

涂光炽 霍明远 等著

ECONOMIC GEOLOGY
OF GOLD

科学出版社

金的经济地质学

金的经济地质学

涂光炽 霍明远 等著

科学出版社

内 容 简 介

本书是《经济地质学》丛书中的一部，是一本阐述金的成因理论研究与开发应用成果的专著，具有系统性、创造性和实用性。全书分上、中、下三篇，共三十三章。

上篇阐述了国内外首次提出的金原子椭球体结构新说和成矿模式，荟萃了80年代末有关金的基础理论研究的最新成果。中篇系统而又综合地介绍了迄今为止有关金的找矿方法、采选冶技术工艺和产业形势与政策研究，提出了系统优化找金勘查法、非采性黄金生产法和强化投资、集约规模经营的黄金生产方式及相关政策性建议。下篇首次用全国15个地区金矿的典型事实，说明了中国黄金资源品位低、储量大的特点，明确提出了开发低品位大储量黄金资源是今后我国黄金生产的方向。

本书可供从事找金、采选冶金的科研、生产人员，大专院校有关专业的师生和国家黄金生产管理部门的干部参阅。

金 的 经 济 地 质 学

涂光炽 霍明远 等著

责任编辑 谢洪源 衣晓云

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100707

北京怀柔县黄坎印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1991年8月深圳第一版 开本：787×1092 1/16

1991年8月第一次印刷 印张：23 1/4

印数：1—1 000 字数：531 000

ISBN 7-03-002611-X/P·523

定价：23.00 元

谨以此书献给：

那些为找金矿历尽千辛万苦而百折不挠，依靠科技进步，群策群力，不求功名利禄而在默默奉献着的人们。

——作者

本书作者

(按执笔的章节次序排列)

- 霍明远 中国科学院、国家计划委员会自然资源综合考察委员会，
副研究员
- 李荫槐 中国科学院地质研究所，研究员
- 涂光炽 中国科学院地球化学研究所，研究员，学部委员
- 滕吉文 中国科学院地球物理研究所，研究员
- 李惠 冶金工业部地球物理勘查院物理化学探矿研究所，高级工程师
- 郭华东 中国科学院遥感应用研究所，副研究员
- 郭文魁 中国地质科学院地质研究所，研究员，学部委员
- 文克玲 清华大学应用物理系，副教授
- 陈颢延 清华大学应用物理系，教授
- 黄建军 中国有色金属工业总公司西北地质研究所，高级工程师
- 李人澍 中国有色金属工业总公司西北地质研究所，高级工程师
(教授级)
- 陈淑德 核工业总公司西北地质勘查局，高级工程师
- 王元清 宁夏地质矿产局地质研究所，高级工程师
- 郑一义 东北工学院秦皇岛分院，副教授
- 王有志 冶金工业部第一地质勘查局，高级工程师 (教授级)
- 张宝仁 山西省黄金公司，高级工程师
- 唐胜年 中国有色金属工业总公司，广西地质勘查局 272 地质队，
高级工程师
- 何柏安 核工业总公司中南地质勘探局，高级工程师
- 黄伟良 核工业总公司华南地质勘探局二九〇研究所，高级工程师
- 殷质义 核工业总公司西南地质勘探局三一〇地质队，高级工程师
- 卓维荣 核工业总公司云南地质调查队，高级工程师
- 王庆祥 内蒙古东风金矿，工程师
- 韩国恒 内蒙古东风金矿，工程师
- 于忠清 山东省地质矿产局第三地质队，高级工程师
- 方章然 核工业部中南地质勘探局三〇四地质大队，高级工程师

序

“七五”期间，我国黄金资源开发有了长足进展，据国家统计局公布的资料表明，黄金产量以年平均 10.37% 的速度递增，远远高于世界黄金年平均增长 4% 的速度。黄金生产之所以发展得如此迅速，最根本的有三个依靠：一是依靠合理的产业政策；二是依靠增大资金投入；三是依靠科学技术进步。《金的经济地质学》一书就是在这样一个背景下出版的。

《金的经济地质学》是《经济地质学》丛书中的一部。经济地质学是从经济学角度来研究地质问题，将经济学与地质学通过数理化工具有机地融为一体的一门新的边缘学科¹⁾。它分为区域经济地质学和系统（矿种）经济地质学。系统经济地质学就是依据不同的矿种来进行系统研究的经济地质学，它包含石油经济地质学、金的经济地质学、稀土经济地质学等等。

本书首先从金的基础理论研究入手，总结了迄今为止的有关发现金的地球物理性质及其地球化学行为方式，介绍了金的主要控矿构造，探索了金的生物成因机制，研讨了金矿地质若干问题，从而为找金地质实践提供了理论依据。

