

金矿成矿学概论

说明：本文是从有关含金剪切带金矿的论文中节选出来的，故以金矿成矿学概论的形式推出，很显然本概论并不是笔者的金矿成矿学的全部。

含金剪切带型金矿首先是金矿床，因此其应该具有金矿床的一般性地质属性。因此，笔者拟就金矿成矿学问题作以不成熟的讨论，其目的在于解答和讨论有关剪切带型金矿提出的一些思考。笔者认为，只有掌握金矿成矿学的基本理论和金矿床的一般特征，才能够区分出剪切带型金矿床的特殊性和客观存在的必然性，才能够有针对性的查明剪切带型金矿床的研究现状中存在的/key问题，并且能够较好地回答笔者的有关思考。

1 金矿成矿理论与找矿理论

金矿成矿学一直是矿床学家所潜心研究的问题，这不仅仅是因为黄金作为人类社会经济活动和发展的标志，并且至今黄金依然保持货币储存的职能，而显示出对政治经济变化的敏感性。

1.1 成矿理论概念和要点

在我国矿产资源开发业已进入了一个重要的新的历史时期的时候，面对“攻深、找盲、求新、做大”的艰巨任务和市场经济环境，似乎呈现出一派“轻视理论认识、注重方法”的找矿态势，因而促使笔者不得不就与金矿的成矿学有关的问题作以重新的思考，试图以此提供给同行一些参考和借鉴。

笔者以为，首先必须承认地质学是一门科学，并且是一门以认识为前提的科学。笔者以为所谓科学（自然科学和社会科学）不仅仅能够解释客观，而且能够预测未来（和未知）。赋予地质学的任务就是这样的一门科学，其面临的问题和需要解决的永远是未来学所关注的课题。因此，地质学是一门探索性极强的认识科学。既然是科学，那么就应该以其科学理论作为指导，进行地质实践。由此可见，所谓找矿理论就是成功地指导找矿实践的理论。这就是说，方法找矿永远替代不了理论的指导，真正实现理论找矿之日，就是成矿理论成熟之时。

实现理论找矿必确认找矿模型和成矿模式，因为人们已经意识到，“成矿模式”是实现理论找矿的“智力拐杖”和“桥梁”。然而令人莫解的是，近年来出现了一个较为普遍的现象这就是，在很多有关资源大调查的项目中，有关矿床成矿模式的总结方面都是一律的“三位一体”说。出现了一个不加审慎思索的、遍在性的公式：成矿理论=成矿模式=找矿理论=控矿因素=成矿规律的“三位一体”（地层+构造+岩浆岩）的成矿理念。我想出现这种局面的重要原因之一，是由于对其中的某些概念的理解不确切所致，其中自然包括了对含金剪切带

的认识。以下笔者就成矿理论、成矿模式和找矿理论的具体解释谈点看法，呈现出来的可能是错误的或者甚至是谬论。笔者力求按照“求真务实”和“科学发展观”为指导，共同讨论之。

1.1.1 金矿成矿理论要点

现代成矿理论的实质和核心问题已不仅是对于成矿物质来源的简单地回答和解释，而且还要解决成矿物质的“来龙去脉”及其“自组织作用”过程。这是近二十多年来矿床学界最关注的问题，而不同于以往那种只强调物质来源问题和矿床的成因问题的理论探讨和自圆其说。

早在 1943 年 W.H.White 曾经提出过，金的沉淀是源于（岩浆热液形成的）成矿流体库的“残余含矿流体”的观点，尤其是自 20 世纪 70 年代末期 Fyfe 等人（1978）的著名论著《地壳中的流体》发表以来，国际地质界业已开始了对成矿物质来龙去脉的追根溯源的探索，并且成为了现代矿床学的前瞻性课题。如 80 年代，前苏联科拉超深钻井的研究者提出了“液态矿源”观点（科兹洛夫斯基 E.A，1984）。同后，我国学者张秋生教授提出了地壳深部（19km）存在着富硫的金属液态矿源（1987）。1985 年 12 月在菲律宾马尼拉召开的专题讨论会，会议重点讨论了建立热液金矿成因模式问题，其涉及低硫系（冰长石—绢云母型）和高硫系（明矾石—硫砷铜矿型）；1987 年 1 月在智利召开的国际矿床模型项目第四次讨论会的内容是火山中心的热液成矿体系。会上，美国的 C.G.坎宁安将美国西部热泉、酸性硫酸盐型和冰长石—绢云母型金矿床的特征与地热系统特征进行比较，来证实它们之间的成因联系。加拿大的潘特利夫描述了加拿大西部火山中心中，浅成热液的贵金属矿床的特征，认为这些特征与深约 3km 的岩浆热液作用有关。1991 年 8~9 月，在法国召开的矿床应用地质协会（S G A）25 周年年会，其中心议题为“金属的来源、搬运和沉淀”。1990 年 4 月在新西伯利亚市召开的第三届全俄“内生矿建造成因模式”会议，主要讨论了内生成矿体系的构造-动力学类型及其成因模型对区域、局部的详细预测，以及在解决成矿规律问题方面的作用。1996 年 8 月在北京召开的第 30 届世界地质大会上，也设立了“矿床的物质来源、搬运和聚集”专题等等。此外，人们关注的另一个问题是成矿流体的形成及其条件，以及成矿流体形成后的聚集样式和条件。按笔者的理解，成矿理论应该具体分解为以下几个要点：

①成矿物质是从哪里来的；是怎么从那里来的；又是以什么形式来的，以及那里是怎样的时空状态，即成矿流体聚集的状态和聚集的地质条件；

②为什么有的矿床是贫而大/贫而小，有的矿床富而大/富而小呢？

③成矿流体是经过什么样的路径抵达容矿空间的，其中包括流体路径的构造样式及其与容矿构造的时空关系。还需要进一步解释的是，成矿时的断层阀作用及其成矿构造的脉动性与成矿物质沉淀的有序性的统一；

④成矿流体进入容矿空间之后，成矿物质的沉淀富集机理和动力学机制的解析；

⑤成矿理论与找矿理论的关联，从而实现理论找矿的问题。

1.1.2 成矿模式与成因模式

如上所述，地质成矿理论研究的最终目的是在于指导地质找矿，也就是将地质成矿理论中的成矿信息，归纳总结成为矿床成因模式和成矿模式，从而实现以地质成矿理论指导下的地质找矿（图 1）。如图中所示，实现理论找矿的途径是需要建立矿床模式。其中涉及两个概念问题，即一是矿床的成因模式（Metalgenesis mode）；二是矿床的成矿模式（Mode of ore-formation）。对此，在通常的文献中这两个术语常常混淆或者统称为成矿模式，实际上

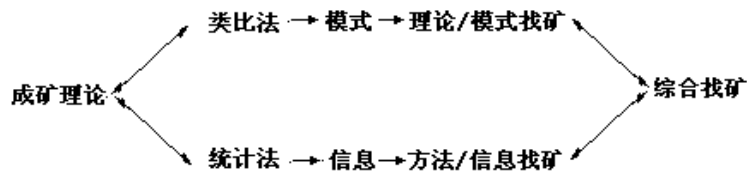
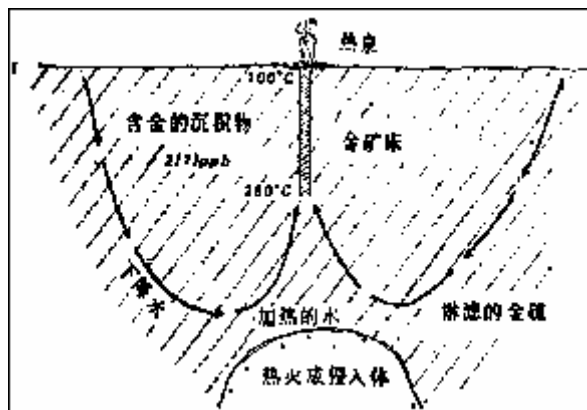


图 1 找矿理论框架

两者是有较大的区别的。笔者的看法是，所谓矿床的成因模式是在矿床成因研究的基础上，建立的模式，例如过去提出的斑岩矿床的“板块构造模式”、“两层楼模式”和“地下水对流模式”（图 2）、“卡林金矿的酸性淋滤成因模式”（含与海底火山喷气喷流作用有关）海底对对流成矿模式等等。由此可见，矿床成因模式是在矿床成因研究的基础上，试图以最最简单的概括性语言或者图示表述成矿物质的“来龙去脉”及其成矿体系的自组织作用过程。其中所谓的成矿体系的自组织作用是指在环境变化的条件下，体系的自我调解过程，从而达到体系的状态与环境的统一（或者说平衡）的过程，称为体系的自组织作用。例如 R W 博依尔（1979）的扩容带金矿成矿模式（图 3）实际上是成因模式。换言之，成因模式是不能够用于直接指导地质找矿的理论模型，成因模式却具有普遍理论指导价值和意义。例如，以西澳学派为代表的，曾经试图建立与太古代绿岩带有关的绿岩带型金矿变质成因模式。

所谓成矿模式是以最简洁概括性的语言或图示，表述矿床形成时的空间状态和成矿的地质要素。例如前苏联学者 B .A .布里亚科的金矿变质-穹隆成矿模式（图 4）。成矿模式常常是局部的或者是类似矿床的成矿模型；主要表述，矿床形成时空状态和成矿的地质要素的综合，因此成矿模式具有地质找矿的实际意义和价值。



金矿成矿学概论

图 2 金矿形成的一般模式 (据 A A Keays, 1982)

花岗岩体侵位提供“热能”使流体处于流动状态,从围岩中淋滤金和其它元素。在这个模式中一般假定① 某些类型岩石作为金的矿源岩②在 A 点的所有金进入溶液③A 点的金在 B 点成矿沉淀 (引用者指出这些假定是错误的)

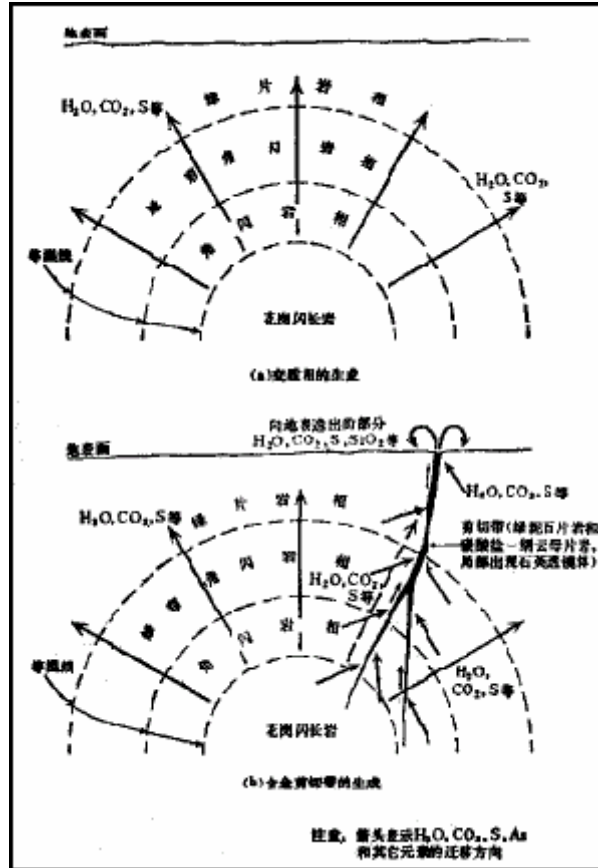


图 3 金矿成矿的扩容模式 (R W 博依尔, 1989)

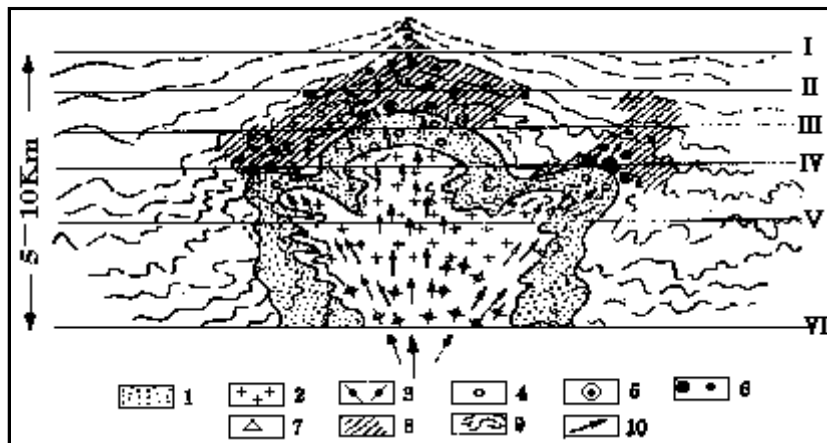


图 4 矿化片麻花岗岩穹隆构造造成矿模式 (据 B A 布里亚克, 1981)

1-结晶片岩 (氯帘-角闪岩相及更高变质相); 2-变质型伟晶岩和混合岩; 3-再生-交代型黑云母花岗岩和片麻状花岗岩; 4-高温不含石英脉; 5-与少硫化物建造含金石英脉 (共生的细脉浸染型硫化物矿化的含金带); 6-多金属矿化及含金多金属少硫化物建造含金石英脉 (a-矿石中金品位高于银品位; b-矿石中金品位稍高于银品位); 7-少硫化物建造的含金石英脉, 其中含银品位高于含金品位 3-4 倍; 8-含矿的变质-热液型交代岩发育晕圈; 9-绿片岩相分布区; 10-变质和矿化流体的运动方向; I-VI-可能的剥蚀面: I-未剥蚀的穹隆; II-弱剥蚀面; III-VI-深切 (矿下部) 剥蚀面

矿床成矿模式实际上是在矿床 (矿区/矿带) 的成矿规律的研究基础上建立的。因此, 成矿模式不同于成因模式的是, 在于它是主要表述成矿时的时空状态和成矿定位的条件。因此, 成矿模式实质上是成矿规律的高度概括。与成因模式比较, 成矿模式更有利于地质找矿, 而显示出其实用的价值。所以有人称为成矿模式是地质找矿的“智力拐杖”和“桥梁” (陈毓川,

1993)。由于矿床的成因模式主题是表征成矿物质的来龙去脉，实际上业已属于成矿学的研究范畴。

综上，成矿理论应定义为：所谓成矿理论是阐述成矿物质的“来龙去脉”及其成矿体系自组织演化的成矿过程。例如大家所熟知的“花岗岩成矿说”、“层控论”、块状硫化物矿床的“海底火山喷气说”、斑岩铜矿的“板块构造”说、“边缘成矿”理论、界面成矿理论等等。笔者基于对矿床的成矿理论的认识认为，成矿理论将要涉及以下几个需要必须回答和解决的课题：

①、成矿物质来源的层次，包括幔源中的岩浆源的性状（体系状态），成矿物质在岩浆中的状态，如何从岩浆中分异，并且能够达到成矿所需要的物质的质和量；壳源的物质来源的层次、状态和形成矿床的物质聚集的地质地球化学条件。

②、成矿物质的运移路径、状态及其条件。

③、成矿物质及其载流体沉淀富集成矿的过程和机理。

当前，对于金矿床的成矿理论除了必须阐述成矿流体的“来龙去脉”之外，还十分强调成矿流体的形成过程和条件，以及揭示成矿富集的条件和机理等。

1.1.3 关于成矿体系的自组织成矿作用

人们有关现代成矿作用的定义是成矿体系的自组织成矿作用，即意味着成矿体系的成矿作用过程中，随着环境的变化，成矿体系必然发生自我的调节和变化的过程，称为成矿体系的自组织作用过程，亦即成矿作用过程。故成矿作用称之为体系的自组织作用。

根据这一理论思维，笔者创建了目前流行的成矿体系找矿理论，及其基本概念。

1.2 找矿理论的要点和概念

根据地质找矿的历程，笔者以为大体经历了三个时期：第一时期是前人为我们开发的已知矿床的工程评价和旧采遗迹的勘查；第二个时期是对已知矿化点的评价和勘查，所谓露头矿找矿阶段；目前所处的第三个时期是对业已评价过的矿化点、矿床的再评价和再开发。因此，目前的地质找矿与勘查的风险性最大，找矿的难度也最大。这就不仅仅需要有新的找矿理论认识的指导，更迫切地需要建立适合于“攻深、找盲、求新、做大”的找矿理论指导，以实现最大限度地减少风险的理论找矿目的。

1.2.1 地质找矿的基本原则

找矿理论实质上就是从成矿理论中提取的能够判别矿床存在的成矿场信息，能够揭示矿化地质体的空间展布状态的规律性认识。众所周知，我们面对的找矿地质实际是成矿定位之后被改造变位的结果，因此需要对成矿时的时空状态进行恢复。据此，具体金矿床找矿操作的原则是：

(1)找矿预测的有效性原则

目前执行的矿产勘查规范首先提出了预测阶段，并指出“成矿预测是矿产勘查的理论依据，又是重要的技术手段，随着找矿对象的改变，找矿难度的加大，成矿预测的作用日趋重要。目前国内外的矿产勘查工作证明，地质找矿工作已由直接阶段转变为以间接推断为主的理论找矿阶段。另一方面，各种矿产在地壳中的分布是极不均匀的。在许多的物化探异常、矿（化）点、矿化带或成矿带中，具有工业意义的矿化只是其中很少一部分，相当一些地段客观上就不存在矿床。因此，如何根据成矿规律和成矿信息，正确判断成矿远景区就成为找矿成败的关键。成矿预测的重要意义就在于它是实现科学性找矿的重要途径”。所以找矿预测实质是以成矿理论为基础，以找矿理论为指导的理论找矿。

实现找矿预测的有效性需要找矿理论。目前的找矿预测或者成矿预测有效性的难点是大比例尺（1:10000~1:2000）的定位预测。因此这就需要一个能够定量解释成矿物质的沉淀条件（成矿温度、压力和组分组成变化的度）的找矿理论，从而实现定位预测。笔者认为，定位成矿预测必须遵循恢复和建立成矿时的各个地质要素的状态及其总和组成的成矿场的原则。对于金矿的定位成矿预测来讲，主要是按照成矿时的成矿构造体系的空间性状、范围和对成矿流体运移及其性状变化的控制作用。只有这样才能够相对定量的给出矿化体的空间范围、成矿后剥蚀矿化体被剥蚀了多少，还残留了多少，矿化富集部位的深度等，以达到定位预测找矿的目的。这不仅是当前地质找矿的难点，同时也是成矿预测的难点。

(2)工程验证的原则

地质找矿必须进行各项山地工程的揭露，以验证找矿预测的有效性和找矿理论应用的正确性。当部署找矿（重型）工程的时候，则必须按照矿床、体的目前状态，即成矿后的被改造的空间状态进行。显然，对于金矿来讲则应按照成矿后成矿构造体系的状态作为勘探设计依据原则。

(3)间接找矿的原则

在进行地质找矿时，特别是解决“攻深、找盲和做大”的找矿任务时，人们常常是采用所谓的有效找矿方法，而忽视了找矿理论的指导，其结果往往是事倍功半，甚至是无功而言。笔者以为所有的找矿方法都是对认识的验证。因此，笔者强调在应用找矿方法时，主要的目的是解决深部地质问题，是提供解决深部或者隐伏区是否具有成矿的地质要素。只有如此，才能够真正达到攻深找盲的目的。

(4)就矿找矿的原则

笔者认为直到目前为止“就矿找矿”的原则依然奏效。众所周知的日本菱刈金矿的找矿、加拿大的赫姆洛金矿的找矿、包括我国甘南阳山金矿带的找矿无一例外的都是遵循这一找矿原则，实现找矿的重大突破的。

1.2.2 找矿模式

在目前,人们通过对矿床的深入研究提出了适合于相似矿床的找矿模型,例如斑岩铜矿的蚀变-矿化分带模型(青磐岩化→泥化→绢英岩化→钾长石化,对应的矿化分带是黄铁矿化→黄铜矿化→辉钼矿化);日本黑矿的“三层楼”模式(膏矿→黑矿→黄矿);江西钨矿的“五层楼”模式(网脉带→细脉带→复脉带→石英脉带→大脉带);胶西北金矿床提出的“二层楼”模式(上部为石英脉型,下部为蚀变岩型);浅成低温热液金矿床的蚀变-矿化分带模式(从外至内青磐岩化→泥化→硅化;从上至下硅帽的 As-Sb-Hg-Ag→硅化的金矿石带→泥化带的重金属矿化带)等等。运用找矿模式找矿的成功实例有美国的科拉马祖斑岩铜矿,克莱麦克斯钼矿。前苏联学者运用黑矿分带模式成功地解剖了乌拉尔含铜黄铁矿矿床;卡林型金矿的超微细粒浸染型特征,不纯碳酸盐岩赋矿岩系特征等等;霍姆斯塔克金矿作为碳酸盐相铁建造的赋矿岩系的找矿指导意义等等,都是运用找矿模式指导找矿实践的成功范例。当前,人们已经不满足于单纯的地质找矿模式,而力求地质-化探-物探的综合找矿模型的建立,即提出所说的综合找矿模型。笔者十分欣赏王世称先生的名言,所谓综合成矿信息预测是以人们的先验认识为指导的,信息间的关联与转换。其中的先验认识就包含了找矿理论的认识。

所谓“先验认识”就是告诉我们,应该以成熟的成矿理论和找矿理论作为指导的找矿实践,已经孕育着必须采取“先入为主”的理念。

综上所述,地质找矿理论可定义为:所谓地质找矿理论是建立在地质成矿理论基础上,提取矿化体的成矿信息、找矿程序及其控矿要素的综合。从这个意义上讲,找矿理论是指导找矿的依据;其具有十分明显的可操作性特点,而不同于成矿理论。

1.2.3 矿床中矿体赋存规律是找矿理论的理论核心

矿体赋存规律即是通过成矿圈闭的研究、矿体形态、规模、产状及矿体间的时空分布关系来确定的,查明矿床体空间展布或者说赋存规律对于指导矿床找矿勘查具有十分重要的意义。这就是说,只有查明矿床体的空间位置和范围,才能够有效地进行成矿预测和勘查工程的有效布设。

众所周知,矿体是组成矿床的基本地质单元,查明矿床中矿体赋存规律即矿体间的时空分布关系。这种时空关系对于金矿床来讲是通过控矿构造体系的时空演化状态关联起来的。从而出现了各个矿体间在形态、展布样式和层次;矿化类型、规模与质量、产状等矿床地质地球化学方面的时空演化关系。从而为由已知到未知、由浅至深地质找矿勘查提供最直观和最可靠的地质找矿方向与标志,而成为勘查工程布署的最基本的设计依据。

根据大量的找矿勘查实践与理论上的分析,在上述的研究内容中,对于热液矿床最重要的是查明矿体乃至矿床总体矿化的侧伏产状(侧方向伏与侧伏角)。如果说,矿体的侧伏产状

金矿成矿学概论

是指导对矿体勘查的依据的话，那么矿床总体矿化的侧伏产状则是对整个矿床地质找矿勘查的最基本的地质依据。

对于金矿床（体）来讲，其矿体的空间展布规律事实上是控矿构造的性质和控矿构造的空间展布规律的查定问题，而控矿构造的查定的前提是查明成矿后控矿构造的变动及其空间状态的确定。由此可见，控矿构造的查定并不是一个很简单的地质工作。需要进行十分细致的构造研究。即能够从成矿后的各种各种形迹中筛选出成矿期的控矿构造。

综上所述，笔者提出矿床(体)的赋存规律是找矿理论的核心，是实现成功的成矿预测和找矿勘探的前提，显然也是成矿预测研究的主要内容与成果之一。

众所周知，成矿规律、成矿模式和成矿预测三者间的内在关联，构成了现代成矿学的三大主题内容或组成。对此，笔者作以概略的解释，并结合图 5 表述如下：

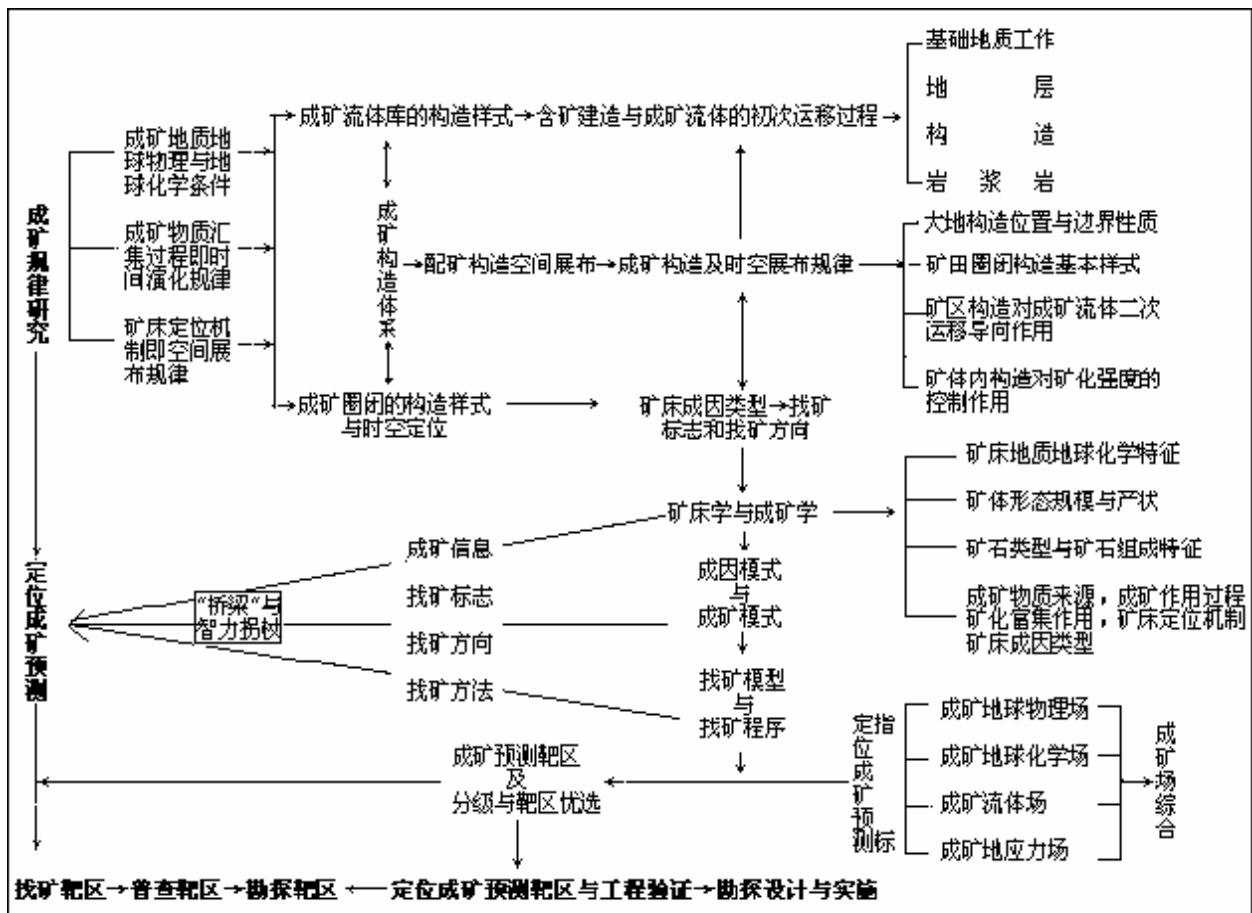


图 5 成矿规律、成矿模式、成矿预测与地质找矿的关联

所谓成矿规律是揭示矿化体客观存在的必然性，是以阐述矿床与矿床之间，矿床中的矿体之间时空演化关系和成矿要素。如图所示，对于金矿床的成矿规律研究是建立在成矿地质环境和背景的基础上，阐述成矿体系的形成和演化，及成矿体系的自组织作用过程。从而才能够得出切合实际的不同级别矿化体的成矿规律。由此可见，成矿规律实质上是成矿学的主体内容。如前所述成矿模式是通过成矿规律研究的基础建立的，并且是成矿预测的智力“桥梁”与“拐杖”。据此，我们还从理论角度将三者关联起来，即成矿理论→找矿理论→理论找矿的

必然关系。

1.3 有关金矿成矿理论的概要回顾

1.3.1 概要回顾与简评

(1) 概要回顾

浦志伟(1992)在《黄金开发史和金矿床成因》(R W Boyle, 1981)一书的译著序言中写到:“目前流行的一些有关金矿成因的观点,实际上是先辈们在文艺复兴时期、中世纪,甚至更早的时候就以较为原始的形式提出过的;而各种学派又周期性地交替处于主导地位。这充分显示出创造性思维在探索中的能动作用,以及人类对自然认识沿螺旋式轨道不断深化的趋势”。现今依然是水火不容,壳源与幔源各持己见的状态。加之层控理论处于岌岌可危的态势,无力面对含矿岩系中金的丰度作为判别标准的提法和无法回答“大洋中脊”的成矿作用的实际,而出现了在幔源论的强大攻势下的软弱状态。特别是由于金的向心性和亲铁亲硫性,以及金矿床产于各种各样的地质环境中和条件下存在的实际,成为了各种学派立论的前提和依据。由此展现出从古至今对金矿成因的反反复复、莫衷一是的认识历史与现状和主因。

上个世纪20~30年代艾孟斯(1924)的经典著作《世界金矿床》问世以来,花岗岩成矿的观点处于统治地位;20世纪70年代以来乌尔夫(1976)8卷本的《层控矿床手册》发表以来,按照成矿元素丰度进行地质找矿热潮来势异常迅猛,刹那间席卷了整个矿床界;与此同时,博依尔(1979)的巨著《金矿床及其地球化学》的发表,被首先应用于《中国东北部金矿类型及找矿方向》研究项目以及博依尔的“混合岩化说及剪切带扩容成矿模式”被广泛地接受;使得火成论受到猛烈地冲击,与此同时,我国的季克俭的“三源论”天水作为水源-岩浆作为热源-矿源层作为矿源,也很盛极一时;似乎可以从“三位一体”中找到他的踪影。20世纪80年代博依尔(1984)的另一部著作《金矿开发史及矿床成因》被译成中文介绍了世界金矿床成因的历史和典型金矿床的研究历史及其作者本人的述评。直到20世纪90年代末期,人们在研究成矿物质的活化和迁移形式的研究中发现了一个极其值得思考的问题。这就是在岩石中以什么样形式赋存的金才能够进入溶液并且能够最终成矿;第二个问题对于地壳金的丰度产生了疑虑,认为丰度值偏高,应该 $<1 \times 10^{-9}$ (涂光炽, 1991);与此同时,对于成矿区的各种岩石的含金丰度的大小作为判别提供成矿物质来源的问题也提出了质疑;第三个问题对于博依尔提出的,对花岗质岩石成矿的质疑。他指出如果花岗质岩石是成矿物质的提供者的话,那么为什么含金石英脉还能够穿切固化了的岩体呢?从而引起了“层控论”与“火成论”的再度论战,此次论战实际上从20世纪80年代初至90年代中叶乃至到迄今为止仍然没有停止过。更确切地讲,从层控论的再度兴起的70年代至今“层控论”与“火成论”的论争,始终没有间断过。不同观点都在希望得到否定对立观点的支持。

(2) 两种观点的主要论点

“层控论”从 1982 年津巴布韦讨论会是层控论的鼎盛时期，在大会主席的结束报告中指出“绿岩带中金的丰度为 7.6ppb, >7.6ppb 的绿岩将能够形成金矿床”。关于带状铁建造的金矿床问题；特别是金的成矿物质来源于“地壳与地幔的结合处—太古代绿岩带”(A A Keays, 1982) 的提法得到了支持。20 世纪 80~90 年代关于大陆超深钻井的实施(前苏联、西欧的意大利和德国)提出了“液态矿源”理论，其中包括已故的矿床学家张秋生(时任国际矿床委员会主席)提出金矿集中区的古大陆边缘地壳深部 19km 以下存在着富含硫和金属的液态矿源层；西欧超深钻井给出了碳泥质沼泽地区中的硫是以羰基硫的形式存在的即 (COS) ， $(\text{COS} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2)$ ，以及十分明确地提出地壳中古流体和现代流体的来源就是产生流体的岩石本身。由此，“建造水”的概念被提出。

