

## 筏子坝别子型铜锌矿床构造环境与演化\*

## Tectonic Setting and Evolutive Model of Besshi-type Cu-Zn Deposit at Faziba, SE Gansu, NW China

宋学信 郭月敏 徐 珏 徐庆生

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

Song Xuexin, Guo Yuemin, Xu Jue, Xu Qingsheng

(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

**摘要** 根据地层学、岩石化学、稀土元素地球化学以及硫、硅、铅同位素地球化学研究, 提出筏子坝别子型铜锌矿床形成于中晚元古代扬子地块西北缘与俯冲作用有关构造体制中的碧口火山岛弧和弧后盆地交接地带。同时, 还初步拟定了该火山岛弧和与之有关的包括筏子坝矿床在内的金属矿床演化模式。

**关键词** 别子型 构造环境 演化 筏子坝铜锌矿床

筏子坝矿区位于甘肃陇南文县碧口镇北西约 8 km 处, 座落于碧口水库上端让水河和白龙江交汇处的崇山峻岭之中。我们曾首次提出并确定筏子坝铜锌矿床属 VMS (火山成因块状硫化物) 矿床中别子型 (Besshi type) 矿床, 又因查明其伴生锌含量较高, 所以确称其为别子型铜锌矿床 (宋学信等, 1998)。根据对比, 筏子坝铜锌矿床与日本、芬兰、挪威、南非、美国等国的典型的别子型矿床有许多共性或相似之处。这些共性基本可归纳如下: ① 矿体赋存于变基性火山岩与变细碎屑岩或变中性火山碎屑岩层之间; ② 矿体多呈板或似层状, 厚度小 (0.5~5 m), 延深大 (>350 m); ③ 主要矿石矿物组合为黄铜矿+黄铁矿+闪锌矿+磁 (赤) 铁矿, 主要脉石矿物为绿泥石+石英; ④ 矿石条带状构造发育, 围岩蚀变以绿泥石化最为常见; ⑤ 矿石含钴较高 ( $n \times 100 \times 10^{-6}$ ); ⑥ 硫同位素组成变化范围较小, 以幔源硫为主; ⑦ 铅同位素组成变化范围较大, 投影点较分散且呈线性排列, 模式年龄大多比主岩年龄年轻; ⑧ 基性火山岩主岩稀土元素型式为平缓型或右倾平缓型曲线,  $\delta\text{Eu}$  为 0.65~0.83,  $\delta\text{Ce}$  为 1 左右; ⑨ 矿床成带出现, 但单个矿床规模较小。

## 1 矿床的大地构造位置

筏子坝铜锌矿床赋存于中晚元古代碧口群火山-沉积岩系内, 地处秦岭褶皱带、扬子地台和松潘甘孜褶皱带交汇处。关于该区域的确切的大地构造位置, 传统的大地构造观点认为其属于秦岭褶皱系的西秦岭南缘摩天岭褶皱带 (李锁成等, 1993; 邱柱国等, 1993; 中国地质大学 (武汉) 地球化学系等, 1995, 图 1); 板块构造观点认为其属于扬子板块北缘俯冲增生柱 (甘肃地矿局区调队, 1989) 或裂隙-增生带 (耿树方等, 1994) 或沟-弧-盆体系 (陶洪祥等, 1988; 裴先治, 1989; 夏祖春等, 1989; 秦克令等, 1994)。至于碧口群火山-沉积岩系在这一沟-弧-盆体系中的位置, 又有两种看法: 一种认为属于古海沟-俯冲构造环境 (裴先治, 1989); 另一种认为是火山岛弧带环境 (秦克令等, 1994)。根据我们的研究, 认为秦克令等的看法较为合理。此外, 卢一伦等 (1995) 认为碧口群是南秦岭裂谷南缘初始阶段发育的一套喷发-沉积产物。

## 2 构造环境及其判据或佐证

别子型矿床形成的构造环境一直是一个颇有争议的问题, 有人认为其产于弧前海槽或海沟中, 有人认为形成于拗拉槽环境, 亦有人认为是弧间槽或弧后断裂盆地的产物。反正他们一般都是在与俯冲作用有关的构造体制下形成, 并与岛弧有某种成因关系。

\* 本研究得到国家自然科学基金(编号: 49872034)、地质矿产部定向基金(地科定 95-15)和“九五”国家攻关项目(96-914-03-03-04) 资助  
第一作者简介 宋学信, 男, 1939 年生, 研究员, 主要从事矿床学、矿物学、地球化学和矿产资源战略研究。

