



金矿床地质学

俞广钧 编著

重庆大学出版社

金矿床地质学

俞广钧 编著

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书讲述了金的地球化学、金的矿物学、金矿床成矿理论及其分类、金矿床的主要类型、金矿床成矿规律等内容。本书特点：作者全面总结、吸收了近几年来国内、外金矿成矿新理论、矿床新类型、典型金矿床实例，并结合本人多年金矿地质实践科研成果，在加强基本理论的基础上，突出理论与实际的应用，内容丰富而新颖。

本书既可供大专院校金矿地质专业、地质矿产勘查专业作为教学参考书，也可作为从事金矿找矿勘探人员、矿山地质人员及金矿地质研究人员参考资料。

金 矿 床 地 质 学

俞广钧 编著
责任编辑 李长惠

•
重庆大学出版社出版发行
新华书店经销
四川省隆昌县印刷厂印刷

•
开本：787×1092 1/16 印张：11 字数：275千
1991年1月第1版 1991年1月第1次印刷
印数：1—2000

标准书号：ISBN 7-5624-0337-6 定价：3.31元
P·12

前 言

从古至今黄金就是人类用作货币和装饰品的一种贵金属、当今世界黄金是国际上金融贸易的硬通货。随着现代科学技术的发展，黄金在工业与高科技领域中的用途日趋重要，它既有交换价值，又有使用价值。目前，国内外黄金的需求量急剧增长，国际市场黄金价格不断上涨。世界各国普遍重视黄金生产，主要产金国都把黄金资源的普查勘探、矿山地质及开发利用研究列为最重要的经济项目。世界黄金产量随着金价的上涨和需求量增长而迅速增加。

我国金矿资源十分丰富，为我国发展黄金工业提供了良好的物质基础。近十几年来，我国极为重视金矿的地质普查勘探和黄金资源的开发利用，黄金储量与产量增长较快。

为了大力开展金矿地质普查勘探和矿山地质工作，进一步扩大金矿资源，培养大批金矿地质专业人才，是当前刻不容缓的任务。为此，编写《金矿床地质学》一书，以适应教学、科研和生产的需要。

本书全面总结了我国金矿成矿理论、成矿规律、金矿床新类型、典型金矿床实例及作者多年金矿地质的教学实践与科研成果，吸取了国外金矿成矿新理论及研究新方法，反映了近年来国内外金矿研究的趋势与研究水平。

在编写过程中，作者考虑了加强课程的基本理论及理论联系实际、突出重点和少而精的原则。

本书可供大专院校金矿地质专业、金属矿产地质勘查专业作为试用教材；也可供从事金矿地质勘查、金矿矿山地质和金矿地质研究人员参考。

编者

1989. 10.

目 录

绪论	(1)
第一章 金的地球化学	(4)
第一节 金的化学性质	(4)
第二节 金在地壳中的丰度	(7)
第三节 金在成矿作用中的主要地球化学性质	(11)
第四节 内生成矿作用中金的地球化学	(14)
第五节 表生成矿作用中金的地球化学	(23)
第二章 金的矿物学	(25)
第一节 金矿物分类	(25)
第二节 主要金矿物的特征	(27)
第三节 内生金矿建造及金矿床的矿石组构特征	(38)
第四节 自然金的标型特征	(42)
第五节 载金矿物的标型特征	(47)
第三章 金矿床成矿理论及其分类	(52)
第一节 内生金矿床成因学说概论	(52)
第二节 内生金矿床的成矿条件	(55)
第三节 金矿床的成矿作用	(70)
第四节 金矿床的分类	(82)
第四章 金矿床的主要类型	(92)
第一节 含金岩浆岩型矿床	(92)
第二节 热液金矿床	(93)
第三节 沉积—变质金矿床	(134)
第四节 外生金矿床	(137)
第五章 金矿床成矿规律	(145)
第一节 金的成矿物质来源及迁移富集	(145)
第二节 金矿成矿特征	(148)
第三节 金矿床的时空分布规律	(153)
第四节 我国金矿区域分布规律	(158)
参考文献	(167)

