

金矿化变异 的数学地质研究

GEOMATHEMATICAL RESEARCH ON Au MINERALIZATION VARIATION

赵鹏大 周有武等



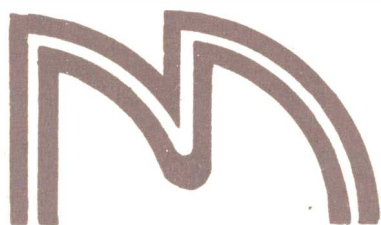
矿产勘查与定量评价丛书
SERIES ON MINERAL
EXPLORATION AND
QUANTITATIVE
ASSESSMENT

中国地质大学出版社

52-51
1/6

金矿化变异的 数学地质研究

赵鹏大 周有武等



矿产勘查与定量评价丛书
SERIES ON MINERAL
EXPLORATION AND
QUANTITATIVE
ASSESSMENT

中国地质大学出版社

国家自然科学基金资助项目

“专家系统监控下金矿化变异理论及变异模型”成果

金矿化变异的数学地质研究

赵鹏大 周有武 等

中国地质大学出版社

GEOMATHEMATICAL RESEARCH ON Au MINERALIZATION VARIATION

Zhao Pengda Zhou Youwu et al

(鄂)新登字第 12 号·

金矿化变异的数学地质研究

赵鹏大 周有武 等

出 版 中国地质大学出版社 (武汉市·喻家山·邮政编码 430074)

责任编辑 李继英 责任校对 熊华珍

印 刷 湖南省地质测绘印刷厂

发 行 湖北省新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张: 4.5 字数 104 千字

1992 年 10 月第 1 版 1992 年 10 月第 1 次印刷 印数 1—1000 册

ISBN 7-5625-0691-4/P·244

定价: 4.00 元

《矿产勘查与定量 评价丛书》简介

《矿产勘查与定量评价丛书》是以赵鹏大教授为学术带头人，经国家教委正式批准的全国高等学校重点学科“矿产普查与勘探”的教学和科研集体在数学地质、矿产普查与勘探、地质经济管理等相关学科领域的系列专著。本丛书着重反映该领域的新理论、新方法及其实际应用。丛书内容涉及面广、实践指导性强，具有重要的学术价值和实用意义。

中国地质大学出版社将陆续出版本丛书的各分册，以展现我校上述各学科领域中的研究成果。我们深切期待广大读者提出批评和宝贵意见。

《金矿化变异的数学地质研究》是在国家自然科学基金资助项目成果基础上撰写而成。该书介绍金矿化变异理论,系统论述金矿化变异性的组成,不同尺度水平的金矿化变异,以及影响金矿化变异的因素。以胶东地区和其他若干典型金矿为实例,对区域金矿化变异及金矿床和矿体的变异规律进行研究,并建立了初步的计算机程序系统。

该书可供从事数学地质、金矿地质及矿产勘查的科学技术人员参考。

责任编辑:李继英

献给中国地质大学

校庆 40 周年(1952—1992)

前 言

研究成矿元素空间和时间变异性,对于查明某种矿床的形成机制、成矿物质来源、空间富集部位、时间演化特征以及解决矿床普查勘探、预测评价等实际问题都是至关重要的。对于金矿化来说,由于其变异十分强烈、各种控制因素复杂,加之肉眼难于辨识,一般精度测试难于查明等原因,尽管长期以来成为金矿化研究热门课题,但仍有许多问题有待进一步研究。尤其是为了正确指导矿床普查勘探和预测评价工作,研究金矿化变异规律就具有更重要的意义。

金矿化变异的研究历来为矿床学家和矿产普查勘探专家所重视。如前苏联学者 И. Л. 卡里斯托夫(1956)在“矿化的变异性及勘探取样密度”一文中,对金矿品位变异特征进行了详细探讨。南非学者 D. G. 克里格(1960)在研究了南非若干金矿品位分布偏离对数正态模型的问题后指出:“一个常量的金可能在矿石形成后被淋滤”。因而,他提出,一些金矿品位的原始观测值若不服从对数正态模型,则加适当常数就会使其分布成为对数正态。S. 科奇及 F. 林克(1966, 1967, 1971)发表了多篇有关金矿化分布特征的研究论文,他指出:金的分布的研究毫无疑问地多于任何其它微量元素的研究。