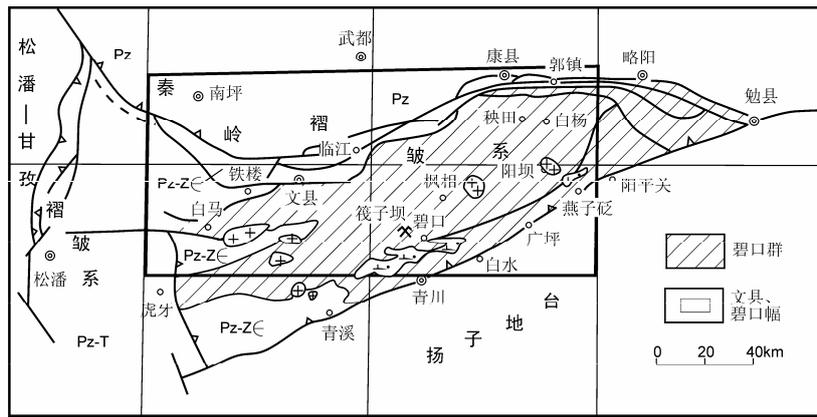


图1 筏子坝铜锌矿床和碧口群所处大地构造位置图

(转引自中国地质大学(武汉)地球化学系等<sup>①</sup>, 1995)

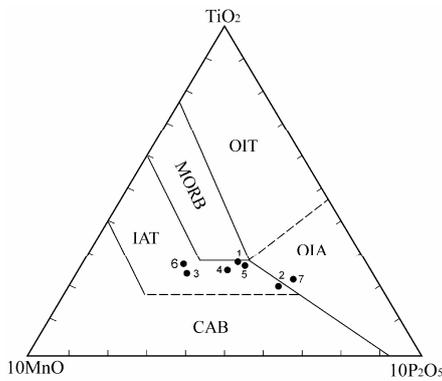


图2 阳坝—碧口地区碧口群火山岩

TiO<sub>2</sub>-10MnO-10P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>图 (原图据E.D.Mullen,1983)

OIT—大洋岛屿拉斑玄武岩; OIA—大洋岛屿碱性玄武岩;

MORB—洋中脊玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩;

CAB—钙碱性玄武岩

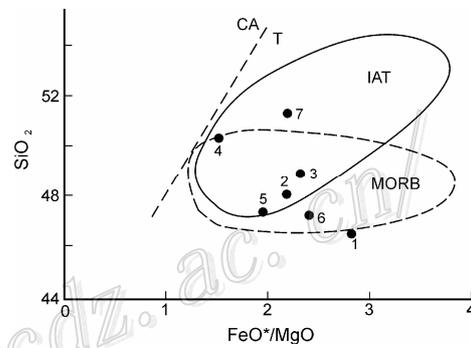


图3 阳坝—碧口地区碧口群火山岩

FeO\*/MgO-SiO<sub>2</sub>图

(原图据 A.Miyashiro,1974, 1975; )

CA—钙碱性系列; T—拉斑玄武岩系列;

IAT—岛弧拉斑玄武岩; MORB—大洋中脊玄武岩

至于筏子坝别子型矿床, 我们更认为是扬子古板块西北缘中晚元古代沟-弧-盆体系中火山岛弧带与弧后盆地交界带的产物, 现将六方面的证据论述如下。

### 2.1 赋矿地层岩石

筏子坝铜锌矿床的赋矿地层为碧口群中下部的阳坝组 (即中元古界蓟县系阳坝组, 代号 Jxy)。其为一套浅到次深海相海底火山喷发的基性、中基性夹陆源碎屑岩、泥质岩建造。矿区内出露的阳坝组下部层位地层, 由绿色中浅变质火山岩和浅色中浅变质细碎屑沉积岩 (我们认为其中亦包括一些变中酸性的火山岩) 相间组成。绿色岩石主要为绿帘绿泥片岩、绿泥片岩和绿泥阳起片岩 (我们还发现有石英绿帘钠长绿泥片岩); 浅色岩石有绢云石英片岩、绢云片岩、绿泥绢云石英片岩、铁白云岩 (我们鉴定为绿泥石英钠长铁白云岩) 和磁 (赤) 铁石英岩。矿体主要赋存于绿色和浅色岩石过渡带内的磁 (赤) 铁石英岩中或其上下。