绪 论

一、金矿床地质学的性质与任务

世界性黄金勘查工作的迅速发展，金矿床地质学逐渐成为矿床学的一门分支学科。

金矿床地质学的主要任务是研究各类金矿床的形成条件、成矿特征、形成过程，阐明金矿床的成因问题；研究金矿床的形成时间、空间位置、成矿地质条件，阐明金矿床在地壳中的分布规律；研究矿体的物质成分、矿物和元素的共生特征、矿石结构构造、矿体形态、规模、产状、矿床产出环境、矿床围岩岩性、构造、岩浆岩、变质作用、蚀变作用与金矿化的关系；研究成矿理论、成矿规律，建立成矿模式，指导金矿床的评价、找矿、勘探及矿山地质工作。

二、金矿床地质学与其他学科的关系

与金矿床地质关系最密切的地质科学有矿床学、矿床矿田构造学、地球化学、同位素地质学、矿物学、岩石学、地质构造学、地史学、矿物包裹体研究等。

运用矿床成矿理论和研究方法，研究金矿床成矿特征、成矿条件、形成过程、成矿规律与矿床成因。运用矿床矿田构造控矿理论，阐明金矿受大、中、小构造控制的分布规律。运用地球化学理论研究金矿成矿物质来源、迁移富集条件、成矿物理化学条件。运用同位素地质学研究成岩成矿时代、成矿物质来源以及矿床成因。运用矿物包裹体研究资料阐明金矿成矿温度、盐度等成矿环境。运用成因矿物学理论研究金矿物和载金矿物的标型特征、矿物共生组合、矿石组构特征，阐明金矿床的成因。随着金矿床地质学、成因矿物学等学科的发展，逐步产生了金矿找矿矿物学这门新兴的地质分支学科，它以金的指示矿物为主要研究对象，运用成因矿物学、标型矿物学理论，在金矿普查勘探中阐明金的指示矿物与金矿体的空间关系及成因关系。

三、我国金矿地质工作的主要成就

建国以来，我国黄金工业有了较大发展，特别是近十年来，各级政府比较重视黄金生产与找矿勘探工作，我国建立了一支数十万人的金矿地质队伍，发现了一系列金矿床，建立了一大批黄金生产基地。著名的金矿床有黑龙江团结沟、东风山金矿，胶东三山岛、焦家、新城、玲珑金矿田，小秦岭地区金矿，广东河台金矿，云南墨江、镇源金矿，黔西南金矿，四川耳泽金矿以及嘉陵江、汉江等江河流域的砂金矿。伴生金产量也占有重要地位。我国已成为当今世界十大产金国（南非、苏联、加拿大、美国、巴西、津巴布韦、中国、澳大利亚、菲律宾、哥伦比亚）之一，金矿储量也跃居世界前茅，仅次于南非、苏联和美国。

目前，我国黄金工业空前发展，成立了黄金专业性院校与科研机构，出版了一系列黄金地质学术专著，涌现了一批金矿地质学者、专家。全国范围内金矿地质学术活动活跃，广泛交

流科研成果与信息。

由于我国金矿地质工作者对于①胶东前寒武系构造破碎带蚀变岩型金矿床、②以黑龙江团结沟为代表的中生界陆相火山岩型金矿床、③黔西南三叠系一二叠系碎屑岩系中的微细粒浸染型金矿床、④黑龙江东风山前寒武系硅铁建造中的金矿床、⑤豫西熊耳群中古火山岩系金矿床等金矿新类型的地质研究有新的突破，以及成矿规律的总结、成矿模式的建立，因此极大地丰富了对金矿成矿条件的认识，大大扩大了我国的找金区域。

四、金矿床地质学的现状与发展趋势

在成矿理论方面，由于稳定同位素的应用、矿物包裹体研究成果的应用、成岩成矿模拟实验、以及微量金测试技术水平的提高，金矿地质学家对成矿物质来源、成矿物理化学条件及成矿机理等有了新的认识，并提出了成矿物质、成矿溶液的多源性、叠加成矿的多期性、成矿作用的多阶段性的成矿新理论；尤其对成矿物质的多源性作了新的解释，认为矿质就近吸取，来自矿床附近的矿源层和矿源岩。R. W. 博伊尔论证了变质岩中含金石英脉的形成，是由于区域变质过程中围岩所含金元素通过离子扩散、扩容作用的结果。B. A. 布梁克提出了变质热液金矿床的成矿概念，我国地质学家谢家荣、黎彤、朱奉三等对区域变质作用金的活化迁移的地球化学行为作了探讨。母瑞身等根据我国区域成矿规律，提出了我国金矿分布集中区的概念与划分原则，并分析了区域成矿地质条件。

