

·学术讨论·

# 地球演化过程中金属矿产的形成

聂凤军 江思宏

(中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037)

**提 要**:通过对全球重要金属成矿区(带)的综合性分析对比研究,从古大陆成矿作用地球动力学角度入手,讨论了地球各圈层金属元素的起源和空间分布特点,探讨了地球不同演化阶段构造-岩浆活动与金属矿床成矿作用的耦合机理,揭示了成矿流体的来源、迁移路径和金属巨量堆积过程,阐述了前寒武纪和显生宙(古生代和中生代)时期重要金属矿床的形成环境、就位特点和保存规律,建立了综合性成矿模式并提出了相应的找矿模型。

**关键词**:地球演化;金属矿产;成矿流体;成矿作用;矿床成因

## 1 前 言

随着现代科学技术的迅猛发展和人类对地球演化过程认识水平的不断提高,目前,地质学家对金、银、铁、铜和锡等金属矿床的形成过程有了比较详细的了解,并且提出了各种各样的成矿学说和建立了一系列找矿勘查模型。尽管人们在金属矿床成矿物质源于何处和如何堆积成矿等方面仍存在较大意见分歧,但是大量野外地质调查和室内研究结果表明,所有金属矿产资源的形成作用均是地球形成与演化过程不可分割的一部分。

## 2 金属元素的起源与演化

尽管地球演化过程是由不同时间段构成的,但是地球各演化阶段金属元素总含量是不变的。一般来讲,除铀或钍可衰变成铅外,其它金属元素在地球中均已生存了46亿年之久。

大量研究结果表明,地球中的各种金属元素主要赋存在地球的内外部地质圈层内,外部圈层包括大气圈、生物圈和岩石圈(包括大洋和大陆板块赖以移动的软流圈),内部圈层主要由地核和地幔二部分组成,其中以外部圈层内生物与地质作用最为活跃,各种金属元素的分散与富集作用也最为明显。

尽管这些金属元素大都经历过多次搬运与再分配,多次分散与富集,但是它们本身并未遭受过任何破坏作用。地球内外地质圈层间或内部所发生的复杂物理和化学反应是造成金属元素分散与富集的主要地质营力。

美国华盛顿国家自然历史博物馆的布朗·玛森博士和澳大利亚国立大学阿尔弗雷德·林伍德教授认为,地球的原始物质组份与陨石相似,在地球形成与演化的早期阶段,体积大小不等的陨石块可通过缓慢的拼贴作用形成地球胚,随着地球胚体积的不断增大和重力的增加,陨石块体增生与拼贴的速率也将会大幅度增高。受上述拼贴作用的影响,地球在演化过程中将会分异形成若干不连续的同心壳层。大量的研究表明,地球各圈层金属元素丰度互不相同,各具特征。一般来讲,从地幔分离出的铁、镍、钴、金和铂族元素硫化物乳滴沉淀在地球中心部位,形成金属元素核,相比之下,镁、铝和钙等金属元素大都以硅酸盐矿物方式在地壳中产出。另外,最常见的成矿元素为铜和锌,最常见的与成矿作用有关的挥发性组份为硫和氯。从地球元素总体丰度来看,亲铁、亲硫和亲石元素之间并无明显差别。

众所皆知,成矿元素在地球中业已存在了几十亿年,它们无时无刻不在运动,并且可借助深源岩浆或幔源流体到达地壳浅部。成矿元素运移方式和卸载过程主要取决于成矿流体的物质组成以及所处的构造环境和围岩特性,它们要么发生富集作用并且成为可供开采的金属矿石,要么发生分散作用并且成为不具任何工业价值的含矿岩石。如若亲铜元素在上移过程中遇到硫,那么,这些成矿元素将会与硫结合,进而形成硫化物,并且发生沉淀与富集作用。就某种元素单个硫化物来讲,它与普通造岩矿物或副矿物在成矿元素浓度方面并无明显差别,但是它们的堆积体则与普通岩石具有极不相同的物理特性(如密度、磁力和放射性等)。地球物理学家可根据矿石与围岩的这种物性差异进行找矿勘查活动。

