

文章编号 0258-7106 (2007) 04-0475-06

铟矿床研究现状及其展望*

李晓峰¹, Watanabe Yasushi², 毛景文¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 日本产业技术综合研究院地圈资源与环境研究所, 筑波 3508567, 日本)

摘 要 铟是一种稀有金属,它在高科技产业中的应用价值越来越受到人们的普遍关注。由于供求矛盾突出,其消费价格水平不断上涨。目前,世界矿业界在铟业投入的技术和资金支持不断增加,以寻求满足日益增长的经济发展的需求。但相对来说,与铟有关的地质工作程度较低,新探明的储量远远跟不上其消费的增长水平,因此,有必要加大地质投入,探求新的资源量,保障世界经济可持续发展的要求。文章在总结前人研究成果的基础上,综述了世界上铟矿床的分布及其地质构造背景,以及铟矿物学、矿床成因和成矿机制等方面的最新研究成果。文章指出,为了寻找潜在的铟资源,必须加强铟的基础地质研究工作,在对铟的成因矿物学、成矿机制及其成矿环境进行深入系统研究的基础上,建立铟矿床的成矿模型和找矿勘查模型。

关键词 地质学 铟矿床 成矿作用 进展 综述

中图分类号: P618.82

文献标识码: A

Research situation and economic value of indium deposits

LI XiaoFeng¹, WATANABE Yasushi² and MAO JingWen¹

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Institute for Geo-Resources and Environment, AIST, Tsukuba 305-8567, Japan)

Abstract

Indium is a relatively rare metal with increasing economic importance in a variety of high-tech application fields such as semiconductors, solar cells and display devices like LCDS. The mining companies have provided much technical and financial support for indium exploration in the past several years. In spite of this, there has been up till now only very insufficient geological information on the indium deposit in such aspects as its tectonic setting, mode of occurrence, metallogenic process and exploration model. This paper has made a review of mineralogy, geology, types, distribution and tectonic settings of indium deposits studied before, and also put forward some opinions on further researches, such as the exploration implications.

Key words: geology, indium deposit, metallogenic process, economic value, review

作为稀有分散金属,由于铟具有低的熔点和良好的超导性能(在 3.4 K 温度下),因此,在世界经济的发展中,它扮演越来越重要的角色。在铜合金中加入少量的铟,可以大大增强铜合金在海水中的耐腐蚀性,因而被广泛地运用于船舶制造工业。由于

它在高精端技术材料中的不可替代性,如在半导体材料、太阳能电池和液晶显示器等制造业中,而逐步显示出巨大的经济效益和社会效益。此外,作为可熔性合金和焊接材料,它在高速信号处理机、ITO(透明电极)以及齿科材料等方面也表现出良好的潜在

* 本文得到国家自然科学基金青年项目(40403006)、日本学术振兴学会研究助成金的资助

第一作者简介 李晓峰,男,1971 年生,博士,主要从事矿床地质和地球化学的科研工作。E-mail: lxfdc@sina.com

收稿日期 2007-02-09 改回日期 2007-04-16。李 岩、许德焕编辑。

应用前景。

世界经济的蓬勃发展和对铟资源的旺盛需求,刺激了铟产业规模的不断壮大和技术水平的不断提高。世界上对金属铟的大量需求始于 1994 年底 1995 年初。在随后的十几年间,铟的价格一路攀升,由 1995 年初的 131 美元/kg 上升到 2005 年初的 1000 美元/kg (McCutcheon, 1996),凸现了铟在世界经济发展中的重要性。已有的研究表明,铟主要赋存于与锌、铜和锡等有关的矿床中,而且是在锌的冶炼过程中作为副产品来回收。在富锌和锡的矿床中,铟具有明显的富集趋势 (Roskill, 1996; Murao et al., 1990)。近年来,在部分铜矿床中也发现了铟,如加拿大的 Mount Pleasant 矿床和葡萄牙的 Neves Corvo 多金属矿床 (Benzazoua et al., 2003; Sinclair et al., 2006)。与其他金属矿床的研究水平相比,与铟矿床有关的基础地质和科学研究工作还相对十分薄弱 (Kovalenker et al., 1993; Hannington et al., 1999; Schwartz-Schampera et al., 1999; Sinclair et al., 2006; Seifert et al., 2006; 顾雪祥等, 2004; 刘大春等, 2005; 伍永田等, 2005),有些领域的研究几乎为空白。本文总结和分析了近年来铟矿物学、铟矿成矿流体和矿床成因机制等方面的研究成果,并对其今后研究方向提出了几点建议。