### 2.2 岩石化学特征

筏子坝矿区及其外围碧口群阳坝组基性火山岩只有部分程度不等地保留着其原岩的结构、构造特征, 大部分均已变为绿色片岩, 包括绿帘绿泥片岩、绿帘钠长石英片岩、绿泥片岩或绢云绿泥片岩等。这些变基性火山岩一般Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3.42%~7.12%) 和CaO (6.98%~12.94%) 含量较高, 但其Na<sub>2</sub>O (1.47%~2.80%) 和MgO (4.13%~6.36%) 含量较低, 所以真正以富钠为特征的细碧岩较少。

① 甘肃南部碧口群分布区区域化探异常筛选、查证方法技术研究. 1995. (科研报告).

为了判断碧口群基性火山岩形成的构造环境, 我们投绘了它们的  $TiO_2-10 MnO-10 P_2O_5$  图 (图 2)。从该图可见, 本区碧口群基性火山岩大多属于岛弧环境下形成的拉斑玄武岩系列, 但也有个别样品属大洋岛屿环境下形成的碱性玄武岩。

在  $FeO^*/MgO-SiO_2$  图 (图 3) 上, 碧口群基性火山岩亦主要落于岛弧拉斑玄武岩区或岛弧拉斑玄武岩区与大洋中脊玄武岩区过渡部位, 少数落于大洋中脊玄武岩区内, 说明其主要形成于岛弧环境, 部分形成于大洋环境。

### 2.3 稀土元素参数与型式

筏子坝矿区变质基性火山岩具有较低的  $\delta Eu$  值 (0.65~0.76) (Song et al., 1999), 即具有较明显的负铕异常, 这说明它们在海底与海水反应和在以后的变质过程中由于长石的分解, Eu 曾有一定释放和排出; 筏子坝矿区块状黄铜黄铁矿石和变质基性火山岩均具一定程度的负铕异常 ( $\delta Ce=0.61\sim 0.96$ ), 说明它们为海底喷流沉积产物并可能与负铕异常明显的古海水反应过; 筏子坝矿区块状黄铜黄铁矿石和变质基性火山岩的 Sm/Nd 比值较高, 分别为 0.282~0.493 和 0.231~0.364, 这说明它们来源较深, 可能为幔源。此外, 上述矿石和岩石的稀土元素型式相似, 即均未显示出明显的右倾趋向, 这说明两者来源一致, 而且轻重稀土分馏不明显。

### 2.4 硅同位素地球化学

表 1 列出了筏子坝矿区及外围、中国华北和北美一些地(矿)区的石英岩、磁铁石英岩和绿色片岩的硅同位素组成。

从表 1 不难看出筏子坝矿区及外围的石英岩和含铜磁铁石英岩硅同位素组成与华北地台白云鄂博和八家子等地的石英岩相似, 同属浅海环境下的陆源碎屑沉积成因, 而明显不同于属于浅海化学沉积成因的北美苏必利尔湖式铁燧岩或磁铁石英岩 ( $-1.6\%\sim -1.9\%$ ), 亦不同于与海底基性火山岩伴生或互层的弓长岭铁矿区磁铁石英岩 ( $-0.8\%\sim -2.2\%$ )。筏子坝外围绿色片岩的硅同位素组成为较小的负值 ( $-0.1\%\sim -0.4\%$ ), 与弓长岭斜长角闪岩 ( $-0.2\%\sim -0.6\%$ ) 相似, 显然原来均属海底基性火山喷发成因。此外筏子坝外围绿色片岩与马里亚纳岛弧玄武岩的硅同位素组成 ( $-0.4\%\sim -1.0\%$ ) 亦有些接近, 这也可能佐证碧口群阳坝组基性火山岩的形成环境类似于岛弧环境。

