

文章编号: 0379-1726(2001)02-0155-08

西秦岭降扎地区寒武系层控金矿床中 Au-Se 共同富集成矿机制

刘家军¹, 郑明华², 刘建明³, 卢文全⁴, 刘显凡²

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学开放研究实验室, 贵州 贵阳 550002; 南京大学 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093; 2. 成都理工学院 矿床地质研究所, 四川 成都 610059; 3. 中国科学院 矿物资源探查研究中心, 北京 100101; 4. 国土资源部 矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: 西秦岭降扎地区寒武系中的层控金矿床, 产于由碳质硅岩和碳质板岩组成的硅岩建造中。研究表明, 无论是围岩还是金矿石, 均普遍含有较高的硒, 达到工业综合利用的要求, 在局部地段甚至可以圈出独立的硒矿体。在金矿石中, 硒主要呈独立矿物和以类质同象形式存在于硫化物中, 且硒与金呈密切的正相关关系。尤为重要的是, 在金矿石中常常见到自然金与一些硒矿物紧密共生, 说明 Au、Se 可能以 Au-S-Se 或 Au-Se 络合物形式进行迁移。由于沸腾的成矿流体与下渗的富氧冷水混合而发生氧化还原作用, 导致了 Au 和 Se 的共同富集成矿。

关键词: 层控金矿床; Au-Se 共生机理; 降扎; 西秦岭

中图分类号: P595 **文献标识码:** A

0 引 言

硒是分散元素, 在自然界通常极难形成工业富集, 甚至硒的独立矿物也很少。国内外文献中所述的有硒化物产出的金矿床, 多是一些与陆相火山作用有关、富砷化物的浅成热液金-银矿床, 如日本湖凌^[1]、串木野^[2]、菱刈^[3,4]、珊瑚^[4]、千岁^[4]和八谷^[4]等, 美国内华达州斯珀^[5,6]和贾布里器奇^[7]、爱达荷银城^[8,9]、华盛顿里帕布利克^[10]、英国德文郡托阔伊^[11]、新西兰大巴里尔岛^[12]和卡穆拉^[13]、印度尼西亚萨利达^[14]和雷德尼兹洛邦^[15]、墨西哥瓜纳花托^[16]、西班牙普罗维登西亚^[17]以及环太平洋和地中海成矿带中许多金银矿床(如普拉索勒夫斯科伊、国后岛和千里群岛^[18,19]等)即为典型实例。然而, 在上述矿床中均没有形成硒的矿化富集体, 它仅表明硒的浓度有所增大。

作者在研究我国西秦岭降扎地区寒武系层控金矿床的物质组分时, 发现矿床中不仅存在大量硒的独立矿物^[20-26], 而且也存在硒的矿化富集体^[27,28]。在含硒的金矿石中, 硒含量一般在 $n \times 10 \sim n \times 100$

$\mu\text{g/g}$ 范围内, 最高达 $7\,700 \mu\text{g/g}$ ^[28]。研究表明, 矿床既与陆相火山作用无关^[29,30], 又无银的异常和碲矿物产出^[31]。但硒在金矿床中却如此富集, 这是一种尤为奇特的现象。是什么原因导致了硒在金矿床中的高度富集? 硒在金的成矿过程中起何作用? Au、Se 为何共生在一起? 有关传统理论均无法解释上述问题, 而对这些问题的研究, 可能是揭示硒为何在金矿床中高度富集、甚至可能形成独立硒矿床的关键所在。

1 金矿床地质特征

西秦岭南亚热带寒武系中的层控金矿床, 由拉尔玛(位于俄都地段)、邛莫金矿床和牙相金矿点组成(图 1)。它是我国境内发现的一种具有独特地质特征的金矿床。在 20 世纪 80 年代中期, 四川省地质矿产局川西北地质大队和甘肃省地质矿产局第三地质大队就开始对矿床进行普查和勘探工作。金矿床位于西秦岭南亚热带白依沟背斜西部的倾没端(图 1), 并赋存于寒武系太阳顶群由碳质硅岩和碳质板岩组成的硅岩建造中, 受地层、岩性和构造控制十分

收稿日期: 2000-01-13; 修订日期: 2000-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49773197); 中国科学院 1997 年度“百人计划”资助项目; 国家重点基础发展规划资助项目(C1999043208); 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室基金资助项目(049805)

作者简介: 刘家军(1963-), 男, 研究员, 矿床地球化学专业。

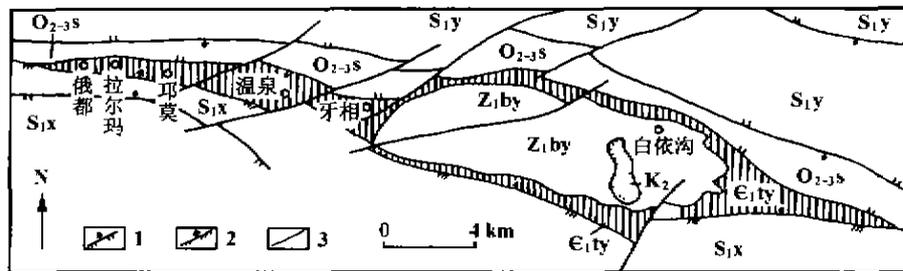


图1 西秦岭降扎地区寒武系层控金矿床区域地质略图
(据四川省地质矿产局川西北地质大队区调分队, 1990, 略有修编)

Fig. 1 Geological sketch map of the Cambrian stratabound gold deposits
in Jiangzha, western Qinling Mountains

K₂: 上白垩统; S_{1y}: 下志留统羊肠沟组; S_{1x}: 下志留统下地组; O_{2-3s}: 中、上奥陶统苏里木塘组;
E_{1ty}: 寒武系太阳顶群; Z_{1by}: 震旦系白依沟群; 1. 逆断层; 2. 逆掩断层; 3. 平移断层。

