

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

扬子地台西缘大渡河谷超大型层状铅锌矿床 地质地球化学特征及成因

林方成^{1,2)}

1) 成都理工大学地球科学学院, 610059; 2) 中国地质调查局成都地质矿产研究所, 610082

内容提要: 20世纪90年代以来,四川地矿局207地质队及地方采矿业在扬子地台西缘大渡河谷沿岸,相继发现了黑区—雪区、红花、白熊沟、核桃坪、养善坪—中溪坪—宝水溪—双凤沟等层状铅锌矿床及矿点。其中,黑区—雪区矿床的矿体地表露头长达6000m,估算的铅锌资源量达370万吨,达到超大型矿床的规模。不同的矿床、矿点的分布构成了长度大于50km的铅锌矿化带,预测铅锌资源量有望达1000万吨以上。各矿床、矿点产于上震旦统一寒武统灯影组顶部麦地坪段含磷硅质白云岩的相同层位,矿化与硅质岩及角砾状白云岩层关系密切。矿床中发育层状、纹层状、条带状、同沉积角砾状、层间揉皱等构造,沉积特征明显。矿床的地质、地球化学特征显著区别于区域上以往发现的产于地台盖层碳酸盐岩中具有明显后生成因特点的密西西比河谷型(MVT型)铅锌矿床,也有别于产于中元古界褶皱基底中的火山沉积块状硫化物型(VMS型)铅锌矿床。笔者的研究表明,与铅锌矿密切共生的硅质岩为典型的海底热水沉积产物,铅锌矿床属于海底喷流-沉积成因(SEDEX型);成矿作用受晚震旦世—早寒武世北东东向延伸的汉源—峨眉凹陷及同生断裂带的控制。该类层状铅锌矿床可能是扬子地台西缘铅锌矿聚区中最具找矿潜力的矿床类型。

关键词: 超大型; 铅锌矿床; 喷流-沉积; 扬子地台西缘; 四川

位于扬子地台西缘的川滇黔铅锌多金属矿聚区,是我国重要的铅锌矿产勘查和开发基地。据统计,北自四川荣经、南至云南建水、东至贵州安顺的三角形区域内,在地台盖层碳酸盐岩中,共发现铅锌矿大型矿床6处、中型矿床20处、小型矿床及矿点、矿化点300余处(图1)。铅锌矿床产于上震旦统、下寒武统、中上奥陶统、中志统、中泥盆统、上泥盆统、上石炭统、中二叠统等众多层位。其中,上震旦统灯影组和下石炭统是最重要的赋矿层位。容矿围岩以白云岩为主,其次为白云质灰岩、硅质白云岩、灰岩等。

众多学者对本区铅锌矿床进行了研究,但由于缺乏精确定年的数据,制约了对成矿时代和矿床成因的认识。对有关矿床成因的观点归纳起来有:①多数研究者认为矿床属于沉积-改造成因(孙燕等,1995;朱赖民等,1997;李连举等,1999);②成矿金属来源于容矿地层与深部岩石的混成成因(林方成,1994,1995;邵世才等,1996);③热液喀斯特成因(张立生,1997);④与峨眉山玄武岩存在成矿物质、成矿流体或成矿热动力等的联系(沈苏等,1988;曾忻耕,

1990;余明烈,1993;柳贺昌,1996;李文博等,2004;黄智龙等,2004);⑤成矿物质来源于下震旦统火成岩(Chaoxian Zhou et al., 2001);⑥燕山运动引起地下热卤水的运移并导致了黔西北地区、滇东北地区矿床的形成(郑传仑,1994;赵准,1995;钱建平,2001;王奖臻等,2001);⑦喜马拉雅期受到印度板块与古亚洲板块俯冲碰撞的强烈波及,川西南地区地台盖层震旦系—古近系发生全面的褶皱变形,并导致大规模含矿热卤水的迁移和铅锌成矿作用(林方成,2004)。

尽管对矿床成因的认识尚不一致,但这类矿床存在一些共同的特征。例如,矿床产于以白云岩为主的碳酸盐岩中;矿体受不同型式的断裂构造或褶皱层间破碎带的控制;热液成因的粗粒亮晶白云石、石英、重晶石、萤石等脉石矿物以及方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等金属硫化物充填于断裂带中,并胶结断层角砾岩,形成脉状、网脉状、角砾状等矿石构造;含矿围岩伴有较强烈的硅化、白云石化、重晶石化等热液蚀

注:本文为国家“973”项目(编号 2002CD412609)资助的成果。

收稿日期:2004-06-10;改回日期:2004-11-16;责任编辑:章雨旭。

作者简介:林方成,男,1963年生。博士,副研究员,从事矿床地质研究及西南地区地质调查项目管理。通讯地址:610082,成都市一环北路三段82号,中国地质调查局成都地质矿产研究所;电话:028-83236007;传真:028-83227374;Email: linfch@126.com。

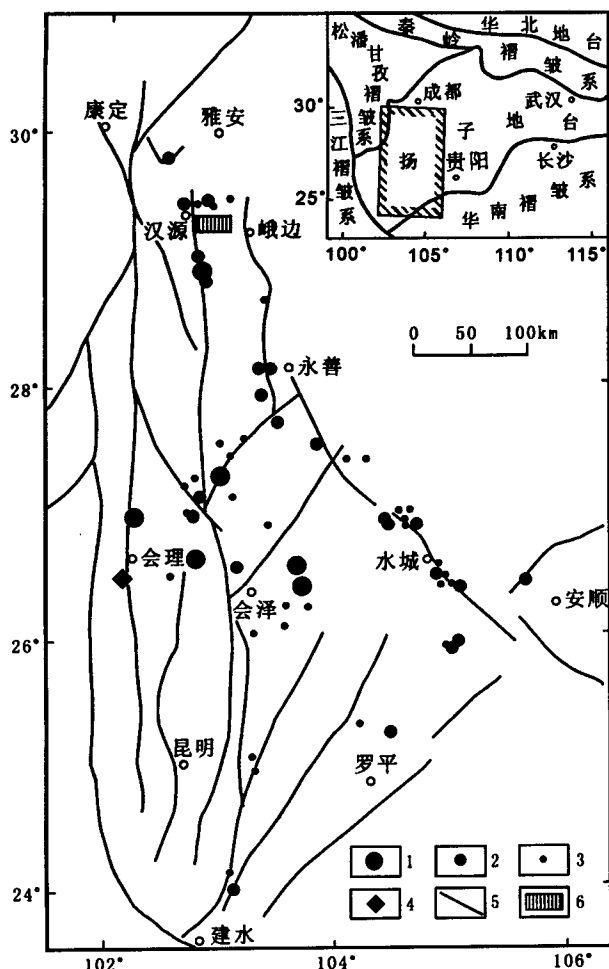


图1 扬子地台西缘铅锌矿床分布及研究区位置图
(构造背景据陈智梁等, 1987和成都地质矿产研究所^①)

Fig. 1 Distribution of Pb-Zn deposits on western margin of the Yangtze Craton and location of the research area (the tectonic background after Chen Zhiliang et al., 1987, and the Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources^①)

1—MVT型铅锌矿床(大型); 2—MVT型铅锌矿床(中型); 3—MVT型铅锌矿床(小型); 4—VMS型铅锌矿床(大型); 5—主要断裂; 6—大渡河谷层状铅锌矿分布区
1—MVT-type Pb-Zn deposit (large-scale); 2—MVT-type Pb-Zn deposit (middle-scale); 3—MVT-type Pb-Zn deposit (small-scale); 4—VMS-type Pb-Zn deposit (large-scale); 5—main fault; 6—location of stratiform Pb-Zn deposits in Dadu river valley

变; 矿床具有明显的后生成因特点。因此, 可将它们划归密西西比河谷型(MVT型)铅锌矿床的范畴。

除了产于地台盖层碳酸盐岩中的MVT型矿床外, 在褶皱基底中元古界会理群天宝山组—风山营组海相变火山—沉积岩中, 还发现了会理小石房似层状火山沉积块状硫化物型(VMS型)铅锌矿床(杨应选等, 1994; 林方成, 2004)。

20世纪90年代初以来, 随着地方采矿业的蓬勃发展以及1999年国土资源地质大调查的实施, 四川地矿局207地质队和汉源有色金属总公司等在康滇地轴北段乌斯河—金口河大渡河谷沿岸, 在上震旦统一寒武统灯影组顶部发现了一批层状整合铅锌矿床、矿点。笔者经过深入的实地考察、系统的岩矿显微鉴定和测试分析研究认为, 这些矿床的地质、地球化学各方面的特征均显著区别于区域上以往发现的MVT型及VMS型矿床, 属于新的成因类型。该类层状矿床可能是扬子地台西缘铅锌矿聚区中最具找矿潜力的矿床类型。

1 大渡河谷层状铅锌矿地质特征

1.1 铅锌矿带的分布与规模

黑区—雪区、红花、深溪坪、白熊沟、核桃坪、养善坪—中溪坪—白塔—宝水溪—双凤沟等层状整合铅锌矿床、矿点和矿化点, 分布于大渡河谷北岸; 在大渡河谷南岸的甘洛田坪也有矿化分布。各矿床、矿点稳定地产于上震旦统一寒武统灯影组顶部麦地坪段含磷硅质白云岩的相同层位。这些矿床、矿点的分布构成了长度大于50km的铅锌矿化带(图2)。

位于铅锌矿化带西段的汉源黑区—雪区铅锌矿床, 矿体露头线的长度达6000m, 据四川地矿局207地质队2003年矿区普查估算, 该矿床333+334₁级别(现行的固体矿产资源/储量分类, 333为推断的内蕴经济资源量, 334₁为经工程验证的预测资源量)铅锌资源量370万吨, 达超大型矿床的规模。由四川省地质调查院承担的地质大调查项目正在对养善坪—中溪坪—白塔—宝水溪—双凤沟一带及其北东方向的牛心山、莲花岩一带继续开展调查评价工作, 并发现了相同层位的铅锌矿化, 预计该区段的矿床规模不亚于黑区—雪区矿床。而介于雪区与中溪坪之间的区段以及大渡河谷南岸尚未开展系统的调查评价。可以预见, 经过进一步的调查评价和开采, 部分矿床、矿点可能连成一体, 估计整个矿化带的铅锌资源量有望达1000万吨以上。大渡河谷层状铅锌矿“沿层找矿”的实践取得了极大的成功, 引起了有关矿产勘查和开采单位的高度重视。

1.2 含矿地层岩性

大渡河谷层状铅锌矿产于灯影组顶部, 该组地层在川西南地区分布广泛, 地层厚度一般为900~1100m, 自下而上分三个岩性段: 第一岩性段为厚层含藻微晶白云岩、葡萄状白云岩, 局部含燧石条带或

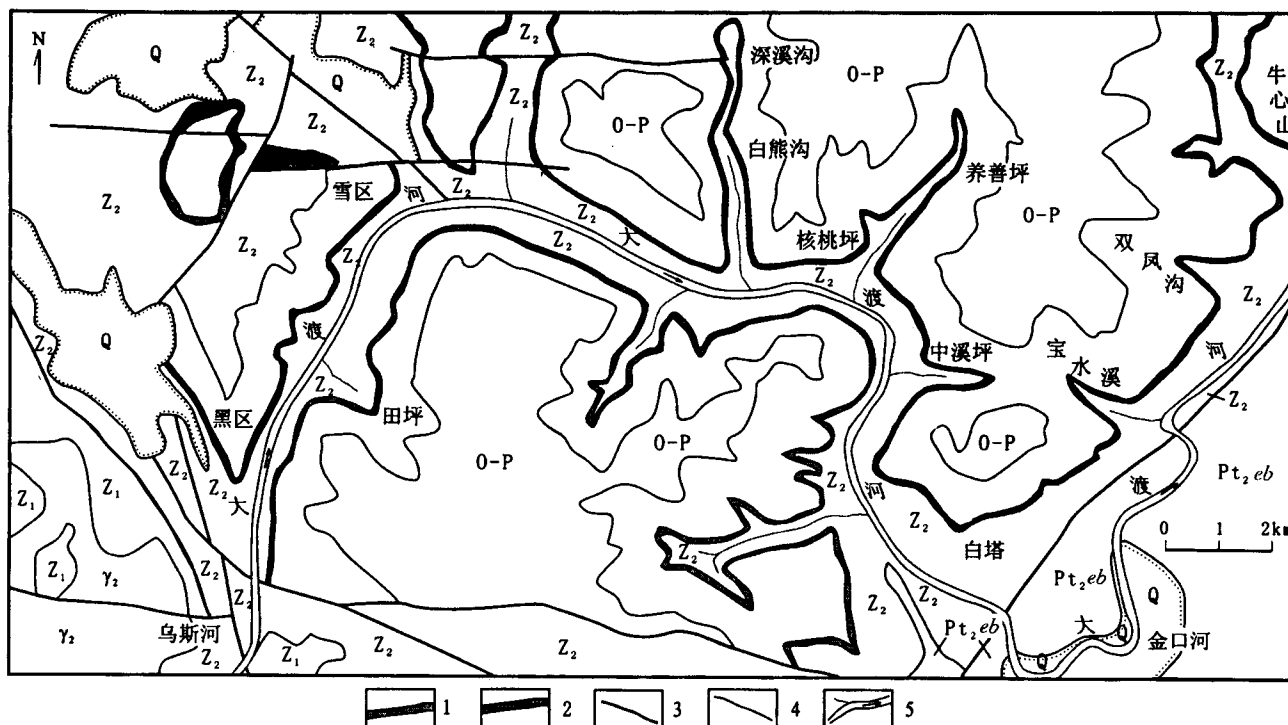


图 2 扬子地台西缘大渡河谷层状铅锌矿带地质图

(据四川省地质矿产局 207 地质队^①和四川省地质调查院^②资料综合编制)

