

文章编号:0258-7106(2003)01-0309-08

# 分散元素铟富集的矿床类型和矿物专属性\*

张乾 刘志浩 战新志 邵树勋

(中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室, 贵州 贵阳 550002)

**摘要** 文章研究了我国一些铁锰矿床、铜矿床及铅锌硫化物矿床矿石及矿物中铟的含量变化特点,发现In在不同类型的铅、锌、铜、铁、锰等矿床中并不大量富集,在这些矿床中矿石平均 $w_{In}$ 大都低于 $10 \times 10^{-6}$ ;在锡石硫化物矿床和富含锡的铅锌多金属矿床中,矿石中 $w_{In}$ 平均可达 $80 \times 10^{-6}$ 以上,这类矿床中铟的工业储量可达数百吨甚至数千吨,80%以上的铟都富集在闪锌矿中。研究结果表明,铟的富集成矿具有矿床类型和矿物专属性,这种专属性对铟资源的寻找与利用具有重要意义。

**关键词** 地球化学 矿床类型 铟 富铟矿床 专属性 综述

**中图分类号**: P618.82

**文献标识码**: A

铟是地球上最稀少的元素之一,其地壳丰度仅为 $0.04 \times 10^{-6}$ (黎彤等,1990)。通常认为,铟以分散状态存在于其他元素组成的矿物中,很难独立形成具有工业意义的矿床(刘英俊等,1984)。我国对铅锌硫化物矿石中In的工业利用标准厘定为 $5 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ (全国矿产储量委员会办公室,1987),其下限与金矿床工业开采的品位一致,也说明In元素的稀有性。近年来的研究表明,In的富集有一定的规律可循,虽然目前尚未发现只有In本身可以利用而无其他可利用元素的真正意义上的独立In矿床,但是,它却大量富集于特定类型的矿床和少数几种其他元素组成的矿物中,可以构成大型乃至超大型共(伴)生铟矿床(Zhang, 1998)。

## 1 铟富集的矿床类型专属性

### 1.1 我国不同类型矿床中铟的含量特征

据笔者对国内数十个铅锌矿床(包括沉积改造型及热水沉积层状矿床、产于火山岩中的矿床、与岩浆作用有关的矿床如夕卡岩型、岩浆热液型矿床)的调查和研究,绝大多数矿床的矿石平均 $w_{In}$  $1 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$ (表1)。不难看出,不同类型的铅锌矿床中In的富集程度并不高。一个拥有1亿吨矿石量的铅锌矿床,平均 $w_{In}$ 按 $10 \times 10^{-6}$ 计,其金属量仅

1 000t,而铅锌金属量(Pb+Zn品位按5%计)肯定达到超大型规模(Pb+Zn储量大于500万吨)。

我国不同类型的铜矿床也不富集In。表1中德兴、城门山、武山、金满、羊拉、拉么等铜矿床矿石的 $w_{In}$ 平均在 $4 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$ 之间。

刘英俊等认为,赤铁矿石中In的平均品位可达0.1%,这样的铁矿床可作为In矿床单独开采(刘英俊等,1984)。实际上,这种富In的铁矿床是很少见的,通常仅见于某些富In的锡石硫化物矿床氧化带(全国矿产储量委员会办公室,1987),但很少能形成大的In矿床,如广东金子窝锡多金属矿床氧化带中的氧化铁矿石, $w_{In}$ 最高可达0.3%,但In金属量并不能构成大规模的工业矿床。而贫In的硫化物矿床氧化带,In的含量很低,如广东大降坪硫化物矿床上部氧化带型铁矿床中 $w_{In}$ 平均仅为 $4 \times 10^{-6}$ 。石录铁矿、镜铁山式铁铜矿床、鞍山式铁矿的分析结果显示,矿石 $w_{In}$ 低于 $3 \times 10^{-6}$ (表1),说明铁矿床不是In元素的富集场所。

湖南桃江、贵州遵义等处的大型锰矿床的分析资料(表1)显示,锰矿石的 $w_{In}$ 在 $0.1 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$ 之间,有些样品甚至检测不出In。另外,很多矿床还缺乏系统深入的研究,现有的零星资料显示,金矿床不含具有工业意义的In, $w_{In}$ 一般为 $n \times 10^{-6}$ 。资料显示,赣南17处钨锡矿床 $w_{In}$ 均小于 $10 \times 10^{-6}$

\* 本文受国家自然科学基金资助项目(批准号:40172037)资助

第一作者简介 张乾,男,1955年生,研究员,从事矿床地球化学研究工作。

收稿日期 2002-11-04; 改回日期 2003-04-15。张绮玲编辑。

表 1 中国不同类型矿床矿石及闪锌矿中铟含量  
Table 1 Indium content of ores from different types of ore deposits in China