### 3 金属元素大规模运移的动力来源

金属元素从地幔到地壳、从流体到固体、从岩浆到热液、从分散到富集均需要巨大的地质营力,成矿作用强度与地质营力呈正相关关系。智利拉埃斯康迪亚斑岩铜矿床的矿石量大约为180亿吨,铜的平均品位为1.65%,为地壳中铜丰度平均值( $55 \times 10^{-6}$ )的300倍,矿山可采铜的价值约600亿英镑。究竟是什么样的地质营力能够造成如此大规模铜的富集,是地质学家一直在探讨的课题。部分研究者认为,地球演化早期阶段构造-岩浆活动可导致金属元素发生大规模的富集作用,并且形成具有工业价值的金属矿床。然而,也有学者提出,金属元素的运移与富集主要是通过各种后生地质作用(风化、剥蚀和变形改造)完成的。无论是同生成矿作用理论,还是后生成矿作用学说,它们均强调,一个长期稳定的构造环境对于矿床的保存至关重要,否则,地壳的局部抬升与强烈的变形作用将会使整个矿石堆积体(矿体或矿床)剥蚀殆尽,再次造成金属元素的分散。由此可见,详细研究金属矿床的风化剥蚀程度,对于找寻大型隐伏金属矿床具有重要指导性意义。

大量研究结果表明,自地球形成之日起,地幔和软流圈就无时不处在运动状态。在过去的2亿年中,大洋中脊扩张与裂解为大陆与大洋板块的碰撞-对接提供了动力来源,洋中脊岩浆活动所形成的大量火山岩可通过大洋板块运移至板块边缘俯冲带,并且在大陆壳之下发生消减作用。据统计,在大洋与大陆板块对接过程中,能够保存下来的洋壳部分仅为原有洋壳火山-沉积岩层体积的0.01%。美国斯坦福大学的科尔曼教授认为,除了上述0.01%洋壳物质外,原

始洋壳其余部分全部消失在地幔圈层内。大洋与大陆板块的裂解,碰撞和对接作用以及由此所诱发的局部构造-岩浆活动为金属矿石的巨量堆积提供了物质和动力来源。

## 4 含矿流体的运移过程

一个优秀的矿产资源科学家,除了要对矿体、矿床和矿集区的本身特点及构造环境有深刻的认识外,还应该对其所赋存的围岩岩相学、岩理学、矿物学和地球化学有一个全面的了解。一般来讲,地壳上部(或称浅部)的陆、海相火山-沉积岩被称为超壳岩,金属元素的大规模富集往往就发生在各种各样的超壳岩层内,并且在可采深度范围内形成大型或超大型金属矿床。为什么金属矿产大都产出在地壳浅部或近地表处,究其原因,大概有二点,其一,地壳表面(含地壳浅部)是大气圈、水圈与岩石圈的交接面,三套圈层间的各种物理和化学参数大都以突变为特征。例如,高温岩浆热液流体在上侵过程中,热梯度的急剧降低就会引起某些金属元素的大量沉淀,进而形成具有工业价值的金属矿床;其二,在地球深部的高温与高压条件下,各类岩石均以塑性变形,低渗透性和挤榨式蠕变变形为特征,与此相比,地壳浅部岩层的脆性断裂构造极为发育,为含矿热液的运移与储藏提供了有利的条件。

