

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

## 甘肃李家沟铅-锌矿床成矿地球化学条件的初步研究

林 兵

(浙江省地质矿产研究所, 杭州)



甘肃李家沟铅-锌矿床属同生热液沉积-变质热液弱改造型层控矿床。文中按不同成矿阶段详尽地探讨了该矿床的成矿物理化学条件。依据对矿床成矿物质来源的系统研究, 作者认为, 该矿床成矿金属物质、矿石硫和成矿流体水主要分别取自基底地层、海水硫酸盐的还原硫以及渗流加热的大气降水和部分回灌海水。最后, 本文建立了该矿床的成矿模式。

### 一、地质概况

李家沟铅-锌矿床位于甘肃西成铅-锌矿田北部成矿亚带的中段, 大地构造位置处于秦岭地槽系海西褶皱带中部。

西成矿田内出露地层主要为泥盆系, 次为二叠系、三叠系和侏罗系等。泥盆系可进一步划分为上统洞山组; 中统西汉水组、安家岔组和下统吴家山组。中泥盆统主要为一套浅变质的浅海相具海侵式的类复理石建造。

从区域上看, 许多地方构成基底的地层主要为碧口群和志留系沉积和火山沉积建造, 主要岩石有含碳质千枚岩、粉砂岩、硅质灰岩和凝灰质板岩等。

该区发育有东西向、南北向和北东向三组基底断裂。它们对盖层和区内矿产分布有着严格的制约作用。其中东西向断裂最大, 控制着盖层和矿田的分布; 南北向基底断裂具切割深、规模大(横穿切割基底碧口群、志留系和矿田内泥盆系)和活动强的特点, 从加里东期到喜马拉雅山期均有活动, 南北向断裂发展到后期, 往往具张性特点, 成为导矿和储矿构造, 使区内一些成型矿床多位于南北向基底断裂中<sup>1)</sup>。

李家沟铅-锌矿床位于西成矿田吴家山背斜向东倾没的北翼部位。矿区含矿层为中泥盆统安家岔组第一层, 该层上岩性段主要岩石为结晶灰岩和大理岩, 下岩性段主要为黑云石英片岩; 尚有少量矿体产于安家岔组第二层的石英片岩、大理岩夹白云岩层中。矿体赋存部位主要处于浅海台地灰岩相向浅海陆棚细碎屑岩相过渡带, 且矿体有赋存在古地

1) 张洪杰、陈耀光, 1984, 西成铅锌矿田卫片影像特征及其找矿意义。西成铅锌矿田地质科研论文集(中国有色金属工业总公司甘肃地质勘探公司), 第 209—212 页。

本文 1989 年 10 月收到, 1990 年 12 月改回, 季国容编辑。

形低洼处的趋势,如厂坎—李家沟—向阳山长达 7.5km,发育三个滞流洼地,它们分别控制着三个矿床,且三个台内洼地的分布范围也和矿化规模成正相关。

矿区内铅—锌矿体成群、成带顺层产出,只少量含致密块状矿石的富矿体出现斜切层理现象,矿体产出受安家岔组层位和层内破碎带控制。根据含矿岩石矿体群可分为片岩含矿系统和碳酸盐岩含矿系统。前者以浸染状、块状构造矿石为主,并出现较多的伴生黄铁矿和磁黄铁矿;后者则以条带状、块状矿石为主,金属矿物(主要为黄铁矿)呈稀疏或稠密浸染状构成条纹,密集的条纹组成条带状矿石,部分极细粒金属矿物构成隐晶质矿物条带或组成致密块状矿石。矿床的矿石物质组成简单,矿石矿物以闪锌矿、方铅矿和黄铁矿为主,其次为磁黄铁矿、毒砂和黄铜矿等。

矿区内侵入岩主要有印支期的黄渚关杂岩体(以花岗闪长岩为主)和厂坝二长花岗岩,两个岩体的钾—氩同位素年龄分别为  $184 \pm 1 - 222 \pm 26 \text{ Ma}$  和  $196 \pm 11 - 201 \pm 3 \text{ Ma}^{1)}$ 。

