

## 成果与应用

## 分散元素成矿机制研究获重大进展\*

涂光炽 高振敏

(地球化学研究所 贵阳 550002)

**摘要** 分散元素一般指在地壳中丰度很低(多为 ppb 级),且在岩石中极为分散为特征的元素。经深入研究某些分散元素在特殊地质环境下能常富集形成独立矿床,厘定了分散元素独立矿床的含义,对分散元素矿床进行了分类,总结出分散元素矿床中它们以独立矿物、类质同象、吸附三种形式存在。分析了我国西南地区它们集中出现的有利因素,阐明了分散元素成矿专属性。

**关键词** 分散元素,独立矿床,矿床分类,赋存状态,成矿专属性

分散元素指在地壳中丰度很低(多为 ppb 级),而且在岩石中极为分散为特征的元素。多数分散元素在自然界形成矿物的几率很低,而且产地稀少,将这些元素称为分散元素。分散元素包括 Ga、Ge、Se、Cd、In、Te、Re、Tl 等 8 个元素。

分散元素在国民经济建设中有着广泛的用途,特别在高科技领域中,如通讯用的高性能电池、集成电路、超导材料、光纤和半导体材料、特种玻璃、钢铁和橡胶工业等。

从 20 世纪初开始,人们先后发现了某些分散元素。1911 年,乌克兰学者 B.N.维尔纳茨基将分散元素概念引入到地球化学领域,当时对它们的用途和自然界产出情况几乎一无所知,主要原因是当时工业落后和它们在自然界物质组成(如岩石)中的含量非常低,无法将它们提取出来<sup>[1]</sup>。第二次世界大战前期,由于新技术革命,某些分散元素得到了一定的应用,因而如何寻找分散元素矿产资源,引起当时地学科学家关注。由于分散元素在地壳中的丰度低,在岩石中又极为分散,再加上分散元素矿物十分细小、准确定量测试的难度很大以及提炼技术跟不上等因素,长期以来,分散元素的研究工作进展缓慢。

到 20 世纪 80 年代以后,随着高新技术工业的发展,市场需求量增加,特别是测试技术和认识水平提高,使分散元素资源的研究工作出现了新的飞

跃。首先是分散元素矿物不断被发现,逐渐解决了某些分散元素的选冶工艺,国内外先后发现了一些分散元素矿床。如,美国犹他州的阿佩克斯 Ga-Ge 矿床,玻利维亚的帕卡哈卡 Se 矿床,纳米比亚楚梅布 Ge 矿床等。1990 年,以中国科学院地球化学研究所涂光炽院士为首的课题组,在我国西南大面积低温成矿域中发现了贵州烂木厂独立铊矿床<sup>[2]</sup>和滇西临沧独立锗矿床。与此同时,中国地质科学院陈毓川院士等与四川地质矿产局、成都理工大学的科研人员发现了四川石棉县大水沟的独立碲矿床<sup>[3,4]</sup>。在上述研究基础上,涂光炽院士分析了我国分散元素成矿优越的地质背景,认为我国西南地区大面积低温成矿域中可能存在分散元素矿床的集中区。根据这一指导思想,在国家自然科学基金委员会的支持下,把“分散元素成矿机制”列为重点基金项目,对中国的分散元素矿床进行了系统研究。

项目组通过对 6 种分散元素(Ge、Se、Cd、In、Te、Tl)11 个矿床的解剖和多个中国含分散元素矿床的调查研究,并进行了系统的总结,取得了以下创新性的研究成果。

### 1 分散元素的超常富集

长期以来,地学工作者认为分散元素很难成矿,更不能形成独立矿床。通过找矿实践和研究证明,分散元素可以超常规富集,矿石中分散元素的富集程度一般都达到地壳丰度的几千倍到上万倍,

\* 收稿日期:2003 年 8 月 9 日

富集程度最高的碲矿床,其富集程度为地壳丰度的 $10^6$ 倍<sup>[4-7]</sup>。和其它金属和贵金属元素富集成矿相比,如铜、金、银富集 3 个数量级,即可成矿;分散元素的富集程度须高达 3—4 个数量级以上方能成矿,说明它们需经过更复杂的地质过程,才能达到超常富集程度。

