

中国分散元素富集与成矿研究新进展

张 乾¹, 朱笑青¹, 高振敏¹, 潘家永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, 贵阳 550002;
2. 南京大学 地球科学系 内生金属矿床成矿作用国家重点实验室, 南京 210093

摘要: 本文重申了对分散元素种类的界定, 将 Cd、Ga、In、Tl、Ge、Se、Te 和 Re 8 种元素作为分散元素既兼顾了传统习惯, 也考虑到了地球化学性质的异同, 同时也考虑了地质事实。近十年来, 分散元素大规模的工业利用引发了对分散元素资源的进一步研究, 新的研究成果主要包括: ①分散元素可以成矿, 可以形成独立和共生矿床, 可以形成大型甚至超大型矿床, 甚至可以形成分散元素矿集区或成矿域, 这一新的进展打破了分散元素不能独立成矿的传统观念。在中国已经发现了许多分散元素独立矿床; ②分散元素的富集成矿具有矿床类型和矿物类型的专属性, 这意味着注意特定的矿床类型, 会使找到相应的分散元素矿床的可能性增加; ③发现和明确了分散元素的三种主要存在形式即独立矿物、类质同象和吸附, 首次在国内矿床中发现了一系列分散元素矿物和新矿物; ④Se、Tl、Cd 的释放对环境的危害最主要的方式是通过污染饮用水进而影响到人类健康, 其它分散元素对环境的作用目前还不十分清楚。

关键词: 分散元素; 分散元素矿床; 成矿机制; 研究进展

中图分类号: P618.701 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2005)04-0342-08

1 分散元素的定义及地球化学性质

“分散元素”最早由著名地球化学家维尔纳茨基于 1922 年提出, 主要是指在自然界含量低(一般为 $10^{-9} \sim 10^{-6}$ 级), 以分散状态存在, 很少形成独立矿物的一组元素^[1]。维氏当时所指的分散元素为 Cd、Ga、In、Tl、Ge、Se、Te、Re、Hf、Rb、Sc 共 11 种元素。其后, 关于哪些元素属于分散元素的争论不断, 划分方案层出不穷。仅 20 世纪 80 年代以来, 至少有两种具有一定影响的方案。

第一种是根据地球化学性质进行分类。刘英俊等^[2]按地球化学性质的差异分为造岩元素、铁族元素、稀有稀土元素、放射性元素、钨钼族元素、亲铜成矿元素、铂族元素、分散元素、矿化剂及惰性气体元素等 10 大类, 其中分散元素包括 Sr、Ba、Cd、Ga、In、Tl、Ge、Se、Te 与 Re 等 10 种元素; 牟保磊^[3]类似的分类方案中将分散元素分为亲石分散元素(包括 Rb、Ce、Sr 与 Ba)与亲铜分散元素(包括 Cd、Ga、In、Tl、Ge、Se、Te 等元素)。

第二种是根据元素的丰度及元素形成矿物的种数进行分类。Tischendorf (1985) 以元素的地壳丰

度(X)为横坐标, 以该元素所形成的矿物种数(Y)为纵坐标, 它们之间存在线性关系: $\lg Y = 0.214 \lg X + 0.941$, 其相关系数为 0.66。如果一个元素与回归直线正偏离, 则该元素呈聚集趋势, 反之则呈分散趋势。赵振华^[4]以每个元素相对于回归直线的距离为横坐标, 元素数目为纵坐标将元素划分为强分散元素、弱分散元素、弱聚集元素和强聚集元素。这一分类方案包括的分散元素较多, 其中强分散元素有 Ga、Rb、Br、Sc、Hf、Cs 和 In, 弱分散元素有 Ge、I、Re、Zr、La、Cr、Cd、Sr、Th 和 Rb。

显然, 这两种分类方案所确定的分散元素存在很大的差异, 如 Se 与 Te, 按第一种方案属于典型的分散元素, 而按第二种方案则属于聚集元素。尽管第二种方案定量地划分出了分散元素和聚集元素, 然而存在以下问题: 1) 该方案划分分散元素与聚集元素的依据仅仅是元素的地壳丰度及形成独立矿物的种数, 也就是说, 只要形成的独立矿物种数少就是分散元素, 而形成的独立矿物种数多就是聚集元素, 如 Se 与 Te, 这两种元素的独立矿物种数较多 (Se 的独立矿物 40 种, Te 的独立矿物达 172 种^[5]), 故将其划归聚集元素范畴。然而, Se 与 Te 尽管各自

收稿日期: 2005-01-05 收到, 06-27 改回

基金项目: 中国科学院重要方向项目资助(KZCX3-SW-125); 国家自然科学基金资助项目(40172037)