表 1 石英岩含铜、磁铁石英岩和绿色片岩的硅同位素组成

矿区或地区 (样品数)	岩矿石类型	$\delta^{30}Si_{NBS-28}/\%$	资料来源
筏子坝矿区及外围(5)	石英岩和含铜磁铁石英岩	0.0~0.7	本研究
筏子坝矿区外围(3)	绿色片岩	-0.1~-0.4	本研究
内蒙白云鄂博(2)	石英岩	0.0~0.1	丁悌平等, 1994
辽宁八家子铅锌矿区(1)	石英砂岩	0.1	丁悌平等, 1994
辽宁弓长岭铁矿区(8)	磁铁石英岩及其中石英	-0.8~-2.2	蒋少涌等, 1992
辽宁弓长岭铁矿区(2)	斜长角闪岩	-0.2~-0.6	蒋少涌等, 1992
加拿大苏必利尔湖区(2)	磁铁石英岩	-1.6	丁悌平等, 1994
美国梅萨比铁矿带(1)	铁燧岩	-1.9	本研究
马里亚纳岛弧(10)	玄武岩	-0.4~-1.0	Douthitt, 1982

### 2.5 硫同位素组成

我们对别子型筏子坝及其外围的白皂矿床的 12 件黄铁矿单矿物样品进行了测定。此外, 还搜集了碧口群中黑矿型矿床 (包括刘家坪铜锌黄铁矿床、二里坝含铜黄铁矿床、红土石铜锌黄铁矿床、东沟坝铅锌金银矿床) 和其他别子型矿床即阳坝铜 (钴) 矿床, 以及国外某些别子型矿床 (包括日本别子矿床、芬兰 Outokumpu 矿床) 的硫同位素数据 (表 2)。

从表 2 可看出, 筏子坝和白皂矿床黄铁矿的硫同位素成分变化较小, 平均值为 1.1‰, 说明其硫源单一和均一化程度很高, 可能为地幔来源。阳坝矿床黄铁矿的  $\delta^{34}S$  值 (2.0‰) 与筏子坝和白皂矿床的相近, 来源相同。至于属于黑矿型的刘家坪、二里坝、红土石和东沟坝矿床, 其黄铁矿的  $\delta^{34}S$  值为中一低的正值, 变化范围不大, 平均值亦比较接近, 说明它们的硫同位素均一化程度较高, 为某种混合硫源 (很可能是以地幔硫为主, 以地层硫为辅)。

而日本的别子和芬兰的 Outokumpu 等典型的别子型铜 (锌) 矿床的硫同位素组成特征与筏子坝相似, 亦为幔源硫。格里年科等 (1980, 中译本) 在论述 Outokumpu 等前寒武纪硫化物矿床时亦曾指出: “合理的推测应该是前寒武纪黄铁矿类硫化物矿石的硫同位素组成与陨石接近而且经过了均一化作用, 这证实了它们的硫源是深部的高温的”。

### 2.6 铅同位素组成及模式年龄

表 3 示出了筏子坝、白皂及其他别子型矿床黄铁矿 (硫化物) 铅同位素比值和模式年龄。

表2 筏子坝及其他碧口群中相似或相关矿床黄铁矿硫同位素组成

矿床名称	$\delta^{34}\text{S}_{\text{Py}} / \text{‰}$		资料来源
	变化范围	平均值	
1. 文县筏子和白皂 Cu-Zn 黄铁矿床	-2.5~1.8	1.1(12)*	本研究
2. 康县阳坝 Cu(Co)黄铁矿床		2.0(1)	成都地院等, 1989(未刊)
3. 宁强刘家坪 Cu-Zn 黄铁矿床		9.8(1)	西北有色地研所, 1986(未刊)
4. 宁强二里坝含铜黄铁矿床	5.4~8.0	6.9(10)	陕西地矿二队, 1984(未刊)
5. 略阳红土石 Cu-Zn 黄铁矿床	7.9~10.3	9.7(14)	陕西地矿二队, 1984(未刊)
6. 略阳东沟坝 PbZnAuAg 矿床	5.8~13.6	8.2(12)	陕西地矿二队, 1984(未刊)
7. 日子别子矿床	1~2(3)		格里年科等, 1980
8. 芬兰 Outokumpu 矿床	-1.5~3.5(8)		格里年科等, 1980

\* 括号内数字为样品数。

由表3可以看出筏子坝矿床黄铁矿的铅同位素比值变化范围较大, 即 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  16.960~18.612,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  15.320~16.039,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  36.364~38.932, 据此而计算出的模式年龄亦变化范围很大 (270~957 Ma)。这说明矿区成矿作用具多期性(新元古代、早古生代和晚古生代)、均一化程度低或铅的来源较复杂, 而挪威的别子型矿床铅同位素比值变化很小, 说明其均一化程度高或来源比较单一, 它们的模式年龄主要为晚古生代。日本的别子型矿床的铅同位素比值变化亦很大, 而且包括极高的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值 (19.321~19.378), 说明后期有放射成因铅加入。