明显, 所表现出来的层控性质为众所公认^[31]。

产于硅岩建造中的金矿体, 80%以上赋存于硅岩中。矿体一般沿顺层破碎带分布, 形态为似层状和透镜状, 其产状与围岩产状一致。矿石矿物和元素组合十分复杂。现已鉴定出的矿物多达80余种。其中包括Cu、Pb、Zn、As、Mo、Ni和Sb等的硫化物、含铀矿物以及一大批氧化矿物。常见的矿物有自然金、硒汞矿、硒铅矿、黄铁矿、白铁矿、辉锑矿、石英、重晶石和地开石等。但在金矿石中尚未发现自然硒、碲化物以及Ag和Cu的硒化物。值得一提的是, 作者在研究中鉴定出多种硒化物^[29-36], 如硒汞矿、硒铅矿和硒锑矿等。矿石中矿物种类之多以及硒矿物的出现之广泛, 是该金矿床的一大特点。

根据含矿岩石的差异, 可将矿石划分为三种类型: (1) 硅岩型金矿石; (2) 板岩型金矿石; (3) 英安斑岩型金矿石。硅岩型矿石包括层状硅岩矿石和硅化硅岩矿石, 它是矿床的主要矿石类型, 约占矿石总量的75%~80%。其中的金含量变化较大, 最高达66.0 μg/g, 但多在1.0~7.0 μg/g之间。板岩型矿石中金含量一般为2.0~5.0 μg/g。英安斑岩型矿石多见于邛莫矿区, 该类矿石中的金含量极不稳定, 变化极大, 高者达41.57 μg/g。除金外, 矿床中Cu、U、Mo、Sb、V和Zn在局部地段亦可圈出独立矿体。尤为重要的是, 作者在研究金矿床时, 发现了Se、In和PGE(铂族元素)在矿石中的高度富集^[27, 28, 32, 33], 并在局部地段可以圈出独立的硒矿体, 从而使矿床价值大为提高。

矿床的围岩蚀变有硅化、辉锑矿化、黄铁矿化、重晶石化和地开石化等。其中以硅化为主, 大部分金矿体就位于最强烈的硅化蚀变范围之内。它的显著特征是岩石颜色由灰黑色、深灰色变成灰色、灰白

色, 其中有机碳被带出, 使其含量降低。其他围岩蚀变分布较局限。无论何种蚀变, 均发育于顺层破碎带内。一般说来, 围岩蚀变较强烈的地带, 矿石组分较复杂, 矿化较好; 而围岩蚀变较弱的地带, 矿化较差。

根据脉体的穿插关系、矿石组构以及矿物共生组合, 拉尔玛、邛莫金矿床的形成主要经历了两个成矿阶段, 即(1) 黄铁矿-白铁矿-黄铜矿-斑铜矿-自然金-石英成矿早阶段和(2) 辉锑矿-硒化物-自然金-石英-重晶石成矿主阶段。研究表明, 金的成矿主要发生在中、新生代交替时期(47~137 Ma)^[34]。

2 Au、Se 共生现象

2.1 岩石和矿石中的Se含量

金矿床中普遍存在硒的高异常。根据对研究区含矿硅岩建造中11条地质剖面、7个钻孔、5个坑道中的714件碳质硅岩、碳质板岩样品中硒元素的分析表明, 无论是矿化地段, 还是非矿化地段, 均存在不同程度的硒元素富集^[28]。714件样品平均含硒量为42.08 μg/g。

按金矿石类型差异, 笔者分别统计了矿石中Au、Se的平均含量(表1)。其中金矿石中硒含量变化系数较低(<62%), 含量范围一般为10~50 μg/g, 最高达7700 μg/g(在表1数据统计中已剔除硒含量特高值), 且邛莫矿床中硒含量较拉尔玛矿床高。在邛莫, 硅岩型矿石中金的平均含量(5.07 μg/g)明显高于板岩型矿石(3.69 μg/g), 但两者的硒平均含量接近(分别为42.3 μg/g和39.7 μg/g); 在拉尔玛, 硅岩型矿石中金的平均含量(2.40 μg/g)明显低

于板岩型金矿石 ($5.16 \mu\text{g/g}$), 但硒含量则是前者 ($33.9 \mu\text{g/g}$) 明显高于后者 ($18.0 \mu\text{g/g}$)。矿床中英安斑岩型矿石金含量较高 ($> 7 \mu\text{g/g}$), 其中的硒含量变化较大, 从 $14.1 \sim 57.5 \mu\text{g/g}$ 不等。

表 1 矿石中 Au 和 Se 平均含量 ($\mu\text{g/g}$)

Table 1 Average contents ($\mu\text{g/g}$) of Au and Se in gold ores

类型	地点	Au	Se
硅岩型矿石	拉尔玛	2.40 (17)	33.9 (5)
	邛莫	5.07 (9)	42.3 (4)
板岩型矿石	拉尔玛	5.16 (16)	18.0 (19)
	邛莫	3.69 (17)	39.7 (13)
英安斑岩型矿石	拉尔玛	7.23 (12)	53.5 (2)
	邛莫	7.88 (9)	20.5 (3)

注: 括号内数据为样品数

可见, 无论是拉尔玛还是邛莫, 金矿石中硒含量均甚高, 达到工业综合利用要求。在局部地段, 甚至可圈出独立的硒矿化体。如在邛莫 7 勘探线 OPI 坑道中 17 号和 18 号金矿体内, 12 件样品的硒含量为