“火成论”于 1986 墨尔本的国际金矿讨论会提出了十分引人关注的两个大的论题其一是提出了碱性煌斑岩成矿理论。碱性煌斑岩岩浆位于地幔与地核的接合部；其二是韧性剪切带成矿控矿理论。目前，在我国中央电视台多次放映太平洋中脊“黑烟囱”形成块状硫化物矿床的科教片和提到与之相关内容的报道，……。1996 第 30 届世界地质大会有关岩浆成矿论的报道，据说西澳的层控学派业已对于绿岩带变质成矿发生了动摇，开始倒向了绿岩带中的花岗岩成矿理论认识。主要依据是花岗岩成岩年龄与金矿的成矿年龄的相近(邱玉民口头通讯，1996)。

需要指出的是，尽管层控论受到冲击，但是有关成矿物质源于矿源岩/矿源层的理念，以及“胚胎矿”预富集的观点还占有相当的市场和影响。例如近期有人撰写文章介绍了《金矿“矿源层(岩)”研究的新进展》(阎立伟等，2004)，然而文中引述的最新资料仅是上世纪 90 年代中叶，可谓新而不新。不过从中可见，矿源层/矿源岩是成矿产物的来源的观点还是明确的。

矿源-水源-热源的“三源论”成矿观点是我国学者季克俭等(1989, 1994)提出的，其主要论点是矿源源于矿床的周边围岩；水源主要是大气降水；热源是浅成侵入的岩浆岩。主要依据是被岩浆热能加热的大气降水具有极强的渗透和交代围岩的能力，并从中汲取成矿物质，形成了成矿流体。同时有关矿石和蚀变围岩中的氢氧同位素测定结果表明，几乎显示出以大气降水为主，并且与保存大气降水的岩系直接相关。

1.3.2 有关现代成矿理论认识的拓展

需要指出的是，很多成矿理论的提出大多数带有假说的色彩。这是因为，自然界矿床的形成过程人们是从来没能够亲自考查过，同时也不太可能提供实验进行成矿过程的模拟。伴随科技长足进步，必然给包括地学在内的各个学科领域输入新的动力引擎，从而大大地促进各个学科的新的飞跃和发展。自从 20 世纪 60 年代以来，新技术、新方法的引入和出现和应

用（同位素地质学、流体包裹体研究、成岩成矿实验的拓展、微区测试技术的应用），特别是通过一系列国际地质合作项目的实施和开展，使得人们有能力、有条件进行更为全面地科学调查和从不同学科和方法进行对比研究。例如值得关注的几个大的事件是：对现代热液-热泉、海底热液成矿；生物成矿的考查；大洋中脊成矿现象的观察、大洋、大陆超深钻井等等，为成矿理论的提出提供了实际支持。

(1) 现代成矿的矿床和研究

例如 60 年代通过全球有关热液体系的考查，提出了“活动地热系统与热液矿床”（D E 怀特；1981）。如红海海渊发现了含金属的热卤水和沉积物；东太平洋海隆的沉积物中发现了热液成因的金属组分；1972~1973 年在北纬 26°附近缓慢扩张的大西洋中发现了温泉和低温热液矿床；1977 年在加拉帕戈斯中等速率扩张中心发现了温泉和化学合成喷口中发现了生物群；1978 年在北纬 21°东太平洋海隆发现了现代高温热泉形成的残余块状硫化物矿床；1979 年在这个残余块状硫化物矿床附近几公里处发现了现代高温黑烟囱型排放。以往人们认为，高温热液活动和块状硫化物所需热体制与太平洋中到高的扩张速率有关。1985~1986 年，分别在北纬 26°和北纬 23°22'缓慢扩张的大西洋中脊横贯大西洋地学大剖面的热液田和“蛇窝”热液田，发现了高温黑烟囱、块状硫化物和不同的喷口生物群。除大洋中脊环境之外，在许多弧后盆地也发现了热液成矿活动。如冲绳海槽 JADE 热液田中的现代矿化，是第一个类似于日本北鹿地区黑矿型块状硫化物矿床的海底矿床。在劳海盆扩张中心的许多地点，发现了多种类型的热液矿物，包括首次发现原生金。在与劳海盆相邻的北斐济河盆的一个地点，发现了硫酸盐和硫化物矿化。在马努斯海盆的扩张中心发现了大规模的块状硫化物矿床，其产出环境很像加拿大地盾的某些太古代矿床（如诺伦达）。

与此对应，在陆地上的裂谷和深断裂带中也发现了强烈的热液活动。1990 年在贝加尔湖底发现了一些热液喷口和喷口生物群。与沿着洋中脊系统分布的热液喷口的排泄作用不同，贝加尔湖的热液喷出口是沿着离开该裂谷底板轴部 18 公里以上的一个侧面断裂带产出。在陆地上还发现了两类热液成矿系统，一类是位于火山带的地热成矿系统，另一类是没有显示火山作用的深断裂卤水成矿系统。前一类以氯化钠和硫酸盐-氯化钠成分的属性水或中性-弱碱性水起主要作用，与现代火山作用有关的并赋存于深断裂内，金属含量较高（4.5g/L），含有砷、锑、汞、金、银和少量铅、锌、铜、铁的矿物和自然元素，例如勘察加的乌宋热液系统和新西兰的地热系统等，后一类以氯化钙-钠型水起主导作用，产于壳下形成的深断裂内，矿质是从灼热的卤水中沉淀出来的，金属含量高（230~332g/L），含有黄铁矿、闪锌矿、方辉铜矿、斑铜矿和自然铅，靠近地表有带状分布的有色金属硫化物，深部则是铁的硫化物。

在大洋底形成的铁锰结核和含金属软泥，是现代成矿作用的另一种重要类型。研究表明，铁锰结核最大的分布区是在裂谷、大洋中脊系统、转换断层、尤其是产于这些断层的交切点

和出现在现代海底火山作用地区。在转换断裂带中发现了碳化物、硅化物和自然元素。B C 库泽布内等指出,现代成矿系统有着共同的特点,即在其前锋部分存在强而有力的氧障(地球化学屏蔽层),它有助于将岩石圈上部能量很大的深部还原流体流与流体化的岩浆熔融体流改造成为巨大的含金属热液(盆地地球的水圈和大气圈就是这样的氧障。成矿体系一般位于氧障带的底部(水体底部、地下水有效排泄区及天水与海水的深部循环区)其主要特点是①渗流水(主要是天水)和海水在热液中占有优势地位、原生水属于从属地位;②热液中存在亲硫性(主要是地幔)和亲石性(主要是地壳)金属元素,这些金属以卤化物(主要是氯化物)、氰化物、硫化物、硫代硫酸盐等配合物形式搬运到排泄地点;③矿石大量沉积产于地球表面、大陆潜水面及海底和洋底的活动构造中;④矿石主要以硫化物(优势)和氯化物(铁锰结核)或某些复合矿物(红海软泥)的形式出现。

(2) 超深钻井

超深钻井资料提供了一些地区的岩石圈某些特征和现代流体以及古流体的特征。例如前苏联实施的科拉超深钻井揭示了 $>5\text{km}$ 以下的构造大多数是缓倾斜状态的剪切带或者不透水层,因此提出了热液成矿的深度 $<5\text{km}$;同时发现各种性质的流体的分布是伴随深度的变化而变化。

欧洲共同体的超深钻井揭示了意大利托斯卡纳地区现代地热田热水系统的超热流体。现已查明,该区的地热田在低于 3000m 深度水平地温可达 250°C 以上,本区认为热流高的原因是由于岩石圈变薄作用和现代洋壳生成有关。在托斯卡纳南部是一个高二氧化碳流动区域,在地表逸出气孔、苏打泉、硫酸水以及钙华相当发育。热泉的 CO_2 气体的碳同位素填图表面,其碳同位素值介于 $\delta^{13}\text{C}-10\text{‰}\sim+2\text{‰}$,与区域碳同位素组成异常值($-2\text{‰}\delta^{13}\text{C}<+2\text{‰}$)很接近。研究者认为, CO_2 来源于深部封闭构造中的海相碳酸盐岩石的热变质脱气作用有关。

在钻井的深部早期高温热液矿物组合被低温矿物组合交代:斜长石+阳起石 \rightarrow 黑云母+电气石($1.61\sim1.3\text{Ma}$) \rightarrow 绿帘石+钾长石(冰长石)+绿泥石、透辉石 \rightarrow 透闪石+阳起石。地热田的 $3000\sim4000\text{m}$ 深部热储岩中热液石英、电气石、斜长石、冰长石、绿帘石等“key minerals”的成因矿物相、流体包裹体以及同位素地球化学等研究表明,地热田的热流体活动与阿尔卑斯-亚平宁造山期后期晚第三纪上新世-第四纪花岗岩浆活动和构造变质事件有关,至少有三次流体与储岩发生交互作用的记录:(1)、岩浆阶段的高温热液($450\sim500^{\circ}\text{C}$)以 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 气体为主含有 CH_4 和 N_2 的氯化锂卤水。其沸腾形成了 $\text{LiCl}-\text{H}_2\text{O}$ 水合物的 $\text{NaCl}-\text{KCl}$ 流体,围岩热变质(500°C)的去碳和脱气作用形成了含碳流体。岩浆热液与含钙围岩的交互作用形成了矽卡岩类矿物组合,与变质杂岩的交互作用则形成了黑云母-电气石组合。(2)、减压阶段。在古生代变质基底上覆的三叠纪碳酸盐岩系中形成加热的含 $\text{Ca}-\text{Mg}$ 的卤水,温度为 $400\sim500^{\circ}\text{C}$,压力介于静岩压力和流体压力之间,水岩交互作用的结果导致了低温矿物组合

叠加在高温矿物组合之上。(3)、后期-现代阶段。由岩浆热流体和大气水掺合形成了地热田热水流体(简称地热流体),温度为 $400\sim 350^{\circ}\text{C}$,流体压力为 $<$ 流体压力,低盐度,产生硅化和碳酸盐化等低温围岩蚀变,以及可能形成浅成热液汞、锑、金矿化。

从Larderello地热田 12 口深井流出的流体中发现了气态羰基硫化物(COS)和 H_2S 气体。COS含量达 $0.005\sim 0.1\mu\text{mol/mol}$,COS/ CO_2 的比值介于 $2.2\times 10^{-7}\sim 1.7\times 10^{-6}$ 之间,两者都与井内的温度呈正相关。热水系统中的COS和 H_2S 气体对浅成热液硫化物的沉淀具有重要的意义。地热田深部水蒸气具有高温(3000m深处达 400°C)和重同位素特征水蒸气和大气层的 $3\text{He}/4\text{He}$ 比值 R/Re 为 $0.556\sim 3.20$,反映了地热田的氦气是地幔源($R/\text{Re}\geq 5$),红海放射性地壳源氦($R/\text{Re}<1$)的混合。

此外,通过对欧洲中部结晶基底和中-新生代盖层的古流体的研究表明,德国下萨克森中-新生代沉积盆地的若干个钻井岩芯 $\text{P}_2\text{-T}$ 、 J-K_3 砂岩的碳酸盐胶结物、石英碎屑岩次生镶边,碎裂石英缝合物中的流体包裹体进行了研究。在流体包裹体内封存的地层水或沉积卤水的古温度一般高于 100°C 。由于盆地热卤水与碎屑长石、碳酸盐和硫酸盐的交互反应,导致了 CaCl_2 含量伴随深度增加,以至于在流体包裹体中出现了NaCl或CaCl的子晶。与成岩同时形成的气体包裹体的气体成分与盆地地热梯度和古温度演化有关。在正常的成岩古地热梯度 $20\sim 30^{\circ}\text{C}/\text{km}$,并有强烈下降的盆地范围以 CH_4 和 KHN 流体为主,在异常的成岩古地热梯度 $40\sim 50^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的盆地范围以 CO_2 为主。对上二叠纪Zechstein统灰岩和蒸发岩中同生的、成岩后孔隙充填的碳酸盐和其他盐类矿物流体包裹体的研究表明,热流体离子浓度程度与深度无关。在深度 $3000\sim 4800\text{m}$ 存在Ca-Na-Cl和Na-Ca-Cl两种溶液类型,后者NaCl过饱和出现了石盐子矿物。在蒸发岩中的地下水侵蚀含有高含量的氯离子。

通过阴极发光光谱技术方法区分砂岩石英碎屑次生镶边的世代。对晚世代的石英碎屑次生镶边以及岩石孔隙、裂隙充填物石英、方解石、硬石膏和石盐等矿物流体包裹体的研究,查明了成岩后的流体性质和系统特征。在 $1700\sim 4700\text{m}$ 深度,成岩后的流体包裹体均一温度可达 $170\sim 230^{\circ}\text{C}$ 。储存在不同时代砂岩的流体类型有较大的差别, $\text{J}\sim \text{K}_3$ 砂岩:Na-Cl、Na-Ca-Cl体系; $\text{P}_2\text{-T}$ 砂岩:Ca-Na-Cl和Na-Ca-Cl体系。同成岩和成岩后的Ca-Na-Cl或Na-Ca-Cl流体体系具有继承性,都以高盐度、低Cl/Br比值为特征。同生盆地卤水温度随储存的深度升高。在盆地基底和盖层活动的、与华力西期后铅锌和萤石-重晶石矿化有关的矿化流体与上述的盆地热卤水很相似,但Cl/Br比值高达 $250\sim 400$ 。

德国基底实施的KTB超深钻井位于欧洲中部华力西结晶基底波希米亚地块西缘的基底出露区-巴伐利亚的上法耳茨地区。KTB地壳剖面的岩性从上至下为副片麻岩类和基性岩,在孔深 $6860\sim 7320\text{m}$ 之间遇到了Franconian线性构造带的深延部分之后,岩性又重复出现副片麻岩类和变质基性岩夹层。岩石类型组合有:角闪岩-变辉长岩、角闪岩-角闪片麻岩(变层凝灰

岩), 研究黑云母片麻岩(变质沉积岩)。变质温度和压力的峰值: 副片麻岩 650°C , $800\sim 1000\text{MPa}$; 变质基性岩 $700\sim 750^{\circ}\text{C}$, $1000\sim 1400\text{MPa}$; 变质年龄峰值: 475Ma 。造山期后的冷却年龄($^{30}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$)角闪石 $380\sim 390\text{Ma}$ ($<500^{\circ}\text{C}$)、白云母 365Ma (350°C)、黑云母 317Ma ($<300^{\circ}\text{C}$) (Duyster等, 1995)。岩石的交代作用或退变质作用为绿片岩-次绿片岩相。侵入的岩脉有横贯细晶岩和钙碱性煌斑岩。KTB钻井的惊人发现是钻井的深部存在大量的游离流体。泵抽试验和自动记录数据显示了深部流体可以从很远的和渗透率高的部位流入钻井, 充满游离流体的裂隙带出现的频率与钻井深度不相关, 但流体流的规模与深度有关。从孔深 400m 到 9101m 终孔遇到重要的富含流体破碎带或含流体层有 20 多层次, 主要有两种不同的流体系统: 富烃(C、H)的“干”流体和含盐(Ca-Na-Cl)热水流体, 前者局部出现在副片麻岩中石墨化断裂带; 后者多出现在角闪岩中。规模最大的含盐水流体流浅部出现在孔深 1325m 角闪岩内张开的裂缝带, 深部出现于孔深 $6850\sim 7260\text{m}$ 之间的断层破碎带, 这很可能与 Franconian 线性构造带的深延部分有关。规模最大的石墨“干”流体见于孔深 7010m 角闪岩与片麻岩交界处断层带。在孔深 $7260\sim 7792\text{m}$ 之间的碱性蚀变片麻岩出现大量小规模含盐水流体流, 并以高含量和非放射性成因的氦气为特征。在孔深 7812m 石墨化断裂带出现含烃类流体, 与其他断裂带石墨“干流体”相比, 铀和氦气的含量并没有增加。最深和最后一次, 也许是最有意义的氯含量高达 120×10^{-6} 的含盐水流体流见于孔深 8657m 片麻岩与角闪岩互层之间。在孔深 $9030\sim 9101\text{m}$ 之间, 长达 12 小时的终孔钻井泵抽试验流出了 4.5m^3 含盐水流体。种种证据表明, KTB 超深钻井的现代流体源于原岩, 为此进行了古流体的研究工作。

Bech等(1993)对KTB岩芯中的热液细脉中的流体包裹体研究结果表明, 古流体至少存在三种不同的流体体系: ①中地壳流体体系是与中压变质作用有关的 $\text{CO}_2\text{-N}_2$ 的低盐度水溶液; ②花岗岩浆热液流体是与晚石炭纪花岗岩侵入活动有关的 $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$ -石墨富钠低盐度水溶液; ③上地壳流体是在矿化花岗岩剪切带、张开缝隙、破碎带热液矿物圈闭的含Ca-Na-K-Cl和 $\text{N}_2\text{-CH}_4$ 高盐度渗透流体。上地壳流体的古热流体很类似于现今储存在张开裂缝的游离流体, 流体的成分以富含 CaCl_2 为特征。

富含 CaCl_2 流体包裹体的充填度与其分布的深度、古地热梯度、 CaCl_2 的含量以及形成时间有一定的关系。 5000m 以上充填度为 $99\%\sim 100\%$, CaCl_2 的含量为 $1\sim 8\%$, 古地热梯度为 $23\sim 26^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 形成较晚, 大约为 30Ma , 受大气的影响比较明显; 7400m 充填度为 92% , 8080m 充填度为 88% , CaCl_2 的含量为 $8\sim 25\%$, 古地热梯度为 $40^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 大约形成于白垩纪 100Ma 左右。在 7012m 深处的石英-葡萄石热液细脉中的 2mm 大小的自形石英晶体内发现有高盐度和较低均一温度(170°C)的流体包裹体。据此认为这种流体不可能是现代的流体, 只有古生代或者中生代才有可能。

大陆超深钻井揭示的地质资料表明, 在 $12\sim 15\text{km}$ 的地壳深度其温度可达 350°C 以上, 而

且该层次中的岩石极易发生构造变动和形成矿化卤水，因而具有重要的大陆动力学和成矿动力学意义。因为，重力下渗的游离流体、基底卤水、深部变质流体在这一深度和温度的地壳层次可能会出现停滞下降迁移。各种成因的流体构成的不同的包裹体将重新平衡，并导致流体包裹体相变、爆裂和其他逸出，形成数不胜数的显微地震源，且使得零星散布的流体重新汇聚，并与那些呈停止迁移状态的地壳深部的流体在这一深部水平构成一个连续的层状流体储区。

综上，现代和古流体的研究提供了对于热液成矿理论重新认识的依据和前提。

1.3.3 几个值得关注的成矿理论

如上所述，成矿理论建立的核心问题是成矿物质的来龙去脉及成矿体系的自组织作用。因此，以为提出的金矿成矿理论主要是建立在成矿物质来源的认识基础之上，故首先考查之。

(1) 与成矿物质方面有关的成矿理论

在这方面我们简介两个比较突出的，而又相互对立的成矿理论，即“幔源”成矿论和“壳源”成矿论。

I 钙碱性煌斑岩-中温热液金矿床成因模式

该金矿床成矿论是三位西澳学者 N S Rock、D I Groves 和 A A Ramsay 于 1988 年墨尔本国际金矿讨论会期间提出的。现就其理论要点简介如下：

他们认为以往有关太古代中温热液金矿的种种观点均存在不足之处，即岩浆观点认为成矿流体和金源于有关的花岗岩（斑岩）侵入体，经分析发现侵入体仅含有少量的金，不足以形成规模的金矿床；变质成因观点涉及到变质流体的形成，此种观点认为这些流体可以从绿岩带中的火山岩萃取金，并通过与适当的（Fe/Mg 比值高）围岩反应使金发生沉淀。然而还需要进一步解释的问题是变质作用释放的流体的有效聚集，才能够实现使大量的金溶解和沉淀（ $X=10^4$ ）；对于显生宙由于大气降水的加入量要使得太古代中温热液金矿形成时所需要的水的量太大，才能够形成同等规模的金矿床。然而有关金的来源的解释依然存在问题。这是因为迄今为止人们还没有足够的证据表明有大量的成矿流体能够形成像太古代那样规模的金矿床，并能够使人信服。所谓超镁铁质岩、科马提岩、镁铁质岩或者长英质岩的含金丰度都是很低的（ $0.5\sim 2\times 10^{-9}$ ），很难形成规模矿床。这就是说，金矿床的成矿物质根本不是源于绿岩带本身，而是源于钙碱性煌斑岩。具体依据是：

金矿成矿学概论

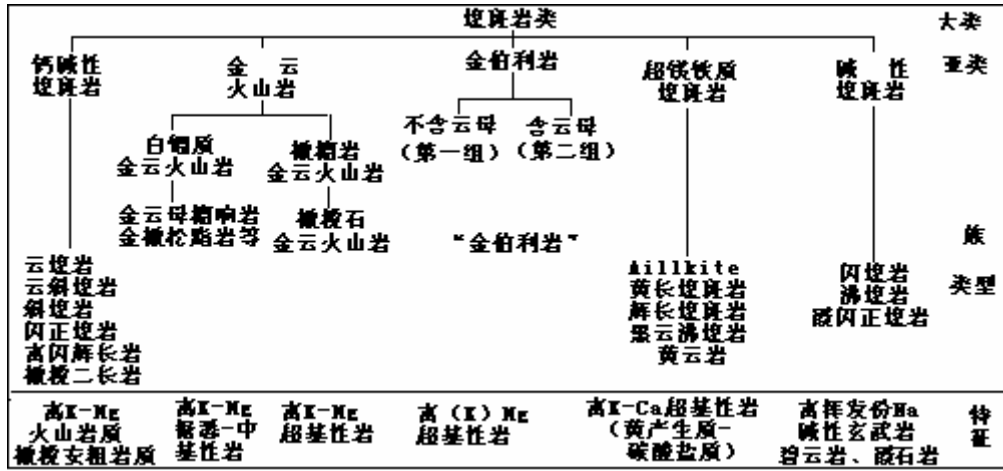


图 6 煌斑岩分类图 (据 Rock, 1987)

“煌斑岩”、钙碱性煌斑岩、“云煌岩”代表不同级序的特定岩石术语(根据野外,岩相学和岩石学特征划分),与深成岩中“花岗岩”、“原地交代花岗岩”和“S 型花岗岩或火山岩中“霏细岩”、“流纹岩”和“纳闪碱流岩”等分类方案类似。“橄榄安粗岩质煌斑岩”与“钙碱性煌斑岩”是同义词

①煌斑岩具有高含量的金。需要说明的是他们所说的煌斑岩并不是限于通常所说的煌斑岩,而主要是与超镁铁质、镁铁质岩、金刚石等具有亲缘关系的,富含挥发组分的、中深成火成岩类(图 6、7);煌斑岩类含金性统计结果如图 8 所示;

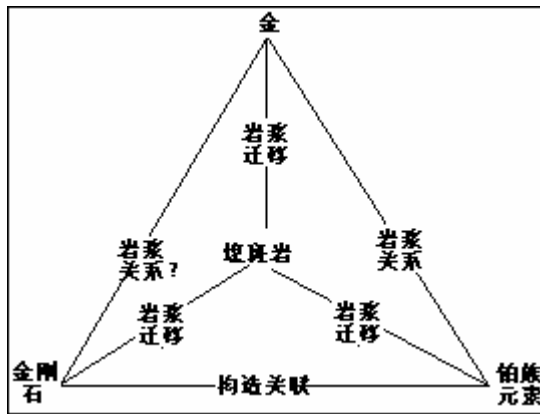


图 7 金刚石-金-煌斑岩的理想三角形图解

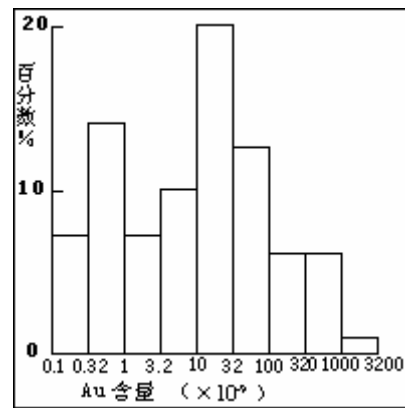


图 8 煌斑岩类金含量直方图

(据 Rock, 1987)

总计 88 件, 平均值 87×10^{-9} , 离差 320×10^{-9}

② 认为煌斑岩岩浆具有搬运金的能力。基于含金流体是低盐度、硫中等、富含 CO_2 的;煌斑岩具有中等的硫、富含 H_2O 、Cl、F、K、Ba、Rb等元素,是岩浆岩中挥发性组分含量最高的岩石。两者对比表明煌斑岩本身就是含金流体的载体;此外,富氟的霓长岩和煌斑岩均与金矿床伴生,据此可以认为煌斑岩熔浆是提供形成高温热液金矿脉的物质来源。

③ 煌斑岩岩浆来源。煌斑岩是在富含挥发分条件下由位于极深的部位($>150\text{km}$)处交代地幔而形成的岩浆。此点可从含有金云母、镁铁质矿物、碳酸盐矿物以及岩浆富含F、 CO_2 、Ba等挥发分,特别是钾镁煌斑岩含有金刚石等特征可知,含金煌斑岩岩浆源于地幔与地核的接合部。

④ 金矿区内普遍此种煌斑岩能够作为成矿的物质来源标志。在西澳的东戈德菲尔兹和默奇森省有数百条煌斑岩岩墙,其金含量高煌斑岩和斑岩类具有金矿化;在加拿大的苏比利尔

金矿成矿学概论

的柯克蓝克、皮克尔莱克、雷德莱克和赫姆洛等地金矿化与煌斑岩之间的伴生关系，以及金矿化与各种岩浆岩的时空关系。在布列颠加里东期造山带 400Ma 的含金煌斑岩；在爱尔兰金矿区同样存在着大量的煌斑岩；在我国的大多数金矿区各种类型的脉岩广布的实际等等。所以 Boyle 指出：：在一些黄金勘探者口中流传着这样一个格言：煌斑岩是金矿床存在的最值得注意的指示剂。

(2) 煌斑岩成矿模式

其成矿模式用图 9、10 表示之，详细见相关图示说明。

煌斑岩代表来自地幔深部金的搬运，通过复杂的与地壳的相互作用过程，产生了长英质或花岗岩类，其中只有小规模岩株（花岗闪长岩、奥长花岗岩、正长岩等）和斑岩（安山岩、英安质、流纹质、粗面岩质）的岩墙与金矿床具有多重的关系 A 和 B 为通常演化过程的

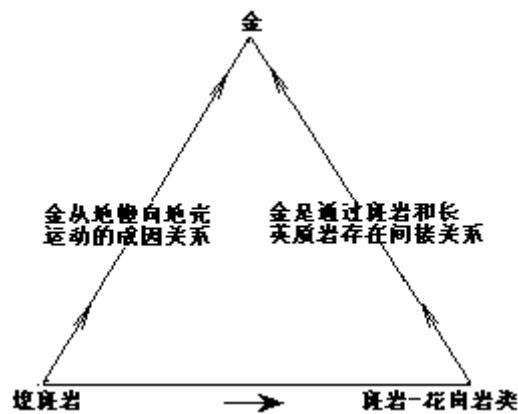


图 9 金矿床-煌斑岩-斑岩-花岗岩类成因三角图解

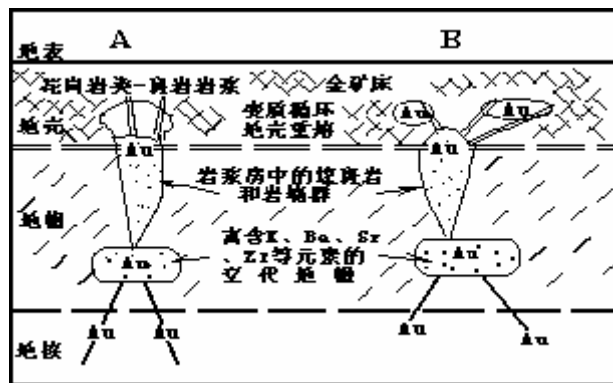


图 10 一个能够解释中温热液金矿床的煌斑岩与长英质岩浆作用之间关系的模式示意图

端元组分，在 A 和 B 两部分，来自地核或地幔深部的交代流体产生了富含大离子亲石元素的地幔源使得地幔重熔产生了煌斑岩岩浆。在 A 部分，这些岩浆与地壳物质相互作用产生花岗岩类-斑岩岩浆；在 B 部分，它们开始形成变质或大气降水循环体，其中金从煌斑岩中被淋滤出来，然后再按变质模式演化。各个阶段的深度或者图中所示的与模式的表述无大的影响有关煌斑岩成矿的观点曾经成为很时髦的观点被推广，特别是脉岩成矿论的积极支持者。现就相关的否定意见，摘要如下：

①脉岩或者岩墙导致围岩膨胀的证据（R 法尔明，1941）：法尔明在解释加利福尼亚州的格拉斯谷含金石英脉与脉岩证据所导致现象的描述“岩石遭受构造变形作用导致产生断裂和次级裂理仅具轻度的扩容特点，反映出它们形成于深部环境。含金石英脉和火成岩岩墙包含有包体角砾；并分布在具有高度扩容特点的裂理内，这些特点表明这种裂理可能是深部岩石经流体贯入膨胀所造成的，但由必须与近地表的裂隙存在紧密联系。脉间和岩墙间在裂张扩容时产生的褶皱表明所处的环境不是开放裂隙环境。在石英脉中发现的大部分构造都可与在相近规模的岩墙中所发现的构造相类比，因此两者具有相似的定位机制。”

②煌斑岩和其它基性岩在成矿中的作用（E.C 莫尔 1940）：煌斑岩曾经是很多研究者们颇感兴趣的问题，据观测结果认为，有的矿区存在煌斑岩，但是有的矿区没有煌斑岩，不仅有矿而且是大型的；所以煌斑岩与金矿床之间的关联是不必要的。既然脉岩可以沿着构造侵入，那么为什么矿脉不能够沿着同一断裂形成呢？所以脉岩与矿脉之间只存在构造关联。

上述这些很早就为人们所关注的煌斑岩摘引至 R.W Boyle 所著《金矿开发史与矿床成因》（1984）。从中不能看出，尽管煌斑岩与金矿床的关系为人们所关注，但是多数是持否定观点的。笔者认为大多数煌斑岩并不是与含金刚石的“钾镁煌斑岩”同源的，并且两者产出的大地构造环境截然不同。通常所说的煌斑岩广泛出现于各种地质环境中，甚至没有任何岩浆岩出露的沉积岩区亦有煌斑岩岩脉出现，并且大多数与深断裂存在一定的时空关系。而钾镁煌斑岩则必须产出与地体的边界深大断裂部位（如贵州省南西部）。因此，一般的煌斑岩常常是“断熔”产物，而钾镁煌斑岩则可能是地幔的派生产物。实际上，煌斑岩成矿论者并没有展示给人们钾镁煌斑岩遍在的实例。正如在数学上面 $A=B$, $B=C$, 则必然是 $A=C$ 的推理，实际上 $A \neq C$ ！就是说一般的煌斑岩不是钾镁煌斑岩。我们十分赞同断裂构造的空间关系，以及没有煌斑岩的矿床大有存在的实事表明，煌斑岩与金矿床之间不存在必然的成因关联。

II 矿源层观点

金矿床显示出成矿的时空性和层控性比较明显，例如太古代绿岩带中的金矿床大约为 12000t 占世界总储量的 20%：北美洲的阿比蒂比绿岩带、南美洲巴西、印度和非洲津巴布韦绿岩带等拥有世界级金矿床和金矿矿集区。在我国有 3000 多个金矿产于绿岩带中。对此一些学者提出了如下认识：

①A.A Keays 提出“地壳与上地幔的接合部—太古代绿岩带是金矿的矿源岩”（1982）；特别是强调了此期火山喷气（喷流）作用，为金矿床的形成提供了物源；很多人赞同此观点，并视之为初始矿源岩，较新时代的称之为衍生矿源岩（马起波，1994）

②绿岩带中广泛发育的剪切带成为了绿岩带中的控矿构造；

③绿岩带不仅能够成为本身金矿床的成矿物质来源，同时也是提供砾岩型金矿床（砂金矿床）以及与沉积作用有关的其它类型金矿床提供了成矿的物源。

III 地震与金矿床

成矿的动力学问题

韧性剪切带型金矿一般形成于高角度（50-80°）的逆冲断层。根据应力分析，在水平挤压体制下，既不利于这种断裂的形成，也不利于其活动。R.H.Sibson 等对断层的成因和运动体制进行了研究，提出的断层阀模式，并受到广泛地关注。

(1) 高角度逆断层的成因

R.H.Sibson 等认为这些高角度逆断层是先存构造的重新活化结果，可能的情况是：在拉张体制下形成的高角度正断层，当区域应力场转变为挤压时变为高角度逆断层；它是在区域应力方向作用下，初始的低角度逆断层逐渐变陡，进而转化为陡直的走滑断层。

