

富铟及贫铟矿床成矿流体中
铟与锡铅锌的关系研究朱笑青^{1*}, 张 乾¹, 何玉良^{1,2}, 祝朝辉^{1,2}

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 富铟矿床几乎是锡石-硫化物矿床或富含 Sn(Sn 以硫盐类矿物存在或赋存于方铅矿等硫化物中)的 Cu-Pb-Zn 矿床。Sn 的存在与否在某种程度上意味着 In 的富集与否。以富铟与贫铟矿床主成矿期石英中的流体包裹体为研究对象, 分析了成矿流体中 In、Sn、Pb 和 Zn 的含量, 结果显示, 两类矿床成矿流体中 Pb 和 Zn 的含量处于同一水平, 而富铟矿床成矿流体中 In 和 Sn 的含量远远高于贫铟矿床, 二者相差 1~2 个数量级。这一方面说明富铟的成矿流体是形成富铟矿床的物质基础, 另一方面说明 Sn 在 In 的迁移富集过程中起着重要作用。

关键词: 富铟矿床; 贫铟矿床; 成矿流体; 成矿元素含量

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 0379-1726(2006)01-0006-07

Relationships between indium and tin, zinc and lead in ore-forming fluid
from the indium-rich and -poor deposits in ChinaZHU Xiao-qing^{1*}, ZHANG Qian¹, HE Yu-liang^{1,2} and ZHU Chao-hui^{1,2}

1. Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In China, indium-rich deposits are almost the cassiterite-sulfide or tin-bearing Cu-Zn-Pb sulfide deposits. That is to say, enrichment of indium in one deposit depends on whether tin exists to a certain extent. In order to find out relationship between tin and indium, the fluid inclusions in quartz from some indium-rich and -poor deposits in China are taken as ore-forming fluid and contents of In, Sn, Zn and Pb are analyzed by ICP-MS in this paper. The result shows that contents of Pb and Zn in the ore-forming fluid from the two types of deposits are uniform, their range is from 31 to 74 $\mu\text{g/g}$ for Pb and 164 to 221 $\mu\text{g/g}$ for Zn, while contents of In and Sn in ore-forming fluid from the indium-rich deposits, which are from 2.5 to 4.1 $\mu\text{g/g}$ for In and from 15 to 39 $\mu\text{g/g}$ for Sn, are largely higher than those from the indium-poor deposits, which are from 0.03 to 0.09 $\mu\text{g/g}$ for In and from 0.4 to 2 $\mu\text{g/g}$ for Sn. These characteristics indicate that indium-rich ore-forming fluid is the material foundation for formation of the indium-rich deposit, and element tin probably plays an important role in the processes of the indium activation, transference and enrichment.

Key words: indium-rich deposit; indium-poor deposit; ore-forming fluid; ore-forming element content

0 引 言

从国内外的研究结果来看, 富铟矿床(矿石含 In 一般大于 80 $\mu\text{g/g}$)主要是锡石-硫化物矿床及含

Sn 的 Cu-Pb-Zn 矿床, 并且 In 主要存在于闪锌矿中, 这种特征被称之为 In 富集成矿的矿床类型与矿物专属性^[1,2]。富铟矿床一般具有较高的成矿温度, 并且或多或少与中-酸性岩浆活动有一定关系, 如广西大厂, 云南都龙、个旧和内蒙古孟恩陶勒盖等。但同

收稿日期(Received): 2005-01-05; 改回日期(Revised): 2005-06-28; 接受日期(Accepted): 2005-07-18

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-125); 国家自然科学基金(40172037, 40072036)

作者简介: 朱笑青(1955-), 女, 研究员, 矿床地球化学及成矿实验专业。

* 通讯作者(Corresponding author): ZHU Xiao-qing, E-mail: zhuxqcas@sohu.com; Tel: +86-851-5891701

样满足这两个条件的不含 Sn 的铅锌硫化物矿床, In 含量却很低(矿石含 In 一般低于 10 $\mu\text{g/g}$),如湖南水口山、黄沙坪和广西佛子冲等。同处于大厂矿田不含 Sn 的拉么 Cu-Zn 矿床,矿石含 In 低于 10~15 $\mu\text{g/g}$,而含 Sn 的长坡、铜坑、巴力-龙头山、大福楼和宝坛等矿床矿石含 In 都很高,其中位于巴力-龙头山矿区,产于中泥盆统礁灰岩中的 100 号矿体平均含 In 达 310 $\mu\text{g/g}$ 。也就是说, In 的富集与 Sn 有关,但在沉淀过程中, In 并不大量进入锡石,而是富集于闪锌矿中。因此,张乾等曾推测,当 Sn 存在时, In 易于与 Sn 一起富集于成矿流体中共同迁移,而沉淀成矿时二者又分道扬镳^[2]。为了验证这一思路,笔者进行了富铟与贫铟矿床成矿流体中 In 与 Sn (包括 Pb 和 Zn) 的含量及其关系的研究,本文介绍这一研究成果。