1 铟矿研究进展

世界上铟资源的分布十分不均匀。已探明的铟资源主要分布于大陆边缘锡矿带,如中欧、澳大利亚南部、南美、东亚、美国西部以及加拿大东部等地区。世界上最大的铟矿床则位于与板块俯冲作用有关的西太平洋板块边界(如东亚和东北亚地区)、玻利维亚和 Nazca-南美板块边界、秘鲁的北美西板块边缘以及中欧的海西和阿尔卑斯造山带 (Schwartz-Schampera et al., 2002)。中国已经探明的铟资源分布也十分不均匀,主要集中于华南褶皱带和古亚洲褶皱带,分布于广西、云南、内蒙古、广东、青海、湖南、江西、贵州和四川等省区,其中,广西、云南、内蒙古和广东等 4 个省区的铟资源量占全国总储量的 80%。著名的矿床有广西的大厂、云南的个旧和都龙、湖南的七宝山、内蒙古的孟恩陶勒盖等 (张乾等, 2003; 陈学明等, 1998; 朱笑青等, 2006; Zhang et al., 2006),其中,中国四川岔河锡矿是一个新发现的富铟锡矿床 (郭春丽等, 2006)。

1.1 铟的矿物学研究

目前,对铟的矿物学研究主要是采用电子探针手段,已发现含铟的矿物主要有锡石、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、黝锡矿、铟石以及一些未知名的矿物。铟主要集中于闪锌矿、锡石等精矿中,在这些矿石中,In 的含量与矿石中 Zn 和 Cu 的含量密切相关,说明铟主要赋存于 Zn 和 Cu 的硫化物中。铟在矿床中和矿物中的分布也十分不均匀,即使在同一矿床的不同矿石类型中,其铟的含量差别也很大。如在日本西南部 Goka 矿床中,铟主要赋存于黄铜矿、闪锌矿、黝锡矿、锡石、方铅矿和毒砂等硫化物中,其中,黝锡矿的铟含量最高, w_{In} 可达 9.63%。除了上述矿物以外,在该矿床中还发现有 $mCu(In, Sn)S_2 \cdot n(Zn, Fe)S$ 未知矿物,它是介于闪锌矿与 Zn-Cu-Fe-In-Sn-S 之间或者黝锡矿与 Zn-In 矿物之间的变种 (Murao et al., 1990)。而在日本 Toyoha 铟矿床中,铟主要赋存于 Zn-In 矿物中以及含铟的闪锌矿、黄铜矿、kesterite、黝锡矿中。另外,在 Toyoha 铟矿床中,还发现了 2 种未知名的矿物,一种是 Zn-In 矿物,介于闪锌矿与硫铟铜矿之间;另一种是 Ag-In 矿物,其成分为 $AgInS_2$ 。在这些矿物中,铟主要以固溶体的形式存在。研究结果表明,铟的形成温度一般比同一矿床中的其他金属形成温度要高 50~100℃ (Ohta, 1989)。在德国 Erzgebirge 东部 Freiberg 地区的富铟多金属脉状矿床中,铟主要以 2 种方式存在,一种是存在于 Zn-Sn-Cu 矿化阶段的闪锌矿中,另一种存在于富 Cu 的 Zn-Cu-Sn-In-S 矿化阶段。在这些多金属矿脉中,铟的含量最高可达 0.15%,平均为 176×10^{-6} 。在含石英的 As(-Au)-Zn-Cu-(In-Cd)-Sn-Pb-Ag-Bi-Sb 多金属硫化物矿石中,铟的最高品位是 1560×10^{-6} ,平均为 253×10^{-6} ;而在 Muldenhütten 类型矿石中,铟的最高品位是 785×10^{-6} ,平均为 284×10^{-6} (Seifert et al., 2006)。在加拿大 Mount Pleasant 地区的铟矿床中,90% 多的铟赋存于闪锌矿中,仅有少部分赋存于黄铜矿中 (Sinclair et al., 2006a)。