研究金矿化变异特征具有重要理论意义。金矿化属于不连续跳跃式的很不均匀的一种变化类型。在传统的概率统计分析中,“金数值的变异系数是地质数据中所发现的最高变异系数的典型”。金矿化的品位变化系数一般均在 120% 以上,并被列入极不均匀型。在地质统计学中,相距为零的两点、金矿化的变差函数不为零,这一现象被称为“块金效应”,其值称为“块金值”。由于金矿化变异的这些特性,金矿化成为研究矿体变化性质、变化程度以及矿化变异地质数学方法的主要对象和典型代表。正如 S. 科奇及 F. 林克所说:“由金化验数据研究可得出许多在科学上有意义的信息”。

如众所周知,在金矿勘查时常常遇到这种情况:一个钻孔具有很好的金矿化,而相邻钻孔却完全缺失。当金矿化赋存于有明显边界的地质载体或有明显产状的地质体中时,钻孔只能判断含金体在深部是否存在,而不能正确确定矿体的金品位。如果金矿化赋存于没有明显边界或产状的地质体中时,则单纯依据钻孔甚至无法联接矿体,这些现象在金矿勘探实践中是屡见不鲜的。

又如在对金矿体进行储量计算时,虽然圈定矿体的工程间距足够近,但若无必要数量的工程作依据,则不能计算较高级别的储量。只有当具有求取某种高级储量所要求的工程间距的几个块段空间相毗邻时,才有可能对这些块段计算相应级别的高级储量。

再如矿床勘探中对特高品位样品的确定和处理问题,对金矿而言,合理地确定并处理特高品位对正确评价金矿具有十分重要的意义。一般来说,对于估计低品位矿石的平均数样品往往是足够的,但对于估计高品位矿石的平均数却很少有足够的样品。只有在满足“分级代表性”的前提下才能正确计算平均品位,才能判断是否有特高品位的存在。否则,如果不采取适当措施,少数几个高化验值往往支配并歪曲了统计分析的结果。特别是在评价接近边界品位的矿床时,这一问题则显得尤为重要。

所以,研究金矿化变异特征具有重要的理论和实际意义。金矿化变异,可以从不同尺度进行研究。换言之,金的变异具有不同的规模和范围,而研究不同尺度水平的变异规律具有不同的实际意义。如研究金矿化的全球性和区域性变异,对于查明金矿化带在地壳的空间分布和时间分布,以及查明金矿化可能的矿源都是有现实意义的。而研究金矿化的局部变异或显微变异规律,则对查明含金体的分布、赋存条件、金矿化机制和成因,金的勘探、取样与评价以及金的采、选、冶问题等都是很重要的。

应当指出的是,在实际金矿勘查中,对于取样、化验以发现并圈定含金体的工作重视较多,而根据取样化验结果研究金矿化的变异规律则注意较少。即使进行一些变异性研究,也往往是局部的、零星的研究多,系统的、全面的研究少,又由于各自研究的尺度范围和内容不一,往往缺乏可比性而使资料价值大大降低。鉴于此,有必要在一个设计周全的金矿化变异专家系统指导或监控下进行此项工作。本研究课题正是以此为目的的。作为第一阶段的工作,先从我国若干典型金矿区和矿床的金变异特征研究入手,建立金矿化变异模型,并整理研制出与之相对应的金矿化变异研究专家指导系统(AuSYS)。它是一个集金矿化变异的概念、模型、金矿化变异研究的具体思路、方法、过程以及根据金矿化变异特征进行区域成矿或矿床评价的专家检验于一体的智能化计算机程序系统。它可以看成是最终可以指导金矿化变异规律研究的、更加完善和实用的专家系统的初型。而在这一专家系统的监控和指导下,将可进一步查明金矿化的变异规律,并从不同层次范围或尺度水平上指导金矿普查勘探和预测评价工作。

