

金同铅锌矿化的分离及共生^①

汪东波^②

(北京矿产地质研究所, 北京, 100012)

摘要 金矿化同铅锌矿化存在独特的关系。在块状硫化物矿床和现代洋底硫化物堆积物中金和贱金属的富集程度基本上是相同的, 而脉状金矿床中, 在富集了大约 $10^3 \sim 10^4$ 的金的同时仅轻度富集或实际上贫化($10^1 \sim 10^{-1}$) 贱金属铅锌; 此外, 人们还发现在特定的地质构造背景中, 金矿床和铅锌矿床相伴产出, 在勘查过程中两类矿床可以互为标志。造成金同铅锌共生和分离的原因是成矿流体的化学成分和流体流动循环方式, 在较低温度、高水岩比、Cl 络合物为主的体系中金与铅锌相伴富集, 高温、高热梯度、低水岩比、低卤化物浓度下的流体在迁移金的同时不利于铅锌的转移。

关键词 金, 铅锌, 矿床, 共生, 分离

金的地球化学性质决定了它同硫化物的密切内在联系, 因此, 自然界中金与铜、铅、锌硫化物相伴产出并不鲜见。金与铜的紧密共生关系是十分明显的, 比如, 金经常以共伴生组份出现在块状硫化物型铜矿床中, 且金往往与铜矿体一起出现, 而在铅锌矿体中金与铅锌矿体共生关系不是十分密切。在铜镍硫化物矿床中, 金及铂组元素常以共伴生形式出现; 此外, 金还常常与铜一起形成重要的 Au-Cu 矿床, 这已被众多探明的斑岩铜金矿床(环太平洋成矿带的内带)所证实, 对于这一规律, 几乎不存在太多争议。但是, 金同铅锌矿化间的潜在关系尚没有得到足够的重视。近几年来, Au 与 Pb、Zn 矿床在特定的地质背景条件下的共生、分离关系已渐渐引起矿床地质学家的关注, 这一问题的探讨及解决不仅有助于对脉金矿床成矿机制的理解, 而且还可能极大地推进金矿勘查的进展。随着近年来金矿科研、勘查工作的深入, 人们发现在金和铅锌矿化间存在如下基本规律: 1. 从全球范围内看, 金矿床同铅锌矿床的主要矿化期存在明显的差异。金矿化主要集中在晚太古宙、晚古生代和中新生代, 而铅锌矿化则主要集中在中元古代和晚古生代。从成矿的大地构造背景看, 金矿床的形成主要同汇聚板块的俯冲、加积、造山作用有关, 形成于挤压(造山期)及挤压后期(后造山期)的应力松弛状态下。而铅锌矿床的形成则主要同非造山的拉张、伸展运动有关, 因此大多数铅锌矿床均产在具张裂性质的裂谷及弧后盆地之中。2. 越来越多的资料及研究证明在太古宙绿岩带块状贱金属硫化物矿床中共伴

