

## 分散元素——金矿床中应引起注意的地球化学信息

司荣军<sup>1,2</sup>, 顾雪祥<sup>1</sup>, 周登诗<sup>3</sup>, 高鹏<sup>3</sup>, 杨升岐<sup>3</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所矿床重点实验室, 贵阳 550002;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 山东省第七地质矿产勘查院, 临沂 276006)

**[摘要]**分散元素 Te、Se、Cd、Tl 在某些类型金矿中可以富集, 是黄金找矿的重要指示元素, 甚至是最重要的指示元素。Te、Se 主要富集在与碱性岩浆活动有关的金矿中, Cd 主要富集在火山热液型金矿和古老结晶基底内的糜棱岩型金矿中, 而 Tl 则在卡林型金矿中富集。分散元素在金矿床中的地球化学信息丰富了黄金找矿方法理论, 拓宽了找矿思路。

**[关键词]**金矿床 分散元素 Te Se Cd Tl

**[中图分类号]**P618.51 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2006)01-0068-04

分散元素一般指在地壳中丰度很低(一般  $10^{-6}$  ~  $10^{-9}$  级), 而且在岩石中极为分散的元素, 包括 Te、Se、Cd、Tl 等。由于分散元素过于分散很难形成独立的矿床、且含量很低造成测试困难等原因, 分散元素的研究长期处于低潮。20 世纪 80 年代末, 由于分散元素在高技术领域中的广泛应用、世界范围内分散元素矿床的发现和灵敏度定量分析测试仪器(如 ICP-MS)的应用, 使分散元素的研究掀起了高潮<sup>[1]</sup>。

地球化学信息是反映地质体中物质组分经历长期地质演化历史的现存状态, 表现为元素的组合、浓集程度和分布特征, 是矿(化)体的定位标志, 可卓有成效地运用到黄金地质找矿工作的实践中<sup>[2]</sup>。但以往主要金矿床研究只注重分析 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Hg、W、Sn、Bi、V、Ti、Mn 等元素, 对分散元素的注意不够。20 世纪 80 年代以后, 随着分散元素研究的不断深入, 研究人员发现, 分散元素 Te、Se、Cd、Tl 等与金矿关系密切, 也是探寻金矿的指示元素, 有时甚至是最主要的指示元素。

## 1 金矿床中 Te、Se 的地球化学信息

Te、Se 的地壳克拉克值很低, Te 地壳克拉克值为  $0.001 \times 10^{-6}$ , Se 为  $0.05 \times 10^{-6}$ <sup>[1]</sup>。Te、Se 与 S 在元素周期表中都位于第五周期 VIA 族, 与硫的结

晶化学及某些地球化学性质相似: 离子半径  $S^{2-} = 0.184 \text{ nm}$ ,  $Te^{2-} = 0.211 \text{ nm}$ ,  $Se^{2-} = 0.191 \text{ nm}$ , 离子电位  $S^{2-} = 1.09 \text{ eV}$ ,  $Te^{2-} = 0.95 \text{ eV}$ ,  $Se^{2-} = 1.05 \text{ eV}$ , 晶格能系数  $S^{2-} = 1.15$ ,  $Te^{2-} = 0.95$ ,  $Se^{2-} = 1.10$ 。所以碲、硒具有亲硫性<sup>[3]</sup>。

碲、硒与碱性岩浆活动关系密切, 在火山及喷气活动中, 硫、碲、硒是典型元素, 在热液活动阶段, 硒呈类质同像进入硫化物晶格中, 碲除少部分进入到硫化物的晶格中外, 更主要的受金、银等沉淀剂元素的控制, 以独立矿物晶出, 形成金、银或其他金属的碲化物。这就是应用碲、硒探索金矿床的地球化学理论基础。

表生作用过程中, 硒被氧化成自然硒, 较为稳定混入附近的氧化物中, 碲易从破坏的硫化物晶格解离出, 形成自然碲或  $Te_2O_3$  沉淀下来, 通常不远离。因而碲在硫化物氧化带中的含量与原生矿石带几乎没有变化。碲、硒在氧化带相当稳定, 其异常距原生露头很近, 是指示金矿床空间位置的重要地球化学标志。

豫西熊耳群火山岩系中金矿床类型多、规模大, 矿床中富含 Te、Se。研究结果显示<sup>[4]</sup>: ①矿床中 Te、Se 含量高。熊耳群火山岩系和无矿化构造蚀变带中 Te 含量一般  $0.08 \sim 0.15 \times 10^{-6}$ , Se 一般  $0.08 \sim 0.27 \times 10^{-6}$ ; 而矿石中 Te 含量一般  $0.02 \sim 93 \times$