本书共分四章。“前言”及第一章“金矿化变异概论”由赵鹏大执笔;第二章“胶东地区区域金矿化变异研究”由金友渔、张光前执笔;第三章“金矿床和矿体的变异规律及变异模型”由魏民执笔;第四章“金矿化变异研究专家指导系统(AuSYS)”由周有武、陈建国和林碧英完成。参加本课题研究工作的还有王仁铎、胡光道、邱泳枝、黄宏瑞和瞿蓓敏同志。

本课题由国家自然科学基金资助,研究工作起止时间为1988年1月至1990年12月。先后在胶东、小秦岭、吉林、黑龙江、云南等地区进行了四次为时120天的野外地质观察和资料收集工作,在此过程中得到招远金矿、新城金矿、山东地质六队、团结沟金矿、夹皮沟金矿、文裕金矿、秦岭金矿以及驻东闯金矿武警支队、墨江金厂金矿地测科的大力支持和帮助,谨此致谢。笔者还要感谢范永香教授对本项研究的支持和帮助。

本书的各种不足之处,敬希读者及同行批评指正。

目 录

第一章 金矿化变异概论	(1)
第一节 金矿化变异性的组成	(1)
第二节 不同尺度水平的金矿化变异	(2)
第三节 影响金矿化变异的因素	(4)
第二章 胶东地区区域金矿化变异研究	(8)
第一节 我国重要金矿床地质特征概述	(8)
第二节 胶东地区区域金矿化变异	(12)
第三节 待定线性组合的自回归过程模型与地质异常定量化	(18)
第四节 胶东地区有控制区的金矿化地质异常定量模型	(23)
第五节 胶东地区无控制区的金矿化地质异常定量模型	(31)
第三章 金矿床和矿体的变异规律及变异模型	(42)
第一节 典型金矿床地质特征及变异模型举例	(42)
第二节 金矿化空间分布的有序性规律及其变异模型	(46)
第三节 金矿化品位统计分布模型、统计总体性质及品级结构变异模型	(50)
第四节 金矿化 $\delta^{34}\text{S}$ 变异模型初探	(54)
第五节 金矿化变异要素及“地质-矿化-变异”模型	(56)
第四章 金矿化变异性研究专家指导系统 (AuSYS)	(58)
第一节 系统的总体设计	(58)
第二节 系统的实现	(59)
第三节 系统的使用	(62)
英文摘要	(64)
英文目录	(65)

第一章 金矿化变异概论

任何金属只有占地壳总质量 0.01—0.0001% 的部分能形成具有经济或开采价值的显著富集体，即矿产。因此，任何金属其成矿概率（表现为该金属矿床的储量或矿床个数）是该金属地壳丰度的函数，同时也是使该金属能够富集成矿的地质作用广度的函数。从这个角度出发，可区分以下 4 种组合情况：

(1) 元素地壳丰度高，可使其富集成矿的地质作用广泛。如 Fe，无论沉积、岩浆或变质作用均可使其富集成矿。这种金属只需要较低的富集因子（即元素或金属最低可采品位与其地壳丰度的比值）即可成矿，其大体为 4.5—5。

(2) 元素地壳丰度高，但可使其富集成矿的作用有限。如 Al，其地壳丰度高于 Fe，但只有热带风化作用可使其富集成矿，因而这种矿床分布有限且不均匀，数量也较铁矿少，其富集因子为 3.5—3.8 左右。

(3) 元素地壳丰度低，但可使其富集成矿的地质作用广泛。如 Cu、Pb、Zn，虽其地壳丰度较 Fe、Al 低近 3 个数量级，但因其成矿地质作用多样，故其矿床在地质上及地理上的分布仍较广泛。