| 矿床类型                  | 矿床       | t/℃ | 矿石  |                  |                  | 闪锌矿              |     |             |             |             |
|-----------------------|----------|-----|-----|------------------|------------------|------------------|-----|-------------|-------------|-------------|
|                       |          |     | 样品数 | $w_{In}/10^{-6}$ | $w_{Zn}/10^{-6}$ | $w_{Sn}/10^{-6}$ | 样品数 | $w_{Zn}/\%$ | $w_{Fe}/\%$ | $w_{In}/\%$ |
| 铁锰矿床                  |          |     |     |                  |                  |                  |     |             |             |             |
|                       | 甘肃镜铁山    |     | 7   | 3                | 75               | 3                |     |             |             |             |
|                       | 海南石录     |     | 7   | 2                | 44               | 5                |     |             |             |             |
|                       | 辽宁鞍山     |     | 5   | 1                | 28               | 3                |     |             |             |             |
|                       | 广东大降坪氧化矿 |     | 13  | 4                | 358              | 6                |     |             |             |             |
|                       | 贵州桃江     |     | 5   | 2                | 46               | 2                |     |             |             |             |
|                       | 贵州遵义     |     | 6   | 2                | 22               | 1                |     |             |             |             |
| 铜矿床                   |          |     |     |                  |                  |                  |     |             |             |             |
|                       | 江西德兴     | 280 | 7   | 4                | 22100            | 11               |     |             |             |             |
|                       | 云南金满     | 210 | 6   | 5                | 6300             | 15               |     |             |             |             |
|                       | 云南羊拉     | 220 | 12  | 5                | 15000            | 25               |     |             |             |             |
|                       | 甘肃白银     | 270 | 9   | 7                | 9500             | 31               | 4   | 54.65       | 11.37       | 3           |
|                       | 广西拉么     | 315 | 6   | 9                | 120000           | 58               | 11  | 53.19       | 12.36       | 77          |
|                       | 江西城门山    | 310 | 6   | 6                |                  | 60               |     |             |             |             |
|                       | 安徽金鸡岭    | 290 | 5   | 7                |                  | 55               |     |             |             |             |
| 沉积岩中的铅锌矿(热水沉积、沉积改造型等) |          |     |     |                  |                  |                  |     |             |             |             |
|                       | 内蒙古东升庙   |     | 9   | 3                | 6900             | 3                | 4   | 55.06       | 9.28        | 8           |
|                       | 内蒙古炭窑口   |     | 10  | 4                | 13000            | 5                | 3   | 55.12       | 8.99        | 7           |
|                       | 河北高板河    |     | 7   | 1                | 90000            | 1                | 5   | 53.69       | 6.42        | 2           |
|                       | 辽宁坨沟     | 255 | 5   | 2                | 190000           | 6                | 4   | 57.44       | 3.79        | 18          |
|                       | 辽宁荒沟山    | 264 | 6   | 2                | 23000            | 5                | 2   | 57.01       | 4.22        | 14          |
|                       | 辽宁柴河     | 240 | 5   | 2                | 155000           | 8                | 3   | 63.71       | 0.87        | 4           |
|                       | 广东大降坪硫化矿 | 305 | 14  | 6                | 15000            | 16               | 5   | 59.31       | 1.22        | 5           |
|                       | 四川大梁子    | 200 | 7   | 1                | 53000            | 7                | 4   | 54.58       | 2.52        | 2           |
|                       | 广东凡口     | 220 | 16  | 4                | 30000            | 14               | 9   | 61.5        | 3.12        | 10          |
|                       | 陕西银洞子    | 240 | 11  | 4                |                  | 13               | 2   | 59.56       | 1.77        | 7           |
|                       | 甘肃邓家山    | 235 | 9   | 5                | 125000           | 8                | 5   | 58.67       | 3.95        | 10          |
|                       | 甘肃毕家山    | 234 | 10  | 4                | 230000           | 10               | 3   | 57.93       | 4.37        | 13          |
|                       | 湖南鱼塘     | 230 | 8   | 2                | 140000           | 7                | 4   | 62.4        | 1.25        | 4           |
|                       | 江苏栖霞山    | 245 | 14  | 8                | 200000           | 22               | 5   | 60.47       | 2.1         | 54          |
|                       | 贵州杉树林    | 190 | 9   | 1                | 150000           | 5                | 3   | 62.33       | 1.68        | 2           |
|                       | 云南矿山厂    |     | 8   | 1                | 170000           | 7                | 3   | 60.27       | 2.01        | 2           |
|                       | 云南金沙     | 210 | 6   | 2                |                  | 4                | 2   | 60.14       | 1.12        | 3           |
|                       | 云南金顶     | 290 | 18  | 2                | 240000           | 3                | 7   | 62.37       | 0.94        | 2           |
| 火山岩中的铅锌矿              |          |     |     |                  |                  |                  |     |             |             |             |
|                       | 浙江五部     | 240 | 8   | 5                | 70000            | 11               | 3   | 61.03       | 3.58        | 9           |
|                       | 甘肃小铁山    | 265 | 14  | 8                | 90000            | 19               | 4   | 62.23       | 2.11        | 38          |
|                       | 青海锡铁山    | 260 | 16  | 21               | 310000           | 145              | 6   | 55.37       | 11.8        | 142         |
|                       | 内蒙古额什陶勒盖 |     | 7   | 7                |                  |                  | 4   |             |             | 430         |
|                       | 浙江毫石     | 230 | 6   | 4                |                  | 20               | 4   | 64.68       | 1.5         | 9           |
| 与岩浆作用有关的铅锌矿床          |          |     |     |                  |                  |                  |     |             |             |             |
|                       | 辽宁桓仁     | 340 | 15  | 10               | 150000           | 63               | 5   | 57.85       | 10.4        | 35          |
|                       | 广西佛子冲    | 335 | 13  | 5                | 250000           | 27               | 6   | 59.22       | 7.6         | 15          |
|                       | 福建夏山     | 330 | 11  | 16               | 90000            | 39               | 7   | 58.35       | 8.3         | 80          |
|                       | 湖南七宝山    | 340 | 9   | 24               | 96000            | 113              | 5   | 55.46       | 10.53       | 153         |
|                       | 湖南水口山    | 330 | 8   | 13               | 175000           | 50               | 3   | 54.28       | 10.67       | 41          |
|                       | 湖南黄沙坪    | 310 | 8   | 15               | 80000            | 77               | 6   | 53.99       | 12.45       | 50          |
|                       | 甘肃花牛山    | 315 | 5   | 6                | 55000            | 28               | 2   | 55.64       | 9.39        | 29          |
|                       | 黑龙江小西林   | 300 | 4   | 8                | 170000           | 60               |     |             |             |             |
|                       | 湖南桃林     | 290 | 11  | 5                | 100000           | 17               | 8   | 64.6        | 1.58        | 28          |
|                       | 山东香乔     | 345 | 13  | 16               | 120000           | 75               | 6   | 58.83       | 9.6         | 37          |