第一作者简介: 张乾(1955-), 男, 研究员, 博士生导师, 从事矿床地球化学研究。

存在较多的独立矿物,但这些矿物在自然界大量堆积的情况很少,因此将其划归分散元素已被大多数学者所接受;2)该方案对地球元素划分过于简单,划分出的分散元素既有化学性质活动性很强的卤素元素(Br与I),又有稀有稀土元素(如Rb、Sc、Hf、Cs、Zr、La)、铁族元素(如Cr)、放射性元素(Th)及典型的分散元素(Cd、Ga、In与Ge);3)按地壳丰度和矿物种数划分分散元素的方案出现不少与地质事实不符的情况,除前述将Se和Te划归聚集元素外,Ga的地壳丰度并不低,却划归强分散元素,Re的矿物种数非常少,却划归弱分散元素,Cr的丰度及矿物种类都不多,但能够大量堆积形成矿床,等等。同时如将稀土元素也划归分散元素,势必引起混乱;4)由于新矿物还在不断被发现,如以矿物种数作为标准,势必使得结论呈现动态变化趋势。

Sr与Ba的地壳丰度较高(Sr与Ba的地壳丰度分别为 375×10^{-6} 与 425×10^{-6}),虽然二者的独立矿物种类较少,但重晶石几乎无处不在且常形成大规模工业堆积,天青石也往往在沉积盆地中的某些矿床中大量存在,如滇西兰坪盆地中的天青石达到了超大型规模。因此也不宜作为分散元素对待。

分散元素的各种划分方案如果划分依据不够全面,则会引起人们对分散元素认识的混乱。笔者认

为,分散元素的界定应考虑遵从习惯、元素的地球化学性质和地质事实三个方面。因此,我们所说的分散元素包括Cd、Ga、In、Tl、Ge、Se、Te和Re^[6,7]。

2 分散元素的主要研究进展

20世纪90年代以来,在涂光炽院士主持的国家自然科学基金“分散元素成矿机制研究”和包括三个国家基金面上项目的支持下,在国内掀起了一个分散元素研究的热潮,并取得了一些新的进展。

2.1 分散元素可以成矿,甚至可以形成超大型矿床

传统观点认为分散元素只是呈分散状态存在于自然界中,而不形成独立矿床。《中国大百科全书》(1993)给的定义是:“分散元素不形成独立的矿床,它们以伴生元素的方式赋存于其他元素矿床内”^[1]。涂光炽^[8]于1994提出了“分散元素可以成矿,甚至可以形成超大型矿床”的论断。

分散元素可以超常富集,形成大型-超大型独立矿床和/或共伴生矿床(表1)已是不争的事实。随着近十年来的深入研究,一些独立的分散元素矿床相继被发现,如牛角塘独立镉矿床、滥木厂和南华独立铊矿床、拉尔玛和鱼塘坝独立硒矿床、大水沟独立碲矿床、临沧和乌兰图嘎独立锗矿床等。

表1 中国西南主要分散元素矿床

Table 1 The major disperse element deposits in southwestern China

分散元素	矿床名称	品位	分散元素富集规模/t	分散元素存在形式	资料来源
Cd	大厂锡多金属矿床	0.3356%~0.9646%	>20000(超大型)	主要以类质同象形式赋存于闪锌矿中,氧化带偶尔可见硫镉矿、方镉矿及菱镉矿等镉的独立矿物	叶霖等 ^[9] 谷团等 ^[10]
	金顶铅锌矿床		>150000(超大型)		
	都龙锡多金属矿床		>9000(大型)		
	牛角塘独立镉矿床		>5000(大型)		
In	大厂锡多金属矿床	$(50 \sim 480) \times 10^{-6}$	>6000(超大型)	主要以类质同象形式赋存于闪锌矿中	Zhang et al. ^[11]
	都龙锡多金属矿床	$(81 \sim 560) \times 10^{-6}$	>4000(超大型)		
	金窝子锡多金属矿床		≈ 400 (中型)		
Tl	滥木厂独立铊矿床	$(720 \sim 3800) \times 10^{-6}$	大型	矿石中发现了数种铊的独立矿物	张忠等 ^[12,13]
	南华独立铊矿床	$(964 \sim 1900) \times 10^{-6}$	中型		
Ge	临沧锗矿床	$>100 \times 10^{-6}$	800(超大型)	有机结合态及吸附态	胡瑞忠 ^[14,15] 王兰明 ^[16]
	乌兰图嘎		1600(超大型)		
Se	拉尔玛金硒矿床	$55.09 \sim 89.85 \times 10^{-6}$	大型	矿石中发现多种硒矿物	温汉捷等 ^[17]
Te	大水沟碲矿床	0.095~33.64%	大型	矿石中发现多种碲矿物	曹志敏等 ^[18]

新的研究显示,某些不能形成独立矿床的分散元素如In、Re等,在特定的矿床中达到了超常富集,金属量常以数千吨计。如大厂矿田In的工业储量在6000 t以上,仅100号矿体就达2000多吨,内蒙古孟恩陶勒盖矿床In储量达600 t,都龙和个旧在

4000 t以上;铝土矿中Ga的储量可以万吨计;有些铅锌矿床中Cd的储量可达数十万吨等。这些矿床中的分散元素含量远远超过工业品位,有些甚至可以圈出独立矿体,但大部分都是存在于某一特定矿物中。这说明分散元素除了形成独立矿床外,还可