Fig. 2 Geological map of stratiform lead-zinc ore belt along Dadu River valley on western margin of the Yangtze Craton

(compiled from No. 207 Team, Sichuan Geological Bureau^① and Geological Survey of Sichuan Province)

Pt_{2eb}—中元古界峨边群变质岩; γ_2 —中元古代晋宁期花岗岩; Z_1 —下震旦统苏雄组陆相火山岩、碎屑岩; Z_2 —上震旦统观音崖组碎屑岩—灯影组白云岩; ϵ —寒武系碎屑岩、碳酸盐岩; O—P—奥陶系—二叠系碎屑岩、碳酸盐岩; Q—第四系; 1—灯影组麦地坪段含磷及硅质条带白云岩(铅锌矿赋矿层位); 2—铅锌矿(化)层; 3—断层; 4—地质界线; 5—河流及方向

Pt_{2eb}—Mezoproterozoic metamorphic rocks of Ebian Group; γ_2 —Mezoproterozoic granite of Jinning Period; Z_1 —Lower Sinian subaerial volcanic and clastic rocks of Suxiong Formation; Z_2 —Upper Sinian clastic rocks of Guanyinya Formation and carbonate rocks of Dengying Formation; ϵ —Cambrian clastic and carbonate rocks; O—P—Ordovician—Permian clastic rocks and carbonate rocks; Q—Quaternary System; 1—phosphate and siliceous dolomite of Maidiping Member of Dengying Formation (lead-zinc ore surrounding rocks); 2—lead-zinc ore bed; 3—fault; 4—geological boundary; 5—river and its direction

团块;第二岩性段为含硅质条带白云岩,底部为厚10~30m的紫红色砂页岩(“旧城页岩”);第三岩性段(麦地坪段,厚37~67m)为含磷和硅质条带白云岩(陈智梁等,1987;王汝植等,1988)。麦地坪段上部所夹黑色硅质岩及角砾状白云岩为铅锌矿的赋矿围岩(图3)。

灯影组白云岩属于碳酸盐台地的潮坪、泻湖及潮下浅滩环境的沉积产物(杨应选等,1994),其中,第一、二岩性段的时代为晚震旦世,第三段(麦地坪段)含小壳动物化石和胶磷矿,其时代属于早寒武世,与滇东的中源村段、湖北峡东的天柱山段相当(陈智梁等,1987;王汝植等,1988)。因此,灯影组是个跨系的岩石地层单位。

1.3 典型矿床地质特征

下面以该类矿床中最先被发现、经过普查和历经十年开采的黑区—雪区矿床为例,阐述该类矿床的地质、地球化学基本特征。

1.3.1 矿体形态、产状、规模

黑区—雪区铅锌矿床位于汉源乌斯河火车站北北东方向约3km处。矿床产于近南北向开阔的万里山向斜核部及两翼,地层倾角小于20°。矿体产于麦地坪段上部白云岩所夹的黑色硅质岩层和角砾状白云岩中。圈出达工业品位要求($Zn \geq 1.0\%$ 或 $Pb \geq 0.5\%$)的矿体两层,上层矿体为主矿体,呈整合层状产出,距麦地坪段与筇竹寺组的界线1.47~11.76m,矿体厚度0.50~4.86m,平均厚度1.81m;下层矿体呈透镜状,较不稳定,分布于矿区西南部三斗岩矿段,工程控制厚度1.16m。矿体横向规模巨

地 层	岩 性 柱	岩 性 及 厚 度
统 组		
下寒武统	邱竹寺组	滨浅海相碎屑岩、碳酸盐岩, 底部含磷矿, 厚约450m
上震旦统	灯影组	总厚约900~1100m, 分三个岩性段: 第三段(麦地坪段, 厚37~67m): 含磷和硅质条带白云岩、角砾状白云岩, 为铅锌矿赋矿层位 第二段: 含硅质条带白云岩, 底部为紫红色砂页岩(“旧城页岩”, 厚10~30m) 第一段: 厚层含蓝藻、似红藻化石微晶白云岩、葡萄状白云岩, 局部含燧石条带或团块
	观音崖组	滨浅海相砂页岩、灰岩、白云岩, 厚50~160m
下震旦统	苏雄组	陆相火山岩、火山碎屑岩、正常碎屑岩, 厚3000~5000m
中元古界	峨边群	千枚岩、板岩、变质砂岩、大理岩、玄武岩、火山碎屑岩, 局部有晋宁期花岗岩侵入, 厚度大于4000m

图3 大渡河谷铅锌矿带地层柱状图

Fig. 3 Geological column of Pb-Zn ore belt along Dadu River Valley

区域地层据陈智梁等(1987)、王汝植等(1988)、杨应选等(1994)和四川省地质矿产局207地质队^①等资料综合编制
Compiled from Chen Zhiliang et al. (1987), Wang Ruzhi et al. (1988), Yang Yingxuan et al. (1994) and No. 207 Team, Sichuan Geological Bureau^②

大,从黑区向北东延伸至雪区,地表露头断续长达6000m以上,矿层西界被王帽山逆断层错失,而东界尚未圈闭。

矿床的平均品位 $Zn + Pb = 10.58\%$, $Zn 8.62\%$, $Pb 1.96\%$, $Zn:Pb=4.4:1$, 因此是以锌为主、铅次要的矿床。达不到工业品位要求 ($Zn < 1.0\%$ 、 $Pb < 0.5\%$) 的铅锌矿化体的厚度可达20m。矿石中 SiO_2 含量较高,根据矿区普查11个坑探工程24件正规刻槽采样的化学分析^③, SiO_2 含量 $6.49\% \sim 73.88\%$, 平均 27.41% 。

1.3.2 矿石矿物组分

矿石的矿物组合很简单。金属矿物以闪锌矿最主要,其次为黄铁矿,方铅矿。闪锌矿的颜色很浅,呈

棕黄色、暗红色、褐色等。非金属矿物主要为微晶石英,其次为玉髓、白云石,含少量重晶石、胶磷矿、水云母、沥青等。

1.3.3 矿石结构构造

该类矿床矿石结构最突出的特征是矿物粒度非常微细(图版 I-1)。其中,闪锌矿多为 $0.008 \sim 0.4mm$ 的微晶,部分可达 $2mm$,以他形晶、半自形晶为主;方铅矿的粒度比闪锌矿大,一般为 $0.1 \sim 2mm$;黄铁矿更微细,多数介于 $0.002 \sim 0.05mm$,少部分达 $1.2mm$,以半自形晶为主;石英基本上为 $0.004 \sim 0.3mm$ 的微晶,少数达 $2mm$,微细粒石英常包含更微细的白云石、有机质等杂质;玉髓呈 $0.004 \sim 0.03mm$ 大小的纤维放射状集合体;白云石基本上为 $0.001 \sim 0.5mm$ 的微晶;重晶石为 $0.004 \sim 0.45mm$ 的板状、粒状、不规则状微晶;胶磷矿呈 $0.04 \sim 0.3mm$ 大小的次圆状、不规则状颗粒或碎屑,零星分布;水云母呈 $0.002 \sim 0.03mm$ 的鳞片状、纤维状,常与微晶石英、白云石混生,多分布于塑性滑动面中。

与区域上 MVT 型铅锌矿床相比较,本矿床的矿石构造别具特色,具有非常典型的同生沉积特征。主要构造有:

(1) 层纹状构造:由微晶硅岩与微细粒闪锌矿构成韵律性纹层。硅岩层的厚度相对较大,而闪锌矿纹层的厚度相对较小,一般厚度小于 $5mm$,最细者不到 $10\mu m$ (图版 I-2)。

(2) 条纹一条带状构造:黑色含有机质及黄铁矿的微晶石英与微细粒闪锌矿-方铅矿构成条纹一条带状构造,其中,方铅矿为粒度相对较粗 ($1 \sim 1.5mm$) 的自形晶,仅局限于厚度相对较大的部分闪锌矿层中(图版 I-3)。

(3) 层状构造:除了铅锌工业矿体或矿化体总体呈层状分布外,矿体内部还见有由角砾状白云岩层—含有机质硅岩层—闪锌矿层—闪锌矿、方铅矿、黄铁矿层等构成的次级层状构造,厚度一般数厘米~数十厘米(图版 I-4)。

(4) 层间揉皱构造:见有不同尺度的层间塑性变形构造,小者如层纹状硅岩-闪锌矿石中的层间塑性揉皱,在揉皱的转折端闪锌矿纹层明显加厚,而在揉皱的翼部纹层则被拉长变薄,并产生明显的微裂缝(宽度 $< 0.3mm$),裂缝被黑色有机质充填,说明在塑性变形过程中物质组分曾发生了调整位移(图版 I-5);大者如薄层硅岩中的层间褶曲构造(图版 I-6)。在褶曲构造的上下侧往往过渡为平直的矿层或

岩层。

(5)滑塌构造:在一些部位发育大规模的滑塌构造。滑塌角砾岩的成分主要为白云岩,还见有硅质岩、闪锌矿石。角砾岩大小混杂堆积,砾径几厘米至数十厘米不等。角砾形态多为棱角明显的不规则状,部分呈次棱角状。角砾之间分布具塑性变形的黑色含有机质的泥质物、闪锌矿、黄铁矿等组分;还见有闪锌矿脉、方铅矿脉分布。在滑塌构造带内可见到滑塌构造面。在滑塌角砾岩与白云岩基岩之间的滑动面上,分布一层厚达数十厘米、发生强烈塑性流动变形的细粒闪锌矿(图版 I-7,8)。

(6)碎裂构造:铅锌矿体底部的白云岩或硅质岩发生破碎,裂缝被黑色含有机质的白云质或硅质物充填和胶结。破碎岩块往往可以互相拼接。有的部位岩层碎裂,但内部未发生明显的相对错动而貌似“砖墙状”。碎裂岩中的部分裂隙充填较粗粒的棕黄色闪锌矿脉(图版 II-1);某些部位的层纹状硅岩或层纹状含微晶石英的闪锌矿层产生平行或斜交层理的不规则状张开裂隙,被较粗粒的闪锌矿脉、黑色含有机质硅岩脉、白色硅岩脉等充填。碎裂岩层最厚处近2米,向下过渡为正常的白云岩层,其上被铅锌矿层覆盖。

(7)沉积角砾状构造:矿石中发育成分多样、大小不一的沉积角砾(包括粒径 $<2\text{mm}$ 的岩矿石碎屑)。角砾的成分复杂多样,包括灰白色白云岩角砾、含有机质深灰色或黑色白云岩角砾、有机质含量不等的灰色、深灰色、黑色等不同颜色的微晶硅岩角砾、纹层状闪锌矿石角砾、棕黄色微细粒致密块状闪锌矿石角砾、块状黄铁矿石角砾、胶磷矿角砾等等。在部分硅岩角砾或闪锌矿石角砾内部,还包含更早阶段形成的岩矿石角砾,构成多重角砾岩套叠现象。角砾的大小不一,一般为数毫米至数厘米,大者达数十厘米,分选性较差。角砾呈不规则状、长条状、椭球状等形态,有的角砾呈撕裂状或波状弯曲塑性变形。角砾的磨圆度较差,以棱角状、次棱角状居多,少部分为次圆状。胶结角砾的基质以微晶石英、微细粒闪锌矿为主,也可以是石英、玉髓、有机质、黄铁矿、重晶石、胶磷矿、水云母等多种成分的混杂物(图版 II-2,3,4)。

(8)胶状构造:胶状 SiO_2 与黑色有机质等组分混杂,呈流纹状、漩涡状、烟雾状构造(图版 II-4)。此外,还见有胶状闪锌矿、胶状黄铁矿。部分胶状黄铁矿经重结晶形成粗大的聚形晶,但仍可见到特征的胶状残留边。

(9)莓球状构造:微细粒黄铁矿聚集形成椭球状、草莓状构造,在其周围常分布有机质及浸染状黄铁矿(图版 II-5)。

(10)块状构造:含有机质密集堆积的黄铁矿或含硅质的微细粒闪锌矿构成块状构造。块状矿石分布于滑动构造带附近。

(11)浸染状构造:由粒度不等的闪锌矿或闪锌矿碎屑、黄铁矿等较均匀地分布于黑色硅岩中构成浸染状构造。

(12)脉状、细脉状构造:石英、闪锌矿、黄铁矿、沥青或其他有机质等沿裂隙充填和交代,构成闪锌矿脉、石英脉、石英-黄铁矿脉、或沥青脉等构造(图版 II-6)。碎裂岩中的闪锌矿脉或硅岩脉的宽度一般为数厘米至二三十厘米,有的微细脉的宽度小于 0.1mm 。脉状构造主要发育于滑动构造带附近,而在纹层状矿石中微细脉常局限于一定的纹层内。