众所周知,岩浆热液、水蒸气、海水和地表水均有可能成为金属元素的“载体”,与“稠密”的岩浆相比,上述各种含矿流体在岩石圈与水圈中最为活跃,并且是盐、酸和碱的最佳溶剂。这些流体可对地壳中各类岩层中的金属元素进行最为有效的淋滤与萃取,从而极大地提高原始含矿流体的矿化浓度,最终沉淀形成金属矿石。一般来讲,大量的地表水或海水可以通过各种断裂向地壳深部渗透,并且与部分围岩发生强烈物理与化学反应,受此影响,含矿流体和围岩在化学组份和物理特性方面将会发生重要变化,例如,当某种氧化的酸性流体流经具还原特征围岩时,其与围岩所发生的强烈化学反应致使流体变为中性态或还原态。含矿流体物理-化学性质的改变将导致大量硫化物发生沉淀与富集。另外,在特定物理化学条件下含矿流体本身亦会发生分异或稀释作用,进而形成含矿流体相和非含矿流体相,例如,含矿蒸气和含矿浓集热卤水就是流体不同演化阶段的产物。

世界许多知名的学者认为,金属矿床实际上就是一些独特的火成岩、变质岩或沉积岩,其产出环境和类型在地球演化历史中同样存在重复、变化与消失。通过对金属矿产时、空分布特征的研究,我们同样可以获取地幔、地壳、水圈、大气圈和生物圈演化方面的信息,进而为建立地球演化事件序列表提供理论依据。

## 5 地球演化与金属成矿作用

地球均变论者认为,详细剖析全球范围内主要金属矿产的时、空分布特征,对于查明金属元素大规模富集的动力来源和运移机制极为重要。他们说,如果你粗略观看一下现今的全球金属矿山分布图,就不难得到这样的结论,即大型到特大型铜矿床无一例外地产出在较年轻的造山带内。与此相反,部分学者认为,随着地球从“幼年期”经“中年期”到“老年期”的演化,其所释放的能量将会逐渐减小,金属矿产形成的速率也将大大衰减。因此,目前我们所观察到的各种地质现象并非全部都能成为了解地球过去的“金钥匙”。他们认为,除了部分金属矿产(如铜)外,大部分金属矿山所处的地理位置与现代造山带并不一定吻合,也就是说许多金属矿床形成与现代造山作用并非存在特定的因果关系。因此,了解含矿流体的运移轨迹和金属矿石的形成

年龄比确定金属矿山空间分布特征更为重要,它们不仅有助于查明金属矿产的成因和演化历史,而且对于隐伏金属矿床的找矿勘查具有指导性意义。

### 5.1 25~30亿年前金属矿产

在地球演化过程中,金属元素的大规模成矿作用主要发生在下述五个时间段,即早太古代(38~30亿年),晚太古代(30~25亿年),早元古代(25~17亿年),中-晚元古代(17~7亿年)和显生宙(7亿年至今)。

众所周知,早太古代之前,地球曾遭受多次重大的地质灾变事件,其中以陨石雨对地球的撞击和薄层地壳拆沉于地幔最为特征。尽管对早太古代金属矿产成矿作用“轨迹”进行示踪是一件极其困难的工作,但是采用各种高新技术方法,我们还是可以对38亿年以来地球(尤其是地表)演化和变形历史有一概括性了解,对金属矿产的形成过程有一初步性的认识。在早太古代,强烈的火山喷溢作用可产生大体量的熔岩,这些熔岩不仅可以构成初始的洋壳,而且可将大量金属元素带到海底或地壳浅部,并且在局部地段形成矿胚。加热海水对熔岩

的淋滤与萃取,可导致局部地区海水中金属元素含量骤增,并且形成含矿热流体。随着含矿流体物理-化学条件和组份的改变,它们既可在狭长的海槽或海沟的沉积岩层内形成金属矿石,亦可在各类火山岩或侵入岩内部富集成矿。澳大利亚矿产资源的安德鲁·格里柯森博士认为,当海水流经破裂的镁铁质熔岩时,水-岩反应可改变熔岩的物质组份,并且形成一定量的