(2) 高角度断层的运动—断层阀模式

R.H.Sibson 等认为，在水平挤压体制下流体的作用对于高角度逆断层的活动是至关重要的。大型韧性剪切带在深部为韧性变形，其运动方式是连续的或称为非地震的；在浅部为脆性变形，地震性滑动，地震成核作用发生在脆性层的底部即韧脆性转换带，它对于上部的地震滑动起到控制作用。R.H.Sibson 等的断层阀模式阐述了韧脆性转换带的断层滑动机制。

(3) 断层活动与流体活动状态

破裂前。断裂处于愈合状态，对于深部来的流体而言，上部地壳起到盖层作用。伴随流体的持续涌入，流体压力逐渐升高，当达到静岩压力时，水平裂隙张开。

地震破裂。当流体压力超过静岩压力负荷时，累积的剪应力将导致陡直脉剪切破裂。破裂过程首先是在地震带的底部发生地震成核作用，然后产生直达地表的地震破裂，同时产生大量的渗透性裂隙，破裂的产生使剪应力得以释放。

破裂后流体充填。由于流体压力降低，剪裂隙及其次生裂隙中将发生流体充填作用，并在其中发生矿物沉淀作用。

自愈合。流体的充填和矿物的沉淀作用，使得剪裂隙逐渐愈合，渗透率降低。

再循环。破裂愈合之后，流体压力和剪应力再次累积，进入下一个循环。R.H.Sibson 等还推断，由于静岩压力与静水压力的差值为 17MP/km，因此，在 10km 处因断层地震破裂引起的流体压力降低是巨大的，它必然会影响到石英及其它矿物的溶解度，是导致矿物沉淀的重要因素。另外，该类矿床的流体一般为富含 CO₂ 的低盐度溶液，压力的突然降低必然导致溶液沸腾或不混溶作用，从而引起碳酸盐沉淀。

韧性剪切带是地壳深层次（10-15km）普遍存在的构造形式，是相对狭长的（长宽比>5:1）被低有限应变状态岩石包围的面状高应变带，它具有强烈的塑性流变及剪切应变的特点。特殊的浅层次“高温低压”类型的韧性剪切带可以在地壳浅部（约 5km）出现，其与地热异常有关，往往与花岗岩侵位同时发生。韧脆性转换带的温压条件：10-15km、0.25-0.4GPa、250-350℃。

地震带也是金矿带，换言之金矿带与地震带的空间同一性使得人们格外关注。例如 1988 年在加拿大的北极考古挖掘时，发现了地震能够使金富集成矿。R H Sibson (1988、1994) 多次进行了相关的论证，他指出：很多金矿床受到陡倾的断裂带控制，构成陡倾的“断层脉”，并且具有相当大的深度（2km）依据摩擦理论和地质实际，高角度逆冲断层起着促使流体压力从静岩压力向静水压力（图 11）发生周期性转换的“断层阀”作用。由于这种“断层阀”作用引起了不连续的流体压力的重新积累→流动的波动过程（脉动）是矿床形成过程中不可或缺的关注要素。根据流体包裹体估算的温度为 300~400℃ (F.Robert 和 Kelley, 1987) 与氧同位素（蚀变岩）得出的温度 (R.Kerrick, 1988)，以及与依据绿片岩相测得的变质温压条件相吻合；石英脉的压力范围为 2-4kbar (Robert 和 Kelley, 1987)。

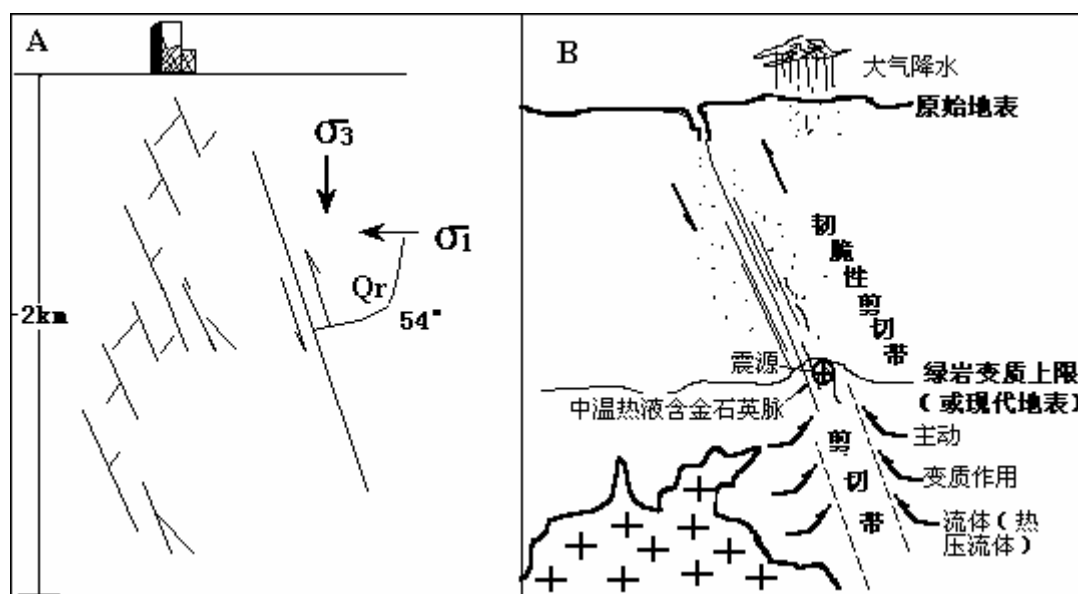


图 11 产于剪切带中的热液环境石英脉型矿床矿脉构造示意图 (F.Robert, 1983, R.H.Sibson, 1988)

关于深度。众所周知，通常的浅源地震的震源深度为 10~15km，而且与绿片岩相的变质压力是相当的 (R.H.Sibson, 1983)。由于非震剪切带形成的糜棱岩缺乏断裂裂隙间歇性期间的连续性，因此大多数石英脉型金矿床的控矿剪切带形成于大陆环境（韧性变形层次）的高角度逆断层，并且该断裂裂隙系统的根部是石英脉型金矿赋存的部位（图 12）。

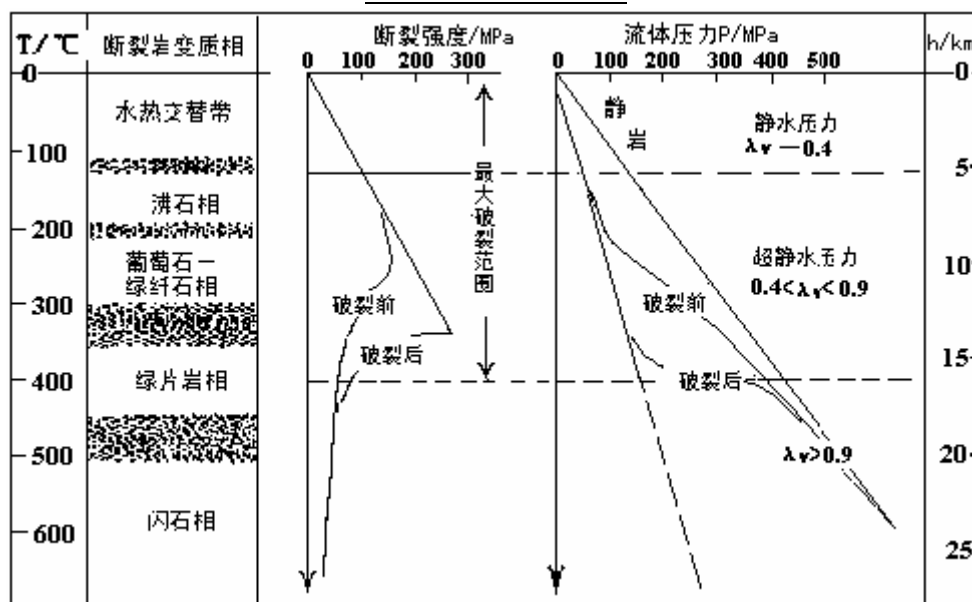


图 12 断裂带中流体状态的垂直分带性 (据 R H Sibson, 1994)

地震是诱发断层阀开放的原因，其地震破裂幕具有如下的主要旋回：

破裂前旋回：发震带（形成于地下热流体库的顶部的不透水层）下面的流体压力当其积累并到达超过静岩压力时，就会打开压力系统中的早期断裂；发震断裂破裂旋回（图 13）：流体压力一旦超过静岩压力，积累的剪应力可能导致底部附近的断裂产生破裂，从而集中形成了有关地震破裂。它将强烈地向上和向下扩展至地表，并导致地压热流体库中的流体沿着破裂裂隙涌入，即进入破裂后的流体排放；由于流体的突然降压即由静岩压力状态转变为静水压力状态，就会导致成矿物质从流体中沉淀的作用（在透镜状的扩容区段沉淀）。

与现代地震破裂比较可知，在震后幕的整个时间内（可能是几个月），流体排放逐渐减少。应该说在全部成矿过程中由于成矿部位是地震的多发部位，所以必然会出现多期次的地震活动，这种间歇性的地震活动过程就导致了成矿的期次和过程。

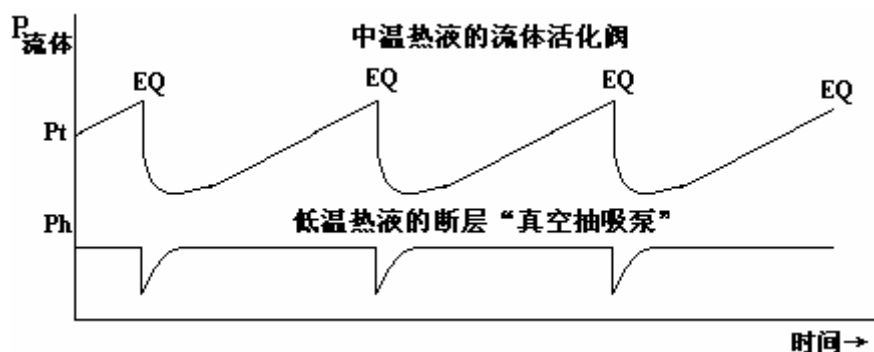


图 13 断裂阀 机理图(据 R H Sibson, 1994)

推测的由“阀”造成的流体压力波动及与连续地震破裂幕（EQ）有关的泵原理；Ph 和 Pt 分别表示静水的流体压力和降压流体状态的压力。上部曲线与发震系统底部的中温热液含金石英脉形成的环境有关；下部曲线与扩容断层凸凹面附近的压力系统有关

笔者的思考：Sibson 等人提出有关地震、断层阀和真空抽汲的原理及其脉动理论是令人

信服的，但是，在论证动态演化过程时笔者以为有一些令人难以理解。通常情况下，地震的震源都在 20km 以下的韧性变形带，流体怎么能够向上运移呢？又怎么能够达到流体的压力超过静岩压力呢？他的前提条件是液态矿源处于下部剪切带之下。否则的话，中温热液型金矿床于浅成低温热液型金矿床之间的间隔是难以想像的。实际上，地震引发的喷流现象并不是深部的水，而主要是地下水或者说是浅源水。所以，Sibson 的结论是值得商榷的。根据笔者的上述思考认为，成矿事件的充要条件与所有的金矿床的成矿条件是一致的，即只有在地壳抬升的条件下，才能够进入水热交换带成矿，也就是说，成矿的最大深度是 5km。

IV 动力变质成矿-Н.П. Брмолаев (1986)

彼德罗夫（Петров, 1974）通过对叶尼塞地区含碳质页岩地层中的含有石英脉金矿仔细研究之后，得出的结论认为：金矿化的形成取决于二个基本要素①含金岩系中的金含量；②含矿岩系中的裂隙带发育程度，而且裂隙带的同生断裂的形成与其伴生褶皱的次级褶曲有关；断裂或裂隙中的岩石“化学分异作用”是否发育。其中破碎带的化学分异作用是一种典型的“热液成矿作用”，而与岩浆活动无关的动热（热液）化学分异，其在化学反应动力学和物质转移方面很类似于变质分异，但在时间上不同于变质分异，而是出现在变质作用的起初或者之后。

Н.П.Брмолаев 在上述研究的基础上，针对两个不同的变质/动热变质带中的浸染状矿化进行了再次研究结果表明：①在黑色页岩中的浸染状硫化物矿化，金存在着两种附近程度。即在早期的低级动热变质化学分异条件下，页岩金的富集是以早期形成的硫化物矿物（相当于成岩期）表面为主，形成了低品位（ $n \times 10^{-6}$ ）矿化；晚期阶段金的矿化富集是在热液流体的参与作用下形成的，这就是说金将热液（高盐度、富K、CO₂、贫H₂O）作用发生重新分配形成富矿石（ $>10 \times 10^{-6}$ ）；②上述两种矿化在空间上表现为早期在上部的浅环境，晚期在深部。两者具如表 II-1 所列的特征。

IV 有机质与金矿化

表 1 含碳质碎屑岩型金矿成矿类型 (Н П Брмолаев, 1986)

	浅变质浸染状贫矿	中等动热变质浸染状富矿
区域变质类型	向绿片岩相过渡的沸石-绿帘石相(沸石-石英，钠长石-石英呈平衡条件)	绿片岩相，(至更高级亚相)：石榴石和黑云母亚相：石英-绢云母-绿泥石-钠长石平衡条件
矿源岩岩性	晚里菲期的碳质千枚岩、粉砂岩、砂岩互层	中晚文德期的似冰碛砾岩、细砾岩、碳质云母页岩、千枚岩、含白云岩、灰岩透镜体和薄层杂砂岩
构造特征	发育的断裂，并切割地层	褶皱+顺层和斜交的断裂
蚀变	断裂内云母岩、少量的铁的硫化物、砷化物。围岩为弱绢云母化($1 \sim 3 \times 10^{-1} - 6$)	长石化、硅化和碳酸盐化(铁白云石和白云石集合体)，具铁的硫化物、白钨矿、钨锰铁矿；据两个矿化世代，贫→富矿化
矿带规模	数十~>100m 相当深	同左
世代	早期绢云母化-黄铁矿化、晚期碱交代、硅化，少量碳酸盐化和粘土化	第一期贫矿化；第二期再活化富矿化
成矿温度	200~180℃，140~120℃	一期：320~220℃ 280~260℃；二期：320~300℃

成矿流体组成	H- 201500~1600μg/g、CO- 220~25ml/kg、 CH- 40.02~0.4ml/kg、碱性 Cl ⁻ -1.0ml/kg(H- 2O)	H- 201900~850μg/g、CO- 22.2~17.8ml/kg、 CH- 4?0.01ml/kg(H- 2O)
	区域变质+构造：叠加成矿	区域变质+构造：叠加成矿

曾允孚等（1994）指出：黑色岩系共有的地球化学特征是，金的背景值很高，但是与之伴生的元素各异。例如白龙江复背斜古生代地层中金的背景值和丰度分别为 1.95×10^{-9} 和 2.1×10^{-9} ，而拉尔玛赋矿岩系的太阳顶群金的背景值和丰度分别为 21.06×10^{-9} 和 30.70×10^{-9} ；据研究表明，矿源层中的“干酪根”是金的重要载体之一。根据对拉尔玛金矿的相关研究得出结论认识：拉尔玛金矿中的有机质来源于海洋生物为主，属于腐泥型古菌藻类及其衍生的有机质的吸附，并且吸附是造成金属元素初始富集的主要控制因素。有机质丰度及地球化学分析表明，容矿地层不仅是造成金属元素的矿源层，而且还是生油岩，它构成了金-油的双源层；有机质演化已达到过成熟或超成熟阶段，矿体和开始以伴生沥青和甲烷为特征；黑矿围岩中干酪根和沥青受含矿热液作用裂解产生低分子烃类是促使矿质沉淀成矿的主要机制；成矿溶液与油气运移方向一致性表明，导致金矿床在空间上与古油藏共生，二者在“生储盖”组合上存在着明显的相关性，也为该类层控金矿床的普查提供了预测方法和依据。

基于目前的找矿重点属于含碳质碎屑岩系，其中有机碳成为了找矿和勘探的重要依据，为此引述李志锋等人（1994）的《地壳中有机碳及其在成矿中的作用》一文相关内容如下：

①有机碳的分类与研究方法

沉积物中的有机质可分为可溶性有机质和固态有机质两类。沉积物经过地质作用（成岩、变质）小部分转化为石油和天然气之外，大部分为不可溶性有机质（如煤、干酪根和固态沥青）固定在古代沉积物中。深部烃类具有两种来源，除了由干酪根裂解作用形成的烃类之外，还包括少量由活的生物所合成，并被捕集于沉积物中的是几乎不发生变化的烃类和有关化合物的一些脂化合物的游离分子（图 14）。这些特殊化合物是化石分子或称为地球化学化石，又称生物标志物。通过对比它们的生物前躯体，可以推论其成因，并提供重要的地质、地球化学信息；可溶性有机质中生物标志物的研究是地质学家和地球化学家们非常感兴趣的课题。

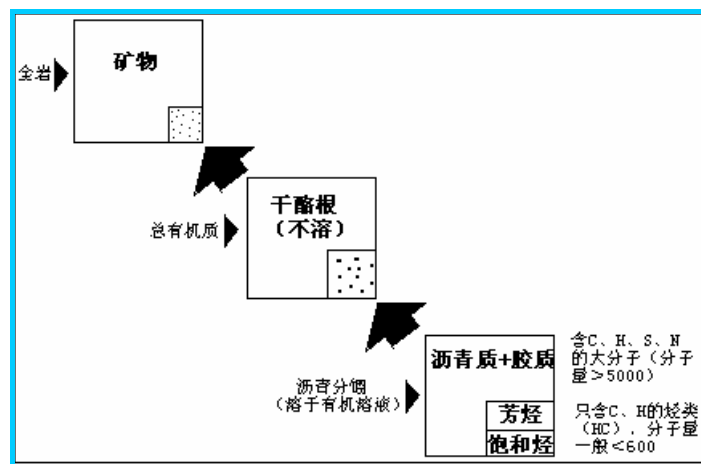


图 14 古代沉积物中的分散有机质组分(据李志锋等，1994)

煤和干酪根的生成方式有明显的差别，干酪根主要在生油层中呈细粒分散状，并且和矿物基质聚集混合，特殊石油化合物的主要前躯体物质，是与金有关的有机质。

干酪根含有大量的有机质、重金属、硫化物和二硫化物的原因在于它是由 H、O、N、S 的碳骨架物质，不是均一的分子，而是分子结构相似或各不相同的次级单元的集合体组成的；它以含有缩合芳香环碳物质为核心，包含直链-支链的脂肪链，和含氧或含硫的各种官能团，在干酪根网络的外缘有大量的取代基，通常也包含各种羰基团，与芳香核和杂原子相联，另外，脂肪链与官能团相互也可以交联。因此，干酪根像一个大分子筛，并且具有分子筛型的孔穴结构，这些孔穴可以截留上述物质的缘故。

干酪根的类型是按照生物前驱、化学性质及生油的潜力不同划分为四种类型：I 型干酪根主要具有脂肪结构和少量芳香环，其原始 H/C 比率高，对形成石油和天然气的潜能也最高，但在自然界里较少，局限在一些缺氧的湖泊和一些独特的海洋环境中，由富类脂化合物的藻类组成；II 型干酪根含有较多的芳香环和环烷烃烷，其 H/C 比率及形成油气的潜能比 I 型干酪根低，但相对还是较高的。它们主要由还原环境中的海相有机质形成，如藻或浮游生物残骸等。II 型干酪根一般与具有中等到高硫含量的、在还原环境中沉积的海相腐泥有机质有关；III 型干酪根主要具芳香结构化合物及含氧官能团，只含少量的脂肪链，通常由腐植质的、不透明的煤化物质组成，来源于陆相高等植物。其 H/C 比率及生油潜力均较低，在深部仍可生成大量天然气，而它的 O/C 比率比其它两类干酪根均较高；IV 型干酪根有机质残余物具有异常高的 O/C 比值及异常低的 H/C 比率。它的来源多种多样，包括森林燃烧、陆表风化作用及生物氧化作用等使有机质产生再循环及交代作用。也可能代表已被侵蚀或热液改造的早期沉积有机质的残体一般来讲已经没有生油能力。

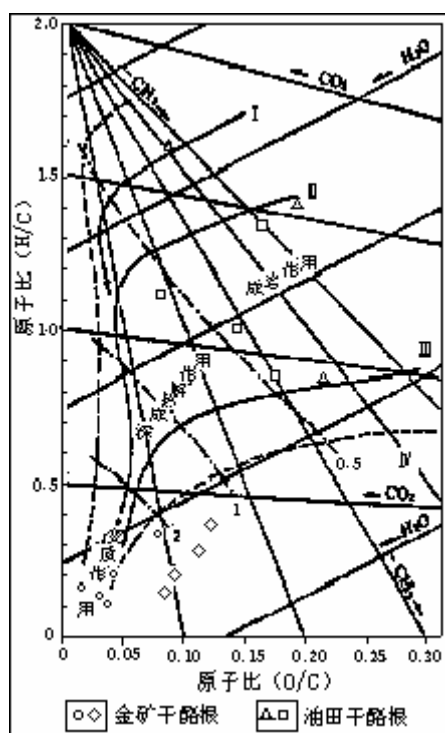


图 15 Van Krevelen 图上干酪根演变图(据李志锋等, 1994)

图 15 表示四类典型的干酪根的元素组成和在 H/C-O/C 图解中的位置。图 15 还给出了 9 个金矿干酪根和若干个油田干酪根的投影位置。从中可见, 金矿干酪根明显不同于石油中的干酪根之处在于经历了较高的温压作用(深部裂解作用, 特别是变质作用), 造成了 H/C 和 O/C 比值均低。

(2) 有机质与金属矿床的矿化关系

从图 16 中给出的国外几个矿床的干酪根的组成表明: 派恩波斯特和苏斯堡矿床(均属于密西西比河谷型铅锌矿矿床)属于 I 和 II 型干酪根, 透明度成熟度相对较低(在成岩作用和深成热解作用阶段); 无论是在还老地层赋存的(维特瓦特斯兰德金铀矿床), 还是热液交代的(布罗肯希尔铅锌矿), 其 H/C、O/C 比值均很低, 而且其干酪根类型也分不清; 发现用酸不能溶解的重晶石的干涉, 其影响是 O/C 比值出现异常高值(如盖斯河矿床, 属于密西西比河谷型铅锌矿矿床)。

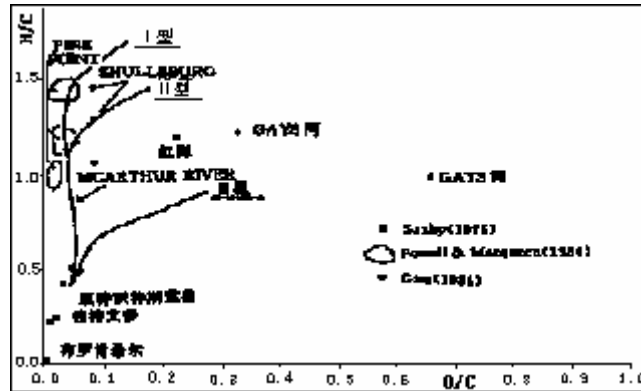


图 16 国外某些与金属矿床伴生的有机质充分在派氏图解中的位置 (据李志锋等, 1994)

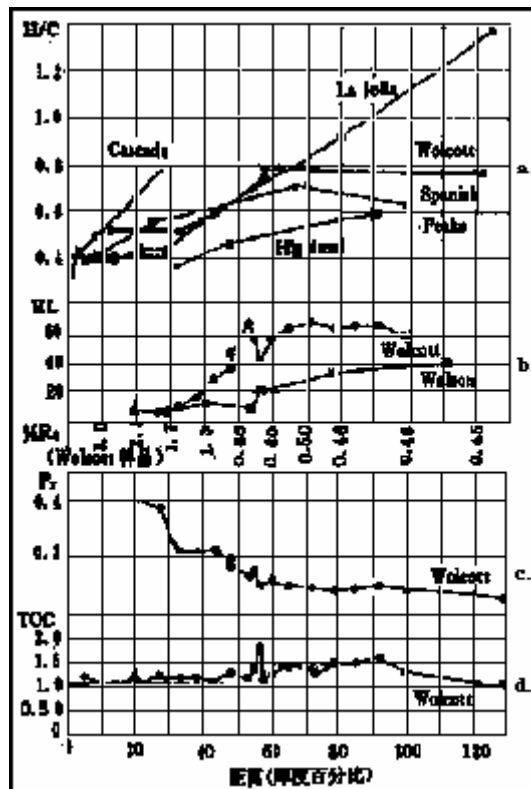


图 17 美国科罗拉多距 Wolcott 岩脉接触带距离的干酪根变化曲线图 (据李志锋等, 1994)

含油层干酪根与卡林型金矿的干酪根对比, 发现两者之间金铀显著的差别。含油层干酪根是产于第三纪油盆地泥岩和砂岩中, 形成时代较新, 属于未成熟阶段, 其 H/C 比值高 (>0.84)。我国卡林型金矿多数产于泥盆系-三叠系, 形成时代较老属于成熟阶段, 其 H/C 比值较低 (<0.359)。两者的 O/C 比值相近但多数是前者高于后者。就演化程度而言, 含油层干酪根多数相当于 II 型干酪根, 处于成岩作用和深成裂解作用阶段, 金矿则属于变质作用阶段。

(3) 与热源接触带的距离的关系

现以美国的科罗拉多 Wolcott 岩脉的接触带为例, 伴随与岩脉的接触带距离增加 R_0 有规律地减小, H/C 比值以及氢指数增大, 岩石中的总有机碳还老变化不大, 即 TOC 基本上不变, 而姥鲛烷 TR 含量却是有规律地降低。说明伴随火成岩的热比值作用的增强, 干酪根热解成为烃类 (碳氢化合物) 的数量增加, 从而使其 H/C 和 HI 有所降低 (图 17)。

有关火成岩对煤岩的热变质作用的强度是通过测定干酪根镜煤反射率 (R_0) 这种热比值作用, 根据试管温度与 R_0 的关系曲线, 推断岩石的最高温度 (图 18、19)。

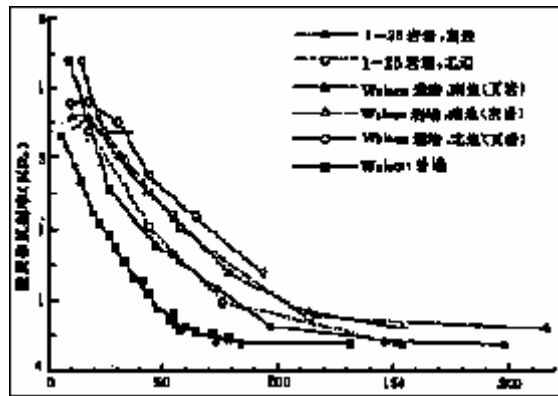


图 18 镜煤反射率接触带距离变化曲线图 (据李志锋等, 1994)

横坐标为与接触带的距离, 以岩石厚度百分数表示

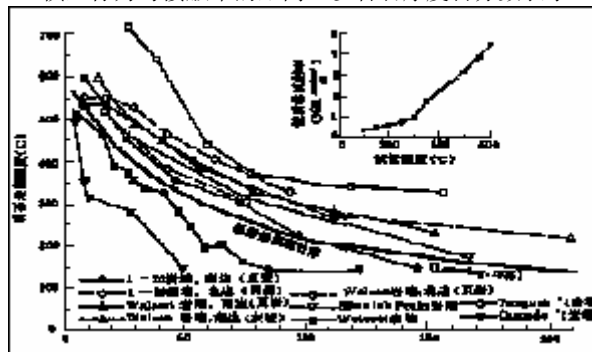


图 19 根据镜煤反射率和试管温度推断岩石最高温度 (据李志锋等, 1994)

横坐标为与接触带的距离, 以岩石厚度百分数表示

上述以及结果表明, 温度对流体的作用在于导致其裂解, 或者说是流体发生分异和重新组合成为新的体系的原因之一。

(4) 有机碳的对金矿的成矿的作用

以卡林型金矿研究结果说明如下:

碳质金矿石特征：在卡林型金矿床的氧化带深部均见有碳质金矿石存在，在碳质主岩中存在没有风化的浸染状细粒黄铁矿，矿石从黑色到浅灰色，有机碳从 0.n~n%。镜下观察表明，有机碳沿层面呈薄透镜状，或呈 0.2mm 的斑杂状产于重结晶粉砂岩中，或呈细粒浸染状分散在粉砂岩、隧石和白云质灰岩的基质中。这些有机碳的镜下颜色为中等灰色，据弱非均质性，不透明。种种迹象表明这些有机碳曾经为石油所迁移，它发生在晚期许多二氧化硅和重晶石脉形成之前、期间或之后，并伴随有黄铁矿和金的带入。沥青残渣充填在各种孔隙中。充填的形式包括：玉髓细脉中；重晶石细脉和岩石基质中；沿层理面呈透镜体充填；在泥质粉砂岩的细粒间隙中。根据矿物共生表明，石油沥青的再分布发生在矿化过程的 100~150℃ 条件下，其迁移作用是在热液对主岩沉积物中非晶态石油残渣作用的结果。在金矿化主期和碳氢化合物再分配之后，晚期热液仍以碳酸盐形式继续活动。由于老化和聚合作用沥青斑块发生挥发收缩裂解，随后和方解石一起充填在围岩的裂隙中。在内华达州古生代岩石中类似的固态沥青的裂隙充填现象十分普遍。

在含矿岩系的罗伯茨山组中镜下发现了原始化石残体，系类似于放射虫，并且已黄铁矿化和硅化。据此表明硅化和黄铁矿化发生在金的热液沉淀前或过程之中。1973 年 Wells 对碳质矿石的电子探针研究中发现金的富集部位并不是碳质，而是具有多孔状的黄铁矿，而且金与砷一起产于细粒的和草莓状黄铁矿中，少量富集在立方体的黄铁矿周边。其它矿物如粘土、石英和碳酸盐等亦含有少量的金。据扫描电镜观察，碳质矿石中的草莓状黄铁矿具多孔状，呈球形，由松散的黄铁矿晶体组成，几乎呈等粒状，粒径为 0.5~1μm 为主，晶体间隙 <0.2~1.0μm。另一类粗粒黄铁矿（10~100μm）呈立方体具生成纹，没有内部孔隙，金分布在边缘。红外分析表明有机碳质大部分已去挥发分，所含烃类很低；有机质主要由长链和中链的支脂肪和少量的芳香碳组成。主岩中的有机质为海相的腐泥，其焦沥青浓缩物在油中的反射率平均为 4%，表明石油的成熟度进入到干气期，经热裂变为甲烷为主。焦沥青浓缩物的元素分析（%）：C=81.072%，H=2.037%，N=1.493%，O=3.577%，属于无烟煤阶段。

综合研究表明，所含的沥青质主要代表着石油的残留物，这就是说其经受了热水的加热、挥发和迁移。金矿化在时空上和成因上与石油源的焦沥青的侵位有关。根据这些沥青质碳氢化合物在玉髓和重晶石矿化脉的结构关系，可推论其迁移性质。这些重烃已成为热液脉体的流体组分，它们部分来源于罗伯茨山逆掩断层上下盘古生代的含油灰岩、粉砂岩和硅质隧石岩。

总之，各类卡林型金矿床中的含碳物质源于石油的残留物，受热液作用而部分发生脱挥发作用和被搬运。金矿化的穹隆和断层区也是储油区，这些地区存储石油和热液。有机质残留物的存在显然有利于金的沉淀；在碳质矿石中，有机碳和黄铁矿对金的统计关系的结果尚不清楚如何作以解释，但金主要富集于草莓状黄铁矿中，少量在碳质中却是事实。这可能是

金矿成矿学概论

由于碳不是从热液中沉淀的，而金是从热液中沉淀的缘故。至于在主岩中碳对金的吸附在很大程度上取决于碳的成熟度，不过碳作为金属元素的捕集器是毋庸置疑的。

实验研究表明，有机碳和粘土质矿物是金的最佳捕集物，并以吸附态保存在沉积物中。而呈吸附态的金要比任何一种状态的更易于在成岩期呈溶解状态赋存于原岩的孔隙裂隙中，形成达饱和极限的微孔隙、粒间溶液。多角度的实验支持了这一认识：经酸性淋滤作用可使金被淬取出来(表 2)。从表 2 中可见，当沉积时，有机炭与粘土质以最佳形式富集水系中游离态金，而在成岩期或在热的作