该区地层普遍经受了区域浅变质作用,在此基础上,局部又有接触变质作用的叠加。区域变质作用主要与晚古生代的板块对接挤压有关,而接触变质则由印支期岩浆侵入造成。

## 二、地层地球化学特征

远离矿区的区域正常沉积区内的泥盆系中,绝大部分化学元素都服从正态分布,元素含量波动较小。除铅含量略高外,其它成矿元素及其伴生元素平均含量皆低于大陆地壳丰度值。而李家沟矿区含矿层中,成矿元素和伴生元素含量高而波动,其中铅、锌元素平均含量比正常沉积区高出 6 倍之多。矿区含矿层中的化学元素服从正态分布型式的种数显著减少<sup>2)</sup>。R 型因子分析表明,在矿区地层中还出现两套正常沉积区没有的成矿元素组合:第一套为反映铅、锌矿化作用的元素组合,由元素铅、锌、镉、铜、锰组成;第二套系包括钴、镍、铜、铁元素的反映黄铁矿化的元素组合。这些事实说明,矿区含矿层中的成矿元素和伴生元素有相当一部分是成矿作用叠加的产物。其次,矿区碳酸盐岩的元素富集程度往往高于碎屑岩<sup>3)</sup>,这表明碳酸盐岩是该区有利于铅、锌成矿的主要容矿岩石。

在基底碧口群和志留系白龙江群中,成矿元素铅、锌的平均含量要比西秦岭泥盆系丰度高数倍,其它伴生元素含量也普遍比泥盆系丰度高。特别需要指出的是,在碧口群中,某些厚度较大的凝灰质岩层中的锌、铅含量分别都高于 100ppm;而志留系中某些碳质岩层(其  $C_{\text{有机}}$  含量为 0.24—0.44%)中的锌、铅含量甚至可高达 200—300ppm。这些地层不仅富含成矿元素,而且地层厚度巨大,分布广泛,因而它们具有雄厚的成矿物质基础。成矿元素偏提取实验结果显示,基底岩石的锌、铅皆主要以硫化物形式存在,且成矿元素的易溶物相(吸附相和有机相)占有相当的比例。如志留系含碳质千枚岩中吸附相的锌、铅含量占全岩总量的 7.5% 和 8.3%,有机相的锌、铅含量占全岩总量的比例更高,分别为 9.0% 和 17.9%。而成矿元素在不易淋滤、萃取的硅酸盐相中所占的比例,仅为全岩的 6.0% 至 12.4%。可见基底地层中,成矿元素主要赋存在硫化物等易于被淋滤、转移的物

1) 喻锡锋、龚元杰,1984,西成铅锌矿田区域地质及矿产的基本特征。西成铅锌矿田地质科研论文集(中国有色金属工业总公司甘肃地质勘探公司),第 16—17 页。

2) 林兵,1989,化学元素概率分布型式的新认识。地质科技情报(中国地质大学),第 1 期,第 87—92 页。

相中。

### 三、矿床成因和矿质来源的地球化学研究

#### 1. 成矿物理化学条件

李家沟矿床在形成过程中, 经历了中低温同生热液沉积成矿作用和中高温变质热液改造成矿作用(表 1)。成矿流体具  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{-CH}_4\text{-CO}$  型气相成分和  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-\text{-K}^+(\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-)$  型液相成分。从同生热液沉积成矿期到变质热液改造成矿期, 成矿流体

表 1 李家沟铅-锌矿床成矿物理化学条件一览表

Table 1 Inventory of the metallogenic physicochemical conditions of the Lijiagou Pb-Zn deposit