在铟的成矿作用中,铟主要表现为以离子替代的方式进入富铟矿物的晶格中。尽管铟和锡在化学组成上具有明显的相关性,但是它们在闪锌矿的晶格中的位置是不同的。Ishihara 等 (2006) 在对日本 Ikuno 铟矿床中的闪锌矿进行 EPMA 分析时发现,铟主要集中于代表早期结晶阶段的结晶带内带,而锡倾向富集于结晶带的晚期。在日本 Ashio 铟矿床

的闪锌矿中, 铟和锡的分布情况与 Ikuno 矿床类似, 锡也倾向在晚期的结晶带富集。铟和锡的明显的相关性表明, 在闪锌矿结晶过程中, Cu、In 对 Zn 和 Fe 具有较强的替代作用 (Benzaazoua et al., 2003; Sinclair et al., 2006)。

1.2 铟矿的类型

富铟的矿床主要分布在与岩浆活动有关的、具有明显地温梯度的活动洋壳、大陆边缘或者造山带中, 这些矿床的形成时间与造山带的峰期、或与俯冲作用和碰撞有关的区域成矿作用的时限是一致的 (Schwarz-Schampera et al., 2002)。由于对铟的成矿作用方面的研究工作还十分有限, 因此, 对其矿床类型也没有统一的认识和标准。已有的矿床分类, 大多是研究者根据研究对象和实际需要而划分的, 如, Schwarz-Schampera 等 (2002) 在对比世界上富铟矿床地质特征的基础上, 把铟矿床分为 8 种类型: ①与脉状-网脉状锡矿、钨矿以及斑岩锡矿有关的; ②与火山岩中的块状硫化物 (VMS) 矿床有关的; ③与喷流沉积 (SEDEX) 矿床有关的; ④与多金属脉状矿床有关的; ⑤与浅成低温矿床有关的; ⑥与活动的岩浆系统有关的; ⑦与斑岩铜矿有关的; ⑧与矽卡岩矿床有关的。Ishihara 等 (2006) 把日本岛弧岩带铟矿床划分为 2 种类型, 一类是与块状硫化物矿床有关的, 如 Kidd Creek, Broken Hill, Sullivan, Brunswick 等, 另一类是与浸染状、脉状和矽卡岩矿床有关的, 如 Mt. Pleasant, Toyoha, Ikuno, Akenobe, Kawayama, Nakatatsu 和 Taishu。Zhang 等 (1998)、张乾等 (2003) 对中国不同类型铅锌矿内铅锌矿石中铟的富集、赋存状态进行了研究和分析, 发现锡石硫化物矿床和富锡的铅锌矿床是比较富铟的。根据产铟铅锌矿床的类型, 把富铟矿床分为 2 种类型: ①以海底喷流沉积成矿作用为主的矿床; ②与岩浆作用有关的矿床。

1.3 铟的成矿作用

铟是一个亲铜元素, 在岩浆分馏过程中, 属于不相容元素。因此, 在岩浆结晶分馏的晚期, 大部分铟还倾向保留在熔体中, 铟的分馏演化可能与锡类似 (Lehmann, 1990)。铟在活火山喷气口富集的现象以及赋存于与岩浆有亲缘性的矿床中, 说明铟是岩浆来源的, 其成矿作用与岩浆作用密切相关。由于岩浆挥发分富含金属离子的载体, 因此有利于形成稀有元素 (如 In, Sn, Se 和 Bi) 矿床。在岩浆热液系统中, 铟的氯合络离子 (如 InCl_4^-) 和水合络离子可能

是铟的主要迁移方式。温度的增加, 有利于提高铟与氯络离子的结合能力, 在 $300 \sim 350^\circ\text{C}$ 之间, InCl_4^- 的浓度最大 (Seward et al., 2000; Wood et al., 2006)。朱笑青等 (2006) 对比研究发现, 富铟矿床成矿流体中的铟比贫铟矿床成矿流体中的铟高 $1 \sim 2$ 个数量级, 富铟的成矿流体是形成铟矿床的基础。另外, 铟可与其他元素 (如 Zn、As、B、Sn、Mo、Cu、Cd、Ag、Te、As 和 Se) 一样, 以氯络合物的形式 (如 InCl 、 InCl_3 和 InBr), 以气态的形式迁移、富集成矿。有关气态迁移金属的事实, 已被有关实验的数据所证实 (张荣华等, 2001)。