① 收稿日期 1998-08-17 审回日期 1998-10-08

② 汪东波, 男, 1962年生。博士, 教授级高级工程师, 主要从事矿床地球化学和区域地球化学研究。

生的金与贱金属的富集程度基本上是相同的。但是在太古宙绿岩带中产出的脉金矿床中却出现了明显的金同贱金属(Cu, Pb, Zn)的矿化分离作用。太古宙绿岩带中的脉状金矿床中富集了大约 $10^3 \sim 10^4$ 的Au, Ag, Pd, W, B, As, Sb的同时,仅轻度富集或实际上贫化了 $10^1 \sim 10^{-1}$ 的贱金属(Cu, Pb, Zn)^[4],造成这一现象的原因已引起地球化学家的关注。除太古宙绿岩带中的脉金矿床具有这一现象外,年轻的脉状金矿床中金同贱金属的分离(如卡林型金矿床、产于浊积岩中的脉状金矿床)也引起了不少人的注意。3.对现代洋底沉积物及喷出的流体的化学成分详细分析表明,金同铅锌的分离可能同沉积喷流的成分及沉积喷流成矿历史的差异有关。为了说明此类现象,R. W. Hutchison(1990)列举了位于东北太平洋戈达洋脊附近的两个热液喷口的例子,其中一个主要是喷出含氯化物—贱金属的流体,另一个主要喷出物为含二硫化物的金的流体,这为解释金同铅锌矿化分离提供了最为直接可靠的证据。4.近十年来,在国内金矿勘查过程中,人们发现了众多大中型金矿床和铅锌矿床分布在同一地质单元之内,在形成时代相近的地质体中相伴产出,但两者又相互分离的地质事实。例如,在南秦岭造山带的铅锌找矿于70~80年代获得重大突破后,人们又在该带的上部层位中发现了众多大中型的独立金矿床。在辽宁青城子矿田,在原铅锌矿床的外围上部层位中,继银矿找矿突破后,又发现了大型的金矿床。在新疆阿尔泰褶皱系中,在泥盆系贱金属矿带中,在不断取得Cu, Pb, Zn找矿进展的同时,也发现了金矿化的重要线索。这种金矿床同铅锌矿床在空间上相伴产出,在时间上先后矿化,在赋矿层位上有一定联系的分布规律同通常意义上的分带是完全不同的。这一规律目前在国外鲜见报道,是十分独特的。比如,在美国内华达卡林型矿带中缺乏贱金属矿化,在中国的“滇黔桂”金三角亦没有发现金同铅锌矿化的这类时空对应关系。金同铅锌矿化的这种时空分布关系仅仅是在秦岭、青城子、阿尔泰地区的一种巧合,还是存在一定的内在联系,这种联系能否被用作勘查准则,是矿产勘查专家最感兴趣的。如果这一规律具有普遍性,将会引起对铅锌矿田找金潜力的重新评价。下面笔者主要就金同铅锌矿化的分离及起因进行讨论。

1 金同铅锌(铜)矿化的分离

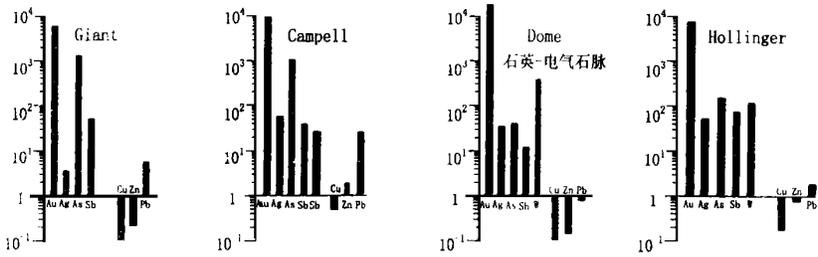
R. Kerrich(1981)和W. S. Fyfe and R. Kerrich(1984)^[4]业已发现并证实太古宙绿岩带中的脉金和沉积型金矿床相对于背景丰度来说高度富集了稀有金属(Au, Ag, Pd, Sb, W, Se, B),仅轻微富集或实际上贫化了贱金属(Pb, Zn, Cu)。但是,绿岩带中的块状硫化物矿床中贵金属和贱金属富集程度则相近。图1给出了12个太古宙脉金矿床的有关元素的富集系数,该系数是由矿床中元素的平均含量除以区域背景值而获得的。从图1可以看出,背景丰度极低的Au, Ag, As, Sb, W同丰富的过渡族元素Cu, Pb, Zn的分离是十分明显的。在Yellowknife矿田的Con和Giant矿床,金和铜的富集系数分别为10 000和0.1,两元素富集程度的差异高达100 000倍。这一基本特征重复出现在赋矿围岩和构造背景(structural environment)变化很大的矿床中,以化学沉积岩为例,可以是燧石(硅质岩)、碳酸盐、硫化物和硅酸盐含铁建造。W. S. Fyfe和R. Kerrich(1984)^[4]还对所选的18个矿床的30个独立矿体中的20余个元素的变化