| 成矿物理化学参数         |                                                | 成 矿 期                                                                                              |                                       |
|------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
|                  |                                                | 同生热液沉积成矿期                                                                                          | 热液改造成矿期                               |
| T(°C)            |                                                | 130—260                                                                                            | 240—340                               |
| P(Pa)            |                                                | $400 \times 10^5$                                                                                  | $690 \times 10^5$ — $877 \times 10^5$ |
| 气<br>相<br>成<br>分 | 气相成分类型                                         | $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{-N}_2\text{-CH}_4\text{-CO}$                                          |                                       |
|                  | $\text{CO}_2$ 摩尔数                              | 5.672—15.058                                                                                       | 0.649—6.475                           |
|                  | $\text{CH}_4$ 摩尔数                              | 0.046—0.351                                                                                        | 0.099—0.624                           |
|                  | R(还原指数)                                        | 0.044—0.091                                                                                        | 0.137—0.253                           |
|                  | $\log f_{\text{CO}_2}$                         | 1.509—1.871                                                                                        | 0.909—1.872                           |
|                  | $\log f_{\text{CH}_4}$                         | -0.558—0.330                                                                                       | 0.180—0.934                           |
|                  | $\log f_{\text{O}_2}$                          | -40.807—-37.232                                                                                    | -36.241—-33.948                       |
|                  | $\log f_{\text{S}_2}$                          | -14.143—-13.624                                                                                    | -12.189—-11.579                       |
| 液<br>相<br>成<br>分 | 液相成分类型                                         | $\text{Na}^+\text{-Cl}^-\text{-K}^+(\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{SO}_4^{2-}, \text{F}^-)$ |                                       |
|                  | 盐度(NaClwt%)                                    | 18—20                                                                                              | 6—22                                  |
|                  | $\text{Na}^+(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ | 11.1—26.8                                                                                          | 3.8—6.6                               |
|                  | $\text{Na}^+/\text{K}^+$                       | 3.4—57.1                                                                                           | 3.1—24.9                              |
|                  | $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$                 | 4.6—6.9                                                                                            | 0.8—84.2                              |
|                  | $\text{Cl}^-/\text{F}^-$                       | 4.0—27.7                                                                                           | 29.1—204                              |
|                  | $\log m_{\text{H}_2\text{S}}$                  | -5.983—-4.196                                                                                      | -6.647—-5.500                         |
|                  | $\log m_{\text{HS}^-}$                         | -9.103—-6.376                                                                                      | -9.527—-7.240                         |
|                  | pH                                             | 3.54—4.48                                                                                          | 3.78—4.92                             |
|                  | Eh(V)                                          | -0.231—-0.221                                                                                      | -0.287—-0.245                         |
|                  | $\log m_{\text{Zn}^{2+}}$                      | -4.475                                                                                             |                                       |
|                  | $\log m_{\text{ZnCl}^+}$                       | -2.049                                                                                             |                                       |
|                  | $\log m_{\text{ZnS}(\text{H}_2\text{S})_2}$    | -13.271                                                                                            |                                       |
|                  | $\log m_{\text{ZnF}^+}$                        | -6.555                                                                                             |                                       |
|                  | $\log m_{\text{Pb}^{2+}}$                      | -4.365                                                                                             |                                       |
|                  | $\log m_{\text{PbCl}^+}$                       | -3.109                                                                                             |                                       |
|                  | $\log m_{\text{PbS}(\text{H}_2\text{S})_2}$    | -15.431                                                                                            |                                       |
|                  | $\log m_{\text{PbF}^+}$                        | -6.445                                                                                             |                                       |
|                  | $\Sigma \text{Zn(m)}$                          | $8.967 \times 10^{-3}$                                                                             |                                       |
|                  | $\Sigma \text{Pb(m)}$                          | $8.215 \times 10^{-4}$                                                                             |                                       |

的总压力(P)、 $\text{CH}_4$ 含量、硫逸度( $f_{\text{S}_2}$ )和氧逸度( $f_{\text{O}_2}$ )等有所增高,而 $\text{H}_2\text{S}$ 和 $\text{HS}^{1-}$ 含量以及液相中的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量比例有所降低。随成矿作用的演化,成矿流体的酸性程度略有减弱,而还原程度则有增强趋势。

物理化学参数计算结果表明,成矿流体中锌和铅的氯络合物远比其它形式的络合物浓度高,说明成矿元素主要以氯络合物形式存在。成矿流体中锌和铅的总溶解度分别为 $8.967 \times 10^{-3}(\text{m})$ 和 $8.215 \times 10^{-4}(\text{m})$ ,分别都相当于 $n \times 10^3 \text{ppm}$ ,这很好地解释了为什么在这范围不大的地段内,会集中分布储量很大的铅-锌矿的地质事实。

## 2. 矿物化学成分的标型特征

本文收集、整理了国内外数千件各种成因黄铁矿、闪锌矿和方铅矿的化学成分资料,建立了成因标型元素的综合判别指标(表2)。李家沟矿床矿石的黄铁矿、闪锌矿和方铅矿的化学成分与这些综合判别指标对比,可知其标型元素地球化学特征与国内外层控型矿床类似,而与其它成因矿床明显不同。

表2 不同成因矿床金属矿物标型元素的判别指标

Table 2 Genetic criteria of different kinds of deposits by the typochemical elements in the metallic minerals