1.3.4 围岩蚀变

总体而言,层状矿体的围岩蚀变基本不发育,而在滑动构造带附近的围岩蚀变相对明显。可见到微弱的硅化、白云石化、黄铁矿化、沥青化等。蚀变矿物呈毫米级~厘米级的微小斑点状或细脉状产出。局部见粗粒白色纯净的石英、白云石晶洞和细脉,可能为成矿后就地改造的产物。

2 矿床地球化学特征

2.1 岩、矿石地球化学

金属硫化物和 SiO_2 是矿石最主要的化学成分。笔者选送的10件富含硅质的铅锌矿石和2件容矿硅质岩样品的化学成分分析结果为(表1):主要金属硫化物($\text{Zn} + \text{Pb} + \text{Fe} + \text{S}$)的含量变化于 $0.99\% \sim 67.77\%$,平均 35.94% ,金属组分以 Zn 的含量最高,其次是 Fe ,再次为 Pb ; SiO_2 的含量变化于 $18.84\% \sim 64.40\%$,平均 46.57% ; $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{CO}_2$ 含量变化于 $1.18\% \sim 42.15\%$,平均 10.19% ;平均含量 $\text{SiO}_2 : (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{CO}_2) = 4.57:1$,说明了硅质岩的含量与碳酸盐岩相比占绝对优势。 Al_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 MnO 、 TiO_2 等的含量低。

根据川西南地区甘洛赤普、会东大梁子等地灯影组地层岩石化学的研究(杨应选等,1994),该组地层岩石的化学成分较稳定, $\text{CaO} = 25.20\% \sim 30.98\%$,平均 29.15% ; $\text{MgO} = 16.65\% \sim 21.14\%$,平均 19.49% ; $\text{SiO}_2 = 0.62\% \sim 14.95\%$,平均 5.36% ($n = 10$)。岩石的钙镁比值(CaO/MgO)介于 $1.40 \sim 1.79$,平均 1.50 ,接近于纯白云石的理论值

表 1 黑区—雪区铅锌矿床岩、矿石化学分析结果

Table 1 Analysis results of ore and siliceous rocks from Heiqu—Xuequ Pb-Zn deposit

样号	岩矿名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	CO ₂	S	有机碳
		(%)											
Hx001	灰黑色层纹状硅质闪锌矿石	60.50	1.12	1.86	0.29	0.35	0.011	0.04	1.26	0.02	0.34	9.69	1.28
Hx003	灰黑色层纹状硅质闪锌矿石	64.40	1.30	2.25	0.46	0.39	0.010	0.03	1.45	0.02	0.50	7.36	2.10
Hx006	灰黑色层纹状硅质铅锌矿石	49.72	2.82	2.94	0.61	1.09	0.022	0.13	2.10	0.01	0.28	8.61	0.53
Hx015	致密块状硅质闪锌矿石	25.84	0.34	2.86	0.91	0.19	0.011	0.02	1.18	0.02	1.88	21.79	0.79
Hx017	层纹状黑色硅质闪锌矿石	43.06	0.38	1.63	0.52	0.16	0.010	0.03	0.79	0.02	0.88	15.55	2.03
Hx018	角砾状硅质闪锌矿石	51.87	0.60	0.87	0.13	0.19	0.015	0.05	0.61	0.02	0.18	13.29	1.15
Hx037	块状硅质黄铁矿铅锌矿石	43.26	0.90	1.78	0.27	0.40	0.012	0.04	1.24	0.01	0.17	20.70	1.21
Hx041	灰黑色块状黄铁矿石	18.84	1.47	2.89	0.60	0.64	0.019	0.10	1.85	0.04	0.40	35.17	1.56
Hx044	黑色细粒浸染状闪锌矿石	42.35	2.39	4.22	1.74	0.84	0.020	0.10	1.76	0.02	3.01	12.44	2.53
Hx047	深灰色白云质硅质闪锌矿石	40.76	0.54	10.49	6.54	0.19	0.013	0.04	1.18	0.08	12.88	8.23	1.00
Hx048	黑色含黄铁矿胶磷矿硅岩	63.50	2.39	11.30	1.54	0.85	0.060	0.07	7.06	0.03	2.88	3.40	0.36
Hx050	灰白色白云质硅岩	54.78	0.01	13.27	9.22	0.03	0.013	0.02	0.04	0.04	19.66	0.06	0.10

样号	岩矿名称	Fe	Pb	Zn	Cu	Ni	Co	W	Sn	As	Sb	Hg	Ba	Y	B	Ag
		(%)				(×10 ⁻⁶)										
Hx001	同 上 表	1.25	0.70	18.56	121	12.2	5.9	1.06	10.8	18.8	21.8	21.6	61.6	7.82	19.4	35.0
Hx003		1.6	0.18	14.56	125	12.6	5.2	0.48	9.3	20.9	14.8	15.2	63.9	10.00	22.3	26.9
Hx006		1.94	17.63	9.61	124	156	6.5	0.10	9.0	346.0	614.0	10.8	105.0	25.60	41.3	69.4
Hx015		2.84	0.60	39.05	433	23.6	5.4	1.06	35.0	58.8	53.5	43.6	64.3	9.90	23.5	204.0
Hx017		1.67	0.09	30.85	508	9.8	3.9	<0.1	25.0	14.1	18.9	37.1	158.0	5.56	20.3	114.0
Hx018		2.26	0.01	26.48	186	16.3	5.6	1.06	6.7	38.4	42.0	24.1	68.0	3.42	22.6	29.7
Hx037		14.65	0.94	11.50	139	41.9	8.1	0.18	7.2	168.0	81.8	18.8	106.0	10.60	18.6	42.9
Hx041		32.27	0.05	0.28	91	47.7	10.2	0.59	7.6	345.0	51.8	5.25	109.0	17.20	29.6	0.4
Hx044		3.74	0.08	19.82	297	29.6	7.9	0.10	10.0	66.3	38.5	15.1	138.0	15.40	36.7	29.3
Hx047		1.19	0.08	15.12	132	13.2	7.8	0.10	6.6	20.6	22.4	20.5	55.2	7.78	15.5	41.3
Hx048	同 上 表	4.07	0.02	0.38	38.7	31.8	8.7	0.59	2.2	122.0	10.1	0.89	310.0	57.70	47.0	2.8
Hx050		0.91	0.00	0.02	23.3	4.1	5.0	0.59	1.0	1.9	0.7	0.21	140.0	0.42	2.6	0.1

注: 样品由国土资源部宜昌地质矿产研究所测试。测试方法: CaO、Co、Cu、K₂O、MgO、MnO、Na₂O、Ni、Pb、Fe、Zn: 原子吸收光谱法(AAS); B、Sn: 电激发射光谱法(AES); As、Hg、Sb: 原子荧光法(AFS); P₂O₅、TiO₂: 分光光度法(COL); Ag: 石墨炉原子吸收光谱法(GFAAS); SiO₂: 重量法(GR); Ba、Y: 电感耦合等离子体发射光谱法(ICP); W、Al₂O₃、CO₂、S: 容量法(VOL); 有机碳: 燃烧-非水滴定法。

(CaO = 30.4%, MgO = 21.8%, CaO/MgO = 1.39), 表明碳酸盐中方解石含量很少, 90%以上是白云石。因此灯影组地层主要为白云岩。会东大梁子灯影组中所夹的透镜状、薄层状硅质岩属于海底热泉成因。

黑区—雪区矿床虽然以厚度巨大的灯影组白云岩为容矿围岩, 与区域地层相比, 矿石中 SiO₂ 是最主要的化学成分, 其次是金属硫化物, 而正常沉积物碳酸盐的含量相比之下很低, 铅锌矿石实际上是“富含金属硫化物的硅质岩”。因此, 研究“富含金属硫化物硅质岩”的成因对于阐明成矿作用具有重要的意义。

Marchig 等(1982)对含金属热水沉积物、现代深海正常沉积物的 Y、P 的地球化学性状进行对比研究, 其结果表明, 现代深海沉积物及成岩沉积物中 Y 的含量随 P 的富集而升高; 而在热水沉积物中, P

因热水活动容易发生富集, 但 Y 并不随 P 的富集而升高, 因此, 正常海水沉积硅岩与热水沉积硅岩在 Y-P₂O₅ 关系图上有明显不同的分布区域。黑区—雪区矿床矿石及硅质岩的样品投点均位于热水沉积物趋势线及集中区的下方, 而远离正常海水沉积物趋势线及集中区(图4), 表明富硅质矿石及硅岩可能为热水沉积成因。

硅质岩的成因类型较多, 归纳起来可分为生物或生物化学沉积成因; 火山沉积成因; 热水沉积成因; 热液交代(硅化)成因等(刘家军等, 1991; 杨建民等, 1999)。硅质岩 Al、Fe、Mn、Ti 等常量元素的含量可以作为判别其成因的标志, 其中, Al、Ti 的相对富集与陆源物质的介入有关, 而 Fe、Mn 的富集主要与热水活动有关系。硅质岩的 Al/(Al+Fe+Mn) 的值从热水成因的 0.01 到远洋生物沉积成因的 0.60 (Adachi et al., 1986; Yamamoto, 1987)。Bostrom

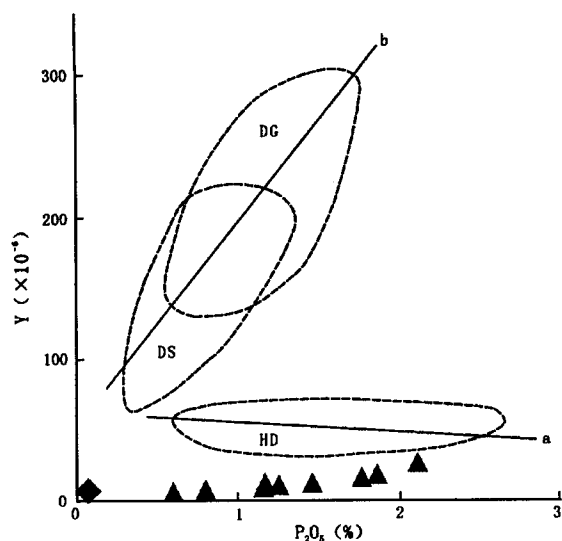


图4 黑区—雪区铅锌矿床富硅质矿石和
硅质岩 Y-P₂O₅关系图

(原图据 Marchig et al., 1982)

Fig. 4 P₂O₅ plotted against Y for siliceous ore and
siliceous rocks from Heiqu—Xuequ Pb-Zn deposit

(after Marchig et al., 1982)

HD—含金属热水沉积物区; DS—深海沉积物区; DG—含金属成
岩沉积物区; a—热水沉积物趋势线; b—海水沉积物趋势线;
▲—黑区—雪区矿床富硅质铅锌矿石; ◆—黑区—雪区矿床硅
质岩

HD—Hydrothermal metalliferous sediments; DS—deep-sea
sediments; DG—diagenetic metalliferous sediments; a—trendline
for hydrothermal metalliferous sediments; b—trendline for deep-
sea and diagenetic metalliferous sediments; ▲—siliceous Pb-Zn
ore from Heiqu—Xuequ deposit; ◆—siliceous rock from Heiqu—
Xuequ deposit

(1983) 指出, 当海相沉积物 $Fe/Ti > 20$ 、 $(Fe + Mn)/Ti > 20 \pm 5$ 、 $Al/(Al + Fe + Mn) < 0.35$ 时, 一般为热水沉积物。黑区—雪区矿床的富硅质的矿石及硅岩的 $Fe/Ti = 24.91 \sim 611.44$ (170.41) (括号内为平均值, 下同)、 $(Fe + Mn)/Ti = 25.01 \sim 611.76$ (171.04); $Al/(Al + Fe + Mn) = 0.01 \sim 0.43$ (0.10)。在 Al-Fe-Mn 三角图上 (图5), 除了1件样品外, 其他样品点均落在热水沉积硅质岩区内。说明了富含硅质的矿石及容矿硅质岩属于热水沉积产物。

沉积物中 Ba 的富集和重晶石的产出是热水活动的重要标志 (周永章, 1990; 彭军, 1999)。现代远洋沉积物和成岩含金属层 As、Sb 的含量低, 分别为 10×10^{-6} 和 $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$, 而热水沉积物富集 As、Sb, 分别为 200×10^{-6} 和 7×10^{-6} (Marchig et al., 1982)。黑区—雪区矿床富硅质矿石及硅质岩 Cu、As、Sb、Ba、Ag 等元素富集程度较高, 平均含量为

$Cu = 184.8 \times 10^{-6}$ 、 $As = 101.7 \times 10^{-6}$ 、 $Sb = 80.9 \times 10^{-6}$ 、 $Ba = 114.9 \times 10^{-6}$ 、 $Ag = 49.6 \times 10^{-6}$, 远远高于碳酸盐类岩石的平均含量 ($Cu = 4 \times 10^{-6}$ 、 $As = 1 \times 10^{-6}$ 、 $Sb = 0.2 \times 10^{-6}$ 、 $Ba = 10 \times 10^{-6}$ 、 $Ag = n \times 10^{-8}$) (武汉地质学院地球化学教研室, 1979)。再次证明了矿石及硅质岩属于热水沉积产物。富硅质矿石及黑色硅质岩除了 W、Ba 以外的其他微量元素的含量均远高于灰白色硅质岩, 说明了伴随铅锌硫化物的形成, 也有更多的其他物质组分的带入。