紧接着本书综合介绍了找金方法，其中包括已有的在找金实践中已经比较可靠、可行的方法，例如地球物理找金方法、地球化学找金方法和构造地质找金方法；还包括最近几年才发展起来并已取得可观效果的新方法，例如航空遥感找金方法、激光单原子找金方法、生物找金方法和优化系统勘查金矿法等等。综合方法进行找金矿，一可以提高找矿命中率，二可以减少找金投资风险。

接着本书详略分明地介绍了有关金矿的采、选、冶方法，将中国黄金资源与世界黄金资源进行了对比，并进行了黄金产业政策的研究，将经济学与地质学在高层次的学术水平上结合起来。将金的基础理论与找矿勘探方法和采、选、冶技术，以及相关的产业政策、投资政策融为一体进行研究后指出，强化政策、规模生产、效益经营，进行我国低品位大储量金矿资源的开发，是今后我国黄金生产的一个战略方向。从世界采金史看，是从高品位向低品位发展；从中国采金历史看，也是从高品位向低品位发展。

然后本书从冀东、胶东、小秦岭、桂西北、闽西北、滇西、阿拉善、东北和黔东北等遍及中国 17 个省市、自治区的低品位大储量金矿的实例，说明了中国黄金资源品位低、储量大的显著特点。

综上所述，这是一部理论联系实际著作，是集体劳动的成果。作者中不仅有蜚声中外的金矿专家、老教授，而且有一直奋战在黄金找矿勘探、采选冶金生产第一线，具有丰富实际经验的高级工程师和科研、生产的管理工作者，他们都将自己的宝贵经验和知识浇灌在这本书里，使得这本书具有对于科研人员来说不浅，对于生产管理人员来说不

1) “经济地质学”(economic geology) 在国外常和“矿床学”通用。本书所论的“经济地质学”则是另一概念。

深的特点。应该说,《金的经济地质学》是在黄金资源开发方面具有创造性和系统性的专著,它不仅在学术上具有明显的价值,而且在黄金生产实践中也必将产生重大影响,对我国黄金生产步上新台阶将起到积极作用。

中国科学院副院长 孙鸿烈
中国科学院黄金工作领导小组组长

目 录

序	孙鸿烈 (i)
---	-----------

上篇 金的基础理论研究

第一章	金的原子结构模型及其成矿模式	霍明远 (1)
第二章	金的地球物理性质及其地球化学行为方式	霍明远 (8)
第三章	大型金矿床控矿构造模式的探讨	李荫槐 (23)
第四章	金的生物成因机制	霍明远 (43)
第五章	金矿地质若干问题的探讨	涂光炽 (56)

中篇 金的找矿方法及其开发利用

第六章	金的综合地球物理勘探方法和找矿效能	滕吉文 (65)
第七章	化探在找金中的应用	李 惠 (122)
第八章	金的遥感找矿方法	郭华东 (134)
第九章	山金矿床的主要地质特征和构造控矿	郭文魁 (144)
第十章	激光单原子探测 (共振电离光谱学) 及其在找金中的应用	文克玲、陈颀延 (154)
第十一章	生物找金方法	霍明远 (161)
第十二章	金的系统优化勘查法	霍明远 (166)
第十三章	世界黄金资源对比及开发方向的研究	霍明远 (172)
第十四章	中国黄金资源的特点及开发方向的研究	霍明远 (181)
第十五章	金的采矿与选矿方法	霍明远 (197)
第十六章	金的冶炼方法	霍明远 (215)
第十七章	金的产业形势与政策研究	霍明远 (226)

下篇 中国低品位大储量黄金资源成矿条件与开发方向

第十八章	小秦岭地区构造破碎蚀变岩型金矿成矿地质特征及找矿潜力分析	黄建军 (235)
第十九章	陕西秦岭褶皱带微细粒金矿勘查前景分析	李人澍 (243)
第二十章	秦岭泥盆系金矿	陈淑德 (253)
第二十一章	阿拉善断块含金性条件初析	王元清 (270)
第二十二章	青龙河流域斑岩型金矿床的地质特征及成矿远景	郑一义 (283)
第二十三章	河北省内生金矿床成矿规律的探讨	王有志 (289)
第二十四章	降低工业利用品位, 提高黄金资源利用率——以金厂峪金矿为例	张宝仁 (298)