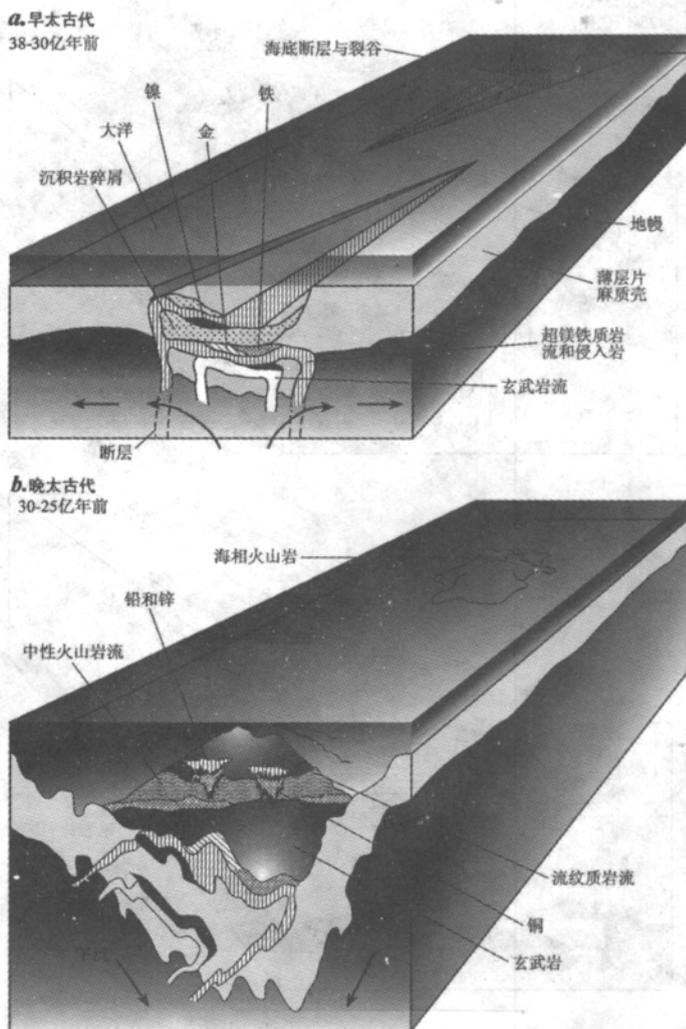


图 1-1 前寒武纪金属成矿作用示意图

- a. 早太古代: 镁铁质火山熔岩与海水的相互作用形成原生绿岩带。镍、铜、铁和金矿床大都在海底裂谷或裂陷槽内产出
- b. 晚太古代: 强烈的构造变动致使古陆块发生部分熔融作用, 并且形成再生绿岩带。海水与火山熔岩的相互作用可将大量金属元素(如锌和铜)从早期岩层中淋滤出来, 并且在再生绿岩带内形成一系列金属矿床