$6.80 \sim 315.98 \mu\text{g/g}$, 平均 $165.23 \mu\text{g/g}$ 。硒矿化体厚度可达 6.30 m 。

2.2 Au、Se 空间分布

为全面了解硒在空间上的富集特征及其与金矿化的关系, 作者采用三维有限元分析方法来探讨这一问题。三维模型边界按实际采样位置定界。模型平面主要由勘探线地表构成, 而模型剖面则由勘探线地表、坑探中段及钻探线构成。在模型平面中, x 坐标、 y 坐标即为地理坐标, z 坐标表示区内成矿元素的含量。在模型剖面中, x 坐标对应于模型平面中的 y 坐标, 而 y 坐标则是海拔高度, z 坐标仍是成矿元素的含量。三维图形直接用 Surfer 软件绘制。

(1) 模型平面: 以拉尔玛、邛莫矿区及其外围数条剖面的地表样品构成整个模型平面 (图 2), 共由 360 个结点 (数据点) 构成。各结点坐标均以实际地理坐标表示。从所作的 Se、Au 成矿元素三维有限元数值模型图 (图 2) 中可以看出, 尽管 Au、Se 富集的具体部位不一定完全一致, 但两者在拉尔玛、邛莫

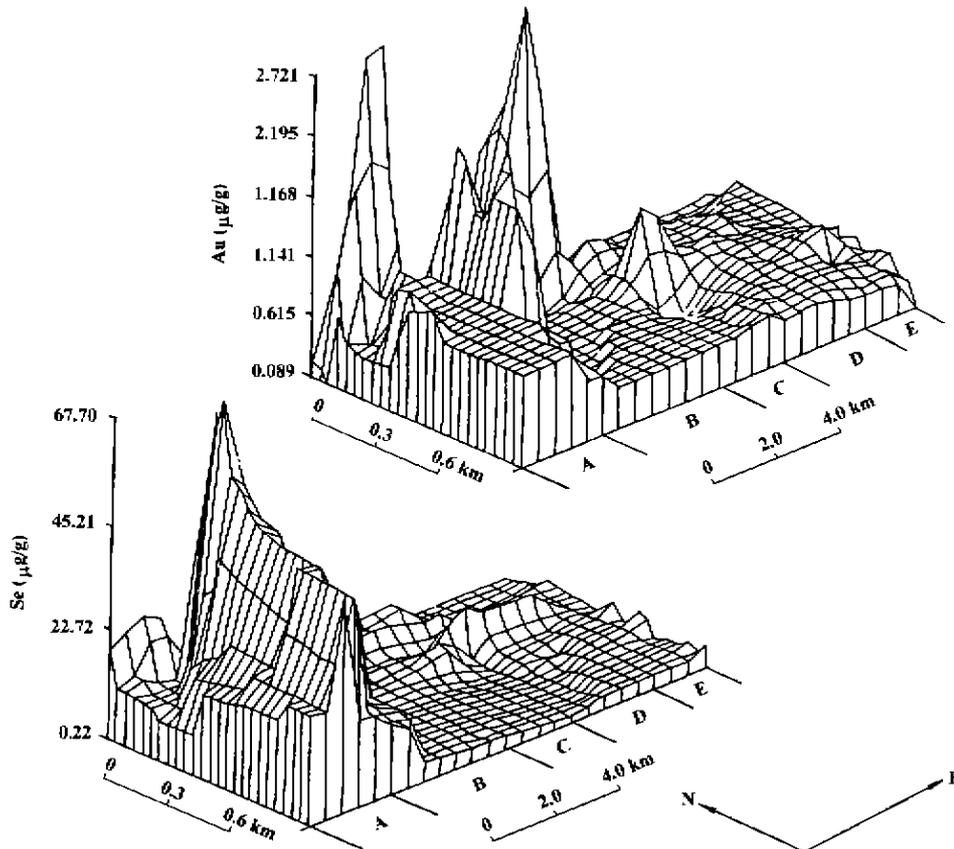


图 2 Au、Se 成矿元素三维有限元数值平面模型

Fig. 2 Planimetric patterns of tri-dimensional finite unit of gold and selenium elements

A 拉尔玛金矿区; B. 邛莫金矿区; C. 黄水沟、510-3 铀矿区; D. 温泉沟; E. 牙相金矿点。

矿区富集程度均最高,而其他地方(如黄水沟、牙相)富集程度较低。

(2) 模型剖面:以邛莫7号勘探线剖面地表、坑探、钻孔样品构成整个模型剖面,共由250个结点(数据点)构成。各结点坐标均以实际地理坐标及海拔高度表示。从所作的 Au、Se 成矿元素三维有限元数值模型剖面图(图3)中可以看出,Au、Se 在地表浅部富集程度均较高,而深部则较贫,并同样具有 Au、Se 富集的具体部位不一定完全重合的特点。

2.3 Au、Se 矿物共生

迄今为止,作者在反光显微镜下已鉴定出多种硒化物^[20-26],如硒汞矿、硒铅矿、硒锑矿、等轴硒镍矿、六方硒镍矿、斜方硒镍矿、白硒铁矿和 Ni-As-S-Se 矿物相等。但最常见的硒矿物是硒汞矿,其占硒矿物总量的80%以上。金矿石中硒矿物的产出状态有4种:(1)共生硒,硒矿物常与自然金、辉锑矿等矿物紧密共生在一起;(2)粒间硒,硒矿物沿石英、重晶石、辉锑矿等矿物颗粒间充填,此种粒

间,可以是单一矿物的粒间,也可能是两种或两种以上矿物的粒间;(3)裂隙硒,硒矿物在硅岩以及石英、重晶石等矿物的裂隙呈细脉、网脉状产出,脉厚可达1~2mm左右;(4)包裹体硒,硒矿物常被包裹于辉锑矿、重晶石、石英和地开石等矿物中。尽管硒矿物的产出形式多种多样,但作者所见到的显微自然金几乎均与硒汞矿共生在一起(图4)。