续表 1

| 矿床类型    | 矿床         | t/ °C | 矿石  |                  |                  | 闪锌矿              |     |             |             |             |
|---------|------------|-------|-----|------------------|------------------|------------------|-----|-------------|-------------|-------------|
|         |            |       | 样品数 | $w_{In}/10^{-6}$ | $w_{Zn}/10^{-6}$ | $w_{Sn}/10^{-6}$ | 样品数 | $w_{Zn}/\%$ | $w_{Fe}/\%$ | $w_{In}/\%$ |
| 富锡硫化物矿床 | 辽宁青城子      | 275   | 7   | 6                | 110000           | 46               | 4   | 60.1        | 3.22        | 13          |
|         | 江西银山       | 280   | 8   | 19               |                  |                  | 5   | 62.94       | 3.8         | 137         |
|         | 广西铜坑-长坡    | 295   | 16  | 95               | 150000           | 960              | 12  | 59.42       | 6.15        | 1010        |
|         | 广西大福楼      | 300   | 9   | 105              | 190000           | 1050             | 2   | 57.82       | 7.9         | 1300        |
|         | 云南都龙       | 260   | 35  | 139              | 182000           |                  |     |             |             |             |
|         | 大厂 100 号矿体 |       |     | 310              | 101000           | 17900            |     |             |             |             |
|         | 内蒙古孟恩陶勒盖   | 250   | 38  | 118              | 200000           | 840              | 15  | 56.85       | 9.26        | 1080        |
|         | 广东金子窝      | 300   | 8   | 92               | 170000           | 900              | 4   | 58.99       | 5.24        | 1390        |
|         | 广东锯板坑      | 315   | 5   | 87               | 70000            | 910              | 2   | 57.01       | 8.56        | 722         |

注: ① 大福楼矿床闪锌矿资料据黄民智等(1988), 高峰 100 号矿体据黄文振(1999), 都龙矿床据刘玉平(1999); 其余矿床资料来自本文及 Zhang(1987;1998)。In 含量用原子吸收光谱和 ICP-MS 分析, 分析者: 吕佩芹、郭安贞、漆亮; Zn、Fe、Sn 含量用化学方法分析, 分析者: 李逊蓉、杨启顺。② 富锡硫化物矿床的成因较为复杂, 其中孟恩陶勒盖、金子窝、锯板坑属于(岩浆)热液型脉状矿床, 而都龙及铜坑-长坡、大福楼、高峰 100 号矿体属于热水沉积+岩浆热液叠加型矿床, 为了方便, 本文将这些富 In 矿床归并到一起统称为富锡硫化物矿床。下文及图表中的资料来源都与此相同。

(中国科学院地球化学研究所, 1979)。

与以上不同的是, 富锡硫化物矿床中相当富集铟, 矿石平均  $w_{In}$  在  $80 \times 10^{-6}$  以上(表 1)。从表 1 可以看出, 有两类矿床可以构成共(伴)生铟矿床。一类为锡石硫化物矿床, 如大厂矿田长坡-铜坑锡铟矿床的 In 储量达 4600 t 以上, 矿石平均  $w_{In}$  为  $95 \times 10^{-6}$ , 外围还有大福楼、宝坛等富铟矿床, 矿田内的 100 号矿体, 平均  $w_{In}$  达  $310 \times 10^{-6}$  (黄文振, 1999), 黄民智等(1988)的研究也证实了这一点。云南都龙锡铟矿床仅曼家寨一个矿段铟储量就达 3 500 t 以上, 矿石平均  $w_{In}$  为  $139 \times 10^{-6}$ 。个旧锡矿的铟储量达 2 500 t 左右。另外, 金子窝、锯板坑等都是富 In 锡石硫化物矿床。值得关注的是, 据陈学明等电子探针测定结果, 云南白牛厂锡多金属矿床浅色锡石中  $In_2O_3$  含量最高达 4.41%, 平均 2.75%, 闪锌矿中富铟(陈学明等, 1998), 因此, 该矿床也是一个潜在的铟资源。据笔者对内蒙古东部的大井等锡多金属矿床少量样品进行的初步研究, 发现该地区的该类矿床也含有很高的铟。另一类为含锡的铅锌多金属矿床, 锡除少量以锡石状态产出外, 部分锡以黄锡矿形式存在, 另一部分锡分散存在方铅矿等矿物中。如内蒙古孟恩陶勒盖矿床, 是一个产于花岗岩基中心部位断裂带中的含锡多金属矿床, 铜铅锌金属量均为小型规模, 银达大型规模, 铟储量达 400 t 以上, 矿石平均  $w_{In}$  大于  $118 \times 10^{-6}$ 。该矿床与其他铅锌矿床最明显的不同之处在于含有 2 000 多吨可综合回收的锡。另外, 如云南澜沧老厂、巧家, 湖南香花岭、七宝山以及青海锡铁山等矿床也都是含锡富铟