| 矿物          | 类型<br>参数 | 层 控 型                     | 岩浆热液型                           | 火山热液型                   | 李家沟矿床*      |
|-------------|----------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------|
| 黄<br>铁<br>矿 | Se(ppm)  | <3                        | >10                             | >10                     | 3.0(5)      |
|             | Te(ppm)  | <10                       | >20                             | <10                     | 4.8(5)      |
|             | Co/Ni    | <1                        | 1—3                             | 3—60                    | 0.324(5)    |
|             | Se/Te    | <1—>1                     | <1—>1                           | >2                      | 0.625(5)    |
|             | S/Se     | $n \times 10^5$           | $n \times 10^3 - n \times 10^4$ | $n \times 10^3$         | 151100(5)   |
| 闪<br>锌<br>矿 | In(ppm)  | <10                       | >30                             | >30                     | 4.6(5)      |
|             | Ga(ppm)  | $n - n \times 10^4$ (变化大) | $n - n \times 10$ (变化小)         | $n - n \times 10$ (变化小) | 3—22(5)     |
|             | Ge(ppm)  | $n - n \times 10^3$ (变化大) | <3                              | <6                      | 6—11(5)     |
|             | Mn(ppm)  | $n - <2000$ (变化大)         | >2000                           |                         | 800—2500(5) |
|             | Ga/In    | $\gg 1$                   | <1                              | <1                      | 2.17(5)     |
|             | Ge/In    | $\gg 1$                   | $\ll 1$                         | $\ll 1$                 | 1.61(5)     |
|             | In/Cd    | <0.01                     | >0.01                           | >0.01                   | 0.0015(5)   |
|             | Cd/Mn    | $n - n \times 10^2$       | <1                              | n                       | 1.80(5)     |
| 方<br>铅<br>矿 | Ag(ppm)  | <800                      | >800                            | <800                    | 313(4)      |
|             | Sb/Bi    | >20                       | <20                             |                         | 28.6(4)     |

\* 由中国地质科学院岩矿测试分析研究所测定;括号中数字为统计样品数。

## 3. 硫、铅同位素特征及矿质来源

矿床硫化物的硫同位素组成 $\delta^{34}\text{S}$ 值在14.11—28.30‰之间波动,明显正向偏离零值,即具重硫特征。不同矿物的平均 $\delta^{34}\text{S}$ 值为:黄铁矿 22.20‰;闪锌矿 20.78‰;方铅矿 19.63‰;重晶石 23.39‰;磁黄铁矿 23.40‰。利用矿床主成矿阶段共生平衡的硫化物矿物对的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,根据平衡矿物对之间的 $\delta^{34}\text{S} - \Delta\delta^{34}\text{S}$ 回归线法<sup>[2]</sup>求出该矿床主成矿阶段的

矿液总硫同位素组成  $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma}$  值为 22.13‰。

李家沟矿床的硫化物和硫酸盐平均  $\delta^{34}\text{S}$  分馏值只有 2.24‰。就每种硫化物而言, 黄铁矿、闪锌矿和方铅矿的最高  $\delta^{34}\text{S}$  值分别为 28.30‰、24.20‰ 和 24.10‰, 这些数值已超过矿床中硫酸盐的平均  $\delta^{34}\text{S}$  值(23.39‰)。实验结果早已证实, 当大部分硫酸盐被还原而进入终了阶段时, 从残余硫酸盐中分解出的硫化氢, 其  $\delta^{34}\text{S}$  值比原始硫酸盐还高。在自然界中, 当细菌活动范围内的硫酸盐数量有限时, 就可以观察到这一同位素分馏现象<sup>[3]</sup>。因此可以认为李家沟矿床的矿石硫直接来自于封闭环境中细菌还原海水硫酸盐。

该矿床矿石样品铅同位素组成变化较稳定(表 3), 且多数落在  $\mu = 9.6$  单阶段演化曲线附近, 并构成一个集中区。矿石铅 B.R.Doe 模式年龄从 450Ma 变化至 616Ma, 且主要集中在 500Ma 左右, 明显老于赋矿地层( $D_2$ )的时代, 因而不具矿化年龄意义, 而可能表征该区矿石铅主要来自古老的基底地层。三件正常沉积区中泥盆统中的黄铁矿, 系典型沉积、成岩产物, 它们的铅同位素组成、模式年龄和源区特征值变化程度很大, 且铅同位素比值相对较低, 与矿石铅明显不同, 两者无直接成因联系。而碧口群样品的铅同位素组成稳定, 其组成变化范围、模式年龄和源区特征值  $\mu$ 、 $K$ 、 $\omega$  与矿石铅较接近, 说明两者可能有一定的成因联系。区域内的岩浆岩及其有关矿床的铅模式年龄为 418—674Ma, 比侵入时代(海西—燕山期)老, 暗示可能是更古老的铅重熔活化的结果。与矿石铅相比, 不仅其组成较低, 且源区特征值和矿石铅亦差异甚大, 说明两者是在两个不同体系中演化的铅。