趋势进行了研究, 结果表明: W, As, Sb, B 通常伴随 Au 出现并经历了高度的富集, 虽然 Te, Se, Bi 在太古宙绿岩带金矿床中的资料不太系统, 但根据有限的例子(Kirkland Lake 金矿床) 和含 Te, Se, Bi 的矿物的出现说明它们也是可以发生高度富集的, Mo, Sn, Cd, Th 的含量同背景值没有太大的差异。此外, 他们还挑选了 20 个铜锌块状贱金属硫化物矿体, 来研究元素的富集、分布规律。其中大多数矿床为产于绿岩带中的矿床, 个别例子来自元古宙矿床。研究表明: Au, Ag, Cu, Zn 相对富集模式极其一致, 相对于背景值富集了 200~2 000 倍, 在元素富集过程中, 没有发生大的分离(图 2)。这一相对富集模式在年轻的块状硫化物矿床中同样出现, 比如 Iberian 黄铁矿带(Strauss et al, 1977, Franklin et al, 1981)。

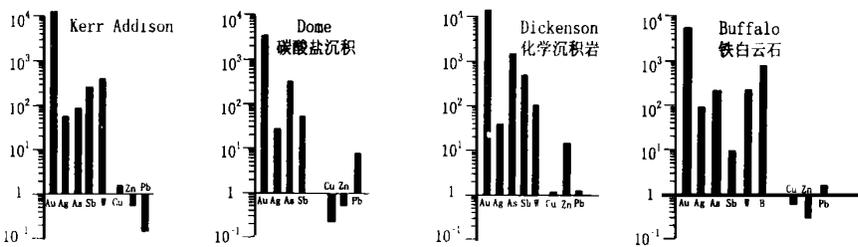
很明显, 在脉金矿床中, 在稀有元素(Au ..) 和丰富的可溶的贱金属元素间存在着极度分离。相反, 块状贱金属硫化物矿床中 Au 同 Cu, Zn 没有发生明显的分离(图 2)。从贫金的块状硫化物矿床(Manitoba 地区, Flin Flon 矿床) 到富金的块状硫化物矿床(Noranda 地区的 Que-mon 和 Horne 矿床) 均保持这一统一的规律。当然, 大多数太古宙贱金属块状硫化物矿床的金绝对含量均显著低于脉金矿床。