表 2 金进入岩石、脱离岩石与有机碳关系实验

岩石中 C-有机含量(%)	进入岩石中 Au 的比例%	Au 从岩石中解离比例
	>95	C>0.74%，为≤53%
0.15~0.4	90~70	C??0.74%，96%
??0.15	80~5	去碳解离金

用下有机炭转变为无机炭(石墨)或者 $C_{\text{有机}}=CH_4/CO/CO_2\uparrow$ 时，金则从岩石中被释放出来并进入溶液中，构成了 $CH_4/CO/CO_2--H_2S(As)--Au(Ag、Sb)--H_2O$ 体系的成矿流体。当在深层构造作用下，上述成矿流体将发生迁移，汇聚于低压形变部位(扩容区)构成了成矿流体库。因此，对于发生褶皱的岩系，含金流体最易于进入的部位显然是背斜的核部，从而形成了背斜构造样式的成矿流体库。众所周知，富有机质的碳酸盐建造，如礁灰岩类、黑色岩系是形成 H_2S 的源，显然也是重金属(Cu、Pb、Zn)硫化物的初始富集最佳条件。因此，含碳质碎屑岩型金矿在空间上又常常与重金属硫化物矿床，尤其是铅锌和银矿呈伴、共生关系。鉴于包括银在内的重金属元素与金的地球化学性状差异，特别是溶液条件不同而出现成矿定位时的分离现象。众所周知，包括银在内的重金属元素易与卤族元素(尤其是 Cl^- 离子)形成易溶配合物，故在高盐度溶液中溶解，形成含矿流体；而金易与 HS^- 离子络合形成低盐度富气体的成矿流体。除初始岩性决定分离之外，造成金、银、铅锌矿床间在空间上分层次赋存的更主要的则缘于上述成矿流体性质的差异。

但是，对于低级变质岩区，有机碳并没有转化为无机碳时，可能在成矿时起到对沉淀金的捕集剂的作用，即能够以吸附的形式（表 3）。

表 3 我国西部某特大型金矿带组合样多元素分析结果表（据王明学，1999）

样号	样品位置	分 析 结 果												
		Au	Ag	As	Sb	Bi	Hg	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Fe	S 碳
①	3 线地表	5.41	0.1	0.61	299	0.50	1.17	17.5	38.6	41.7	10.8	34.9	3.06	0.18 0.08
②	3 线地表	1.72	0.2	0.73	113	0.42	0.88	30.3	44.0	80.0	16.1	18.4	3.90	0.28 0.07
③	7 线地表	0.54	0.4	0.66	22.1	0.22	0.83	29.0	59.3	82.4	19.7	32.2	3.98	0.22 0.07
④	7 线地表	0.66	0.5	0.79	19.1	0.30	0.67	30.9	49.4	71.2	17.0	23.9	5.21	0.35 0.10
⑤	3 线深部	16.3	0.3	1.07	10.4	0.22	0.77	24.3	30.5	56.9	12.6	29.4	5.18	2.28 1.78
⑥	3 线深部	0.12	0.2	0.029	179	0.46	0.21	34.1	28.7	89.6	25.9	37.6	4.72	1.14 0.94
⑦	7 线深部	1.18	0.4	0.19	20.9	0.42	0.38	35.2	33.2	82.0	22.4	26.6	4.00	1.52 1.14
⑧	7 线深部	6.34	0.8	1.06	25.5	0.23	0.63	35.0	36.6	94.0	25.0	29.4	5.10	2.43 2.22

有机炭可作为有机质的代名词。它包含有如下三种原生型：I 型干酪根来自微生物或藻类生物，多与湖泊相沉积环境有关。在化学组成上这类干酪根的结构主要为脂肪型，是一种富氢贫氧的有机质，其 H/C 比值高，为 1.65~1.42；O/C 比值低，为 0.050~0.085，在地质热事件作用下有最强的生烃潜力。II 型干酪根由海相生物(其中贡献最大的是海相浮游植物)衍生而来，与海相沉积环境有关。

有机质的 H/C 比值为 1.42~1.18、O/C 比值为 0.085~0.120，具高饱和的多环碳结构，有较强的生烃潜力。III 型干酪根来源于陆相高等植物，生成环境代表陆相沉积环境。其 H/C 比值最低为 1.18~0.92、O/C 比值最高为 0.12~0.16，主要为芳香族结构，生烃潜力最低，小于前两类干酪根。

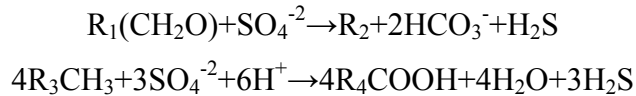
从沉积到成岩、成岩后期变化到沉积变质作用，相应地导致有机物死亡、生成聚合物-腐殖质、地质聚合物-干酪根直至半结晶、结晶成石墨。引起上述变化的主要因素是热作用。在热作用下，有机质的分子链不断地被裂解，长链变短链、环链被断开，侧链、分支链及各种官能团被断裂，C、H、O、P、S、N 等元素从有机主分子上脱离、丧失，重组为 H₂O、H₂S、CO、CO₂、N₂、H₂ 以及 CH₄ 等小分子烃类化合物离开有机主分子母体，最后只有碳残留下来以稳定的石墨结晶态，且标态已达绿片岩相的条件。因此不难得出与之相关的含金流体中不仅有丰富的气体，而且应存在有各种烃类。

关于碳酸盐类沉积岩为容矿岩石的铅锌硫化物矿床的成矿作用。地层或者说海水硫通常以 SO₄⁻² 即重硫(³⁴S)的形式为主要来源，并转变为硫化氢成矿。这一转变被认为是通过两种方式实现：①生物还原作用：即有机质作为硫酸盐还原细菌的营养基，保证这类微生物生存与繁殖，从而导致硫化氢生成。根据生理学、生态学及生物化学原理，硫酸盐还原为硫化氢的细菌为严格的厌氧-异养型微生物，其生成繁衍的最佳温度不超过 100℃。它们赖以生存的营养基主要源于沉积物中的各种有机化合物，如醋酸、乳酸、具有较长链的脂肪酸以及芳香族化合物。微生物则有选择地、有序次地降解有机化合物，进行新陈代谢。次序是：正构烷烃→支链烷烃→异戊间二烯烃→含有母质构型甾烷→藿烷→重排甾烷→孕甾烷→三萜烷→甾烷。微生物还原实验证实了上述生化作用(Petra 等，1994)：



上述实验表明，一种脱硫弧菌种在 55~65℃，PH 为 6.8 时，与癸烷 C₁₀H₂₂ 反应，结果每 1.5g 分之癸烷消耗 1L 培养媒介，可生成 11.3mg 分子 H₂S；非生物还原作用鉴于多数矿床成矿温度大于 100℃，故生物作用的解释就显得无能为力了。对 MVT 型矿床研究发现了烃包裹体，故有人(Barten, 1967)提出了硫酸盐通过有机质或 CH₄ 发生热化学反应作用；Rye 等(1981)对澳大利亚北部的 McArthur Aiver 矿床中贱金属硫化物形成温度为 100~260℃ 的解释认为，这些硫

化物是通过主岩中的有机质与溶液中的 SO_4^{2-} 发生非生物氧化还原反应生成还原硫-硫化氢。加拿大西北地区的Pine Point铅锌矿床，是在大于 100°C 条件下通过地层中的沥青类有机质与硫酸盐发生热化学还原反应，生成硫化氢而导致铅锌硫化物沉淀成矿(Powell等, 1984)。非生物热化学反应可能为：



式中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 均为大分子有机化合物。实验表明，在温度逐渐升高，还原剂含量加大，在有 H_2S 作为接触剂和粘土作为催化剂条件下，上述热化学反应速度加快。

⑥含碳质金矿床的伴生元素特征

众所周知，与岩浆熔离作用有关的铜镍硫化物矿床以富集Cu、Ni、Co、Pt、Au为著称，与本矿床一些元素(尽管含量低却是十分显明)很相像。对此，显然不能运用岩浆和幔源理论解释，只能，而且必须依据本区地质实际即与含碳质的复理石沉积岩系相关金矿加以说明。据有关资料揭示表明(高振敏等, 1998)黑色岩系是Cu、Ni、Co、Pt、Au的富集岩石。如美国内华达州黑色岩系中铂、钯含量可达 500×10^{-9} 、澳大利亚的加比卢卡铀矿床中，钯的含量远远超过工业要求。故黑色岩系往往是基性超基性元素富集源岩和这类元素在低温条件下超常富集的岩类，这类岩石在国内外均分布广泛。如加拿大育空地区泥盆系、波兰蔡希斯坦(Zechstein)地区二叠系、美国阿克拉荷马州密西西比系、内华达州泥盆系、印第安娜州泥盆--密西西比系和宾夕法尼亚系均含有较高的基性元素和铂族元素的黑色岩系；在我国贵州、湖南、湖北、江西、浙江以及秦岭地区等，并在此岩系中发现了镍、钼、钒、钴、铜、铅、锌、金、银等金属矿床。最值得一提的是"兰德"砾岩型金矿床中所具有的元素与矿物组合也具有与黑色岩系极为相近之处。众所周知，该矿中的铀、钍、稀土金属，还有鲜为人知的镍黄铁矿、毒砂、硫钴矿、辉砷钴矿及重金属硫化物等非岩浆成因的"岩浆"矿床中的专属矿物(R W Boyle, 1984)。通过广泛的对比不难看出，金矿石中富超常元素与矿物组合，也就成其为怪而不怪的现象了。

此外，我们从上述一系列反应式中，能够获取成岩期的重要信息：有机质不仅仅能够生成硫化氢，并且表征了硫主要以羰基硫的形式存在于流体中，从而为铁离子和金的配合物的形成提供了物质条件。这就是说，铁能够形成羰基铁氢钠配合物 $[\text{FeNaH}(\text{CO})_4]$ 和金可以形成羰基硫金配合物 $[\text{Au}[\text{HS}]\text{CO}]$ 。

V 关于液态矿源问题

关于地壳中液体矿源的初期理论的提出是见于W S Fyfe等人的著作《Fluids in the earth's crust》(1978)，在书中首次提出了“水床”(Water Sill)的概念。作者指出，在地壳的不同深度层次内存在着若干个由相对不透水的泥岩、页岩、蒸发岩或其它属性的岩石组成的隔档

层封闭了其下部的流体，并且使之在静岩压力条件下的聚集形成地下‘湖’和“水库”（Water Bank）；同时指出，在中、下部地壳变质岩系水/岩作用强度的差异可以改变岩石的渗透性而形成相对不透水的隔档层（如图 20）。笔者认为，作者的这一思路很可能开创了热液成矿新认识的先河。

地壳中不同层次的流体库会如同石油和天然气藏那样赋存于地壳中，对此 Cox 等人（1983）提出并强调了导致静岩压力产生的区域性展布的低渗透率的阻挡层的存在并不是单一的岩性作用，而是变形作用的结果。他还指出，影响流体聚集和循环的两个重要因素是渗透性和流体压力梯度的变化，可以运用描述流体在孔隙介质中通量的 Darcy 定律表示为：

$$Q_i/A = K_{ij}/\mu \left(\frac{\partial P}{\partial X_j} \right) - \rho g \left(\frac{\partial Z}{\partial X} \right)$$

式中 Q 为同一方向的流体流经横截面积 A 的流动率； K_{ij} 是渗透性张量； μ 是流体运动学粘度； $\partial P/\partial X_j$ 为流体的压力梯度； ρ 为流体密度； g 为重力加速度； Z 为垂直方向，流体迁移的几何形态特征取决于侧向和垂向的流体压力梯度的变化。在缺少漂浮力的条件下，静水压力梯度 $dP/dZ = \rho_w g$ （ ρ_w 为水的密度）并提供流体垂向迁移的驱动力。超静水压力梯度（ $dP/dZ > \rho_w g$ ）驱动流体向上迁移；低于静水压力梯度（ $dP/dZ < \rho_w g$ ）时导致流体向下迁移。由此可见，流体的压力梯度是流体库在不透水层以下构成分层赋存的动力学机制。故 Cox 等（1990）认为区域变质变形作用发生期间，地壳不同深度层次发育有低渗透性的压力封闭区（层），它们自身构成了流体分隔的区段，从而在空间上将地壳中的流体分隔成为若干个流体体系。超静岩压力的流体压力和水压裂隙就可能分隔区间的上部层次达到或形成流体库（图 21）。

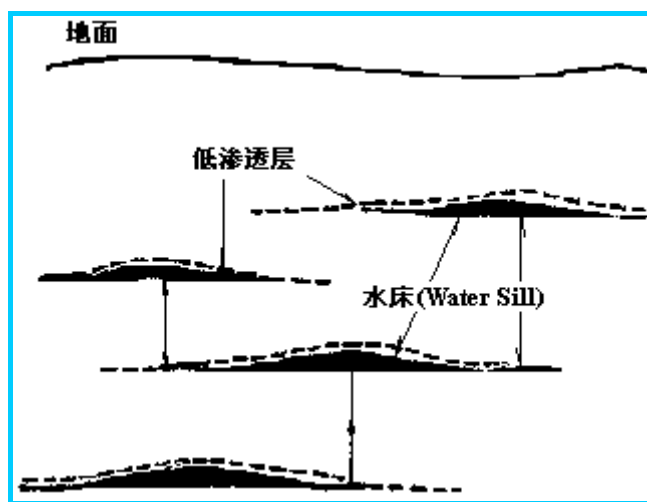


图 20 水床分布示意图(据 Fyfe 等, 1978)

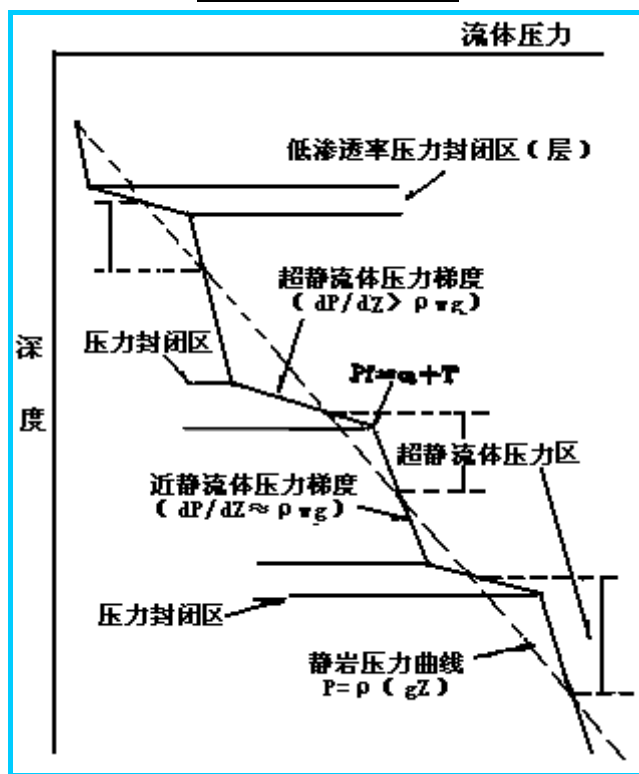


图 21 地壳不同深度流体分布图(据 Cox 等, 1990)

流体库之间的间隔变化于 100~几 km 之间, 这主要取决于岩石强度的大小。在超静水压力分隔的间隔区内, 由变形作用控制渗透性, 渗透性的增加可能是促进流体迁移的关键因素。Cox 特别强调指出, 渗透性压力封闭区的形成(即流体库存储区)是由变形作用产生的创造孔隙度和破坏孔隙度之间的竞争所造成的, 而不是岩性的特点所决定的。因此, 流体库的位置取决于区域变形史。

地壳中不同层次的流体库的存在是以那些近水平的滑脱带的高渗透性构造形变区, 要比围岩的渗透率高出几个数量级(Screaton, 1990), 它对地震的纵波响应方面表现为一个低速层, 并且足以构成地震波的反射面。Fisher 等(1996)的资料表明, 滑脱带的流体压力相当于静岩压力, 这就说明了滑脱带中的流体在没有外来应力作用的条件下可以被保存在其内, 同时也暗示了那些处于不同的地壳层次的地震反射面即可能是富含水的滑脱带或高渗透性区。

在上述地壳不同层次存在流体库的研究成果基础上, 人们特别关注地壳中流体的赋存条件及其状态、组成的研究。实际上, 此项世界性的成矿流体的研究工作始于对现代成矿流体的研究方面(1960~1970), 即现代地热成矿体系的研究; 特别是通过超深钻井的现代流体和深层次的古流体的研究为“液体矿源”的成矿理论提供了具有说服力的证据。

VI 科拉超深钻井的古流体研究之一——液态矿源说(E A 科兹洛夫斯基, 1984)

有关科拉超深钻井是 1970 年开始实施, 孔深 19km, 历经 15 年。在全面地质地球化学研究基础上, 揭示了 5km 以下不存在地下水的交换作用, 据此认为 5km 以下是初始的成矿流体形

成部位，换言之是液态矿源的存在部位（表 4）。从表中的自生的流体包裹体主要参数可知无论是均一温度（Th）、盐度、温度梯度，还是溶液的成分和性质都是不是变质程度的增高和深度的加大均表现为有规律的变

表 4 科拉超深钻井不同深度流体包裹体特征(据 E A 科兹洛夫斯基等, 1984)

交代线, 主要阶段			同相交代作用早期阶段	围岩注		局部交代作用用的晚期阶段	压碎带	晚期阶段包裹体中的流体包裹体
深度 (m)	正 用	交代岩, 同相交代线(1)		同相交代作用晚期阶段	高温高压作用阶段			
			自 生 的	自 生 的	他 生 的	自 生 的	和它同	
0	前岩相 ——正用 相 1400m	Th-190°	Th-280° 温度梯度 150°/km 100°/km 20°/km	Th-400° 水的存在	Th-280° —— 2300m ——	Th-280° —— 2300m ——	Th-201-80°	
1000		Th-300°						Th-280° —— 2300m ——
2000	前岩相 ——正用 相 2500m	Th-415°	Th-395° 温度梯度 150°/km 100°/km 20°/km	Th-400° 水的存在	Th-280° —— 2300m ——	Th-280° —— 2300m ——	Th-201-80°	
3000		Th-510°						Th-280° —— 2300m ——
4000	前岩相 ——正用 相 4500m	Th-555°	Th-460° 温度梯度 150°/km 100°/km 20°/km	Th-400° 水的存在	Th-280° —— 2300m ——	Th-280° —— 2300m ——	Th-201-80°	
5000		Th-555°						Th-280° —— 2300m ——
6000	前岩相 ——正用 相 5500m	Th-555°	Th-460° 温度梯度 150°/km 100°/km 20°/km	Th-400° 水的存在	Th-280° —— 2300m ——	Th-280° —— 2300m ——	Th-201-80°	
7000		Th-555°						Th-280° —— 2300m ——

化。

据此认为，流体伴随温压的变化发生了某些的组成体系的变化，即出现了分异现象。

从科拉超深钻井到上法尔茨，以及兰德聂罗地热田深部流体研究能够得出以下几点十分令人振奋的认识：

①天水或者称为地下水向下渗滤的最大深度不超过 5km，换言之 5km 以上是深部存储的流体和向下渗滤的地下水混合的层次，而这一深度区间恰恰是大量的金属矿床形成的最活跃层次。

②流体的主要地球化学参数的测定表明，原生流体的形成直接取决于成矿期间的岩石学性质。这就是说沉积岩和岩浆岩的流体形成之后，尽管经历了不同程度的变质作用，然而其根本（表征来源）性质是不变的。据此可能认为成矿流体的主要来源是沉积物的成岩期形成的同生建造水和由岩浆派生的含矿热液组成。变质作用仅仅是对上述两种成矿流体的改造而已，这就是变质作用不可能形成成矿流体或者说变质热液矿床是不存在的。

③不同深度层次的流体性质不同，表明了流体在地壳中是按照流体体系的物化性质分层赋存的。

④成矿流体中的碳的化合物直接或者说主要源于成岩期。地热田的羰基硫化化合物的揭示，及其形成的温压条件表明了硫化物形成的条件为 400℃左右。

以上从成矿流体可能形成的条件、岩相的性质等等成为了“液态矿源”说的主要依据。故 E

A 科兹洛夫斯基提出了 5km 以下的深部存在着液态矿源。

笔者对此十分感兴趣，因为液态矿源说是一个全新的成矿理论。它能够解释大量的以往成矿学中存在的分歧，并且还能够合理地解释成矿物质的来龙去脉。不过还存在一些值得进一步探索之处。

总之，依笔者之见，只要进一步补充完善，运用液态矿源说将能够完美地解释大多数金属热液矿床，特别是金矿床。对此，周乃武先生作了较多的论述，提出了液态矿源说，二次迁移论的金矿成矿理论。简介并讨论于后。

2 “液态矿源说 二次迁移论”金矿成矿理论

2.1 学说提出的背景概述

“水火之争”自始至终是矿床界理论争论的焦点，自 20 世纪 80 年代开始，到 90 年代中叶有关金矿成矿理论的认识分歧业已达到了白热化的程度，论战的焦点是成矿物质来源是深成（幔源）的，还是浅成（壳源）的。面对此当口，一切关心金矿床成矿理论的黄金地质工作者自觉不自觉地就会参与这场论争之中。此时，由于论争的结果使得层控论在很多方面难以回答对方的质疑。例如对于区域性的岩石丰度的大量统计和调查；自然界在金矿床和岩石中的赋存状态（岩石蚀变是金矿床的“来龙去脉”的物质记录还是成矿定位的物质记录？固化结晶的岩石中自然金的赋存及其可以活化、迁移的状态及其物质记录的证据？例如太古代基性熔岩的碳酸盐化问题--博依尔.1979、岩石中的吸附、粒间和赋存于硫化物中的的自然金被认为是可以迁移的，并参与成矿的金）的查定和研究；沿层找矿的的不可思议（同一岩系有的区段有矿，有的区段无矿的实际）。含矿岩系的含矿地球化学标志等等。同样火成论也暴露了很多弊病无法自圆其说，特别是花岗岩论无法解释石英脉穿切固化的岩体的事实；脉岩成矿说无法解释在同一矿区内石英脉的数量远远大于脉岩的数量，以及成矿所需要的二氧化硅、金等等的提供源；碱性煌斑岩说的三点依据（金矿区中基性脉岩与矿脉的形影相随、碱性煌斑岩中发现了金刚石矿床以及中基性岩含金丰度较高的实际，得出碱性煌斑岩源于地幔与地核的接合部）。难以解决“卡林”金矿，更难以说明碱性煌斑岩能否提供成矿所需要的大量的二氧化硅、汽水溶液和金等矿石矿物所需要的元素及其组合，……。

此时，“液态矿源说”的提出，5km 或者 19km 的概念使得人们难以置信，特别是“成矿流体库”、“水床”的构造样式；乃至成矿的脉动过程与成矿沉淀物质的统一性的解释；……。这此情况下，笔者根据大量的实际地质找矿研究，特别是有关陆台区中的高级变质岩区金矿床的找矿实践和相关课题研究发现了很多值得重新思考的问题：例如国人根据太古代绿岩带型金矿的成矿模式将以往认定的早元古代或者太古代-早元古代的地体（胶西北、小秦岭、辽西

地区、河北省北部)统统划归太古代;本来是高级变质岩区十分生硬地视为“花岗绿岩区”;明明是副变质岩系硬是说成“三位一体”的绿岩带,如此等等。使得地质找矿理论进入了一个“怪圈”-“人云亦云”的状态。在此情况下,笔者提出了成功的指导找矿的成矿理论-“液态矿源说,二次迁移论”。

笔者认为“液态矿源说,二次迁移论”是热液矿床成矿的最基本的成矿理论。根据对以往金矿的成矿理论,尤其是上述有关为笔者的成矿理论的提出提供了前提,经研究与探索认为:

①独立金矿床(Only gold deposits)的成因类型属于热液矿床;②其成矿物质来源于富 Fe、S、C 的并被称为含金沉积建造的壳源物质(含已进入地壳的早期幔源岩石喷硫沉积物,即层流沉积物);③金的预富集形式是以含金沉积建造成岩期形成含金的稀薄流体为基本形式,经过对含金稀薄溶液的不间断的改造过程(导致溶液中的含金浓度增加),使之转变成为能够形成各种品级的金矿床的成矿流体。同时十分强调成矿流体形成之后的储积,储积的构造样式和储积方式等等,对于储积成矿流体的构造及其内的成矿流体统称为含金液态矿源或者成矿流体库;④成矿流体库形成后,在特定的抬升构造热事件中将被打开,并使其内的成矿流体按照构造脉动的理论运移至成矿圈闭中沉淀富集成矿,因此成矿是突发性的。也就是说,对于金矿床成矿全过程中只有一个成矿主期或主阶段;鉴于金从成矿流体中沉淀机制是由于其流体体系的物化性质的突变而导致金的配合物不稳定的自组织作用,因此,查明成矿流体的来龙去脉及其变化是金矿床成矿学的主体研究内容,同时也是实现成功的找矿所必经的途径。

综上,我们提出了关于“含金液态矿源说,二次迁移论”的独立金矿床成矿理论(图 II-19)。

值得指出的“液态矿源”说自 20 世纪 40 年代(W.H.White)提出“含金残余流体”假说,经 Fyfe(1978)的“水床”的理论阐述、科兹洛夫斯基 E A 的“液态矿源”(1982)和张秋生“古大陆边缘地壳深部 19km 以下存在含金液态矿源层”的推理而逐渐成熟。在此方面,加拿大学者(哈奇逊等,1992)依据“第一水库”和“第二水库”判定为基础,建立了地质勘查找矿模型。因此,该理论已逐渐为人们所认同。

2.2 学说概要

如图 19 所示,作为独立金矿床的物源源于含金沉积物,其应该具有特征的沉积盆地-拉伸的构造环境,成岩作用过程(含深埋变质作用)时期,即成矿流体形成初期所需要的增温增压以及加大成矿物质的溶解度过程;如果说增温增压是成矿流体形成过程的话,那么降温降压作用将是成矿物质从成矿流体中沉淀所需要的条件,即成矿的充要条件,此乃学说的基本构思和原理。

金矿成矿学概论

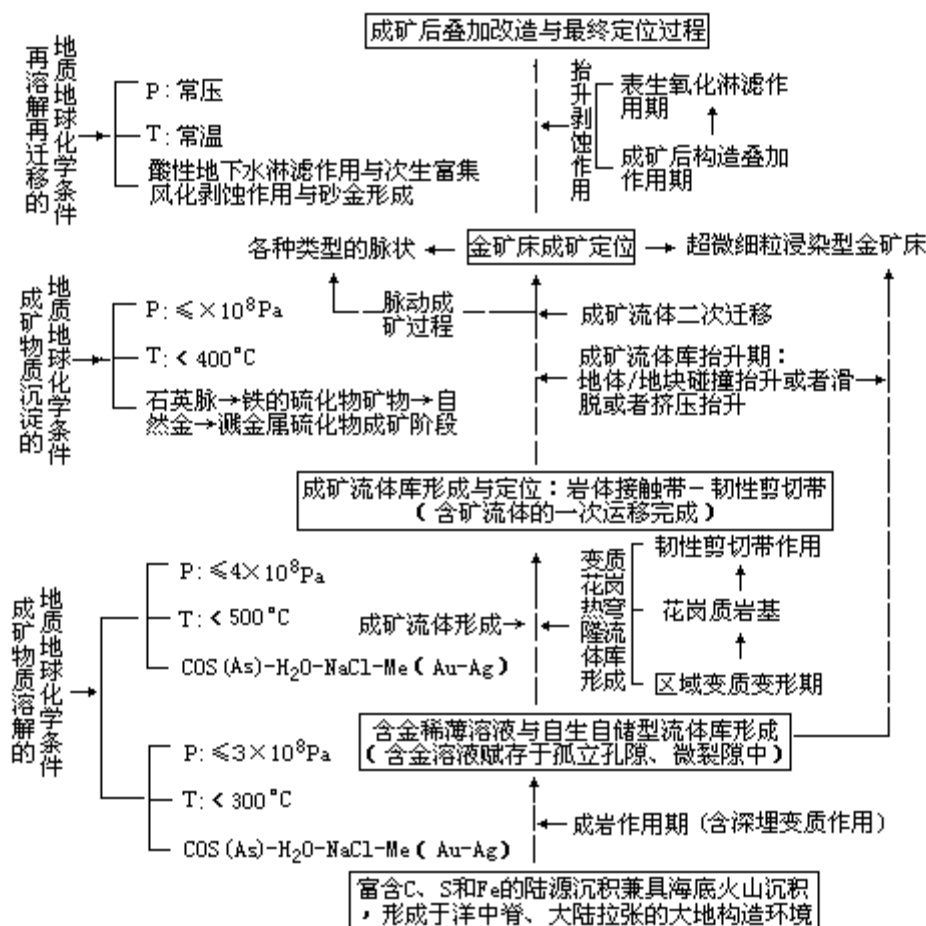


图 19 独立金矿液态矿源及二次迁移成因 (-成矿) 模式图 (据周乃武, 1998; 2004)

2.3 金矿床的典型性-物源的沉积特征

笔者认为, 几乎涵盖了全部矿床类型的金矿床是导致不同金矿床成因观的表现依据; 由于金矿床广布于各种各样成矿“环境”和不同地质地球化学条件, 则是造成金矿床成矿物质多样性提出的“证据”。然而人们在观察和思考金矿成矿学时却忽略了一个最最重要的事实, 为什么迄今为止所发现的规模最大、储量最丰富的金矿床是南非的含铀砾岩型金矿床或者说是改造型“砂金”矿床, 以及在所谓的内生或者称为岩金矿床中, 储量最大, 分布最广泛的金矿床同样是与沉积作用有关的含碳、铁、硫沉积岩型金矿。如穆龙套金矿 (5000t,)、霍姆斯塔克金矿 (3000t,) 和所谓的典型的“卡林”型金矿呢? ! 甚至所谓的与“花岗岩”有关金矿床为什么主要产于接触带呢? ! 再如, 人们曾经提出过为什么巴比盾地盾绿岩带型金矿少且小, 而“兰德”砾岩型金矿成为了世界金矿之最? ! 因此, 使得人们发出十分令人深思的惊叹“不是所有的绿岩带都有金矿!”; 尽管像世界级绿带岩型金矿—西澳卡尔古里金矿田 (储量达 3000t), 矿床的直接围岩尽管是赋存于 Cu-Ni 硫化物矿床的粗玄岩, 但在查定成矿物质来源时, 依然提出过很多假设。然而, 含矿岩系中的层流沉积物是金的主要物源的证据却是令人信服的! 这就是说, 金矿床的成矿物质源于直接沉积物。加拿大最大的金矿床-赫姆洛金矿更是最典型

的与火山-沉积岩系有关的金矿（海底喷气沉积物作为矿源）；日本菱刈金矿虽然被公认为典型的火山热泉型金矿床，但是它的成矿物质却源于基底含矿岩系-白垩纪四万十群～老第三纪的含金沉积建造（主要由黑色页岩和砂岩组成）和上第三系（中新世～上新世）含金沉积建造（主要为安山质火山砾凝灰岩和安山质凝灰角砾岩，局部夹泥岩、细粒凝灰岩和安山质熔岩。最下面含有赤铁矿，呈红褐色。地层中夹杂有古土壤、植物化石和碳化物，厚 200～300m），并且矿化的 2/3 赋存于四万十群中。如此等等，此外从世界的主要金矿床分布图，也能够看出大多数金矿床与沉积岩系有关。因此，以往有关金矿的多样性成矿学观点和认识难道不值得人们重新审视和深思吗！例如感兴趣的是矿床规模似乎是与含金沉积建造的厚度、时代以及沉积物的物质来源具有直接的关系，即含金沉积建造的厚度越大、直接源于太古代基底则矿床的规模越大。