3 Au、Se 共同富集成矿机制

3.1 理论依据

在金矿床中,Au与Se是否可以共生在一起呢?从理论上讲,它们既有共生的可能性,又有共生的必然性。

众所周知,Se位于周期表中第4周期第VI_A主族,属于S-Se-Te系列。由于Se与S的结晶化学和它们的某些地球化学性质,如离子半径、晶格能系数和离子电位等颇相似,因而Se易进入硫化物的结晶格

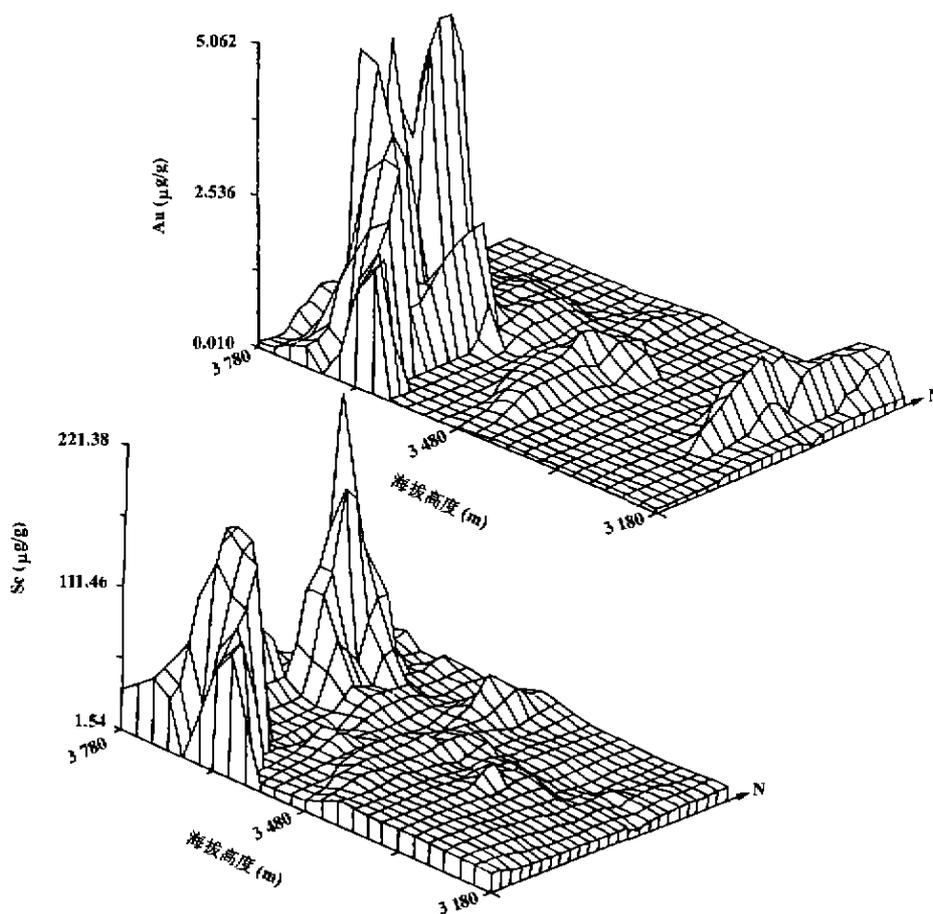


图3 Au和Se成矿元素三维有限元数值剖面模型

Fig. 3 Sectional patterns of tri-dimensions finite unit of gold and selenium elements