(4) 元素地壳丰度低，可使其富集成矿的地质作用有限。如 Pt，Au 和 Hg 等，因而其矿床数量少且分布极不均匀。Au 的地壳丰度为 0.0000004%，据 Skinner (1986) 的资料，由于 Au 价格的上涨，Au 的富集因子从 1969 年至 1982 年由 4000 降至 1600。

上述 4 类金属典型代表元素的有关综合数据见表 1-1。

表 1-1 金属元素地壳内富集及变异因素

金属类型	典型代表	地壳丰度 %	富集因子	成矿作用广度	矿床发育程度	分布均匀程度
I	Fe	5.8	4.5—5	广泛	多	均匀
II	Al	8.0	3.5—3.8	有限	较少	不均匀
III	Cu	0.0058	85—90	广泛	较多	不均匀
IV	Au	0.0000004	1600	有限	少	极不均匀

可见，Au 的变异是与其在地壳中的低丰度，高富集因子以及有限的成矿作用有关。这也可以说是影响任何一种成矿元素在地壳中变异性的内在的地质因素。

第一节 金矿化变异性的组成

地质体的变异性，从广义的概念说，是指包括自然变异性、观测误差和观测错误在内的总变异或总误差。这也是任何地质数据变异性的基本来源。

自然变异性或称“地质误差”，是指地质体内在的、客观存在的变化。它表现为在不同空间位置上、同一地质体的某种特征具有不同的数值，这是由于地质体内部成分、结构、产状、形态等变化而引起的差异。例如，在一个花岗岩基之内，不同侵入岩相的变异，在岩相带内的潜在变异以及条带构造引起的变异等。这种变异属于反映客观事物或研究对象的真实空间特征的“信号”，是我们所要获取的重要信息。

观测误差可以分为两类。一类是“代表性误差”，这是由于观测的对象不具有代表性而引起的误差。例如，在野外进行取样时，可利用的露头不具代表性，这时，观测结果不能反映研究对象的真实变异特征。我们以前曾经指出过（赵鹏大，1964）：代表性可区分为个体代表性、分级代表性及总体代表性。不论何种代表性得不到满足，其观测结果都不能反映地质客体的真实变异特征。另一类是“技术误差”，这是由于仪器性能或测试条件变化而引入的误差。前者决定了分析测试的“精密度”或精度，即分析测定值与真实值的接近程度，这方面引起的误差往往是系统误差。后者决定了分析测试的“准确度”，即多次重复测定值的变化度，这方面引起的误差是偶然误差。

观测错误是指一些过失性错误，如样品混杂，错误编号及书写等。

上述技术误差和过失错误都属于“噪声”，是我们研究地质体变异特征时应努力加以消除或减少的对象。代表性误差比较复杂，有时是客观条件限制，例如根据地表矿体露头观测取样结果推断地下变异特征，根据少量样品分析测试结果推断总体特征等，这些情况有时是不可避免的，是在一定工作阶段无法解决的。这些都是在对地质体变异性进行分析和解释时应充分加以考虑。

金矿化的变异性也由上述三部分组成。金的自然变异性十分强烈。S. 科奇及 F. 林克（1971）指出：“金数据的变异系数是地质数据中所发现的最高变异系数的典型”。他们列举了 35 个金矿床的品位变异系数，最低者为美国内华达州霍姆斯特克，为 0.33，最高者为美国加州哥伦比亚矿井第三纪砂矿，为 5.10，大多数金矿床品位变异系数超过 1.2。

值得特别注意的是金的代表性误差，首先是个体代表性误差问题。对于金品位变异而言，“体积-方差”关系尤为突出，小体积的样品可靠性极差。因此，在金矿勘查中根据钻探取样结果很难正确估计金的真实变异情况或评价金矿化的优劣。单个样品的影响范围很小，距离较大的工程之间观测数据的内插以及较大范围的外推都是无法保证必要的精度的。分级代表性的一个突出问题是“特高样品”问题，金品位统计分布的长尾高值是客观存在的，在样品数量较小的情况下，对于特高样品无论是简单计入或剔除都会由于破坏分级代表性而造成对品位的错误评价。金矿化的总体代表性也必需有足够数量的取样观测点才可能达到。例如在金矿储量计算时，根据数量很少但尽管工程间距很密的块段也是不能求出高级储量的。必须有足够数量的、相互毗邻的、且具一定工程密度的块段才能计算较高级别的储量。