在我国也存在着类似的例证。如始终认为是，与花岗岩具有成因关联的胶西北金矿矿集区中的金矿床，却是存在着一个令人发省的客观事实，为什么其中的大型、特大型金矿（三山岛、焦家-新城、大尹格庄，以及东风地区诸金矿等）都分布在岩体的接触带，特别是容矿断裂带的产状倾向于而且逐渐缓倾于“变质岩系”呢？小秦岭金矿矿集区几乎全部产于“变质岩系”中，特别是含石墨、含铁的碎屑沉积岩为主组成的“太古代”（实际上为早元古代）地层中。面对这一主要地质事实，人们却是仍然认为金矿的成矿主导因素是燕山期花岗岩！这又是什么？对于展布在“滇桂黔”和“陕甘川”金三角矿集区内的金矿床成矿的环境和条件大体相近，由于矿化类型的差异，以及是否存在着“岩体”等等的不同，也给出了不同的成因观点。如因太白金矿具角砾岩型矿化和钠长石化，认为是碳酸盐岩浆成矿观点；然而近在咫尺的同一含矿岩系中的的八卦庙石英脉型金矿，因为矿区内没有岩浆岩出现，故认为是沉积-变质热液金矿；再如李坝金矿田，因为花岗岩岩体位于矿田中部，即使强调了地层的成矿作用，也不得不提出多来源，多成因的认识。在华北陆台区同样存在着极为相似的实例，例如对赤峰-朝阳矿集区的二道沟-金厂沟梁金矿田，因为存在着近在咫尺的三个矿床（斑岩中的、火山岩中的和变质岩中的），或者分别认为是斑岩型、火山岩型和变质岩型或者认为是斑岩型等等的不同成矿观点。

综上所述，对于金矿床的成因认识始终没有摆脱表观认识为立论的依据，以及被束缚在以往认识的桎梏中。在大多数的相关认识中，追逐“流行”和“时尚”异常突出，几乎成为了某一时期的“主导”思潮，曾几何时“层控”热和“绿岩带”热席卷我国大地，就是最好的历史见证。

众所周知，对于内生金矿床（Only Gold Deposits）成矿作用方面业已取得了基本共识，即金矿床是典型的热液矿床，显示出统称的后生性。但是在成岩成矿物质来源的认识上，诸如成矿物质是如何进入到热液流体中的却是存在着“无限的遐思”，特别是受“侧分泌”说的影响格外深刻。因此，多数认为成矿物质是通过热液流体从含矿岩石中“活化-萃取”的，因此提

出了“渗滤”与“循环”的假设和铁镁质岩石的碳酸盐交代观点；高级变质区很少或者不可能存在金矿床的“绿片岩相”成矿观点；然而大贝尔金矿、赫姆洛金矿、霍姆斯塔克金矿，特别是我国华北陆台区大多数金矿都是产于高级变质岩区的金矿床……。然而不争的事实却是低级区有矿，高级区依然办不乏大型金矿床；至于“侧分泌”说更难以令人信服，除了有限的近矿蚀变之外，任何人也没能提供矿床深部及其周边矿源岩的数公里范围的蚀变岩存在的令人信服的证据。更何况热液的流动只能沿着有效的孔隙裂隙流动，据此可以想像其“活化-萃取”的范围之大显然会超出了“矿源岩”的赋存空间！此外，即使是从“矿源岩”获取成矿物质，并且形成了成矿流体，其中金的溶解度和溶解的总量又怎么能够满足形成高品级矿床的需要呢？成矿流体源于哪里？如何能够形成满足不同品级矿床形成的需求？这是金矿成矿学必须回答的关键和根本问题。只有解决成矿流体的“来龙”才能够真正解决成矿流体的“去脉”，才能够实现真正意义上的以理论认识为指导的成功的地质找矿实践。

2.4 金的预富集条件和地球化学特征

如前所述，金的地球化学性状的二重性，决定了金的成矿二重性。

有关论述金的地球化学性状的文献很多，但是强调其成矿的关联方面显现得有些不足。为此，笔者曾就此提出金的亲铁性、亲硫性和亲铁亲硫性的基本条件。认为金的亲铁性是金相对富集并且是呈分散赋存状态原因；金能够被溶解和以热液形式迁移是由于金的亲硫性所致；金的沉淀富集的主因是成矿流体体系性质的变化。与此同时，特别强调了碳（是溶液酸碱度和氧化还原的缓冲剂）在稳定金的溶解度以及成矿过程中的作用。因此，金的亲铁性是其初始幔源的依据，金的亲硫性是其进入地壳并且作为壳源的依据；金在自然界中主要呈原子态；在岩浆中和高温热液中主要为一价金和在表生强氧化条件下以三价金进入溶液中。还原环境是金表生迁移和富集的重要条件，同时也是形成含金沉积建造的充要条件；因此，缺氧的早前寒武纪是砾岩型金矿的重要形成时期，也是内生金矿床的重要形成时期（27 亿年左右）。金的热液成矿属性是其富集形成岩金矿床的本质，而其沉淀的机理是一价金的歧化反应（ $3\text{Au}^{+1} \rightarrow 2\text{Au}^0 \downarrow + \text{Au}^{+3}$ ）；富含大量的气体表明了沸腾成矿和“泡腾成矿”的机制和成矿沉淀的动力学机制等等。

总之，金原子态和亲铁性是金的惰性、向心性、幔源性及不能够形成独立矿床的属性，而金的多价态（含胶体）以及亲硫性是金的活泼性、离心性、壳源性和能够形成独立矿床的属性。

很显然，金的地球化学二重性决定了金的成矿作用二重性。实际矿床的对比分析表明金-铜共生矿床主要是与幔源有关的伴生金矿床，例如与铁质超基性岩有关的铜-镍硫化物矿床、块状硫化物矿床、矽卡岩型和斑岩型矿床等等。笔者注意到当金矿床与上述矿床在空间上分

离赋存时，通常是赋存在“围岩”中的事实。如加拿大诺兰达地区的金矿就是块状硫化物矿床和金矿床独立赋存的实例；菲律宾碧瑶地区则是在空间上，块状硫化物矿床、脉状金矿床和角砾岩筒型-斑岩矿床相伴产出的最佳实例；在我国，长江中下游的一些金矿床也是在空间上与斑岩-矽卡岩型矿床密切相关的等等。

如上所述，几乎所有的独立金矿无一例外的均与含碳质的相对富铁富硫的碎屑岩系或者火山-沉积岩系有关，因此可以认为独立金矿形成的“矿源层”实际上是“矿源层”中的富含铁、硫和碳（特别是有机碳）特定岩系，对此本文赞同含矿建造的提法是适益的，并以此修订传统的“层控”论。据此认为，独立金矿是经过沉积成矿（砂金矿床/含金建造）→成岩成矿（超微细粒浸染型金矿）→热液成矿（脉状金矿）→表生成矿（砂金及风化壳型金矿床）的过程。从成矿物质来源及其演化角度考查其成矿过程应该是幔源直接转换为壳源（喷气沉积矿源）的成矿过程。可以认为含金沉积物(表 II -4)的沉积作用形成的含金沉积建造（含古砂金）是金矿床的主要矿源，与之相关的金矿床也是分布最广泛、储量最大的。

2.5 成矿流体形成过程是金矿成矿学的核心

既然独立金矿床是热液矿床，那么很显然成矿溶液的形成及其来龙去脉就应该成为判定矿床成因和对应的成矿理论提出的主要依据。对于成矿流体的形成过程人们只不过是作了极其简单地解释和公式般的泛泛论证就轻率的结论，例如运用 H、O 和 Pb 稳定同位素资料说明成矿流体最大可能来源，甚至是大气降水的结论。然而，却是很少去查明矿床的成矿流体的形成和演化的过程。其中最最值得指出的是，只要是矿床所在区是变质岩，则必然认为是变质热液成矿；如果矿区存在着岩浆岩则必然得出岩浆热液成矿的观点；如果矿区既不是变质岩，也很少见到岩浆岩或者说岩浆活动非常微弱，则认为是天水成矿。事实上，成矿流体的形成并非如此简单。如前所述，成矿流体形成过程是非常复杂的。大体经历了以下三个阶段：

2.5.1 在含金沉积物的成岩期

基于两个重要的依据和原理，即石油的成油理论和只有吸附状态的自然金才是能够溶解和成为含金热液中的金。这就是说对于与岩浆成矿作用有关的含金矿床其成矿时金的状态是熔融状态，因此只能形成伴生金矿床；对于火山沉积作用有关的金矿床是通过海底火山喷气或喷液沉积作用形成的矿床（伴生金的块状硫化物矿床和独立金矿床），至于大陆与火山活动有关的独立金矿床的成矿作用其关键的物源在于其深部是否存在有能够形成含金成矿流体的条件（像日本菱刈金矿床的白垩纪四万十群含金沉积物存在为标志），据此可以认为大陆火山的成矿贡献在于是成矿定位的构造热事件作用或者说是成矿的诱导因素，而不是必要的成矿因素。以下着重论述含金沉积物成岩期对成矿流体形成的贡献。

含金沉积物在成岩期经历了压实-脱水-固结-深埋变质重结晶再脱水的过程，从而导致了

包括金在内的可溶性物质的溶解，形成了含金低温（ $\leq 200^{\circ}\text{C}$ ）热液。如果深埋变质作用加大至绿片岩相，可溶性物质的浓度必然增加，这就是绿岩带型金矿床的成矿流体形成的状态和条件。

2.5.2 浅成低温微细浸染型金矿床的形成期

成岩期赋存于沉积岩系中的含金流体是被封存于岩石粒间或者独立的微裂隙中的，相当于停滞水带中的状态，构成了含金及其它伴生元素的复杂而又稀薄的物化流体体系。如果，含有这种稀薄的复杂物化流体体系的岩系成岩后没有经历变质、岩浆等等构造热事件的作用，就发生了地壳的抬升事件，则伴随地壳的抬升（即降温降压）的过程成矿作用便自岩石中的含金稀薄热液发生。需要指出的是，鉴于地壳的抬升，必然会导致赋存成矿流体的地层发生形变，最最低级的形变是岩层的脆性程度增加，裂隙发育，从而导致了含金热液的流动和聚集于“扩容带”沉淀成矿。此期形成的金矿床就是如前提及的热动力变质作用成矿作用（彼得罗夫，1974）。特别需要说明的是，由于赋矿地层没有经历了强烈的构造事件的作用和影响的前提下，赋存于岩层中的含金流体就不可能发生大规模的迁移，或者确切地说含金量地体性状没有发生本质的变化。因此，在这种状态下形成的金矿床必然是富含大量挥发组分（As、Sb、Hg、碳氢化合物）的浅成低温微细浸染型金矿床。也就是形成了通常所说的富含砷、锑的难选冶金矿床。

③ 石英脉型中温热液矿床

如果稀薄的成矿流体形成之后，没有经过抬升成矿作用过程，那么稀薄的成矿流体将进入了成矿流体的进一步演化阶段。即通过构造热事件（区域性变质作用、变形作用和岩浆侵入活动等等），而必然导致稀薄的含金流体的浓度增加，并且会在构造热事件的热动力驱动下发生流动，聚集和初始流体体系的分馏、分离赋存状态。至此完成了形成较高品级和规模的石英脉型金矿床的含金成矿流体。

在含金成矿流体的抬升成矿时期。如图 II-19 所示，如果成矿流体储积的部位位于相当于绿片岩相的温压层次以下的深度，很显然成矿流体将被束缚在难以发生成矿沉淀的条件下。其中显示出断裂构造是闭合状态，温度 $> 400^{\circ}\text{C}$ 、流体的压力 $400\sim 500\text{MPa}$ ，此时溶液中的金依然保持溶解状态。因此，只有在含金成矿流体库的地块整体抬升的条件下，才能够进入断裂的破裂状态，以及由此能够使得成矿流体沿着脆性断裂上升和成矿。这就是说，对于大多数金矿床来讲抬升成矿是重要的阶段和必要的过程。

(4) 成矿流体库的构造样式

很显然，在抬升之前成矿流体被封闭在地壳的较深层次，这种能够保存成矿流体的层次及其构造则是我们在地质找矿之中应该十分注重的。

根据成矿流体的物化体系的状态，以及成矿流体赋存的环境，可以将成矿流体库划分为

三种构造样式：背斜式成矿流体库、变质-花岗热穹隆式和韧性剪切带式和韧性剪切带式。第一种类型成矿流体库通常位于以沉积岩区或者低级变质岩区；第三种类型通常位于地盾区；而第二种类型在上述变质岩区都能够存在。

第一种类型成矿流体库通常是赋存于含金沉积建造之中，换言之，成矿流体没有发生更大的迁移，仅仅由于构造作用所形成的动热促使含金流体流动，并且在流动的过程中使得复杂的流体体系发生分异，并储存于正向构造（背斜的核部）储存（很类似于原生原储型油气藏）。

第二种类型成矿流体库就是通常所谓的与“花岗岩”有关的金矿床。无论是花岗岩的接触变质作用，还是在区域变质作用的基础上的叠加的接触变质作用均构成了“变质-花岗热穹隆”构造。产生该种成矿流体库构造样式大体有两类构造体制，一类是我们通常所熟知的花岗岩侵入作用给出的接触变质带构造，另外一类是混合岩化作用形成的“变质-花岗热穹隆”。

第三种剪切带型成矿流体库构造。对此，根据韧性剪切带形成的构造环境与构造体制，划分为四种类型，即第一种是产于地盾区的差异性地块接触部形成的韧性剪切带型成矿流体库；第二种类型是产于地槽区的，因地块的抬升引起的滑脱构造体制形成浅层次“剪切带”成矿流体库和第三种类型是由于发生于台槽区的界面，因伸展-拆离体制形成的变质核杂岩构造形成的韧性剪切带型成矿流体库。第四种形成剪切带的环境是板块与板块之间的俯冲与逆俯冲（仰冲）机制形成的韧性剪切带构造及其成矿流体库。

笔者十分赞同流体库及其构造样式提法，众所周知，岩浆储存部位被称为“岩浆房”；油气的储集部位被称为“油气藏”。难道含矿热液流体为什么不可能同样存在着储集库呢？实际上，在前述中业已为人们所论证。与此同时，也为实际找矿构造部位所证明。例如背斜控矿，提出了背斜+一把刀（实际是两把刀）的找矿模式；“跟着（化探）异常跑，围绕岩体转”的找矿经验，以及韧性剪切带不仅仅是一种容矿构造，而且是一种成矿机制的提法都为上述提出的成矿流体库的构造样式作了最佳的诠释。

成矿流体库形成之后，并不是一蹴而就的。成矿流体库中的成矿流体将伴随后续的地壳运动发生规模性的转移，并且在成矿流体的运移中得到了进一步的分异，为形成独立金矿床提供了成矿的准备。这一理论认识，能够较好地解释各种类型的构造热事件在金矿床形成过程中的作用或者说贡献。即构造热事件不仅仅导致成矿流体再迁移，以及在迁移中发生复杂的成矿流体体系的分异作用，形成了新的子体系，并且构造热事件和能够形成新的构造样式的扩容区，为分异了的成矿流体通过储集空间和新的成矿流体库构造样式。

2.6 成矿流体库中的成矿流体性状的探索

成矿流体库和成矿流体的分异作用的提出是对“液态矿源”理论的又一重大补充和修正，

是将液态矿源理论推向实用，并解释金矿床的形成和全部地质特征的基础和依据。以下拟就主要问题作以解释和讨论。

2.6.1 成矿流体在成矿流体库中的性状是解释构造脉动成矿与成矿物质有序性的本质

该问题的提出是很多学者试图回答的问题，同时也是几乎全部金属硫化物热液矿床所存在的问题，其中包括矽卡岩型、斑岩型和脉状矿床在内。现以金矿床为例论述如下：

大量的有关流体的资料表明，金矿的成矿流体是一个极其复杂的流体体系，这已经为客观的矿床的矿石矿物组合所佐证。那么，成矿期定位的成矿流体库中的成矿流体的性状如何将是我们所关心的。因为它直接涉及到笔者的一系列有关成矿作用的思考，如在承认成矿构造脉动的前提下，为什么大多数金矿床具有十分相似的矿石矿物组合及其成矿阶段呢？

众所周知金矿床的主要矿石矿物是铁的硫化物和/或硫砷化物（黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂）→含铁的硫化物（黄铜矿、铁闪锌矿）→以铅锌矿为主的硫化物→含有砷、锑和银的硫盐矿物（黝铜矿-砷黝铜矿、脆硫锑铅矿、硫铜锑矿、硫砷铜矿等）→低温的硫化物（辉锑矿、雄黄、雌黄、辰砂等）→方解石的生成次序和阶段。尽管一些实际的金矿床可能缺少上述的某一阶段或矿石矿物，但它们在总体上是相似的，所以 A.A.Keays 在 1982 津巴布韦金矿讨论会上简而言之提及“金矿床的主要矿物是石英、黄铁矿和碳酸盐”矿物组成的。这就是说，无论是矿床类型如何，既或是石英脉型、石英网脉型，还是微细粒浸染型，乃至所谓的蚀变岩型，无论是所谓中温热液型，还是浅成低温热液型，都是如此。这种成矿时构造脉动的无选择性与成矿物质沉淀的有序性将暗示成矿流体库中的成矿流体并非是混杂的流体体系，而应该是分层封存的。只有如此，并且必须如此，才可能客观地解释笔者的有关思考。导致这种分层富集的主要原因是初始含金溶液的分异作用，以及多期次的流动和储存的产物。

2.6.2 成矿流体库是解释金矿产出遍在性的钥匙

如上所述，成矿流体库的三种成矿流体库的构造样式及其形成构造环境与背景，地槽区、陆台区、差异性地体的接触部或界面；按照板块理论，形成于被动板块的一侧等等较好地揭示了金矿床的遍在性问题。因此，只要满足了能够汇聚成矿流体的构造条件（扩容区和封闭的不透水层/剪切带）就能够储集成矿流体，形成各种构造样式的成矿流体库。所以本文提出了正向构造（背斜、穹窿、逆冲推覆构造、滑脱构造、变质杂岩核构造）是成矿流体的储集构造。而不同的构造环境，必然形成差异性的成矿流体库的构造样式；差异性构造样式正是造成金矿产出遍在性的根本原因。

2.6.3 金矿成矿流体形成与分异是造成金矿床矿化多样性的前提

成矿流体的分异作用的提出是揭示金矿床产出多样性环境与多样性矿化类型的谜底。虽然我们没有进行相关的实验，但是只要运用一般性的常识就能够对上述两个问题作以合理的

解释。这将涉及以下几个问题：

(1)成矿流体的形成与二次迁移

笔者运用石油的概念，提出了二次迁移的相应概念。所谓一次迁移是指环境溶液赋存于“生金”含金沉积建造之中，它将伴随各种构造热事件发生一次乃至多次迁移。对此，只要没有进入成矿状态我们一律定义为是一次迁移；换言之，与石油成油理论相比较，一次迁移是指石油在生油岩中的迁移，而二次迁移则是脱离生油岩的迁移。故含金溶液的一次迁移包括了石油的一次和二次迁移。因此，可以是类似于油气藏那样能够形成原生原储型成矿流体库，也可能形成原生它储型成矿流体库，以致形成它生它储型成矿流体库。二次迁移的定义是进入成矿时期的迁移，或者说成矿定位时，成矿流体进入容矿构造或者部位的成矿迁移统统称为成矿流体的二次迁移。

如前所述，含金沉积建造成岩期仅仅能够形成稀薄的含金溶液，并被封存于沉积岩中的孤立的微孔隙、岩石中的矿物或碎屑的粒间。在构造作用下，这种被封存的孔隙裂隙溶液将因为独立的孔隙裂隙形成有效的孔隙裂隙系统，则导致了含金溶液流动或称为迁移。从被封存的状态转变为相对的开放状态，含金溶液必然会重新调整体系的性质和状态。这一适应于环境变化的调整，一部分流体（气体或低溶解度的）将从初始的混溶（均一状态的）流体分离（分馏）出来形成与环境条件呈平衡的若干子体系，这种流动分异，必然会形成气液分离、酸碱分离和不同含盐度的分离。与此同时，由于这种分异作用，将导致含金溶液转变为浓度较高的含金成矿流体。

含金溶液发生分异的内因主要是由于含金溶液的组成所决定的，在成岩期的温压条件下，与成岩物质不相溶的元素将被排斥在岩石中的微裂隙孔隙和粒间，构成了复杂组成的孔隙裂隙溶液。这种微孔隙裂隙溶液具有极强的吸附和溶解能力，甚至能够形成均一态有限混溶溶液。有限混溶溶液一旦被释放，必然发生重组和分异，形成在新的条件下平衡的若干个不混溶的子体系。其中子体系，也包括一些有限混溶的溶液和一些无限混溶的溶液。众所周知，含金溶液主要是低盐度，富含气体的 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 溶液，很显然这是一个有限混溶的溶液。因此，一旦被释放流动，将必然发生分异。

导致流体流动的因素主要是环境的变化，环境的变化的历史记录就是通常所说的构造热事件。在构造热事件中，将分为岩浆侵入与喷发事件、褶皱变形事件、断裂活动事件，无论是哪一种事件都会产生热和构造活动，故人们以构造热事件概括之。以下我们将分门别类地讨论各种构造热事件对流体的分异作用的主要贡献。

(2)构造活动与流体的分异作用

不同性质的构造活动，对于流体的分异作用是相同的，因为所有的构造活动不仅能够产生构造裂隙，而且还能够由动能转化为热能。但是细致分析起来，不同构造活动对流体的分

异也是存在差异的。

①褶皱作用对流体的分异作用

褶皱作用通常分为两种形式，一种是紧密褶曲，另一种是宽缓褶皱；褶皱作用往往会出现二次或二次以上的褶皱，称为叠加褶皱。通常叠加褶皱常常遵循走向褶曲→倾向褶曲的规律发生，故二次褶皱轴叠加部位习称“褶皱鼻”。众所周知，紧密褶皱通常发生在下地壳褶皱回返期和或地槽回返期，因此太古代绿岩带是紧密褶皱普遍存在的构造样式。由于紧密褶皱的应力极强，从而可能导致岩层的塑性形变，故韧性剪切带构造常常与紧密褶皱相伴形成。这就是太古代绿岩带金矿床通常为剪切带型金矿床的主因。那么，紧密褶皱形变过程中，成岩期的赋存于岩层中的含金溶液是如何发生迁移和分异的呢？道理是很简单的。

在褶皱过程中，能干性差异性的岩层变形程度必然存在差异，能干性小的岩层表现为塑性形变，能干性大的虽然也发生塑性形变，但塑性形变的强度远远不如能干性小的岩层，甚至会产生大量的裂缝。因此，赋存于能干性小的岩层中的含金溶液将被挤压至能干性大的岩层中聚集。此外，在紧密褶皱形成过程中，褶皱翼部的岩层常常变薄，而核部的岩层厚度加大。所以，含金溶液将向核部，特别是背形褶曲的核部迁移，构成了成矿流体库。如果伴随紧密褶皱产生了韧性剪切带构造，很显然作为扩容区将抽汲含金溶液汇聚于其内，形成了含金韧性剪切带式成矿流体库。这就是说，含金溶液的流动聚集过程，就是含金溶液的分析作用的过程。由此可知，最易于聚集于扩容区和褶皱核部的溶液显然是富含气体的低盐度的含金流体了。这正是能够形成含金韧性剪切带的主要原因，以及其唯一性的主因（至今还没有有关其它矿床可称谓为韧性剪切带型矿床）。

伴随紧密褶皱的同时，常常产生变质作用，因此变质作用的生成热，同样会驱动溶液的流动和分异，并且会加速分异作用的进行。所以，多数金矿床形成于变质岩区，哪怕是低级变质岩区。

对于宽缓褶皱，通常发生于盖层发育的环境或者是基底抬升期。也就是说，宽缓褶皱通常是发生在中上地壳的环境的地槽回返褶皱期。如果褶皱期间或期后，引起地体抬升进入地壳浅层次的脆性形变域，那么褶皱作用将会伴随断裂的形成。褶皱形变期，将同样产生能干性差异界面的破裂和造成含金溶液向背斜核部聚集，形成层间成矿流体库和背斜成矿流体库。在含金溶液汇聚的流动过程中，导致了分异作用的发生，很显然低密度流体迁移速率大，高密度流体迁移速率小，从而造成了含金的成矿流体形成，并且是按照混溶溶液的性质分层汇聚的。

上述有关褶皱作用导致含金溶液的流动分异作用道理虽然相同，但是分异程度是不同的。所以，形成的成矿流体库的流体性质和组成，以及形成的金矿床的矿石矿物组合、矿化类型等等也是不相同的。基底的紧密褶皱是形成含金韧性剪切带成矿流体库，以及形成的矿石矿

物以石英脉、铁的硫化物和金，其它的矿石矿物较少或者很少。盖层宽缓褶皱形成的流体库是分层分层的性质相异的成矿流体，因此形成的金矿床通常是组分比较复杂，矿化类型多样。

②断裂构造对成矿流体形成的作用

标志认为断裂构造通常是成矿流体的控制构造或者说是成矿流体库（圈闭）的边界构造，常常成矿流体库的分割构造。起到这种作用的断裂构造通常是近水平产出的，并且是由压扭性为主的断裂带。在大多数金矿床中，人们常常忽略这种早期形成的断裂及其对成矿的控制作用。例如所谓的成矿梯段的存在事实，就是这种缓倾斜压扭性断裂所致。

鉴于脆性断裂的存在，标志着成矿作用发生的层次条件，因此断裂构造常常对流体的分异作用并不明显。有时作为成矿流体的上升通道，也会引起业已发生分异的流体再分异的作用，特别是那种位于停滞水面以下的低角度的，以不透水岩层或者压扭性结构面的断裂作为边界的，规模很大的构造破碎带。可能作为成矿流体库形式存在，因此含金溶液向其汇聚的过程，也能够导致流体的分异作用。

种种迹象和实际表明，断裂构造主要是控矿构造。而作为控矿构造的断裂最佳的形成时间是伴随褶皱进入脆性变形域的同时，由褶皱引起的断裂。这种与褶皱相关联的断裂常常形成两组断裂。一组是平行褶皱轴的走向断裂，另外一组断裂常常是垂直褶皱轴的倾向断裂（或者称为横断层），故我们提出了“背斜+两把刀”的找矿模式。

(3) 岩浆活动对流体的分异作用

这是一个面对岩浆成矿论，脉岩成矿论的桎梏，必须回答的问题。笔者的认识是岩浆论和脉岩论难以解释的根本问题是不可能提供充沛的溶液和成矿物质满足形成成矿流体的量的需要。这正是大多数难以接受岩浆论或脉岩论的根本所在。同样对于创建“三源论”成矿理论的依据之一，即作为热源可以对地下水加热形成热液，以及热液具有较强的萃取岩石中成矿物质的能力的理论，也必须给予回答。笔者的解释是“三源论”没有提供一个令人信服的成矿预富集的过程（量的累计），成矿作用是在热液萃取成矿物质的对流循环机制下渐进式的发生。对此，三源论者难以解释的是并没有提供渐进式的沉淀作用成矿现象，而是成矿阶段性极其鲜明的事实构成了对三源论的否定。那么，岩浆活动对成矿流体的形成究竟起到何种作用呢？我们的回答是：

岩浆活动与构造活动一样，具有两种作用，一种是热作用，另一种是动力作用。对岩基体来讲似乎热作用远远强于动力作用，相反中浅成岩体似乎动力作用占优势，而浅成超浅成岩体动热是微不足道的。事实上金矿床主要赋存于中浅成岩体的内外接触带，并且已外接触带的一定范围（2km 以内）最具工业意义和较为集中（2/3）。由于岩浆热能够导致岩层中的热液发生热驱动作用，导致了热液流动分异作用。同时，岩浆热还能够导致围岩的接触变质作用，致使岩石脆性程度增大，易于形成破碎带，以及当岩浆冷却时会因为体积收缩，组成

接触带及其扩容带，从而导致了较冷的分异了流体重新汇聚与接触带及其附件的断裂构造带中，所以，在时空上表现为岩体形成较早，成矿较晚，矿化体受控于接触带。

需要说明的是，大多数侵入体是被动侵位的所以动力作用并不十分强烈，以及因此常常与区域构造的活动相关。此外，多数岩体常常于背斜核部侵位，所以笔者认为金矿床的成矿定位的动力学机制在很大程度上与区域构造活动有关。其寓意在于矿床的空间展布，往往与区域性的控岩构造相关。这就较好地解释了所谓异同点内外接触带控矿的原因。我国的峪耳崖金矿就是一个十分典型的例证；岩体的展布方向与区域断裂一致，矿脉体主要富集于围岩且为富矿体，个别穿切岩体，以及出现于岩体中的破碎部位的低品位矿化体。

3 对以往部分研究实例的解析

本节将就一些典型的事例，包括典型金矿床、一些相关的研究成果和相关的理论问题，进行解析以证明本文提出的成矿理论的正确性。

3.1 典型矿床—卡尔古利金矿

卡尔古里金矿田位于西澳诺斯曼—乌伦娜绿岩带内的绿岩带型金矿。绿岩带宽 100～200km，长 400～800km；据悉已经探明储量 5000t 以上，尚保有 3000t 左右。

曾被认为是最最典型的与基性岩具有成生关联的金矿床，同时也是世界级金矿的最最突出的代表。

关于矿床的成因问题：以往认为该矿床为区域变质热液剪切带型金矿床，其形成温度为 300～400℃，成矿压力为 $1\sim2\times10^8$ Pa；成矿时代为 2.8Ga；成矿物质来源于绿岩带本身的各个层位：层流沉积物、玄武岩、铜镍硫化物矿床和块状硫化物矿床等等；成矿流体为低盐度、偏碱性、还原硫的 H_2O-CO_2 流体，金在流体中呈 $HAu(HS)_2$ 形式。认为成矿流体是在变质变形期流体上升并萃取成矿物质和在适宜的空间沉淀成矿的。但是我们稍微考查其赋矿岩系就不难看出成矿物质实际上具有直接关系的是“层流沉积物”（表 5）。

表 5 卡尔古里金矿田区域地层一览表

序号	地层名称	厚度 (m)	岩性特征
9	黑旗岩	3000	酸性-中酸性凝灰岩、角砾岩、板岩、页岩、杂砂岩、沉积石英岩；下部含有少量-微量黄铜矿、闪锌矿的层状硫化物和黑色页岩
8	Goldenmall 粗玄武岩	800	层状基性熔岩，硅质相对较高，被认为是本区主要含矿层
7	帕灵加玄武岩	300～800	玄武质熔岩，部分为枕状熔岩，含少量页岩夹层。与上覆岩层 8 接触部矿化强
5-6	威廉斯顿粗玄武岩	150～300	上部为变质粗玄武岩和变质辉长岩；下部为富含角闪石的超基性岩。呈岩床产出
4	卡派板岩	1.5～3	石墨板岩、页岩，含硫化物。常常已硅化蚀变。为本区的标志层
3	德温昆索尔玄武岩	60～150	变玄武熔岩，具枕状构造，部分为玄武质科马提岩
2	汉南斯湖蛇纹岩	300～900	为卡尔古里层序底部建造，部分为科马提岩
1	拉斑玄武岩及粗玄武岩		为下伏的变质玄武岩及粗玄武岩

据 A.A Keays (1982) 揭示的资料表明，在西澳的卡姆巴尔达地区的层流沉积物中金的含

量可达 800×10^{-9} ，以及结合表中 5 所示，从中不难看出卡尔古里金矿田的成矿物质主要来源于富含铁、硫和碳的层流沉积物。此外，Keays 针对南非绿岩带缺少特大型金矿床的实际进行了相关的研究和对大西洋海底枕状熔岩含金性的查定（图 20）结果发现熔岩的内部含金低，而玻璃质边缘含金高。于是他认为造成此种现象的最大可能性原因是，由于海水和玄武岩的交换反应形成玄武岩的枕状体之后不久金（和硫）向海水中流失而造成的，显然这种金可利于成矿作用；从图中可见，多数样品的含金量实际很低（ $Au = 0.21 - 0.76 \times 10^{-9}$ ）到科马提岩和高镁玄武岩的 $6 - 8 \times 10^{-9}$ 。玄武岩枕状体内部的含金量变化比其玻璃质边缘小得多，而这种变化与玄武岩 Cr、Ni 和 MgO 的含量相关。（对此有人认为这种金是固定在硅酸盐相和氧化物相中，通常不利于成矿）。