1 矿床及样品的选择

本研究涉及的矿床主要包括富 Sn 的硫化物矿床和不含 Sn 的 Pb-Zn 矿床,前者富 In,矿石含 In 一般在 80 $\mu\text{g/g}$ 以上,后者贫 In,矿石含 In 一般低于 10 $\mu\text{g/g}$ ^[1]。富铟矿床选择广西大厂长坡-铜坑矿床的 91 号和 92 号矿体、内蒙古孟恩陶勒盖 Ag-Pb-Zn (含 Sn) 矿床和云南都龙 Sn-Zn 矿床。贫铟矿床选择广西佛子冲 Pb-Zn 矿床和辽宁桓仁 Pb-Zn 矿床。

这些矿床的地质地球化学特征及其成因已有不同学者进行了系统研究,由于篇幅所限,本文不再介绍这方面的内容。韩发等^[3]、李酉兴等^[4]、叶绪孙等^[5]研究了大厂矿田的地质地球化学特征,认为该矿床是在海底热水沉积成矿的基础上,经燕山期岩浆热液叠加形成的。刘玉平等^[6,7]研究了都龙矿床的地质地球化学特征,认为该矿床经历了热水沉

积、区域变质和岩浆热液叠加三个阶段。根据张乾等^[8]、张炯飞等^[9]的研究,孟恩陶勒盖矿床属于与海西期酸性岩浆活动有关的岩浆热液矿床。贫铟矿床中,佛子冲 Pb-Zn 矿床的成因与燕山期岩浆活动有关^[10,11],桓仁 Pb-Zn 矿床为与辉石闪长岩有关的夕卡岩型矿床^[12]。

本研究所用的样品采自上述矿床的主要矿体(表 1)。由于 In 主要存在于闪锌矿中,为了避免处理过程中闪锌矿中的 In 被溶出,选择与闪锌矿、方铅矿共生的石英作为流体包裹体中成矿元素的分析样品。矿石样品在选矿前都进行了显微镜鉴定,确定了矿物组成、结构构造和矿物共生关系,证实石英与金属硫化物(矿石矿物)系同时生成。在此基础上,磨制包裹体片,对石英中流体包裹体的类型进行了研究,以确定其中流体包裹体的大小、数量和类型,区分原生与次生包裹体,测定温度。结果表明,这些矿床形成温度都较高,一般在 250 $^{\circ}\text{C}$ 以上,最高可达 400~450 $^{\circ}\text{C}$,石英中流体包裹体数量多,体积大(一般在 10~30 μm 之间),以气液两相原生包裹体为主,大厂和都龙矿床石英中局部可见数量很少的次生包裹体(一般小于 10 μm ,多数在 1~5 μm 之间,呈线状排列,温度低于 200 $^{\circ}\text{C}$)。

矿石样品在选矿前分析了 In、Sn、Pb 和 Zn 含量(表 1)。不难看出,富铟矿床矿石含 In 都在 100 $\mu\text{g/g}$ 以上,而贫铟矿床矿石的 In 含量低于 10 $\mu\text{g/g}$ 。另一个显著特点是富铟矿床矿石明显富 Sn,而贫铟矿床矿石 Sn 含量比前者低 2 个数量级。因此,两类矿床从 In 和 Sn 含量上就可以明显地区分开来,并且富铟矿床矿石中, In 与 Sn 具有较好的正相关关系($r=0.7270$)(图 1a)。从图 1 还可以看出,无论是富铟矿床还是贫铟矿床,矿石中的 In 与 Zn 也具有正消长关系(图 1b),这是因为 In 主要存在于闪锌矿

表 1 富铟与贫铟矿床样品特征及成矿元素含量

Table 1 Sample features and ore-forming element contents of ores from the indium-rich and -poor deposits

矿床类型	矿床	样号	产状	样品特征	In ($\mu\text{g/g}$)	Sn (%)	Zn (%)	Pb (%)	Zn/Pb
富铟矿床	广西大厂锡多金属矿床	GD-10	92 号矿体	Sph-Py-Cas-Qtz 块状矿石	132	0.46	14.84	1.66	8.94
富铟矿床	广西大厂锡多金属矿床	GD-14	91 号矿体	Py-Sph-Arsen-Qtz 矿石	185	0.74	16.23	0.82	19.79
富铟矿床	内蒙古孟恩陶勒盖 Ag-Pb-Zn 矿床	M-8	V1 矿体	Sph-Gal-Qtz 浸染状矿石	123	0.11	9.54	4.43	2.15
富铟矿床	内蒙古孟恩陶勒盖 Ag-Pb-Zn 矿床	M-35	V1 矿体	Sid-Sph-Gal-Qtz 矿石	149	0.18	11.01	5.79	1.90
富铟矿床	云南都龙 Sn-Zn 矿床	MJ-56	曼家寨采场	Sph-Cas-Chal-Qtz 矿石	138	0.48	14.63	1.68	8.71
贫铟矿床	广西佛子冲 Pb-Zn 矿床	F-9	牛卫矿段	Sph-Gal-Qtz 浸染状矿石	11	0.006	17.31	3.94	4.39
贫铟矿床	广西佛子冲 Pb-Zn 矿床	F-23	刀支口矿段	Sph-Gal-Qtz 浸染状矿石	8	0.002	13.56	3.25	4.17
贫铟矿床	辽宁桓仁 Pb-Zn 矿床	LW-12	主矿体	Gal-Sph-Qtz 矿石	5	0.001	8.55	7.09	1.21