第二十五章	桂西微细浸染型金矿的成矿地质特征与开发方向·····唐胜年 (306)
第二十六章	桂西北地区低品位大储量金矿成矿地质特征及找矿前景·····何柏安 (312)
第二十七章	闽西北地区低品位伴生金成矿条件及找矿前景浅析·····黄伟良 (319)
第二十八章	北衙金银多金属矿成矿地质条件与找矿预测·····殷质义 (324)
第二十九章	滇西两河热泉型金矿床地质特征·····卓维荣 (330)
第三十章	低品位大储量热泉型金矿地质特征、成矿模式及在我国的找 矿方向·····卓维荣 (338)
第三十一章	内蒙古东风金矿低品位大储量金矿的成矿地质特征与找矿方 向·····王庆祥、韩国恒 (345)
第三十二章	山东福山杜家崖变质碎屑岩微细粒金矿的发现和矿床地质特 征·····于忠清 (349)
第三十三章	湖南金矿(岩金)资源特征及今后开发建议·····方章然 (356)

上篇 金的基础理论研究

第一章 金的原子结构模型及其成矿模式

一、金的原子结构模型

非公开的但已在实际应用的金的一个金属特性是，薄到一定程度 ($<0.02\mu\text{m}$) 金不再是良导体，而是绝缘体和隔热体。这是作者依据国外应用实例^[1]，进行基础理论研究之后所获得的最新成果。

研究结果表明，金原子并非是原子半径处处相等的球体，而是原子半径为一个短轴和一个长轴的椭球体。电子在质子周围作高频振荡，并不作圆周运动，不存在电子运行轨道。当金原子数量增加且呈不规则堆积时，电子与电子之间的振荡产生共振效应，当共振力大于质子吸引力时，电子开始脱离振荡位置，进入椭球体轨道，同时电子之间的排斥力使得配对电子各自朝相反方向自旋。

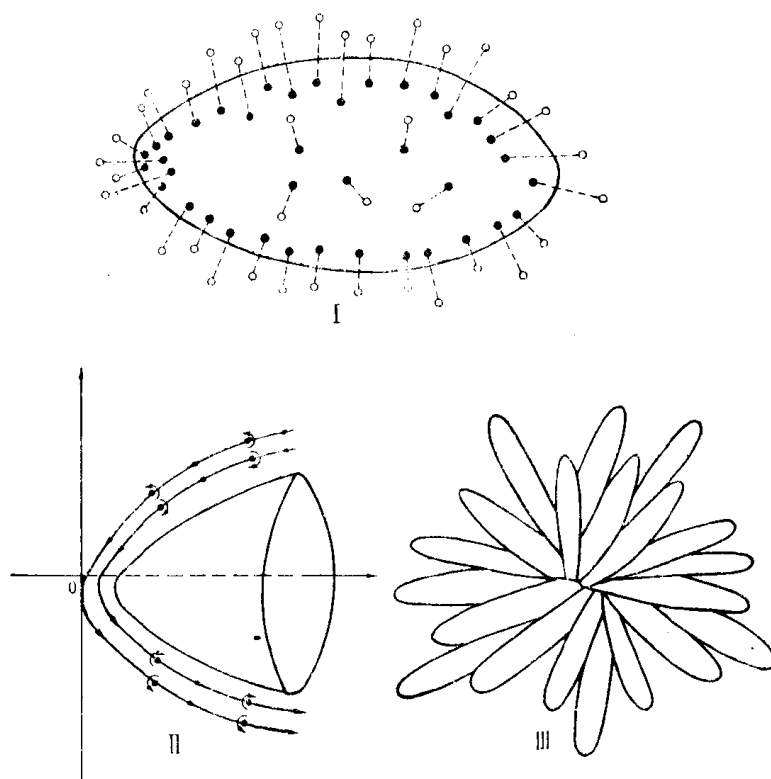


图 1-1 金原子结构关系模型

I. 最初的金原子结构，电子在固定位置作高频振荡；●为电子；——为振幅；○为振移点位置；II. 共振效应产生后的电子运动，配对电子自旋相反地围绕椭球体运动；III. 金原子相互堆积的剖面图

金的中性原子中, $5d$ 层充满了电子, 而使金具有较强的自封闭能力, 不易与其它物质化合; 未满的 $6s$ 轨道又可以使它在一定条件下与其它物质形成络合物或化合物。图 1-1 是金原子结构关系模型, 它不仅反映了金原子最原始状态, 而且反映了金原子在相互堆积时才产生的电子运移轨道及其相互关系。金在原子数量较少且堆积极薄时, 不易发生电子振荡的共振效应, 同时原子半径长、短轴互补堆积, 使得原子间隙消失, 从而表现出绝缘和屏蔽性。当原子数量增到足以产生共振效应时, 电子开始脱离最初位置进行椭圆运动, 同时原子堆积厚度加大, 原子不规则堆积出现较大间隙, 才使得金表现出一般金属性。