**[收稿日期]**2005-01-07; **[修订日期]**2005-11-03; **[责任编辑]**余大良。

**[基金项目]**国家自然科学基金(编号:40573031)和中国科学院“百人计划”项目联合资助。

**[第一作者简介]**司荣军(1966年-),男,1989年毕业于原西安地质学院,获学士学位,高级工程师,在读博士生,现主要从事地球化学研究矿床工作。

$10^{-6}$ , Se 一般  $0.02 \sim 7.5 \times 10^{-6}$ 。金矿床中碲、硒的含量高于熊耳群火山岩系和无矿化的构造蚀变带 1 ~ 2 个数量级。②矿床中金与碲、硒的相关性好。矿床中金与碲、硒呈现不同程度的正相关,尤其是地表富矿段, Te、Se 含量最高, Au 与 Te、Se 密切相关(图 1);而熊耳群火山岩和无矿化构造蚀变带中相关性较差甚至负相关。③矿体中 Au 与 Te、Se 相关系数地表高于深部。这表明不仅碲、硒异常,而且和金与碲、金与硒相关系数也是该区探寻金矿床的重要地球化学信息标志。

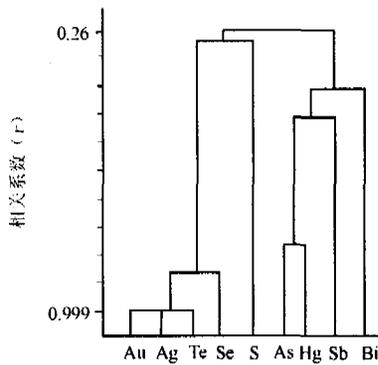


图 1 豫西北岭金矿区 Au 与 Te、Se 的相关性 (据任富根, 2003)

鲁西归来庄大型金矿床是成因上与中生代碱性杂岩体密切相关的隐爆角砾岩型矿床, 研究显示<sup>[2]</sup>:在金矿体附近, 出现清晰的 Au、Ag、Te、Se 等异常(图 2), Te 异常变化几乎与 Au 异常完全同步。相关分析也表明它们具有显著相关性,  $r_{Au-Te} = 0.907$ 。Au - Ag - Te 为成矿指示元素组合, Se - Sb - Bi 为近矿指示元素组合, 说明了 Te、Se 在该区具有重要的指示作用。

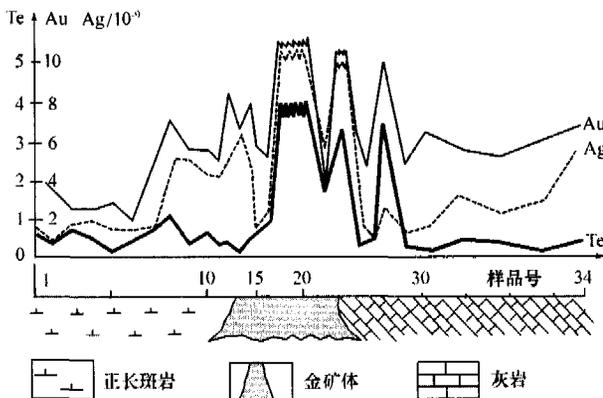


图 2 鲁西归来庄金矿岩石化学剖面图 (据陈永清, 1995)

## 2 Cd 的指示意义

Cd 地壳克拉克值为  $0.2 \times 10^{-6}$ , 地幔中平均含量  $0.07 \times 10^{-6}$ , 地核内可达  $17 \times 10^{-6}$ <sup>[5]</sup>。

Cd 原子序数是 48, 元素周期表上位于第五周期 II B 族 (Zn 副族), 电子构型是  $3d^{10}5s^2$ , 镉离子 ( $Cd^{2+}$ ) 属于 d 亚层充满型 ( $d^{10}$ ) 型, 为亲硫铜型离子。Cd 是一个地球化学性质相当活泼的元素, 其活泼性比 Zn、Fe、Cu、Pb 要大 (Barnes, 1967)。也正是由于 Cd 的化学性质的活泼性, 几乎在各种地质作用中 Cd 都有一定的表现, 从内生作用到表生作用都能找到其地球化学行为的痕迹<sup>[5]</sup>。