以形成更多更大规模的共伴生矿床。

2.2 分散元素富集成矿的矿床类型和矿物类型专属性

基于叶霖等^[9]对牛角塘镉矿床的成因及镉的赋存状态的研究, Zhang *et al.*^[11]对我国独立铟矿床的成矿机制及富集机理的研究, 张忠等^[12,13]对我国独立铊矿床的研究, 胡瑞忠等^[14,15]、庄汉平等^[19,20]、卢家烂等^[21]对临沧超大型锗矿成矿机制及锗的赋存机理的研究, 刘家军等^[22,23]、温汉捷等^[17]对拉尔玛金硒矿床的研究及数种硒的独立矿物的发现, 曹志敏等^[18]、骆耀南^[24]、陈毓川等^[25]、毛景文等^[26,27]对大水沟碲矿床的成矿机理、碲的赋存状态及成矿时代的研究, 等等, 笔者^[11]提出了分散元素的富集成矿具有矿床类型和矿物类型的专属性, 并讨论了铟富集的矿床类型和矿物专属性问题。

(1) 分散元素富集成矿的矿床类型专属性: 绝大多数分散元素所富集的矿床类型具有一一对应的关系:

Cd——铅锌矿床, 几乎所有的铅锌矿床都富集 Cd, 形成独立镉矿床者甚少;

In——锡石硫化物矿床和富锡的铅锌矿床, 单纯的铅锌矿床中 In 的含量很低;

Re——铜钼矿床, 目前还没发现富铼的其他类型矿床;

Ge——低温铅锌矿床和部分煤矿床;

Tl——低温 As-Hg-Sb 矿床;

Se——黑色岩系中的硒矿床;

Te——碲金矿床;

Ga——铝土矿床和低温铅锌矿床。

(2) 分散元素富集成矿的矿物类型专属性: 除一些独立矿床中分散元素以独立矿物形式存在外, 就工业利用来说, 多数分散元素主要存在于载体矿物中, 并且不同的载体矿物容纳不同的分散元素。如共生铟矿床中 80% 以上的 In 都富集在闪锌矿中, 铜钼矿床中 90% 以上的 Re 都富集在辉钼矿中, 铅锌矿床中的 Cd、Ga 和 Ge 都存在于闪锌矿中, 铝土矿中的 Ga 主要存在于一水铝石中, 等等。

Cd、In、Ga、Ge 4 种分散元素都以闪锌矿作为载体矿物, 因此可以说, 闪锌矿是这 4 种分散元素的聚宝盆。但是由于矿床类型的专属性差异, 这四种分散元素往往并不同时富集在闪锌矿中。如与岩浆作用有关的高温铅锌矿床, 闪锌矿含 Ga 和 Ge 很低, 当矿床中有 Sn 存在时, 含 In 可以很高; 无 Sn 时, In

含量亦低; 同生沉积及沉积改造成因的铅锌矿床, 闪锌矿富含 Cd、Ga、Ge 较高, 低 In。

矿床类型专属性说明找到了上述类型矿床, 就有可能找到相应的分散元素矿床; 矿物类型专属性说明, 分散元素的利用不需单独建矿单独开采, 可以与多金属一起利用, 经济价值效益巨大。

2.3 分散元素矿集区

分散元素矿床大都集中分布在古陆边缘, 甚至形成分散元素矿集区。位于扬子地块西南缘的我国西南大面积低温成矿域中的分散元素矿床, 数量多、规模大, 分散元素种类齐全, 包括了除 Re 以外的其他所有分散元素, 区内著名的分散元素矿床如牛角塘镉锌矿床、会泽富锗铅锌矿床、拉尔玛和鱼塘坝硒矿床、临沧锗矿床、大水沟碲矿床、濫木厂和南华铊矿床、南岭西段的大厂-都龙-个旧-白牛厂富铟锡多金属矿床、区内众多的富含 Gd、Ga、Ge 的低温铅锌矿床和黔中-渝南富镓铝土矿床, 构成我国特有的分散元素矿集区。这在全世界都是独一无二的。

位于华北地块北缘的内蒙古东部地区, 海西期以来的构造-岩浆作用造就了丰富的火山-岩浆热液成矿作用, 区内众多的 Sn-Pb-Zn-Cu 热液矿床中的闪锌矿富 In 含 Ga^[29~31], 如大井锡多金属矿床、孟恩陶勒盖、布敦化、莲花山、闹牛山、敖脑达巴及浩布高等, 其中孟恩陶勒盖银铅锌矿床就是我国为数不多的共生铟矿床之一。该区有可能成为我国富铟矿床的矿集区。

南岭东段的湘南地区, 拥有众多大型-超大型锡多金属矿床, 也是我国富铟矿床有希望的地区。西秦岭多金属成矿带及扬子地块南缘的湘-粤交界地区, 存在许多改造型和热水沉积型铅锌金属矿床, 是寻找富 Ga、Ge 矿床的有利地段, 如凡口铅锌矿富 Ga, 大宝山矿床富 Ga 和 Ge。显生宙以来一些沉积盆地中的改造和热水沉积成矿作用, 也具有形成富 Ga、Ge、Cd 矿床的可能, 如湘中盆地、兰坪盆地等。贵州、山西、山东、河南和广西是我国一水硬铝石型铝土矿的重要产地, 是镓资源最重要的来源, 随着研究的深入和水平的提高, 局部地段有可能圈出富镓矿体。

