

## 太古宙岩石中金富集的地球动力学条件

胡正国

(西安地质学院)

产于太古宙岩石中的四种类型金矿床,无一例外地都具有明显的后生性、伴生性和叠生性,可划属同生构造型矿床(褶皱区)和叠生构造型矿床(断块区)。小秦岭金矿带的实际地质资料表明,金矿床与褶皱作用和与之同步形成的剪滑断裂,以及随后叠加的脆性断裂等多期动力变形—变质(混合岩化)环境相联系。因此,找矿工作应着眼于成矿作用的特殊地球动力学环境,从不同地区的具体条件出发。

**关键词:** 太古宙; 金矿类型; 地球动力学条件



地质·矿床

复杂多样的金矿床也是最古老的一类矿床,几乎形成于地球发展演化的全部历程中。就金的储量而言,除了元古宙的金铀砾岩型矿床而外,太古宙岩石中的金矿在世界上列居第二位,累计储量已逾 1.2 万吨。在我国,归属于太古宙岩石中的金矿床占全国总储量一大半。

太古宙岩石以“绿岩”发育为特征,组

成了各类地体的基底。早在上世纪,由于其具有特征的岩石组合和矿床组合,其外观色调又是找矿的标志,故首先在加拿大、澳大利亚等处启用了这个俗名。

赋存于太古宙岩石中的金矿床共有四种成因类型(表 1)。其中构造破碎蚀变岩型金矿床为我国所特有。

这四类金矿床的最终富集并不与所在岩石的成岩期相一致,无一例外地都比成岩期要晚,甚至晚很久,从而表明这种产于太古宙岩石中的金矿床具有明显的后生成因特点。

太古宙岩石中的金矿床类型 表 1

形态类型	成因类型	矿床实例
脉型	金属硫化物石英脉型	耶洛奈夫(加)、小秦岭、夹皮沟
	构造破碎蚀变岩型	焦家式(混合花岗岩、斑状花岗闪长岩)、鹤鹿式(混合岩)、上官式(变火山岩)
层型	条带状富铁燧石层浸染型	霍姆斯塔克(美)
	硅化、绢云母化变火山岩-沉积岩型	赫姆洛(加)

地球经历了原始地球聚生阶段、初始陆核形成阶段、地壳形成阶段和地块裂陷并结阶段的发展演化。其中第一、第二阶段和第三阶段一部分的时限总合就相当于太古宙。这一时期在地球上开始了物质的分异作用,特别是部分类型矿床的形成作用,而后期的强烈叠加改造作用,又使仅有的一些古老矿床被彻底改造而消逝了(胡正国, 1980)。

早期,地球表面喷溢着超基性和基性的

岩浆，由玄武岩组成了“微地壳”，遭受着强烈的陨石轰击作用。以后尽管陨石轰击大大减弱，但地壳仍处于不稳定状态，水平挤压力弱，无明显的线状褶皱构造隆起，出现了无规律分布的沉积盆地，深断裂围限其周边，并经由它们从深层带出大量的、包括金在内的成矿物质。由于水圈和气圈的出现，从而产生了强大的破坏、分选、搬运和再沉积的营力，促进了地表构造选格局的变迁和重建。在古老沉积盆地中花岗岩开始出现，上亿年间形成了大量花岗岩穹窿，它在这“自由”的地壳上形成并导致周边火山—沉积地层的粘—粘塑性构造变形和绿片岩至角闪岩相变质作用的发生；而在另一些活动性更大的地区，地壳裂隙，原始火山—沉积层深埋于地下30~40km处，在挤压应力作用下发生多期变形—变质作用，形成角闪岩至麻粒岩相的高级变质组合，出现了大型的韧性剪切带和伏卧褶皱。

太古宙的岩石—变形组合呈现为三种类型：高级变质的片麻岩—混合岩—麻粒岩组合、中级变质的花岗岩—绿岩组合和低级变

质的陆源盆地组合。前二者可能代表了古老洋壳上横向连续的水下盆地中的深源产物，部分为横向上不连续的火山穹窿中心附近的产物，后期它们均以水平运动和热力作用为特征；第三者则可能为陆壳上的古老沉积盆地组合，是稳定区的代表。未遭受明显强烈的变形—变质作用，后期以幅度不大的垂直运动为特征。