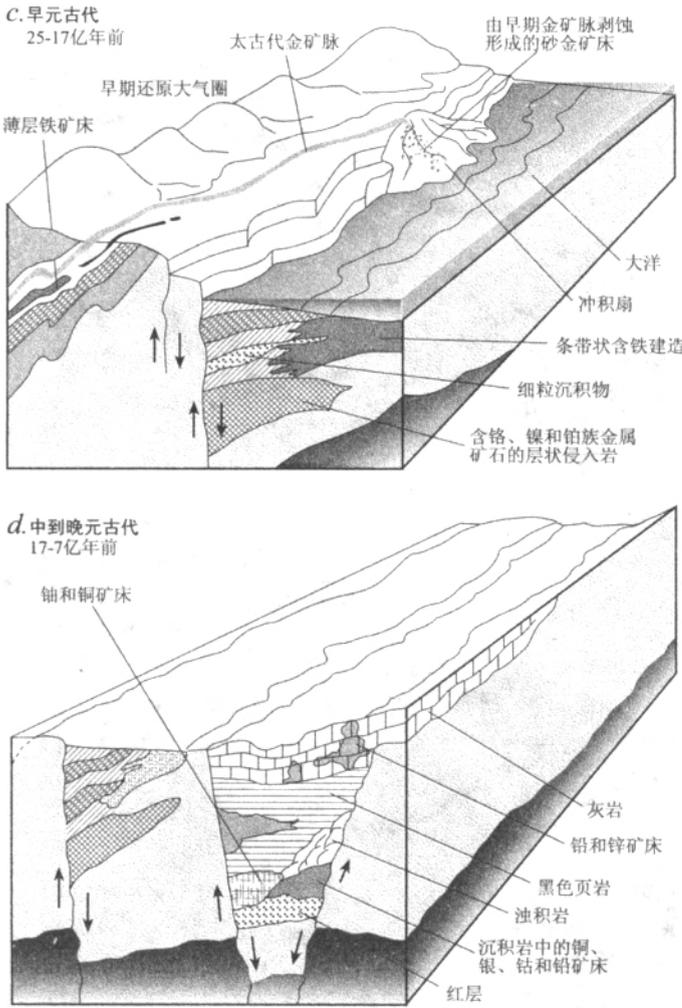


图 1-2 前寒武纪金属成矿作用示意图

c.早元古代:受抬升构造作用影响,早期形成的矿床(体)遭受到剥蚀与破坏,砂金矿床和条带状含铁建造分布广泛。另外,陆壳中的侵入岩与铬和铂族元素矿床具密切时空分布关系

d.中晚元古代:大气圈中氧逸度急剧增高,受其影响大量层状铜、铀、锌和铅矿床得以形成。另外,沉积盆地中,浓卤水与灰岩作用可形成铅和锌矿床

绿色次生矿物集合体,因此,他将此类岩石称为原生绿岩 (Primary greenstones)。

一般来讲,原生绿岩中产出的金属矿产以铜、镍和金为主。铜和镍硫化物矿床多在超镁铁质原生绿岩,特别是火山熔岩层的底部产生。在矿床形成过程中,海水与熔岩的物理-化学反应也会导致富铁沉积物的形成,典型的矿床实例为澳大利亚的卡姆巴达 (Kambalda) 和中国金川铜-镍矿集区。需要提及的是,在早太古代原生绿岩带内,亦产出有大量的富金沉积岩(如含金的燧石-碳酸盐-铁硫化物堆积体)(图 1-1a)。研究结果表明,这样的含金沉积岩层是海底火山喷气作用的产物,成岩期后的低级变质作用致使沉积岩层中的金发生活化、富集与再沉淀,最终形成大量的含金石英脉。加拿大阿比提比绿岩带,西澳大利亚伊尔岗地盾,印度科拉地台和中国华北古陆块中所赋存的大型或特大型金矿床即是很好的例证。

在晚太古代,持续的海相火山喷发活动导致超镁铁

质火山熔岩岩层厚度骤增,进而引起原生绿岩层的快速下沉。当原生绿岩层到达地壳一定深度时,受高温和高压变质作用影响,它们将会发生局部熔融,并且形成一定量的岩浆。如若这些再生岩浆在构造作用驱动下上侵定位,它们将叠加在早期火山-沉积岩层之上,并且构成较为复杂的构造-地层单元,玄武岩与流纹岩常常交替出现。需要指出的是,再生岩浆的喷发或侵位可诱发含矿热液体系的对流循环,热卤水对原有火山-沉积岩的淋滤与萃取可形成富锌和铜的流体,并且在海底火山喷口处或邻近地区沉淀形成块状锌-铜矿石(图 1-1b)。另外,在此类

矿床或矿体的底部往往存在有含铜硫化物网脉带,代表含矿热液体系供给通道。

## 5.2 7~25 亿年前的金属矿产

从演化角度看,地球在整个早元古代均处于一个超壳构造状态。大量野外地质调查结果表明,尽管古大陆边缘裂陷作用极为强烈,但是在其所形成的裂谷带内均很难查找到造山带火山活动的证据。早元古代金属矿床大都在古大陆裂谷内部或其旁侧的裂陷槽内产出(图1-2c)。