第二节 不同尺度水平的金矿化变异

栾世伟等（1987）在《金矿床地质及找矿方法》一书中对地球中金的分布引证了大量资料。其中，据黎彤（1976，1965）的资料列举了金在地球不同圈层中的分布（表 1-2）及在地壳各基本大地构造部位的分布（表 1-3）。

表 1-2 Au 在地球不同圈层中的分布 ($\times 10^{-6}$)

元 素	地 球	地 壳	上 地 幔	下 地 幔	地 核
Au	0.8	0.0035	0.005	0.005	2.6

表 1-3 Au 在地壳不同基本大地构造部位的分布 ($\times 10^{-6}$)

元 素	地 壳	地 盾 区	褶 皱 区	浅 洋 区	深 洋 区
Au	3.5	3.4	3.8	2.9	4.0

据上述资料, 栾世伟等认为: 金从地壳、上地幔、下地幔到地核其含量是增加的。金在地核中达到最大的聚集。他还认为: 金在地壳次一级大地构造单位中的分布是比较均匀的。上述作者还列举了大量资料分析 Au 在各类岩石中和各种矿物中的分布、这些都是很有价值的资料。

在罗斯拉柯娃等 (1975)《金矿床内生晕》一书中指出: 金的变异与距矿体乃至矿床的距离有关, 随着靠近矿床进而接近矿体, 含金量的变异性越来越大, 含量平均值也随之增大。应该说, 这种“品位-方差效应”对金矿化来说是很显著的。根据金的含量和分布特点可划分为矿田晕、矿床晕和矿体晕。

矿田晕的规模可由数平方公里至数百平方公里。其中的矿床越大, 矿田晕的规模越大, 金的平均含量越高, 金在矿田晕中分布离差也越大。矿田晕的金平均含量高于区域背景 2 倍以上。金的局部含量值变化于 3—4 个数量级之间, 特别是在矿床附近金含量往往低于背景值 1 个数量级。金的偏高浓度 (为亿分之几) 和金在面积分布上的明显不均匀性是金矿化的重要地球化学普查准则。在高背景值上存在金的异常低含量, 可作为接近矿带的可靠标志。

矿床 (矿带) 晕中金分布更不均匀, 其范围从低于区域背景值的低含量到达矿石品位的较高含量。在网脉型和浸染型矿床的矿带晕中金的分布相对较为均匀。矿床晕通常是金含量在大范围内比背景值高出 4—5 个数量级, 且金平均含量增高 2—4 倍以上。

矿体晕则很复杂, 一般与围岩蚀变作用有关, 各种不同的热液蚀变岩石其金的分布形式不同。矿体晕的规模大大超过矿体本身的规模, 脉状矿体的金晕、其宽度可达 100—150m, 细脉浸染型金矿体晕的宽度则更大。

金矿床在空间上的分布是很不均匀的, 这可从世界已知金储量在几个国家的分布情况看出 (表 1-4)。

表 1-4 世界几个矿业大国金储量分布

国 家	美 国	加 拿 大	南 非	澳大利亚	原 苏 联	总 计
占世界陆地面积百分比 (%)	6.4	6.7	0.8	5.2	15.0	34.1
占世界金储量比例 (%)	11.0	6.0	47.0	4.0	21.0	89.0

注: 本表数据引自美国矿业局。

由上表可见, 占世界陆地面积 34% 的地区分布有 89% 的已知金储量, 而占陆地面积仅 0.8% 的南非却分布有占几乎世界一半的已知金储量。当然, 随着勘查工作的发展, 上述数据