太古宙岩层具有清楚的旋回性和独特的组合。一个巨旋回往往分为上、中、下三部分。下部以超镁铁质—镁铁质岩（科马提岩和拉斑玄武岩）为主，夹钙碱性安山岩及少量沉积岩；中部为绿岩组，镁铁质—长英质火山岩和火山碎屑岩交替组合，并夹少量沉积岩；上部为沉积岩组合，周期性的粒度变化，少量火山岩发育。我国华北地块南北缘即具有这类旋回性及组合的表现（表2）。旋回下部往往为“双峰式岩套”。该岩类组合及其序列，具有世界的可比性，但它们又并非都是同时形成的。由于这时期地壳地质构造环境的特殊性，因此在旋回序列的上部并不大量出现成熟度高的碎屑岩、碳酸盐岩及富

华北地块（古陆核）南北缘太古宙地层表

表 2

辽宁鞍山抚地区（据陈洪江，1983）			豫陕小秦岭地区（参考陶铁镛等，1986）		
晚 期 绿 岩 带	辽河群		沉积岩群		
	上鞍山群		泥砂质沉积岩夹厚层硅铁质岩及少量中酸性及基性火山岩		
	中 鞍 山 群	大峪沟组	钙碱性火山岩群 上部：英安—流纹火山岩夹基性火山岩及沉积岩； 下部：拉斑玄武岩夹英安—流纹质火山岩、沉积岩		
		烟龙山组			
	山城子组	超基性岩群 拉斑玄武岩与科马提岩互层、夹硅铁质岩			
早期绿岩带	下鞍山群		沉积岩群 钙碱性火山岩群 超基性岩群		
晚 太 古 宇	上太华群	秦仓口组			
		三关庙组	泥质粉砂岩、砂岩		
		洞沟组	玄武岩、泥质粉砂岩		
	下太华群	板石山组	石英砂岩、泥质粉砂岩、灰岩、白云岩等		
大月坪组		英云闪长岩等（TTG杂岩） 拉斑玄武岩			

碱性火山岩。

由于太古宙岩石随不同地区其组合比例和具体成分的变化,因此,成矿类型也有所不同。比如,包括中国在内的古老绿岩带中

金丰度值 (ppb) 统计表 表 3

地球各圈层中 Au 的丰度值 (黎彤, 1979)	火成岩中 Au 的丰度值 (《美国地球化学手册》, 1974)	沉积岩中 Au 的丰度值 (R.W.Boyle 1979)
地壳 4	花岗岩 1.6	砂砾岩 30
上地幔 5	花岗闪长岩 3.0	页岩 4
下地幔 5	闪长岩 3.2	石灰岩 3
地核 2600	辉长岩 4.8	含石墨片岩 2000
地球 800	橄榄岩 6.6	硫化物片岩 2000
	纯橄岩 1.5	磷块岩等 2000
	流纹-安山岩 1.5	
	安山-粗面-玄武岩 3.6	

均有含铁建造和金矿产出;南非和西澳由于绿岩带中超镁铁岩类较多,因而富集镍、铬等矿床;而较为年青的加拿大绿岩带则有较多的流纹-英安岩,因而以产出铜-锌矿床为特征;可能更为年青的巴西和西非绿岩带具有较多的火成碎屑岩,故其铁矿建造中有较多锰矿产出。

根据金在不同圈层和岩类中丰度值分析(表 3),可以肯定地说,太古宙具有形成各地质历史时期中金初始矿源层的特殊地质-构造环境,是地球深层物质(包括 Au)外迁的最重要而又最普遍的时期。

但是,在一些金矿分布的地区范围内,绿岩的含金背景值都比地壳内金的克拉克值要低,如安大略区(加)、小秦岭(表 4)等

小秦岭地区变质岩类中金含量 (ppb)

表 4

特 征	斜长角闪岩	斜长片麻岩	斜长角闪片麻岩	混合岩	石英岩	大理岩	全区岩层
变化范围	0.6~3.4	0.98~2.9	0.21~5.8	0.19~1.8	0.29~1.4	0.25~1.1	0.19~5.8
算术平均值	1.63	1.34	0.98	0.64	0.59	0.55	0.71

(据栾世伟等, 1985)