关于成矿过程中铟的物质来源的研究还处于起步阶段。在这个方面日本学者和欧美学者研究比较多, 分别代表了铟成矿物质来源的两种观点, 即铟的地幔 (或岩浆) 来源和地壳来源。日本学者研究发现, 日本的铟矿床主要与西南部钛铁矿系列的花岗岩有关 (Murao et al., 1991), 从而认为铟主要是壳源的。Murao 等 (1991) 认为, 日本铟矿有 7 个共同的地质特征: ①具有酸性岩浆作用; ②钛铁矿系列的花岗岩; ③特定时期钛铁矿系列花岗岩; ④大陆地壳环境下的热液锡多金属矿床中铟的品位为 $(n \times 10^2 \sim 10^3) \times 10^{-6}$, 而火山-沉积矿床中铟的品位为 $(n \times 10) \times 10^{-6}$; ⑤产于一些热液锡多金属矿床的火山洼地中; ⑥主要赋存于火山岩、斑岩、蚀变花岗岩及其围岩中; ⑦主要富集于锡石和硫化物共存的地方。最近, 在日本中部 Honshu 的 Green Tuff 带中发现了大量的铟异常, 然而在 Toyoha 和 Ashio 矿区没有花岗质岩石出露, 表明次火山环境对铟的富集也是至关重要的, 铟可以富集于火山-次火山环境的磁铁矿系列花岗岩体中。虽然磁铁矿系列的花岗岩中硫的活动性可能对铟的富集起着至关重要的作用, 但是在这种情况下, 铟和碳也必定来源于沉积岩围岩 (Ohta, 1995)。Ishihara 等 (2006) 通过对比分析日本与钛铁矿系列和磁铁矿系列有关的 2 种类型的铟矿床, 认为钛铁矿系列花岗岩和磁铁矿系列花岗岩的混合作用是引起日本超强度铟矿化的主要因素, 沉积物源区的性质以及氧逸度和硫逸度的变化控制着铟矿床的形成, 他们强调铟的地壳来源。类似的观点有, Ohta (1991) 对日本最大的铟矿 Toyoha 矿床的成矿流体和氧化还原状态研究发现, 铟的成矿温度为 400°C , 成矿流体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $5\% \sim 7\%$, $f(\text{O}_2)$ 低于磁黄铁矿的上限, 而 $f(\text{S}_2)$ 则介于磁黄铁矿与黄铁矿的边界, 从而得出铟是源于钛铁矿系列

花岗岩的成矿流体与大气降水来源的地热流体的混合作用的结果,成矿物质来源于钛铁矿系列花岗岩。Murao 等(1991)也认为高度演化的还原性的钛铁矿系列的花岗岩是铟的可能源岩。Kooiman 等(1992)认为,日本和加拿大的富铟矿床主要富集于转换压缩(左旋剪切)背景,富铟的锡多金属矿床与高度分异的、硅质的、富氟的侵入体之间的关系密切,这些侵入体以及特有的元素组合(如 Sn-Mo-W)指示了铟的地壳来源。

欧美学者根据富铟的矿床主要赋存于与岩浆有亲缘性的矿床(如,Sn-多金属矿床、富 Ag 的热液贱金属矿床、浅成低温 Au-Ag-贱金属矿床、斑岩 Cu-Mo 矿床和 VMS 矿床)以及活动火山喷气口,认为铟矿床与岩浆具亲缘性,铟主要来源于岩浆,甚至有可能来自地幔。另外,Sn 多金属矿床和贱金属矿床中富铟硫化物的硫同位素($\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 主要变化于 $-3\text{‰} \sim +3\text{‰}$)和成矿流体主要为高温流体等有关事实,也支持了铟的岩浆来源的观点(Seifert, 1999; Schwarz-Schampera et al., 2002)。在上述地质事实的基础上,根据富铟矿床与后碰撞煌斑岩脉和 A 型花岗岩在时空上紧密共生,以及流体包裹体和硫同位素特征,欧美学者认为富铟的流体主要来自于幔源的岩浆。富铟的成矿流体主要是低盐度的富 CO_2 的流体,成矿流体的温度在 $250 \sim 410^\circ\text{C}$ 之间(Seifert et al., 2006; Sinclair et al., 2006)。因此认为,与后碰撞有关的花岗岩是寻找铟矿床的有利地段(Seifert et al., 2006)。