早元古代时期,太古代陆壳(或块)的抬升与风化剥蚀作用可导致大体积量沉积物的堆积。鉴于许多古陆块均赋存有金属矿床(体)或矿胚,那么各类冲、洪积物中自然也会含有某种(或几种)金属矿物或元素。由于许多重砂矿物的比重远高于普通造岩矿物,那么在规模大小不等的河床底部常常可找到它们的堆积体。砂金、砂铀和砂铂矿床即是很好的实例。在早元古代的砂金矿床中,人们常常可以观察到磨圆度极好的黄铁矿颗粒,这充分表明,早元古代大气圈的氧化程度要远低于今日之大气圈。此外,早元古代时期出现的大量条带状含铁建造(BIF)和铁矿床(如澳大利亚哈曼斯里和加拿大苏必利尔超大型铁矿床)也是早元古代地壳演化的最重要产物之一。

霍兰德和哈维乐德教授认为,大气圈中氧逸度的高低是衡量某种金属元素能否富集成矿的标志之一,以铁为例,当一种温度和氧逸度均较低的含铁海水与相对氧化的地表水相遇时,二价铁氧化物即会发生沉淀富集,并且有可能形成条带状含铁建造。野外地质调查结果表明,条带状含铁建造(BIF)的形成作用在18亿年处存在有一极为明显的“间断”,大气圈中氧逸度的骤然增高很可能是导致二价铁分散的主导因素。一般来讲,在高氧逸度条件下,含铁岩层的化学风化作用可造成铁的析离,铁质可以褐铁矿或磁铁矿形式附着在岩层露头上,此种铁质一般很难再次被带入河流或海洋,其富集成矿的机率也将会大幅度降低。需要提及的是,当铁在地球表面发生分散或富集的同时,大体积量的镁铁质熔浆侵位于巨厚的陆壳岩层中或在地壳深部构成规模巨大的岩浆房,岩浆与围岩的相互作用可导致一系列大型铬、铁、钛和铂族元素矿床的形成,南非布什维尔德、美国蒙他那斯特瓦特尔和中国攀枝花等大型铬、铁、钛和铂族元素矿床即是最好的实例。

在中晚元古代,大气圈的充氧效应致使许多金属元素(二价铁除外)活动性大大增加,含赤铁矿(红层)沉积层的出现标志着地球演化进入到了一个新的历史时期。在古大陆裂谷环境条件下,热液流体对富有机质沉积岩、富硫化物沉积物和富赤铁矿红层的淋滤与萃取作用将会形成富矿流体,并且在适宜构造条件下沉淀形成大型金属矿床(图1-2d)。研究结果表明,古大陆边缘干旱地区的强烈蒸发作用将会导致红层中的含矿流体向地表处运移,大量的铜和钴硫化物在红层与黑色页岩的接触带上发生沉淀富集,并且构成具工业价值的金属矿床(体),如赞比亚铜矿带。与铜相似,铀在近地表处活动性明显增大,含铀花岗岩的风化剥蚀作用可造成铀矿物在岩体风化壳或者邻近的粗碎屑岩层内发生再沉淀与富集,进而形成规模巨大的铀矿床。另外,在巨大沉积盆地的周缘地带,沉积物的压实作用可将含矿酸性卤水“排挤”到灰岩地层中,进而形成铅锌矿床,美国密西西比河流域的铅锌矿床即是通过上述成矿作用形成的。

## 5.3 7亿年至今的金属矿产

显生宙是地球演化历史过程中最为年轻的成矿作用期,鉴于部分地区含矿流体仍处于迁移和沉淀状态,因此,地质学家不仅可以根据理论来推导金属元素成矿作用的过程,而且可以通过直接观察来验证许多成矿理论。