可能发生某些变化，但不会改变金分布极度不均的基本特征。

为了研究各类矿床特征的变异性，有时，定义一个“均一体”作为基本地质单元是有益的。也就是说，在这个“均一体”中，对于某一特定的测定参数，其地质误差为零，也即不存在有实际的变异性。此时，参数的测定归结为对于一个“单值”的估计，而全部误差整个由“噪声”组成。一个“地球化学均一体”，相对某一特定同位素或元素来说是完全均质的；一个“地质均一体”是对某种观测特征来说为完全均质的地质体；一个“地质年代均一体”是指瞬时形成的地质体。因此，甚至一个环带状晶体既不是一个地球化学均一体，也不是一个地质年代均一体，除非它们是骤然形成的产物。另一方面，同一地质体，对于不同的测定参数可能具有不同的变异性，对某一种参数可以认为是“均一体”，而对另外一些参数则是“变异性体”。最典型的莫过于某些含金石英脉的厚度和品位，对于前者可能在一定范围内是“均一体”，而对于后者却可能在这个范围品位极不连续和极不均匀。因此，利用钻探勘探含金石英脉，往往只能起到追索含金体是否向外或向下延伸或圈定含金脉体的作用，通常不能用于正确估计和评价金品位。

地质体的变异特征或可能查明的变异尺度水平，与观测间距和条件有关。例如，规模小于观测间距的变异特征我们就不可能揭示或查明。因此，“均一体”越小的地质体或地质观测标志，为了查明其变异特征，就需要采用更密集的观测取样点或更小的观测间距。

当某种观测参数在不同部位具有较大变异性时，通常方差不是逐地相同的。为了获取相同精度的平均数，也需采用不同的观测密度。例如 S. 科奇等 (1971) 曾指出：“因大多数金矿床几乎所有地质样品都很少含金或不含金，其结果是极端偏斜的频率分布，通常对于估计低品位矿石的平均数的样品是足够的，但却很少取有足够样品来估计高品位矿石的平均数，……因此，希望设计一种比用一般系统的或随机的取样方法抽取更多高品位矿石的取样方案”。这也可视为不同尺度水平变异性的一种表现。

第三节 影响金矿化变异的因素

研究金矿化变异特征和变异规律不仅具有理论意义，而且对于金矿的普查、勘探、评价以及开发利用等具有实际意义。为了评价金变异的意義需要了解或查明影响金矿化变异的因素或金矿化变异成因。

一、金矿化在时间上的变异

在整个地球发展历史的不同时期，金矿化的分布是很不均匀的。据统计，目前世界金储量中，太古代 (35—25 亿年) 和元古代 (18—16 亿年) 储量占 70%，古生代 (9—2.5 亿年) 占 5% 以上，中生代 (1.6—0.7 亿年) 及新生代 (<0.6 亿年) 约占 25%。据我国 429 个金矿床和 1815 个矿点统计，太古代金矿占矿床总数的 21.7%，元古代占 34.7%，早古生代占 2.3%，晚古生代占 5.1%，中生代占 10.9%，新生代占 5.3% (主要为砂金)。美国情况则有所不同。美国的金矿成矿期主要是中新生代，其次是古生代。

在一个矿床内部，不同成矿阶段金矿化也有差异，总之，它是一个“地质时代变异性体”。

二、金矿化在空间上的变异

对金属元素在原始地壳中的分布状态存在很多不同的观点。截然对立的两种观点，一是

认为初始地壳中元素的分布是均匀的，由于随后地质过程的演化与发展，使这些元素在一些地段趋于富集，而另一些地段贫化，因而产生了不均匀的空间分布。另一种观点是按照所谓中心极限定理，若已知随机变量是很多独立随机变量的和，并且后者中的每一个对结果的影响都比较小，则该随机变量趋于正态分布的假设，认为经过长时期地质过程的影响，原始分布不均匀的元素趋于正态，也即等于或接近其平均值的观测值出现的概率最大。