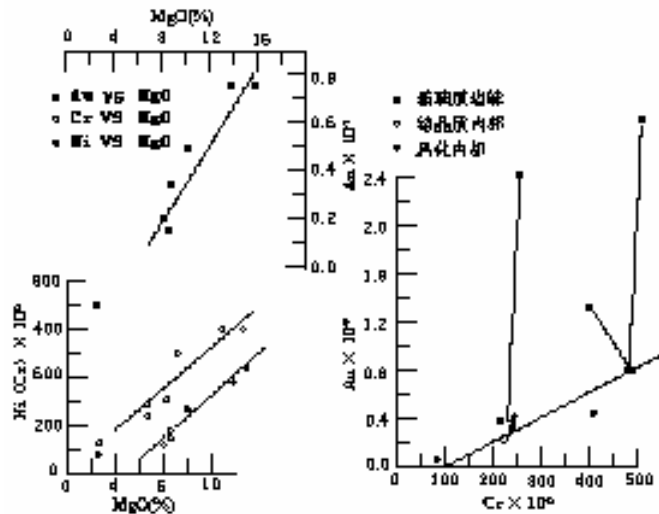


图 20 自中大西洋中脊（MAR）的最年轻的枕状玄武岩的各部位 Ni、Cr、Au 含量分析结果对比图
（据 A. A. Keays 和 Scott, 1977）

笔者认为，诚然海水与炙热玄武岩反应会导致枕状熔岩的薄层发生金和硫的流失现象，但是不可能造成如图所示那种状态（金从内部的 0→边缘的 0.8 的高度富集）。因此，笔者提出了突然过饱和迁移观点，即在海底火山熔岩喷溢时，本来处于硫不饱和的岩浆，由于突然的喷溢的降压作用导致了岩浆中的硫呈现出突然的过饱和状态。在此状态下，具有亲硫性的元素（包括金在内）随同硫一起脱离岩浆进入到喷溢的沉积物（火山碎屑，特别是凝灰质沉积物）中，即火山喷发间歇期的沉积物之中（称为层流沉积物）。因此，熔岩中含金丰度低。换言之，与海底火山作用有关的金矿床的成矿为主主要来源并不是岩浆本身，而是层流沉积物。其成矿原理十分类似于块状硫化物矿床，即成矿物质与火山喷硫沉积作用有关。

3.2 对金矿床的物源研究再分析

Glasson 和 A. A. Keays (1978) 对澳大利亚维多利亚含金板岩带中的粉砂岩和硬砂岩劈理发育对释放金及其它元素的研究，试图给出提供成矿可用物质的解释。结果表明劈理发育的岩石释放的含金量仅为原岩的 10.5%。据此可见，岩石的碎裂虽然有利于金的释放，然而其提供成矿的量并不理想。

不久，Ewers和A .A. Keays（1978），从研究新西兰布罗德兰达贵金属分带（图II-21）得出结论认为，影响地热溶液沉积的因素主要是：当热液接近地表时硫化物中的金伴随温度的下降而迅速的增加。与温度剖面重叠的金含量存在两个点，即在 400m和 800m的深度，研究者认为这是火山-沉积层中热流体沸腾作用造成的。但金的最高含量是富集在热泉的泉华中，金含量达到 85×10^{-6} 。据此研究者认为，如果该地热系统活动时间更长，毫无疑问必然能够形成经济价值可观的金矿床。但实际上只有少量的金带入溶液并沉积在热液系统中，其余部分进入地表形成了河流沉积或在泉华中富集，最后由于剥蚀搬运形成含金沉积物。这就是说，真正热泉型金矿床的形成和富集是比较困难的，这是因为整个热液成矿系统处于开放状态所至；如果在热泉成矿体系（系统）的顶部被封闭起来（例如硅帽）的话，热泉型矿床必然能够形成且为大而富金矿床（如日本的菱刈金矿）。看来，硅帽是热泉型金矿成矿的关键性条件，也是地质找矿的最最重要的标志。

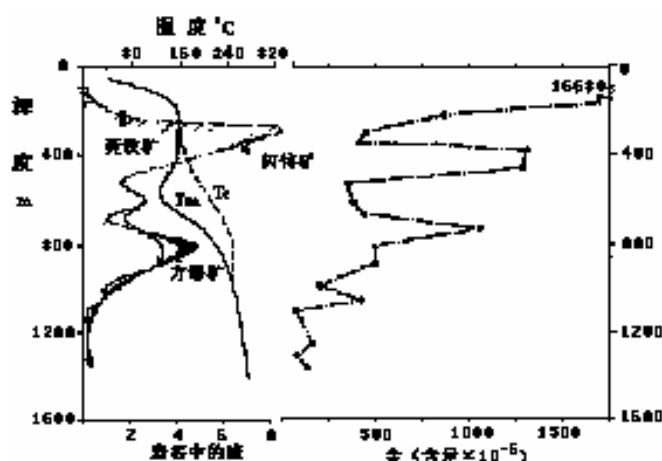


图 21 西兰布罗德兰达地热区 DDHBR16 中 Au、硫化物含量和温度随深度的变化图

（据 A .A. Keays 和 Ewers，1977）

在布罗德兰达沉淀的沉积物中含 8800×10^{-9} 的 Au，图中 Tm 是实测的温度；Tc 是推荐的温度剖面，硫化物增加和 Au 沉降的两个带（300m 和 800m 深度）代表地热溶液沸腾带

笔者认为 A .A. Keays 的针对性（沉积岩和火山岩）研究的方法是合理的，但是研究思路 and 解释显然是不合适的。研究者缺乏动态思考和最大的可能性，例如关于洋中脊枕状熔岩的测定方法是十分合理的，从而能够动态观察金品的位分布，然而分析和解释却是局限于测定的对象本身，没有考虑到金的突然过饱和和逃逸的问题，否则“层流沉积物”怎么会出现特高的含金量呢？！同时还没有考虑到成矿物质沉积的条件，依笔者之见，形成“层流沉积物”的主要条件是海底火山活动的间歇期，以及深海的水压条件。否则，沉积物和成矿物质将伴随洋流迁移。

关于沉积岩释放金的研究，笔者是不欣赏的。岩石的裂隙度释放金的研究，仍然停留在溶液对岩石的萃取，或者说是证实“侧分泌”理论的研究，而显得毫无新意。众所周知，微不足道的岩石中的裂隙，显然不能够提供成矿所需要的量。然而，我们不能不看到，他的研究为我们重新认识和判别金矿床形成，特别是对于含金沉积物中的金的来源提供了新的思考：热泉喷流、火山喷气以及含金沉积建造（相当于热泉沉积物）和矿床的风化剥蚀物都应该成

为形成含金沉积建造的物源。

以上两个既典型又极端的实例，可以看出特定的沉积物建造是金矿床形成的主要成矿物质来源。需要说明的是，我们认为成矿流体形成与岩浆和变质作用没有根本的厉害关系，换句话说岩浆和变质作用仅仅是起到了使成矿流体的浓度增加以及能够形成富矿的作用。从中我们还能够得出一个重要的结论性认识，在于沉积物是成矿物质的主要来源，而岩石中的金不可能仅仅通过围岩蚀变获取，以及因此认为成矿定位之前的构造热事件只是起到浓缩成矿流体密度的作用。

3.3 对侧分泌理论的否定与金在热液中的性状

著名的地质学家许靖华（2004.7.27 在中央电视台少儿频道）指出，科学研究总是在对于前人认识的否定过程中发展的。

在全部以往的研究中，人们总是逃脱不了一个十分怪异的概念的束缚，这就是既然成矿作用是在围岩固结的条件下发生的，因此成矿流体的形成也同样是在固结的岩石中形成的。于是人们在研究和追索矿床的成矿物质来源时，总是在解释成矿物质是如何从固结的岩石中被萃取的。这就是作为层控矿床理论基础的“侧分泌”说。

我很久以前就得出结论：姑且不说全部，至少大部分石英中的金，是取源于它们所赋存的岩石。（R 达恩特瑞；1866）。

侧分泌理论由来已久，其基本思想是矿脉的组分取源于脉体的主岩，早在 16 世纪阿格里科拉就已提出过。虽然以后有关侧分泌理论作了某些修改和补充，但是其所固有的两个一般概念依然是：①狭义的侧分泌，组成矿石和脉石的组分直接取自脉体附近的围岩；②广义的侧分泌，矿石和脉石组分来自分布范围很广的主岩，通常为赋存的成矿带的一大套沉积岩、火成岩和与之有关的侵入岩。分泌的机制多种多样；矿石和脉石组分朝脉体的运移可以是侧向的，垂向的（上升或者下降），也可以是斜向的；运移的介质可以是大气降水（地表水），层间（同生）水，变质（热液）水，扩散流，或者上述介质的各种组合。当扩散是主要搬运机制时，元素以沿着颗粒间界面的表面扩散方式迁移，或者表现为通常弥散于岩石中的空穴、粒间、裂隙和其他不连续面中的停滞水进行扩散。

对于侧分泌理论的核心问题在于成矿物质（金）和构成热液的水，不是同生水和不是同时进行萃取的，而是渐进式的萃取。而我们的意见是成矿物质和水是同时、同生并且是同源与含金的沉积物的。由此可知我们有关金矿床的成矿物质来源的认识观是沉积物不仅仅提供了成矿物质，而且同时也提供了成岩期的压实水，从而能够形成含金的稀薄溶液，并进而为成矿流体的形成提供了必要的物质准备。对于“侧分泌”理论否定的主要点是：溶液或热液对岩石中成矿物质的萃取是局限于能够发生交代反应的部位（裂隙发育的部位）；热液萃取的

路径是有限的，不可能萃取出来或者不可能形成成矿所需要的成矿物质的量。如果按照碳酸盐化的萃取方式（R.W. Boyl, 1979），那么形成 100 吨金矿所需要的金的量：需要从 250km^3 体积的含金丰度 $>7.0\times 10^{-9}$ 的绿岩，经过强烈的碳酸盐化之后（假定 $90\text{g}/\text{km}^3$ -按 R. W. 博依尔的假设）。请大家想一想 250km^3 是一个什么样的概念，如果地盾的地壳厚度为 80km ，其长度为 3km 的话，其深度也 $>80\text{km}$ 至上地幔。由此可见，从围岩中萃取成矿物质是不可能的。更何况，带出如此之多的金所需要的水的量呢？！更是一个不可思议的天文数字！（形成 100 吨金矿，含金流体含金量为 1×10^{-9} /吨水，那么需要多少水呢？何况从包裹体测定的含金量为 0.1×10^{-9} ）此外，一个最重要的事实是我们并没有看到如此深广的碳酸盐化现象，所以结论是不可能的。

我们之所以认为成矿流体的形成的初始是源于沉积物的成岩期，主要理由是：金的可溶解状态必须是吸附状态，而其他的任何一种状态都涉及到金在岩石中的赋存。很显然岩石中的金无论是粒间的、还是矿物中呈包裹状态的，都必须使得含金的岩石经过强烈的蚀变（包括风化）和改变原岩的性状，否则金是很难通过溶液的萃取作用将金萃取并溶解在溶液中的。事实上，在金矿区我们并没有看到矿床围岩的大体积的蚀变现象，而是仅仅出现在矿化地质体的附近。由此可见，通过侧分泌是不能够提供成矿所需要的成矿物质的量的。同样的理由，成岩期的压实作用的排水过程的同时必然会从沉积物中带出大量的可溶性元素，其中必然包括金、硫和铁等等。这就为成矿流体的形成提供了物质准备。

著名的地球化学家 A.E. 费尔斯曼（1939）曾强调指出：“对金的地球化学性质研究仍不充分；有关金的地球化学迁移的认识至今还非常混乱”，但他十分明确指出：金的无限可分性是其呈胶体状态的地球化学行为的主因。笔者以为，起码在形成含金沉积建造的过程中（搬运形式和沉积富集形式）起主导作用。砂金矿床的形成就是最具说服力的例证，这也是笔者强调沉积作用是金的唯一初富集的形式依据，并且据此提出了含金沉积建造的地球化学条件或标志（富铁、富硫和富碳），以及十分强调沉积建造应该是含碳质的复理石或类复理石建造（包括浊流沉积建造）。此外，表 II-6 给出的沉积物含金丰度的统计结果，有利于含金沉积物的认识是正确的。

表 6 金在各种沉积物中的丰度 （据 Boyle, 1979）

固结沉积物（地点）	变化范围 10^{-6}	平均	固结沉积物（地点）	变化范围 10^{-6}	平均
火山灰（智利）	0.1~5		生物及化学沉积（里海）	0.0046~0.150	0.0204
深海红粘土火山灰-大西洋	0.15~0.267	0.108	（地中海）	0.0011~0.0065	0.0031
红粘土（巴西盆地）	0.0042~0.0312		（大西洋）	0.0007~0.0034	0.0015
细碎屑岩（阿根廷盆地）	0.0031~0.0173		火山沉积物（大西洋冰岛）	0.0005~0.015	0.0092
碳酸盐（佛罗里达海滨）		0.0039	（地中海，Santorinm）		0.0140
陆源碎屑沉积（波罗的海）	0.0001~0.0054	0.003	大洋沉积物-东太平洋隆起	0.00076~0.00282	0.0013
（里海）	0.002~0.024	0.006	红海含金属沉积物	0.0210~5.6	0.6592

金矿成矿学概论

(地中海)	0.0011~0.009		大陆架沉积物(美国海湾)	0~0.006	
(大西洋)	0.0006~0.0042	0.0013	冲积砂矿	<0.01~200.0	

我们十分强调含金沉积物或者说含金沉积建造型的概念，而不是岩石或者岩石建造的理由还在于岩石含金丰度查定的徒劳无益，即使查定的岩石是矿区远外围的所谓与成矿无关联的样品也是如此。因为，目前所检测的岩石品位已经是成矿后的样品了，它们能够形成矿床的金业已迁移，根本不能够表征成矿前或者成矿时的含金丰度。同时，大量的检测结果得出不确定的结果，例如含金丰度高并不表明能够形成金矿，含金丰度低也并不能够说明不能形成金矿，相反的实例却是存在的，例如小秦岭地区含金丰度为 0.1×10^{-9} ，然而却是我国金矿矿集区之一。

根据上述理由，我们提出了含金沉积建造型的地球化学判别标型，即富铁、富碳和富硫的沉积岩系。因为这些元素的富集能够表征金的丰度高，特别是能够促使金加热溶液和保持金的稳定溶解状态的条件。

为此，就含金沉积建造的主要类型（矿床类型）列入表 II-7 中。从表中可知，笔者将所谓的含金沉积建造划分为两种不同成岩物质来源的大类：即来源于地幔的火山喷流沉积建造和源于古陆补给的沉积建造以及由此构成了第三种类型，即兼具有上述两个成岩物源的含金沉积建造。在本分类中，提出了含金沉积建造岩石组合或者说主岩性质，但是考虑到成岩期是成矿流体的形成期，因此在建造的命名方面是即考虑了岩系构成的建造，又考虑了沉积建造的概念，但需要强调指出的是，无论是岩石组合构成的建造还是提出的沉积物沉积建造其原意都是指沉积物构成的沉积建造。

表 II-7 立金矿床分类表

矿床类型	矿床亚类型	典型矿床实例
I 太古代绿岩带型金矿床	1 与基性熔岩喷气沉积-"含碳质层流沉积物"含金建造有关矿床	西澳卡尔古利金矿田、加拿大 Horns-Mcintyre、Kerr-Addison、印度 Kolar、巴西 Fachuca-Nie Aljier-Monjie 金矿；胶西北矿集区；
	2 与中酸性火山喷流-沉积建造有关金矿床	加拿大 Homlo、金矿诺兰达金矿；小秦岭矿集区、排山楼金矿；
	3 与碳酸盐-硫化物相含金铁造有关金矿床	美国 Homestake、津巴布维、加拿大 Pick Crow、印度 Kolar 部分金矿、巴西 Bosajim de Malina 金矿床；东风金矿
	4 与绿岩带中的含金碎屑沉积建造有关金矿	加拿大 Yellowknife 金矿
II 元古代沉积岩型金矿床	1 与含碳质浊流沉积型含金建造有关金矿	辽南金矿、胶东蓬家乔金矿
	2 与含碳质砂砾沉积型含金建造有关金矿	南非兰德型含砾岩型金矿
	3 与碳酸盐-含碳质碎屑沉积型含金建造有关金矿	与铅锌矿含矿沉积建造有关金矿(辽南地区)
III 古生代浊积岩型金矿床	1 含碳质浊积岩型含金建造有关金矿床	Muruntau 金矿(-银-钨)带、澳大利亚 Bendigo-Ballarat 金矿
	2 与不纯碳酸盐型含金建造有关金矿床	美国内华达矿集区金矿；滇桂黔、陕甘川矿集区金矿

IV与伴生金矿有关金矿床	1 与含金的块状硫化物矿床有关金矿床;	日本菱刈金矿、加拿大赫姆洛金矿、菲律宾碧瑶地区金矿; 浙江遂昌金矿
	2 与含金的铜镍硫化物矿床有关金矿床;	云南墨江铜厂金矿、陕西煎茶岭金矿;
	3 与含金斑岩、矽卡岩型铁铜矿床有关金矿	智利 El indio 金矿; 湖北大冶鸡笼山金矿
V砂金矿床	1 古砂金矿床	陕西黄龙金矿及第三纪埋藏砂金矿
	2 第四纪砂金矿床	
VII风化壳金矿	风化壳型金矿床	西澳 Buddington 铝土型金矿

3.4 金的沉淀成矿与富集规律讨论

笔者感到有关金的沉淀成矿作用还存在较多问题,其中包括蚀变作用、金的成矿沉淀阶段、自然金在矿石中的赋存状态,以及金矿床中的及和银的沉淀富集问题等等。

根据本文提出的成矿理论认为,大多数金矿床的成矿过程表明,都具有明显的围岩蚀变,各种各样的石英脉和不同阶段形成的矿石矿物和脉石矿物。

(1) 关于围岩蚀变

在围岩蚀变方面非常突出的特点是强烈的褪色化。所谓褪色化是将基性的色素离子(如铁、镁、锰、钒、钛等等)带出,以硅酸盐中的二氧化硅残留下来为蚀变的最终产物。

例如铁镁质-超铁镁质岩石的铁镁碳酸盐化→滑石菱镁矿化→硅化;中性-中酸性物质组成的岩石的绿泥石化→绢英岩化→黄铁绢英岩化→硅化;中低温热液的蚀变大致有两种类型,即青磐岩化→冰长石-绢云母化→硅化(玉髓状石英)和酸性硫酸盐化的青磐岩化→绢云母+明矾石→硅化(玉髓状石英)。有的矿床围岩蚀变还常常出现钾化(黑云母化或钾长石化)等等。通常情况下成矿末期出现以方解石脉为特征的碳酸盐化。成矿前的上述蚀变实际上是成矿流体当中不含矿的溶液与围岩之间的渗滤交代作用的产物,是热液性质变化的结果。

显然首先是酸性溶液的氢离子交代→弱酸性的碳酸盐交代→碱性交代→含硅质的碱性交代过程,以及由于溶液的温压不同所形成的不同的蚀变矿物及其组合。因此,围岩蚀变是成矿的标志,但是不是成矿富集的唯一标志。

需要说明的是,围岩蚀变常常出现明显的分带现象,或者说蚀变的强度分带现象,即从远矿蚀变→近矿蚀变通常是绿泥石化带→碳酸盐化带→绢英岩化带→黄铁绢英岩化带→矿化石英脉。对于这种侧向蚀变分带的解释大体有两种不同的看法:

其一是,认为蚀变与矿化是同时发生的。这是由于,介质(溶液、气体或扩散流)从裂隙或其它扩容形迹向外迁移时蚀变作用逐渐减弱造成的。

另一种认为,蚀变分带是由于蚀变介质的连续波动或脉动造成的。由于水溶液的大量进入,首先形成绿泥石化带;其后含有一定数量的CO₂的“波”,在绿泥石化带局部叠加了弱碳酸盐化;最后,由于富含CO₂、K和S的“波”的作用,在靠近矿脉处较早形成的绿泥石碳酸盐化带之上,叠加强烈大量绢云母、碳酸盐及黄铁矿带。

我们赞同后一种观点，其合理性表现在围岩蚀变的机理是建立在流体脉动的机制下发生的，同时由于脉动的每一个阶段的流体性质是不同的，因此形成的围岩蚀变类型也就存在差异，并造成围岩蚀变分带规律。但是需要指出的，造成围岩蚀变的矿物及其组合的因素除了流体的物化体系（T-P-Xi）不同之外，还取决于围岩的岩性。一般情况下，围岩蚀变实质上是不含矿的热液与围岩之间的化学反应，即通常所说的水/岩反应。

绢云母化是岩石褪色化的标志性矿物之一。可以由斜长石的蚀变、钾长石的氢离子交代作用形成，同时析出石英（或二氧化硅）。绢英岩化的高温等同物是云英岩化，低温蚀变的等同物为玉髓（碧玉）-泥化（伊利石-水白云母化）。

硅化是围岩褪色化了的标志性矿物，常常与绢云母构成绢英岩化，绢英岩化是围岩褪色化的最终产物。如果围岩中含有铁质，同时热液中含有硫，则围岩褪色化的最终蚀变矿物组合则为黄铁绢英岩化或黄铁绢英岩。硅化还能够析出所谓的石英岩化和次生石英岩。

青磐岩化或绿盘岩化。青磐岩化或者称为绿盘岩化是中基性火山岩及其碎屑岩的蚀变，由于蚀变岩的颜色以绿色物质，而得名。其蚀变矿物组合可划分为：①阳起石-绿帘石-钠长石；②绿帘石-绿泥石-钠长石；③绿泥石-碳酸盐组合，其又可分为含冰长石或者明矾石（石膏）的绿泥石组合，以及含沸石的矿物组合。不同的蚀变矿物组合是分别是形成深度（温度）的条件反映。青磐岩化的标志性矿物是钠长石、绿帘石和黄铁矿。有时绿帘石常常为晚期的低温的绿纤石和葡萄石所交代，钠长石则为冰长石或正长石交代。此外，青磐岩化叠加后期蚀变出现硅化、绢云母化、沸石化，并同时出现石膏、重晶石、明矾石等硫酸盐矿物。从泥化的蚀变矿物可见有些与青磐岩化类似，因此两者常常呈现出过渡关系，以下为青磐岩化向高级泥化过渡的反应式（图 22）：

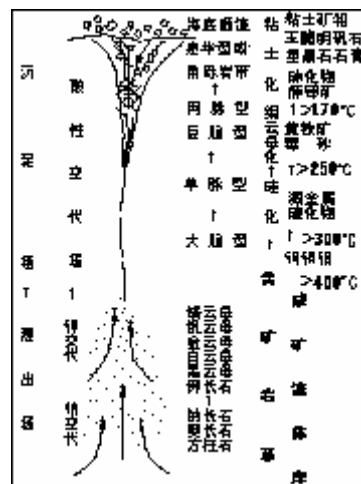
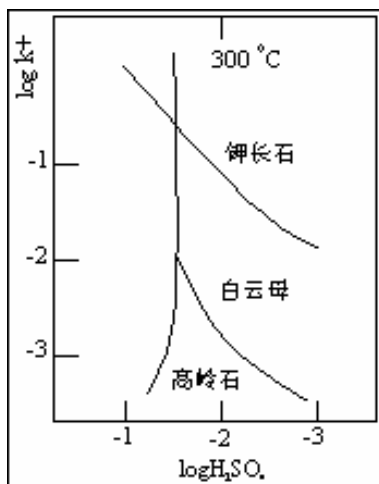
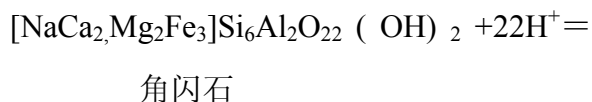
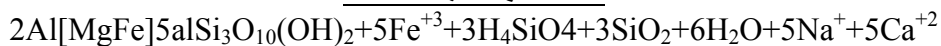


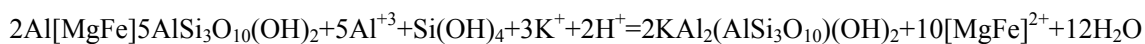
图 22 泥化与 $\log K^+ - \log H_2SO_4$ 关系图解 图 23 金矿化蚀变矿化分带理想模式

（据杜乐天，1989 修改）



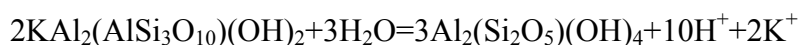


绿泥石



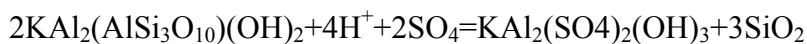
(绿泥石)

(绢云母)



(绢云母)

(迪开石)



(绢云母)

(明矾石)

碳酸盐化也是热液矿床中的普遍蚀变类型，碳酸盐化一般进一步有关按照碳酸盐矿物界线详细划分，而且是十分必要的，而不能够过于简单化。这是因为碳酸盐化的物质可能具有两个不同的来源，一是金属离子源于围岩，另一部分源于热液本身或者说直接从热液中沉淀的。通常情况下我们所说的碳酸盐化的金属离子是源于围岩中的 Ca、Mg、Fe、Mn 形成方解石、白云石、铁白云石、菱铁矿、菱锰矿和菱镁矿。围岩中上述的碳酸盐化也是褪色化的一种标志，鉴于它们与碳酸根结合能力（确切说是溶解度）和先后次序不同，通常情况下首先出现的是铁（锰）镁碳酸盐化，最后则是方解石化。易于引起碳酸盐化的岩石显然是富含铁（锰）镁的岩石，如镁铁质岩、超镁铁质岩类以及中酸性岩类（及其火山岩、火山碎屑岩），含铁质、锰质的碎屑岩类。

(2) 蚀变与矿化的转变标志

对于热液矿床（包括金矿床）从蚀变到矿化的转变的重要标志是石英脉的出现，对此杜乐天先生（1979；1995）提出了“硅桥”的新颖的概括。这可能是由于包括二氧化硅在内的大多数金属成矿元素易于溶解在碱性溶液中，并且以可溶性的硅酸盐 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 的（胶体）形式。也就是说在二氧化硅之前的全部蚀变作用主要是在酸性溶液中发生的（酸性前锋）氢离子交换反应的话，那么从硅化开始则转变为碱性溶液阶段的金属元素成矿期（图 II-23）。从图中可以看出，杜先生认为成矿流体源于含矿岩系的深部碱交代作用，并沿着控矿构造上升产生围岩的酸性蚀变，并且在蚀变的部位由下至上依次形成大脉型→大脉型→复脉型→网脉型→角砾岩型→泉华型（或者海底喷气）

笔者认为杜先生的上述理想模式之中尽管还存在一些题问（笔者作了相应的修改：黑体字部分：这就是其有关成矿物质的来源和成矿流体的形成方面依然是按照“侧分泌”理论和观点想像的，并且此理想模式实际上是两个来源的拼合，即与所谓“碱交代岩”，如我国的河北省崇礼县后沟一带金矿床以及前苏联报道的一些有关金矿床。实际上包括二氧化硅在内的成矿物质大多数是溶解于中性和偏碱性溶液的。既然含矿流体是偏碱性的，因此在成矿流体汇聚的部位必然是与之呈现化学平衡的状态，即偏碱性的。否则，成矿流体中的成矿物质将会发生沉淀。），但是就蚀变与矿化的空间关系及机理等阐述得合理和具有说服力。特别是

金矿成矿学概论

有关酸性交代场是成矿沉淀部位，以及就金矿化的各种类型给予了理想的，但也是比较复合客观实际的产出（空间）样式和层次。表 8 是引自 R W Boyle（1979）有关金矿床的元素-矿物分带，即从热中

表 II-8 金矿化蚀变矿化分带表（据 R W Boyle, 1979）

带	贯通元素	指示元素	Au/Ag	贯通矿物	指示矿物	备注
1	SiO ₂ 、Fe、S	W、Sn、Bi、Mo、Be、Ta、Nb、Li、Cu、F、REE、Th、Zr、U、B、As、S	高	石英、长石、云母、黄铁矿、磁黄铁矿（在某些矿床中磁铁矿/赤铁矿替代黄铁矿）	黑钨矿、锡石、毒砂、辉铜矿、自然铋、辉铋矿、绿柱石、及 U、稀有放射性元素	矿化通常发生在侵入体及其边缘，矿床一般不含金，板块伟晶岩
2	SiO ₂ 、Fe、S、Ca、Mg、Mn	Fe、S、Ag、（Sb）、Te、Au、Ag、Cu、Mo	高	石英、长石、黄铁矿、磁黄铁矿、碳酸盐类在某些矿床中磁铁矿/赤铁矿替代黄铁矿）	毒砂、含 Ni-Co 的砷化物和碲化物、辉钼矿、自然金、白钨矿（可能含铜矿物）	接触变质矿床，有些可能位于侵入体中心即斑岩 Cu/Mo 矿床
3	SiO ₂ 、Fe、S、Ca、Mg、Mn	Cu、S、As、Au、Ag、Te、U		石英、长石、黄铁矿、磁黄铁矿、碳酸盐	黄铜矿、砷黝铜矿-黝铜矿、硫砷铜矿、重晶石、萤石、晶质铀矿（沥青铀矿）	可能叠加在第二带上
4	SiO ₂ 、Fe、S、Ca、Mg、Mn	Zn、Cu、S、（Au）（Ag）	中等	石英、黄铁矿、磁黄铁矿、碳酸盐	闪锌矿、重晶石、萤石	可能与第三带结合
5	SiO ₂ 、Fe、S、Ca、Mg、Mn	Pb、Ag、Au、S、Te	中等	石英、黄铁矿、碳酸盐	方铅矿、碲化物、重晶石、萤石	可能与第四带结合
6	SiO ₂ 、Fe、S、Ca、Mg、Mn	Ag、S、Au		石英、黄铁矿、白铁矿、碳酸盐	螺状硫银矿	可能与第四、第五带结合
7	SiO ₂ 、Fe、S、Ca、Mg、Mn	Sb、As、S、Cu、Zn、Pb、Bi、Ag、Au、Fe、Te、Se	低	石英、黄铁矿、白铁矿、碳酸盐	重晶石、萤石、辉锑矿、硫盐	可能叠加在 3~6 带之上
8	SiO ₂ 、Fe、S、Ca、Mg、Mn	As、Sb、（Au）、（Ag）、（Hg）	低	石英、黄铁矿、白铁矿、碳酸盐	雄黄、雌黄、辉锑矿、重晶石、萤石	可能叠加在第 7 带之上有些含金
9	SiO ₂ 、Fe、S、Ca、Mg、Mn	Hg、（Sb）、（As）		石英、玉髓、黄铁矿、白铁矿、碳酸盐	辰砂、雌黄、雄黄、辉锑矿、重晶石、萤石	可能叠加在第 8 带之上，偶尔含金

到远离中心的金矿床元素、沉淀的矿石矿物及其各个带之间的关系。R W Boyle 给出的矿化蚀分带是集各种金矿床的综合，同样按照笔者的认识和观点存在一定问题，即成矿流体的性质、矿床围岩的性质不同，其蚀变产物尽管具有某些相似之处（即从酸性交代和碱性交代角度方面的相似性），但在蚀变矿物及其矿物组合方面仍然存在着差异。例如富含镁质的围岩常常出现滑石-菱镁矿化、富含镁的淡斜绿泥石化。

金矿床的上述矿化特征的实质，有一些至今尚不十分清楚。例如通常的矿石矿物的矿化阶段几乎总是按照以下的阶段次序进行，似乎显示出非常明显的沉淀的有序性：

铁的硫化物（磁黄铁矿/黄铁矿/毒砂）阶段→自然金沉淀阶段→重金属硫化物矿物沉淀阶段（含铁的重金属硫化物（黄铜矿-铁闪锌矿）亚阶段→不含铁的重金属硫化物（闪锌矿-方铅矿）沉淀亚阶段→银的硫化物或者自然银亚阶段）→锑-汞-砷的硫化物沉淀阶段→碳酸盐（CaCO₃）脉阶段。

有关金的成矿阶段的划分问题比较混乱，诸如一些研究者认为金的沉淀从石英脉形成阶段开始直到重金属硫化物沉淀阶段的全过程都有金的沉淀析出，其证据是因为自然金赋存于上述阶段的矿物中，特别是由于黄铁矿和重金属硫化物作为金的载体矿物。对此笔者通过镜下金的赋存状态观察和相关资料综合，发现自然金形成于铁的硫化物碎裂之后和交代阶段之前。实际上大多数矿床中的脉石英和毒砂或者黄铁矿是金的主要载体矿物，而其它则是次要