还原条件下,  $Cd^{2+}$  的极化率极高, 极易与  $S^{2-}$  形成典型的共价键; 另外, Cd 的结晶化学参数和地球化学性质亲硫元素 Zn、Fe、Ag、Cu、Pb 等具有一定的相似性, Cd 常以类质同相的形式进入到闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿等硫化物矿物或硫酸盐中, 尤其是闪锌矿内。而这些矿物也往往是主要的载金矿物。

在表生风化条件下, 在氧化不强的环境中, 一些含镉的硫化物 (如闪锌矿) 可被迅速氧化溶解, 而镉则以 CdS 形式残留下来。在较强的氧化条件下,  $CdS + O_2 \rightarrow CdSO_4$ , 也可被  $CO_3^{2-}$  交代, 形成稳定的  $CdCO_3$ 。Cd 的硫酸盐和碳酸盐微溶或不溶于水, 不容易随地下水或地表水流失而在土壤中相对富集, 显示 Cd 异常。

西藏洞嘎金矿位于雅鲁藏布江断裂北侧, 是燕山期火山热液型矿床。金矿区 Cd 的背景值  $145 \times 10^{-9}$ , 与克拉克值相近, 但在金异常分布地段, 镉异常非常发育, 且两元素的异常套合很好(图 3)。洞嘎金矿的研究表明, 土壤样品中 Au、Cd 密切相关, 相关系数  $r = 0.79$ 。在洞嘎地区的 5 个已知金矿化点, 均有次生 Cd 异常分布, Cd 异常甚至比 As、Sb、Bi 等元素的异常清晰, Cd、Au 异常分布基本一致, 金矿化体位于异常中心, Cd 异常对找金的指示作用比 Cu、Ag、Sb 异常还好。推断结果表明, 凡 Au、Cd 异常叠加地段, Au 含量高于  $40 \times 10^{-9}$ , Cd 含量高于  $250 \times 10^{-9}$ , 就有可能发现金矿化体, 并且根据这一推断结果, 在外围又发现了 6 个矿化体, 取得了很好的地质效果<sup>[6]</sup>。

绍兴 - 诸暨金矿带是浙江中部最重要的金矿带, 矿床位于晋宁期石英闪长岩中的糜棱岩带中。金矿带中 Cd、Au 的区域背景值与地壳克拉克值大致相当(表 1), 石英闪长岩中 Cd 与 Au 同步富集,

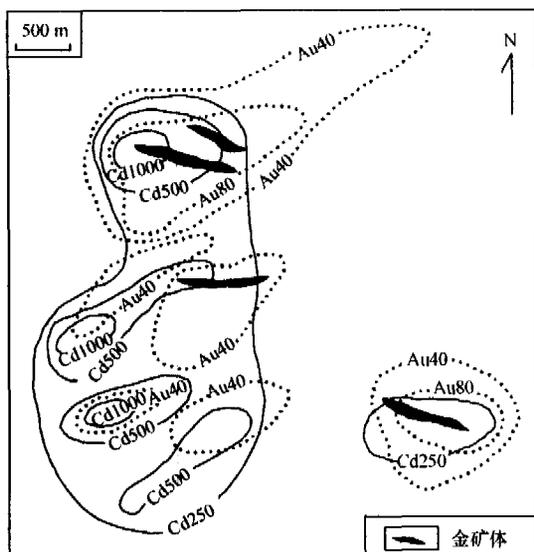


图3 洞嘎金矿区 Au、Cd 异常  
(据朱细创,1993)

但矿石中 Cd 的富集速率是 Au 的 13 倍,平均值达  $134.81 \times 10^{-6}$ 。统计分析表明,  $r_{Au-Cd} = 0.978$ , 远远大于 Au 与 Cu、Zn、Hg 之间的相关系数 ( $r = 0.595 \sim 0.520$ ) (图 4)。Cd 是 27 种元素中与 Au 关系最密切的元素,是金矿床的第一指示元素<sup>[7]</sup>。

表 1 绍兴—诸暨金矿带 Au、Cd 分布统计表

项目	样品数	Au/ $10^{-9}$	Cd/ $10^{-6}$	资料来源
区域背景值	2080	2.4	0.37	朱平,1996
石英闪长岩	8	6.61	68	
矿石	33	102.42	134.81	
地壳克拉克值		3.5	0.2	刘英俊,1984

### 3 金矿床中 Tl 的地球化学信息

Tl 地壳丰度为  $0.45 \times 10^{-6}$ <sup>[1]</sup>, 在周期表中位于第六周期 IIIA 族, 电子构型为  $6S^2 6P^1$ 。由于 Tl 的主要地球化学参数和 IA 族碱性金属 K、Rb、Cs 相近, 这就决定了 Tl 在一定条件下能以类质同相形式进