表 3 西成铅-锌矿田铅同位素组成及源区特征值

Table 3 Isotopic composition, model age,  $\mu$ ,  $\omega$ , and  $K$  from the Xicheng Pb-Zn orefield

| 地质体                                       |           | 李家沟矿床         | 中泥盆统          | 碧口群           | 岩浆岩及有关矿床      |
|-------------------------------------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 样 数                                       |           | 9             | 3             | 3             | 11            |
| $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ | Ra        | 17.574—18.459 | 16.686—17.940 | 17.644—18.126 | 17.415—17.860 |
|                                           | $\bar{X}$ | 18.018        | 17.370        | 17.929        | 17.668        |
| $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ | Ra        | 15.473—15.707 | 15.353—15.498 | 15.471—15.553 | 15.405—15.576 |
|                                           | $\bar{X}$ | 15.608        | 15.423        | 15.525        | 15.488        |
| $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ | Ra        | 37.537—38.733 | 36.668—37.087 | 38.066—38.394 | 37.389—38.326 |
|                                           | $\bar{X}$ | 38.178        | 36.931        | 38.196        | 37.831        |
| Doe 年龄<br>(Ma)                            | Ra        | 450—616       | 291—1117      | 351—567       | 418—674       |
|                                           | $\bar{X}$ | 513           | 705           | 437           | 566           |
| $\mu$                                     |           | 9.62          | 9.25          | 9.37          | 9.33          |
| $\omega$                                  |           | 38.17         | 35.52         | 37.53         | 37.47         |
| $K$                                       |           | 3.97          | 3.84          | 4.01          | 4.02          |

注: Ra 为范围;  $\bar{X}$  为平均值; 由核工业部北京第三研究所测定。

#### 4. 碳、氢、氧同位素及成矿流体来源

李家沟矿床的矿石和近矿围岩中方解石样品的平均  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  值为  $16.30\text{--}22.95\text{‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值为  $-1.79\text{--}4.51\text{‰}$ <sup>1)</sup>。在  $\delta^{18}\text{O}\text{--}\delta^{13}\text{C}$  相关图上, 样品的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  值回归线向海水和当地雨水方向延伸, 暗示着成矿流体有海水和大气降水的参与。

杜海燕(1987)测定了西成矿田李家沟等矿床的矿物包裹体中  $\text{CO}_2$  气体的碳同位素组成, 其  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值变化范围为  $-1.76\text{--}5.80\text{‰}$ 。这一数值不同于深成岩  $\text{CO}_2$  气体的  $\delta^{13}\text{C}$  值 ( $-14\text{--}-28\text{‰}$ , J. Hoefs, 1973)<sup>[4]</sup>, 而与世界上不同地热区  $\text{CO}_2$  气体的  $\delta^{13}\text{C}$  值 ( $-2\text{--}-6\text{‰}$ , B. H. Кулешов, 1983)<sup>[5]</sup> 相近, 说明该矿床成矿流体具有大气降水渗流加热的成因特征。

该矿床成矿流体的  $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$  值处于  $-76.00\text{--}-88.60\text{‰}$  之间(图 1), 接近当地大气降水的  $\delta\text{D}$  值 ( $-90\text{‰}\pm$ , 张理刚, 1985)<sup>[6]</sup>。成矿流体比当地大气降水略富 D, 可能是由于热卤水与海水混合效应引起的结果。与当地大气降水相比, 成矿流体的  $\delta^{18}\text{O}$  值发生“漂移”, 显示出富  $^{18}\text{O}$  的特征。H. Craig (1963)<sup>[7]</sup> 对各类地热水氢、氧同位素组成进行研究后, 也发现由大气降水渗流加热的富氯地热水的  $\delta\text{D}$  值与当地大气降水的  $\delta\text{D}$  值相

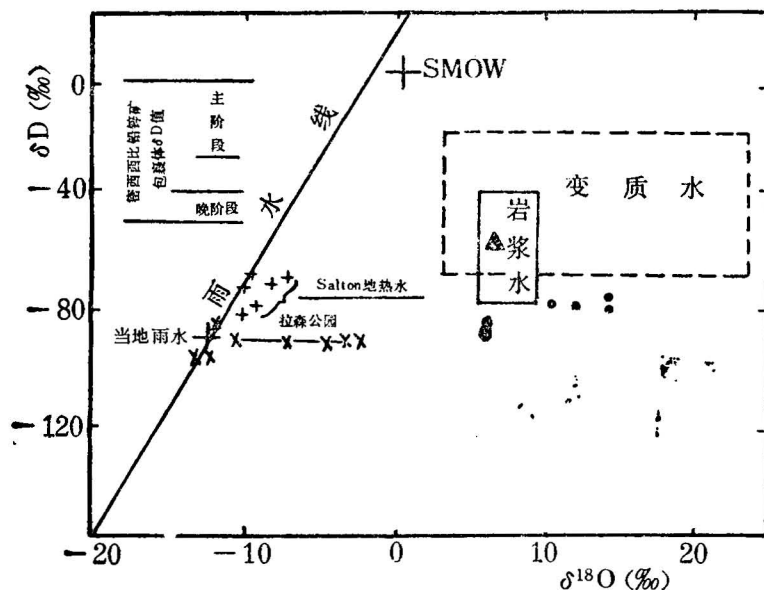


图 1 成矿流体氢、氧同位素组成图

(据 H. Craig, 1966 和 H. P. Taylor, 1979 改绘, 并补充李家沟矿区资料)