2.4 分散元素存在形式

分散元素在矿床中的赋存状态有三种主要形式:

(1) 以独立矿物存在, 主要为铊和碲矿床。濫木厂和南华两个铊矿床已发现近 10 种铊矿物, 大多

数都是在国内首次发现^[12,13];大水沟和东坪碲矿床存在大量的碲矿物^[18,24,25],Te的工业利用可直接从分选出的碲矿物回收。

(2)以类质同象形式存在于载体矿物中,主要为硫化物矿床中的In、Cd、Ga、Ge。这几个元素正像矿物专属性部分所述,都以类质同象形式存在于闪锌矿中。在富铟矿床中,锡石通常含In很低,但含锡的硫酸盐矿物有时含铟很高,但这种富铟的含锡硫酸盐矿物的数量本身就少,因此所含的In占整个矿床In总量的比例很低,大厂、都龙、个旧、孟恩陶勒盖等共生铟矿床都属于这种情况^[30]。不管是独立镉矿床还是共生镉矿床,90%以上的Cd都在闪锌矿中,尤其是热水沉积及改造成因的铅锌矿床中,闪锌矿含Cd最高可达10%以上。富Ga、Ge的铅锌矿床中二者也赋存于闪锌矿中,其他硫化物及非金属矿物中含量都很低,如会泽的Ge和凡口的Ga都是如此^[32]。

(3)以吸附状态存在。最典型的是产于煤中的临沧和乌兰图嘎锗矿床,均未发现独立锗矿物。研究显示,Ge以有机结合态和吸附态形式存在^[15,16]。

在鱼塘坝和拉尔玛硒矿床中已发现15种硒矿物,但有一部分Se置换黄铁矿中的S,还有大量的Se被粘土矿物和有机质吸附^[17]。因此,Se的存在有独立矿物、类质同象和吸附状态三种形式。

2.5 分散元素的环境效应

上世纪较早时候,对分散元素的环境效应只注意到Se,针对Se与人体健康方面的研究已有相当的积累^[33]。近十年来,Cd、Tl所引起的环境效应包括它们对水的污染和人类健康的危害等问题有了一定的研究^[12],但对Ga、Ge、In、Te等对环境的影响,至今还是空白。因此,对分散元素环境效应的研究尚需加大力度。

2.6 分散元素作为指示元素寻找隐伏矿体及矿床成因类型研究

Zhang^[34]利用分散元素建立了硫化物矿床成因类型判别图解,经过多次验证,说明对示踪矿床成因类型是有效的。潘家永等^[35]提出了Tl作为寻找微细浸染型金矿床的指示意义;侯嘉丽等^[36]用Tl作为探途元素来寻找陕西煎茶岭地区的隐伏矿体;刘家军等^[37]对Se作为微细浸染型金矿床的指示意义

进行了探讨。这方面国内外只有零星的研究资料,关键在于研究结果的实践检验。如果证明确实能够为找矿作出贡献的话,这将是一项非常重要的成果。

2.7 国外学者近年来对分散元素的研究

国外针对分散元素主要开展了以下方面的研究:1)分散元素(作为伴生元素)在多金属矿床中分布规律及赋存状态。如铅锌矿中的Cd、锡多金属矿中的In,卡林型金矿及Sb-As-Tl-Au矿床中的Tl,块状硫化物及铜矿床中的Se,Au-Ag-Te及金碲矿床中的Te等^[38,39]。2)发现了一系列的分散元素独立矿物^[40~46],尤其是碲的矿物,目前已在自然界发现172种之多^[5]。3)在美国、俄罗斯、芬兰、韩国及澳大利亚等地发现了一系列的Au-Ag-Te及金碲矿床,并对这些矿床开展了较系统的地质地球化学研究^[45~49]。4)对分散元素Tl、Se与Te开展了一些溶解度及相平衡实验研究,确定了它们在热液中的可能运移方式^[50~52]。5)分散元素作为示踪元素来探讨矿床的成因、成矿物理化学条件及作为指示元素来探寻隐伏矿体,如利用闪锌矿中Cd含量作为微量元素地质温度计来探讨矿床的成矿物理化学条件^[53];利用Tl作为指示元素来探寻隐伏金矿及低温Pb-Zn-Ag矿床^[51,55]。6)有些分散元素(如Cd、Tl、Se等)是对土壤与动植物毒性很强的元素,近年来有关分散元素环境污染及控制机理方面的研究已经开始引起重视。

尽管国外学者针对分散元素开展了一系列的元素地球化学及实验研究,发现了一系列的Au-Ag-Te及金碲矿床,然而到目前为止,还没有见到发现大型分散元素独立矿床的报道。而在中国已发现了数个大型乃至超大型的分散元素矿床,在成矿机制研究方面国内明显领先。而有关分散元素的实验研究国内很少开展。