铅锌矿床的例子, 只不过这些矿床中铟的品位比前面列举的矿床中的铟低 2~4 倍, 铟的金属总量也仅数十吨到百吨。

## 1.2 铟富集的矿床类型专属性

图 1 清楚地显示了不同类型矿床平均含量的变化。显然, 最富铟的矿床是锡石硫化物矿床和富锡的铅锌矿床。在国内, 大厂矿田的铜坑-长坡、大福楼、宝坛等矿床, 云南都龙、个旧锡铅锌矿床, 广东金子窝、锯板坑锡石硫化物矿床以及内蒙古的孟恩陶勒盖含锡银铅锌矿床等, 都是富铟矿床。日本、美国、俄罗斯、瑞典等国家的富铟矿床也都不同程度地富含铟(Kieft et al., 1990; Murao et al., 1991; Yi et al., 1995)。这说明锡在铟的富集中可能起着某种重要作用。

图 2 表示不同类型矿床中 In 与 Sn 的关系。可

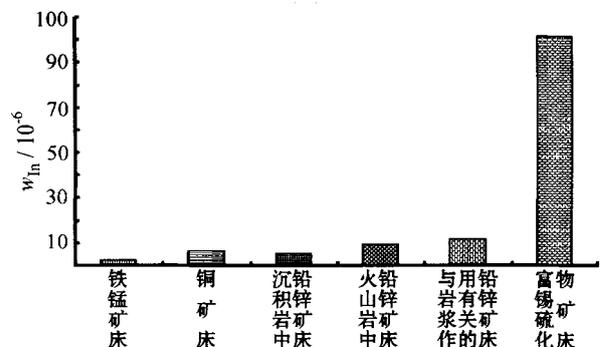


图 1 中国一些主要矿床类型平均铟含量

Fig. 1 Average content of indium in some major types of ore deposits in China

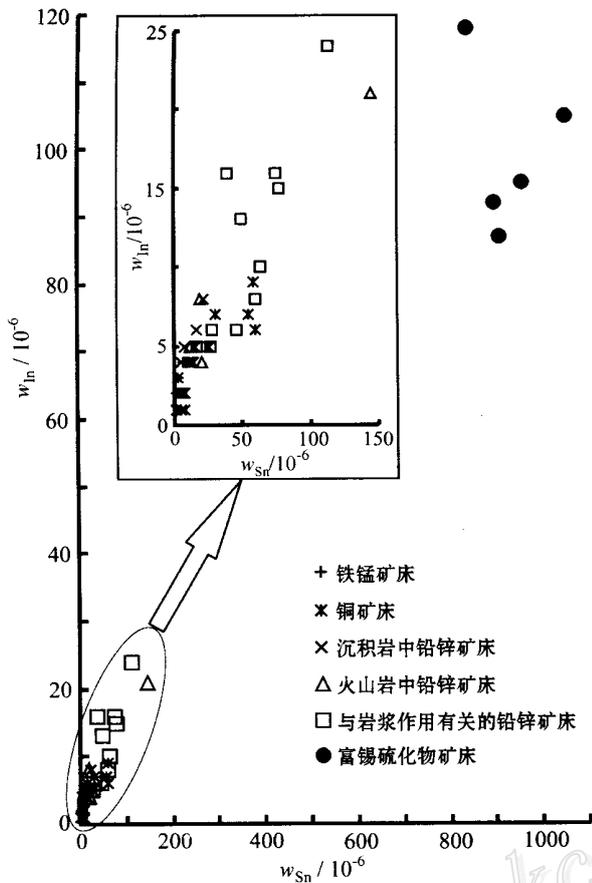


图2 中国不同类型矿床中铟与锡的关系

Fig. 2 Relationships between indium and tin in different types of ore deposits in China

可以看出,不同类型矿床中,In 与 Sn 具有同步增长的关系,即使在贫 In 的铁、锰、铜、铅锌矿床中也是如此。在岩浆热液型、夕卡岩型及火山岩型铅锌矿床中,如湖南七宝山、青海锡铁山矿床及湖南东坡矿田的矿床矿石 In 和 Sn 含量明显高于其他同类型铅锌矿床。

同处于大厂矿田的矿床,含锡低的矿床中 In 含量也低,如拉么铜锌矿床锡不具工业意义,In 含量比长坡-铜坑低得多,后者的  $w_{In}$  是前者的 5~10 倍,剪猪坡雌黄铁矿不富 Sn 也不富 In。以上证据说明,In 元素富集具有矿床类型的专属性。也就是说,In 主要富集在锡-锌(铅)硫化物矿床中。