## 2 分散元素独立矿床

大百科全书地质卷<sup>[8]</sup>认为“分散元素不形成独立矿床,它们以伴生元素方式存于其它元素的矿床内”。近年来,在中国西南地区发现了锗、硒、碲、铊的独立矿床。我们认为:分散元素独立矿床是指它们的富集程度很高,经常有分散元素的独立矿物或富含分散元素载体物(类质同象矿物或吸附体)的出现为矿化特征;矿床规模较大,随着开采和冶炼技术的提高,以及市场需求的变化,分散元素可能不再是副产品或开采其它矿产资源而回收的伴生元素,而是分散元素本身的经济价值高于或等于并存的其它矿种,将这样的矿床称为分散元素独立矿床<sup>[6,9]</sup>。按这样条件,临沧锗矿床、渔塘坝硒矿床、大水沟碲矿床、烂木厂铊矿床定为独立矿床。河北省东坪碱性杂岩中的碲金矿床,其中碲和金储量基本相当,若碲的冶炼技术过关,可直接提取碲,碲的价值还高于金,到那时该矿床也可称为独立碲矿床。

Ge、Se、Te、Tl 等元素能够形成独立矿床的原因是与这些元素的地球化学行为有关。(1)从迄今为止自然界发现的各分散元素的独立矿物数目看,Re 2, Ga 3, In 10, Cd 13, Ge 21, Tl 44, Se 104, Te 142。Te、Se、Tl 三个元素的矿物最多,表明它们富集能力最强,形成独立矿床的潜在能力也最大。(2)Ge 和 Se 易被吸附,如滇西第三纪褐煤中的锗,这种锗主要是以有机吸附状态存在。湖北恩施县渔塘坝独立硒矿床中的硒也主要是有机质吸附。

## 3 分散元素矿床类型

按工业利用可分为独立矿床和伴生矿床两大类:(1)独立矿床:Ge、Se、Te、Tl 等元素在特定的地质条件下可形成独立矿床。(2)伴生矿床:Ga、Cd、In、Re 等元素形成独立矿物的几率比 Ge、Se、Te、Tl 低得多,因此它们很难形成独立矿床,基本上都以伴生形式赋存于其它元素的矿床内。如 Ga 常伴生于铝土矿中,In 多出现在锡石硫化物矿床中,Re 多

产于斑岩型 Mo(Cu)矿床中。Ge、Se、Te、Tl 除形成独立矿床外,还常以伴生矿床形式出现,如 Ge 和 Cd 伴生于 Pb、Zn 矿床中;Se、Te 常伴生于 Cu 矿床和金矿床中;Tl 经常出现于低温 As、Hg、Sb 矿床和卡林型金矿中。

按成矿作用和富集机制可分为 3 类:(1)以分散元素独立矿物的大量形成而成矿。如大水沟 Te 矿床、滥木厂独立 Tl 矿体。(2)分散元素主要以吸附方式成矿。如临沧 Ge 矿体。(3)分散元素以类质同象代替主成矿元素,以此方式它不可能形成分散元素独立矿床,但可以造成超常富集,有利于工业回收。如牛角塘 Pb-Zn 矿床中的 Cd,会泽 Pb-Zn 矿床中的 Ge,黔中铝土矿中之 Ga。

## 4 分散元素成矿专属性

可分为矿床类型专属性和矿物专属性。

(1)矿床类型专属性。分散元素的产出与特定的矿床有密切关系,如 Ga 出现在铝土矿和低温铅锌矿床中;Ge- 低温铅锌矿床和部分煤矿床;Se- 黑色岩系中的硒矿床和相应的铜矿床;Cd- 铅锌矿床;In- 锡石硫化物矿床和富锡的铅锌矿床;Te- 碲金矿床和碲铋矿床;Re- 斑岩型 Mo(Cu)矿床;Tl- 低温砷-汞-锑矿床和卡林型金矿中。

(2)矿物专属性。分散元素除独立矿物外,就工业利用来说,多数分散元素的载体矿物具有专属性,如铝土矿中的 Ga 主要存在于一水铝石中;在铅锌矿床中 Cd、Ge、Ga 都存在于闪锌矿中;含铟矿床中 80%以上的 In 都集中在闪锌矿中;在富钼矿床中 90%以上的 Re 都集中在辉钼矿中;在富硒的铜矿中 Se 除了它的独立矿物外,主要赋存于硫化物矿物(特别是黄铁矿)中。