3 分散元素成矿机制研究中亟待加强的几个问题

(1)分散元素能够形成矿床甚至形成独立矿床和大型-超大型矿床已是不争的事实。但它们形成矿床的关键控制因素和动力学背景仍然是一个解释不清的问题。

(2) 分散元素大型矿集区或成矿域包含了多种分散元素的富集,如西南大面积低温成矿域中既有 Tl、Se、Te、Cd、Ge 的独立矿床,又有 In、Ga、Ge、Cd 的共生矿床,既有低温矿床又有高温矿床。是什么因素使得它们都能在同一成矿域中出现? 这一问题仍然没有得到很好的解释。

(3) 从富铟与贫铟矿床来看,Sn 在 In 的富集中起着重要作用,但同样是含锡矿床,南岭东段的一些锡矿中 In 的含量比西段的锡石硫化物矿床低得多,原因何在? Ga 和 Ge 在热水沉积和低温热液型铅锌矿床中存在富集的趋势,但是在这种类型的铅锌矿床中,真正富镓和富锗的矿床仅是少数,原因何在?

(4) 利用分散元素异常寻找隐伏矿体,国内外学者都有不少研究,但对分散元素异常形成机理以及找矿实践检验还不够,这在很大程度上限制了分散元素作为指示元素寻找隐伏矿体的实际应用。

(5) 分散元素的生态环境效应研究已经有了良好的开端,但对 Ga、Ge、In、Te 的环境问题的研究还是空白。

(6) 分散元素富集与成矿方面的实验研究还太少,这在很大程度上直接影响了分散元素成矿机制理论的建立。

4 结 论

(1) 分散元素的种类界定为 Cd、Ga、In、Tl、Ge、Se、Te 和 Re 共 8 种元素,这一方案兼顾了传统认识、元素地球化学性质和地质事实。

(2) 分散元素研究最重要的进展包括:1) 分散元素可以成矿,可以形成独立或共生矿床、大型-超大型矿床,这一进展打破了传统认为其不能形成矿床的观点;2) 分散元素的富集成矿具有矿床类型和矿物类型的专属性,有利于指导分散元素找矿和利用;3) 分散元素以独立矿物、类质同象、吸附三种存在形式;4) 分散元素环境效应的研究已经起步并且已初见成效。

(3) 分散元素的研究虽然成效显著,但还有不少问题亟待解决:1) 分散元素形成矿床、形成成矿域及同一成矿域中存在多种分散元素独立或共生矿床的控制因素和动力学背景不清;2) 不同分散元素富集的矿床类型是不同的,但同一类型矿床并不是都富集分散元素,这是什么原因造成的? 仍是一个难以回答的问题;3) 分散元素作为找矿的示踪元素需

要实践的检验;4) 分散元素成矿的实验研究急需加强;5) 尽可能地全面开展所有分散元素的环境问题。

参考文献 (References):

- [1] 中国大百科全书编写组. 中国大百科全书[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1993. 197.
Writing Group of. China Large Encyclopedia China large encyclopedia[M]. Beijing: China Large Encyclopedia Press, 1993. 197. (in Chinese)
- [2] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 360-421.
Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, et al. Element geochemistry[J]. Beijing: Science Press, 1984. 360-421 (in Chinese).
- [3] 牟保磊. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1999. 169-200.
Mu Baolei. Element geochemistry[M]. Peking: Peking University Press, 1999. 169-200. (in Chinese)
- [4] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 7-12.
Zhao Zhenhua. Principle of trace element geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1997. 7-12. (in Chinese)
- [5] 钱汉东, 陈武, 谢家东. 铊矿物综述[J]. 高校地质学报, 2000, 6(2): 179-187.
Qian Handong, Chen Wu, Xie Jiadong. Summarization of Tl minerals[J]. Geol. J. Chin. Univ., 2000. 6(2): 179-187. (in Chinese with English abstract)
- [6] 高振敏, 李朝阳. 分散元素地球化学研究[A]. 中国科学院地球化学研究所. 资源环境与可持续发展[C]. 北京: 科学出版社, 1999. 241-248.
Gao Zhenmin, Li Chaoyang. A study on geochemistry of the dispersed elements[A]. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, ed. Resource and environment and Their continuous development [C]. Beijing: Science Press, 1999. 241-248. (in Chinese)
- [7] 涂光焜, 等. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 1-407.
Tu Guangzhi, et al. Geochemistry and mineralization of the dispersed elements[M]. Beijing: Science Press, 2003. 1-407. (in Chinese)
- [8] 涂光焜. 分散元素可以形成独立矿床——一个有待开拓深化的新领域[A]. 欧阳自远主编. 中国矿物学岩石学地球化学研究新进展[C]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994. 234.
Tu Guangzhi. Dispersed elements may form the independent deposits — A new field of awaiting deployment[A]. Ouyang Ziyuan, ed. A new advance of mineralogy, petrology and geochemistry research in China[C]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1994. 234. (in Chinese)
- [9] 叶霖, 刘铁庚. 都匀地区镉(Cd)资源及其远景初探[J]. 贵州地质, 1997, 14(2): 160-163.