注: Sph. 闪锌矿; Py. 黄铁矿; Cas. 锡石; Qtz. 石英; Arsen. 毒砂; Sid. 菱铁矿; Gal. 方铅矿; Chal. 黄铜矿。

分析方法: In 为 ICP-MS 法; Sn 为极谱法; Pb 和 Zn 为常规化学法。

中。In 与 Pb 不具备这种同步变化关系(图 1c)。

2 分析方法及结果

2.1 样品处理

由于样品矿物粒度粗大(一般在 3~8 mm 之间),故首先将矿石样品破碎,手工挑选出石英,再将石英破碎至 0.2~0.4 mm,经淘洗除去大部分硫化物,再在显微镜下挑选出 6 g 纯净石英单矿物。经检查,挑选出的石英纯度达到了 99%,能够满足分析需要。

苏文超等^[13,14]成功地分析了矿物流体包裹体流体中的稀土元素含量和贵州卡林型金石英流体包裹体流体中的成矿元素含量,建立了一套完整的样品处理和分析流程。因此本研究也采用与其类似的方法。

将挑选好的石英单矿物样品 3 g,用高纯度的 HNO₃ 于 200 °C 下热煮 5~10 h,溶解石英表面或裂隙中的杂质,去除石英中的部分次生包裹体,再用二次去离子水清洗数次,直到清洗液的电导率达到二次去离子水的电导率为止,然后低温烘干石英样品 12 h,以彻底除去石英颗粒表面的水分。

2.2 提取流体

苏文超等^[13]对流体包裹体不同打开方式的优劣进行了对比,认为用爆裂法效果最佳。由于本文选择的矿床成矿温度一般在 250~400 °C 之间,少量次生包裹体温度在 200 °C 以下,因此,打开流体包裹体分两步:首先,将石英样品装入高温 U 型石英管中,在 250~300 °C 区间爆裂 3~5 min,取出样品,用 5% HNO₃ 清洗干净,低温烘干。这一步的目的是尽可能除去次生包裹体。第二步,烘干后的石英样品装入新的充满 Ne 气的高温 U 型石英管,以 650 °C 高温爆裂 5 min,打开石英中的流体包裹体,同时用气相色谱仪精确测定流体包裹体中的 H₂O 含量,在爆裂后的样品中加入 5 mL 高纯度的 5% HNO₃ 淋滤液,通过超声波振荡、离心分离提取出流体包裹体中的流体,供分析用。

2.3 分析条件及结果

本次研究所采用的仪器为 Finnigan MAT 公司的 ELEMENT 型高分辨等离子质谱仪(ICP-MS),其仪器条件与苏文超等^[14]测定贵州卡林型金矿床石英流体包裹体中微量元素时所用的参数相同。将实验全程空白溶液连续测定 10 次所得标准偏差的 3 倍对应的浓度值确定为仪器的测定限,In、Sn、Pb 和 Zn 的测定限分别为 0.02 ng/g、0.08 ng/g、0.2 ng/g 和 0.45 ng/g;淋滤液空白则是浸取流体包裹体成分所用的 5% HNO₃ 溶液中上述元素的含量,5 次测定结果平均值为 In 0.04 ng/g、Sn 0.11 ng/g、Pb 0.034 ng/g 和 Zn 0.51 ng/g,可见淋滤液空白值和仪器的测定限都低于 1 ng/g,应该说远低于成矿流体中这些元素的含量。