为查明块状硫化物矿床中金与铜、铅、锌的共同富集及脉状金矿床中金同贱金属的分离原因, 必须从成矿流体的化学组成、流体对元素的萃取、淋滤和搬运机制的研究入手。很显然矿床的形成要求: a. 大量的具有高度的渗透性和微孔隙的岩石, b. 大量的流体, c. (流体) 排放的聚焦(集) 机制。流体流动循环所涉及到的最著名的环境之一是大洋中脊附近, 此处大量的海水使热的破裂的岩石冷却, 破裂是由岩浆的冷却引起的。这种环境最适宜于块状硫化物 Cu, Zn, Fe 矿床的形成, 同时伴随有一定程度的 Au, Ag 和某些稀有元素的富集, 但却极少形成矿石级的原生金矿床, 此种环境下缺乏大规模的石英脉, 在此环境下, 岩石的蚀变显示出高度的可变性。控制流体循环路径和由此而引起的蚀变的破裂的渗透性, 当其允许有效的热萃取时, 并不适合诸如金一样的稀有金属的广泛的淋滤。进一步说, 金属的淋滤在裂隙边界进行的同时, 边界处的火成玻璃经历了脱玻化作用, 大量的诸如斜长石的火成岩相转化为钠长石, 沿裂隙暴露于热液中的岩石的体积很可能只是全部岩石的一部分。另一个大量流体被转移的过程是进变质脱气作用(prograde metamorphic degassing)。在进变质作用过程中, 在全部主要的相边界处, 大量的流体从“反应”矿物中释放出来, 在这一环境下, 如果流体具有适宜于形成络离子的组份, 某些元素的高度有效萃取能够发生。值得注意的是, 在岩石堆积成岩时, 捕获在空隙内的水的盐度大致同海水相同, 当在低温条件下埋藏时, 由于渐进埋藏时部分水因同无水矿物的反应而消耗, 导致盐度的升高; 此后, 在高温条件下, 当捕获的流体因矿物脱水而被排出时, 流体的盐度又降低。所以转移金的流体具有低盐度、高 CO_2 、 $\text{K} > \text{Na}$ 的特征, 相反形成贱金属块状硫化物的流体具有低 CO_2 、 $\text{Na} > \text{K}$ 和高盐度的特征。上述认识已被大量的矿床流体包裹体地球化学研究所证实。在变质脱水过程中, 当水岩比较低, 且卤素的活度受限于较低的地壳丰度($\text{Cl}, 60 \times 10^{-6}$) 时, 脉金矿床中稀有元素同贱金属的分离似乎可以发生。上述两个因素可限制丰富的贱金属元素进入溶液, 但金等含量甚低的元素的溶解度并不受有限流体的限制。现代海底喷流沉积作用的观察表明, 在较低温度、高水岩比、Cl 络合物为主的体系中金可以伴随 Cu, Zn, Pb 富集, 但是, 高温、高热梯度、低水岩比、低卤化物浓度下的变质脱气是最为主要的导致金矿床形成的地质作用过程。

基性-超基性环境下的脉状体系



基性-超基性环境下的化学沉积岩



长英质侵入-喷出环境下的脉和化学沉积物

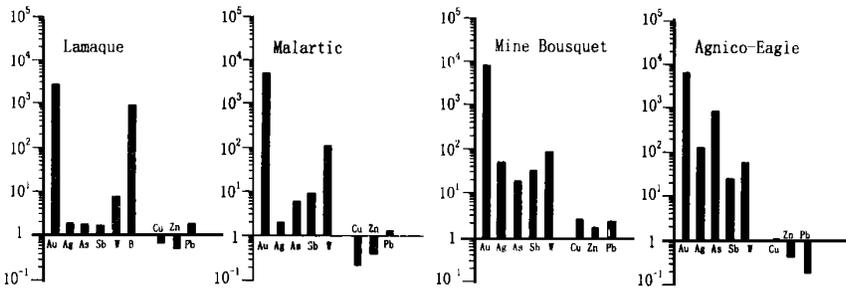


图1 太古宙脉状金矿床中某些元素相对于玄武岩的背景丰度的富集系数^[4]

(纵坐标为相对于背景的富集系数, 对数坐标)

Fig.1 Enrichments of selected elements in Archaean lode gold deposits, referenced to background abundances in basalts (Note logarithmic co-ordinate)^[4]

S. A. Wood(1987)^[3] 为探讨引起太古宙绿岩带中的贱金属矿化同金矿化分离的机理, 设计了用于测定 200~ 350 °C条件下, NaCl+CO₂ 水溶液中黄铁矿+ 磁黄铁矿+ 磁铁矿+ 闪锌矿+ 方铅矿+ 金+ 辉银矿+ 辉梯矿+ 辉钼矿的同步溶解度实验。溶解度是在 NaCl 浓度从 0.0 ~ 5.0 mol, CO₂ 压力从 10⁵ Pa 到几百 x10⁵ Pa 的水溶液中测定的。黄铁矿+ 磁黄铁矿+ 磁铁矿组合用于缓冲氧逸度和硫逸度及溶解的 H₂S 的活度。实验结果表明, 盐度上的差异是引起