- Ye lin, Liu Tiegeng. A primary discussion of cadmium resource and its ore-forming prospect in Duyun district in Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 1997, 14(2): 160—163. (in Chinese with English abstract)
- [10] 谷团, 刘玉平, 李朝阳. 分散元素的超常富集与共生[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2000, 19(1): 60—63.
Gu Tuan, Liu Yuping, Li Chaoyang. Transnormal enrichment and symbiosis of dispersed elements[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2000, 19(1): 60—63. (in Chinese with English abstract)
- [11] Zhang Qian, Zhan Xinzhi, Pan Jiayang. Geochemical enrichment and mineralization of indium[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1998, 17(3): 221—225.
- [12] Zhang Zhong, Chen Guoli, Zhang Baogui, Chen Yecai, Zhou Xingmao. The Lanmuchang Tl deposit and its environmental geochemistry[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 43(1): 50—62.
- [13] 张忠, 周兴茂, 张宝贵. 南华砷铊矿床元素地球化学和成矿模式[J]. *地球化学*, 1998, 27(3): 269—275.
Zhang Zhong, Zhou Xingmao, Zhang Baogui. Element geochemistry and ore-forming model of the Nanhua As-Tl deposit [J]. *Geochimica*, 1998, 27(3): 269—275. (in Chinese with English abstract)
- [14] 胡瑞忠, 苏文超, 戚华文, 毕献武. 锗的地球化学、赋存状态和成矿作用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2000, 19(4): 215—217.
Hu Ruizhong, Su Wenchao, Qi Huawen, Bi Xianwu. Geochemistry, existence and mineralization of germanium [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2000, 19(4): 215—217. (in Chinese with English abstract)
- [15] 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 叶造军. 对煤中锗矿化若干问题的思考——以临沧锗矿为例[J]. *矿物学报*, 1997, 17(4): 364—368.
Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Su Wenchao, Ye Zaojun. Some considerations on germanium mineralization in coal—As exemplified by Lincang germanium deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1997, 17(4): 364—368. (in Chinese with English abstract).
- [16] 王兰明. 内蒙古锡林郭勒盟乌兰图嘎锗矿地质特征及勘查工作简介[J]. *内蒙古地质*, 1999, (3): 16—20.
Wang Lanming. Introduction of the geological feature and exploring of Wulantuga germanium deposit in Xilinguole League, Inner Mongolia[J]. *Inner Mongolia Geology*, 1999, (3): 16—20. (in Chinese)
- [17] Wen Hanjie, Qiu Yuzhuo. Organic and inorganic occurrence of selenium in Laerma Se-Au deposit, China[J]. *Sciences in China (Series D)*, 1999, 42(6): 662—669.
- [18] 曹志敏, 温春齐, 李保华. 首例独立碲矿床成因探讨[J]. *中国科学(B)辑*, 1995, 25(6): 647—654.
Cao Zhimin, Wen Chunqi, Li Baohua. A discussion on the genesis of the first unattached Te deposit[J]. *Science in China (Series B)*, 1995, 25(6): 647—654. (in Chinese)
- [19] Zhuang Hanping, Lu Jialan, Fu Jiamo, Liu Jinzhong. Lincang superlarge germanium deposit in Yunnan Province, China: Sedimentation, diagenesis, hydrothermal process and mineralization[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 1998, 9(2): 129—136.
- [20] Zhuang Hanping, Lu Jialan. Germanium occurrence in Lincang superlarge deposit in Yunnan, China[J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 41 (Supp.): 21—27.
- [21] 卢家烂, 庄汉平, 傅家谟, 刘金钟. 临沧超大型锗矿床的沉积环境、成岩过程和热液作用与锗的富集[J]. *地球化学*, 2000, 29(1): 36—42.
Lu Jialan, Zhuang Hanping, Fu Jiamo, Liu Jinzhong. Sedimentary environment, diagenetic process and germanium enrichment of the Lincang super-large germanium deposit[J]. *Geochimica*, 2000, 29(1): 36—42. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘家军, 郑明华. 首次发现锑的硒-硫化物系列[J]. *科学通报*, 1992, 37(9): 864.
Liu Jiajun, Zheng Minghua. First discovery of Sb-bearing Se-sulfide[J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 1992, 37(9): 864. (in Chinese)
- [23] 刘家军, 郑明华, 卢文全. 首次发现块硫锑铜矿的变种-硒硫锑铜矿[J]. *科学通报*, 1993, 38(18): 1726—1727.
Liu Jiajun, Zheng Minghua, Lu Wenquan. Chinese Sci. Bull., 1993, 38(18): 1726—1727. (in Chinese)
- [24] 骆耀南, 曹志敏. 大水沟独立碲矿床——世界首例碲化物脉型矿床地质地球化学[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996.
Luo Yaonan, Cao Zhimin. Dashiugou independent Te deposit — Geology and geochemistry of the first telluride vein-type deposit in the world[M]. Chengdu: SW Jiaotong University Press, 1996. (in Chinese)
- [25] 陈毓川, 毛景文, 骆耀南, 等. 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, 1996.
Chen Yuchuan, Mao Jingwen, Luo Yaonan, *et al.* Geology and geochemistry of Dashiugou Te (Au) deposit in Sichuan [J]. Beijing: Atomic Energy Press, 1996. (in Chinese)
- [26] 毛景文, 陈毓川, 李红艳. 四川大水沟碲矿床⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄研究[J]. *地球学报*, 1997, 18: 397—399.
Mao Jingwen, Chen Yuchuan, Li Hongyan. A study on the ⁴⁰Ar/³⁹Ar age of Dashiugou Te deposit in Sichuan[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1997, 18: 397—399. (in Chinese with English abstract)
- [27] 毛景文, 魏家秀. 大水沟碲矿床流体包裹体的 He、Ar 同位素组成及其示踪成矿流体的来源[J]. *地质学报*, 2000, 21(1): 58—61.
Mao Jingwen, Wei Jiaxiu. He-Ar isotopic composite of fluid inclusion and indication of ore-forming fluid source of the Dashiugou Te deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 21(1): 58—61. (in Chinese)