Fig. 1 Diagram showing hydrogen and oxygen composition of the metallogenic fluids

(Modified after H. Craig, 1966 and H.P. Taylor, 1979, and added the data of the Lijiagou ore district)

● 李家沟矿床; ▲ 黄渚关岩体

● Li jiagou deposit; ▲ Huangzhuguan intrusive body

1) 由核工业部北京第三研究所测试。

近,但氧同位素组成则向富 $^{18}\text{O}$ 方向发生“漂移”。

黄渚关岩体石英包裹体中水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 值准确地落入原生岩浆水区域内,显示出与成矿流体明显不同的成因特征。

按公式 $^{[8]}(W/R)_{\text{封}} = (\delta^{18}\text{O}_{\text{f岩}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{f岩}}) / [\delta^{18}\text{O}_{\text{f岩}} - (\delta^{18}\text{O}_{\text{f岩}} - \Delta)]$ 和 $(W/R)_{\text{开}} = \ln[(W/R)_{\text{封}} + 1]$ ,利用该区岩石和矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别计算了封闭体系和开放体系环境下大气降水循环过程中的水/岩值(W/R)。结果表明该区岩石最高的 $(W/R)_{\text{H}}$ (重量上的水/岩值)约等于0.125。

### 5. 基底地层铅、锌的活化机制

在确定了基底地层中有丰富的成矿物质基础和其成矿元素主要赋存形式有利于热液的淋滤和活化转移后,周乐尧(1988)<sup>[9]</sup>根据本区成矿物理化学条件,设计并进行了基底地层铅、锌活化机制的成矿模拟实验。结果证明成矿温度增高能增强铅、锌的活化能力(图2-I)。在压力低于 $300 \times 10^5\text{Pa}$ 时,铅和锌淋滤量随压力升高而增大,并在 $300 \times 10^5\text{Pa}$ 时达到最大淋取量(图2-II)。

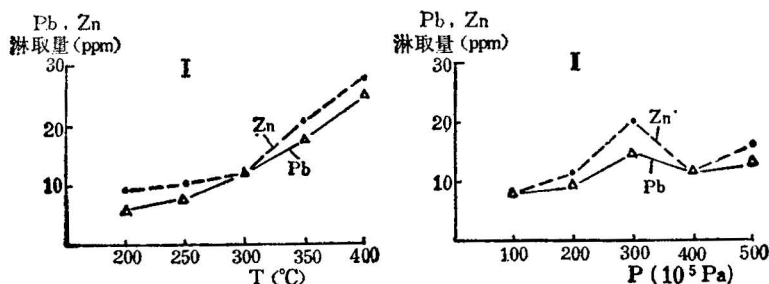


图2 基底岩石铅、锌淋滤实验曲线

Fig. 2 Experimental curves showing lead and zinc extraction of the basement rock

实验样品: 碧口群粉砂岩,碎至140目,重2g;实验溶液:  $\text{Na}^+(1\text{m})$ ,  $\text{K}^+(0.4\text{m})$ ,  $\text{Ca}^{2+}(0.1\text{m})$ ,  $\text{Cl}^-(1.6\text{m})$ ,  $\text{pH} = 5$ 。I— $P = 4 \times 10^7\text{Pa}$ 时,不同温度下的淋滤实验; II— $T = 300^\circ\text{C}$ 时,不同压力下的淋滤实验。(据周乐尧(1988)实验结果编绘)

Test sample: 2 gram of siltstone of the Bikou Group, crushed into 140 meshes; test solution:  $\text{Na}^+(1\text{m})$ ,  $\text{K}^+(0.4\text{m})$ ,  $\text{Ca}^{2+}(0.1\text{m})$ ,  $\text{Cl}^-(1.6\text{m})$ ,  $\text{pH} = 5$ 。I—the experiment with different temperatures at  $4 \times 10^7\text{Pa}$ ; II—the experiment with different pressures at  $300^\circ\text{C}$ . (The curve drawn on the experimental data from Zhou Leyao) (1988).