现今人们观测到的金原子半径从 $1.40\text{\AA}$ 到 $1.44\text{\AA}$ 不等, 也是金原子不是圆球体的一个佐证。随着科学技术的进步, 人们一定能观测到金原子半径的长、短不等值。图 1-1 是金原子结构关系模型, 它形象地反映出金原子的最初原始状态、运动方式和相互结构关系。

国内外已经发表的和正在进行的有关金的能级谱的研究^[2], 从量子力学观点看来, 都是金的后期群体运动状态所表现出来的性质, 而图 1-1 给出的是金的最初的原始状态中电子独立的相对静止势态。

二、金的成矿模式

依据金的非专属性、金属特性和新构造出的金原子结构模型, 推测金起源于地核。称之为铁镍合金的地核, 实际上是铁镍和金。金是以紫色气体状混合于铁镍之间的。在地核的收缩与膨胀过程中, 金蒸气进入到地幔的软流圈, 其上升通道是幔核之间由于核收缩或膨胀而局部和暂时形成的大分子间隙。金蒸气到达地幔的软流圈后, 一部分变成液态, 形成气-液混合相金, 与软流圈中的甲烷类物质 (CH_4) 一起, 随其岩浆浆体(源)一起流动, 在流动过程中起到比重平衡作用。

这种气-液混合相金, 在遇到幔断裂与岩浆上涌时, 占混合相 $2/3$ 以上的气态金将进到由于地热条件而发生塑变软化的围岩中去, $1/3$ 以下的气-液混合态金与岩浆一起进行分异作用。

在分异过程中, 液态金在地表淡水作用下, 可直接变成固态金; 在地表咸水(海水)作用下, 呈络合物仍然进行搬运, 当再有淡水或细菌(生物)等因素作用下, 则开始变为固态金。

所以, 金的形成是以气态→气-液混合态→固态, 从地核→地幔→地壳→大气层来演变的。无论金矿的物质来源、导矿通道还是富集空间都表明金矿的成矿条件中最主要的是构造条件。

图 1-2 是金的成矿模式, 它系统地反映出金的形成、运移与产出过程。

从以上金的成矿模式出发, 在以下 ABC 组合条件下就可以找到金矿:

- A、深大断裂, 尤其是先拉张后挤压或剪切的深大断裂, 它能提供金的物质来源;
- B、构造运动所产生的构造交汇部位, 它能使金进行运移、富集和演变;
- C、产出空间, 能吸附金蒸气的热塑变质围岩; 能使金发生沉淀的由构造活动所提供的搬运能量的衰减带; 搬运网络中介质数量的增加与减少, 能使金以络合物或化合物

产出的突变的动荡封闭、半封闭环境。

两个来源和多次富集成矿是金成矿作用的一个重大特征。岩金和伴生金都来源于地球深部，而砂金来源于地壳表层。现有资料表明，地壳中金平均丰度值为 0.004ppm，与宇宙中的陨石相比较，球粒陨石中金的含量大约在 0.448—2.90ppm 之间，陨铁中为 0.055—8.744ppm，陨硫铁中为 0.07—8.0ppm，普遍比地壳丰度约高 140—2 200 倍左右^[3]。