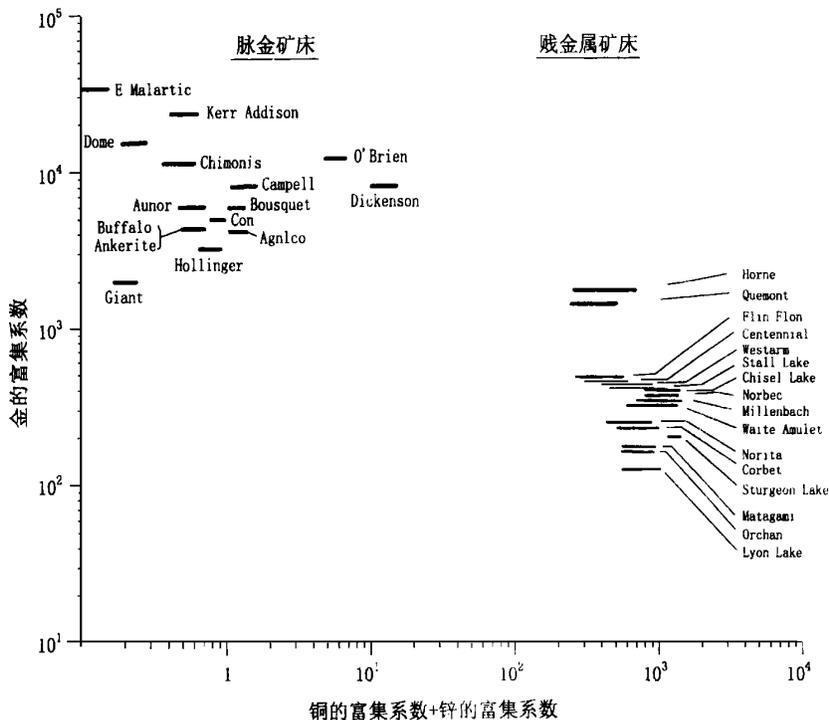


图 2 脉状金矿床和块状硫化物矿床中金的富集系数对应于铜的富集系数加上锌的富集系数。所有富集系数均是相对于原生未蚀变火成岩的背景丰度计算出的。水平线段的范围反映了用镁铁质岩和长英质火成岩的背景值计算出的富集系数(对数坐标)^[4]

Fig. 2 Enrichment of Au versus the enrichment of Cu plus the enrichment of Zn, for lode gold and base metal massive sulfide deposits. All enrichments are calculated based on background abundances in primary unaltered igneous rocks. The horizontal spread reflects enrichments logarithmic coefficient computed utilizing background values for both mafic and felsic igneous rocks.^[4]

太古宙矿床中金和贱金属分离的主要因素。在 0.0~ 0.5 mol NaCl 溶液中的实验获得的金的溶解度为 5~ 500x 10⁻⁹, 可能只有低盐度的溶液(接近 0.5 mol 或更低)才能几乎完全萃取源岩中的金, 然后足以饱和并允许在沉淀场所有效的沉淀, 而且正是在接近 0.5 mol NaCl 溶液中获得最低贱金属对金的比值。在 200~ 300 °C 和 pH 为 4~ 6 时, 仅仅是 NaCl 浓度高于大约 1.0 mol(w (NaCl) wt%) 的溶液能够转移足够的贱金属而形成具有经济意义的块状硫化物矿床。这表明要么是具有高盐度、要么是低 pH 值的那些通常推断的形成块状硫化物的溶液可能是迁移贱金属所必要的。R. P. Ilchik 和 N. D. Barton(1997)^[6] 为验证其所提出的卡林型金矿床的非岩浆模式, 设计了分两步进行的实验用以揭示流体-岩石相互作用和质量的搬运。首先在 300 °C 和 10⁵ Pa 条件下使具有固定 ΣCl 的流体与各种潜在源岩(长石砂岩、杂砂岩和泥质岩, 各种源岩具有不同的 f_{o2} 和 f_{s2} 缓冲组合)达到平衡, 用以模拟在深度可能接近脆性至

