

中国富铟矿床的成矿规律及找矿方向

张乾, 王大鹏

(中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

分散元素铟在尖端科技领域的应用至今无法替代, 因此世界发达国家都将其列为重要的战略资源。目前, 工业应用的铟主要来自两个方面, 其一为二次资源回收, 其二为富(含)铟矿床的开发利用。前者远不能满足需求, 因此近 10 余年来越来越多的国家将重点放在富铟矿床的研究和寻找上来。本文归纳我国 20 年来富铟矿床成矿规律的研究成果并探索其找矿方向。

1 中国富铟矿床的成矿规律

1) 富铟矿床存在矿床类型的专属性。张乾等(2003)研究了铟富集成矿的矿床类型专属性, 近 20 年来国内外对富铟矿床的研究证实铟的这一富集成矿规律是成立的: 中国乃至全世界几乎所有的富铟矿床都是锡石硫化物矿床或富含锡的铅锌多金属矿床。前者中锡主要以锡石存在, 锡是最主要的成矿元素。后者中锡主要以黄锡矿等锡的硫酸盐矿物存在或以微细粒锡矿物及类质同象方式包含在方铅矿等硫化物中。

锡在铟的富集成矿中起着重要作用。Zhang et al. (2007)研究富铟与贫铟矿床成矿流体中铟与锡、铅、锌的关系发现, 富铟矿床成矿流体中的铟和锡比贫铟矿床高出 2-3 个数量级, 并且铟与锡具有很好的正相关性。王大鹏和张乾(2019)研究了岩浆演化过程中铟与锡的关系, 发现从岩浆岩→矽卡岩化→热液蚀变过程中二者是同时迁移富集的。这可能就是铟富集在含锡矿床中的主要原因之一。

2) 富铟矿床中铟主要富集在特定矿物中。已有的研究证实, 富铟矿床中 80%以上的铟富集在闪锌矿中, 部分矿床中的黄铜矿也含有较高的铟, 如都龙矿床中的黄铜矿含铟 $400-800 \times 10^{-6}$ 。有些矿床中黄锡矿和毒砂含铟很高, 如巴西 Mangabeira Sn-In 矿床矿石含 In 最高达 1%, 其中闪锌矿含 In 最高 6.7%, 而毒砂含 In_2O_3 最高达 7%, 黄锡矿含 In 最高达 1.3-2.2% (Moura et al., 2014), 这种情况比较少见, 并且一个矿床中毒砂和黄锡矿如果没有大量堆积, 对铟的总资源量影响有限。从国内富铟矿床的情况来看, 尽管黄锡矿含铟高, 该矿物属于微量矿物, 其中的铟所占比例并不大。一般来说, 锡石含铟低于闪锌矿并且变化很大。

3) 富铟矿床的形成主要与酸性岩浆作用有关。全世界已发现的富铟矿床几乎都与花岗岩体相伴产出。对于那些产于花岗岩接触带部位的矽卡岩型-岩浆热液型富铟矿床, 成因并无争议。而对那些产于岩浆岩外接触带的层状-似层状矿床, 存在岩浆热液与喷流沉积之争, 如南岭西段的大厂、个旧、都龙和白牛厂四个超大型富铟多金属矿床, 至今存在岩浆作用、喷流沉积和叠加成矿多种成因争论。近年来取得的研究成果表明, 这些矿床的形成都与花岗岩浆作用有关, 主要的证据有: ① 成矿时代与岩浆岩时代接近或一致, 即使被当作喷流沉积形成的层状-似层状矿体, 成矿时代也与岩浆岩接近; ② 成矿物质主要来源于岩浆; ③ 矿区内都存在规模不等的花岗岩体, 存在矽卡岩型-热液型矿体及从高温到低温的热液蚀变及元素分带, 层状-似层状矿体都产于花岗岩外接触带, 开采过程中的跟踪观察发现这些矿体并非典型的层状矿体, 都受层间断裂控制。

4) 富铟矿床具有区域性成带成片分布的特点。全球看, 富铟矿床大多产于大型构造带如东-西太平洋构造带、板块俯冲带上盘、大规模造山带上盘及特定的板块边缘带, 因而造成富铟矿床成带成片分布的特点。在我国, 南岭以南的华南块体中存在大量的富铟矿床, 如福建中甲锡多金属铁矿床, 广东的厚婆坳、锯板坑、金子窝、庞西洞, 广西大厂、德保, 云南都龙、个旧、白牛厂等。据资料, 西藏班公湖-怒江成矿带上, 有 13 个矿床铟含量较高, 正在开采的当雄县拉屋多金属矿床的铟含量平均为 45.44×10^{-6} , 最高可达 166×10^{-6} (赵元艺等, 2010), 有可能成为我国重要的富铟矿床集中区。内蒙古东部大兴安岭地区上百个大-中型锡多金属矿床, 具有成为富铟矿床的诸多特征, 已有部分矿床达到了富铟矿床水平, 有可能成为我国规模最大、矿床数最多的富铟矿床矿集区。更有值得关注的是, 该地区许多矿床不仅富铟, 同时富镓、锗、镉甚至铼,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0602501)