地就是如此。R.W.Boyle (1961) 也指出,加拿大耶洛奈夫绿岩带内的绿泥石化带金含量也有大幅度降低。

尽管太古宙及其以后时期的金矿与火山作用有关,但从多方面来看“却又看不出与火山期岩浆作用有直接关系”。“火山期产出的玄武岩、安山岩、流纹岩等岩浆岩,含金并不富。另一方面,与火山岩柱伴生的沉积岩中的金、银……却往往明显聚集”。(R.W.Boyle, 1979) 这就充分揭示了金在地壳中再生富集的重要性。

## 二

“金——无处不有的金属”(B.И.Вернадский), 在地壳中含量极低(仅为十万分之三左右)且分布不均,其浓集度要达到 500 倍以上才达创工业开采品位。由于具有

高的电离势和氧化-还原电位,它在自然界中主要是呈单质,或是与银呈合金产出。熔点高(达 1063°C),在晶格中的金只能进行原子位置的交换运动,形成新的晶核。由于其化学上的惰性,它很难进入矿物晶格呈类质同象置换其他元素。在高于低绿片岩相的温度和压力(380°C, 1kb)条件下具有一定的扩散和再生能力,在有低价态的变价元素存在时更是如此。实验结果(B.Г.Мейн-сико, 宋玉坤等)表明,在 250~600°C 时,黄铁矿中呈分散状态的次显微金可以活化聚集,温度高于 600°C 时金粒则崩解。在许多矿床(如卡林、科特兹、黔西、宁夏等)内的褐铁矿化黄铁矿晶体的晶棱、晶角顶等表面处,均发现有显微金粒的聚集。

在变质作用和混合岩化作用过程中,金有明显的活化、迁移和再聚集的趋势。

一般都认为,混合岩化作用主要是碱、硅质与铝硅酸盐的交代作用,在高温下这些含Na、K、Si、H<sub>2</sub>O等组份的混合岩汁,渗透交代各类老的变质岩,并促使其部分重熔,导致包括金在内的部分元素活化转移。小秦岭地区的实际资料表明,混合岩化作用可以促使Au迁出70% (蒋敬业, 1986)。

由于普遍升温而发生的区域进变质作用,在去水和矿物再生转化的过程中,金亦随之迁移,原来呈分散状态的次显微金粒聚合,使其初始矿源层部分区段得以再度富化。

发生于动力变形带或局部区段中的退变质作用,由升温、升压、矿物破碎和水化等而析出SiO<sub>2</sub>和Au等(图1)。Bridgman (1931)曾指出,所有离子在高压下都是可压缩的。剧烈的单剪变形作用属等体积变形,从而导致升温,在压应力作用下金元素

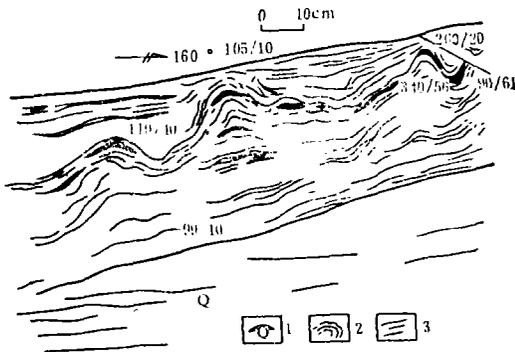


图1 石英脉体充填于剪滑断裂带中片理小褶皱虚脱部位素描图(陕西潼关金矿)

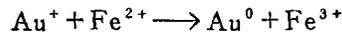
1—石英; 2—绿泥绢云石英片岩; 3—破碎理

等易于从晶格或晶隙、裂隙或包裹体中析出,而定向迁移至扩容空间或破碎空间,亦即发生压溶作用或压泌作用(宫同伦, 1985)。

金的忠实伴侣——石英,无论在进变质、退变质或混合岩化作用中都是活动组份,它可以在CO<sub>2</sub>与硅酸盐矿物作用下析出,可以由于在高温高压的气态热液中溶解迁移,也可以呈Si(OH)<sub>4</sub>·nH<sub>2</sub>O或Na、K含