韧性转变点的部位所发生的反应。然后在形成矿床所必要的条件(225~150 °C, 0.5×10^5 Pa)下使这些流体再平衡,借以调查包括冷却、围岩反应和混合在内的,可能对矿石沉淀是重要的作用过程。实验表明:有利于搬运金的是来自含硫化物的、氯含量低的、中等氧化状态(低于磁黄铁矿、黄铁矿、磁铁矿组合)的弱酸性流体(即与长石砂岩达到平衡)。这些条件不利于贱金属搬运(贱金属以氯的络合物形式搬运),可以用来解释为什么在卡林型金矿成矿体系中贱金属罕见的原因。

2 金与铅锌矿化的时空分布规律

前已述及,近十年来,在金矿勘查过程中,人们在原铅锌矿带(田)内发现了一批金矿床,这些金矿床同铅锌矿床在空间上(同一大地构造单元内)相伴产出,在时间上先后矿化,在赋矿层位上有一定联系的分层矿化(目前所发现的基本上均是上金下铅锌),同通常意义上的分带截然不同。例如秦岭造山带南秦岭亚带是我国著名的铅锌多金属矿带,70~80年代在本区评价出一批铅锌矿床,其中石坝-李家沟铅锌矿床达超大型规模,此外还发现邓家山、毕家山、洛坝(西成矿田)、铅碛山、八方山-二里河、银母寺、银洞梁(凤太矿田)、锡铜沟(镇甸矿田)、银洞子(柞山矿田)等大中型矿床。80年代末至今,又在该带及邻区发现八挂庙、双王、李坝、金山、三华咀、三羊坝、小东沟等一系列大、中、小型金矿床。以往总是把金矿床和铅锌矿床的成矿作用单独研究,随着工作和资料的积累,研究程度的深入,发现两种矿化具有某种内在联系。除已知八方山、银洞梁等铅锌矿床中伴(共)生有金矿体外,还发现了独立金矿床同铅锌矿床的成生与分布关系^[2]。如在凤太矿田,铅锌矿床均产在中泥盆统古道岭组(D_2g)灰岩和硅质岩中,在铅锌矿体下部的铜矿体中伴生金,而金矿床毫无例外地产生在上泥盆统海相细碎屑岩及热水沉积岩中(浊积岩、千枚岩、板岩和钠长角砾岩)。在西成矿田,铅锌矿体均定位于中泥盆统西汉水组(D_2x)大理岩中,而铅锌矿化的上部层位安家岔组(D_{2+3a})的细碎屑岩(浊积岩)是金矿床的赋矿部位。如在西成矿田之三华嘴金矿床,铅锌矿床位于紧闭背斜的核部,铅锌矿床产在灰岩与薄层灰岩的界面上,金矿床产在背斜的两翼,与核部铅锌矿体的对应关系明显。在辽东早元古代裂谷中所发现的青城子铅锌矿,继80年代未发现银矿后,又在上部层位中发现了小佟家堡子等大、中型金矿床。该区铅锌矿床赋存在元古宇浪子山组(Pt_{1l})斜长角闪岩夹透闪变粒岩中,大石桥组第一段(Pt_{1d1})方解石大理岩夹变粒岩中;大石桥组第二、三段(Pt_{1d2} , Pt_{1d3})之石榴石片岩、夕线石片岩夹大理岩,大理岩夹薄层片岩为金银的赋矿层位,也表现为明显的上金下铅锌的特征。经原岩恢复,同铅锌有关的下部赋矿地层主要为碳酸盐和含凝灰质的碎屑岩,而上部层位(金的赋矿层位)主要为不纯碳酸盐、含泥质成分较高的灰岩和细碎屑岩^[1]。在新疆阿尔泰地区,在原科科塔勒铅锌矿床的外围的中上泥盆统中,在原铅锌矿体的外围及上部也发现了金矿床。从上述三地区金矿床与铅锌矿床的产出特点看,两类矿床的分布地区是一致的,所处的沉积环境在没有发生明显变化(间断)的情况下略有差异,可视作“同位”不同期