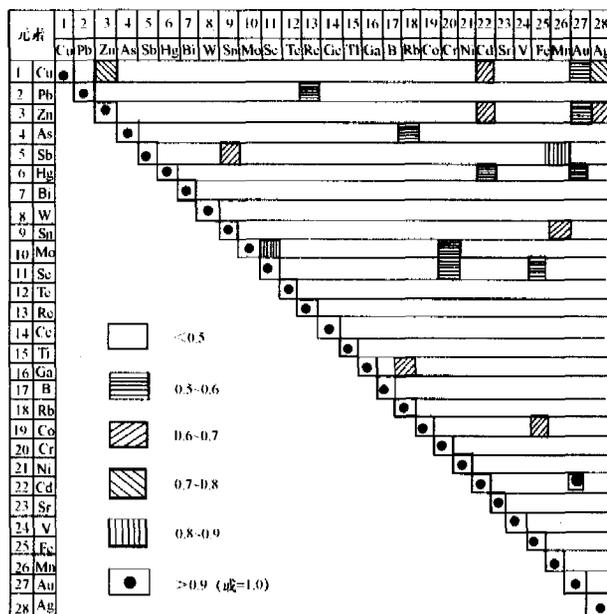


图 4 绍兴—诸暨鑫矿带中 Au 与 27 种微量元素相关关系  
(据朱平,1994)

入含 K、Rb、Cs 的矿物中, 表现亲石性。同时 Tl 又有 18 个电子组成的外电子层, 在低温热液矿床中与 Au、Hg、As、Sb、Fe、Cu、Pb、Zn 等成矿元素共生。Tl 与 Au 关系密切可能是由于二者都是亲硫元素,  $Tl^+$  和  $Au^+$  半径相似 (分别是 1.47Å 和 1.37Å)。

在浅成低温热液硫化物金矿床中 Tl 有较高的富集 (表 2), 特别是在卡林型金矿和热泉型金矿中。卡林型金矿矿石品位稳定, 规模大, 矿床异常组合为 Au-Hg-Sb-As-Tl。这类矿床中, Tl 均有高度富集, 且与 Au 关系密切。如美国的卡林金矿, Tl 在原生金矿石中的平均含量为  $50 \times 10^{-6}$ , 比新鲜未矿化围岩中平均含量 ( $< 3 \times 10^{-6}$ ) 高的多。

滇黔桂金三角是我国重要的卡林型金矿集中区, 矿床一般赋存于三叠系泥质粉砂岩中。龙江

表 2 某些低温热液金矿床中 Tl 的含量

矿床名称	矿(岩)石类型	Tl/ $10^{-6}$	Au/ $10^{-6}$	资料来源
美国内华达州卡林金矿	原生矿石	20~50	7.10	龙江平,1996
	氧化矿石	<20		
美国麦克劳林金矿	原生矿石	3.80	17.30	
加拿大霍姆洛金矿	原生矿石	5~42	6.2~9.3	
中国黔西南戈塘金矿	远矿赋矿岩	1.00	0.040	张忠,1996
	近矿围岩	2.20	0.810	
	矿化岩	6.00	0.890	
	金矿石	42.49	8.890	
黔西南烂泥沟金矿	矿石	0.93~14.87		
桂西北金牙金矿	矿石	1.9~6.2	0.31~28.97	
	围岩	0.5~3.6	0.0018~0.047	
地壳克拉克值	0.45			刘英俊,1987

平<sup>[8]</sup>、张忠<sup>[9]</sup>、潘家永<sup>[10]</sup>等对该区卡林型金矿的指示元素进行了研究。成果显示: Tl 与 Au 在矿石中同步富集(图5,表2),矿石中 Tl 含量最高达  $160 \times 10^{-6}$ , 平均  $5 \times 10^{-6}$ , 而未矿化岩石中一般小于  $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ 。Tl 与 Au 密切正相关, 其相关系数  $r_{Au-Tl} = 0.6 \sim 0.93$ 。Tl 的分散晕较其他指示元素(Au、Hg、Sb、As 等)分散晕大, 属于矿床垂向分带序列的较靠上部位置, 容易形成矿体的前缘晕, 就寻找浅成低温热液金矿尤其是卡林型金矿深部盲矿体而言, Tl 较其他指示元素更有效。张忠(1996)还提出, 在卡林型金矿带中, Tl 的含量大于  $10 \times 10^{-6}$ 、 $(5 \sim 10) \times 10^{-6}$ 、 $(1 \sim 5) \times 10^{-6}$  分别是金矿床、矿田和矿带的找矿标志。