在上述条件下,将制备好的待测溶液用 ICP-MS 分析 In、Sn、Pb 和 Zn 的含量,测定结果再换算为气

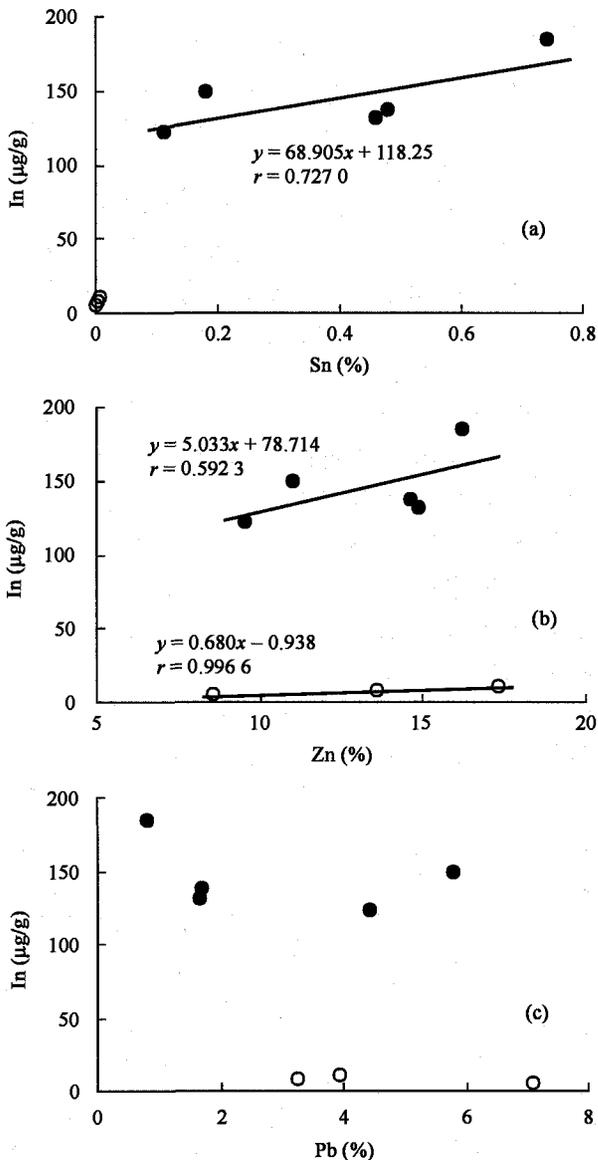


图 1 富钨与贫钨矿床矿石中 In 与 Sn、Zn 和 Pb 的关系

Fig. 1 Relationships between In and Sn, Zn and Pb in ores from some indium-rich and -poor deposits.

●. 富钨矿床矿石; ○. 贫钨矿床矿石。

相色谱测定的 H_2O 中这些元素的含量, 每个样品测定 2~3 次以检验其结果的重现性, 结果表明重现性很好, 误差在 10% 以内, 并且测定结果远远高于仪器测定限和 HNO_3 溶液的空白值, 说明结果是可信的。测定结果的平均值见表 2。

3 讨论

3.1 成矿流体中 In、Sn、Pb 和 Zn 的含量

表 1 显示, 两类矿床矿石中 Sn 和 In 含量虽然不同, 但 Pb 和 Zn 都是主要的有用成分。从表 2 可以看出, 无论是富铟矿床还是贫铟矿床, 成矿流体中 Pb 和 Zn 含量变化不大, 保持在同一个水平上。这与成矿流体中含有很高的 Pb 和 Zn 是完全吻合的。

显然, 富铟矿床与贫铟矿床成矿流体中 In 和 Sn 的含量是截然不同的。富铟矿床成矿流体中 Sn 的含量在 15~39 $\mu g/g$ 之间, 而贫铟矿床为 0.4~2 $\mu g/g$, 后者比前者低 1~2 个数量级。这种差别与表 1 中两类矿床矿石中 Sn 含量的差别是一致的。

表 2 显示, 富铟矿床成矿流体含 In 2.5~4.1 $\mu g/g$, 这一含量范围高出 In 的地壳克拉克值 (0.01 $\mu g/g$) 2 个数量级, 就是说富铟矿床成矿流体中 In 富集了 100 倍以上。而贫铟矿床成矿流体含 In 0.03 $\mu g/g$, 与其地壳克拉克值接近, 比富铟矿床成矿流体中的 In 低 2 个数量级。

从以上事实可以看出, 成矿流体含铟的多少是 In 在一个矿床中富集与否的关键因素。

3.2 成矿流体中 In 与 Sn、Pb 和 Zn 的关系

就富铟矿床而言, 矿石中 In 与 Sn 和 Zn 具有线性正消长关系, 与 Pb 无关 (图 1)。而在成矿流体中, In 与 Sn 具有很好的线性变化关系, 相关系数达 0.931 7 (图 2a), 与 Zn 的关系不明显 (图 2b), 与 Pb

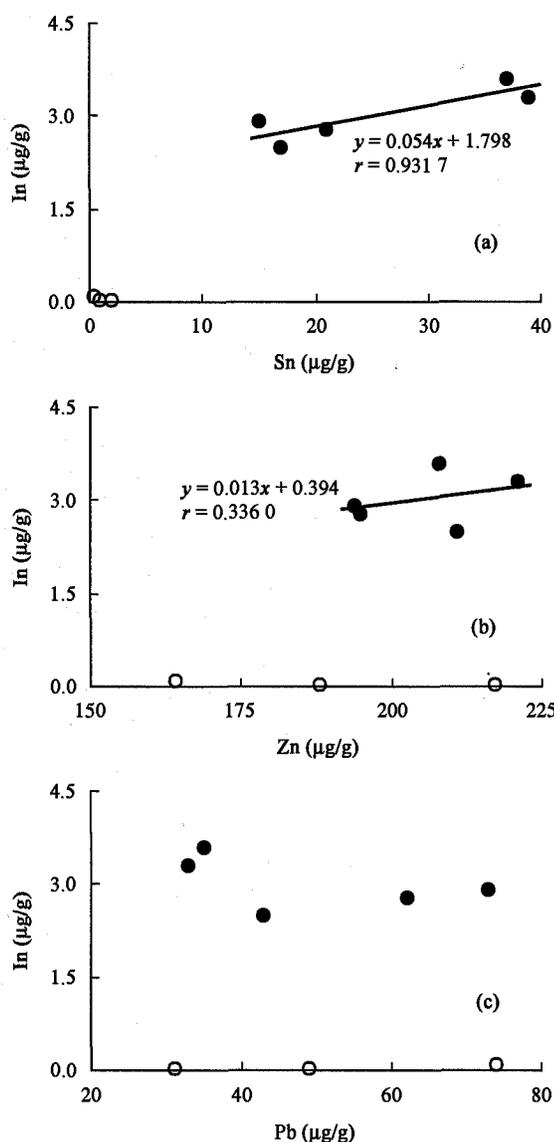


图 2 富铟与贫铟矿床成矿流体中 In 与 Sn (a)、Zn (b) 和 Pb (c) 的关系
Fig. 2 Relationships between indium and Sn (a), Zn (b) and Pb (c) in ore-forming fluid from the indium-rich and -poor deposits
●. 富铟矿床流体; ○. 贫铟矿床流体。