(阶段)产出的矿床。如果这一规律性的分布成立的话,则在今后找矿过程中,两类矿床的出现可以互为标志,并可能带动众多贱金属矿区的金矿勘查。对造成这一现象的机理目前尚不清楚,但造成上下分层的原因可能同形成金矿床和形成铅锌矿床的流体组份、元素的迁移形式及矿床的定位时间有关。经初步研究表明铅锌矿床的形成主要同海底沉积喷流作用有关,与铅锌成矿有关的流体喷流作用发生在生长断裂形成的早期,时代同沉积时代相同;此时,铅锌以卤化物为配体形成铅锌络合物迁移,在适宜的空间与含硫的物质(海水中的硫、喷流物中的硫、沉淀物中的硫等)发生反应,导致铅锌的沉淀;而金矿床的最终定位时间则明显滞后,属后生成因。在沉积喷流作用形成铅锌矿床的同时,由于流体的组份、盐度、循环方式的限制,金只有少量同铜、铅、锌共沉淀,大多数转移到后期低温的热液柱中^[5],并在沉积物中发生初始富集;在铅锌矿床形成后,由于流体中铅锌的活度降低,其中的硫可同金形成络合物,导致金的迁移,或在对应的沉积物中发生富集,在后期变质作用(可能还有岩浆热液的参加)的影响下,使金再富集,由此形成上述金同铅锌“同位”分层产出的现象。

参考文献

1. 刘君. 青城子矿田构造应变和变形结构及控矿作用. 走向地学新世纪——首届有色系统青年地质工作者学术讨论会文集, 北京: 冶金工业出版社, 1995, 263~ 267
2. 张复新. 秦岭浸染状金矿床与热水沉积铅锌矿床地质地球化学共生富集关系. 西北地质, 1996, 17(2): 13~ 17
3. Wood S A. 多相矿石矿物溶解度实验在太古宙绿岩带贱金属矿化同金矿化分离研究中的应用. 地质科学译丛, 1989, (2): 1~ 5
4. Fyfe W S and Kerrich R. Gold natural concentration processes. Gold 82, the geology, geochemistry and genesis of gold deposits, Ed. Foster R P. Rotterdam, Balkema: 1984, 99~ 128
5. Herzog P M and Hannington M D. Polymetallic massive sulfide at the modern seafloor: a review. Ore Geol. Rev. 1995, 10: 95~ 115
6. Ilchik R P, Barton M D. An amagmatic origin of Carlin-type gold deposits. Econ. geol., 1997, 92(3): 269~ 288

THE SEPARATION OF GOLD FROM LEAD-ZINC MINERALIZATION AND THEIR PARAGENESIS

Wang Dongbo

(Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing, 100012)

Abstract

There is a special relationship of gold mineralization to lead-zinc mineralization. Archaean lode gold deposits of both vein and sedimentary types are typically riched in Au, As, Sb, B, W, Se, Te and Bi in the 10^3 - 10^4 range, with low abundance of base metals Cu, Pb and Zn (10^{-1} - 10^1), and a

dramatic separation of the rare versus abundant elements relative to background levels. However, polymetallic massive sulfide deposits both on the modern seafloor and land have remarkably uniform enrichment of Au and Cu, Pb and Zn. The paragenous occurrence of Au and Pb, Zn deposits has been discovered in the special geological and structural environment. This paragenous relation can be used as prospecting criteria. Chemical composition and circulation ways of ore fluid resulted in the paragenesis and separation of gold and base metals. Gold may be somewhat enriched along with Cu, Zn, Pb at lower temperature, high water/rock, Cl⁻ complex-dominated systems, but the high temperature, high thermal gradient, low water/rock and low chloride ore-forming fluid is likely leading to gold deposits.

Key words gold, lead-zinc deposit, paragenesis, separation