表3 筏子坝—白皂铜矿区及其他别子型矿床黄铁矿的铅同位素比值与模式年龄

样品编号	矿石类型	测定矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	模式年龄 / Ma
BB-5'	块状含铜黄铁矿石	黄铁矿	16.983	15.324	36.477	874
BB-6	条带状黄铁矿石	黄铁矿	17.213	15.385	36.825	775
98BZ3-8	条带状含铜黄铁矿石	黄铁矿	17.020	15.426	36.730	957
99BZ3-12	含黄铁矿绿泥片岩	黄铁矿	17.174	15.321	36.730	731
F3-55	块状黄铜黄铁矿石	黄铁矿	16.981	15.377	36.523	933
F3-57	条带状含铜黄铁矿石	黄铁矿	16.960	15.320	36.364	886
F2-12-1	块状含铜黄铁矿石	黄铁矿	18.512	16.039	39.131	593
F2-36	条带状黄铜黄铁矿石	黄铁矿	18.374	15.808	38.673	435
F2-46	块状黄铜黄铁矿石	黄铁矿	17.977	15.479	37.850	330
F3-56	条带状含铜黄铁矿石	黄铁矿	18.612	15.916	38.932	395
F2-18	黄铜矿-黄铁矿细脉	黄铁矿	18.498	15.760	38.706	270
98WE-2	含金黄铁矿石英脉	黄铁矿	18.058	15.521	38.095	322
挪威 Tromsheim 和 Sulitjelma 矿区, Fox et al., 1988	硫化物(6)		18.032	15.514	37.70	161
			-18.425	-15.607	-38.03	-373
日本别子型矿床, Sato et al., 1980	黄铁矿(10)		17.983	15.422	37.600	163
			-19.378	-15.637	-38.775	-301*

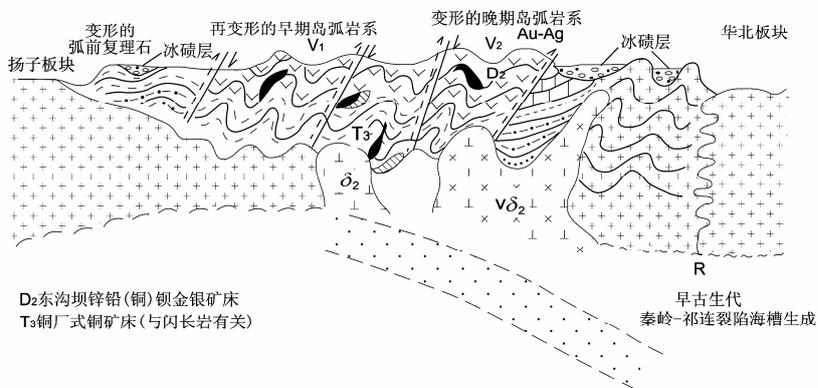
注: 模式年龄计算所用参数:  $a_0=9.307$ ,  $b_0=10.294$ ,  $c_0=29.476$ ,  $t=4.57$  Ga; \* 有6个样品为负值。

在Zartman和Doe (1981)的铅同位素比值的大地构造环境投影图上, 日本别子型矿床、挪威的别子型矿床和筏子坝矿床表现出明显的差异性, 即日本别子型矿床的投影点比较分散, 但全部分布在大洋中脊和大洋岛屿玄武岩区内, 它们显然是地幔来源的, 这与日本中部晚古生代岩浆作用具有镁铁质岩石喷发的基本特点相一致 (Sato and Sakai, 1980)。而挪威Trondheim和Sulitjelma矿区硫化物铅同位素比值投影点呈线性展布于从Doe和Zartman (1979)的地幔到上地壳模式生长曲线的范围之间。这种线性趋势可用幔源铅(玄武岩主岩)和上地壳端元铅(硅铝层基底或玄武岩周围的陆缘沉积物)的混合来解释。至于其形成环境可为拗拉槽环境, 亦不排除属于硅铝质弧后盆地或其他可能环境 (Fox et al., 1988)。而筏子坝矿床的投影点比较分散, 在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上, 主要分布在岛弧区及其附近, 在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上, 亦主要分布在岛弧区及下地壳区附近, 但是其仍显出线性分布之势, 说明其可能属幔-壳混合源, 形成于与陆缘岛弧带有关的大地构造环境。