水的络合物迁移。因此,只要在酸、碱性条件下它都能稳定转移,只是在近中性条件下才析出沉淀。由于它具有凝胶性质,故随温度降低而溶解度减少,早于金沉淀。经实验证实,温度由500°C降为300°C,溶液中的SiO<sub>2</sub>由0.5%降至0.1% (克里奇等, 1977)。SiO<sub>2</sub>组份的析出预示着Au等元素的活化,并成为Au元素等再迁移和定位的先导。

Au多沉淀于金属硫化物晶隙或裂隙间,部分呈包裹金产出,并有溶蚀金属硫化物的表现,显示了Au与Fe离子等相互间的氧化—还原反应:



这一过程的完成,有赖于金的强氧化性质和作为难溶电解质的FeS<sub>2</sub>的离解作用发生。

综上所述,金具有在强烈氧化环境中溶解迁移,在还原环境中集聚沉淀;在酸性和碱性条件下溶解迁移,在近中性条件下集聚沉淀;在高温条件下溶解迁移,在中低温条件下集聚沉淀;在高变质相中活化,在低变质相中聚合;在高压应力条件下出溶,在低压应力空间中定位等规律性的表现。

这就不难理解,太古宙\*岩石中的变质热液金矿床,以及许多岩浆热液金矿床都具有近乎相同的蚀变类型、矿物组合、金的赋存形式、成矿期次等特点,充分显示出金的成矿作用具后生性、叠生性和伴生性的本质特征。

### 三

大量实际资料表明,太古宙岩石中金异常总是出现在石英脉、碳酸盐脉、剪切带,以及长英质岩脉等附近,而高含量金与岩性并无明显联系。大部分金的二次扩散往往集中达ppm级,它们总是与作为矿液流通和定位渠道的构造带有密切的空间相随性,从而

\* 显生宙以来的金矿床亦具有相同的规律性表现。

在那些线型构造域内呈显出蚀变、硫化物富集等地球化学—矿物组合异常。

太古宙岩石中每一种岩类均可成为金矿脉(床)的容矿母岩,亦即成矿作用对围岩无特殊的选择性。就以小秦岭金矿带来说,在各类岩石和不同组段岩层中金矿脉都有产出,其富集量也并不取决于其中金背景值的高低。比如含金高的观音堂组(3.14ppb)并不是赋存金矿脉最多的层位,而含金量相对较低的大月坪组(3.03ppb)和洞沟组(2.04ppb)比之赋存的金矿脉更多。再如夹皮沟金矿区,在吕梁期混合花岗岩内就发现了一处具工业意义的含金石英脉,具典型热液充填特征。绝非就此一例,在河南阾峪花岗岩中也发现有含金石英脉产出。

在强烈褶皱的纵向隆起区内,金矿脉(床)的分布成群成带。一般在众多的小型矿床产出范围内,必有一个或数个大型、乃至特大型矿床产出,在空间上具近等间距分布,显示与应力分段集中的内在联系。由复背形构成的小秦岭金矿带,在区域上受制于平行展布的背影和向形,分成为北、中、南三个成矿亚带,各亚带中又依近等间距产出了不同的矿区:大核桃岔、七树坪、老鸦岔、金锣斑及五里村等。

在太古宙岩石的构造变形中褶皱起着主导的作用,这是由于在地质发展的早期和中期阶段,地壳具高热流值、不稳定性,适相当于较深层次的变形环境,经受了多期次强烈的动—热变形作用改造,使之发育了多期、多型的复杂褶皱变形,在其一定的演化时期内,在褶皱一定部位上与之同步产生了韧性剪切带,以及相随其后的脆性破裂。这就不仅铸成了太古宙地体的现今构造格局,而且在不同程度上决定了变质—成矿作用的发生和发展。

国内外一些著名的产于太古宙岩石中的金矿床(如西澳的卡尔古利,加拿大的波丘潘、克克兰湖,我国的夹皮沟、小秦岭和招

掖地区等),都受控于褶皱带的同生韧性剪滑断裂\*或区域大断裂带的次级断裂系,矿体产在与构造片理、片麻理近整合(或切层)产出的石英脉体的破碎裂隙之中。

变质—成矿作用与构造变形幕在时间上紧随,在空间上同位,清楚显示出构造变形作用是物质改造迁移的先导,而变质—成矿作用则完整地记录了变形作用的发展演化进程,只是它们比构造变形作用稍稍滞后了一段时间结束而已。