- [28] 张乾, 刘志浩, 战新志, 邵树勋. 分散元素铜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 Zhihao, Zhan Xinzhi, Shao Shuxun. Specialization of the ore deposit types and minerals for the enrichment of indium[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(3): 309-316. (in Chinese with English abstract)
- [29] 盛继福, 李岩, 范书义. 大兴安岭中段铜多金属矿床矿物微量元素研究[J]. 矿床地质, 1999, 18(2): 153-160. Sheng Jifu, Li Yan, Fan Shuyi. A study of minor elements in minerals from polymetallic deposits in the central part of the Daxing'an Mountains[J]. Mineral Deposits, 1999, 18(2): 153-160. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张乾, 刘志浩, 战新志, 邵树勋. 内蒙古孟恩陶勒盖银铅锌铜矿床的微量元素地球化学[J]. 矿物学报, 2004, 24(1): 39-47. Zhang Qian, Liu Zhihao, Zhan Xinzhi, Shao Shuxun. Trace element geochemistry of Meng'entaolegai Ag-Pb-Zn-In deposit, Inner Mongolia, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2004, 24(1): 39-47. (in Chinese with English abstract)
- [31] 朱笑青, 张乾, 何玉良, 祝朝辉. 内蒙古孟恩陶勒盖银铅锌铜矿床成因探讨[J]. 矿床地质, 2004, 23(1): 52-60. Zhu Xiaqing, Zhang Qian, He Yuliang, Zhu Chaohui. A Study on the genesis of the Meng'entaolegai indium-rich multimetallic deposit in Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(1): 52-60. (in Chinese with English abstract)
- [32] 李虎杰, 易发成, 田煦, 会泽麟. 铅锌矿伴生银赋存状态及次生变化[J]. 有色金属矿产及勘查, 1999, 8(2): 109-112. Li Hujie, Yi Facheng, Tian Xu. Existence of silver and its secondary alteration of the Qilinchang Pb-Zn deposit in Huize ore field[J]. Geological Exploration for Non-Ferrous Metals, 1999, 8(2): 109-112. (in Chinese with English abstract)
- [33] 郑宝山, 周怀阳, 苏宏灿. 鄂西富硒碳质硅质岩与地方性硒中毒[J]. 科学通报, 1992, 37(11): 1027-1029. Zheng Baoshan, Zhou Huaiyang, Su Hongcan. Selenium-rich carbonaceous silicalite and parochial selenium toxicosis[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(11): 1027-1029. (in Chinese)
- [34] Zhang Qian. Trace elements in galena and sphalerite and their significance in distinguishing the genetic types of Pb-Zn ore deposits[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1987, (3): 170-180.
- [35] 潘家永, 张宝贵. 铊——寻找微细浸染型金矿床的指示元素[J]. 矿物学报, 1997, 17(1): 45-49. Pan Jiayong, Zhang Baogui. Thallium as an indicator element for microfine disseminated gold deposits[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1997, 17(1): 45-49. (in Chinese with English abstract)
- [36] 侯嘉丽, 杨密云. 用铊作探途元素寻找金矿[J]. 有色金属矿产与勘查, 1995, 4(4): 223-227. Hou Jiali, Yang Miyun. Thallium as an indicator element for prospecting of gold deposits[J]. Geological Exploration for Non-Ferrous Metals, 1995, 4(4): 223-227. (in Chinese with English abstract)
- [37] 刘家军, 郑明华. 硒——微细浸染型金矿床中的一个重要指示元素[J]. 地质与勘探, 1994, 30(6): 19-22. Liu Jiajun, Zheng Minghua. Selenium -- A major indicating element for microfine disseminated gold deposits[J]. Geology and Prospecting, 1994, 30(6): 19-22. (in Chinese with English abstract)
- [38] Percival T J, Radtke A S. Thallium in disseminated replacement gold deposits of the Carlin-type: A preliminary report[J]. Neues. Jb. Miner., 1993, 166(1): 67-75.
- [39] Jankovic S, Jelenkovic R. Thallium mineralization in the Allchar Sb-As-Tl-Au deposit[J]. Neues Jb. Miner., 1994, 167(2-3): 283-297.
- [40] Wilson J R, Sengupta P K, Robinson P D, et al. Fangite, Tl_3AsS_4 , A New thallium arsenic sulfosalt from the Mercur Au deposit, Utah, and revised optical-data for Gillulyte[J]. Am. Mineral., 1993, 78(9-10): 1096-1103.
- [41] Pascua M I, Murciego A, Pellitero E. Sn-Ge-Cd-Cu-Fe-bearing sulfides and sulfosalts from the Barquilla deposit, Salamanca, Spain[J]. Can. Mineral., 1997, 35: 39-52.
- [42] Tolstykh N, Krivenko A, Pospelova L. New compounds of Ir, Os and Ru with selenium, arsenic and tellurium[J]. Eur. J. Mineral., 1997, 9(2): 457-465.
- [43] Spry P G, Thieben S E. Two new occurrences of benleonardite, a rare silver-tellurium sulphosalt, and a possible new occurrence of cervelleite[J]. Mineral Mag. 1996, 60(403): 871-876.
- [44] Sheppard S, Walshe J L, Pooley G D. Noncarbonate, skarn-like Au-Bi-Te mineralization, Lucky Draw, New South Wales, Australia [J]. Econ. Geol. Bull. Soc., 1995, 90(6): 1553-1569.
- [45] Poutiainen M, Gronholm P. Hydrothermal fluid evolution of the Paleoproterozoic Kutemajarvi gold telluride deposit, southwest Finland[J]. Econ. Geol. Bull. Soc., 1996, 91(8): 1335-1353.
- [46] Choi S H, Yun S T, So C S. Fluid inclusion and stable isotope studies of gold and silver-bearing vein deposits, South Korea; Geochemistry of a Te-bearing Au-Ag mineralization of the Imcheon mine[J]. Neues. JB. Miner., 1996, 171(1): 33-59.
- [47] Baranova N N, Volynskii A B, Kozerenko S V. Contents and chemical forms of Au, Te, Sb and As in mineral-forming solutions gold-sulfide-telluride epithermal deposits—On fluid inclusions data[J]. Geokhimiya, 1995, (12): 1786-1799.
- [48] Bebie J, Seward T M, Hovey J K. Spectrophotometric determination of the stability of thallium (I) chloride complexes in aqueous solution up to 200 degrees C[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1998, 62(9): 1643-1651.