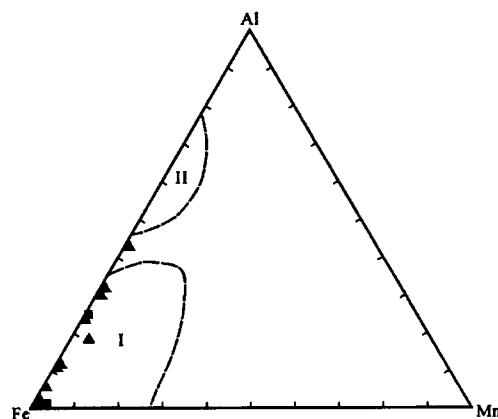


图5 黑区—雪区铅锌矿床富硅质矿石和
硅质岩 Al-Fe-Mn 三角图解

(原图据 Adachi et al., 1986)

Fig. 5 Al-Fe-Mn diagram for siliceous ore and
siliceous rocks from Heiqu—Xuequ Pb-Zn deposit
(after Adachi et al., 1986)

I—热水沉积硅质岩区; II—非热水沉积硅质岩区; ▲—黑区—
雪区矿床富硅质铅锌矿石; ■—黑区—雪区矿床硅质岩
I—Hydrothermal cherts; II—non-hydrothermal cherts;
▲—siliceous Pb-Zn ore from Heiqu—Xuequ deposit;
■—siliceous rock from Heiqu—Xuequ deposit

2.2 岩、矿石稀土元素地球化学

黑区—雪区矿床8件富硅质铅锌矿石及硅质岩的稀土元素总量为 $1.45 \times 10^{-6} \sim 48.47 \times 10^{-6}$; LREE/HREE 为 8.06~23.24。经北美页岩标准化后, δCe 为 0.28~0.74; δEu 为 0.76~1.09; La/Yb 为 0.48~4.62 (表2)。稀土元素组成具有稀土总量低、Ce 亏损显著、Eu 呈弱负异常或不具异常、轻稀土富集的特点。北美页岩标准化的稀土配分模式曲线总体向右缓倾斜、中部呈上凸状 (图6)。

据国内外一些学者的研究 (Shimizu et al., 1977; Murray, 1990; 刘家军等, 1993; 杨海生等, 2003b), 热水成因含金属沉积物的 REE 总量低, Ce 呈负异常, HREE 有富集趋势; 而非热水成因的含金属沉积物 REE 总量高, Ce 正异常, HREE 不具富集

表 2 黑区—雪区铅锌矿床岩矿稀土元素组成($\times 10^{-6}$)Table 2 Analysis results($\times 10^{-6}$) of REE of ore and siliceous rocks from Heiqu—Xuequ Pb-Zn deposit

样号	岩矿名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	LREE HREE	δCe	δEu	$\frac{\text{La}}{\text{Yb}}$
Hx001	灰黑色层纹状硅质闪锌矿石	3.41	6.71	1.11	5.11	1.18	0.25	1.32	0.16	0.92	0.18	0.41	0.05	0.30	0.04	19.25	12.01	0.70	1.02	1.10
Hx003	灰黑色层纹状硅质闪锌矿石	4.44	6.69	1.23	5.18	1.33	0.25	1.42	0.19	1.04	0.19	0.44	0.06	0.30	0.04	20.73	11.88	0.62	0.88	1.43
Hx006	灰黑色层纹状硅质铅锌矿石	9.91	12.08	2.47	10.21	2.17	0.43	2.31	0.32	1.70	0.33	0.80	0.11	0.56	0.07	39.90	14.17	0.53	0.92	1.71
Hx015	含硅岩角砾致密状闪锌矿石	4.10	6.17	1.29	4.95	1.10	0.20	1.12	0.15	0.79	0.15	0.35	0.05	0.24	0.03	19.08	14.02	0.61	0.87	1.65
Hx017	层纹状黑色微晶硅岩	19.57	15.08	2.16	7.99	1.44	0.23	1.80	0.20	1.05	0.25	0.62	0.08	0.41	0.06	48.47	23.24	0.48	0.76	4.62
Hx021	层纹状硅质闪锌矿石	0.35	0.36	0.08	0.35	0.12	0.03	0.14	0.02	0.15	0.03	0.08	0.01	0.07	0.01	1.45	8.06	0.46	1.09	0.48
Hx041	灰黑色块状黄铁矿石	3.26	5.51	0.90	3.34	0.83	0.16	0.88	0.14	0.72	0.14	0.35	0.05	0.25	0.04	15.02	13.73	0.74	0.83	1.26
Hx050	灰白色硅质白云岩	3.61	1.88	0.78	2.41	0.50	0.10	0.43	0.06	0.32	0.06	0.14	0.02	0.11	0.02	9.77	18.94	0.28	1.02	3.18

注: δCe 、 δEu 、 La/Yb 经北美页岩标准化; 样品由武汉综合岩矿测试中心法国 JY 公司生产 JY38S 型单道扫描电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES 法)测试。

特点。黑区—雪区矿床的硅质岩具备热水成因硅质岩的稀土元素基本特征, 仅轻重稀土比值有一定的特殊性, 即 $\text{LREE} > \text{HREE}$, 可能是硅质岩形成时热水沉积物与一定量的正常海水沉积物(白云石等)的混合有关。类似的现象也见于华南震旦系顶部热水成因的硅质岩(杨海生等, 2003a)以及灯影组麦地坪段层位相当的扬子地台东南大陆边缘晚震旦世—早寒武世留茶坡组底部“浅水碳酸盐台地型”稀土的硅质岩层(伊海生等, 1995)。

属于后生热卤水成因的云南会泽铅锌矿床(MVT 型)矿石的稀土元素, 经球粒陨石标准化的配分模式曲线呈轻稀土上拱的右倾型, Ce 为正异常, Eu 有一定的负异常或无异常($\delta\text{Ce} = 1.43 \sim 2.07$, $\delta\text{Eu} = 0.59 \sim 1.09$, $n = 7$)(韩润生等, 2000)。

而黑区—雪区矿床的矿石及硅质岩的球粒陨石标准化稀土配分模式曲线呈右倾型, Ce 和 Eu 均出现显著的负异常($\delta\text{Ce} = 0.30 \sim 0.85$, $\delta\text{Eu} = 0.54 \sim 0.79$, $n = 12$)。

稀土元素的上述特征, 从一个侧面反映了本矿床富硅质的矿石及硅质岩可能为热水沉积成因。

2.3 流体包裹体地球化学

层纹状矿石中的微晶石英流体包裹体非常微小, 一般 $< 3\mu\text{m}$, 基本为单一的液相包体, 偶可见到零星的气液二相包体。在粒度相对较大的石英碎屑和与粗粒闪锌矿共生的石英中, 见有气液二相包体, 其形态呈椭圆形、圆形、三角形、透镜状、不规则状等(图版 II-8), 大小一般为 $2 \sim 9\mu\text{m}$, 气/液比介于 $5\% \sim 15\%$ 。气/液二相包体的均一温度变化于 $140 \sim$

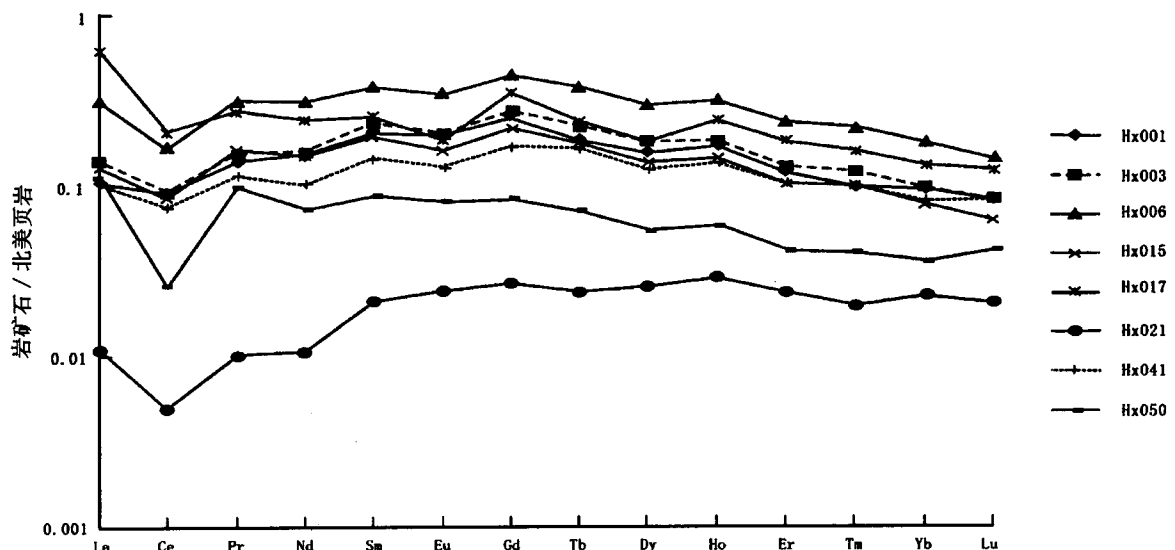


图 6 黑区—雪区铅锌矿床矿石和硅质岩稀土元素配分模式

Fig. 6 REE distribution patterns of ore and siliceous rocks from Heiqu—Xuequ Pb-Zn deposit

285℃,平均197℃($n=47$)。

2.4 同位素地球化学

2.4.1 硫同位素

闪锌矿、方铅矿、黄铁矿的硫同位素组成见表3。矿石硫具有富集重硫的特点, $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为7.48‰~15.51‰,平均12.30‰($n=18$)。成矿硫质可能来源于海水硫酸盐。

根据硫同位素分馏原理,当硫同位素处于交换平衡时,不同硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值的相对大小有一定的顺序,即 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$,从所分析的闪锌矿-方铅矿共生矿物对的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相对大小情况判断,不同硫化物的硫同位素未达到交换平衡,说明矿石可能形成于开放环境,并且是较快速沉淀的结果。早寒武世海相硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 约30‰(G. 福尔,1983),本矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值比容矿围岩同期海水硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 轻, $\Delta(\delta^{34}\text{S}) (= \delta^{34}\text{S}_{\text{海水}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}}) \approx 17.7\text{‰}$,接近于世界海底喷流-沉积成因(SEDEX型)铅锌矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值与容矿围岩同期海水 $\delta^{34}\text{S}$ 值的差值($\Delta(\delta^{34}\text{S})$ 平均值为15.3‰)(桑斯特等,1991)。

表3 黑区—雪区铅锌矿硫同位素分析结果

Table 3 Analysis results of $\delta^{34}\text{S}$ for sulphides from Heiqu—Xuequ Pb-Zn deposit

序号	样号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}(\text{‰})$
1	Hx001	纹层状矿石微细粒闪锌矿	14.83
2	Hx001	纹层状矿石中方铅矿	11.78
3	Hx003	纹层状矿石微细粒闪锌矿	14.53
4	Hx003	纹层状矿石中方铅矿	14.41
5	Hx005	块状矿石黄褐色中粒闪锌矿	12.65
6	Hx006	条带状矿石微细粒闪锌矿	14.82
7	Hx006	条带状矿石中方铅矿	13.99
8	Hx015	块状矿石中方铅矿	13.92
9	Hx020	斑点状棕红色中粒闪锌矿	8.52
10	Hx021	脉状棕色中粒闪锌矿	7.48
11	Hx025	脉状棕色中粒闪锌矿	13.13
12	Hx041	块状黄铁矿	15.51
13	Hx044	块状矿石中的闪锌矿	10.48
14	Hx044	块状矿石中的方铅矿	12.07
15	Hx052	块状矿石中的棕黄色闪锌矿	12.82
16	Hx052	块状矿石中的方铅矿	8.85
17	Hx055	块状矿石中的闪锌矿	10.43
18	Hx055	块状矿石中的方铅矿	11.2

注:样品由国土资源部宜昌地质矿产研究所德国产 MAT-251质谱仪测试,测试精度 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

2.4.2 硅、氧同位素

矿区灰白色微晶硅岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 介于 -0.3‰ ~ -0.2‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 介于 20.9‰ ~ 21.8‰ ($n=3$);分布于黑色微晶硅岩晶洞中的白色粗粒硅化石英的硅氧同位素明显不同于沉积成因的微晶硅岩, $\delta^{30}\text{Si}$ 增大为

0.2‰ ,而 $\delta^{18}\text{O}$ 减小为 18.5‰ (表4)。

表4 黑区—雪区铅锌矿床硅氧同位素组成及平衡温度

Table 4 Analysis results of $\delta^{30}\text{Si}$, $\delta^{18}\text{O}$ and calculated equilibrium temperature for siliceous rocks from Heiqu—Xuequ Pb-Zn deposit

样号	岩矿名称	$\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS-28}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}(\text{‰})$	平衡温度(℃)
Hx021	灰白色硅岩	-0.3	21.8	80
Hx025	灰白色硅岩	-0.3	21.4	82
Hx027	灰白色硅岩	-0.2	20.9	86
Hx046	白色硅化石英	0.2	18.5	105