金矿床在空间的分布服从负二项分布。F. P. 阿格特伯格 (1974) 引述了他们的实验结果。在加拿大安大略蒂明斯—柯克兰湖区，在面积约为 8900 平方英里 (约 22 000km²) 的范围内分布有金矿床 (点) 572 个，按面积为 64 平方英里 (约 158km²) 的网格面积划分了 140 个单元，统计了每个单元中所含金矿床 (点) 数，含不同矿床 (点) 数单元的观测频率与用负二项分布函数拟合的理论频率相符合。两个实验实例及负二项分布的有关参数列于表 1-5。

表 1-5 加拿大安大略金矿点负二项分布基本参数

参 数	$\bar{x}$	s'^2	r'	r	p	q	s^2	$\chi^2 (7)$
例 1	5.51	73.8	0.445	0.291	0.050	0.950	110.3	10.95
例 2	6.60	81.9	0.597	0.411	0.059	0.941	112.8	8.02

注：据 F. P. 阿格特伯格，简化。

上表中 $\bar{x}$ 与 s^2 为样本平均值和方差。在 140 个单元中平均含金矿点数为 5.51 及 6.60 个，而方差分别为 110.3 及 112.8，反映单元中含金矿点数的变异程度是较大的，同时也反映出金矿床在空间的分布具有一定的丛聚性。

很多作者发表过有关不同种类岩石、矿物中金含量的大量资料。栾世伟 (1987) 在引用有关数据后的分析中对金在岩石圈的分布特征进行了概括。各类火成岩中金的平均含量变化在 1.6×10^{-9} — 23×10^{-9} 之间，全部火成岩平均金含量为 11.9×10^{-9} ，约为地壳中金丰度的 3 倍。无论是深成岩、浅成岩或是火山岩，随着岩石基性程度的增高金含量有增加的趋势。有人认为金在纯橄榄岩、斜辉橄榄岩类中含量最高，达到 23×10^{-9} 。金在中性和酸性岩类中含量变化范围很宽，平均值为 3.7×10^{-9} — 11.4×10^{-9} 。在一些赋存有金矿化的火成岩体中，金含量有时高出同类岩石金丰度的 1—2 倍，表明金在火成岩中的分布可能具有区域性变化的特点。

各类岩脉含金量变化于 0.5×10^{-9} — 26.0×10^{-9} 之间。平均值为 1.5×10^{-9} — 6.5×10^{-9} 。基性岩脉含金量高于酸性岩脉 1.5—3 倍。

火成岩中以暗色矿物含金最高。

沉积岩中金含量变化范围比较广，由 0.1×10^{-9} — 2500×10^{-9} ；平均值范围也很宽，由 0.2×10^{-9} — 132×10^{-9} 。全部沉积岩含金量的平均值为 40.3×10^{-9} 。碎屑岩系含金较高，其中砾岩、砂岩及含硫化物的页岩、含黄铁矿的杂矿岩、含有机质的黑色页岩及火山凝灰岩中金含量较高，最高可达 132×10^{-9} 。

金在沉积岩中的分布具有明显的区域性特征，这与沉积物源区是否富金以及沉积环境、条件有关。有资料表明：金矿区的土壤中金含量为 3.0×10^{-9} — 6.5×10^{-9} ，比无矿区土壤中金高 0.3—4 倍。

在变质岩中金含量平均值为 1.0×10^{-9} — 8.5×10^{-9} ，其中板岩最低，角岩最高。但不同地区的同一类变质岩金含量变化较大，表现出明显的区域分布特点。全部变质岩金平均值为 19.9×10^{-9} 。一般情况下，随区域变质程度的加深，含金量有所降低。混合岩化越强烈，金含