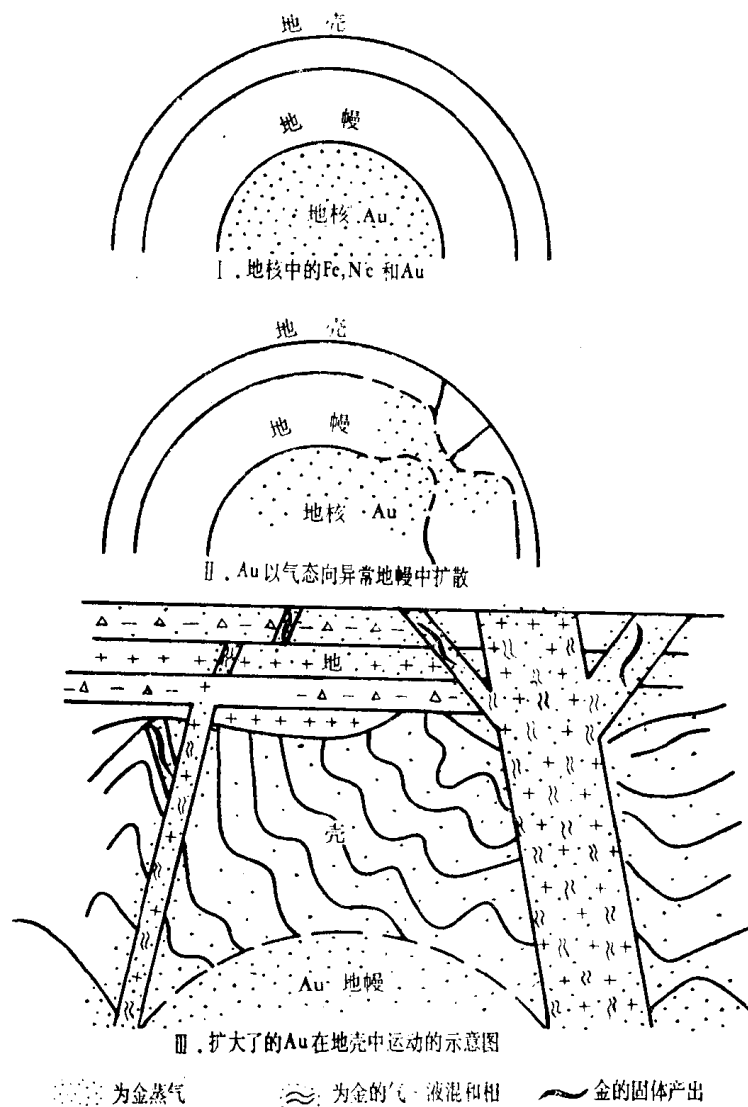


图 1-2 金的成矿模式

经计算，在地球大约 60 亿年的演变过程中，大约 99% 的金都集中到铁镍地核之内^[4]。现时在地壳上见到的金矿床，都是由于构造运动形成的深大断裂，将深部的含金岩浆以侵入方式或火山活动等形式带到浅部或地表而形成的，有的系外生地质作用而形成金的富集。大多数具有经济意义的金矿床，往往是多种地质作用联合或叠加而形成的，特别是各种不同成因的热液活动、变质作用、重熔再生岩浆活动等等。砂金矿床的成因还有地球化学作用，尤其是地表水作用，以及生物（微生物）富集作用等，有越来越多的资料都证明了这一点。

三、金的运移与富集的理论基础

Белов 等 (1982) 利用力参数方法对元素周期表进行了描述, Au 位于第六周期, 力参数为 1.95^[2]。

力参数可通过对电子的亲合力与原子轨道半径的比值求得。计量单位为 e^2/r^2 , 其中 e 表示电子电荷, r 表示原子或离子半径。力参数用 $\gamma_{\text{轨道}}$ 来表示。表 1-1 是元素的力参数 ($\gamma_{\text{轨道}}$)。

表 1-1 元素的力参数 ($\gamma_{\text{轨道}}$)^[2]

周 期 系 的 周 期											
1		2		3		4		5		6	
元素	$\gamma_{\text{轨道}}$	元素	$\gamma_{\text{轨道}}$	元素	$\gamma_{\text{轨道}}$	元素	$\gamma_{\text{轨道}}$	元素	$\gamma_{\text{轨道}}$	元素	$\gamma_{\text{轨道}}$
H	1.42	Li	0.37	Na	0.20	K	0.14	Rb	0.12	Cs	0.09
He	-0.76	Be	-0.18	Mg	-0.17	Ca	-1.14	Sr	-0.82	Ba	-0.23
						Sc	-0.46	Y	-0.24	La	0.29
						Ti	0.26	Zr	0.29	Hf	-0.43
						V	0.46	Nb	0.71	Ta	0.10
						Cr	0.67	Mo	0.78	W	0.57
						Mn	-0.76	Tc	0.72	Re	0.11
						Fe	0.47	Ru	1.07	Os	1.13
						Co	0.80	Rh	1.23	Ir	1.60
						Ni	1.12	Pd	1.80	Pt	1.75
						Cu	1.03	Ag	1.01	Au	1.95
						Zn	0.09	Cd	-0.23	Hg	-0.17
		B	0.37	Al	0.39	Ga	0.31	In	0.14	Tl	0.38
		C	2.05	Si	1.72	Ge	1.60	Sn	0.83	Pb	0.82
		N	-0.40	P	0.87	As	1.06	Sb	0.79	Bi	0.73
		O	3.27	S	1.27	Se	2.02	Te	1.80	Po	1.09
		F	8.64	Cl	4.98	Br	3.97	I	2.95	At	2.43
		Ne	-0.62	Ar	-0.57	Kr	-0.53	Xe	-0.46		

Белов 等 (1982) 把原子对电子的亲合力 F 与元素的力参数 $\gamma_{\text{轨道}}$ 进行综合研究后发现, 贵金属的原子虽具高 F 值, 但由于它们的力参数比较大, 因此不产生明显的酸性^[2]。这是因为松弛的 $(n-1)d^{10}$ 亚层能够形成导致贵金属元素所具有的特别络合作用的两性阳离子。这主要与非新对称的 s 电子的高穿透能力有关, 统计数据表明, s 电子具有内部最大能值。图 1-3 是元素的 F 与力参数的关系, 金位于两性阳离子区的最顶端。