## 5 分散元素赋存状态和分散元素矿物

分散元素赋存状态分为独立矿物、类质同象和有机结合态及吸附三大类。基本上以独立矿物出现的是碲和铊矿床和部分硒矿床;以类质同象形式存在的是镉、镓、铟、铋矿床;完全以有机质和粘土矿物吸附的是锗和硒矿床;三种形式兼有的是硒矿床,如拉尔玛硒-金矿床中独立矿物与类质同象的硒矿约占硒总量的 25%,有机结合态和吸附的硒约占 75%<sup>[10]</sup>。渔塘坝硒矿床以有机结合态和吸附形式存在的硒,初步计算约占 64%<sup>[3]</sup>。

分散元素矿物的新发现: 研究中采用电子探针、扫描电镜、透射分析电镜、显微拉曼探针等先进仪器设备进行分析, 在东坪碲金矿中发现了碲锌(铁)石 -  $(\text{Zn,Fe})_2((\text{Te}_3\text{O}_8))$ , 已被国际矿物协会(IMA)的新矿物和矿物名称委员会(CNMMN)批准为新矿物。还有 8 个分散元素矿物在中国首次找到: 楚碲铋矿 ( $\text{BiTe}_2$ ); 水硫碲铅石 ( $\text{Pb}[\text{Te}_2\text{S}]_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ); 斜硫碲铋汞矿 ( $\text{TlHgAsS}_3$ ); 硫铁铋矿 ( $\text{TlFeS}_2$ ); 辉铁铋矿 ( $\text{TlFe}_2\text{S}_3$ ); 硫碲铋铅矿 ( $\text{PbTlAs}_5\text{S}_9$ ); 硫碲铋矿 ( $\text{Tl, Pb}_3\text{AsS}_3$ ); 铋黄铁矿 ( $\text{Fe, Tl}(\text{S,As})_2$ 。

## 6 中国西南地区分散元素矿床集中出现的有利因素

(1) 多时代黑色岩系(含炭细碎屑岩系)的发育。晚震旦、早寒武、晚泥盆及二叠纪黑色岩系在西南广布, 有利于 Se、Ge 的成矿。

(2) 西南存在大面积低温热液成矿域, 若干分散元素常在低温热液体系成矿。如黔西南 Tl 矿床; 黔南 Cb-Zn 矿床; 云南会泽 Pb-Zn 矿床富集 Ge。

(3) 富含分散元素的大型-超大型矿床集中分布: 如世界最大的两个锡石硫化物矿床-广西大厂和云南个旧, In 常富集于其中。黔中广布一水铝石铝土矿床, Ga 不同程度富集于其中。

(4) 扬子克拉通西缘存在多时代活动的深大断裂, 有利于某些深源分散元素的成矿。如川西石棉大水沟 Te 矿床

项目组对分散元素矿床的成矿机制、矿床分类、成矿专属性、赋存状态和找矿方向等进行了系统研究和总结。根据中国西南地区的地质特点, 项目组提出了某些分散元素可以独立成矿的理论, 突破了“分散元素不能形成独立矿床”的传统观念, 具

有原始创新的意义, 在矿床学理论和指导找矿方面做出了重要贡献。项目组共发表论文 93 篇, 其中 SCI 论文 16 篇, CSCD 论文 61 篇。经检索, 这些论文被引用 132 次。