## 2 铟富集的矿物类型专属性

### 2.1 铟的独立矿物

到目前为止,共发现 In 的独立矿物 9 种,它们

是:铟石 ( $FeIn_2S_4$ )、硫铜铟矿 ( $CuInS_2$ )、硫铜铟锌矿 [ $(Cu, Fe)_2Zn(In, Sn)S_4$ ]、自然铟 (In)、铟铂矿 ( $PtIn$ )、大庙矿 ( $PtIn_2$ ) (於祖相, 1997a)、伊逊矿 ( $Pt_3In$ ) (於祖相, 1997b) 和羟铟石 [ $In(OH)_3$ ]。Nicolas 等于 1999 年报道,在法国 Montgros 铅锌矿中发现了 Laforetite ( $AgInS$ )。另外, Rovalenker 等于 1993 年发现了 3 种未定名的 In 矿物:  $ZnCdIn_2S_7$ 、 $ZnCdIn_2S_5$  和  $CdInS_4$  (Rovalenker et al., 1993)。

日本 Nakakoshi 多金属矿床中的 Cu-Zn-Fe-In-Sn-S 系列矿物  $w_{In}$  最高可达 16.3%, 闪锌矿  $w_{In}$  达 1.8% (Tsushima et al., 1999)。铟独立矿物中,铟铂矿、大庙矿和伊逊矿发现于我国河北大庙铂族元素矿床中,羟铟石发现于锡石硫化物矿床氧化带中,其余矿物发现于富铟矿床中。这些矿物在自然界罕见,数量非常稀少。由此不难看出,In 在矿床中并非以独立矿物为主要存在形式。李锡林等(1994)对大厂矿田所做的大量矿物学研究表明,长坡-铜坑矿床虽然含铟相当高,但未见 In 的独立矿物,90% 以上的 In 都在闪锌矿和少数几种含锡的硫盐矿物(黄锡矿等)中,In 在其中的含量都达不到参加矿物命名的要求。

### 2.2 铟富集的矿物类型专属性

表 1 中列出了多金属硫化物矿床中闪锌矿的 In 含量,为了方便对比,将几个典型矿床中主要矿物的 In 含量汇总于表 2。

由前面的讨论可知,Sn 与 In 有着某种目前还不完全清楚的密切关系,但是,在绝大多数富 In 矿床中,In 并不大量进入锡的最主要工业矿物——锡石中,如广东金子窝矿床锡石中  $w_{In}$  为  $42 \times 10^{-6}$ ,铜坑-长坡矿床锡石中  $w_{In}$  为  $6 \times 10^{-6}$ 。笔者最新的分析结果显示,个旧锡矿锡石  $w_{In}$  为  $(25 \sim 50) \times 10^{-6}$  (3 个样品),锯板坑矿床锡石样品平均  $w_{In}$   $23 \times 10^{-6}$  (2 个样品),厚婆坳矿床中锡石的  $w_{In}$   $(19 \sim 38) \times 10^{-6}$  (3 个样品),这与杨世瑜(1990)对滇东南和我国其他一些锡矿床中锡石具有低 In 含量的结论一致。就目前所知,唯一的例外是白牛厂矿床的浅色锡石,含  $In_2O_3$  高达 2.75% (陈学明等, 1998)。显然,绝大多数矿床中的锡并不是 In 的主要载体矿物。

从矿物中 In 的含量及所占 In 总量的比例来说,闪锌矿是富 In 矿床中富集 In 的最主要对象。如大厂矿田的几个矿床,闪锌矿的  $w_{In}$  比其他硫化物矿物的  $w_{In}$  高出 2~3 个数量级。笔者用 ICP-MS 检测

表 2 部分矿床中不同矿物的铟含量

Table 2 Indium in different minerals from some ore deposits in China

| 矿床类型及矿床名称  | 矿物   | 样品数 | $w_{In}/10^{-6}$ | 资料来源         |
|------------|------|-----|------------------|--------------|
| 富 In 矿床    |      |     |                  |              |
| 广西大厂矿田铜坑长坡 |      |     |                  |              |
|            | 锡石   | 18  | 6                | 本文及黄民智等,1988 |
|            | 闪锌矿  | 12  | 1010             | 本文及黄民智等,1988 |
|            | 毒砂   | 15  | 7                | 本文及黄民智等,1988 |
|            | 黄铁矿  | 10  | 8                | 本文及黄民智等,1988 |
|            | 磁黄铁矿 | 4   | 30               | 本文及黄民智等,1988 |
| 广西大厂大福楼    |      |     |                  |              |
|            | 闪锌矿  | 2   | 1300             | 本文及黄民智等,1988 |
|            | 毒砂   | 2   | 0.4              | 本文及黄民智等,1988 |
|            | 磁黄铁矿 | 1   | 1                | 本文及黄民智等,1988 |
| 广西大厂拉么     |      |     |                  |              |
|            | 闪锌矿  | 11  | 77               | 本文           |
|            | 黄铜矿  | 5   | 0.7              | 本文           |
|            | 黄铁矿  | 5   | 0.2              | 本文           |
| 广东金子窝      |      |     |                  |              |
|            | 锡石   | 2   | 42               | 本文           |
|            | 闪锌矿  | 4   | 1390             | 本文           |
|            | 方铅矿  | 3   | 51               | 本文           |
| 内蒙古孟恩陶勒盖   |      |     |                  |              |
|            | 闪锌矿  | 15  | 1080             | 本文           |
|            | 方铅矿  | 6   | 4                | 本文           |
|            | 黄铁矿  | 2   | 8                | 本文           |
| 铅锌矿床       |      |     |                  |              |
| 山东香奂       |      |     |                  |              |
|            | 闪锌矿  | 4   | 37               | Zhang,1987   |
|            | 黄铁矿  | 3   | 3                | Zhang,1987   |
|            | 方铅矿  | 2   | 5                | Zhang,1987   |
|            | 黄铜矿  | 1   | 8                | Zhang,1987   |
| 广西佛子冲      |      |     |                  |              |
|            | 闪锌矿  | 6   | 15               | Zhang,1987   |
|            | 方铅矿  | 4   | 4                | Zhang,1987   |
|            | 黄铁矿  | 4   | 5                | Zhang,1987   |
| 福建夏山       |      |     |                  |              |
|            | 闪锌矿  | 3   | 8                | Zhang,1987   |
|            | 方铅矿  | 4   | 7                | Zhang,1987   |
|            | 黄铁矿  | 2   | 3                | Zhang,1987   |