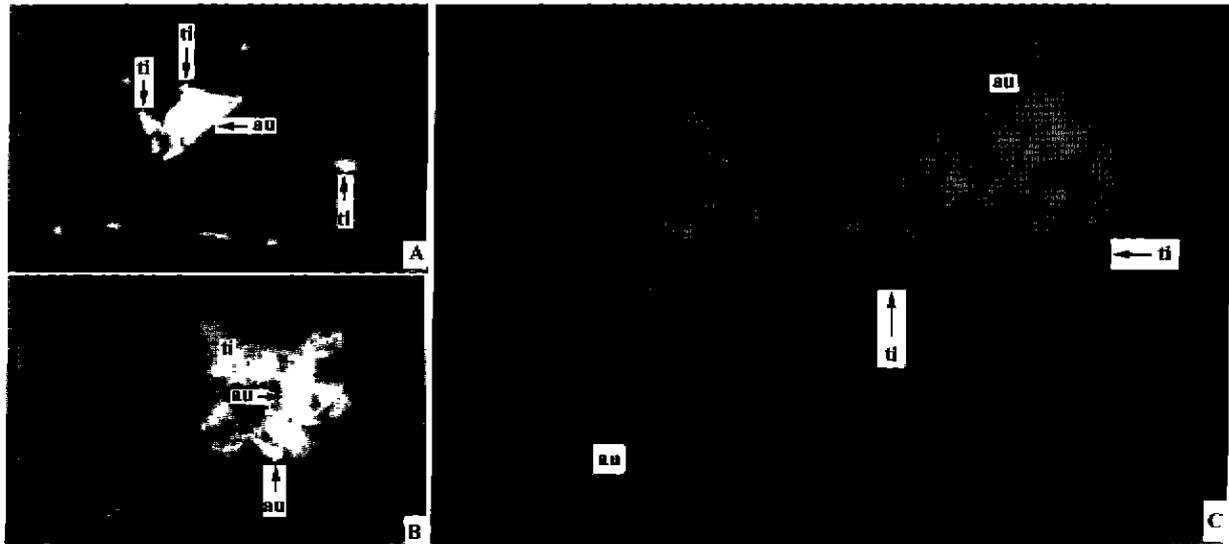


图 4 自然金与硒汞矿共生

Fig. 4 Coexistence of native gold with tiemannite

A~C. 光片, 单偏光, 视域对角线长分别为 3.8 mm、3.8 mm 和 1.9 mm。au, 自然金; ti, 硒汞矿。

架, 以类质同象形式广泛存在于硫化物中。在热液中, 除其他条件外, 温度是控制硒活动的主要因素之一。实验证明^[25], 在高温条件下能扩大 S 和 Se 的类质同象范围, 中高温形成的硫化物矿物中较富含硒, 相反在低温情况下形成的硫化物中含硒少且分散, 但此时若 S 少 Se 多, 则有利于硒的独立矿物的形成。因此在热液活动中, 对硒来说, 热液作用是最主要的作用阶段, 它能以大量呈分散形式或独立矿物形式存在于这一阶段的地质体中。也就是说, 几乎所有热液成因的硫化物矿床和部分金矿床都可能含有硒元素。对于层控金矿床来说, 热液活动是成矿不可缺少的条件之一。层控金矿床中的金虽然难以进入硫化物晶格, 但还是大都赋存于部分硫化物中, 即以细分散质点或包裹体为硫化物所捕获。从这种意义上讲, Au 与 Se 存在共生的可能性。

另一方面, Au 与 Se 都是亲硫元素, 它们的某些性质, 如电负性 (Au 2.3 eV, Se 2.4 eV)、共价半径 (Au 0.134 nm, Se 0.107 6 nm) 等相差不大, 且 Au 与 Se 在热液中都是相当活泼、易活化迁移的元素。它们也能结合形成一些金的硒化物或硫硒化物^[19], 如硒金银矿 $[Ag_3AuSe_2]$ 、碲硒硫金银矿 $[(Au, Ag)_2(Te, Se, S)_2]$ 、硫硒金银铜矿 $[(Ag, Cu)_4Au(S, Se)_4]$ 和硫硒金银矿 $[AuAg(S, Se)]$ 等, 这也说明, Au 与 Se 存在共生的可能性。

3.2 Au、Se 迁移形式

如前所述, 寒武系层控金矿床中具有很高的硒

含量, 并且有数种独立硒矿物产出, 这表明矿床形成时具有特殊的成矿环境。事实上, 它们在中-低温条件下, 且硫逸度低 (贫还原硫) 或硫以 SO_3^{2-} 形式为主时方能生成。因此, 矿床中多种独立硒矿物的出现, 尤其是自然金与硒矿物经常共生在一起 (图 4), 且金矿石中 Au 与 Se 具有正相关的趋势^[28], 说明在热液活化迁移过程中, Se 和 Au 有紧密相关的地球化学性状。

就与金结合的络阴离子团类型来看, 在 O-S-Se-Te 族元素中, 已知有 O、S、Te 与 Au 组成的络合物 22 种, 但未见 Au 与 Se 组成络合物存在的报道。作为络合物的配位体来说, Se 与 S 具有极为相似的地球化学行为^[30]。Se 与 S 的价电子构型相同, 化学性质相近, 均易成负二价, 显共价键非金属性。H₂Se 分子构型与 H₂S 相似, 均为弯曲线型。H—Se—H 的键角约为 90°, 稍小于 H—S—H 的键角。这可能是由于元素的电负性减小导致键合轨道的极化而使其相互靠近使然。H₂Se 与 H₂S 一样, 在水中离解出氢离子, 并与重金属离子生成硒化物, 但其酸性和还原性均强于 H₂S。对硒在热液中的地球化学性质的研究表明^[37, 38], 在温度高于 200 °C 时, 在含 S、Se 的水溶液中, H₂S 和 H₂Se 占主导地位, 且 $m(H_2Se)/m(H_2S)$ 活度比值接近于 $m(\Sigma Se)/m(\Sigma S)$; 而温度低于 150 °C 时, HSe⁻ 则是含硒溶液中的主要离子。此时活度比值 $m(H_2Se)/m(H_2S)$ 与 $m(\Sigma Se)/m(\Sigma S)$ 不相等。实验还表明, pH 值和氧逸度 (f_{O_2}) 对 $m(Se^{2-})/m(S^{2-})$ 活度比值有很大影响^[37, 38]。因

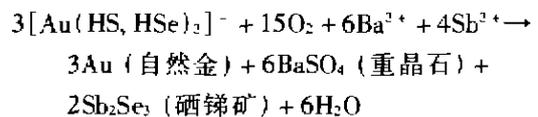
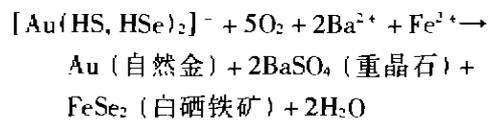
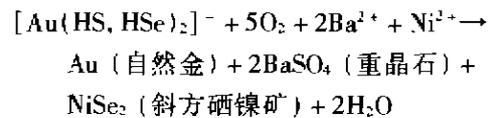
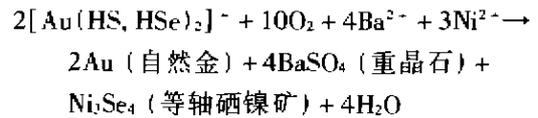
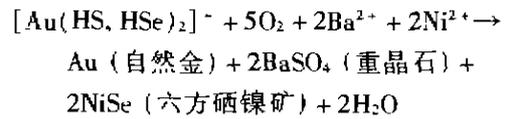
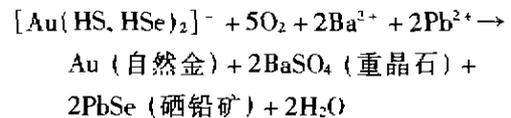
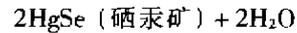
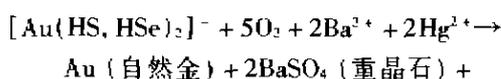
此,在还原性较强的含金热液中,金主要以硫氢络合物形式迁移,这时络合物中的 H_2S 被 H_2Se 取代, HS^- 被 HSe^- 取代, S^{2-} 被 Se^{2-} 取代,即可生成 $[\text{HAu}(\text{HS}, \text{HSe})_2]^0$ 或 $[\text{Au}(\text{HS}, \text{HSe})_2]^-$ 形式的 Au-S-Se 络合物,甚至最终生成 $[\text{HAu}(\text{HSe})_2]^0$ 或 $[\text{Au}(\text{HSe})_2]^-$ 形式的 Au-Se 络合物。一旦这种络合物所需的稳定场被破坏,这种 Au-S-Se 络合物就会分解而形成金与独立硒矿物紧密共生或连生在一起的现象,甚至可能形成金的硒化物。矿床中常见自然金与硒矿物共生在一起的现象(图4),说明金是以 Au-S-Se 络合物形式进行迁移的。