表 2 石英流体包裹体流体中主要成矿元素含量 ($\mu g/g$)

Table 2 Contents ($\mu g/g$) of major ore-forming elements in ore-forming fluid from the fluid inclusion in quartz

矿床类型	矿床	样号	矿物	In	Sn	Zn	Pb	Zn/Pb
富铟矿床	广西大厂锡多金属矿床	GD-10	石英	3.6	37	208	35	5.94
富铟矿床	广西大厂锡多金属矿床	GD-14	石英	4.1	39	221	33	6.70
富铟矿床	内蒙古孟恩陶勒盖 Ag-Pb-Zn 矿床	M-25	石英	2.8	21	195	62	3.15
富铟矿床	内蒙古孟恩陶勒盖 Ag-Pb-Zn 矿床	M-35	石英	2.9	15	194	73	2.66
富铟矿床	云南都龙 Sn-Zn 矿床	MJ-56	石英	2.5	17	211	43	4.91
贫铟矿床	广西佛子冲 Pb-Zn 矿床	F-9	石英	0.03	2	217	49	4.43
贫铟矿床	广西佛子冲 Pb-Zn 矿床	F-23	石英	0.03	0.9	188	31	6.06
贫铟矿床	辽宁桓仁 Pb-Zn 矿床	LW-12	石英	0.09	0.4	164	74	2.22

不相关(图2c)。贫铟矿床成矿流体中既贫In又贫Sn,二者之间看不出明显的相关关系(图2a)。

以上表明,富铟矿床及其成矿流体中Sn含量高时In含量亦高的现象似乎可以说明,在Sn大量存在的情况下,In才有可能大量进入成矿流体,形成In富集成矿的物质基础。这正好与我们早先认为In的富集成矿与Sn有关的推论相一致^[2]。

3.3 成矿流体与矿石中In、Sn、Pb和Zn的对应关系

显而易见,成矿流体中不存在的元素,不可能出现在矿石中,而成矿流体中大量存在的元素,是否就能在矿石中富集,这一问题可以通过成矿流体中成矿元素的含量与矿石中成矿元素含量的对比来说明。从图3可以看出,矿石中成矿元素的含量总是依赖于成矿流体中成矿元素的含量,无论是富铟矿床还是贫铟矿床,Pb和Zn通常是矿石中主要的有用金属元素,成矿流体中Pb和Zn含量高者,矿石中的Pb和Zn含量亦高,二者呈现很好的同步增长关系。两类矿床无论在整体上还是各自都具有这种变化特点(图3c和图3d)。

从图3a和图3b可以看出,In和Sn在富铟矿床成矿流体和矿石中的同时富集以及在贫铟矿床成矿

流体和矿石中的同时贫化,清楚地将两类矿床区分开来。因此可以认为,矿石中In的富集程度,在很大程度上取决于成矿流体中In的存在与否及数量的多少。

3.4 Sn在In富集过程中所起的作用

一个无可争议的事实是,富铟矿床同时都是富锡矿床^[2,15]。在这些富锡矿床中,相伴产出的最常见的金属元素有Cu、Zn、Pb和Sb等。但是,单独的Cu、Zn-Pb及Sb矿床中还没有富In的报道。富铟与贫铟矿床矿石及成矿流体中In与Sn的同时富集与贫化这种对应关系说明,Sn在In的富集及迁移过程中起着某种非常重要的作用。

Seward *et al.*^[16]研究了热液中In的氯化物络合物在25~350℃及饱和蒸气压力条件下的性质和In-Cl和In-O键的长度变化特点,指出In的氯化物 $[In(ClO_4)(H_2O)_3]^+$ 和 $[InCl_n(H_2O)_{6-n}]$ 是热液体系中In搬运的主要方式。事实上,地质过程中In所处的环境要比纯氯化物体系复杂得多,笔者并不认为成矿过程中In就以这种简单的方式迁移,如果In只以简单的氯化物方式搬运,则有可能富集于任何元素组合的矿床中。成矿流体中In等成矿元素的含

