（峨眉山玄武岩）差别较大，表明硫源也非内生硫，而是海水硫在较低温度还原的结果 (Machel et al., 1995)，或其还原机制较其它矿床有一定差别。此外，部分矿床（如茂租、洛泽河等）围岩中细粒沉积黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为负值，可能为生物成因（柳贺昌等，1999）。区域上不同矿床间 $\delta^{34}\text{S}$ 值的差异可能受成矿体系封闭性 (Leach et al., 2005) 和不同 S 还原机制共同制约。

表 1 滇东北地区典型 MVT 矿床 S 同位素组成

矿床名称	赋矿地层	测试对象	硫同位素组成 ($\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$)			资料来源
			范围	平均值	件数	
富乐	P ₁ q+m	Sp+Ga	7.9~14.9	11.7	20	柳贺昌等, 1999; 司荣军, 2005
会泽	C ₁ b	Sp+Ga+Py	4.2~23.5	13.8	184	柳贺昌等, 1999; 黄智龙等 2004; 韩润生等, 2006; 李文博等, 2006; 郭欣, 2011; 吴越, 2013
毛坪	D ₃ z.C ₁ b.C ₂ w	Sp+Ga+Py	8.0~24.1	17.5	42	本文测试; 柳贺昌等, 1999; 胡彬, 2004; 张长青, 2008
洛泽河	D ₃ y.D ₃ z	Sp+Ga+Py	20.1~26.5	22.7	35	廖文, 1984; 柳贺昌等, 1999
五星厂	Z ₂ dn	Sp	11.8	11.8	1	廖文, 1984
金沙厂	Z ₂ dn	Sp+Ga+Py	1.1~24.7	13.7	39	涂光炽等, 1984; 廖文, 1984; 刘文周等, 1989; 柳贺昌等, 1999; 白俊豪等, 2013
乐红	Z ₂ dn	Sp+Ga+Py	14.1~28.6	21.3	12	张自洋, 2003; 张长青, 2008; 张云新等, 2014
茂租	Z ₂ dn	Sp+Ga+Py	6.5~19.9	12.1	23	廖文, 1984; 张立生等, 1997; 柳贺昌等, 1999; 管士平等, 1999; 陈启良等, 2001; 张长青等, 2005; 刘文周, 2009; 周家喜等, 2012; Zhou et al., 2013

矿石硫化物中，共生矿物之间总体具有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ 的特征，表明成矿热液中的硫同位素分馏达到了热力学平衡 (Zhou et al., 2014)。通过 S 同位素计温方程 $\Delta^{34}\text{S} = \delta^{34}\text{S}_{\text{矿物1}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{矿物2}} = A \times 10^6 / T^2$ 计算得到闪锌矿-方铅矿平衡温度与流体包裹体测温结果基本一致，其中 A 值取 0.78 (Czamanske et al., 1974)。如据本文测试数据计算，毛坪铅锌矿床平衡温度为 159~232℃，峰值在 200℃左右，与韩润生等 (2007) 报道的矿床流体包裹体测温结果 180~218℃基本一致，区域内其它矿床如会泽铅锌矿床 (李文博等, 2007)、茂租铅锌矿床 (柳贺昌等, 1999; 周家喜等, 2012) 等的 S 同位素地球化学研究也得到类似结果。对比 S 同位素温度计和矿物流体包裹体研究结果，该地区 MVT 铅锌矿床成矿温度主要集中在 170~230℃间，与典型 MVT 矿床一致。

大量研究表明，SYG 地区 MVT 铅锌矿床的主成矿温度>150℃，超过了细菌还原作用 (BSR) 的

主要温度范围(李文博等, 2006), 矿石中硫还原富集机制以海相硫酸盐的热化学还原作用(TSR)为主(管士平等, 1999; 陈启良等, 2001; 司荣军, 2005; 李文博等, 2006; Han et al., 2007; 张长青, 2008; 刘文周, 2009; 周家喜等, 2012; 白俊豪等, 2013; 吴越, 2013; 张云新等, 2014; Zhou et al., 2014)。此外, 周家喜等(2012)研究表明, 含硫有机质热降解作用(SOD)可能对部分矿床中S的还原富集有着重要意义, 如大梁子、茂租等围岩中有机质较发育的矿床。

此外, 区内单个矿床的矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值较集中, 如会泽铅锌矿床大部分 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于12‰~16‰间; 富乐矿床大部分 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于11‰~14‰间; 茂租矿床大部分 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于10‰~15‰; 乐红矿床主要 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于本文测试的15件毛坪铅锌矿床矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值在9.8‰~21.8‰间, 其中12件样品集中在16‰~21‰间。表明在铅锌矿化过程中, 成矿热液的S同位素曾发生了均一化作用。这与矿床中Pb等稳定同位素组成特征一致(柳贺昌等, 1999), 暗示矿石硫化物沉淀过程中成矿流体可能经过了充分的混合或对流循环, 但其演化过程及驱动机制还有待进一步研究。

3 结 论

(1) 滇东北地区铅锌矿床特征类似, 是一类产于古生界碳酸盐岩地层中、受构造+岩性共同控制的MVT铅锌矿床, 与区域广泛分布的峨眉山玄武岩无直接联系;

(2) 铅锌矿床的硫主要来源于容矿地层海相硫酸盐, 还原机制以热化学还原作用(TSR)为主; 成矿过程中S同位素发生了不同程度的均一化作用。

参 考 文 献:

- Jia-Xi Zhou, Zhi-Long Huang, Mei-Fu Zhou, et al. 2014. Zinc, sulfur and lead isotopic variations in carbonate-hosted Pb-Zn sulfide deposits, southwest China. *Ore Geology Reviews*, 58: 41-54.
- Leach D L, Bradley D C, Huston D, et al. 2010. Sediment-hosted lead-zinc deposits in Earth history. *Economic Geology*, 105(3): 593-625.
- 白俊豪, 黄智龙, 朱丹, 等. 2013. 云南金沙厂铅锌矿床硫同位素地球化学特征. *矿物学报*, 33(2): 256-264.
- 韩润生, 胡煜昭, 王学琨, 等. 2012. 滇东北富铊银铅锌多金属矿集区矿床模型. *地质学报*, 86(2): 280-294.
- 黄智龙, 李文博, 张振亮, 等. 2004. 云南会泽超大型铅锌矿床成因研究中的几个问题. *矿物学报*, 24(2): 105-111.
- 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. *岩石学报*, 22(10): 2567-2580.
- 柳贺昌, 林文达. 1999. 滇东北铅锌银矿床规律研究. 昆明: 云南大学出版社, 1-470.
- 涂光炽. 2002. 我国西南地区两个别具一格的成矿带(域). *矿物岩石地球化学通报*, 21(1): 1-2.
- 吴越. 2013. 川滇黔地区MVT铅锌矿床大规模成矿作用的年代与机制. 北京: 中地质大学(北京)博士学位论文, 1-175.
- 张长青, 毛景文, 吴锁平, 等. 2005. 川滇黔地区MVT铅锌矿床分布、特征及成因. *矿床地质*, 24(3): 317-324.
- 周家喜, 黄智龙, 高建国. 2012. 滇东北茂租大型铅锌矿床成矿物质来源及成矿机制. *矿物岩石*, 32(3): 62-69.