出这些矿床中的闪锌矿  $w_{In}$  最高达  $3800 \times 10^{-6}$ 。目前研究比较详细的孟恩陶勒盖、金子窝、都龙等矿床,80%甚至更高比例的 In 都在闪锌矿中。贫 In 的铅锌矿床如香奂、佛子冲等,闪锌矿的铟含量与方铅矿、黄铁矿等相差并不那么悬殊,最高达一个数量级,却比富 In 矿床中闪锌矿低 2 个数量级。佛子冲、香奂等矿床中闪锌矿含的  $w_{In}$  与其他矿物相差不大。

从表 1 看出,单纯的铅锌矿床中,闪锌矿含铟很低,如与岩浆活动和火山活动有关的桃林、小铁山、

五部等矿床,闪锌矿  $w_{In}$  低于  $20 \times 10^{-6}$ ;与沉积或改造作用有关的金顶柴河、高板河、渔塘、杉树林、凡口等矿床,闪锌矿  $w_{In}$  大多低于  $10 \times 10^{-6}$ 。比较而言,与岩浆或火山活动有关的矿床中闪锌矿  $w_{In}$  比沉积或改造成因矿床中的闪锌矿略高,这也印证了 In 富集成矿需要较高温度的观点(刘英俊等,1984)。将表 1 中不同类型闪锌矿中的 In 分别对应于 Zn 和 Fe 作图,发现 In 与这两个主元素之间不存在消长关系,而矿石 In 含量与成矿温度的关系如图 3 所示,从沉积岩中的铅锌矿床 → 铜矿床 → 火山岩中的铅锌

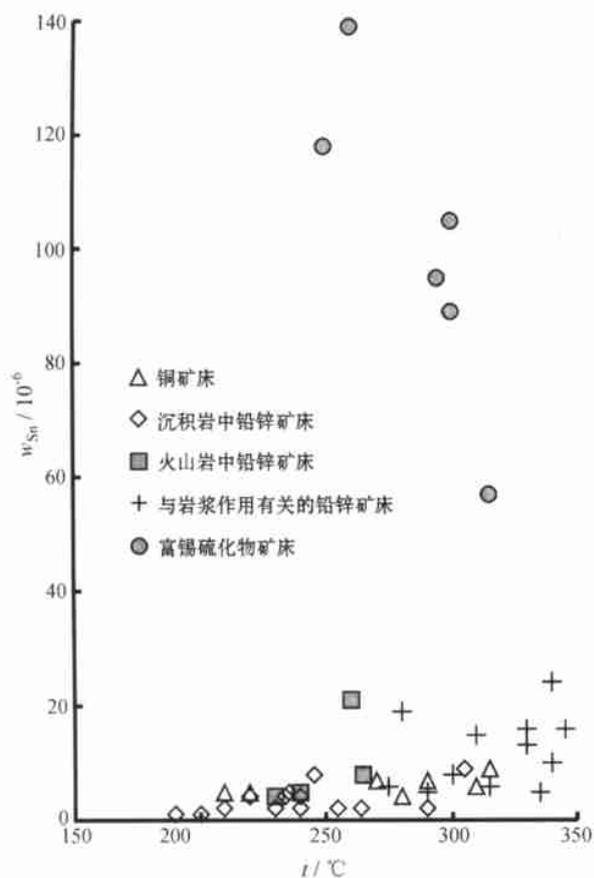


图3 中国不同类型矿床铟与成矿温度的关系

Fig.3 Relationships between indium and ore-forming temperature in different types of ore deposits in China

矿床→岩浆热液铅锌矿床,成矿温度从190℃升高到350℃,矿石中铟的平均含量有所升高,而富铟矿床的成矿温度从250℃至320℃。在富铟矿床中,In的富集具有一定的规律性,即大量的In富集在闪锌矿中,其他矿物含In低,这种规律性可以称作In富集的矿物类型专属性。由此也可以得出另一个结论,即在含锡硫化物矿床中,只有当闪锌矿大量存在时,才有可能使In大量富集起来,进而形成共(伴)生In矿床。In元素的这一富集特点决定了其不能单独开采,只需从Zn的冶炼过程中回收即可。如果闪锌矿少,也很难形成In的工业富集,如内蒙古额仁陶勒盖银矿床中的闪锌矿 $w_{In}$ 在 $300 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$ 之间,但闪锌矿在该矿床中量少,因而In的总金属量很小;赣南一些钨锡矿床中闪锌矿 $w_{In}$ 高达百分之几,但在这些矿床中,闪锌矿为微量矿物,因而矿床的In品位很低,In金属量远达不到矿床级规模。