小秦岭金矿带经历了多期构造变形,相随在不同构造部位及区段发生进变质作用、混合岩化作用、花岗岩化作用,以及包括Au元素在内的物质迁移和集聚作用(图2)。与褶皱作用发展相关,于其中后期顺层(翼部)和切层(轴部)形成韧性剪滑断裂,沿其横向有热液蚀变作用表现(黄铁绢英岩化、硅化、绢云母化等)及石英析出。该类变形带的规模不等,就其厚度与长度而论具正相关性,一般厚度变化于数米至20米许,个别(如太湖峪脉)可达70余米。其滑移量取决于变形作用的长度,直接表现在片理与剪裂带交角和剪裂带厚度,经按下式计算

$$S = \int_0^x \frac{2}{2 \operatorname{tg} 2\theta} dx,$$

(许志琴,1984)最大可达百米。在剪滑断裂发展演化后期,由于地体不断抬升,变形作用转入以脆性破裂为主,充填的石英脉经多次剪切位移重叠和破碎、再胶结,形成了对称的含矿带(构造岩)分带(图3)。以石英为主的矿物产生了多种构造变形——波状消光、核幔结构、流动拉长等。金就主要富集在石英脉体边侧破碎带或与之相邻接的构造

\* 剪滑断裂是在褶皱作用过程中由于翼部顺层的逆向剪切滑移和轴部切层的走向剪切滑移而成的韧性剪切带。带内以糜棱岩和构造片岩为主,并有特征的绿片岩相的退变质作用表现,随之而发生扩容和脆性破裂。其中充填的石英脉体,在脆性破裂中多次改造,Au亦随之而充填沉淀。

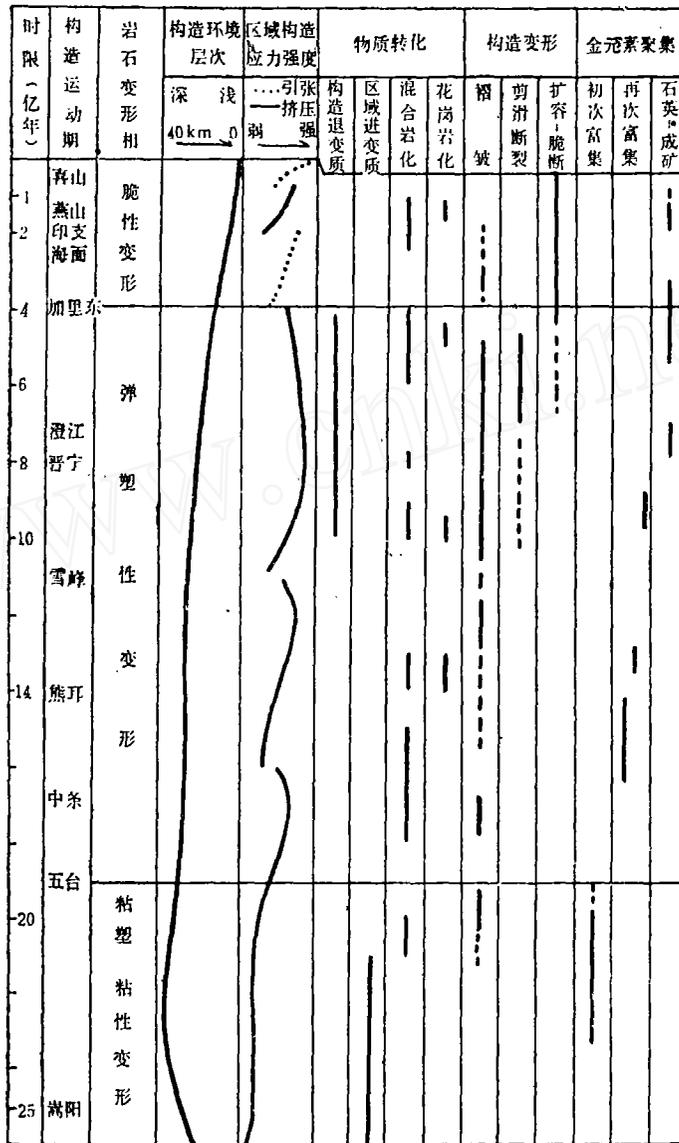


图 2 小秦岭金矿带区域地质-构造演化分析图

(同位素年龄值数据引自郭福祺, 1983; 胡志宏, 1986; 郑志鹏, 1980; 张思云, 1980)