据前文所述,本区岩石最高的 $(W/R)_{\text{H}}$ 值约为0.125,即相当于每克岩石最多含有0.125g循环水。铅、锌淋滤实验表明,在温度 $250^\circ\text{C}$ 、压力 $400 \times 10^5\text{Pa}$ 时,1g岩石可淋出约 $10^{-3}\text{g}$  (10ppm) 锌和 $8 \times 10^{-6}\text{g}$  (8 ppm) 铅。这意味着若淋出的锌和铅都能进入循环水中的话,则结合 $(W/R)_{\text{H}}$ 值可知,基底岩层和循环热卤水反应后,使每克岩石所含的0.125g循环水可溶有最高为 $10^{-3}\text{g}$  锌和 $8 \times 10^{-3}\text{g}$  铅,即使得该区成矿流体中的锌、铅浓度可达80ppm和64ppm。含有这么高浓度的金属元素的热卤水,只要时间和来源充分,就足以形成铅-锌矿床。

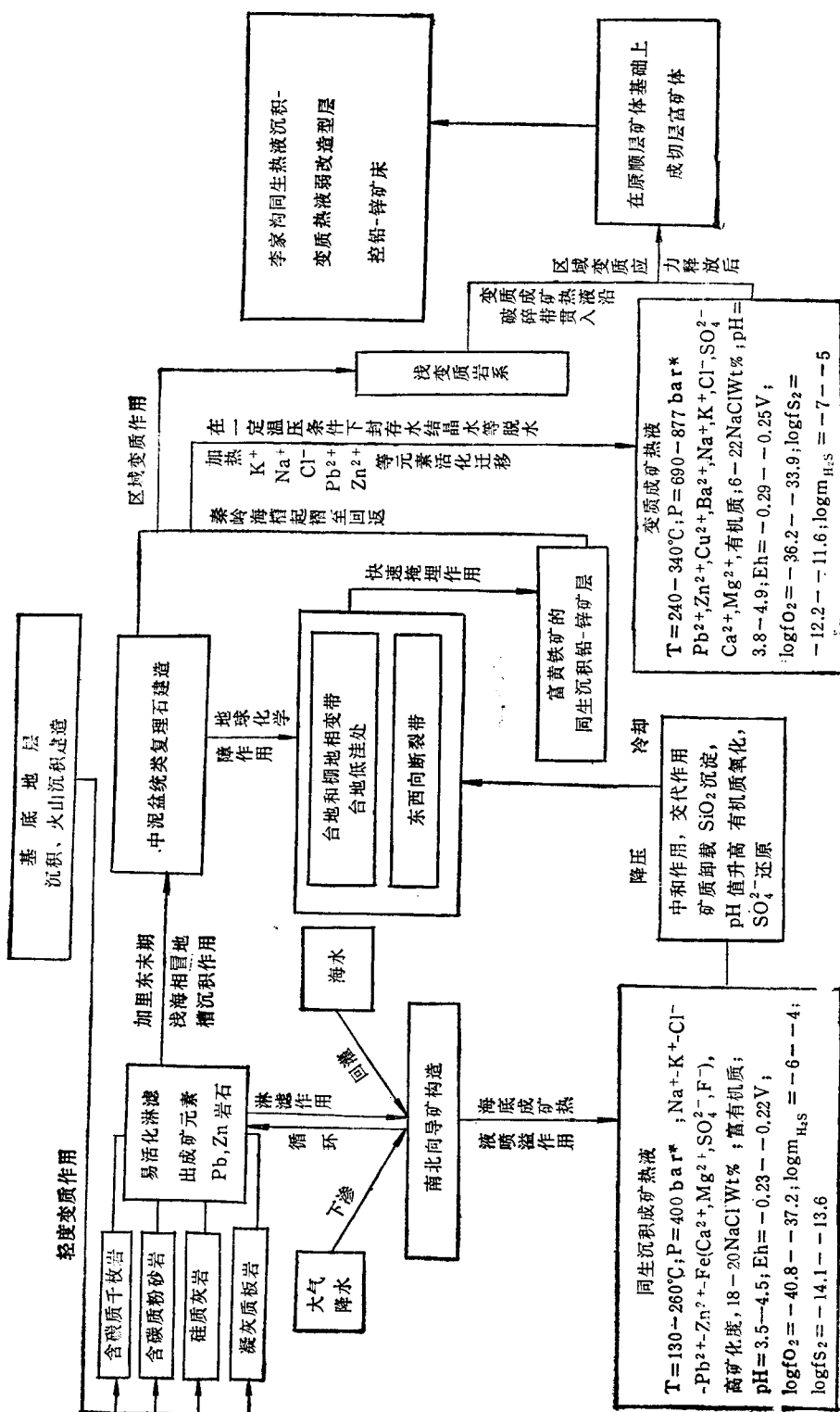


图 3 李家沟矿床成矿模式示意图

Fig. 3 Model of the metallogenic process of Li Jiagou deposit

\* 1bar = 10<sup>5</sup> Pa



## 结 语

通过本文研究,可初步得出下列几点主要认识:

1) 该区泥盆系中没有成矿元素高本底含量的层位,中泥盆统含矿层也不是成矿元素锌、铅、铜的原始矿源层。在同生热液沉积成矿过程中,含矿层只具时控和层控意义,而无提供金属成矿的意义。

2) 系统的地层地球化学和铅同位素等研究业已证明,李家沟矿床的成矿金属物质主要取自基底地层。

3) 该矿床矿石硫主要取自海水硫酸盐的还原硫。由于矿床成矿环境较为封闭、局限,致使硫同位素分馏效应十分显著。成矿流体中的水主要来源于渗流加热的大气降水和部分回灌海水。

4) 李家沟矿床应属同生热液沉积-变质热液弱改造型层控铅-锌矿床。

5) 综合该矿床成矿地质特征和本文系统的成矿地球化学研究成果,以地球化学系统物质为基础,按不同成矿阶段和成矿作用分别解剖和分析,建立该矿床的成矿模式<sup>1)</sup>(图3)。藉以对该矿床进行直观的成矿历史分析,以求有助于了解该矿床的成矿条件,有利于成矿预测。

本研究工作始终是在张本仁教授指导下进行的,并承蒙张本仁教授审阅了本文初稿。在此深表谢意!

## 参 考 文 献

- [1] 林兵,1988,甘肃省成县李家沟层控铅锌矿床原生地球化学异常特征及其找矿意义。物探与化探,第3期,第174—177页。
- [2] Pinckney, D.M. and Rafter, T.A., 1972, Fractionation of sulfur isotopes during ore-deposition in the upper Mississippi Valley Pb-Zn district. Econ. Geol., Vol. 67, pp. 315—327.
- [3] 赵瑞译(格里年科, B.A. 和格里年科, Л.Н. 著),1981,硫同位素地球化学。第50—52页。科学出版社。
- [4] 丁悌平译(霍夫斯, J. 著),1976,稳定同位素地球化学。第68页。科学出版社。
- [5] 沈渭洲等,1987,稳定同位素地质。第148页。原子能出版社。
- [6] 张理刚,1985,稳定同位素在地质科学中的应用。第57页。陕西科学技术出版社。
- [7] Craig, H., 1963, The isotope geochemistry of water and carbon in geothermal areas. In: E. Tongiorgi (Editor), Nuclear Geology on Geothermal Areas. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Spoleto, pp. 17—53.
- [8] Taylor, H. P., 1978, Oxygen and hydrogen isotope studies of plutonic granitic rocks, Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 38, p. 177.

---

1) 林兵,1988,西秦岭泥盆系层控铅锌矿带成矿地球化学模式及其预测系统的建立。博士学位论文,第176—182页。

## GEOCHEMICAL CONDITIONS OF METALLIZATION OF THE LIJIAGOU Pb-Zn DEPOSIT, GANSU PROVINCE

Lin Bing

(China University of Geoscience, Wuhan)

### Abstract

This paper deals systematically with the geochemical conditions of metallization, genesis and ore-forming material source of the Li jiagou Pb-Zn deposit in the Xicheng orefield. The following conclusions have been reached: 1) the ore-forming metals in this area were mainly derived from the basement rather than ore-bearing strata (the Middle Devonian). This view has been proved by the systematic studies of the stratigraphic geochemistry and lead isotopic study; 2) the ore sulfur of this deposit was mainly derived from marine sulphates through biogenic reduction; 3) the water of the mineralizing fluids of the deposit was derived from the heated infiltrating meteoric water and partially from the recharged sea water; 4) the Li jiagou deposit should belong to the syngenetic hydrothermal deposition and metamorphosed hydrothermal weakly reworked stratabound Pb-Zn deposit.

Finally, the metallogenic model of this deposit has been established which shows directly the geochemical conditions of metallization of the deposit.

### 作 者 简 介

林兵,生于 1956 年 5 月,籍贯上海,1988 年获中国地质大学地球化学博士学位,现任浙江省地质矿产研究所工程师,从事矿床地球化学研究,通讯处:杭州市体育场路 232 号浙江省地质矿产研究所,邮政编码: 310007。