自然界中, 金通常呈自然状态出现。

现已查明, 自然金可以出现类质同像和不连续的固溶体系列, 在自然界中最常见到银金矿 (Au, Ag)。

自然界还广泛存在不同晶体结构矿种为特点的有限固溶体: 铜金矿 (Cu, Au)、汞金矿 (Hg, Au)。在自然金中存在有限类质同像的铂族元素混入物; 在自然铂中, 同样可以存在金和镍的混入物。当成矿介质中元素间有一定比值或过饱和固溶体分解时, 会产生

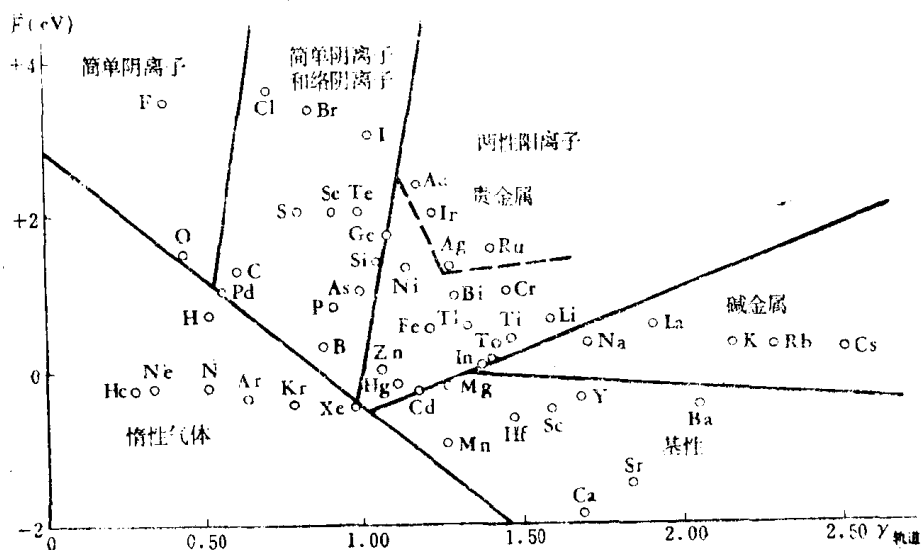


图 1-3 元素的 F 与 γ 轨道的关系^[2]

金属互化物，例如铜金矿 Cu_3Au_2 ， CuAu 和 Cu_3Au 成分相，金汞齐 Au_2Hg 。

饱和固溶体的分解，将导致成分不均一的带状和斑点状的混入物中的金属互化物的析出。自然金的成分主要取决于它的形成条件，例如石英中析出的自然金的成色通常比产于硫化物中的自然金低，它在硫化物中不仅与 Cu ，而且与 Fe ， As 相结合。与碲化物共生中的自然金，由于形成 Au 的碲化物而成色高。自然金以及固溶体，其结构可用最紧密的立方堆积来描述。

地壳运动破坏了壳内地球物理-地球化学的均衡状态，各种元素都发生运移。根据勒夏忒列定律^[5]：一个系统的平衡受到外力的破坏，系统内部即起反应，使平衡条件向抵消外力的方向移动。元素的运动状况，从缓和到剧烈总是吸收能量，而从剧烈到缓和总是释放能量。所以，矿物从岩浆中或溶液中结晶析出的过程，就是能量释放的过程。一般总是能量系数较大，结晶能力强的元素首先晶出，产生最大放热效应的化合物。以此类推，能量系数较小，结晶能力差的元素最后晶出乃至不停地搬运、迁移。

建立在构造作用下的岩浆体、热液和地壳、地幔岩石中热物质运移及变冷成矿的模型，是当前成矿作用动力学研究的新领域。

岩浆从炽热的熔融体到固结成冷的岩石和矿石，是热能与动能不断释放的过程。各种元素的结晶成岩成矿大致可以有个顺序系列。造岩矿物结晶顺序从早到晚为： $\text{Mg} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Ca} \rightarrow \text{Na} \rightarrow \text{K}$ ；成矿元素结晶顺序从早到晚为： $\text{Sn} \rightarrow \text{W} \rightarrow \text{Mo} \rightarrow \text{Bi} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Cu} \rightarrow \text{Eu} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{Sb} \rightarrow \text{Hg}$ 。

结晶先后生成顺序取决于不同元素具有不同的结合能力。Born 和 Lande 对二元化合物的晶格能用下式进行计算：

$$U = \frac{-a\omega_1\omega_2e^2N}{D} \left(1 - \frac{1}{m}\right)$$

式中： a 为离子空间排列关系的系数； $\omega_1\omega_2$ 为相结合的离子的原子价； e 为电子的单位电荷； D 为阳、阴离子半径之和； m 为排斥系数，常取 10； N 为阿伏伽德罗常数，即 6.062×10^{23} ； U 为晶格能。