片岩中, 呈裂隙金、晶隙金, 以及包裹金产出(郭福祺, 1983)。褶皱作用晚期, 地块强烈抬升, 平行于主体复式褶皱枢纽的剪切断裂组(呈X型)多次活动, 形成围限复杂褶皱断块的南北边界大断裂。燕山期重熔型花岗岩岩浆侵位, 从直观的地质判据和同位素年龄数值\*分析, 它只起了对金矿后期热力加富的作用。

实际资料表明, 各地的石英脉型和构造

破碎蚀变岩型金矿床都经历了三个主要成矿作用阶段: 高温(430~230°C)黄铁矿—石英阶段, 在其后期Au开始富集; 中温(360~130°C)石英—黄铁矿—多金属硫化物阶段, 金大量富集; 低温(165~30°C)碳酸盐矿

\* 大量的金矿石中PbS的铅同位素年龄值均在加里东期以前范围: 320~530M.a. (潘毅昌, 1974), 430、480M.a. (郭福祺, 1978、1979), 427~843M.a. (潼峪金矿科研组, 1987)

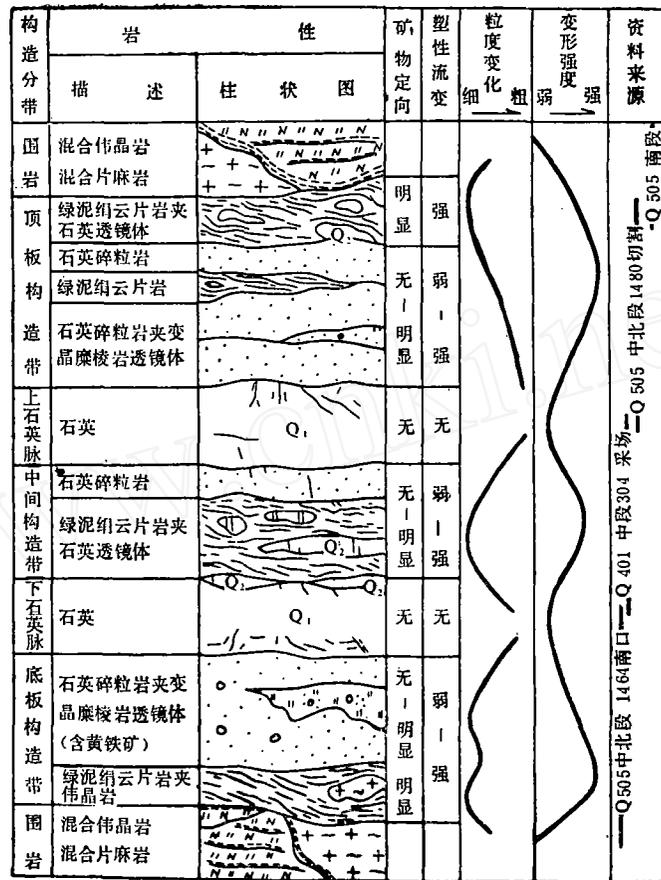


图 3 含金剪断裂带内部特征综合分析图  
(以潼关金矿区若干矿脉为例)

物为主阶段，金微量富集。它们的演化进程与褶皱作用和同步产生的剪滑断裂相一致，并受制于该动力环境的严格控制。经电镜观察（曹成，1983；胡小蝶，1983），石英中有许多微细的气液包裹体，形态多样（如压扁拉长、搓开错列、沿微剪切带或剪裂隙断续延展，以及多次包裹体等），清楚显示了石英随构造带多次塑性和脆性变形的经历。

太古宙岩石在全球地质—构造演化的历程中经受了多次复杂变形改造，并不像 Auh-aeusser 等(1969)所作的太古宙理想构造图那样简单。事实上，水平滑脱、长距离的析离构造——A型和B型俯冲，褶皱叠加变形和叠置层，以及不同产态的韧—脆性断裂的交织、地块层次（深度）的多次变化等，都使之大