注:由中国地质科学院矿产资源研究所 MAT-251EM 气体质谱仪测试。分析精度: $\delta^{30}\text{Si} \pm 0.1\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} \pm 0.2\text{‰}$ 。

不同成因的石英具有不同的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(Savin et al., 1970; Knauth et al., 1976; Clayton, 1986),其中,火成石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 8.3‰ ~ 11.2‰ ;变质石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 11.2‰ ~ 16.4‰ ;正常海相沉积燧石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 25.6‰ ;海滩石英砂的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 10.3‰ ~ 12.5‰ ;热泉华石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 12.2‰ ~ 23.6‰ ;成岩重结晶石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 19.3‰ ~ 21.8‰ 。本矿床微晶硅岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 落在热泉华石英和成岩重结晶石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围内,表明硅岩可能为热水沉积的结果。

不同环境中形成的硅质岩石具有不同的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值。大洋深部蛇绿岩带中放射虫硅岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 为 -0.5‰ ~ -0.3‰ ,正常海水沉积的放射虫硅岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 一般在 0.2‰ ~ 0.8‰ 之间,浅海碳酸盐中硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值介于 0.1‰ ~ 3.4‰ (丁悌平等,1988);热水沉积石英的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值为 -1.5‰ ~ 0.8‰ ,低温地下水自生石英的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值为 1.1‰ ~ 1.4‰ (Douthitt, 1982; Clayton, 1986);现代海底黑烟囱硅质物的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值变化于 -3.1‰ ~ -0.4‰ ,陆上硅质泉华的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值介于 -0.8‰ ~ 0.2‰ (Li Yanhe et al., 1995)。总体而言,与岩浆活动或热水活动有关的硅质岩往往有较低的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值。云南梅树村前寒武系—寒武系界线剖面岩石的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值介于 -2.1‰ ~ 1.0‰ ($n=26$),其中大海段含磷锰质白云岩、硅质条带出现异常低的 $\delta^{30}\text{Si}$ (-2.1‰ ~ -0.2‰),被认为是海底热液活动的反映(李延河等,1995)。本矿床赋矿层位也处于震旦系—寒武系过渡界线附近,层状硅岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值较低,可能也是海底热水活动的反映。

根据硅岩-水的氧同位素地质温度计方程式(Knauth et al., 1976):

$$1000\ln\alpha_{\text{硅岩-水}} = 3.09 \times 10^6 T^{-2} - 3.29$$

计算出灰白色微晶硅岩形成时的古海水温度为 $80\sim 86\text{℃}$,白色硅化石英的形成温度相对高些

(105℃)。据估计,晚震旦世到早寒武世古海水温度大致为35~45℃(卢武长^①),本矿床硅岩的形成温度明显高于当时海水的温度,无疑与热水活动有关。根据彭军等(2000)的研究,扬子地台东南大陆边缘晚前寒武纪的硅质岩具有与此相近的热水沉积温度(66.0~89.7℃)。

2.4.3 铅同位素

矿石中方铅矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 介于17.974~18.171, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 介于15.599~15.652, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 介于37.986~38.251($n=8$)(表5)。

与矿石的硫同位素组成变化范围较大的现象不同,矿石的铅同位素组成相当均一。此种现象可解释为矿石的硫同位素组成既与硫源的同位素组成有关,还受矿石沉淀环境地球化学条件以及硫同位素的分馏效应的影响;而矿石的铅同位素组成仅与源区的铅同位素组成和铅同位素衰变有关,而铅同位素衰变仅与衰变常数和衰变时间有关,并不受矿石沉淀环境地球化学条件的影响。

矿石铅源区参数 μ 值介于9.49~9.60, Th/U值为3.74~3.80,落在正常铅的Th/U值(2.90~4.84)范围内(Zartman et al., 1981),矿石铅属于正常普通铅,可能来自相同的源区。在铅同位素演化与构造环境图解上(图7),矿石铅的数据点靠近造山带铅演化曲线,并落在克拉通化地壳铅的范围内或其上侧。根据矿床产出的构造环境和区域地质构造演化史分析,矿石铅可能来源于经晋宁造山运动改造的基底变质岩系。

与扬子地台西缘其他类型铅锌矿床相比较,不同类型矿床的铅同素组成既有相似性,又存在差异性。表现在黑区—雪区矿床与VMS型的小石房矿

床和MVT型的汉源唐家、甘洛赤普、波波、荣经宝贝山、金阳汞山等矿床的矿石铅具有相近的 μ 值,可能来源于相似U、Th环境的源区。MVT型的其他矿床(如团宝山、大梁子、天宝山、矿山厂等)的铅同位素组成分散性大,且往往呈线性分布;除了会泽矿山厂矿石铅与灯影组地层白云岩的铅同位素组成相近外,其他矿床与灯影组地层的铅同位素组成明显不同,矿石铅属于不同类型铅或不同源区铅的混合成因,可能主要来源于基底富含放射性的变质岩系或更深的环境(林方成, 1994, 1995, 2004)。

黑区矿床铅同位素模式年龄介于365~493Ma, 平均405 Ma($n=8$)。该矿床具典型的沉积特征,实际成矿年龄应与灯影组麦地坪段的地质年龄一样(540Ma $\pm$),因而,矿石铅模式年龄略小于成矿实际年龄,可能代表矿石成岩后生变化的年龄。

3 矿床成因

大渡河谷铅锌矿床的矿体呈层状与地层整合产出,矿层延伸规模巨大;矿石具层纹状、条带状等典型的同生沉积构造,矿体内发育层间塑性揉皱变形;矿化与沉积角砾状白云岩层和黑色富有机质的硅岩层紧密相关;围岩蚀变不发育。岩石化学、稀土元素、硅氧同位素等地球化学特征一致表明,含矿硅质岩属于热水沉积成因。

通过与世界上密西西比河谷型(MVT型)铅锌矿床和海底热水喷流-沉积型(SEDEX型)铅锌矿床地质地球化学特征的对比可看出(表6),在含矿地层岩性、控矿构造、矿体形态产状和规模、矿石矿物特征、典型矿石组构、围岩蚀变等诸多方面,大渡河谷层状铅锌矿床与SEDEX型铅锌矿床具有明显的相似性,而与MVT型铅

锌矿存在显著的差异。因此认为,该类层状铅锌矿床属于SEDEX型矿床。

4 成矿环境分析

扬子地台晚震旦世—早寒武世灯影期为陆表海碳酸盐台地沉积,四川大渡河流域一带地处台地边缘,西侧出现南北向的水下隆起,形成了泸定古岛和石棉古

表5 黑区—雪区铅锌矿床铅同位素分析结果

Table 5 Analysis results of Pb isotopes of Heiqu—Xuequ Pb-Zn deposit

样号	矿物名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	φ 值	μ 值	Th/U	模式年龄(Ma)
Hx001	方铅矿	18.135 $\pm$ 0.002	15.599 $\pm$ 0.002	38.116 $\pm$ 0.006	0.601	9.49	3.74	365
Hx005	方铅矿	18.152 $\pm$ 0.005	15.627 $\pm$ 0.005	38.204 $\pm$ 0.017	0.603	9.55	3.77	386
Hx006	方铅矿	18.127 $\pm$ 0.001	15.602 $\pm$ 0.001	38.109 $\pm$ 0.002	0.602	9.50	3.74	374
Hx011	方铅矿	17.974 $\pm$ 0.001	15.611 $\pm$ 0.001	37.986 $\pm$ 0.006	0.613	9.54	3.77	493
Hx015	方铅矿	18.171 $\pm$ 0.001	15.650 $\pm$ 0.001	38.237 $\pm$ 0.002	0.604	9.59	3.78	399
Hx044	方铅矿	18.130 $\pm$ 0.003	15.616 $\pm$ 0.004	38.140 $\pm$ 0.012	0.603	9.53	3.76	388
Hx052	方铅矿	18.128 $\pm$ 0.001	15.642 $\pm$ 0.001	38.218 $\pm$ 0.002	0.606	9.58	3.80	420
Hx055	方铅矿	18.150 $\pm$ 0.004	15.652 $\pm$ 0.005	38.251 $\pm$ 0.016	0.606	9.60	3.80	416
平均		18.121 $\pm$ 0.002	15.625 $\pm$ 0.003	38.158 $\pm$ 0.008	0.605	9.55	3.77	405

注:样品由国土资源部宜昌地质矿产研究所MAT-261可调多接收质谱计测试。模式年龄计算参数数据Doe et al. (1974): $a_0=9.307$, $b_0=10.294$, $c_0=29.476$, $t_0=4.43\times 10^9\text{a}$, $\lambda_1=1.55125\times 10^{-10}\text{a}^{-1}$, $\lambda_2=9.8485\times 10^{-10}\text{a}^{-1}$ 。

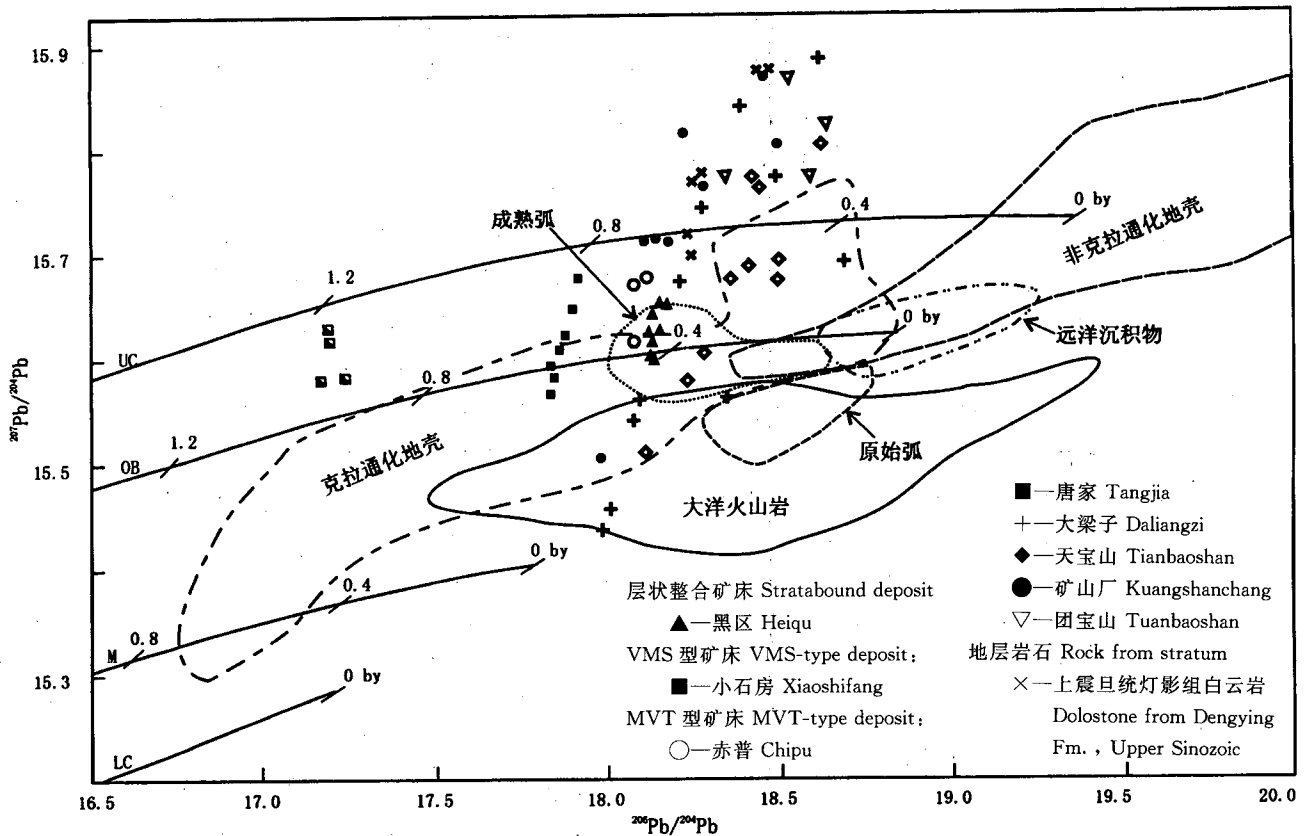


图 7 扬子地台西缘铅锌矿床 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解

Fig. 7 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ against $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ for Pb-Zn deposits on western margin of the Yangtze Craton

背景图据 Zartman 等 (1981) 编制: UC—上地壳; OB—造山带; M—地幔; LC—下地壳。铅同位素资料来源: 黑区据本文; 矿山厂据高子英 (1997); 唐家部分数据据孙燕等 (1995); 其余据杨应选等 (1994)、林方成 (1995)

The background diagram based on Zartman et al. (1981): UC—upper crust; OB—orogeny belt; M—mantle; LC—lower crust. Sources of Pb isotope data: Heiqu—Xuequ from this paper; Kuangshanchang after Gao Ziying (1997); Tangjia partially from Sun Yan et al. (1995); others from Yang Yingxuan et al. (1994), Lin Fangcheng (1995)

岛;在泸定野牛山至荣经白井沟一带出现东西向的水下隆起;在汉源—峨眉一带形成北东东向北陡南缓的不对称凹陷槽,沿凹陷槽中轴线灯影期的沉积厚度约1200m,较南北两侧明显增厚。乌斯河—金口河铅锌矿化带即分布在该凹陷槽西段的中心部位(图8)。