3.3 Au、Se 共同沉淀富集

由于 Se 和 S 被氧化的难易程度差别极大,故二者的分离发生在氧化环境中。S 易氧化,其 $E^0 = -0.45 \text{ V}$,而 Se 的 $E^0 = -0.74 \text{ V}$,因此在还原条件下,硒主要呈类质同象形式进入硫化物晶格,而在相对氧化性较强的环境中则单独形成硒的独立矿物。若 Au-S-Se 络合物主要通过大量硫化物的生成降低了成矿流体中的 H_2S 浓度而发生分解沉淀,则硒主要进入硫化物晶格取代硫而分散;只有当 Au-S-Se 络合物通过混合的浅部富氧地下水氧化 H_2S 成为 SO_4^{2-} 而发生分解沉淀时,硒则不可能分散进入硫化物,只能形成硒的独立矿物。

矿床中广泛存在硒的独立矿物和硒以类质同象形式进入硫化物晶格的现象,说明金以硒络合物形式迁移,并导致了 Au、Se 的共同富集。矿床中普遍存在角砾状矿石和成矿流体中富含 H_2O 、 CO_2 、 CH_4 和 H_2 等挥发分以及热液矿物中存在沸腾包裹体的现象^[30]表明,成矿流体的沸腾作用以及成矿流体与浅部富氧水相混合乃 Au、Se 共同富集的主要机制。成矿流体的沸腾,导致强烈的水热喷发而形成隐爆角砾岩,并伴随明显的矿化。发生沸腾时,围岩不可能向流体提供能量。因此,沸腾作用可能是等焓沸腾或者是能量从流体向围岩散失的沸腾^[40],且沸腾作用可使 40.6% 的流体转化为气相^[41]。不难想象,在断裂系统的开放体系中上升的较高温度的流体由于压力降低而沸腾, CO_2 、 CH_4 、 H_2S 、 H_2O 和 H_2 等气体大量逸出,金的浓度急剧提高。由于沸腾的成矿流体与下渗的富氧冷水混合而发生氧化还原作用,致使自然金和大量硒化物迅速沉淀下来,并共生在一起。

其反应式大体写成:



因此,在含 Au、Se 成矿溶液中, Au 与 Se 能一起迁移并基本同时沉淀,导致 Au 与 Se 的共同富集。

4 地质意义

Se 在地壳中的丰度仅为 S 的千分之几,但大于 Te 的地壳丰度^[35, 42, 43]。由于 Se 与 S 的结晶化学和它们的某些地球化学性质,如离子半径(S^{2-} 为 0.184 nm, Se^{2-} 为 0.191 nm)、晶格能系数(S^{2-} 为 1.15, Se^{2-} 为 1.10)和离子电位(S^{2-} 为 -1.09 eV, Se^{2-} 为 -1.05 eV)等颇相似^[35],加之 Se 与 Te 不同,属强亲铜元素,故 Se 易取代硫化物中的 S 而不易形成硒化物。这就导致了自然界中硒的独立矿物远少于硫化物和碲化物。迄今为止,文献中所报道的有硒化物产出的金矿床,多是一些与陆相火山作用有密切联系的,并有大量碲化物和银的硒化物产出的浅成热液金-银矿床。然而,寒武系层控金矿床,既与陆相火山作用无关,又无银的异常和碲矿物产出,而其中却存在大量硒的独立矿物和含硒矿物,甚至存在硒的矿化富集体,表明矿床形成时具有特殊的成矿环境,这已为金矿床的物理化学条件研究所证实。即富 Se、Au 成矿流体处于中低温(142~269℃)、低压(11~30 MPa)条件。成矿流体中的 Au 以 S-Se-Au 络合物进行迁移。在成矿早期, f_{O_2} 、 f_{Se_2} 相对较低, f_{S_2} 较高,且 $f_{\text{Se}_2}/f_{\text{S}_2} < 1$,有利于硫化物的沉淀。在此情况

下,成矿流体中 Se 的沉淀不能有效地与 S 发生分离,因而形成的多是一些含硒硫化物。在成矿主阶段,随着硫化物的沉淀, f_{Se_2}/f_{S_2} 相应地增大,且 f_{O_2} 较高。高的 f_{O_2} 阻止了 Se 进入硫化物,而有利于硒化物的形成,特别是当 S 被氧化成为硫酸根离子后,更有利于 Se 与 S 发生有效分离,导致大量硒矿物的形成。因此,寒武系层控金矿床中 Au、Se 的共同富集必须具备以下两个条件:(1) 具有丰富的 Au、Se 来源;(2) 具有相对氧化的环境。

Au 与 Se 能共生在一起,这是否意味着 Se 元素可以作为层控金矿床的指示元素呢? 目前人们已经提出了多种元素作为热液金矿床的指示元素,这些元素包括 Sb、As、Cd、Tl、Mn、Hg、Ba 和 B 以及卤族元素等^[44,45]。作者对有关金矿床研究后也提出了 Se 元素可作为层控金矿床的指示元素之一^[46]。