的，并且自然金在载体矿物中明显可见的是以晶隙金和裂隙金为主的赋存形式。即使出现所谓的包体金的话，只要十分仔细地观察，特别是在高倍镜下就会发现自然金出现的部位大多数是载体矿物的边缘，特别是都具有微细的裂隙存在。因此有依据认为这些包体金实际上是假“包体金”真裂隙金；以及自然金赋存于矿石矿物的有效裂隙系统的末端。至于自然金赋存于含铁的重金属硫化物（黄铜矿或铁闪锌矿/有时见于方铅矿）中，呈包体金存在的现象。对此的正确解释是，由于含铁重金属硫化物是通过交代载金矿物形成的，因此自然金必然以包体金的形式残留下来所致，而不是自然金与重金属硫化物同时沉淀的产物；至于自然金在方铅矿中呈包体金状态显然不是两者共生的证据，而是一种生长先后的结果。综上，可以得出自然金为独立的成矿阶段，其应该在铁的硫化物沉淀之后，含铁重金属硫化物交代之前沉淀的。贫铁闪锌矿沉淀之后和辉锑矿沉淀之前沉淀的所有矿物具有一个十分鲜明的特点是都含有银，或者说是含银硫化物或硫盐矿物。这就是说，金和银在金矿床中实际上是分离富集的，即在自然金沉淀交代只有微量的银，而在不含铁的硫化物和硫盐矿物沉淀阶段才出现以银为主的析出。广东长坑金、银分离成矿就是最典型金银分离的矿床实例。

(3) 金的赋存形式和沉淀富集的独立阶段

有关金矿床中金的赋存形式的研究和讨论是金矿床成矿研究课题中较为人们所关注的重点问题之一。研究结果仍然存在着较大的分歧意见，如有人通过加热实验认为，毒砂和黄铁矿中存在的超显微金是呈类质同像的形式赋存于载体矿物之中；有的认为金不可能呈类质同像的形式赋存，并提出可能以填间固溶体的形式进入富硫贫铁的载体矿物（黄铁矿或者磁黄铁矿或者毒砂）中。并因此认为这类金是与载体矿物同时沉淀的；另一类在载体矿物（含重金属硫化物矿物）中呈包体金的，也是与载体矿物同时沉淀的，其中也包括石英中的游离金。唯有裂隙金和晶隙金才是晚于矿石矿物的自然金。

关于金的沉淀机理问题讨论的并不深入，惟有人提出氧化-还原沉淀机理的看法，如金是以正离子的形式从含金溶液中沉淀的，因此需要将其还原为自然金，故需要还原剂给出电子。鉴于此，有人认为在自然金与载金黄铁矿的接触部位发现了氧化高铁（ Fe_2O_3 ）赤铁矿存在；在金矿脉中存在着石墨之类的无机碳等等都可以作为氧化-还原成矿沉淀机理。

关于金的成色和矿石中的 Au/Ag 比值问题，提出了成矿温度高、成矿深度大和矿床形成的时代越早，则金的成色、 Au/Ag 比值越大的结论。然而事实上并非完全如此，例如很多浅成低温的金矿床其中的自然金的成色、 Au/Ag 比值并不低。

对于上述一系列问题，笔者暂不作解释，不过有些观察到的现象提供给大家供思考：

关于矿石矿物的沉淀次序问题，只要我们通过矿相显微镜下认真地观察就会得出十分明确的解答。一般情况下，毒砂和黄铁矿很少出现交代其它种类的矿物，大多数是从溶液中直接沉淀的，所以毒砂和黄铁矿呈结晶结构的自形晶、半自形和他形晶。磁黄铁矿通常为他形

晶并且常常出现与毒砂和黄铁矿之间的包裹关系，磁黄铁矿与黄铁矿之间的这种包裹关系有时出现了互相包裹的现象。通常情况下，磁黄铁矿包裹毒砂和黄铁矿，显然表明了磁黄铁矿沉淀晚于毒砂和黄铁矿；后者表明了溶液中硫逸度的变化状态所至。铁的硫化物（特别是毒砂、黄铁矿）常常被后续沉淀的硫化物，特别是闪锌矿和黄铜矿（有时可见辉铋矿交代铁的硫化物现象，例如辽南的五龙金矿最为典型）所交代，从而出现了较为普遍的交代结构。这种交代沉淀阶段在大多数金矿床中较为普遍，并且因此造成了早期阶段矿石矿物的赋存形式、矿石组构均发生了重大的变化，对此笔者称为矿石组构的重组作用。正因为这种重组作用，导致了部分自然金（被交代的黄铜矿或毒砂中的自然金）的赋存状态发生转移，出现了所谓黄铜矿和铁闪锌矿是自然金的载体矿物的现象。但是有一些重金属硫化物如闪锌矿和方铅矿却是不存在交代铁的硫化物矿物的现象。这就是说，在重金属硫化物阶段出现了两种沉淀方式，一种是通过交代沉淀的，另一种是直接从溶液中沉淀的。通过交代沉淀的硫化物通常是含铁的，例如铁闪锌矿和黄铜矿；不通过交代方式沉淀的闪锌矿通常是贫铁闪锌矿。硫盐矿物沉淀阶段通过以上观察，可以得出上述矿石矿物的结晶沉淀次序，即毒砂→黄铁矿→磁黄铁矿→细粒黄铁矿→铁闪锌矿→黄铜矿→砷黝铜矿-黝铜矿→闪锌矿-方铅矿→硫锑铅矿-脆硫锑铅矿→辉锑矿→雄黄-雌黄-自然砷。黝铜矿和砷黝铜矿常常出现在黄铜矿和贫铁闪锌矿之间出现，有时出现在方铅矿之后。

经观察发现在交代现象出现之前，脉石英和铁的硫化物常常出现碎裂或者糜棱岩化现象，据此可以将矿石矿物形成阶段划分为石英脉形成阶段、铁的硫化物沉淀阶段和重金属硫化物早期阶段和晚期阶段。硫盐沉淀阶段同样出现广泛的交代现象，这种交代作用同样会导致矿石的组构发生再次重组，因此也能够导致自然金的载体矿物的扩大化；一些硫化物例如方铅矿的充填沉淀作用，导致了其包裹早期形成的自然金，而成为了金的“载体矿物”。这就较好地解释了很多入提出的所谓金的多次“沉淀”阶段的认识是一种现象，而不是实质。所以，我们提出了阶段独立成矿阶段的认识是客观的。

此外，我们通过一些矿床自然金的探针分析结果的再统计分析表明，全部探针分析结果的加权平均值与探针剖面法分析的结果是一致的，由此可见，探针分析结果加权平均值应该代表矿床中自然金的成色。造成一个矿床中的自然金具有多种金银合金矿物存在的主要原因是探针分析仅仅是自然金矿物颗粒中的一个点的成分，而不能够代表整个矿物颗粒的成色所至。换言之，自然金的沉淀结晶过程显示出一个缓慢的降温过程，从而出现了由颗粒的中心向外成色降低的“银壳”结构的特征。与之相反，在表生条件下自然金具有“金壳”结构的特征，这表明在表生条件下金银的分离结果。

综上所述，如果按照金银富集进行金矿床的成矿期次和阶段的划分的话，可以划分为不含金的石英脉阶段→含金的铁的硫化物阶段→含银硫化物-硫盐阶段→不含银的硫化物-硫盐

阶段→不含金银的碳酸盐阶段。据此，得出的结论是在金矿床中，自然金只有一个沉淀阶段。其淋滤依据是金的物理化学和成矿地球化学性质的特殊性—二重性的成矿地球化学行为的结果。

有人对于其中金的独立成矿阶段提出了令人信服的解释，如 W H 怀特（1943）对加拿大和美国 27 个地区的矿床的研究表明，这些矿床具有很多特点，其中某些特点几乎反映了所有金矿的共性。裂隙是一种微裂作用，它几乎与金矿脉中的石英重结晶作用同时发生（笔者注：剪切带型金矿中的石英脉常常出现发育的毕姆纹和发生糜棱岩化、粒化、重结晶）。从而为含金溶液进入石英脉中，并发生沉淀提供了空间。同时也表明了成矿过程中的微裂的出现是自然金沉淀的标志和表征了自然金沉淀的独立行为。故，W H 怀特（1942）认为含金溶液是成矿流体中的“残余”溶液（详见 R W 博依尔：《黄金开发史和金矿床成因》：379~390）。

(4) 成矿的温压特征

必须说明的是，笔者比较赞赏胡受奚等人（1997）的观点：“浅成深度不浅，低温温度不低”，对此说明之。

所谓成矿深度是指由成矿时矿床距当时地表的深度，它是通过上覆（岩层）岩石的静岩压力换算的。通常定义为距成矿时地表 100~1000m 范围内的为浅成。深度确定的更为重要的依据是成矿流体的沸腾现象，Seward（1982）就流体沸腾作了说明，他指出沸点为 350℃ 的纯水沸腾的静水压力的深度为 2.3 km（静岩压力换算深度为 $\geq 700\text{m}$ ）；伴随溶液盐度的增加，在体系沸点的条件下，产生静水压力的深度降低，如盐度为 10wt%NaCl 的溶液，则为 1.8km（静岩压力换算深度为 $\geq 600\text{m}$ ）；如果热液中富含二氧化碳等挥发性气体，若阻挡溶液沸腾的静岩压力（深度）则更大。由此表明，在 5km 以上的地壳浅层次条件下，成矿构造裂隙几乎表现为静水压力，换言之，构造裂隙几乎是与地表连通的。由此可见，所谓的浅成的成矿深度最大可达 $\leq 5\text{km}$ 。如果矿床中的成矿流体呈现出沸腾状态的话，其成矿温度可达 $\leq 350^\circ\text{C}$ 。这就是说，浅成矿床的成矿温度并不是低的。因此认为，金矿床的形成深度属于浅成。

3.5 关于含金剪切带型的解释

本小节试图运用本文提出的“液态矿源说，二次迁移论”金矿成矿理论解释博氏等人提出的有关含金剪切带形成的导致环境、条件；三阶段成矿模式，以及自我的相关思考。

(1) 含金韧性剪切带概念及其形成的环境

所谓含金韧性剪切带是特指形成于含金沉积建造型成岩期或者变质变形期的同韧性剪切带。因此含金韧性剪切带经常出现于表壳岩或者基底含金沉积建造形成期，甚至是基底含金沉积建造同沉积盆地的同生“断裂”。例如太古代绿岩带、我国华北陆台区，辽南地区早元古

界裂谷带形成期，华南板块的早中元古代（扬子板块的江南古陆形成期双桥山群、云南的昆阳群、海南的抱板群、两广的云开群及其等同物），上述岩区广泛分别含金韧性剪切带及含金剪切带型金矿床。这就给予了十分明确的指示，含金韧性剪切带形成于基底含金沉积建造的形成期。故可定义为同韧性剪切带，才可能是含金韧性剪切带。这种同韧性剪切带才可能兼具控矿构造和自我成矿机制的特殊性。

对此，我们的解释是这种同韧性剪切带型之所以形成于上述基底岩系形成期，尤其是变质变形期的强烈活动，才可能作为“扩容带”最大限度地集纳周边含金沉积建造成岩期形成的含金溶液，构成了含金同韧性剪切带型成矿流体库。正因为是一种成矿流体库的构造样式，才能够兼具上述两种作用，而显示出其特殊性。

问题是，为什么基底或者表壳岩形成期能够形成韧性剪切带构造呢，我们的解释是十分简单的。因为在表壳岩形成期的地热梯度是很高的，并且是在还原条件下，因此塑性形变发育，不仅仅褶皱如此，由褶皱初始的线性塑变带也是必然的。据此，可以认为所谓的后韧性剪切带不具备作为成矿流体库的条件，因而也就不具有兼具两种作用了。鉴于此，我们不赞同那种将石英脉型、“层控性”作为含金剪切带的分类。这种后韧性剪切带只是成矿期形成，并叠加在控矿构造之上的一种浅层次塑变。

(2)关于三阶段成矿模式

既然含金韧性剪切带作为成矿流体库，显然其成矿作用应该符合于前述的所有成矿流体库构造样式的成矿作用及其过程，而无特殊性。这就是说，含金韧性剪切带的成矿作用必须是经历了抬升过程，以及其内的成矿流体也是由分层赋存的流体。种种迹象表明，这种抬升的层次是适宜金矿形成和成矿沉淀的脆性变形域浅层次和条件。否则成矿流体不会发生成矿期的流动，因此也就不能成矿。例如蚀变作用，以及出现的碳酸盐化和绿泥石化表征了是浅成和低温的产物；石英脉（含细脉带或网脉带）充填和它的形成条件同样反映出较低温压的条件，以及大量的含有砷锑硫盐矿物更是低温的标志，尤其是浅成超浅成脉岩（包括煌斑岩岩脉）同样是浅成脆性变形域的物证标志。

至于何时抬升成矿，则取决于地壳的运动。其中一个十分重要的误导理念必须更正，这就是无盖层的基底岩系常常被误认为是一直处于陆地的风化剥蚀状态。笔者对此是持否定意见的，君不见，大洋洋底同样存在着盆岭和海沟，同样存在着海蚀作用和洋流的冲积与搬运。一切沉积物的陆源补给说不是通用的理论，起码不广泛适于基底岩系的风化剥蚀作用。提及此问题具有两个方面的意义：其一是成矿时的围压（海底成矿条件）和早中元古代裂陷槽沉积的物源补给的还原条件。

此外，同韧性剪切带与其它容矿断裂构造一样，是一个相对的封闭体系，否则不能形成金矿床，而只能够形成含金热泉了。以上讨论是作为含金剪切带型金矿床成矿阶段和成矿作

用过程的基础提出的，以下将就博氏等人的三阶段说具体讨论如下（参阅第一章）：

从博氏等人的基本成矿作用的原理来看大体经历了从成矿溶液中沉淀的阶段（磁黄铁矿含金阶段）→阶段叠加富集及块金是通过剪切带的活动，形成金的“微粒云”，并且“微粒云”是导致金的成矿富集。至于金在硫化物中的赋存状态，以“离子金”占据毒砂砷的晶格的认识等等都是与实际不相符的。似乎给人们留下的成矿机制主要是构造作用。对此，笔者是不能苟同的。其一含金韧性剪切带具有明显的蚀变，显示出热液成矿属性的普遍特点；其二是矿石矿物和脉石矿物的沉淀具有明显的阶段性，显示出从成矿流体沉淀的次序。至于滑石菱镁片岩对硫化物的富集，早期磁黄铁矿富含自然金，而又提出不能形成具有工业意义的矿床的例证等等，都是令人莫解的。

微粒云是物源的提法不确定性在于，①如果金从硫化物中机械的出溶，那么就不可能再观察到含金的硫化物，以及这种硫化物将被破坏至“胶体”粒级，否则其内的自然金不可能出溶。诚然根据金的“热归并性”能够导致金的长大现象，但是由构造的动能转变成热能的温度通常在 360°C 左右。这就是说韧性剪切带型金矿床的微裂隙的摩擦热难以释放如此高的热能，因此“微粒云”仅仅是一种假设。实际上，我们观察到的，导致机械出溶的现象是压扭性断裂追踪容矿断裂的边缘再活动，磨碎了金的载体矿物黄铁矿至粉末状（例如峪耳崖金矿、二道甸子金矿等），对比之下，微裂隙的活动是不可能导致金的“热归并性”出现的。

②微粒云的块金效应的不合理性，块金效应不是含金剪切带型金矿床所独有的现象。君不闻采矿者说，某某矿曾经遇到大片的叶子金；某某金矿中含有明金，乃至块金等等。实际上“原生”的明金在大部分金矿，尤其是石英脉型金矿中是普遍的一种现象，并且明金存在的部位往往是很少出现硫化物的“老白干”石英脉中。对于这种块金的形成通常认为是“再溶解，近迁移”的产物（图 24）。据研究表明，这种块金常常位于矿床的上部，以及通常很少硫化物的石英脉中（如我国蓬莱地区的黑岚沟金矿和大柳夸金矿）。正因为如此，在形成狗头金的理论中，提出了胶体成因说和源于原生矿中的块金风化剥蚀的观点。

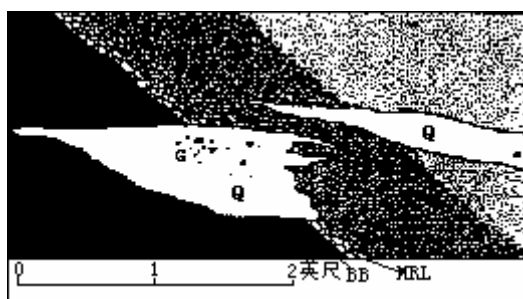


图 24 切穿梅因里夫-利窝层（MRL）和勃莱克巴尔层（BB）的次生石英脉，粗粒金（以 G 表示）

（转引自 R.W.Boyl, 1984）

至于含金剪切带型金矿床出现一些基性岩独有的元素组成的矿物，如辉砷镍矿（ NiAsS ）、硫锑镍矿（ $\text{Ni}_9\text{Sb}_2\text{S}_8$ ）和针镍矿（ NiS ）等也不是剪切带独有的，例如我国的太白金矿就出现

了类似物，如六方硫镍矿、紫硫镍矿、硫铋镍矿、辉钴矿、针镍矿、硫镍矿，甚至出现铂矿物和微粒金刚石（穆龙套金矿）。依笔者之见，一些特殊的矿物的出现的主要原因不是含金剪切带型金矿床的特殊，二是取决于成矿物质来源的性质。例如含碳质碎屑岩系，常常是富含铜、钼、铂以及稀土元素。

综上所述，含金剪切带型金矿床金矿床的特殊性仅仅在于它是陆壳基底岩系的一种含金成矿流体库，因此兼具控矿和成矿两种作用的线性构造。

4 关于找矿理论

4.1 找矿理论研究基本状况

实现理论找矿必须建立找矿理论，这是显而易见的。但是，目前在这方面还不是很成熟，效果并不十分明显。据悉加拿大学者曾提出了根据金矿床的成矿背景建立了一个找矿勘查模型；以及当前普遍推崇的是根据矿床的成矿模式作为理论找矿和就矿找矿的基础。在真正提出找矿理论方面，依笔者之见还应该首推吕古贤（2000）提出的“构造地球物理化学”金矿找矿理论。据笔者所知，当前比较流行的是并且是大量的有关成矿预测的理论和方法原理，如范永香等（1991）提出了运用确定成矿场的成矿预测理论和方法；赵朋大及其学子运用数学地质和统计分析原理，建立的数学找矿模型和理论方法；李惠（1990）提出的有关金矿床地球化学叠加晕的找矿原理；王世称先生提出的“综合信息解释原理与矿产预测图编制方法”（1989）等。但是这些已有的找矿理论和方法原理并不能够为人们所理解和掌握，特别是对于野外地质找矿人员还很不适应和很不适合。那么如何建立一个能够从原理到实际的可操作性方面兼备的，并且能够指导各类金属矿床，尤其是热液矿床的找矿理论当是亟待解决的重大课题任务。

依笔者之见，建立的找矿理论应该是依据实际地质找矿需要解决的问题和难点：客观实际地确定矿化地质体的范围，矿床体的赋存空间、规模与产出状态（特别是对剥蚀程度的估测），确定矿化富集部位等以实现减少和最大的避免地质勘查投入的风险性和判别投入地质找矿在经济效益方面的合理性，从而适应“攻深、找盲、求新、做大”的找矿任务和市场经济的需求，同时也是规范矿业市场的需要。

以上这些地质找矿问题的解决，当是找矿理论确立的目标和前提。我想目前所执行的地质勘查规范提出的预查阶段的规范中，十分强调预测的研究也是试图从认识上解决上述问题，进而实现理论找矿的目的。

4.2 成矿体系找矿理论提出及其基本概念

人们赋予成矿学的基本内涵和出发点有二：其一是能够查明地壳中可以利用的地质矿产资源的时空聚集规律；其二是揭示和回答矿产资源时空聚集的条件、原理、样式和程度（矿床类型及其富集成矿原理），进而实现理论指导下的地质找矿。这就是说，成矿学的理论核心不仅仅限于成矿理论范畴，同时是能够指导地质找矿和能动的建立地质找矿理论。如上所述，鉴于目前提出的相关理论和方法尚需作以进一步补充、修改和完善，尤其是在指导找矿方面理论的匮乏，而需要提出适于理论找矿的找矿理论。为此，笔者提出了一个全新的成矿体系（Ore-forming System）找矿理论，并用于指导金属矿床的地质找矿勘查。

(1) 成矿体系概念

众所周知，体系是相对于环境而言的，与环境之间以界面相分离的，以及受到环境所制约的，其范围可大，又可小的，由相互关联的物质及其特定状态构成的。根据体系的概念，成矿体系是一个相对于成矿地质环境和背景独立存在的，是由矿化地质体为主体及其相关联的地质地球化学和地球物理性状组成的地质范畴或地质范围。根据液态矿源说，二次迁移论地质成矿理论，成矿体系是由成矿物质及其载流体（岩浆的、热液的、各种含矿的水溶液等等）构成的含矿流体的物化体系，以及含矿流体赋存的地质构造样式和部位组成的地质成矿构造体系构成的。例如，岩浆矿床是由含矿岩浆组成的，它的侵位与成矿，取决于岩浆侵位条件（主要是构造环境与条件），从而构成了岩浆矿床的成矿体系。同样沉积矿床也是由含矿的沉积物及其搬运、沉积的载流体组成的成矿体系，对此人们统称为含矿沉积建造，例如硅铁质建造、含铜砂页岩建造等。热液矿床的成矿体系是成矿物质及其热液载流体组成的成矿体系，热液成矿体系依托与地质构造环境的变化而变化进入成矿状态的，构成了成矿时的成矿体系（或者称为成矿场）。环境成矿体系的范围实际是指成矿圈闭的界线规范的范围。根据环境与体系之间的制约关系，成矿体系的伴随地质环境变化而变化的过程，即自组织作用过程称为成矿作用过程。的十分强调相对于环境存在的孤立地质地球化学和地质地球物理的性状，以及伴随环境变化而变化的成矿体系的性状。由此可见，所谓的成矿体系包括了两个主要的组成部分：其一是鉴于体系是相对于环境存在的，因此，成矿体系的形成及其成矿作用是以环境变化为制约条件的体系的动态调整过程及其产物。

综上可以得出成矿体系的基本概念是，在特定的地质时空环境中，相对于环境呈封闭状态独立存在的含矿流体的物化体系和地质构造体系的总和。

从上述概念出发，追索成矿体系的形成条件、产出环境和判别成矿体系的组成及其范围，以及成矿定位之后残留信息就是以成矿体系找矿理论为指导的地质找矿。

(2) 相关概念的定义及其找矿分析

成矿体系相关联的概念有：成矿物质及其载流体圈闭、成矿圈闭与成矿体系的范围界线；

成矿定位与成矿后重就位；成矿后残留的成矿体系判别等。

成矿物质及其载流体圈闭是指成矿物质及其载流体的源在地壳乃至更深层次的存储及其存储的条件。例如含矿岩浆房、含矿热液流体库以及沉积矿产的补给物源等。

成矿圈闭或成矿体系的范围是指形成的矿床、矿田、矿化带乃至成矿域的范围，称为成矿体系的范围或者称为成矿圈闭。

成矿体系或成矿圈闭的界线是指矿化地质体赋存的地质范围及其地质构造围限。成矿体系的地质边界及其范围的确定是地质勘查中最基础的地质问题。几上几下的多轮次的地质找矿教训，在勘探范围的邻区发现了新的矿床，后续的找矿新突破所造成的“几家欢乐，几家愁”的情景等等的地质找矿的荣辱兴衰历史使得人们耿耿于怀，在很大程度上不都是因为地质勘查的范围不清，界线不明所致吗！现今依然如此，依然呈现出凭借勘查工程的“探索”状态。这正是本文提出成矿体系范围和地质边界的实际找矿意义所在。

那么如何按照成矿体系找矿理论确定矿化体的地质边界呢？如上所述，成矿体系是由成矿带物化体系和地质构造体系组成的，很显然，地质构造体系的范围和边界就是成矿体系的范围和地质边界。在构造控矿的研究中，人们总结了成矿构造体系的“埃级控矿”的理论和所谓一级断裂构造不成矿的结论。所谓一级构造是相对而言的，对于矿床来讲一级构造就是控制矿化地质体赋存空间的围限构造（断裂），或者说矿床级的成矿圈闭的围限构造（断裂）。它是由比之控矿构造体系更高一级的构造体系组成的，热液矿床的范围及其地质边界实质上就是控矿构造体系的地质范围和边界。对于更大尺度范围，将涉及矿化体群、带的控矿构造体系，例如帚状构造体系、山字型构造体系，推覆构造体系、伸展-变质核杂岩构造体系等等。甚至对于成矿域，矿集区的成矿体系的范围和地质界线常常与各个级序的大地构造单元/地体/地块/断块的范围和地质构造边界有关。

成矿体系找矿理论涉及成矿时的成矿体系状态和成矿后成矿体系的状态，对于前者，可称为成矿场，或者称为残留成矿场。在成矿预测和地质找矿过程中，残留成矿场的确定显然是重要的。但是，若获取残留成矿场的状态，必须首先查明成矿场的状态，只有这样，才可能经过比对确定残留成矿场的赋存状态。例如，残留成矿场可能是成矿场的局部残留，也可能是大部分保存，由此可见对于残留成矿场的状态的确定直接关系到地质找矿的成果。残留成矿场的状态、范围同样需要通过对成矿时的控矿构造体系加以判定。为此，需要从成矿后控制残留成矿场的控制构造体系筛选出成矿时控矿构造体系，即恢复成矿时的成矿场。只有这样，才能够获取成矿后成矿场重就位的要素和状态。直白地讲，“若要进行成矿预测，必须查明成矿时的控矿构造体系；若要进行有效的勘查工程布设必须查明成矿后控制矿化体空间展布的构造体系”。

在上述论述中涉及控矿构造体系和控制构造体系的概念，就此分别说明如下：

成矿时的控矿构造体系，是由控制成矿物质及其载流体的运移的（通道或路径）构造和成矿定位的控制构造组成的。对于热液矿床来讲，即通常所说的配矿断裂构造和容矿断裂构造。本文强调配矿断裂构造的寓意在于配矿断裂构造不仅仅是成矿流体的通道，并且是分配成矿流体进入相同级别矿化体的构造。由于配矿断裂构造和容矿断裂构造是成矿时同时活动，并控制矿化的成矿控制构造体系，所以本文借用了由赵寅震先生提出的一个十分恰如其分的概念，即同成矿构造体系来表征。通常情况下同成矿构造体系是由同一应力场形成的同序次构造，并且构造的力学性质相反的（见本章）一对（配矿和容矿）断裂构造所组成的。其地质找矿的意义在于，通常的地质找矿常常是沿着容矿断裂构造追索和勘查，忽略了对配矿断裂构造的判别，由此造成了同级别矿化体的丢失。这种找矿思路和方法与老百姓并无差别，只不过懂得一些地质而已。本文强调配矿断裂构造是控制同级别矿化体空间展布格局和样式的断裂构造，因此查明配矿断裂构造是实现地质找矿有效性的前提。

本文提出的矿化体控制构造体系是特指成矿后导致矿化体重就位的构造体系。由于目前我们所面对的残留成矿场，实际上是为成矿后构造改造了的成矿场，是一个同成矿构造体系与控制构造体系混杂在一起的状态。特别是，同成矿构造体系于成矿后的的继承性活动，就更为错综复杂了。因此，如何从中筛选出同成矿构造体系则是地质找矿的关键。本文的方法是，首先查明容矿断裂构造的活动次序，进而判别与之同序次的断裂构造。其依据是同成矿构造体系应力场的两组断裂构造是控制矿化体的构造，是一对同序次，力学性质相反的断裂构造，并且在成矿后都同样发生对应的继承性活动。据此，就能够从错综复杂的各个期次的断裂构造中筛选出同成矿构造体系了。

4.3 成矿体系与定位成矿预测

众所周知，进行成矿预测人们所希望的是能够达到定量预测的程度，回答矿在哪？有多少？贫还是富？品级如何？由此可以实现直接找矿获取储量的目的，岂不乐哉。然而现实毕竟是想为而不可为，就是说科技水平与实现理论境界还存在着一定的错距，犹如“嫦娥奔月”还需要一段时间，而有待于科技的进步与发展。直接实现定量成矿预测需要对成矿流体包裹体中的成矿物质的溶解度测定，例如对金矿的成矿流体包裹体中的金的溶解度的测定，其需要的不仅仅是检测的精度 $<<10\times10^{-9}$ ，而且需要更高的精度和灵敏度。但是，我们通过成矿体系之中的成矿流体体系能够实现定位成矿预测。为此，详细阐述如下：

(1) 成矿流体的形成

能够形成目前具有经济价值标准的矿床的成矿流体并不都是通过一次作用形成的，而是需要其不断地演化过程实现的。这就是说，初始应该是含有成矿物质的流体体系，而形成真正意义上的成矿流体应该是成矿流体本身的成矿物质的聚合程度达到能够形成具有工业价值

的矿床的浓度。这一过程，就是成矿流体的形成作用。这一思路 and 观点，将会剥离成矿流体形成的神秘面纱，还以其本质。

我们的结论是，任何一个成矿体系的形成至少需要二次以上的分异作用，才能够形成具有工业价值的矿床，分异作用越少，显然其形成矿床的贫富必然存在明显的差异，就是说分异的次数越多，形成富矿的几率越大。由此可见，成矿物质及其载流体的分异作用及其次数和强度是成矿的前提。

首先是成矿流体与非成矿流体的分异，这是必须的过程，否则就不能形成矿床。这一分异作用的基本原理是成矿物质与成岩物质是不相容的元素组成的，因此在成矿作用过程中成矿物质将从成矿物质及其载流体中分异出来形成含矿流体或者是含矿的稀薄流体或溶液。如果在此情况下，进入成矿状态成矿的话，通常是贫矿化，甚至不具工业意义。因此需要再分异作用和多次分异，以促使含矿溶液或含矿流体的成矿物质的浓度增高。导致这种分异的条件是成矿流体体系的性状，即从复杂的有限混溶状态向稳定的有限混溶状态演化，这一演化过程必然是促使含矿流体的浓度增高，最终进入成矿状态。导致可能发生多次分异作用的外部因素是后续的构造热事件。

上述分异作用过程可以运用经典的热力学方程表述之：

第一次成矿物化体系是在一定的温压条件下的相对均一态，就是说成矿物质及其载流体物质（即非成矿物质为主组成）的呈均一状态。其综合表达式： $T-P-X_i$ 。T 为体系的温度；P 为体系的压力； X_i 为体系的化学组成。其分异作用是混溶状态到不混溶状态，即：

$$(T-P-X_i) \rightarrow (T-P-X_{ki}) + (T-P-X_{yi})$$

上式中 X_{ki} 表征成矿物质组成； X_{yi} 表征成岩物质组成。

例如，岩浆成矿体系是在含矿的岩浆侵位过程中或者侵位后的固结的过程中，从岩浆中分异（结晶分异/重力分异/熔离分异作用等等）形成的，并且以岩浆中的不相容元素（成矿元素）为主体构成的成矿流体体系（地质的和物理化学的）。沉积成矿体系同样是在搬运和沉积过程中，通过搬运分异（方式）作用和沉积分异作用形成的成矿体系。热液成矿体系看似很复杂，实质上也是在成岩演化的过程中形成的热液成矿体系。

进入第二（多）次分异作用的表达式是：

$$(T-P-X_{ki}) \rightarrow (T-P-X_{kai}) + (T-P-X_{kbi}) + (T-P-X_{kci}) + \dots + (T-P-X_{sni})$$

上式中 X_{ki} 为第一次分异的含有成矿物质的物化体系的物质组成； X_{ai} 、 X_{kbi} 、 X_{kci} 分别表征分异的含有不同成矿元素的子体系的物质组成； X_{sni} 表征分异的不含成矿元素子体系的物质组成。

能够从含矿的流体体系中，最容易分异出来的子体系是不含成矿元素的流体，它们通常是一些溶解度较低的易挥发的物质（气体和酸性物质），因此这一分异作用能够实现成矿物

质的浓度增高的目的。

(2)成矿时成矿流体的分异与定位预测

成矿分异作用的过程：首先进入容矿空间的流体是易挥发组分：接续依次是含有不同成矿元素的子体系，最后也应该是不含矿的，但是是溶解度最大的物质组成的子体系，而结束成矿作用过程。这一过程的综合表达式：

$$(T-P-X_{ki})_{\text{成矿前成矿流体状态}} - (T-P-X_{li})_{\text{成矿时残余流体状态}} = \Delta(T-P-X_t)_{\text{成矿条件}}$$