大地复杂而多型化。这样，各类岩石中的原始结构构造可以由于强烈改造而在高级变质地体或剪碎地块中被完全置换掉，也可以在低级变质地体中保留得十分完好。

恰如 P.T.Wyllie (1971) 所深刻指出的：“地球是在物理作用下的化学体系”。复杂多期的动力作用，必然提供太古宙岩石中 Au 等物质活化转移的能量和空间条件，这大概是太古宙岩石既作为 Au 的初始矿源层，又产出多型大量的金矿床的根本原因。

#### 四

我国太古宙岩石主要出露于华北地块南北缘，其金矿储量占全国金矿总储量的 70% 以上，在该区并发现了霍姆斯塔克型硅铁建

造金矿的线索(辽阳、清源等地的鞍山群中),构造破碎蚀变岩型金矿亦有多种亚类型的发现,表明太古宙岩石中金矿的潜在储量还很大。

由于我国太古宙地壳演化的特殊性,主要形成以角闪岩相-麻粒岩相为主的高级变质地体,而不存在花岗岩-绿岩组合及陆源盆地组合类型,这对寻找另外两种成因类型的层型金矿床不利。但是作为金的初始矿源层的太古宙岩石呈东西向广泛出露于华北地块的南北缘,经受了强烈的多次构造变形改造,是寻找后生的受构造控制的脉型金矿床及部分经受后期动力改造的层型金矿床的有利环境。金的化学分散性特点,决定其与变质作用-花岗岩化作用相联系而多次活化迁移再后生富集,并最终在与区域总体褶皱作用同步演化完成的韧-脆性断裂中定位成矿。因此,金矿并不严格受某一特定的岩层控制,而在空间分布上受线型变形-变质带的制约,与不同宽度的退化变质蚀变岩类相伴产出。

在太古宙岩石中金矿的地质找矿工作,要从金成矿作用的多期性和多型性分析入手,注重对其成矿序列和成矿系列的分析,以此为核心开展综合目标找矿。要特别注意褶皱隆起区内的同生构造型和断块区内的叠生构造型(曾庆丰,1986)金矿床的对比研究,以及不同构造演化特征区段的地质进程综合分析。

由于金元素的分散性和低含量表现,需要特别强调化探与地质相结合;重视以地质

观察研究为基础,研究各类韧性剪切带、褶皱构造中同步产出的顺层和切层韧-脆性剪滑断裂、花岗岩化发育区内长英质脉体发育区段,各类基性脉体群出露区、各类蚀变带、构造角砾岩带等;全面准确收集第一性地质资料;研究元素的基元景观变化、进行金及相关元素的区域背景分析、相关元素组合分析、化探异常的成因分析等。

实践证明,金矿床具有明显、稳定的直接和间接找矿标志,各类退变质带(包括钾化带等)、石英脉或石英网脉、金属硫化物浸染矿化、相关元素的地球化学(水平和垂直)分带等。以此与构造研究相结合,在太古宙岩石分布区找金多有成功的实例。而金元素地球化学性质和成矿作用上的后生性、后生性和伴生性,都决定着一个地区可以有多种金矿类型分别在不同构造-成矿旋回、不同构造变形区段和不同层位、层次成矿。

金矿床的综合目标找矿工作还要注意矿床形成后的剥蚀、切割深度的对比分析和研究,后期岩浆作用的热力加富,以及区内的变形特征分析。由于分层滑脱、逆掩推覆等多期变位,在这类古老变质岩区的找矿工作具有三维空间的复杂变化和多层次叠置的规律,这对于金矿床的找矿勘探工作都是具有非战术上的意义。

因此,完善太古宙岩石中各类金矿床多型多期多层成矿模式,乃是我们从事金矿地质-科研工作同仁当前应当集中关注和奋力探索的一个关键问题。

### Geodynamic Conditions for the Enrichment of Gold in Archaean Rocks

Hu Zhengguo

Gold deposits occurred in Archaean rocks are all characterized by their distinct epigenetic, accompanying and telescoping features without exception, and could be classified into the syngenetic structure type (in folded region) and the telescoped structure type (in fault block area). Geological observations of the Xiaqinglin gold ore belt show that the gold deposits are related to environments of multiple phase dynamic deformation metamorphism (migmatitization) manifested themselves in folding synchronous shear-slide fracturing and subsequently superimposed brittle faulting, So the effect of the special geodynamic environment and the peculiar local geological conditions on metallogenesis must be carefully considered in gold ore searching in this district.