作者简介: 张乾, 男, 1955 年生, 研究员, 主要从事矿床学、矿床地球化学研究. E-mail: zhangqian@vip.gyig.ac.cn

如牙克石 1227 铍矿，伴生铟、铯、锆、镉等元素，其保有储量为：铍 34.2 t、铟 324 t、铯 99 t、锆 534 t、镉 3726 t(陈旺等，2005)，孟恩陶勒盖矿床铟>500 t，铯 300 t，镉 1800 t。

2 富铟矿床的找矿方向

根据富铟矿床的特点和成矿规律，其研究和找矿可以关注以下几个方面：

1) 锡石硫化物矿床和富锡的铅锌矿床是发现富铟矿床的最主要矿床类型。Wener et al. (2017)报道了 101 个确定的铟矿床，并对全球潜在的 800 个铅锌矿床和 611 个铜矿床的铟含量进行了估算，指出铅锌矿床尤其是喷流沉积型铅锌矿床是未来主要的铟资源。实际上，喷流沉积型铅锌矿床含铟一般低于 10×10^{-6} ，由于矿床规模大，铟资源量可观，但要从这样的矿床中提取铟，经济效益远不如富锡的富铟矿床，因此，应该在富锡矿床中去发现更多的铟资源。

2) 富铟矿床的深部找矿应该以隐伏的花岗岩体为线索，寻找大型-超大型富铟矿床。全世界已有的富铟矿床几乎都产于花岗岩的接触带和外接触带，大厂、个旧等富铟矿床，虽然成因上存在争议，后期揭露的矿体也都围绕岩体产出，因此，找矿应该以花岗岩体为中心向外扩展。一般来说，当岩体出露地表时，只存在接触带部位的矽卡岩型矿床，则矿床规模有限，而当岩体盖层保存完整时，才有可能找到规模更大的外接触带型矿床。当然，并不是所有岩体都会成矿，如何确定隐伏岩体能否成矿，还没有成熟可靠的手段，相信随着研究的深入和技术的进步，终会找到切实可行的方法。

3) 由于富铟矿床具有成带成片分布的重点，在特定的区域内有可能发现更多的富铟矿床。比如大兴安岭地区，不同元素组合的锡多金属矿床都具有富含铟的矿床特征，大部分矿床至今未对铟进行系统研究，部分矿床已被证实富铟。进一步的研究有可能发现更多的富铟矿床。青海柴达木盆地周边的锡多金属矿床也有可能富含铟，也有必要加强对铟的研究。

3 结论

1) 富铟矿床成片成带分布、具有特定的矿床类型、富集在特定的矿物中，矿床的形成与花岗岩浆有关是铟富集成矿的主要规律。

2) 找矿重点关注富锡的多金属矿床、隐伏花岗岩体接触带可能是富铟和锡多金属矿床集中区。

参考文献:

- Moura M A, Botelho N F, Olivo G R, Kyser K, Pontes R M, 2014. Genesis of the Proterozoic Mangabeira tin-indium mineralization, Central Brazil: Evidence from geology, petrology, fluid inclusion and stable isotope data. *Ore Geology Reviews*, 60: 36-49.
- Werner T T, Gavin M. M, Simon M J, 2017. The world's by-product and critical metal resources part III: A global assessment of indium. *Ore Geology Reviews*, 86: 939-956.
- Zhang Qian, Zhu Xiaoqing, He Yuliang, Zhu Chaohui. 2007. In, Sn, Pb and Zn contents and their relationships in ore-forming fluids from some In-rich and In-poor deposits in China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 81(3): 450-462.
- 王大鹏, 张乾, 武丽艳, 叶霖, 刘玉平. 2019. 花岗岩中铟与锡铜铅锌的关系及其富集成矿意义. *岩石学报(出版中)*.
- 张乾, 刘志浩, 战新志, 邵树勋. 2003. 分散元素铟富集的矿床类型的矿物专属性. *矿床地质*, 22(3): 309-316.
- 赵元艺, 刘妍, 崔玉斌, 吕立娜, 宋亮, 曲晓明, 2010. 西藏班公湖-怒江成矿带与邻区铟矿化带的发现及意义. *地质论评*, 56(4): 568-578.
- 陈旺, 徐锡华, 孙中庆, 汪建宇, 2005. 重视内蒙古分散元素矿产资源的开发与利用. *地质找矿论丛*, 20(4): 248-253.