黑区铅锌矿床中见有很发育的滑塌角砾岩,并见有滑动断裂面,分布于滑动断裂面上的闪锌矿、黄铁矿体发生强烈的塑性变形(图版 I-7,8);滑动构造带附近出现块状铅锌石,铅锌矿体厚度大,最厚达5m。笔者认为,所见的滑动构造带应为同生断裂带,并将其命名为“汉源—峨眉同生断裂带”,该同生断裂带的存在不但控制了汉源—峨眉凹陷槽的发育,同时也控制了铅锌矿化带的分布,可能是含矿流体向上运移的通道和海底喷发成矿的中心。

在铅锌矿层底板发育的碎裂白云岩(图版 II-1)和角砾状白云岩层(图版 I-4),分别属于原地破碎-堆积、破碎-搬运-异地堆积的产物;在铅锌矿层中普遍发育白云岩、硅质岩、铅锌矿等多种成分的沉积角砾(图版 II-2,3,4),为异源沉积物,属于强大的水动力条件下形成的碎屑流沉积产物。层间塑性变形构造的发育(图版 I-5,6),显然是在成岩期间沉积物尚未完全固结的状态下发生层间滑动塑性变形的结果。这些沉积构造可与碳酸盐岩地震液化序列的构造(乔秀夫等,1994;Qiao Xiufu et al., 2002)相对应,其中,滑塌角砾岩相当于地震液化序列的“震塌岩”;碎裂白云岩相当于“震裂岩”;层间揉皱相当于“震褶岩”;各种成分的沉积角砾岩相当于“碎屑流”沉积物;在纹层状铅锌矿中也发现了“包卷层理”。笔者认为,这些同沉积岩矿石构造很可能是与

表 6 不同类型铅锌矿床地质地球化学特征对比

Table 6 Comparison of geological and geochemical characteristics of different types of Pb-Zn deposits

矿床类型	MVT 型铅锌矿床	SEDEX 型铅锌矿床	大渡河谷层状铅锌矿床
容矿岩石	以白云岩为主的碳酸盐岩	包括碳酸盐岩、蒸发岩在内几乎所有种类的沉积岩	白云岩
容矿地层与成矿时代	多数产在古生界,其次为三叠系,少量为元古界。成矿作用发生于容矿岩石岩化之后,属“后生矿床”	集中产于中元古界、寒武系、泥盆—石炭系,个别产于侏罗系。容矿地层时代等于矿化的时代	产于下寒武统。容矿地层时代等于矿化时代
矿体形态	总体上是层控的。与围岩不整合的似层状、透镜状、筒状、脉状	与围岩整合的堆垛状、层状、透镜状。有的矿床层状矿体底部伴有脉状、网脉状或浸染状矿化带	与围岩整合的层状,部分地段底部发育浸染状矿化
矿石矿物组合	常见黄铁矿、白铁矿、闪锌矿、方铅矿,有的矿床重晶石和萤石为重要副矿物	常见黄铁矿、磁黄铁矿、白铁矿、闪锌矿、方铅矿,有的矿床含大量的重晶石	闪锌矿、黄铁矿、方铅矿,微晶石英和白云石为主要的非金属矿物
典型的热液/热水沉积物	热液成因的亮晶白云石、石英、重晶石、萤石等脉石及铅锌硫化物,矿物通常呈粗大的晶体	层状重晶石岩、硅岩、钠长岩、铁白云岩、电气石岩等喷流岩以及铅锌、黄铁矿等硫化物,矿物粒度通常很细	热水沉积的层状、层纹状硅质岩及铅锌矿、黄铁矿,矿物粒度以微细粒为主
典型矿石结构构造	块状、浸染状、脉状构造。常见硫化物和热液粗晶白云石胶结碳酸盐岩角砾;可见到硫化物盖在碳酸盐岩角砾上形成“屋顶盖雪”示顶构造	块状构造、条带状构造,细粒硫化物与围岩构成纹层状构造、浸染状构造	硫化物与硅质岩互层构成层纹状、层状构造
围岩蚀变	硅化、碳酸盐化、黄铁矿化、重晶石化、萤石化等很发育	层纹状矿体的围岩蚀变不发育;底部脉状、网脉状、浸染状矿体的蚀变发育	层纹状矿体的围岩蚀变不发育,在滑动断裂带附近发育硅化、白云石化
矿床规模	单个矿床规模较小,多数矿床矿石量 30~300 万吨,但可成群分布,矿区可由数量众多的矿体组成,大的矿区 Pb+Zn 金属量可达 1000 万吨以上,与巨大的 SEDEX 型矿床相当	呈单个矿床或小群矿床产出,矿床规模非常大,平均矿石量 7000 万吨	黑区—雪区矿床铅锌矿层长达数千千米,Pb+Zn 金属量 370 万吨;乌斯河—金口河大渡河谷矿带长约 50km,Pb+Zn 金属量估计达 1000 万吨以上
矿石品位	Pb+Zn=5%~15%,Zn/(Zn+Pb)多数为 0.6~0.8	Pb+Zn=3%~15%,平均高达 12%,Zn/(Zn+Pb)多数为 0.5~0.8	黑区—雪区矿床 Zn+Pb=10.58%,Zn/(Zn+Pb)=0.81
成矿构造背景	克拉通盆地边缘的碳酸盐台地(如美国中部密西西比河谷矿区),部分产于裂谷带(如中欧阿尔卑斯)。绝大多数矿床未受到变形变质作用	拉张的构造环境:克拉通边缘海槽(裂谷)、克拉通内盆地。同沉积断裂及三级盆地控矿。多数矿床经受了成矿后的变质变形	克拉通边缘盆地。成矿受次级盆地和同生断裂控制。矿床未受变形变质而保存良好
容矿构造	以与不整合面伴生的溶塌角砾岩层或角砾岩筒为主,其次为断裂裂隙	地层控矿	地层控矿
与侵入岩关系	没有关系	没有关系	没有关系
成矿方式	角砾岩之间的开放孔隙充填和对碎屑或围岩的交代作用	海底(少数可能为湖底)沉积作用	海底沉积作用
含矿围岩岩相古地理	浅水碳酸盐岩。有的矿床分布于均匀的碳酸盐岩层中,而有产于礁体或页岩-碳酸盐岩的相变带	深水相黑色页岩、粉砂岩、浅水相砂岩、碳酸盐和蒸发岩,甚至是巨大的陆相湖泊等	浅水碳酸盐台地的潮坪相
铅同位素	美国中部、中国扬子地台西缘等部分矿床铅同位素组成变化大,其他多数矿床的铅同位素均一。模式年龄变化较大,可出现负值	所有矿床的铅同位素组成均匀,模式年龄介于 1700Ma 和 240Ma 之间	铅同位素组成均匀,模式年龄介于 365~493Ma,平均 405Ma(n=8)
硫同位素	富集重硫,矿床硫化物的硫同位素平均值比容矿围岩同期海水轻, $\Delta(\delta^{34}\text{S}) (= \delta^{34}\text{S}_{\text{海水}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}}) = -1.0\text{‰} \sim +32.9\text{‰}$,平均 15.3‰。硫来源于海水硫酸盐的还原	富集重硫,矿床硫化物的硫同位素平均值比容矿围岩同期海水轻, $\Delta(\delta^{34}\text{S}) (= \delta^{34}\text{S}_{\text{海水}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}}) = -0.1\text{‰} \sim +28.5\text{‰}$,平均 16.5‰。硫来源于海水硫酸盐的还原	富集重硫, $\delta^{34}\text{S} = 7.48\text{‰} \sim 15.51\text{‰}$ (n=18),矿床硫化物的硫同位素平均值比容矿围岩同期海水轻, $\Delta(\delta^{34}\text{S}) (= \delta^{34}\text{S}_{\text{海水}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}}) \approx 17.7\text{‰}$ 。硫来源于海水硫酸盐的还原
矿床实例	加拿大派因波因特;美国密西西比河流域;波兰西里西亚;中欧阿尔卑斯(奥地利、南斯拉夫、意大利);中国扬子地台西缘	加拿大沙利文;澳大利亚布罗肯希尔、麦克阿瑟、芒特艾萨;德国麦根、腊梅尔斯伯格;爱尔兰锡尔弗迈因斯;中国厂坝—李家沟、狼山霍各乞、东升庙	黑区—雪区
资料来源	据 D. F. 桑斯特 ^① ;田毓龙等,1999;李英等,1999;肖新建等,2000;王炎臻等,2002,等综合		本文

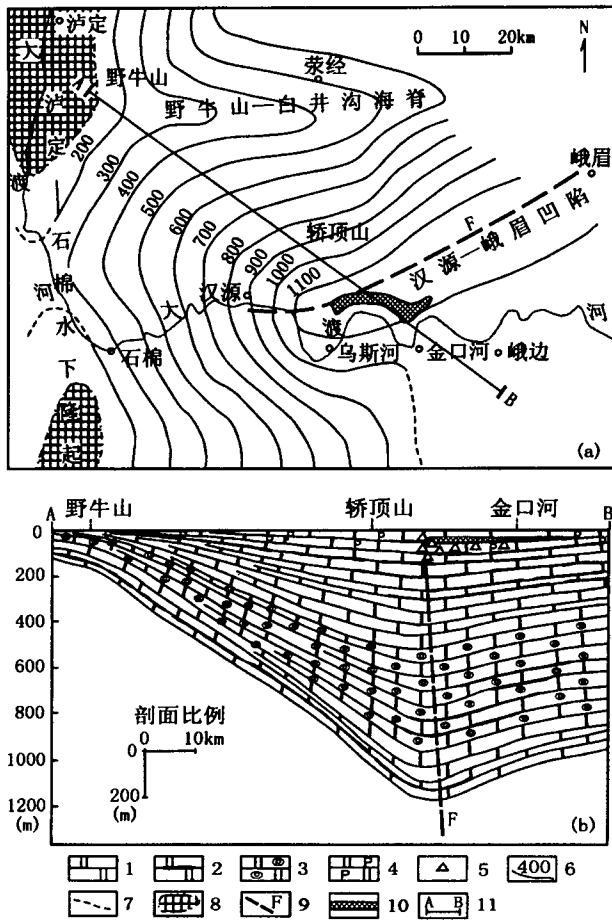


图 8 扬子地台西缘大渡河流域晚震旦世—早寒武世灯影期岩相古地理图
(岩相古地理背景据杨应选等^①)

Fig. 8 Lithofacies-paleogeographical map of the Dengying age of Late Sinian—Early Cambrian Epoch in Dadu River basin on western margin of the Yangtze Craton (paleogeographic background after Yang Yingxuan et al.^①)

(a)—平面图; (b)—A—B 剖面图; 1—白云岩; 2—硅质白云岩; 3—含藻白云岩; 4—含磷白云岩; 5—沉积角砾岩; 6—沉积等厚线及厚度; 7—推断沉积等厚线; 8—古岛; 9—推测同生断层; 10—铅锌矿带; 11—岩相剖面位置

(a)—Plan; (b)—A—B section; 1—dolomite; 2—siliceous dolomite; 3—algal dolomite; 4—phosphate dolomite; 5—breccia; 6—sedimentary isopach and thickness; 7—hypothetical sedimentary isopach; 8—ancient island; 9—hypothetical contemporaneous fault; 10—Pb—Zn ore belt; 11—location of lithofacies section

同生断裂活动相伴发生的古地震的产物; 古地震引起的海啸等强大海流使破碎的岩矿石发生搬运、沉积, 形成了在铅锌矿层内广泛分布的沉积角砾岩。

5 讨论与结论

(1) 分布于四川大渡河谷以锌为主的层状铅锌矿床, 其地质、地球化学特征与扬子地台西缘盖层碳酸盐岩中广泛分布的具有明显后生成因特点的 MVT 型矿床明显不同, 也显著区别于褶皱基底会理群中的 VMS 型矿床。矿体呈整合层状, 矿层的横向延伸规模在国内有色金属矿床中前所未见; 矿石的沉积特征非常典型; 铅锌矿化与巨厚的碳酸盐台地所夹的硅岩建造和角砾状白云岩层的分布密切相关, 与成矿有关的硅岩属于热水沉积成因。因此, 笔者首次提出该类矿床属于与海底热水沉积硅岩建造有关的喷流-沉积型矿床 (SEDEX 型)。

(2) 大渡河谷层状铅锌矿的产出与晚震旦世—早寒武世灯影期碳酸盐台地中的汉源—峨眉凹陷以及同生断裂带的发育有关。沿同生断裂带有多期的热水成因硅岩的发育, 其中, 灯影组底部的硅岩主体上分布于凹陷槽的北侧, 反映了当时的海底地形可能是北低南高; 而灯影组中部及麦地坪段中的硅岩主要分布于凹陷槽的南侧, 结合凹陷槽南侧的沉积厚度大、厚度变化较小, 而北侧的沉积厚度较小、厚度变化梯度大的特点分析, 说明了凹陷槽南侧的沉降幅度相对较大, 是海底热水成因硅岩的沉积中心地带。灯影期从早到晚热水活动的强度由弱到强, 到早寒武世热水活动达到顶峰时, 开始了铅锌硫化物的大规模喷流和沉积。成矿作用的发生与同生断裂带的活动及其伴生的强烈的海底古地震作用有内在的联系。多层位硅质岩的产出、矿层中多种成分角砾的发育以及硅岩-铅锌硫化物韵律性纹层的发育, 反映了同生断裂构造的律动性和喷流成矿过程的脉动性特点。