刘英俊等(1984)认为,富含In的矿物在晶体结

构上的一个共同特点是,它们都具有四面体结构。由此推断,含锡的热液体系有利于In的富集与迁移,因而In在成矿溶液中能够达到较高的浓度,而在沉淀过程中,In与Sn分道扬镳,大量进入具有四面体结构的闪锌矿中。

### 3 铟矿床的区域分布特点

我国的富铟矿床主要分布在广西、云南、内蒙古和广东,它们的In储量占全国In储量的80%以上,并且以大矿为主(Zhang, 1998)。其他地区的矿床无论是In品位还是In储量都远低于上述四省(区)的矿床。如湖南香花岭、七宝山、青海锡铁山、江西银山等矿床,闪锌矿 $w_{In}$ 一般低于 $200 \times 10^{-6}$ ,单个矿床的铟储量一般小于200t。

富铟矿床的这种地区性分布,从构造环境来说,正好是古陆边缘位置,扬子地块南-西南缘是我国最重要的大型-超大型富铟矿床的分布区,位于华北地块北缘的内蒙古东部地区,已知孟恩陶勒盖矿床铟储量达大型规模,区内还存在许多富锡的铅锌硫化物矿床,已证实有3个富锡的铅锌矿床为富铟矿床(盛继福等,1999)。另外,大井等锡多金属矿床也富In,区域上In的地球化学背景值高,有可能成为一个富铟矿床的大型集中区。

从富铟矿床的成因类型来看,主要可以分为两类:其一为以海底喷流沉积成矿作用为主的矿床,如大厂、都龙、白牛厂等矿床,不少研究都提供了这些矿床海底喷流沉积成矿的证据(陈学明等,1998;张起钻,1999;刘玉平,1999)。但是,这些矿床或多或少都受到了中-酸性岩浆作用的影响,因此,铟的来源可能是复杂的;另一类矿床与岩浆作用关系更密切,如孟恩陶勒盖、锯板坑、厚婆坳、个旧等矿床,这类矿床的铟来源可能主要与岩浆作用有关。

### 4 结论

(1) In元素可以形成具有工业价值的共(伴)生矿床。

(2) 铟的富集成矿具有矿床类型专属性。即构成工业富铟矿床的矿床类型以富锡的硫化物矿床为主,找到富锡的硫化物矿床也就意味着找到了富铟矿床。

(3) 在富铟矿床中,In的富集具有矿物类型专

属性,即 80% 以上的 In 都富集在闪锌矿中。

(4) 我国的富铟矿床具有地区性集中分布的特点,即主要分布在华北地台北缘和扬子地台南-西南缘,这两个地区分布的富铟矿床的 In 资源量可达大型超大型规模。

(5) 构成富铟矿床至少要具备以下两个条件:

① 锡石硫化物矿床或含锡铅锌矿床的存在;② 闪锌矿大量堆积。

## References

- Chen X M, Lin Z and Xie F C. 1998. Geological and geochemical characteristics of the Bainiuchang superlarge silver polymetallic deposit of superimposed mineralization, Yunnan Province [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 33 (1): 115 ~ 124 (in Chinese with English abstract).
- Huang M Z and Tang S H. 1988. Ore petrology on tin field deposits at Dachang [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press. 17 ~ 88 (in Chinese with English abstract).
- Huang W Z. 1999. Study on utilization of the magnetic waste from No. 100 orebody ores in Dachang [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, (2): 29 ~ 31 (in Chinese with English abstract).
- Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1979. Geochemistry of Granite in South China [M]. Beijing: Science Press. 303 ~ 317 (in Chinese).
- Kieft K and Damman A H. 1990. Indium-bearing chalcopyrite and sphalerite from the Gasborn area, west Bergslagen, central Sweden [J]. *Mineralogical Magazine*, 54: 109 ~ 112.
- Li T and Ni S B. 1990. Chemical element abundances of the earth and earth's crust [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 15 ~ 110 (in Chinese).
- Li X L and Zhao R S. 1994. Mineralogy of the Dachang ore field [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Liu Y J, et al. 1984. Element Geochemistry [M]. Beijing: Science Press. 387 ~ 392 (in Chinese).
- Liu Y P. 1999. Preliminary study on mineralization mechanism of Cadmium—Taking Dulong superlarge tin-zinc polymetallic deposit as an example [D] (Doctor paper). Teacher: Li C Y. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 53p (in Chinese).
- Murao S, Furuno M and Uchida A C. 1991. Geology of indium deposits: a review [J]. *Mining Geology*, 41(1): 1 ~ 13.
- Nicolas M, Philippe T, Jacques C P, et al. 1999. Laforetite, AgInS (Sub 2), a new mineral of the chalcopyrite group from the Montogros Mine, Haute-Loire, France [J]. *Euro. J. Mineralogy*, 11 (5): 891 ~ 897.
- Rovalenker V A, Laputina I P, Znamenkii V S, et al. 1993. Indium mineralization of the Great Kuril Island arc [J]. *Geol. Ore Deposits*, 35(6): 491 ~ 495.
- Shen J F, Li Y and Fan S Y. 1999. A study of minor elements in minerals from polymetallic deposits in the central part of the Dahinggan mountains [J]. *Mineral Deposits*, 18(2): 153 ~ 160 (in Chinese with English abstract).
- The Office of National Mineral Reserve Committee. 1987. Reference manual of the mineral resource standard [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 197 ~ 198 (in Chinese).
- Tsushima N, Matsueda H and Ishihara S. 1999. Poly metallic mineralization at the Nakakoshi copper deposits, central Hokkaido, Japan [J]. *Resource Geology*, 49(2): 89 ~ 97.
- Yang S Y. 1990. The time-spatial characteristics of the tin deposits and their mineralizing model in eastern-south Yunnan [J]. *Geol. Science*, (2): 138 ~ 140 (in Chinese with English abstract).
- Yi W, Halliday A N, Lee D C, et al. 1995. Indium and tin in basalts, sulfides and the mantle [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59(24): 5081 ~ 5090.
- Yu Z X. 1997a. Damiaoite—a new native indium and platinum alloy [J]. *Acta Geologica Sinica*, 71(4): 328 ~ 331 (in Chinese with English abstract).
- Yu Z X. 1997b. Yuxunite—an ordered new native indium and platinum alloy [J]. *Acta Geologica Sinica*, 71(4): 332 ~ 335 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q. 1987. Trace elements in galena and sphalerite and their geochemical significance in distinguishing the genetic type of Pb-Zn ore deposits [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 6(2): 177 ~ 190.
- Zhang Q. 1998. Geochemical enrichment and mineralization of indium [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 17(3): 221 ~ 225.
- Zhang Q Z. 1999. Isospatial superimposed metallogenesis of the Dachang superlarge tin-polymetallic ore deposit [J]. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metal*, 8(6): 482 ~ 485 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈学明, 林琮, 谢富昌. 1998. 云南白牛厂超大型银多金属矿床叠加成矿的地质地化特征 [J]. *地质科学*, 33(1): 115 ~ 124.
- 黄民智, 唐绍华. 1988. 大厂锡矿矿床学概论 [M]. 北京: 北京科学技术出版社. 17 ~ 88.
- 黄文振. 1999. 大厂 100 号矿体矿石选矿废弃磁性物的利用研究 [J]. *矿产保护与利用*, (2): 29 ~ 31.
- 黎彤, 倪守斌. 1990. 地球和地壳的化学元素丰度 [M]. 北京: 地质出版社. 15 ~ 110.
- 李锡林, 赵汝松. 1994. 大厂矿田矿物学 [M]. 北京: 科学出版社.
- 刘英俊, 等. 1984. 元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社. 387 ~ 292.
- 刘玉平. 1999. 镉的成矿机制初步研究——以都龙超大型锡锌多金属矿床为例 [D] (博士论文). 导师: 李朝阳. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所. 53 页.
- 全国矿产储量委员会办公室. 1987. 矿产工业要求参考手册 [M]. 北京: 地质出版社. 197 ~ 198.
- 盛继福, 李岩, 范书义. 1999. 大兴安岭中段铜多金属矿床微量元素研究 [J]. *矿床地质*, 18(2): 153 ~ 160.

- 杨世瑜. 1990. 滇东南锡矿时空分布特征及成矿模式[J]. 地质科学, (2): 138 ~ 140.
- 於祖相. 1997a. 新矿物大庙矿——铟与铂的天然合金[J]. 地质学报, 71(4): 328 ~ 331.
- 於祖相. 1997b. 新矿物伊逊矿——有序的铂与铟的天然合金[J]. 地质学报, 71(4): 332 ~ 335.
- 张起钻. 1999. 广西大厂超大型锡多金属矿床同位叠加成矿作用[J]. 有色金属矿产与勘查, 8(6): 482 ~ 485.
- 中国科学院地球化学研究所. 1979. 华南花岗岩类的地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 303 ~ 317.

## Specialization of Ore Deposit Types and Minerals for Enrichment of Indium

Zhang Qian, Liu Zhihao, Zhan Xinzhi and Shao Shuxun

(Open Lab. of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China)

### Abstract

In order to find out the distribution of indium in different types of ore deposits in China, the authors have studied the content and variations of indium in ores and minerals from some Fe, Mn, Cu, Pb-Zn and Sn deposits. It is found that indium is not concentrated in large quantities in different genetic types of lead, zinc, copper, iron and manganese deposits. The average contents of indium in ores from these types of deposits are lower than  $10 \times 10^{-6}$ . However, its average contents in ores from the stannolite-sulfide deposits and the tin-bearing Pb-Zn deposits are higher than  $80 \times 10^{-6}$ , and its reserves in these types of deposits may reach several hundred tons or even several thousand tons. More than 80% of Indium in these deposits exists in sphalerite. Indium can be concentrated and can thus form significant associated deposits. Its enrichment is intimately related to tin. The formation of the indium-enriched deposit generally requires high ore-forming temperature, and its genesis is more or less related to magmatism. Two prerequisites are necessary for the formation of the indium-enriched deposit: one is the existence of stannolite-sulfide deposits and tin-bearing Pb-Zn deposits, and the other is the accumulation of sphalerite in large quantities. It is therefore thought that the enrichment and mineralization of indium have an ore deposit and mineral specialization. Such a specialization is of significance to the exploration and utilization of indium resources.

**Key words:** geochemistry, ore deposit, mineral, indium, indium-rich deposit, specialization