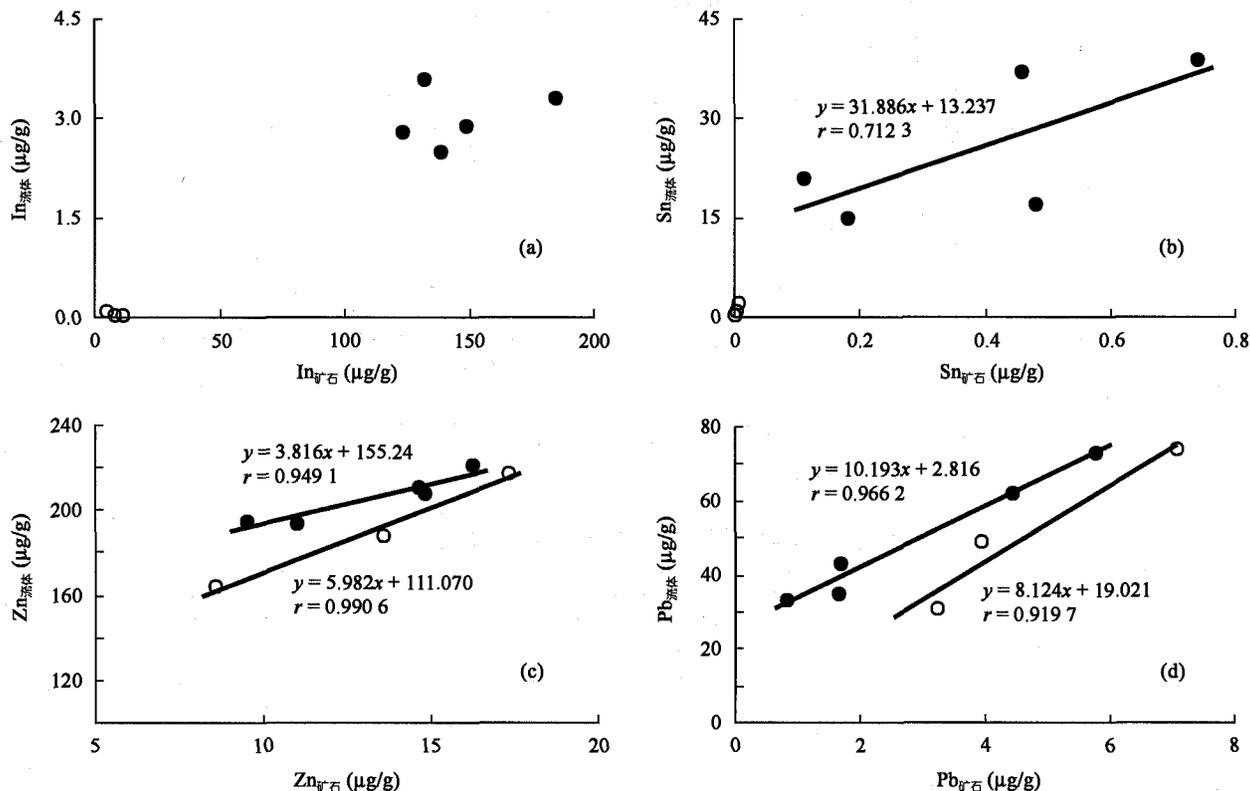


图3 成矿流体中In、Sn、Zn和Pb与矿石中In、Sn、Zn和Pb之间的关系

Fig. 3 Relationships between In, Sn, Zn and Pb in ores and ore-forming fluid from the two types of deposits

●. 富铟矿床; ○. 贫铟矿床。

量及其关系说明,存在富含 In 的成矿流体是富钢矿床形成的物质基础。因此推测,Sn 的存在更有利于 In 进入流体并随 Sn 一起迁移。在氧化条件下,In 似乎具有亲铁性,有时能够富集在褐铁矿中,在这种条件下,它与 Sn 具有相似的化学和地球化学性质,材料工业中就是利用这一性质将二者制成合金。地质过程中的活化-迁移就是在氧化条件下进行的,因此只有当 Sn 存在时,In 随其一起迁移。但二者的迁移方式和介质性质等问题还有待于进一步研究,无疑,进行 In、Sn 及相关元素共存体系的实验研究是解决这一问题的关键。目前已有的资料还不足以很好地解释这些问题。

富钢成矿流体在形成富钢矿床时,在闪锌矿大量存在的情况下,80%以上的 In 进入闪锌矿中^[2]。在闪锌矿很少的情况下,Sn 的硫酸盐类矿物也是 In 的主要载体矿物,如葡萄牙 Neves Corvo Sn-Cu 矿床的黝锡矿含 In 达 0.7%^[17],而黄铜矿平均含 In 仅 54 $\mu\text{g/g}$ 。在 Sn 以锡石形式存在的富钢矿床中,多数情况下 In 并不进入锡石中^[18],而木质结构和胶状结构的锡石有时含较高的 In,如巴西中部与花岗岩有关的 Sn-Cu 矿床,锡石含 In 0.2~0.4%^[19,20],我国白牛厂 Ag-Pb-Zn-Sn 矿床透明锡石平均含 In 1.84%^[21]。陈学明等^[21]认为,自然界中锡石中 In 的含量主要与压力有关,随压力减少 In 含量增高。木质结构和胶状锡石也是低温低压条件下形成的。但是,锡石的形成大多为中-高温条件,这也可能就是多数矿床中锡石含 In 低的原因之一。其实,In 的最重要的地球化学属性是亲硫,尤其是在还原环境中 In 的亲硫性体现得更为明显。因此,尽管 In 在流体中与 Sn 的关系更密切,但在还原条件下沉淀时,它更多地进入含硫矿物中。并且据刘英俊等^[22]的研究,In 对载体矿物具有很强的选择性,它优先进入具有六面体配位的少数几种硫化物中。