张乾等(2003)、Zhang 等(1998, 2006)认为,在中国富铟铅锌矿床中,以海底喷流沉积成矿作用为主的铟是多源的,而与岩浆作用有关的铟则主要来源于岩浆。

2 研究展望

迄今,对铟资源的研究主要集中在其经济意义和应用价值等方面,而对其地质特征、成因和背景等则研究甚少,已有的研究工作也主要集中于铟的矿物学研究,而且研究者也比较少。有关铟资源地质特征及其成因研究方面的文献也是十分有限,因此,要寻找新的铟资源量,必须加大其科学研究力度,提出有利于铟形成的地质条件,建立铟的成矿模型和找矿模型,从而指导找矿实践。因此,为使铟矿床的地质研究和成矿理论水平上一个新的台阶,需

加强以下方面的研究:

(1) 加强铟的成因矿物学研究

矿床是有用矿物的聚集体,因此,矿物学的研究是矿床学研究的基础,尤其是对稀有金属矿床来说,其矿物学的研究是必需的,也是必要的。当前,对铟的矿物学研究主要集中于铟在不同类型矿石中的分布、分配及其与 Sn、Cu、Cd、Zn 等元素的相关性研究。而对铟与这些离子之间的替代方式以及替代机制研究还比较薄弱。在什么条件下岩浆热液系中有可能发生铟的富集?什么情况下铟能够与其他元素产生替代以及与其他元素以固溶体的形式存在?为什么有些闪锌矿中不能富集铟?为什么在黄铜矿中又可以富集铟?世界上是否独立存在铟的矿物?因此,需要加强宏观矿物学和微观矿物学的综合研究,采用先进的技术和手段(诸如, SIMS 和 LA-ICP-MS 以及微区的硫同位素),研究铟在岩浆结晶分馏过程中的地球化学行为、与其他离子的替代机制和沉淀的物理化学环境。

(2) 加强铟的成矿环境和成因机制研究

当前,铟的成矿作用和成矿机制方面的研究还比较薄弱,对铟的成矿流体研究还处于初始阶段,已有的同位素结果显示了成矿物质和成矿流体的截然相反的来源(Ishihara et al., 2006; Seifert et al., 2006),因此,在详细的基础地质研究的基础上,配合矿物学研究,运用微量元素地球化学、微区同位素地球化学以及 SEM-CL、激光拉曼和 LA-ICP-MS 等手段,查明与铟矿化有关的成矿环境以及成矿期次和成矿流体活动的特点,并配合成矿年代学研究,进而阐明铟的成矿环境和成因机制。

(3) 建立铟的成矿模型,指导找矿实践

矿床学的研究目的是提出合理的成矿机制和成矿环境,建立成矿模型,从而指导找矿实践。因此,在对单个矿床进行成矿机制详细研究(小尺度)和对其进行地质构造背景宏观研究(大尺度)的基础上,对不同类型铟矿床的成矿条件控矿因素以及成矿流体和成矿物质来源进行系统的归纳、综合,建立成矿模型和找矿模型,进而提出找矿勘查模型,对于铟的成矿机制研究以及寻找新的资源量,都具有重要的经济和理论意义。

(4) 探索独立铟矿床或以铟为主的矿床是否存在

与碲和锗类似,铟是一种分散元素,很难形成独立矿床或以铟为主的矿床。但是在中国扬子地台西南缘发现有独立碲矿床(陈毓川等, 1996)和锗矿床

(涂光炽等, 2003), 而该地区又有明显的铟区域地球化学异常, 以及以岔河和个旧为代表的锡矿床都显示出明显富铟的特点, 因此, 通过进一步研究, 是否有可能找到独立或以铟为主的矿床, 是值得思考的科学问题。在中国的华南地区, 也同样广泛发育磁铁矿系列和钛铁矿系列的 2 种不同类型的花岗岩, 这 2 类花岗岩的过渡地区也是良好的铟的找矿前景区。