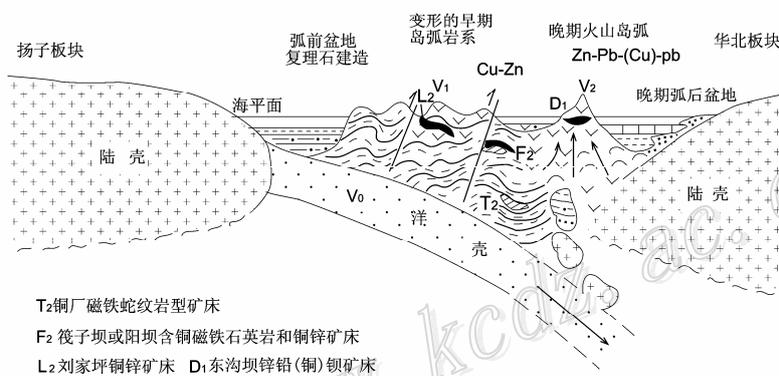
### 3 构造与成矿演化模式

前已述及，筏子坝铜锌矿床形成于碧口古火山岛弧带上。那么，其确切部位在哪里，我们认为应产于古火山岛弧与弧后盆地交接地带，详见其构造与成矿演化模式图 (图 4)。

(C) 新元古代晚期(震旦纪早期, 800-700Ma)



(b) 新元古早期(青白口纪, 1000-800Ma)



(a) 中元古代中晚期(蓟县纪, 1400-1000Ma)

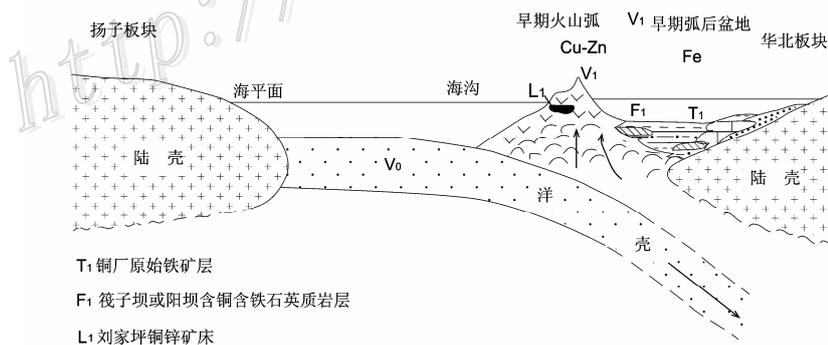


图 4 扬子板块西北缘碧口沟-弧-盆体系构造与成矿演化模式

由图 4 可以看出：在中元古代中晚期 (1400~1000 Ma, 相当蓟县纪, 亦即任纪舜的早扬子旋回晚期), 扬子板块西北边缘洋壳向华北板块下俯冲, 碧口早期火山弧形成, 基性到中酸性火山熔岩及火山碎屑岩大量发育, 在弧后盆地有陆缘碎屑岩和碳酸盐岩沉积。关于成矿作用, 在这一时期, 首先在弧后盆地底部形成铜厂式铁矿的原始铁矿沉积层, 稍后在火山弧与弧后盆地交接处形成筏子坝-阳坝式含铁含铜石英质岩层, 最后在火山弧上火山机构附近的角斑质火山碎屑岩层内形成黑矿型刘家坪 (燕子砭) 铜锌矿床。

在新元古代早期 (1000~800 Ma, 相当青白口纪亦即任纪舜的晚扬子旋回), 洋壳继续俯冲, 弧前盆地形成, 并堆积了复理石建造, 早期火山弧和弧后盆地的火山-沉积岩系褶皱变形, 晚期火山弧和弧后盆地形成, 并在晚期火山弧的角斑质火

山岩系中形成黑矿型东沟坝式锌铅(铜)钼矿床,而早期岛弧岩系和早期弧后盆地的(火山)沉积岩系中黑矿型刘家坪式铜锌矿床、铜厂式原始铁矿层和筏子坝—阳坝式含铁石英质岩层受到变形、变质和改造,特别是铜厂式原始铁矿层变为磁铁蛇纹岩型铁矿,筏子坝—阳坝式含铁含铜石英质岩石变质为含铜磁铁石英岩,叠加了火山热液铜、锌矿化、黄铁矿化和铁碧玉化,并在其下面或附近层间断裂内淀积了块状含磁铁矿黄铜闪锌黄铁矿石,即现在见到的别子型筏子坝—阳坝式铜锌矿床。