以上公式反映出电价越高，离子半径越小，其晶格能越大。

表 1-2 是金与一些元素的离子电价和离子半径。

表 1-3 是金与一些元素的离子能量系数。

表 1-2 主要元素离子电价和离子半径^[5]

离子电价	C ⁴⁺	B ³⁺	Se ⁺	Be ²⁺	P ⁵⁺	Si ⁴⁺	As ⁵⁺	Mn ⁴⁺	As ³⁺	Al ³⁺	V ⁵⁺	W ⁶⁺
离子半径	0.16	0.23 (0.24)	0.30	0.35 (0.34)	0.35	0.42	0.46	0.52	0.58	0.51 (0.57)	0.59	0.62
离子电价	Mo ⁶⁺	Cr ³⁺	Co ³⁺	Fe ³⁺	Mg ²⁺	Ti ⁴⁺	Li ⁺	Ta ⁵⁺	Nb ⁵⁺	Ni ²⁺	W ⁴⁺	Mo ⁴⁺
离子半径	0.62	0.63	0.63	0.64 (0.67)	0.66 (0.78)	0.68 (0.65)	0.68 (0.78)	0.63 (0.69)	0.68 (0.69)	0.69	0.70 (0.68)	0.70 (0.68)
离子电价	Mn ³⁺	Sn ²⁺	Cu ²⁺	Co ²⁺	Bi ⁵⁺	V ³⁺	Fe ²⁺	Zn ²⁺	Sb ³⁺	Mn ²⁺	Pb ²⁺	Bi ³⁺
离子半径	(0.70)	0.71 (0.74)	0.72	0.72	0.74 (0.80)	0.74	0.74 (0.83)	0.74 (0.83)	0.76 (0.90)	0.80 (0.91)	0.84	0.96
离子电价	Cu ⁺	U ⁴⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Th ⁴⁺	Hg ⁺	Pb ²⁺	Ag ⁺	K ⁺	Ba ²⁺	Au ⁺	
离子半径	0.96 (0.96)	0.97	0.97	0.99	1.08	1.10	1.20	1.26	1.33	1.34	1.37	

表 1-3 离子能量系数^[5]

离子电价	W ⁶⁺	P ⁵⁺	C ⁴⁺	Si ⁴⁺	Mo ⁶⁺	Pb ⁴⁺	Sn ²⁺	U ⁴⁺	B ³⁺	V ⁵⁺	Fe ³⁺	Al ³⁺
能量系数	19.35	15.5	12.2	8.6	8.5	7.95	7.9	7.00	6.00	5.32	5.15	4.95
离子电价	Cr ³⁺	Ti ⁴⁺	Be ²⁺	Sb ³⁺	Zn ²⁺	Ni ²⁺	Co ²⁺	Fe ²⁺	Mg ²⁺	Cu ²⁺	Mn ²⁺	Ca ²⁺
能量系数	4.75	4.65	2.65	2.30	2.22	2.18	2.15	2.12	2.10	2.10	2.00	1.75
离子电价	Pb ²⁺	Ba ²⁺	Hg ⁺	Cu ⁺	Au ⁺	Ag ⁺	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	I ⁻	Cl ⁻	H ⁻
能量系数	1.65	1.35	0.93	0.70	0.65	0.60	0.55	0.45	0.36	0.18	0.25	0.32
离子电价	F ⁻	(OH) ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	S ²⁻	PO ₄ ²⁻	AsO ₄ ³⁻	O ₂	SiO ₄ ⁴⁻			
能量系数	0.37	0.37	0.68	0.78	1.15	1.50	1.53	1.55	2.75			

表 1-2 与表 1-3 反映出元素晶出的顺序与元素能量系数的排列顺序基本一致。同时应指出，其它因素的加入可能会改变这种元素的晶出顺序。

从表 1-2 与表 1-3 与地壳上矿床产出状况相结合，可以得出以下一般规律：

1) 同一种元素，高价的比低价的先晶出，例如 Fe³⁺ 比 Fe²⁺ 先晶出，Sn⁴⁺ 比 Sn²⁺ 先晶出。

2) 同价不同种元素，离子半径小的比离子半径大的先结晶，如 Mg²⁺、Fe²⁺ 比 Ca²⁺ 先结晶。金为特例，离子半径虽然较大 (1.37)，但往往先晶出。

3) 价高、离子半径小的元素比价低、离子半径大的元素先结晶。

4) 在类质同像、离子交代过程中，晶格能大的元素，可以置换晶格能小的元素，如 Cr, V, Sc 可以置换 Mg, Fe。

5) 晶格能大致相当的元素, 往往同时结晶, 例如 Fe, Mg 经常在一起。

6) 在地壳上强烈挤压构造带往往聚集着晶格能大的元素的矿产产出, 远离挤压构造带出现晶格能小的元素的矿产产出。金矿又违反这一规律, 往往在挤压破碎带、韧性剪切带内富集成矿。