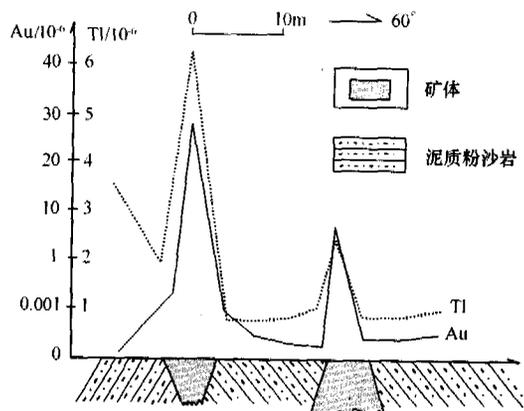


图5 桂西北金牙金矿 Au、Tl 含量剖面图  
(据潘家永, 1997)

#### 4 结论

分散元素 Te、Se、Cd、Tl 皆具有一定的亲硫性, 并易与 Ag、Cu、Pb、Zn、Hg 等元素共生, 虽然在地壳中的丰度值很低, 但它们仍然在某些金矿床中富集, 而成为该类型金矿床的重要指示元素, 有时甚至是最主要的指示元素。

分散元素一般在低温热液金矿床中才能富集。

Te、Se 主要富集在与碱性岩浆活动有关的碲金型矿床中, 而 Cd 则富集在火山热液型金矿和赋存于古老结晶基底的糜棱岩型金矿床。在卡林型金矿中, Tl 一般会有较高的含量。分散元素异常及相应地球化学参数对于圈定金矿(化)、寻找隐伏矿床、判定金矿体剥蚀程度具有重要意义。

#### 5 结语

近年来, 世界黄金产量持续下降, 黄金价格上涨, 引起黄金勘探投资增加, 但现在地质找矿难度越来越大, 研究新理论、探索新方法, 寻找新类型或隐伏金矿的要求日益迫切。分散元素在金矿床中的地球化学信息无疑丰富了黄金找矿方法理论, 拓宽了找矿思路。

#### [参考文献]

- [1] 涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 等. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [2] 陈永清, 纪宏金, 李森乔. 铜石金矿田地球化学找矿模型[J]. 地质与勘探, 1995, 31(6): 49~53.
- [3] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [4] 任富根, 李双保, 赵嘉农, 等. 熊耳群火山岩系金矿床中的碲(硒)地球化学信息[J]. 地质调查与研究, 2003, 26(1): 45~51.
- [5] 谷团. 牛角塘独立铜矿床初步研究[D]. 中国科学院硕士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1999.
- [6] 朱细创. 浅谈铜异常在火山热液型金矿普查中的应用效果[J]. 地质与勘探, 1993, 29(12): 45~47.
- [7] 朱平. 绍兴—江山石英闪长岩金矿带元素地球化规律的多元统计分析[J]. 有色金属矿产与勘查, 1994, 3(4): 230~233.
- [8] 龙江平, 张宝贵, 张忠. 铊的地球化学异常与金矿找矿[J]. 地质与勘探, 1994, 30(5): 51~67.
- [9] 张忠. 卡林型金矿指示元素研究[J]. 地质地球化学, 1996(1): 35~38.
- [10] 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.

### DISPERSED ELEMENTS: GEOCHEMISTRY INFORMATION IN GOLD DEPOSITS SHOULD BE PAID ATTENTION

SI Rong - jun<sup>1,2</sup>, GU Xue - xiang<sup>1</sup>, ZHOU Deng - shi<sup>3</sup>, GAO Peng<sup>3</sup>, YANG Sheng - qi<sup>3</sup>

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039; 3. No. 7 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Linyi 276006)

**Abstract:** Geochemistry research results in some gold deposits show that dispersed elements like Te, Se, Cd, and Tl may be enriched in some types gold deposits. They are important indicator elements, sometimes even the most important indicator element. Te and Se are enriched in those deposits which relate with alkali - magma activities, Cd in those deposits which occur in crystalline basement mylonite, and Tl in Carlin - type gold deposits. The dispersed elements give some geochemistry information for prospecting of gold deposits, which should be paid attention.

**Key words:** gold deposit, dispersed element, Te, Se, Cd, Tl