4 结 论

富钢矿床与贫钢矿床最显著的差别就是 Sn 的存在与否,前者基本上是锡石-硫化物矿床或富含 Sn 的硫化物矿床,后者中 Sn 仅为微量成分。成矿流体中 In 与 Sn 的含量也显示出两类矿床的差异,即富钢矿床成矿流体中 In 和 Sn 明显高于贫钢矿床,二者各自相差 1~2 个数量级。这就为富钢矿床的形成奠定了物质基础,同时说明 Sn 在 In 的富集及迁移过程中起着某种重要作用。推测 Sn 的存在更有

利于 In 进入流体形成富含 In 和 Sn 的成矿流体,二者一起迁移,但在沉淀成矿过程中,In 主要进入闪锌矿或 Sn 的硫酸盐类矿物中,只在少数情况下(如压力及温度降低)部分 In 进入锡石。这很可能是由 In 亲硫和亲铁的双重地球化学性质决定的。Seward *et al.*^[16]认为 In 的氯化物是 In 迁移的主要方式,但富钢矿床通常具有复杂的元素组合(如 Cu、Pb、Zn、Ag 和 Sb 等),尤其是 In 与 Sn 的亲密关系,因此,需要更多的实验来证明 In 在成矿流体中的存在及迁移方式。

南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室潘家永研究员、中国科学院地球化学研究所苏文超副研究员在矿流体包裹体中成矿元素分析及其样品处理中给予了很多咨询和帮助;中国科学院地球化学研究所漆亮副研究员、杨启顺副研究员以及冯家毅高级工程师帮助完成了矿石及成矿流体中 In、Sn、Pb 和 Zn 的分析测试,在此表示衷心的感谢。

参考文献 (References):

- [1] Zhang Qian, Zhan Xin-zhi, Pan Jia-yong, Shao Shu-xun. Geochemical enrichment and mineralization of indium [J]. *Chinese J Geochem*, 1998, 17(3): 221-225.
- [2] 张乾,刘志浩,战新志,邵树勋. 分散元素铟富集的矿床类型和矿物专属性[J]. *矿床地质*, 2003, 22(3): 309-316.
Zhang Qian, Liu Zhi-hao, Zhan Xin-zhi, Shao Shu-xun. Specialization of ore deposit types and minerals for enrichment of indium [J]. *Mineral Deposits*, 2003, 22(3): 309-316 (in Chinese with English abstract).
- [3] 韩发,沈建忠. 大厂锡矿床硅、氧同位素地球化学[J]. *矿物学报*, 1994, 14(2): 172-180.
Han Fa, Shen Jian-zhong. Silicon and oxygen stable isotopic geochemistry of Dachang tin deposit [J]. *Acta Mineral Sinica*, 1994, 14(2): 172-180 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李酉兴,雷元青. 广西大厂法门期岩相古地理与锡多金属矿的关系[J]. *地层学杂志*, 1994, 18(1): 53-56.
Li You-xing, Lei Yuan-qing. Relationship between the Upper Devonian Famennian lithofacies and palaeogeography and the tin-multimetal ore in the Dachang area, Guangxi [J]. *J Stratigr*, 1994, 18(1): 53-56 (in Chinese with English abstract).
- [5] 叶绪孙,严云秀,何海洲. 广西大厂超大型锡矿成矿条件与历史演化[J]. *地球化学*, 1999, 28(3): 213-221.
Ye Xu-sun, Yan Yun-xiu, He Hai-zhou. The mineralization factors and tectonic evolution of Dachang superlarge tin deposit, Guangxi, China [J]. *Geochimica*, 1999, 28(3): 213-221 (in Chinese with English abstract).
- [6] 刘玉平,李朝阳,谷团,王金良. 都龙锡锌多金属矿床成矿物质来源的同位素示踪[J]. *地质地球化学*, 2000, 28(4): 75-