References

- Benzaazoua M, Marion P, Pinto A, Migeon H and Wagner I. 2003. Tin and indium mineralogy within selected samples from the Neves Corvo ore deposit (Portugal): A multidisciplinary study [J]. *Minerals Engineering*, 16: 1291~1302.
- 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).
- Chen Y C, Mao J W, Luo Y N, Wei J X, Cao Z M, Yin J Z, Zhou J X and Yang B C. 1996. Geology and geochemistry of the Dashuigou tellurium (gold) deposits in Western Sichuan, China [M]. Beijing: Atomic Energy Press. 146p (in Chinese with English abstract).
- Gu X X, Wang Q, Fu S H and Tang J X. 2004. Resources and environmental effects of abnormal enrichment of dispersed elements: Research situation and tendency [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(1): 15~21 (in Chinese with English abstract).
- Guo C L, Wang D H, Fu X F, Zhao Z G, Fu D M and Chen Y C. 2006. Discovery of indium-rich ores in Chahe tin deposit, Huili, Sichuan, and its significance [J]. *Geological Review*, 52(4): 550~555 (in Chinese with English abstract).
- Hannington M D, Bleeker W and Kajrsgaard I. 1999. Sulfide mineralogy, geochemistry, and ore genesis of the Kidd Creek deposit, Part 1: North, central and south orebodies [A]. In: Hannington M D and Barrie C T, ed. *The giant Kidd Creek volcanogenic massive sulfide deposit, western Abitibi Subprovince, Canada* [M]. *Econ. Geol. (Mono.)*, 10: 163~223.
- Ishihara S, Hoshino K, Murakami H and Endo Y. 2006. Resource evaluation and some genetic aspects of indium in the Japanese ore deposits [J]. *Resource Geology*, 56(3): 347~364.
- Kooiman G J A and Ruitenberg A A. 1992. Indium deposits and their economic potential: Report on a mission to Japan [J]. New Brunswick Department of Natural Resources and Energy, Mineral Resources, Geoscience Report. 92~3.
- Kovalenker V A, Laputina I P, Znamenskii V S and Zotov I A. 1993. Indium mineralization of the Great Kuril Island arc [J]. *Geology of Ore Deposits*, 35: 491~495.
- Lehmann B. 1990. Metallogeny of tin [M]. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 32. Heidelberg: Springer.
- Liu D C, Yang B, Dai Y N and Ma W H. 2005. The resources and industrial development of indium in Yunnan Province [J]. *Journal of Guangdong Non-Ferrous Metals*, 15(1): 1~3 (in Chinese with English abstract).
- McCutcheon W. 1996. Specialty nonferrous metals-indium [A]. In: Godin E, ed. *Canada Minerals Yearbook 1995- Review and outlook, Mineral and Metals Sectors* [C]. Ottawa: Natural Resources Canada. 5520~5522.
- Murao S and Furuno M. 1990. Indium-bearing ore from the Goka Mine: Naegi district, Southwestern Japan [J]. *Mining Geol.*, 40: 35~42.
- Murao S, Furuno M and Uchida A C. 1991. Geology of indium deposits: A review [J]. *Mining Geol.*, 41: 1~13.
- Ohta E. 1989. Occurrence and chemistry of indium-containing minerals from the Toyoha mine, Hokkaido, Japan [J]. *Mining Geol.*, 39(6): 355~371.
- Ohta E. 1991. Polymetallic mineralization at the Toyoha Mine, Hokkaido, Japan [J]. *Mining Geology*, 41(5): 279~295.
- Ohta E. 1995. Common features and genesis of tin-polymetallic veins [J]. *Resource Geology (Special Issue)*, 18: 187~195.
- Roskill. 1996. The economics of indium [M]. Roskill Information Services Ltd. 111p.
- Schwarz-Schampera U and Herzig P M. 1999. Indium: Geology, mineralogy, and economics-reviews [J]. *Zeitschrift für Angewandte Geologie*, 45: 164~169.
- Schwarz-Schampera U and Herzig P M. 2002. Indium: Geology, mineralogy and economics [M]. Berlin: Springer-Verlag. 257p.
- Seifert T and Sandmann D. 2006. Mineralogy and geochemistry of indium-bearing polymetallic vein-type deposits: Implications for host minerals from the Freiberg district, Eastern Erzgebirge, Germany [J]. *Ore Geology Reviews*, 28: 1~31.
- Seifert Th. 1999. Relationship between late variscan lamprophyres and hydrothermal vein mineralization in the Erzgebirge [A]. In: Stanley C J, ed. *Mineral Deposits: Processes to Processing*, Vol. 1 [C]. Proceeding of the 5th biennial SGA meeting and the 10th quadrennial IAGOD symposium. London, 22-25 August 1999. Balkema: 429~432A.
- Seward T M, Henderson C M B and Charnock J M. 2000. Indium (III) chloride complexing and solvation in hydrothermal solutions to 350°C: An EXAFS study [J]. *Chem. Geol.*, 167: 117~127.
- Sinclair W D, Kooiman G J A, Martin D A and Karsgaard I M. 2006. Geology, geochemistry and mineralogy of indium resources at Mount Pleasant, New Brunswick, Canada [J]. *Ore Geology Reviews*, 28: 123~145.
- Tu G C. 2003. Geochemistry of dispersed elements and their metallogenesis [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract).
- Wood S A and Samson I M. 2006. The aqueous geochemistry of Gallium, germanium, indium and scandium [J]. *Ore Geology Review*, 28: 57~102.
- Wu Y T, Wang M Y and Fan S K. 2005. Reviews on the enrichment of