众所周知,今日地球上大陆和海洋分布格架是原始古大陆裂解和迁移的结果,最早的裂解作用发生在4亿或5亿年前。在此之后,随着大洋中脊的多次扩张活动,壳幔深部规模巨大的软流圈的对流作用将岩石圈分割成若干可移动的板块。各板块的相互碰撞、对接和俯冲作用可诱发大规模构造-岩浆活动,并且形成一系列金属矿床(图2)。在大洋底部,地质学家通过深水潜艇(如埃尔文号, Alvin)观察到许多令人鼓舞的金属矿床地质现象(1)过去一直被解释为古大洋壳残片的蛇绿岩带常常赋存有富铜块状硫化物矿床,这些洋中脊扩张部位形成的金属矿床可通过软流圈发生侧向运移,最终定位于古大陆边缘(2)通过对洋中脊火山喷气孔实地考察,论证了块状硫化物矿床“黑烟筒”成矿模式的正确性(3)古大陆边缘洋壳与陆壳的斜插与俯冲作用可导致洋壳或陆壳岩石的部分熔融,岩浆的上侵定位可形成南、北美洲科第勒拉型和安第斯山型岩浆岩带(4)金属成矿作用大都发生在古大陆边缘,在此所形成的金属矿床要么被完整地保存下来,要么被风化剥蚀殆尽。

大量的研究表明,板块碰撞与对接过程中所形成的富水岩浆,在其上侵定位过程中将会释放出大体积量的富盐和铜的热液流体,热液体系中挥发性组份大量聚集可导致围岩破裂,热液流体一方面对可渗透性围岩中的金属元素进行淋滤与萃取,另一方面其与围岩的相互作用可导致成矿体系物理-化学条件发生根本性变化,进而造成大量铜硫化物沉淀富集。全球范围内最重要的斑岩铜矿床大都是通过上述方式形成的,其储量约占全世界铜总储量的3/4。

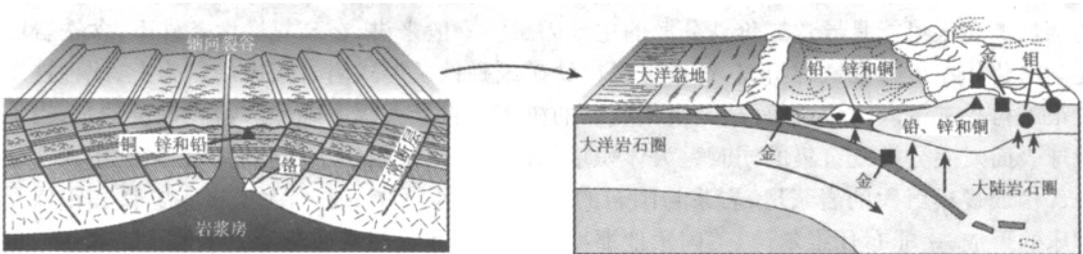


图2 显生宙金属成矿作用示意图

显生宙构造单元主要包括洋底扩张中心和大陆边缘的板块俯冲造山带。在岩浆上侵过程中,其与海水或围岩所发生的相互作用均有可能形成不同类型的金属矿床

区域性深大断裂与热液脉型金矿床具密切空间分布关系,金矿床(体)大都在渗透性极高的沉积岩或变质岩层内产出,金矿区范围内火山喷口,热泉和断裂构造极为发育,美国加利福尼亚“母矿脉”和中国胶东金矿区就是这类金矿床最典型的代表。矿床地质研究结果表明,大洋板块与古大陆的俯冲作用所诱发的构造-岩浆活动可导致含矿流体大规模对流循环。超巨量流体对变质围岩(沉积岩、火山岩和深成岩)的淋滤与萃取为大型-特大型金矿床的形成提供了物质来源。

原生金矿床形成之后,强烈的风化剥蚀作用可使金呈粒状或块状堆积在河流和小溪的底部,从而构成砂金矿床。世界范围内规模最大的砂金和铀矿床首推南非维德凡特斯兰德矿区,其它砂金与铀矿床无论在规模上,还是在品位上均无法与其相对比。表生地质作用在此类矿床的形成过程中无疑占有举足轻重的地位。