(3) 海底喷流-沉积成矿存在水/岩界面以上及水/岩界面以下两个成矿子系统。水/岩界面以上的成矿子系统的成矿温度相对较低 ($80\sim 86^{\circ}\text{C}$), 但明显高于同期海水的温度 ($35\sim 45^{\circ}\text{C}$), 可能代表成矿流体与海水混合后矿石沉淀的温度, 形成了分布较为稳定的层状、层纹状、条带状矿石, 矿物粒度微细; 水/岩界面以下的成矿温度相对较高 ($140\sim 285^{\circ}\text{C}$), 可能代表成矿流体未与海水混合或混合不充分的成矿温度, 形成了矿物粒度较粗大的浸染状、细脉状充填、交代矿石。

(4) 扬子地台西缘 SEDEX 型铅锌矿床的发现, 丰富了区域铅锌矿床的成因类型。晚震旦世—早寒武世 SEDEX 型铅锌成矿作用是介于中元古代

VMS 型铅锌成矿与燕山期—喜山期地台边缘活化期 MVT 型铅锌成矿之间的另一期重要的铅锌成矿作用。

(5) 世界上 Pb-Zn 矿床主要赋存于沉积岩中, 矿床类型主要为 SEDEX 型和 MVT 型, 两者合计占 Pb、Zn 产量及储量的三分之二以上; SEDEX 型矿床往往储量巨大、品位富, Pb+Zn 一般 >10%, 有的高达 30% (涂光炽, 2001)。据统计, 世界上 39 个超大型铅锌矿床中, 有 20 个属 SEDEX 型, 6 个属 MVT 型 (郭洪中, 1994)。因此笔者认为, SEDEX 型超大型铅锌矿床在扬子地台西缘铅锌矿聚区的发现具有重大意义, 可能是该区域最有找矿前景的矿床类型, 蕴藏着巨大的经济价值。

注 释

- ① 成都地质矿产研究. 2003. 云贵川渝 1:250 万地质图.
- ② 四川省地质矿产局 207 地质队. 1993. 四川省汉源县马托乡黑区铅锌矿普查地质报告.
- ③ 四川省地质调查院. 2003. 四川洪雅—金阳铜铅锌多金属矿评价设计. 地质大调查项目设计 (项目编号: 200310200033).
- ④ 卢武长主编. 1986. 稳定同位素地球化学. 成都地质学院出版发行组, 169~173.
- ⑤ 桑斯特 D F. 1991. 密西西比河谷型矿床与沉积喷气型矿床的对比. 张秋明译. 国外地质科技, 8:5~20.
- ⑥ 杨应选, 柯成熙, 林方成, 等. 1992. 地质矿产部定向基金项目“康滇地轴东缘铅锌矿带主要矿床类型、成矿富集条件、找矿标志及靶区预测研究”成果报告. 成都地质矿产研究所.

参 考 文 献

- 陈智梁, 陈世瑜. 1987. 扬子地块西缘地质构造演化. 重庆出版社, 1~172.
- 丁梯平, 万德芳, 李金城, 蒋少涌, 宋鹤彬, 李延河, 刘志坚. 1988. 硅同位素测量方法及其地质应用. 矿床地质, 7(4): 90~95.
- 福尔 G. 1983. 同位素地质学原理. 潘曙兰, 乔广生, 译. 科学出版社, 326~332.
- 高子英. 1997. 云南主要铅锌矿床的铅同位素特征. 云南地质, 16(4): 359~367.
- 郭洪中. 1994. 铅锌矿床的类型划分及特征. 地质地球化学, 6: 4~8.
- 韩润生, 刘丛强, 黄智龙, 李元, 陈进. 2000. 云南会泽铅锌矿床构造控矿及断裂构造岩稀土元素组成特征. 矿物岩石, 20(4): 11~18.
- 黄智龙, 李文博, 张振亮, 韩润生, 陈进. 2004. 云南会泽超大型铅锌矿床成因研究中的几个问题. 矿物学报, 24(2): 105~111.
- 李连举, 刘洪滔, 刘继顺. 1999. 滇东北铅、锌、银矿床矿源层问题探讨. 有色金属矿产与勘查, 8(6): 333~339.
- 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. 地质论评, 50(2): 189~195.
- 李延河, 万德芳, 蒋少涌, 钟华. 1995. 云南梅树村前寒武系—寒武系界线剖面硅同位素研究. 地质论评, 41(2): 179~187.
- 李英, 祁思敬, 马国良, 张振飞. 1999. 中国北方超大型热水沉积硫化物矿床基本特征及形成条件研究. 西安工程学院学报, 21

(4): 19~24.

- 林方成. 1994. 四川会东大梁子铅锌矿床成因新探. 矿床地质, 13(2): 126~136.
- 林方成. 1995. 康滇地轴东缘铅锌矿床铅同位素组成特征及其成因意义. 特提斯地质, 19: 131~139.
- 林方成. 2004. 扬子地台西缘铅锌矿床成因类型及成矿演化. 见: 刘建明等, 编著. 矿床学理论与实践. 北京: 科学出版社, 105~118.
- 刘家军, 郑明华. 1991. 硅岩的新成因——热水沉积作用. 四川地质学报, 12(4): 250~254.
- 刘家军, 郑明华. 1993. 热水沉积硅岩的地球化学. 四川地质学报, 13(2): 110~118.
- 柳贺昌. 1996. 滇、川、黔铅锌成矿区的成矿模式. 云南地质, 15(1): 41~51.
- 彭军, 伊海生, 夏文杰. 1999. 湘黔桂地区晚前寒武纪层状硅质岩的地球化学特征及成因. 地质地球化学, 27(4): 33~39.
- 彭军, 伊海生, 夏文杰. 2000. 扬子板块东南大陆边缘上震旦统热水成因硅质岩的地球化学标志. 成都理工学院学报, 27(1): 8~14.
- 钱建平. 2001. 黔西北威宁—水城铅锌矿带动力成矿作用研究. 地质地球化学, 29(3): 134~139.
- 乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 彭阳, 李海兵, 高劭, 宋彪, 张巧大. 1994. 碳酸盐岩振动液化地震序列. 地质学报, 68(1): 16~33.
- 邵世才, 李朝阳. 1996. 扬子地块西缘震旦系灯影组层控铅锌矿床的成矿规律及形成超大型矿床的可能性. 云南地质, 15(4): 345~350.
- 沈苏, 金明霞, 陆元法. 1988. 西昌—滇中地区主要矿产成矿规律及找矿方向. 重庆出版社, 1~251.
- 孙燕, 肖渊甫, 李承德. 1995. 汉源唐家铅锌矿床同位素地球化学特征及地质意义. 四川地质学报, 16(3): 211~215.
- 涂光炽. 2001. 过去 20 年矿床事业发展的概略回顾. 矿床地质, 20(1): 1~8.
- 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铅锌矿床与美国同类矿床的对比. 矿物岩石地球化学通报, 21(2): 127~132.
- 王汝植, 徐星琪, 赵裕亭, 杨遐和, 李善姬, 何原相, 陈继荣, 佟正祥, 刘协章. 1988. 西昌—滇中地区沉积盖层及其地史演化. 重庆出版社, 1~301.
- 王小春. 1992. 天宝山铅锌矿床成因分析. 成都地质学院学报, 19(3): 10~20.
- 武汉地质学院地球化学教研室. 1979. 地球化学. 北京: 地质出版社, 40~42.
- 杨海生, 周永章, 杨志军, 张澄博, 付伟. 2003a. 华南热水成因硅质岩建造的稀土元素地球化学特征. 矿物岩石地球化学通报, 22(1): 61~64.
- 杨海生, 周永章, 杨志军, 张澄博, 杨小强. 2003b. 热水沉积硅质岩地球化学特征及意义——以华南地区为例. 中山大学学报 (自然科学版), 42(6): 111~115.
- 杨建民, 王登红, 毛景文, 张作衡, 张招崇, 王志良. 1999. 硅质岩岩石化学研究方法及其在“镜铁山式”铁矿床中的应用. 岩石矿物学杂志, 18(2): 108~120.
- 杨应选, 柯成熙, 林方成, 李忠雄, 管士平. 1994. 康滇地轴东缘铅锌矿床成因及成矿规律. 成都: 四川科技出版社, 1~175.
- 伊海生, 彭军, 夏文杰. 1995. 扬子东南大陆边缘晚前寒武纪古海洋演化的稀土元素记录. 沉积学报, 13(4): 131~137.
- 余明烈. 1993. 康滇地轴东缘铅锌矿的成矿构造. 四川地质学报, 13(1): 20~26.
- 曾忻耕. 1990. 地台活化与层控铅锌矿. 矿物岩石, 10(1): 43~51.

- 张立生. 1997. 滇东北地区层控 Pb-Zn-(F-Ba)矿床的热液喀斯特成因. 地球学报, 18(1): 41~52.
- 赵准. 1995. 滇东、滇东北地区铅锌矿床的成矿模式. 云南地质, 14(4): 350~354.
- 郑传仑. 1994. 黔西北铅锌矿的矿质来源. 桂林冶金地质学院学报, 14(2): 113~124.
- 周永章. 1990. 丹池盆地热水成因硅质岩地球化学特征. 沉积学报, 8(3): 75~83.
- 朱赖民, 胡瑞忠, 袁海华, 栾世伟. 1997. 热液改造成矿机制——四川底苏铅锌矿床成矿作用研究. 四川地质学报, 17(3): 182~190.
- ### References
- Adachi M, Yamamoto K, Sugisaki R. 1986. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the Northern Pacific: Their geological significance as indication of ocean ridge activity. *Sedimentary Geology*, 47: 125~148.
- Bostrom K. 1983. Genesis of ferromanganese deposits—diagnostic criteria for recent and old deposits. In: Rona P A et al. ed. *Hydrothermal processes at seafloor spreading center*. New York: Plenum Press, 473~483.
- Chen Zhiliang, Chen Shiyu. 1987. The Tectonic Evolution of the West Margin of the Yangtze Block. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1~172 (in Chinese with English abstract).
- Clayton R N. 1986. High temperature isotope effects in the early solar system. *Reviews in Mineralogy*, 16: 129~139.
- Ding Tiping, Wan Defang, Li Jincheng, Jiang Shaoyong, Song Hebing, Li Yanhe, Liu Zhijian. 1988. Measurement method for silicon isotopes and its application in geology. *Mineral Deposits*, 7(4): 90~95 (in Chinese).
- Douthitt C B. 1982. The geochemistry of the stable isotopes of silicon. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46(8): 1449.
- Gao Ziyang. 1997. Characteristics of Pb isotopes in main Pb-Zn deposits of Yunnan. *Yunnan Geology*, 16(4): 359~367 (in Chinese with English abstract).
- Guo Hongzhong. 1994. Classification and characteristics of Pb-Zn deposits. *Geology and Geochemistry*, 6: 4~8 (in Chinese).
- Han Runsheng, Liu Congqiang, Huang Zhilong, Li Yuan, Chen Jin. 2000. Characteristics of ore-controlling structures and REE composition of fault rocks in Huize Lead-zinc deposit, Yunnan. *J Mineral Petrol*, 20(4): 11~18 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhilong, Li Wenbo, Han Runsheng, Chen Jin. 2004. Several problems involved in genetic studies on Huize superlarge Pb-Zn deposit, Yunnan province. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(2): 105~111 (in Chinese with English abstract).
- Knauth I P, Epstein S. 1976. Hydrogen and oxygen isotope ratios in nodular and bedded cherts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40(9): 1095~1108.
- Li Lianju, Liu Hongtao, Liu Jishun. 1999. A discussion on the source bed of Pb-Zn-Ag deposits in northeast Yunnan. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 8(6): 333~339 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenbo, Huang Zhilong, Wang Yinxi, Chen Jin, Han Runsheng, Xu Cheng, Guan Tao, Yin Mudan. 2004. Age of the giant Huize Zn-Pb deposits determined by Sm-Nd dating of hydrothermal calcite. *Geological Review*, 50(2): 189~195 (in Chinese with English abstract).
- Li Yanhe, Ding Tiping, Wang Defang. 1995. Experimental study of silicon isotope dynamic fractionation and its application in geology. *Chinese Journal of Geochemistry*, 14(4): 212~219.
- Li Yanhe, Wang Defang, Jian Shaoyong, Zhong Hua. 1995. Silicon isotope study on the Meishucun Precambrian—Cambrian boundary section, Yunnan. *Geological Review*, 41(2): 179~187 (in Chinese with English abstract).
- Li Ying, Qi Sijing, Ma Guoliang, Zhang Zhenfei. 1999. Major characteristics and formation conditions of super large sedimentary—hydrothermal sulfide ore deposits in north China. *Journal of Xi'an Engineering University*, 21(4): 19~24 (in Chinese with English abstract).
- Lin Fangcheng. 1994. Some new opinions on the Daliangzi lead-zinc deposit, Huidong county, Sichuan province. *Mineral Deposits*, 13(2): 126~136 (in Chinese with English abstract).
- Lin Fangcheng. 1995. Lead isotopic compositions and genesis of the lead-zinc deposits on the eastern margin of the Kang-Dian Axis. *Tethyan Geology*, 19: 131~139 (in Chinese with English abstract).
- Lin Fangcheng. 2004. Genetic types and evolution of Pb-Zn deposits on western margin of the Yangtze Craton. In: Liu Jianming et al., eds. *Theoretics and practices of mineral deposits*. Beijing: Publishing House of Science, 105~118 (in Chinese).
- Liu Hechang. 1996. Mineralization models for lead-zinc belt in adjacent region of Yunnan, Sichuan and Guizhou. *Yunnan Geology*, 15(1): 41~51 (in Chinese).
- Liu Jiajun, Zheng Minghua. 1991. New genesis of silicate—hydrothermal sedimentation. *Acta Geologica Sichuan*, 12(4): 250~254 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiajun, Zheng Minghua. 1993. Geochemistry of hydrothermal sedimentary silicate. *Acta Geologica Sichuan*, 13(2): 110~118 (in Chinese with English abstract).
- Marchig V, Gundlach H, Moller P, Schley F. 1982. Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments. *Marine Geology*, 50(3): 241~256.
- Murray R W. 1990. Rare earth element as indication of different marine depositional environments in chert and shale. *Geology*, 18: 268~271.
- Pen Jun, Yi Haisheng, Xia Wenjie. 1999. Origin and geochemical characteristics of Late Precambrian bedded silicalites in Hunan, Guizhou and Guangxi. *Geology—Geochemistry*, 27(4): 33~39 (in Chinese with English abstract).
- Pen Jun, Yi Haisheng, Xia Wenjie. 2000. Geochemical criteria of the Upper Sinian hydrothermal chert on the southeast continental margin of the Yangtze plate. *Journal of Chengdu University of Technology*, 27(1): 8~14 (in Chinese with English abstract).
- Qian Jianping. 2001. Tectono-dynamic mineralization in Weining—Shuicheng Pb-Zn ore belt, northwestern Guizhou. *Geology—Geochemistry*, 29(3): 134~139 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Xiufu, Song Tianrui, Gao Linzhi, Peng Yang, Li Haibing, Gao Mai, Song Biao, Zhang Qiaoda. 1994. Seismic sequence in carbonate rocks by vibrational liquefaction. *Acta Geologica Sinica*, 68(1): 16~33 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Xiufu, Gao Linzhi. 2002. Earthquake events in Neoproterozoic and Early Paleozoic and its relationship with supercontinental Rodinia in North China. *Chinese Science Bulletin*, 45(10): 931~935.
- Savin S M, Epstein S. 1970. The oxygen isotopic compositions of coarse grained sedimentary rocks and minerals. *Geochim.*