### 主要参考文献

- 1 Иванов В В, Ga Ge Cd In Tl. Геохимия рассеянных элементов в гидратер-мальных месторождениях. Москва, Изд.-во недра, 1966, 3-15.
- 2 陈代演. 我国汞铋共生矿床中富铋矿体首次发现及其成因初步研究. 贵州工学院学报, 1989, 18(2): 1-19.
- 3 陈毓川, 毛景文, 骆耀南等. 四川大水沟碲(金). 矿床地质地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 1996.
- 4 曹志敏, 温春齐, 李保华等. 首例独立碲矿床成因探讨. 中国科学(B 辑), 1995, (6): 647-654.
- 5 Yao Linbo, Gao Zhenmin, Yang Zhusen et al. Origin of seleniferous cherts in Yutangba Se Deposit, Southwest Enshi, Hubei Province. China, Sciences in China, (Series D), 2002, 45(8): 741-754.
- 6 高振敏, 李朝阳. 分散元素矿床地球化学研究. 资源环境与可持续发展. 北京, 科学出版社, 1999, 241-248.
- 7 胡瑞忠, 苏文超, 戚华文. 锗的地球化学、赋存状态和成矿作用. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(4).
- 8 中国大百科全书编写组. 中国大百科全书[M](地质卷). 北京: 中国大百科全书出版社, 1993, 137.
- 9 涂光焯. 分散元素可形成独立矿床——一个有待开拓深化的新矿床领域. 中国矿物岩石地球化学新进展. 兰州: 兰州大学出版社, 1994, 234.
- 10 Wen Hanjie, Qiu Yuzhuo. Organic and inorganic occurrence of selenium in Laerma Se-Au deposit. China. Sciences in China, 1999, 42(6): 662-669.

## Ore-forming Mechanism of the Dispersed Elements

TU Guangchi GAO Zhenmin

(Institute of Geochemistry, CAS, 550002 Guiyang)

The dispersed elements are normally referred to those elements of low abundance (usually at ppb level) in the crust, with the characteristics of extreme dispersion in various rocks. They include Ge, Ga, In, Tl, Re, Cd, Se and Te eight elements. This research has systematically studied that some of the dispersed elements can be extraordinarily concentrated to form independent ore deposits under favorable geological conditions, stipulated the meaning of independent ore deposits of the dispersed elements, made classification for

ore deposits of the dispersed elements, summarized the dispersed elements presented in their ore deposits as three forms of independent minerals, isomorphism and adsorption, studied the favorable factors for their mineralizations concentrated in the southwestern China, and delineated the ore-forming specialty of the dispersed elements.

**keywords** dispersed elements, independent ore deposits, classification for ore deposits, Existing forms of the dispersed elements, ore-forming specialty

**涂光炽** 男,中国科学院院士,地球化学研究所名誉所长。1949年获美国名尼苏达大学博士。1954年获莫斯科大学副博士。主要研究领域:矿床学、地球化学、地质学。1984年获竺可桢野外工作奖,1982年获国家自然科学奖二等奖,1988年获国家自然科学奖一等奖,1997年获中国科学院科技进步奖特等奖,1998年获国家科技进步奖二等奖,1999年获中国科学院自然科学奖一等奖等多项奖励。出版专著18部,发表论文220余篇。

**高振敏** 男,地球化学研究所研究员,博士生导师。“分散元素成矿机制”项目组第二负责人。1965年毕业于北京大学地质地理系。主要研究领域:矿床地球化学、成因矿物学。1998年获国家科技进步奖二等奖,1997年获中国科学院科技进步奖特等奖,1999年获中国科学院自然科学奖一等奖。此前还获得过国家科学大会奖1项,国家自然科学奖二等奖1项,中国科学院科技进步奖二等奖1项,三等奖2项。主持出版专著4部,发表论文120余篇。

(接364页)

physiological samples such as serum, urine, sputum, adnoid liquid, and splitted cell solution, etc. Its high spatial resolution and high throughout might be available to perform multi-analysis simultaneously with high speed and repeatability for clinic diagnosis, medicine screening and protein function analysis.

**keywords** protein chip, protein analysis, imaging ellipsometry, surface modification

**靳刚** 男,力学研究所研究员。1957年8月出生于北京。1993年获皮埃尔·玛丽·居里巴黎大学(PARIS VI)物理学博士。先后在法国国家科研中心(CNRS 巴黎)任合作研究员和瑞典 LINKOPING 大学做访问科学家。曾多次被葡萄牙里斯本大学聘为客座教授。现任韩国亚洲纳米生物科技研究所国际成员,中国医学科学院微循环研究所特聘研究员,中国科学院知识创新“十五”重大项目首席科学家。现从事纳米生物工程,着重于光学生物传感器和光学蛋白质芯片研究,主持完成国家自然科学基金项目和中国科学院重点项目多项,研究结果已列入中国科学院知识创新工程优秀成果、科技部优秀科研成果和国家自然科学基金委资助优秀科研成果等。发表科技报告近百篇,申请蛋白质芯片及相关专利10余项。