表生地质作用还可造成锡和其它重砂矿物在河流底部或海滨处富集成矿,另外,许多重要的铝土矿床、红土型镍矿床和风化壳型铁矿床的形成亦与含矿岩层的风化剥蚀有关。统计数据表明,上述三类金属矿床大都在亚热带或热带地区产出,大量的降雨和高温天气有助于水-岩化学反应。受其影响,岩层中大量的造岩元素被淋滤分散,而含铝、镍和铁等非溶性残留物(矿物)可得到进一步富集,进而构成金属元素含量很高的金属矿床。此外,部分学者认为,风本身也是一种特殊的成矿流体,风成铝质尘埃的搬运与沉淀也是铝土矿得以形成的重要因素之一,当大量风成铝质为特定的土壤所吸附沉淀时,它们即可富集形成铝土矿。

水与空气是地表或地壳浅部金属元素运移与沉淀的最佳介质。在特定的构造环境中,水与空气作用的强弱直接关系到某种金属能否构成具有工业价值的矿产。在地表处,强烈的风化剥蚀作用,一方面造成许多造岩元素淋滤散失,另一方面也可造成部分成矿元素(如铜、铁、铝和金)发生沉淀富集,进而形成具有一定规模的矿床(或矿体)。一般来讲,潜水面以上岩层的孔隙和裂隙(缝)中均充填有空气,受其影响,硫化物(如黄铁矿和毒砂等)可氧化形成硫酸根和活性金属离子。当含阳离子的酸性流体向下迁移至潜水面时,氧化态将为还原态所取代,铜离子将取代铁离子形成黄铜矿或斑铜矿,局部地段构成铜矿床(或矿体)。

地壳的局部台隆将会使许多深埋的金属矿床(或体)裸露于地表。受风化剥蚀作用影响,这些矿床原生金属矿石中的金属元素将会被淋滤出来,并且在近潜水面处发生再次沉淀与富集。如果没有上述金属元素的这种次生富集作用,那么西半球的大多数铜矿床均不具任何工业价值。近地表处,金属矿床或体的淋滤、萃取和氧化作用可导致大部分可溶性物质散失,因此,残留物(体)可作为找矿勘查标志物之一。据此,人们往往可以确定矿体金属元素次生富集部分规模的大小和品位的高低。金属元素次生富集程度与特定地区大气的氧逸度高低、降雨量大小和潜水面高低有关,例如,潜水面的降低致使原生铜硫化物矿体裸露面积增大,大气中氧逸度增高将使水-岩反应速率加快,大降水量将有助可溶性物质的迁移。因此,铜的大规模富集作用主要发生在潮湿到干燥气候带的过渡区内,智利阿塔卡玛荒漠中的大型铜矿床即是最好的实例。应该说,金属矿床的变形与改造历史从一个侧面反映了岩石圈、水圈和大气圈的演化过程,通过对金属矿产的详尽研究人们不仅可以获取有关成矿物质来源、迁移机制和沉淀过程的信息,而且可以得到大量有关地球演化过程的证据。

我们有理由相信,随着人类对金属矿产形成过程认识水平的提高和高新技术在矿产地质理论研究与找矿勘查中的运用,实现隐伏金属矿产找矿勘查重大突破是完全有可能的。金属矿产找矿勘查与开发利用周期的缩短将会为国民经济的持续发展提供可靠的物质保障。

#### 参考文献:

- [1] Brimhall G. The genesis of ores[J]. Scientific American, 1991: 84~91
- [2] Brimhall G. Preliminary fractionation patterns of the metals through earth history[J]. Chemical Geology, 1987,64 (12): 1~16
- [3] Hutchinson R. W. Mineral deposits as guides to supra crustal evolution. in O'Connen, R. J., and Fyfe, W. S. (eds), Evolution of the Earth, American Geophysical Union, 1981.
- [4] Sawkins F. J. Metal deposits in relation to plate tectonics. Springer-Verley, 1984.
- [5] Dixon C. J. Atlas of economic mineral deposits. Cornell University Press, 1979.