- Cosmochim. Acta, 34(3): 323~329.
- Shao Shicai, Li Zhaoyang. 1996. Metallogenetic rules of the stratabound Pb-Zn deposit in Dengying Formation of the west margin of Yangzi Massif and its possibility of forming super-large ore deposit. *Yunnan Geology*, 15(4): 345~3051 (in Chinese with English abstract).
- Shen Su, Jin Mingxia, Lu Yuanfa. 1988. Mineralization laws and prospect for main ore deposits in the Xichang—Central Yunnan area. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1~251 (in Chinese with English abstract).
- Shimizu H, Masuda A. 1977. Cerium in cherts as indicator of marine environment of its formation. *Nature*, 266(24): 346~348.
- Sun Yan, Xiao Yuanfu, Li Chengde. 1995. Isotope geochemistry and its geological implication of Tangjia Pb-Zn Deposit, Hanyuan. *Acta Geologica Sichuan*, 16(3): 211~215 (in Chinese with English abstract).
- Tu Guangchi. 2001. The development of mineral deposit prospecting and research work in the past twenty years: A brief review. *Mineral Deposits*, 20(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiangzhen, Li Chaoyang, Li Zheqin, Li Baohua, Liu Wenzhou. 2002. The comparison of Mississippi Valley-type lead-zinc deposits in southwest of China and in mid-continent of United States. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 21(2): 127~132 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ruzhi, Xu Xingqi, Zhao Yuting, Yang Xianhe, Li Shanji, He Yuanxiang, Chen Jirong, Tong Zhengxiang, Liu Xiezhong. 1988. The sedimentary cover and its history of geological development in Xichang—Central Yunnan area. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1~301 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaochun. 1992. Genetic analysis of the Tianbaoshan Pb-Zn deposit. *Journal of Chengdu College of Geology*, 19(3): 10~20 (in Chinese with English abstract).
- Yamamoto K. 1987. Geochemical characteristics and deposition environment of chert and associated rocks in the Franciscan and Shimanto terranes. *Sedimentary Geology*, 52: 65~108.
- Yang Haishen, Zhou Yongzhang, Yang Zhijun, Zhang Chengbo, Fu Wei. 2003a. REE geochemical characteristics of hydrothermal cherts from south China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 22(1): 61~64 (in Chinese with English abstract).
- Yang Haisheng, Zhou Yongzhang, Yang Zhijun, Zhang Chengbo, Yang Xiaoqiang. 2003b. Geochemical characteristics and significance of hydrothermal cherts—A case study of south China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 42(6): 111~115 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianmin, Wang Denghong, Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Zhang Zaohong, Wang Zhiliang. 1999. The petrochemical research method for silicalite and application to the “Jingtieshan Type” iron deposits. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 18(2): 108~120 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yingxuan, Ke Chengxi, Lin Fangcheng, Li Zhongxiong, Guang Shiping. 1994. Metallogeny of lead-zinc deposits on the eastern margin of Kang-Dian Axis. Chengdu: Sichuan Science and Technology Publishing House, 1~175 (in Chinese with English abstract).
- Yi Haisheng, Peng Jun, Xia Wenjie. 1995. The Late Precambrian paleo-ocean evolution of the southeast Yangtze continental margin: REE record. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13(4): 131~137 (in Chinese with English abstract).
- Yu Minglie. 1993. Ore-forming structures for lead-zinc deposits on the eastern margin of Kang-Dian Axis. *Acta Geologica Sichuan*, 13(1): 20~26 (in Chinese).
- Zartman R E, Doe B R. 1981. Plumbotectonics — the model. *Tectonophysics*, 75: 135~162.
- Zeng Xingeng. 1990. Platform mobilization and stratabound lead and zinc deposit. *Minerals And Rocks*, 10(1): 43~51 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lisheng. 1997. Hydrothermal karst genesis of stratabound Pb-Zn-(F-Ba) deposits in northeast Yunnan. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(1): 41~52 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhun. 1995. Mineralization models for lead-zinc deposits in eastern and northeastern Yunnan. *Yunnan Geology*, 14(4): 350~354 (in Chinese).
- Zheng Chuanlun. 1994. An approach on the source of ore-forming metal of lead-zinc deposits in northwestern part, Guizhou. *Journal of Guilin College of Geology*, 14(2): 113~124 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Chaoxian, Wei Chunsheng, Guo Jiyun, Li Chaoyang. 2001. The source of metals in the Qilinchang Zn-Pb deposit, northeastern Yunnan, China: Pb-Sr isotope constraints. *Econ. Geol.*, 96: 583~598.
- Zhou Yongzhang. 1990. On sedimentary geochemistry of siliceous rocks originated from thermal water in Nandan—Hechi basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 8(3): 75~83 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Laimin, Hu Ruizhong, Yuan Haihua, Luan Shiwei. 1997. Hydrothermal reworking genetic mechanism of Disu Pb-Zn deposit, Sichuan. *Acta Geologica Sichuan*, 17(3): 182~190 (in Chinese with English abstract).

图版说明

图版 I

1. 黑色含有机质微晶硅岩(L1)与微细粒闪锌矿(L2)构成韵律性纹层。微晶硅岩纹层中含一定数量的微细粒闪锌矿和白色硅岩碎屑(薄片扫描图)。
2. 黑色含有机质微晶硅岩(灰黑色层)与微细粒闪锌矿(浅色细纹层)构成韵律性纹层状构造。下部纹层呈波状弯曲,而上部纹层平直。
3. 条纹—条带状构造。由富含有机质的微晶硅岩(黑色层)与微细粒闪锌矿(浅色粉末状)—方铅矿(白色粒状)构成。
4. 角砾状—层状构造。由白云岩角砾岩层(L1)、含有机质泥质硅岩层(L2)、闪锌矿层(L3)、闪锌矿—方铅矿层(L4)构成。白云岩角砾(L1)被含有机质的黑色硅岩胶结。
5. 层间滑动塑性变形构造。富有机质的微晶硅岩(黑色层)与微细粒闪锌矿(浅色纹层)构成的纹层状矿石中,发育层间塑性变形构造(下部),在褶曲轴部闪锌矿层加厚,而在褶曲翼部闪锌矿层被拉长减薄。
6. 麦地坪段薄层状硅质岩发育层间塑性褶曲变形,产生阶梯状裂隙,裂隙被灰白色硅质岩脉充填。箭头所指处为滑动面。
7. 滑塌构造。滑塌角砾岩由深灰色白云岩角砾(Do1)、含有机质泥质硅质岩(Si)及强烈塑性变形的闪锌矿(Sp)构成。右下角为原地厚层块状白云岩(Do2)。箭头指向滑塌同生断层面。
8. 滑塌角砾岩。由深灰色含有机质白云岩角砾(Do)、角砾间塑性变形的细粒闪锌矿脉(Sp)和微细粒黄铁矿纹层(Py)等构成。

图版 II

1. 白云岩碎裂构造。裂隙中被黑色富有机质硅质岩充填,并有较粗

粒的棕黄色闪锌矿脉(Sp)贯入。

2. 角砾状构造。角砾的成分为灰白色微晶白云岩,胶结物为灰黑色微晶白云岩,并含少量微晶硅岩碎屑(粒径<2mm)、胶磷矿、零星的黄铁矿。
3. 角砾状构造。角砾的成分包括微细粒闪锌矿、角砾(Sp,边缘有0—3mm宽的溶解重结晶边)、微晶硅岩角砾(Si-1)。胶结物为黑色富含有机质及少量黄铁矿的微晶硅岩(Si2)。
4. 微晶硅岩、白云质硅岩碎屑(浅色者)分布于胶状二氧化硅-有机质-白云石-黄铁矿-闪锌矿-胶磷矿-粘土矿物等多种成分混杂的

基质中(深色者)(薄片,斜交偏光)。

5. 黄铁矿莓球状构造,周围深色者为有机质-微细粒黄铁矿-微晶硅岩;右侧浅色者为含有机质的微细粒闪锌矿(光片,单偏光)。
6. 灰黑色含有机质的微晶硅岩的裂隙中分布的黑色有机质脉,脉中含有微细粒黄铁矿、闪锌矿、石英等(光片,单偏光)。
7. 含藻白云岩(Dol)中的白云石化亮晶白云石脉(Dol2)的中间,分布沥青(Asp)(单偏光)。
8. 石英中的气/液二相包裹体(薄片,单偏光)。

Geological and Geochemical Characteristics and Genesis of Supper-large-scale Sedex-type Stratiform Lead-Zinc Deposits in the Dadu River Valley on the Western Margin of the Yangtze Craton

LIN Fangcheng^{1,2)}

1) Geoscience College, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059

2) Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu, 610082

Abstract

A number of conformable stratiform Pb-Zn deposits and occurrences such as Heiqu—Xuequ, Honghua, Baixiongou, Hetaoping, Zhongxiping, Baoshuixi and Shuangfengou have been discovered since the 1990s along the Dadu River valley on western margin of the Yangtze Craton by the 207 Geological Team under the Sichuan Geological and Mineral Resources Bureau and local mining companies. These Pb-Zn deposits and occurrences are hosted in the same strathorizon of phosphate and siliceous dolomite of the Maidiping Member on the top of the Upper Sinian—Lower Cambrian Dengying Formation and the ore beds are confined to the siliceous rock and brecciated dolomite layer. The outcrop of the ore beds of the Heiqu—Xuequ deposit has a length of 6000 m, and its Pb-Zn resources is estimated up to 3.7 Mt. The distribution of various deposits and occurrences forms an ore belt over 50 km long and the total Pb-Zn resources in the ore belt is hopeful up to 10 Mt. The typical ore structures, e. g., stratiform, laminated, banded, sedimentary brecciated, interbedded folded, and slump structures, exhibit sedimentary characteristics. The geological and geochemical characteristics of these stratiform deposits are notably different from those of both the MVT-type Pb-Zn deposits hosted in the cover carbonate rocks and VMS-type Pb-Zn deposits hosted in the Mesoproterozoic metamorphic basement rocks of the Huili Group in the regional Pb-Zn ore belt. This study suggests that the silicalite paragenetically related to Pb-Zn ore is originated from hydrothermal sedimentation, and the deposits are genetically Sedex-type. The Pb-Zn mineralization is controlled by the Hanyuan—Emei depression and a contemporaneous fault in the middle of the depression during the Late Sinian—Early Cambrian Dengying Period. The Sedex-type deposit is probably the one with largest resources potential in the Pb-Zn belt on western margin of the Yangtze Craton.

Key words: conformable; stratiform; supper-large-scale; Pb-Zn deposits; sedex type; western margin of the Yangtze Craton