在新元古代晚期(800~700 Ma,相当震旦纪早期,亦即澄江期),扬子板块与碧口岛弧发生强烈碰撞,早期岛弧岩系进一步变形褶皱并产生一系列具逆冲性质的韧性剪切带,晚期岛弧岩系亦发生强烈褶皱,其中的东沟坝式锌铅(铜)钼矿床遭受改造,叠加了金银矿化,同时并有大量中性、中酸性深成岩体和钠质辉绿岩脉侵入(其中与闪长岩相伴有铜厂式热液铜矿形成)。此时的沉积地层主要为滨浅海相和海陆交互的冰碛层和砂岩、泥岩、砾岩等。

当需说明的是筏子坝式别子型矿床(亦包括阳坝矿床)与产于同一岛弧带的刘家坪式黑矿型矿床在主岩、控矿构造、矿物共生组合、Co含量与Co/Ni比值、硫同位素组成等方面均有差别,后者以角斑质凝灰岩为主岩,与火山机构关系密切、矿物共生组合包括方铅矿和重晶石、Co含量和Co/Ni比值偏低和 $\delta^{34}\text{S}$ 值较高(混合源)为特征。

**致谢** 在野外工作期间得到甘肃地矿局一队、筏子坝铜矿和中国地质大学(武汉)的支持与帮助,李锁成高级工程师参加了部分工作,在成文时与徐志刚研究员进行过有益的讨论,谨在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- 丁梯平,等.1994.硅同位素地球化学.北京:地质出版社.31~49.
- 格里年科 B A, 格里年科 J H. 1980. 硫同位素地球化学. 赵瑞译. 北京: 科学出版社.
- 耿树方,等.1994.秦巴金属成矿概论.北京:地质出版社.31~47.
- 李锁成,金府实.1993.甘肃文县筏子坝铜金矿地质特征及找矿方向.甘肃地质科技情报,2~3:17~22.
- 蒋少涌,等.1992.辽宁弓长岭太古代条带状硅铁建造的硅同位素组成特征.中国科学(B辑),(6):1~6.
- 卢一伦,等.1997.碧口群的层序及时代.中国区域地质,16(3):305~314.
- 裴先治.1989.南秦岭碧口群岩石组合特征及其构造意义.西安地质学院学报,11(2):46~56.
- 秦克令,等.1994.碧口古岛弧带构造演化与成矿.河南地质,12(4):304~317.
- 邱柱国,刘永丰.1993.甘肃康县阳坝金钴铜矿床地质特征与成矿机制.地矿部秦巴科研项目办公室等编.秦巴金矿论文集.北京:地质出版社.147~161.
- 宋学信,郭月敏,等.1998.甘肃文县筏子坝别子型铜锌矿床的稳定同位素地球化学特征.矿床地质,17(增刊):779~782.
- 夏祖春,夏林圻,等.1989.南秦岭碧口群海相火山岩岩石学研究.中国地质科学院西安地质矿产所刊.25:97~107.
- Douthitt C B. 1982. The geochemistry of the stable isotopes of silicon. Geoch. et Cosmoch. Acta, 46: 1449.
- Fox J S, Farguhar R, Rui I and Cook N. 1988, Genesis of basalt-hosted massive sulphide deposits from the Trondheim and Sulitjelma districts, Norway: ore lead isotopic considerations. Mineralium Deposita, 23 (4): 276~285.
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. Am. J. Sci., 274: 321~335.
- Mullen E D. 1983. MnO/TiO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: A minor element discriminant for basic rocks of oceanic environments and its implications for Petrogenesis. Earth planet. Sci. Lett, 62: 53~62.
- Sato K and Sasaki A. 1980. Lead isotopic features of the Besshi-type deposits and its bearing on the ore lead evolution. Geochem. Journal, 14: 303~315.
- Song X, Guo Y, Xu Q and Xu J. 1999. Geology and REE geochemistry of the Besshi-type Cu-Zn deposit at Faziba, SE Gansu, NW China. In: Stanley C J et al. (eds) Mineral Deposits: Processes to Processing, Volume 1. Rotterdam: A. A. Balkema, 593~596.
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics- the model. Tectophysics, 75: 135~162.