所以, 金作为过渡型元素, 往往出现与一般规律相矛盾的状况, 不能不引起人们对金的现有原子结构理论的质疑与大胆探索, 随着科学技术的进步, 金的真面目一定会被揭示出来。

金的富集成矿还有一个不可忽视的有地表水参与下的微生物作用, 至今还不明白微生物富集金的机制, 尽管许多国家的许多科学家正在从事这项工作。

参 考 文 献

- [1] Howard, G., Wilson, Paul B., Maccready and Chester R. Kyle, 1989, Sunrayer Science, Vol. 260, No. 3.
- [2] Белов, Н. В., Годовиков, А. А., и Бакакин, В. В., 1982, Очерки по теоретической минералогии, Издательство «Наука», Москва.
- [3] Boyle, R. W., 1979, The geochemistry of gold and its deposits, Canada.
- [4] 中国有色金属工业总公司北京矿产地质研究所主编, 1987, 国外主要有色金属矿产, 冶金工业出版社。
- [5] 孙殿卿、高庆华, 1987, 隐伏矿床预测, 地质出版社。

第二章 金的地球物理性质及其地球化学行为方式

一、金的地球物理性质

金是一种黄色金属，硬度较低，纯金摩氏硬度为 2.8，当杂质较多时，硬度可达 3.7。金熔点相当高，在 1 063℃ 时熔化成液体。在 2 860℃ 时，金液开始沸腾，出现金蒸气，该种紫色气体向四周扩散极为迅速。金的比重较大，自然金的比重为 19.37。金具有极好的韧性和延展性，纯金可以拉成直径为 2μm 的细丝，还可以压成 1/10 000mm 厚的薄片，还可以把金镀成 <0.02μm 厚的薄膜，此时的金显示出金属的特异性能，使得金具有双重物理性能，既是良导体（导电、导热），又是绝缘屏蔽体（不导电、不导热）。

金位于元素周期表第六周期的 IB 副族的第三位，属于铜族元素，因此金常常与铜、银两个金属相伴生。表 2-1 是 Boyle (1979) 所收集到的有关金的各种能量特征参数^[1]，而且与铜、银两种元素进行了对比。金是第三个系的过渡元素，但金并不具备作为过渡元素特征电子排布条件，过渡性元素一般具有一个没有饱和的内层 d 或 f，例如镍。在金原子中，5d 层轨道是完全填满电子的。这可能是金在原始状态而表现其特异性能的

表 2-1 金、铜、银的各种能量特征^[1]

特 征	金	铜	银
外层电子排布	5d ¹⁰ 6s ¹	3d ¹⁰ 4s ¹	4d ¹⁰ 5s ¹
氧化态 (价)			
(括号内价数不常见)	1, 3	1, 2, (3)	1, 2, (3)
负电性	2.4	1.9	1.9
电离势 (eV)	Au(I) 9.223 Au(III) —30	Cu(I) 7.724 Cu(II) 20.29	Ag(I) 7.574 Ag(II) 21.48
晶格能量系数	Au(I) —183	Cu(I) 215 Cu(II) 630	Ag(I) 180
原子半径 (Å)	1.40(8)	1.24(8)	1.40(8)
(括号内为配位数)	1.44(12)	1.28(12)	1.44(12)
离子半径 (Å)	Au(I) 1.37	Cu(I) 0.96(6)	Ag(I) 1.13
(括号内为配位数)	Au(I) 1.37 Au(III) 0.78(4) 方形 Au(III) 0.91(6)	Cu(I) 1.00(8) Cu(II) 0.82(6)	Ag(I) 1.13(10) Ag(II) 0.97(6)
各种半径 (Å)	Au(I) (水合的) 1.4	Cu(I) (氟化物内) 1.00 Cu(I) (氧化物内) 1.05 Cu(II) (氟化物内) 0.87 Cu(II) (氧化物内) 0.97 Cu (四面体共价) 1.35 Cu(I) (水合的) 1.7 Cu(II) (水合的) 3.5	Ag(I) (氟化物内) 1.33 Ag(I) (氧化物内) 1.35 Ag (四面体共价) 1.53 Ag(I) (水合的) 1.7
离子电离势 $\frac{Z}{r}$	0.88 Au(I) 0.73 Au(III) 3.30	Cu(I) 1.00 Cu(II) 2.44	Ag(I)