综上所述,西秦岭降扎地区寒武系金矿床中 Se 的高度富集,不仅动摇了“分散元素不能成矿”的传统观念,展示出一种 Au-Se 共生矿化的新类型,而且为我国对分散元素富集成矿,把 Se 富集必备的条件与金矿成因有机联系起来,开展 Se 的示踪作用、Au 与 Se 的共生机制以及 Se 在金成矿过程中所起的作用等方面的研究,也颇具理论价值、学术意义和实际意义。

在室内外研究中,四川省地质矿产局川西北地质大队毛裕年、彭达全、文锦明高级工程师以及核工业部北京地质研究院周德安研究员提供了大量的分析资料,在此深表谢意。

参考文献:

- [1] Shimizu T, Matsueda H, Ishiyama O, *et al.* Genesis of epithermal Au-Ag mineralization of the Koryu Mine, Hokkaido, Japan [J]. *Econ Geol*, 1998, 93: 303 ~ 325.
- [2] Mukaiyama H, Izawa E. The gold-silver ores from the Kushikino mine, Kagoshima prefecture, Japan, with special reference to occurrence of naumannite [J]. *Min Geol*, 1964, 14: 191 ~ 199 (in Japanese with English abstract).
- [3] Izawa E, Urashima Y, Ibaraki K, *et al.* The Hishikari gold deposit: High grade epithermal veins in Quaternary volcanics of southern Kyushu, Japan [J]. *J Geochem Explor*, 1990, 36: 1 ~ 56.
- [4] Shikazono N, Nakata M, Shimizu M. Geochemical, mineralogical and geologic characteristics of Se- and Te-bearing epithermal gold deposits in Japan [J]. *Min Geol*, 1990, 40(5): 337 ~ 352.
- [5] Saunders J A, Utterback W C, Day W C, *et al.* Characteristics of bonanza epithermal gold mineralization at the Sleeper deposit, Nevada, USA [J]. *Geol Soc Aust Ext Abs*, 1988, 23: 368 ~ 388.
- [6] Saunders J A. Supergene oxidation of bonanza Au-Ag veins at the Sleeper deposit, Nevada: Implications for hydrogeochemical exploration in the Great Basin [J]. *J Geochem Explor*, 1993, 47: 359 ~ 375.
- [7] Hewitt W P. Western Utah, eastern and central Nevada [A]. Ridge J D. *Ore Deposits of the United States, 1933 ~ 1967 (Graton-Sales vol)* [C]. New York: Am Inst Min Metallurg Petroleum Eng, 1968. 857 ~ 885.
- [8] Petruk W, Owens D R, Stewart J M, *et al.* Observations on acanthite, aguilante and naumannite [J]. *Can Mineral*, 1974, 12: 365 ~ 369.
- [9] Ramulohr P. *The Ore Minerals and Their Intergrowths* [M]. 2nd ed. Berlin: Pergamon Press, 1980. 1 207p.
- [10] Full R P, Grantham R M. Ore deposits of the Republic mining district, Ferry County, Washington [A]. Ridge J D. *Ore Deposits of the United States, 1933 ~ 1967 (Graton-Sales vol)* [C]. New York: Am Inst Min Metallurg Petroleum Eng, 1968. 1 481 ~ 1 495.
- [11] Paar W H, Roberts A C, Criddle A J, *et al.* A new mineral, chrisstanleyite, Ag₂PdSe, from Hopes's Nose, Torquay, Devon, England [J]. *Mineral Mag*, 1998, 62(2): 257 ~ 264.
- [12] Ramsay W R H, Kobe H W. Great Barrier Island silver-gold deposit, Hauraki Province, New Zealand [J]. *Mineral Deposit*, 1974, 9: 143 ~ 153.
- [13] Mann J V, Rodgers K A, Kobe H W, *et al.* Aguilante from Camoola reef, Maratoto Valley, New Zealand [J]. *Mineral Mag*, 1972, 38: 961 ~ 964.
- [14] Kieft C, Oen I S. Ore minerals in the telluride-bearing gold-silver ores of Sabda, Indonesia, with special reference to the distribution of selenium [J]. *Mineral Deposit*, 1973, 8: 312 ~ 320.
- [15] Sindeeva N D. *Mineralogy and types of deposits of selenium and tellurium* [M]. New York: Interscience Publishers, 1964. 363p.
- [16] Petruk W, Owens D R. Some mineralogical characteristics of the silver deposits in the Guanajuato mining district, Mexico [J]. *Econ Geol*, 1974, 69: 1 078 ~ 1 086.
- [17] Paniuga A. Selenium in copper-rich disulfides of the Providencia mine, Leon, Spain [J]. *Neues Jahrbuch Mineral Abh*, 1995, 169: 291 ~ 295.
- [18] So C S, Dunchenko V Y, Yun S T, *et al.* Te- and Se-bearing epithermal Au-Ag Mineralization, Pradolovskoye, Kunashir island Kuril island arc [J]. *Econ Geol*, 1995, 90(1): 105 ~ 117.
- [19] Некрасов И Я, Лукин С Е. Условия образования сульфидов, селенидов и сульф-селенидов серебра системы Ag-Sb-S-Se (По экспериментальным данным) [J]. *Минералогический Журнал*, 1987, 9(1): 25 ~ 39.
- [20] 刘家军, 郑明华, 卢文全. 硒锑矿——下再仅是人工合成矿物[J]. *科学通报*, 1992, 37(15): 1 438 ~ 1 439.
- [21] 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(19): 864.
- [22] 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): 1 726 ~ 1 727.
- [23] 刘家军, 郑明华, 刘建明, 等. 一种尚未定名称的 Ni-Au-S-Se 矿物相[J]. *矿物学报*, 1995, 15(4): 425 ~ 427.
- [24] 刘家军, 郑明华, 刘建明, 等. 邱莫金矿床中的灰硒汞矿[J].