- [49] Simon G, Kesler S E, Essene E J. Phase relations among selenides, sulfides, tellurides, and oxides. 2. Applications to selenide-bearing ore deposits[J]. *Econ. Geol. Bull. Soc.*, 1997, 92(4): 468—484.
- [50] Fulignati P, Sbrana A. Presence of native gold and tellurium in the active high-sulfidation hydrothermal system of the La Fossa volcano (Vulcano, Italy)[J]. *J. Volcan. Geotherm. Res.*, 1998, 86 (1—4): 187—198.
- [51] Mcphail D C. Thermodynamic properties of aqueous tellurium species between 25-degree-C and 350-degree-C [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59(5): 851—866.
- [52] Zhang X M, Spry P G. Calculated stability of aqueous tellurium species, calaverite and hessite at elevated-temperatures [J]. *Econ. Geol. Bull. Soc.*, 1994, 89(5): 1152—1166.
- [53] Large R R, McGoldrick P J. Lithogeochemical halos and geochemical vectors to stratiform sediment hosted Zn-Pb-Ag deposits, 1. Lady Loretta Deposit, Queensland[J]. *J. Geochem. Explor.*, 1998, 63(1): 37—56.
- [54] Huston D L, Sie S H, Suter G F. Selenium and its importance to the study of ore genesis-The theoretical basis and its application to volcanic-hosted massive sulfide deposits using pixeprobe analysis[J]. *Nucl. Instrum Meth. B*, 1995, 104(1—4): 476—480.
- [55] Yun S T, So C S, Choi S H. Genetic environment of germanium-bearing gold-silver vein ores from the Wolyu mine, Republic of Korea [J]. *Mineralium Deposita*, 1993, 28(2): 107—121.

A Review of Enrichment and Mineralization of the Dispersed Elements in China

ZHANG Qian, ZHU Xiao-Qing, GAO Zhen-Min, PAN Jia-Yong

1. *Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*; 2. *State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Earth Science Department, Nanjing University, Nanjing 210093, China*

Abstract: In this paper, the authors ingeminate the definition of the dispersed elements and consider that naming Cd, Ga, In, Tl, Ge, Se, Te and Re for the dispersed elements is not only tally with the geological tradition, but also considering their geochemical properties and geological fact. The extensive industrial utilization of the dispersed elements has urged the further and more systematic study on their mineralization in China in recent ten years. The latest research achievements include: ① the dispersed elements may form their own deposits, even super-large deposits, and form the dispersed element ore field or mineralizing region. This new development influences the traditional conception of which dispersed elements can't form their deposits. In China, many dispersed element deposits have already been prospected. ② the enrichment and mineralization of the dispersed elements exist a specialization of the deposit types and the mineral types. This implies that the uncertainties of the dispersed element prospecting will be decreased; ③ their three existence formats in ores have been discovered, which are their minerals, isomorphism and adsorption. Several new dispersed element minerals are found; ④ release of Se, Tl and Cd from ore and rock can pollute the drinking water and then may endanger the human health, while effect of other dispersed elements to environment is indistinct as yet.

Key words: disperse element; disperse element deposit; ore-forming mechanism; research development