上式中 $(T-P-X_{ki})$ 表征成矿前成矿流体体系； $(T-P-X_{li})$ 表征成矿时残余流体状态（残留在矿石矿物中的流体包裹体）；很显然，上式中的结果是 $\Delta(T-P-X_t)$ 应该表征成矿的参数，故分解之得到： ΔT 、 ΔP 和 ΔX_t ，即表征了成矿沉淀时温度的变化、压力的变化和成矿流体体系的组成变化是导致成矿物沉淀的原因。根据目前流体包裹体研究的现状，组分的测定只能够给出定性的结果；温度的测定需要压力的校正；唯有压力可以直接测定。由此，进行成矿流体压力的测定，并获取压力的变化值是可行的。由于压力可以换算成为深度，据此就能够获得矿化的初始赋矿区间，进而为成矿时成矿场的恢复提出了可靠的参数。以上就是，实现定位成矿预测的理论思考。

2.4.4 成矿富集机理

在地质找矿过程中，有关矿床的矿化富集问题是找矿者最为十分关注的问题。换言之，人们的投入总是希望有较大的回报，总是可望找到富而大的矿床。对此，笔者将从几个侧面或者说导致矿化富集的几个因素论述如下：

(1)成矿体系是一次还是多次分异演化定位的是判别能否形成富矿的依据之一

前述中提及，导致矿化富集的主要原因是判别含矿溶液初始形成后是否经历了多次分异演化作用，多则富，少则贫。那么如何判别成矿体系的分异演化次数呢？主要的导致标志是什么？对此，以金矿为例分析论证之。

从人们的直观感觉得到的答案是微细粒浸染型金矿通常是贫矿，而石英脉型金矿-石英网脉型是往往是富矿和特大型金矿的矿化标志。那么两者之间为什么出现这种贫富差别呢？笔者以为主要是两者产出的环境和背景不同所致。众所周知微细粒浸染型金矿大多数产于低级变质岩区，岩浆活动微弱，主要是一些宽缓褶皱和断裂活动，并且含矿地块构造形变几乎是一次或者很少次数就抬升进入成矿定位。石英脉型金矿床常常产于强烈活动的地体边缘，构成了通常所说的构造岩浆岩带。这种成矿环境上的差异主要表现在对初始形成的成矿体系分异演化的强度和次数明显的差异，由此可见考查分析的目的在于查明成矿流体体系的演化及其过程：即查明含矿溶液形成之后，再没有经历分异演化过程就进入成矿定位阶段，那么形成的矿床，一般情况是贫矿。属于经过一次分异形成的矿床如金刚石矿床、块状硫化物矿床（喷硫-沉积矿床）和超微细粒浸染型矿床等等；如果成矿体系是经过了多次分异演化过程，那么

所形成的矿床通常是富矿床，其显示的地质特征应该具有明显的岩浆分异的岩浆矿床、热液脉状、细脉—网脉状矿床等等。其原因在于通过多次分异能够导致成矿物质的溶解度的提高，并且能够促使非成矿元素（或物质）的分离，因此能够形成富而大的矿床。

同样道理，对那些微细粒浸染型贫而大的矿床（如卡林型），能否形成富而大的金矿床，则需要从成矿流体的分异作用强弱角度去考查。例如，在成矿定位期或者成矿定位之前，存在着能够导致成矿流体分异的因素的深刻影响（如岩浆活动强烈、矿床出现了矿化石英脉、细脉-网脉），并且在空间上出现了明显的矿化分带和矿床分带等等，那么就能够预见其形成富而大的矿床可能性。这就是说，浅部的贫而大是深部的富而大的征兆和指示。所以，人们曾经建立了浅成低温→中成中温热液矿床模式，如热泉型→石英细脉-网脉型→石英大脉型；热泉型→角砾岩筒型→斑岩型→夕卡岩型（如智利铜矿带）。

4.5 成矿物质来源的丰富与否是判别成矿规模的基础

上述仅仅是从成矿流体的分异作用角度论证能否形成贫或富矿化，但是在决定能否形成大型、乃至特大型矿床的充要条件主要是成矿物质及其载流体体系中的成矿物质丰富与否，这是显而易见的。例如在讨论铜镍硫化物矿床时认识到含矿岩体是侵位后发生的分异（熔离）作用，还是在深部发生的分异作用，前者形成的规模小，而后者形成的矿床大而富。这就是说，后者源于含矿岩浆源，而前者已经脱离了含矿岩浆源。

沉积矿床与含矿沉积岩系的厚度相关，这是显而易见的。著名的赞比亚含铜砂页岩型矿带长达 500km 以上，并延长至扎伊尔。其铜矿储量占世界铜储量的 27%，我国的东川铜矿与之十分类似。

对于金矿床的实例更为典型，例如南非“兰德”型金矿床的含矿沉积建造形成时限达五亿年之久，采矿深度达 4km。众所周知的乌兹别克斯坦的穆龙套金矿，于 4km 深处仍然见矿。胶西北金矿业已突破了 800m 以下；夹皮沟金矿，一再突破深部找矿禁区，近年来又找到了 30 吨的大型金矿。西澳卡尔古利金矿带 3000 吨储量等等都表征了含矿岩系的巨厚的特征，从而表明了成矿物质来源的丰富。

其次是控矿构造体系的规模大小。例如陕甘川金三角区受到巨型的左行展布的山字型构造体系的控制，其中近年来发现的特大型金矿就位于文县山字型构造的前弧；云南大坪等矿集区受控于向南撒开的“帚状构造体系”；弧形展布的江南古陆的湘西-贵州锦屏—天柱金矿带长达 35km，为同韧性剪切带型金矿床，在江西的同层位双桥山群有著名的铜厂-金山构成了巨型含金剪切带型金矿床；滇桂黔金三角区金矿矿集区主要受控于叠加褶皱和近南北向右江裂谷带，一系列特大型金矿为其显著特征，如滥泥沟、戈塘、紫木圪、板其、高龙等微细粒浸染型矿床，如此等等，无一不表明大型特大型金矿床与控矿构造体系的规模相关。

(2)矿床中的矿化富集部位

地质找矿的时，首先需要解决的问题是矿化富集部位，只有这样才可能首钻见矿，增进找矿的信心。对此，以往的经验总结较多，本文不予以赘述。拟就金矿成矿体系成矿机理方面加以论述。

(1)泡腾成矿机理与找矿预测

如前所述，成矿流体体系进入容矿空间之后，导致成矿沉淀作用的因素是含矿子体系的 $\Delta(T-P-X_t)$ 。其中体系的压力变化是主因，因此成矿流体体系中的易挥发物质($CO/CO_2/CH_4/H_2$ /惰性气体等)将逃逸。由于容矿断裂构造的围压大于流体压力，所以以气体的逃逸表现为泡腾现象，对此我们称为泡腾成矿机理。泡腾成矿是一般金矿床的成矿机理。

由于含金成矿流体容矿断裂构造的脉动过程中进入成矿空间的，因此从流体的排泄口进入的瞬间表现为压力的突降和流体的流速很快，沉淀的自然金将伴随气体向上运移，并叠加在中下部矿化体之上，构成了矿体的富矿段。成矿流体的接续向上运移，由于流体中的金的总量逐渐减少，并且流体的压力降低的缘故，故上部常常出现相对贫矿化。由此可见，金矿化的富集部位常常位于中部偏下。

在这种成矿机理中，矿化富集部位常常是根据成矿流体在容矿空间中的运移路径进行判别的。我们知道，容矿断裂构造的成矿瞬间是呈真空状态，所以能够对成矿流体库中的含金流体抽汲，但是由于重力作用，使得含金流体的运移路径发生向下弯曲（图II-25）和呈发散状态。从图中可知，含金流体的主路径是成矿流体流量最充沛的部位，因此流体的主路径是矿化连续，相对矿化富集的部位。由于流体的主路径是矿脉体的最大延伸方向，所以按照矿体的侧伏产状部署勘探工程见矿率必然是大的，并且应该是富集的部位。这就是，人们总结的钻探工程的打侧伏的基本依据。

然而在通常的地质找矿当中，最易于引起人们兴趣的是矿化露头或矿点的矿化品位，进而感兴趣的是容矿断裂构造的产状与规模，往往轻视矿脉体的侧伏产状。认为矿脉体的侧伏产状只能够根据工程将矿化体的三维状态揭露之后，从垂直纵投影图上获取，所以根本就不去作此项研究，结果必然造成对矿点的评价，仅仅停留在表观的评价上，而无大的作为。冯友库（1996）提出了有关判别侧伏产状的几种方法，笔者同时也提出了几个较为有效的判别方法，简介如下，以供参考：

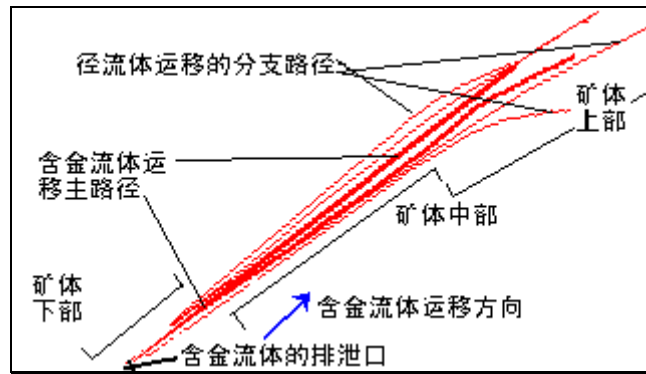


图 25 含金流体在容矿空间内流动的总趋势示意图

构造解析法：以控制矿床的区域构造、小构造、显微构造形迹入手确定矿体主成矿应力场继而确定矿液流动方向，依此判定矿体的侧伏方向。方法的关键是确定主控矿构造面的主应力场，常用的构造解析方法有：

- ①矿体侧伏受两组裂隙交线控制，交线在主控矿构造面上的侧伏即为矿体的侧伏；
- ②矿体侧伏与主控矿断裂面上的凹凸线（如成矿时形成的阶步、擦痕等）一致，凹凸线总体侧伏即为矿体侧伏；
- ③主控矿断裂面倾角变化线总体方向即为矿体侧伏；
- ④与主控矿断裂面伴生，成矿期形成的小褶皱轴线，即与矿体侧伏一致；
- ⑤主控矿断裂面、主成矿期最小主应力轴线总体方向即为矿体侧伏方向。

右图所示为辽西东五家子金矿 I 号矿体侧伏构造解析赤平投影图（图 26）。矿体侧伏受控于断裂 F1（ $250^\circ \angle 75^\circ$ ）及 F2（ $345^\circ \angle 70^\circ$ ）的交线，并且主控矿断裂面为 F1。为了证实上述测定是否合理，则采用小构造、显微构造（石英晶轴）的最小主应力轴方向。结果表明是符合实际的。

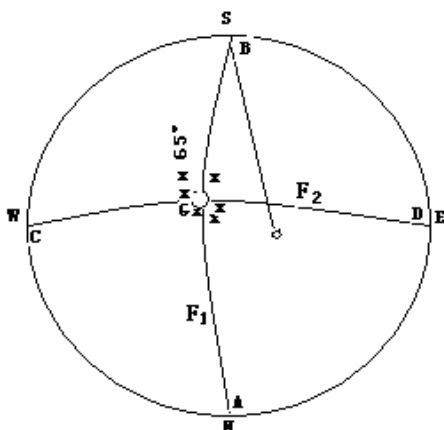


图 II-26 构造解析法示意图

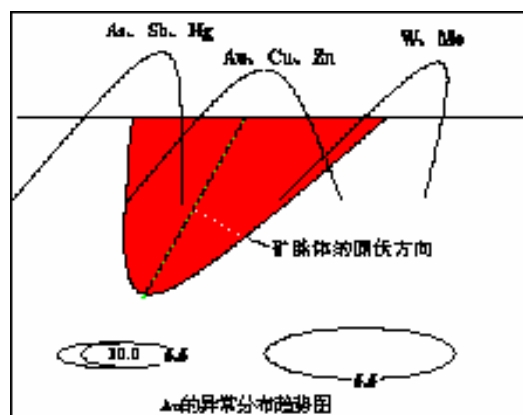


图 II-27 构造地球化学法示意图

笔者提出的判别方法是：

- ①构造地球化学法（27）

矿体的侧伏方向表现为与矿上晕→矿晕→矿下晕的分布趋势是一致的。

在平面上，则显示出异常增加的方向，如此等等。

②岩石矿物相法

一般情况下成矿流体的运移主路径即为矿体的侧伏方向线。因此可以从表征矿化强度的矿物组合、矿石组构的空间变化及其趋势大体判别矿体的侧伏方向。

③品位等值线图，垂直投影图品位等值线图及其趋势图能够十分直观地判别侧伏方向、侧伏角。

④成矿流体包裹体的温度、压力空间变化这是最直接的判别方法。

⑤根据砂金及其品位、规模的分布趋势判别侧伏方向（28）。如图所示，是根据云南微细粒浸染型

金矿产区某地的冲积砂金矿点的变化，并结合地质现象推断的。该矿化区的砂金矿点呈近东西向展布的，由东至西呈现出由富至贫，规模由大至小的态势，从而表征了源区的矿化体由西至东出露的程度逐渐降低（或者说埋藏较深），因此对应的剥蚀程度逐渐减少，砂金的补给趋于贫乏，故能够推断原生矿脉体是向东侧伏的。

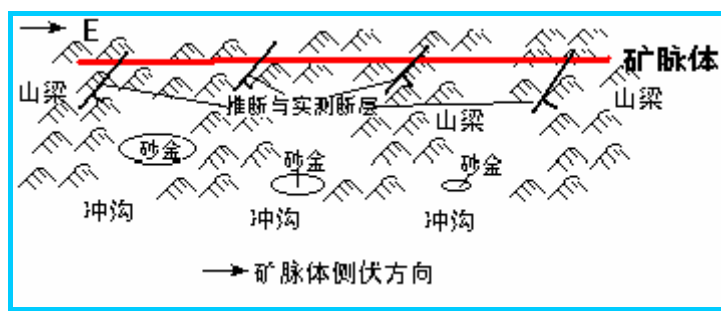


图 II-28 根据云南文山地区砂金空间分布状态判别示意图

（据武警黄金十支队资料编绘）

⑥根据控矿构造体系的应力分布状态确定矿床、矿带的总体侧伏。大量矿床分布规律的研究和总结表明，控矿构造体系的应力分析是十分重要的，因此提出了应力集中与应力释放的找矿依据，即应力集中到应力降的梯度带是矿床体的赋存部位。从成矿流体的运移角度考查，我们会得出应力集中到应力降应该是成矿流体的流动方向。例如，上述提及的新近发现的与文县弧相关的特大型金矿就是最佳实例。该矿带从弧顶向东断续延长数十公里，被划分成为几个矿段。种种迹象表明各个矿段的矿化强度，与容矿断裂及其围岩具有十分明显的差异。例如向弧顶方向矿化深度加大，矿石中的有机碳含量减少，近矿围岩中的石墨化增强，以及矿化的平均品位增高等，从而佐证了弧顶是应力集中区段，并且表征了成矿流体的流动总体方向（由弧顶向东上部运移），以及给出了矿段和整个矿带的总体侧伏方向是向西深部是无疑的。

可能还有很多判别矿脉体的侧伏产状方法。笔者认为矿脉体的侧伏产状，不仅是指导找矿的直接有效的标志，而且各个矿脉体的侧伏产状的查明还会给出矿体之间的展布样式，从

而为矿床的勘查提供极为有益的信息。所以提出了对矿床和矿体的侧伏的查定是地质找矿的关键，即不仅要查明各个矿体的侧伏产状（侧伏方向与侧伏角），并且还需要查明和确定矿床的总体侧伏产状。

(3) 沸腾成矿机理与矿化富集

成矿流体体系的唯一的研究方法是通过成矿流体包裹体的观测方法，它不仅能够给出成矿的流体包裹体的性质状态，还能够给出成矿机理。上述的泡腾成矿同样是依据矿床中的成矿流体包裹体得出的结论。成矿流体的沸腾现象是可以观测到的，其特征是沸腾区间的流体包裹体的均一温度相近，并且是高密度、低密度的流体包裹体相伴存在。这是在流体压力等于容矿构造的围压的条件下发生的，因此给出的均一温度是实际成矿的温度，而无需进行压力校正，也就是说给出的温压参数是成矿时的温压。由于沸腾是突然改变成矿流体的性质，所以成矿物质的沉淀是快速的堆积。正因为如此，矿化强度是大的，是富矿的形成机理。人们因此对沸腾成矿的富集，定义为沸腾品级。由此可见，确定成矿流体的沸腾及其空间，是判定矿化富集的一个重要指标。由于沸腾常常出现在矿化体的上部，所以通常的金矿床显示出矿脉体的上部，特别是顶部富集可能就是这一原因。当然这里指的是原生的，没有经过氧化淋滤作用和成矿后断裂改造作用的矿石。既然多数金矿床都显示出上部富集，从中能够给予我们一个十分重要的成矿信息，即大多数金矿床是浅成的热液矿床。所以，矿石矿物组合较为复杂，重要的找矿地球化学的前缘指示元素是 As-Sb-Hg，并且具有普遍性的特征。

同韧性剪切带型金矿床，既然是金矿床是具有明显热液蚀变的矿床，其抬升成矿的层次也应该是浅成的。

(4) 运用配矿断裂构造找矿

按照成矿体系之中的控矿构造体系的概念进行金矿床的地质找矿是十分重要的地质找矿工作。这里需要十分明确说明，所谓配矿断裂构造是指在空间上是构成成矿流体库与矿化体直接连通的断裂构造，或者说是成矿流体库中的流体直接进入容矿空间的通道。因此它能够起到对矿床中的各个矿体，或矿带中的各个矿床的成矿物质的分配作用。所以是成矿沉淀的最最关键的地质要素，显然也是实现“做大”任务的关键性地质工作，而不容忽视。如前所述，在通常的地质找矿当中，配矿断裂构造的查定工作往往是最最容易被忽略的一项工作。分析其主要原因是“导矿断裂”、“配矿断裂”都是理论上的理想概念，实际上是难以确认的，甚至是无法确认的。对此，前述中业已就此问题作了理论上的回答，以下拟就实例说明之。图 29 给出的是海南省新邵龙山金矿某矿体的垂直纵投影图，从图中能够十分清楚的辨别出三条垂直矿脉体，并且近似成等间距展布的断裂所控制出现了矿化间断再现，这就是说容矿断裂和与其近似垂直的断裂构成了矿化段的圈闭，因此能够确认另一组断裂为配矿断裂。当然在三条主断裂当中和存在着一些更低序次的断裂控制着更低序次的矿化体。这就是本文指出的“埃

级控矿”以及成矿的构造圈闭是可大可小的依据。从图中很明显地看出，这些不同级序的配矿断裂是地质找矿和勘探中应该十分注重的。

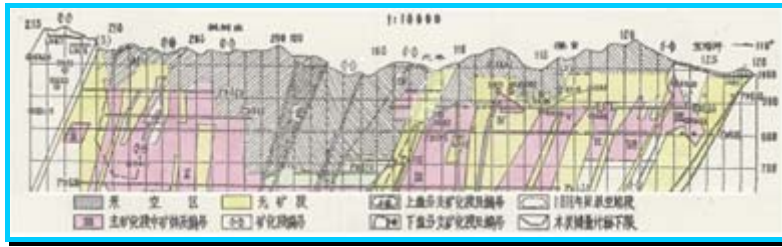


图 II-29 新邵龙山金矿垂直纵投影图（据中国人民解放军 00535 部队，1983）

对于同韧性剪切带型金矿床，同样也应该存在配矿断裂构造，只不过配矿断裂构造存在于剪切带内，以及一个与含矿的裂隙带近似垂直的断裂构造裂隙带（横切剪切带走向）。这就为同韧性剪切带型金矿的地质找矿提供了十分明确的依据和直接找矿的标志。

综上所述，运用成矿体系找矿理论指导热液矿床找矿时，应该十分关注组成成矿体系的两个体系，即成矿流体体系和同成矿构造体系。前者是查明成矿沉淀物化条件和成矿富集机理的重要途径，后者是地质勘查和矿化点能否做大的地质依据。

运用成矿体系找矿理论的一个重要原则是成矿体系与环境之间的只有关系，查明构造热事件对成矿体系的形成、成矿流体的形成、分异作用条件，依据成矿定位时成矿流体的状态及其同成矿构造体系对成矿流体体系的控制作用。与此同时，还必须查明成矿后成矿体系的变化和变位，从而实现地质找矿的能动的指导价值。

5 小结

通过成矿学，特别是金矿成矿学的讨论，建立了“液态矿源说，二次迁移论”的成矿理论与“成矿体系”找矿理论。在此基础上，解释和分析了目前有关矿床和金矿床的论争的热点和焦点问题，论证和解释了地质找矿中如何运用“成矿体系”找矿理论，能动的完成“攻深、找盲、求新、做大”的地质找矿重任。从而为地质找矿逐渐实现定量化的途径提供了一个开拓性的思路。总结本章，主要提出了以下一些新的理论认识：

(1)对侧分泌成矿理论的否定

本章提出的“液态矿源说，二次迁移论”金矿成矿理论是对目前大多数学者和找矿地质工作者所接受的古老的“侧分泌”理论的否定，显然也是对当前所有的，以其作为基础的成矿论的否定。为此提出了含金溶液是与含金沉积建造沉积成岩期形成的含金同生水或者建造水的概念，它是成矿流体形成的前提。

(2)提出了有关含金沉积建造的新概念

这里提出的含金沉积建造的概念完全不同于以往提出的矿源层的理论和概念，它是治成岩前的沉积和沉积建造，而不是成矿后的沉积岩建造。强调此点的地质意义在于，沉积物的

金矿成矿学概论

成矿期能够通过成岩作用分离出来的建造水溶液，并且伴随这一过程溶解了大量呈吸附状态的成矿物质构成了含矿流体，形成了含矿溶液。这就是说，成岩后，赋存于岩石层间、微裂隙和微孔隙中的成矿流体是形成各种类型热液矿床的初始的含矿流体，因此，从这个角度来讲岩石中的含矿物质所存甚少，以及岩石与成岩期分离出来的含矿流体之间处于物化平衡状态。据此能够得出的结论是成矿流体形成于含矿沉积建造的成岩期，成岩后的岩石不再是含矿的了，所以赋予矿源岩、矿源层的定义是不符合实际的。我们强调沉积物成岩期形成成矿流体的主要理论依据是：成岩期的温压条件具备了能够溶解大多数热液成矿物质的物化条件；成岩期能够提供大量的溶解成矿物质的水和水溶液；更为重要的是沉积物中的成矿物质大多数是以吸附状态赋存其中的，因此具有被大量溶解的可能。这一认识的提出的理论依据还在于借用了石油的成油理论。即生油岩相当于含矿沉积建造；石油的形成过程相当于含矿流体的形成过程；石油的储集构造或者称为油气藏相当于含矿流体库。换言之，成油过程仅仅是成矿过程的成矿流体形成阶段。

根据金的亲铁性、亲硫性和对碳氢化合物、碳的氧化物的依赖性，因此，提出了含金沉积建造的地球化学标型是富含铁硫碳的沉积建造是形成含金流体的物源的结论。这就是说，含有铁硫碳的岩系、岩层是成岩期能够形成含金成矿流体的标志。从而，提出了利用常量元素作为含金沉积建造的直接判别标志的理论依据。

根据含金沉积建造的沉积厚度、空间上的规模和范围能够直接判别形成的矿床的规模大小。

(3)提出了成矿流体的流动分异作用

含金成矿流体的性质和状态取决于成岩之后的构造热事件的作用和影响，这种作用并不是一种加入流体和成矿物质的作用，而是导致含金建造水溶液的不断发生流动和在流动中的分异作用，最终形成了含金成矿流体。这就意味着不同的地质构造环境中形成了具有不同性质和状态的成矿流体，因而也就形成了具有不同矿化类型的金矿床。由此可知，成矿流体的分异程度取决于构造热事件的影响强烈程度的大小，而分异程度又决定了形成的矿床的矿化类型。

对于大多数金矿床（含同韧性剪切带型金矿床，甚至大多数金属硫化物热液矿床）的成矿作用过程一致性，以及成矿物质沉淀及其成矿阶段；矿石矿物组合的相近性等等，至今没有得到令人信服的解释。为此，本文提出了成矿期的成矿流体，在成矿流体库中的赋存状态是（按照分异出来的子体系的性质差异）分层赋存的。这一设想完美的解释了成矿期构造脉动与成矿物质沉淀的有序性。

(4)提出了金矿成矿流体体系组成及其成矿机理

根据金的成矿流体的特殊性（低盐度，富含气体的 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ ），以及 H_2S 的在自然界

中的主要赋存形式是COS，故提出了金在含金流体中的赋存形式是 $[\text{Au}^{+1}(\text{HS})_2]^{-}\text{CO}$ 的形式,从而解释了大量的 CO_2 存在，以及 CO_2 作为含金流体的酸碱性与氧化还原的缓冲剂作用，以保持含金成矿流体库的性质的稳定性，并且据此提出了金的沉淀是其配合物的歧化反应；根据大多数金矿床上部相对富、成矿沉淀时分馏出大量的 CO_2 的实事，提出了金矿床的泡腾成矿和沸腾成矿机理。

(5)对含金剪切带的正确解释

本章对含金韧性剪切带型金矿床的相关问题和笔者的思考作了较为全面和精炼的解释，得出了以下重要结论性认识：

①含金韧性剪切带是表壳岩和基底岩系形成期或者变质变形期特有的构造样式，因此大多数含金剪切带形成于基底岩系的形成期。故，含金剪切带又可称为含金同韧性剪切带；

②通常情况下，含金剪切带的主岩是基底地体中的类裂谷式沉积，因此常常被称为绿岩建造；

③含金韧性剪切带是一种成矿流体库的构造样式，因此其兼具控矿构造和自成矿作用的二重作用；

④含金韧性剪切带型金矿既然是独立金矿床，因此，具有与其它类型金矿床相同的基本特征。其成矿物质来源是来自于本身储集的成矿流体，其成矿作用过程，以及矿石矿物同样存在着与其它类型金矿床的相近性；

⑤含金韧性剪切带型金矿床，因此同样能够运用成矿体系找矿理论，并依此进行地质找矿。

(6)成矿体系找矿理论是实现理论找矿的唯一途径

根据本文提出的金矿成矿理论，提出了“成矿体系”找矿理论。成矿体系是由成矿流体体系和同成矿构造体系组成的。因此，根据成矿流体体系能够获取成矿富集的部位和机理；根据同成矿构造体系能够确定矿床、矿带的规模，并进而指导找矿勘探。成矿体系找矿理论的要点是：

①环境变化是引起体系变化的条件，体系变化是成矿的前提，因此在研究成矿体系的演化时，应该以构造热事件为主线，进行成矿流体来龙去脉的追溯；

②成矿体系演化研究，应该以构造体系的演化和形成为主体进行，从而能够判别成矿流体的形成及其成矿时的迁移路径；

③成矿体系找矿理论应用的基本原则是进行成矿场的恢复。成矿场包括了成矿地球化学场、成矿流体场和同成矿构造应力场三个基本组成；

④成矿场研究的核心是矿床（体）的空间展布样式或者说是矿床（体）的空间赋存规律。因此确定矿床（体）的产状，特别是侧伏产状是成矿场研究的最终成矿体现）

⑤成矿场恢复和确立的关键是同成矿构造体系的恢复和确立，此点十分重要。

总之，根据成矿体系找矿理论能够完成“攻深、找盲、求新、做大”的找矿重任，实现理论找矿的目的。

主要参考文献

- [1] 袁见齐、朱上庆、翟裕生 主编《矿床学》北京.地质出版社.1979
- [2] 翟裕生.成矿系统及其演化——初步实践到理论思考.武汉.地球科学 2000. (4): 333—339
- [3] 程裕祺主编.中国区域地质概论.北京.地质出版社.1994
- [4] 沈照理.水文地球化学基础.北京.地质出版社.1986
- [5] 孟祥化著.沉积建造及其共生矿床分析.北京.地质出版社.1979
- [6] 周乃武.液态矿源说二次迁移论—内生金矿成矿模式油找矿模型.黄金学报.1999.1 (2):
- [7] 周乃武.论金的其它亲硫性.矿山地质.1990.11 (2): 77—82
- [8] J. H. Simon 碎屑沉积地体的金矿成矿作用.沈阳.1989.国际金矿地质与勘探学术会议论文集: 50—57
- [9] E.A.科兹洛夫斯基主编.科拉超深钻井.1984.张秋生主译.北京.地质出版社.1989
- [10] W. S. Fyfe .et al. Fluids in earth's crust. Elsevier Scientific Publishing Company Amsterdam-Oxford-New York. 1978
- [11] 李伟源.欧洲共同体国家地壳流体以及的概况和进展.地学前缘.1996.3 (4): 313—323
- [12] C.J.迪克逊著《世界矿床图册》.1979.改译为《国外矿床图册》冯钟燕等译, 北京.北京大学出版社.1992
- [13] 单卫国等.黑色岩系成矿作用及相关金属矿床找矿 昆明 2004《云南地质》Vol.2: 25-139
- [14] 李力.周乃武.孙为尚 辽南脉状金矿 沈阳.东北大学出版社 1996
- [15] 邱小平《深部剪切变形与金矿成矿作用》《黄金地质》1999 Vol.5 No.3 p6-11
- [16] R W 博伊尔.黄金开发史和金矿床成因.原子能出版社.1991
- [17] A.A.Keays 太古宙金矿床及其源岩: 上地幔与地壳结合处.GOLD'82: The Geology Geochemistry and Genesis of Gold Deposits: 17—48
- [18] 石准立等.陕西双王金矿床地质特征及其成因.西安.陕西科学技术出版社.1989
- [19] 惠德峰.双王金矿床矿化类型问题研究.黄金学报.2001.3 (1): 1—5
- [20] 韦龙明等.陕西八卦庙金矿床地质特征及其成因分析.南京.南京大学出版社.1994: 286—305
- [21] 柳 淼.李坝金矿床地质特征.南京.南京大学出版社.1994: 160—202
- [22] 林宝钦 泰勒等.华北陆台辽西冰长石-绢云母型低温浅成热液脉状金矿床.中国地质科学院“七五”对外科技成果选编: 60—79
- [23] 王建平等.内蒙古金厂沟梁金矿控矿构造分析.北京.地质出版社.1992
- [24] 马启波.中国热液金矿床黄金建造及成矿作用与找矿方向.北京.地质出版社.1994
- [25] Simon J. H.碎屑沉积地体的金矿成矿作用.沈阳.1989.国际金矿地质与勘探学术会议论文集: 50—57
- [26] 刘东升等.中国卡林型(微细浸染型)金矿.南京.南京大学出版社.1994: 1—36
- [27] 苗昌德.国内外金银矿床图册.1993.北京.冶金工业出版社
- [28] R.H.Sibson .Crustal Stress faulting and fluid flow. In: Hickman S H et al(eds) Open-file Report-U.S. Geological Survey. 1994. 334—348
- [29] 韦永福等 中国东部金矿地质研究 北京 地质出版社 1993 p.88-106
- [30] B.Fehlberg and C.W.Giles 西澳大利亚斯帕戈维利太古宙火山喷气金矿床 天津 国外前寒武纪地质 1985 No.2 p.72-82
- [31] R.P.Foster and J.E.Wilson 津巴布韦太古宙金矿床的地质环境 天津 国外前寒武纪地质 1985 No.2 p.83-97
- [32] T.M.Seward 金在热液系统中的搬运和沉淀 天津 国外前寒武纪地质 1985 No.2 p.59-72
- [33] 吕古贤等 构造物理化学与金矿成矿预测 北京 地质出版社 2000
- [34] 孙丰月等 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿 长春 吉林人民出版社 1995
- [35] 陈毓川等 中国矿床成矿模式 北京 地质出版社 1993 p.1-33
- [36] 赵鹏大等 矿床统计预测 武汉 中国地质大学出版社 1983
- [37] 王世称等 综合信息解释原理与矿产预测图的编制方法 长春 吉林大学出版社 1989
- [38] 范永香 论提高矿产预测研究水平的主要途径 1990
- [39] 周乃武 王新武 论成矿系列与成矿预测的关联性 北京 矿床地质 Vol.17 p.897-902