82.
Liu Yu-ping, Li Chao-yang, Gu Tuan, Wang Jin-liang. Isotopic compositions on the source of ore-forming materials of Dulong Sn-Zn polymetallic deposit, Yunnan [J]. *Geology-Geochemistry*, 2000, 28(4): 75 - 82 (in Chinese with English abstract).
- [7] 刘玉平, 李朝阳, 刘家军. 都龙矿床含矿层状夕卡岩成因的地质地球化学证据[J]. *矿物学报*, 2000, 20(4): 378 - 384.
Liu Yu-ping, Li Chao-yang, Liu Jia-jun. Characteristics and genesis of stratiform skarn from Dulong tin-zinc polymetallic deposit, Yunnan [J]. *Acta Mineral Sinica*, 2000, 20(4): 378 - 384 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张乾, 战新志, 裘愉卓, 邵树勋, 刘志浩. 内蒙古孟恩陶勒盖银铅锌铜矿床的铅同位素组成及矿石铅的来源探讨[J]. *地球化学*, 2002, 31(3): 253 - 258.
Zhang Qian, Zhan Xin-zhi, Qiu Yu-zhuo, Shao Shu-xun, Liu Zhi-hao. Lead isotopic composition and lead source of the Meng'entaolegai Ag-Pb-Zn-In deposit in Inner Mongolia [J]. *Geochimica*, 2002, 31(3): 253 - 258 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张炯飞, 庞庆邦, 朱群, 金成洙. 内蒙古孟恩陶勒盖银铅锌矿床白云母 Ar-Ar 年龄及其意义[J]. *矿床地质*, 2003, 22(3): 253 - 256.
Zhang Jiong-fei, Pang Qing-bang, Zhu Qun, Jin Cheng-zhu. Mengentaolegai Ag-Pb-Zn deposit in Inner Mongolia: Ar-Ar age of muscovite and its significance [J]. *Mineral Deposits*, 2003, 22(3): 253 - 256 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张乾. 广西河三铅锌矿田同位素和微量元素特征及矿床成因[J]. *有色金属矿产与勘查*, 1993, 2(4): 245 - 254.
Zhang Qian. Characteristics of isotopes and trace elements and genesis of the Hesun Pb-Zn orefield, Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. *Geol Explor Non-Ferr Metal*, 1993, 2(4): 245 - 254 (in Chinese with English abstract).
- [11] 雷良奇, 宋慈安, 冯佐海. 广西佛子冲铅锌(银)成矿带多元素富集特征及矿床成因[J]. *矿床地质*, 2002, 21(1): 74 - 82.
Lei Liang-qi, Song Ci-an, Feng Zuo-hai. Discussion on multi-element enrichment characteristics and genesis of Fuzichong Pb-Zn (Ag) metallogenic belt, Guangxi [J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(1): 74 - 82 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张乾. 辽宁桓仁夕卡岩型铜铅锌多金属矿床的地球化学特征[J]. *地球化学*, 1992, 21(3): 243 - 254.
Zhang Qian. Geochemical characteristics of Huanren skarn-type Cu-Pb-Zn polymetal deposit in Liaoning Province, China [J]. *Geochimica*, 1992, 21(3): 243 - 254 (in Chinese with English abstract).
- [13] 苏文超, 漆亮, 胡瑞忠, 张国平. 流休包裹体中稀土元素的 ICP-MS 分析研究[J]. *科学通报*, 1998, 43(10): 1 094 - 1 098.
Su Wenchao, Qi Liang, Hu Ruizhong, Zhang Guoping. Analysis of rare earth elements in fluid inclusions by ICP-MS [J]. *Chinese Sci Bull*, 1998, 43(10): 1 094 - 1 098 (in Chinese).
- [14] 苏文超, 胡瑞忠, 漆亮, 方维萱. 黔西南卡林型金矿床流体包裹体中微量元素研究[J]. *地球化学*, 2001, 30(6): 512 - 516.
Su Wen-chao, Hu Rui-zhong, Qi Liang, Fang Wei-xuan. Trace elements in fluid inclusions in the Carlin-type gold deposits, southwestern Guizhou Province [J]. *Geochimica*, 2001, 30(6): 512 - 516 (in Chinese with English abstract).
- [15] Murao S, Furuno M, Uchida A C. Geology of indium deposits: A review [J]. *Mining Geol*, 1991, 41(1): 1 - 13.
- [16] Seward T M, Henderson C M B, Charnock J M. Indium (III) chloride complexing and solvation in hydrothermal solutions to 350 °C: An EXAFS study [J]. *Chem Geol*, 2000, 167(1/2): 117 - 127.
- [17] Benzaazoua M, Marion L P, Pinto A, Migeon H, Wagner F E. Tin and indium mineralogy within selected samples from the Neves Corvo ore deposit (Portugal): A multidisciplinary study [J]. *Mineral Eng*, 2003, 16(11, suppl 1): 1 291 - 1 302.
- [18] 杨世瑜. 滇东南锡矿时空分布特征及成矿模式[J]. *地质科学*, 1990, 25(2): 137 - 148.
Yang Shi-yu. Characteristics of distribution in time and space of tin ore in Southeast Yunnan tin ore belt and its metallogenic model [J]. *Sci Geol Sinic*, 1990, 25(2): 137 - 148 (in Chinese with English abstract).
- [19] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *J Petrol*, 1984, 25(4): 956 - 983.
- [20] Botelho N F, Moura M A. Granite-ore deposit relationships in Central Brazil [J]. *J South Am Earth Sci*, 1998, 11(5): 427 - 438.
- [21] 陈学明, 林棕, 谢富昌. 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*, 1998, 33(1): 115 - 124.
Chen Xue-ming, Lin Zong, Xie Fu-chang. Geological and geochemical characteristics of the Bainiuchang superlarge silver polymetallic deposit of superimposed mineralization, Yunnan Province [J]. *Sci Geol Sinica*, 1998, 33(1): 115 - 124 (in Chinese with English abstract).
- [22] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 387 - 393.
Liu Ying-jun, Cao Li-ming, Li Zhao-lin, Wang He-nian, Chu Tong-qing, Zhang Jing-rong. *Element Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 1984: 387 - 393 (in Chinese).