量也越低。

在许多地区,金矿化与绿岩带相关联。绿泥片岩、阳起石片岩、角闪片岩及闪长岩中含金为 0.1g/t 。

矿物中金含量的变化也是很多研究者感兴趣的问题。在造岩矿物中金含量变化范围为 0.0002×10^{-6} — 0.924×10^{-6} ,即最高不超过 1×10^{-6} ,矿石矿物中金含量由百万分之几到几十,少数可达千分之一。在金矿床的矿石矿物中,其独立金矿床以黄铁矿含金最高,其次为黄铜矿、毒砂等,而在伴生金矿床中,金在黄铜矿、毒砂、斑铜矿中含量较高,黄铁矿则次之。

黄铁矿一般是金矿床主要载金矿物之一。含金由千分之几至几十,甚至达百分之一,个别可达十分之一以上。金在黄铁矿中的分布极不均匀、平均含量变异范围可达2—4个数量级。如河南小秦岭含金石英脉中,黄铁矿含金量变化范围为 0.19×10^{-6} — 1200×10^{-6} 相差达6136倍之巨,其含金量因地区和金矿类型而异。另外,黄铁矿成分中砷含量与金含量往往存在正相关关系。

除黄铁矿外,黄铜矿平均金含量变化范围为 0.02×10^{-6} — 748×10^{-6} ,毒砂平均金含量变化范围为 0.203×10^{-6} — 1500×10^{-6} 。此外尚有方铅矿、闪锌矿、辉锑矿、黝铜矿等,有时也有可观的含金量。

至于金与其它元素的共生及变异关系,早在上个世纪,人们就发现金、碲、铋等元素密切共生。如Kemp (1897)指出:“碲的分布较之人们所想象的更广、而且通常与金共生”。碲往往与金聚集在有次生富集的矿脉中。在发现有纯自然金的所有矿床中,几乎都有碲化物或碲矿物存在。但碲既不能作为金矿床变异性,也不能作为金的深部延伸稳定性的标志,因为它既在很不规则的囊状矿体中存在,也在延深很大的连续矿柱中存在。

三、影响金矿化变异的因素

金矿化在时间和空间上的自然变异性是受各种地质构造、地球化学以及岩石矿物学等多方面因素制约的。据陈淳福等(1990)的研究,金于高温高压条件下极其活跃,以原子状态蒸腾,与 SiO_2 , H_2O 共同迁移,于 350°C , $10\times 10^7\text{Pa}$, $\text{pH}=2.4$ 的水中,金块于釜底蒸腾,迁移至釜顶温度降低,立即结晶成片状和立方体。所以,在围岩受到高温热液作用而引起强烈的钾化、钠化和赤铁矿化阶段,金原子不能沉淀,当热液温度下降到中至低温的硅化、绢云母化和黄铁矿化阶段,金原子快速沉淀结晶,析出大量金。所以,硅化、绢云母化和黄铁矿化与金的成因有极其密切的联系。据美国克赖斯特(1971)在内华达州科特兹(Cortez)金矿的研究资料,金含量随岩石中 SiO_2 的增加而增加。当矿石中 SiO_2 为59%时,金含量为 126×10^{-6} ; SiO_2 为10%时,金含量为 20×10^{-6} ;含量为1%时,则金含量仅为 0.1×10^{-6} 。从未遭蚀变到晚期蚀变,金、银、碲等以增加几个数量级的幅度富集起来,最后大量沉淀形成金矿石。金的含量也随着各种不同的围岩蚀变而发生变异。

地层、构造、岩浆岩和变质作用等对金矿化的变异都有明显影响。如栾世伟等(1990)在研究小秦岭地区金矿时指出:小秦岭地区近1000条含金石英脉,大多分布于太古界太华群地层中,而且其中61.6%的含金石英脉和86.0%长度大于1000m的含金石英脉都集中于闾家峪组地层中,这表明该区金的分布明显地受地层层位的控制。另外,91.0%有工业价值的金矿脉产于糜棱岩带中。以燕山晚期花岗岩为中心,由内向外可分为3个不同强度的矿化带:①内带为弱矿化带;②中带为强矿化带;③外带为弱矿化带。在强矿化带内矿脉在水平与垂向