- indium [J]. South Land Resource, 10 : 33~35 (in Chinese).
- Zhang Q, Liu Z H, Zhan X Z and Shao S X. 2003. Specialization of ore deposit types and minerals for enrichment of indium [J]. Mineral Deposits, 22(1) : 309~316 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Zhan X Z, Pan J Y and Shao S X. 1998. Geochemical enrichment and mineralization of indium [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 17(3) : 221~225.
- Zhang Q, Zhu Z Q, He Y L, Jiang J J and Wang D P. 2006. Indium enrichment in the Meng 'entaolegai Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia, China [J]. Resource Geology, 56(3) : 337~346.
- Zhang R H and Hu S M. 2001. The evolution of deep earth fluids and ore genesis [J]. Earth Science Frontiers, 8(4) : 297~310 (in Chinese with English abstract).
- Zhu X Q, Zhang Q, He Y L and Zhu Z H. 2006. Relationships between indium and tin, zinc, and lead in ore-forming fluid from the indium-rich and -poor deposits in China [J]. Geochimica, 35(1) : 1~5 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈学明, 林 棕, 谢富昌. 1998. 云南白牛厂超大型银多金属矿床叠

- 加成矿的地质地球化学特征 [J]. 地质科学, 33(1) : 115~124.
- 陈毓川, 毛景文, 魏家秀, 骆耀南, 曹志敏. 1996. 四川大水沟碲(金)矿床地质和地球化学 [M]. 北京: 原子能出版社. 1~146.
- 顾雪祥, 王 乾, 付绍洪, 唐菊兴. 2004. 分散元素超常富集的资源与环境效应: 研究现状与发展趋势 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(1) : 15~21.
- 郭春丽, 王登红, 付小方, 赵支刚, 傅德明, 陈毓川. 2006. 四川岔河锡矿区富铟矿石的发现及其找矿意义 [J]. 地质论评, 52(4) : 550~555.
- 刘大春, 杨 斌, 戴永年, 马文会. 2005. 云南省铟资源及其产业发展 [J]. 广东有色金属学报, 15(1) : 1~3.
- 涂光炽. 2003. 分散元素地球化学及成矿机制 [M]. 北京: 地质出版社.
- 伍永田, 王明艳, 范森葵. 2005. 分散元素铟的富集规律研究综述 [J]. 南方国土资源, 10 : 33~35.
- 张 乾, 刘志浩, 战新志, 邵树勋. 2003. 分散元素铟富集的矿床类型和矿物专属性 [J]. 矿床地质, 22(1) : 309~316.
- 张荣华, 胡书敏. 2001. 地球深部流体演化与矿石成因 [J]. 地学前缘, 8(4) : 297~310.
- 朱笑青, 张 乾, 何玉良, 祝朝辉. 2006. 富铟及贫铟矿床成矿流体中铟与锡铅锌的关系研究 [J]. 地球化学, 35(1) : 1~5.

<http://www.kcdz.ac.cn/>