- 成都理工学院学报, 1996, 23(12): 21~28.
- [25] 刘家军, 刘建明, 卢文全, 等. 邛莫金矿床中硒-辉锑矿的特征及成因意义[J]. 矿物学报, 1998, 18(4): 445~451
- [26] Liu Jiajun, Liu Jianming, Lu Congqiang, *et al.* Mineralogy of the stibnite-antimonelite series [J]. *Int Geol Rev.* 1999, 41(J1): 1 042~1 050.
- [27] 刘家军, 郑明华. 拉尔玛层控金矿床中硒富集体的发现及其意义[J]. 地球科学进展, 1993, 8(16): 89.
- [28] 刘家军, 郑明华, 刘建明, 等. 西秦岭寒武系层控金矿床中硒的矿化富集及其找矿前景[J]. 地质学报, 1997, 71(3): 266~273.
- [29] 刘家军, 郑明华, 周德安, 等. 拉尔玛金成矿带成矿流体氢氧同位素组成及其演化[J]. 长春科技大学学报, 1998, 28(1): 43~49.
- [30] 刘家军, 郑明华, 刘建明, 等. 西秦岭寒武系硅岩建造中金矿床成矿物质来源研究[J]. 矿床地质, 1997, 16(4): 330~339
- [31] 郑明华, 周渝峰, 刘建明, 等. 喷流型与浊流型层控金矿床[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994. 146~170.
- [32] 刘家军, 郑明华. 微细浸染型金矿床中铂族元素富集体和(含)硒辉锑矿矿物的发现及其找矿意义[J]. 地球科学进展, 1992, 7(6): 93.
- [33] 刘家军, 刘建明, 郑明华, 等. 西秦岭寒武系金矿床中硒的富集及其意义[J]. 黄金科学技术, 1998, 6(1): 24~25.
- [34] 刘家军, 刘建明, 周德安, 等. 西秦岭隆扎地区金、铂矿床成矿年代学研究[J]. 地质科学, 1998, 33(3): 300~309.
- [35] 刘英俊, 曹励明, 王鹤年, 等. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社, 1987. 244~257.
- [36] Cotton F A, Wilkinson G. *Advanced Inorganic Chemistry* (5 ed) [M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1988: 491~543.
- [37] Dyacbkova I B, Khodakovskiy I L. Thermodynamic equilibrium in the systems S-H₂O, Se-H₂O, and Te-H₂O in the 25~300 °C temperature range and their geochemical interpretations [J]. *Geochem Int.* 1968, 5: 1 108~1 125.
- [38] Yamamoto M. Relationship between Se/S and sulfur isotope ratio of hydrothermal sulfide minerals [J]. *Mineral Deposits.* 1976, 11: 197~209.
- [39] 刘家军, 郑明华, 刘建明, 等. 拉尔玛-邛莫金矿床的地质特征及成矿模式[J]. 贵金属地质, 1997, 16(4): 241~254.
- [40] Spycher N F, Reed M H. Evolution of a broadbands-type epithermal ore fluid along alternative *p-T* paths [J]. *Econ Geol.* 1989, 84: 328~359.
- [41] Cooke D R. Numerical models of mineral deposition for the Acupan vein system, Philippines [A]. Kharada Y K, Maest A S. *Water-rock Interaction* [C]. Rotterdam: Balkem, 1992 1 579~1 582.
- [42] Simon G, Essene E J. Phase relation among selenides, sulfides, tellurides, and oxides. I. Thermodynamic data and calculated equilibria [J]. *Econ Geol.* 1996, 91: 1 183~1 208
- [43] Simon G, Kesler S E, Essene E J. Phase relation among selenides, sulfides, tellurides, and oxides. II. Application to selenide-bearing ore deposits [J]. *Econ Geol.* 1997, 92: 468~484.
- [44] Brookins G. Geochemical behavior of stibium, arsenic, cadmium and thallium [J]. *Chem Geol.* 1986, 54: 271~278
- [45] Watreu H V. Thallium, a biogeochemical prospecting tool for gold [J]. *J Geochem Explor.* 1986, 26: 215~221.
- [46] 刘家军, 郑明华. 硒——微细浸染型金矿床的一个重要指示元素[J]. 地质与勘探, 1994, 30(6): 19~22

Mechanism of Au and Se co-enrichment in Cambrian Stratabound Gold Deposits in Jiangzha, Western Qinling Mountains, China

LIU Jia-jun¹, ZHENG Ming-hua², LIU Jian-ming³, LU Wen-quan⁴, LIU Xian-fan²

(1. *Open Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; State Key Laboratory of Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China.* 2. *Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;* 3. *The Research Center of Mineral Resources Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;* 4. *Institute of Complex Utilization of Mineral Resources, Ministry of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610041, China.*)

Abstract: The Cambrian stratabound gold deposits in Jiangzha, western Qinling Mountains are hosted in the silicalite formation composed of black chert and carbonaceous slate. Studies have shown that Se is so high in abundance either in wall rocks or in gold ores as to reach the grade of industrial value for comprehensive utilization. In local places some independent Se orebodies can even be delineated. In gold ores Se is present mainly as independent minerals, or isomorphously in sulfides. In addition, Se is closely positively correlated with Au. What is more important is that in the gold ores native gold is commonly observed ultimately intergrowing with some selenium minerals. On the basis of this unique phenomenon, it is thought that gold and selenium are possibly transported by Au-S-Se or Au-Se complex. The co-enrichment of Au and Se is attributed mainly to boiling of ore fluids and their mixing with shallow-seated oxygen-bearing water.

Key words: stratabound gold deposit; Au-Se co-enrichment mechanism; Jiangzha; western Qinling Mountains