目前，世界各国都在强化黄金普查勘探工作，尤其加强已知金矿田或有色金属矿田外围综合地质研究和成矿预测。80年代以来，国外发现了100t以上的特大型金矿床20多个。例如：世界最大的金矿——苏联穆龙套1000t、加拿大赫姆洛590t、莫斯科肖350t、巴布亚新几内亚利希尔岛310t、波格拉287t、美国金坑127t、麦克劳克林100t、日本菱刈120t、巴西佩拉达山100t。成矿理论与成矿模式方面也有新的发展。发现卡林型金矿容矿岩石除碳酸盐岩外，还有片岩、燧石岩、凝灰岩和火山岩等，这就扩大了卡林型金矿找矿勘探范围。美国在老汞矿区发现了特大型麦克劳克林金—汞矿床，在研究了汞、锑、金地球化学共生组合特性后，提出了新的找矿方法。加拿大在古绿岩带中发现的赫姆洛层控浸染型特大型金矿床是绿岩带中金矿的新类型，扩大了找金领域；加拿大金矿地质学家还提出了“浊积岩容矿”的金矿新类型，其成矿时代为古生代，容矿岩石为杂砂岩，矿脉受剪切带控制。在成矿模式方面，建立了浅成热液金银矿床热水对流系统成矿模式，适用于火山岩中浅成热液金银矿床和卡林型金矿床。

我国已知原生金矿的70%，几乎都集中分布于华北地台边缘的几个金矿集中区。我国广泛分布有元古代地层，古生代和中—新生代褶皱带与造山带也十分发育，岩浆活动强烈，具有寻找时代较新的金矿床的有利条件。天山褶皱带中发现有穆龙套式金矿的成矿条件。我国继陕西李家沟、湖北石峡、四川金山、贵州板其、丫他卡林型金矿床之后，在西南（黔西南、桂西北、滇东南）地区，又发现了一系列大—中型金矿床。山东、河南、广东又发现了一系列新的破碎带蚀变岩型金矿，建立了相应的成矿模式，对打开我国找金局面、增加金矿储量起了重要作用。

进行综合地质研究是深入找矿的关键。随着找矿工作的深入，找金难度越来越大，目前，已从地表露头找矿转向深部隐伏盲矿和微细粒金矿找矿。从总体上综合研究某一成矿带

(区)，并运用综合研究成果、找矿信息、成矿理论、成矿模式或成矿规律来指导该带(区)普查找矿工作，将会有新的发现或重大突破。即从研究一个矿床、一个矿田发展到以整个成矿带(区)为中心，进行各种类型金矿床的总体综合性研究，包括研究不同期各种金矿、各种类型、各个矿床之间内在联系和规律，用来指导找矿工作。例如，美国内华达金矿带有浸染型金矿、斑岩型金矿和砂金矿；我国小秦岭—熊耳山金矿成矿带的矿床类型有脉型金矿、破碎带蚀变岩型金矿、斑岩型金矿、砾岩型金矿和砂金矿。成矿时代有晚太古代、元古代、中生代和新生代。这种不同成矿时代形成的不同类型的金矿床聚集在同一成矿带的成矿规律，正是金矿集中区所要研究的内容。

新技术新方法是深入普查找金的有效手段。目前化探方法是一种行之有效的找金矿方法。我国河南上官大型破碎带蚀变岩型金矿床的发现，就是应用水系沉积物地球化学测量经过钻探验证找到的。小秦岭金矿田内应用岩石地球化学测量方法找到了一个大型盲矿体。国外应用化探找金曾在美国内华达州找到十多个金矿床；在苏联乌兹别克根据化探砷异常发现了穆龙套等一系列大型、特大型金矿床。

近年来，高灵敏度的痕量金分析技术(DC等离子法、中子活化法、化学光谱法等)用于微细粒金矿的勘查工作，获得了良好效果。

我国疆域辽阔，地质构造单元复杂多样，金矿类型繁多，金矿点、异常分布广泛，具备良好的找矿地质前提条件和找矿前景。

第一章 金的地球化学

第一节 金的化学性质

一、金在元素周期表中位置

金的物理性质、化学性质及地球化学性质主要决定于金在元素周期表中的位置及其原子构型。金在元素周期表中位于第六周期第一副族（IB）金、铜、银构成铜族元素（表1-1）。

化 学 元 素 周 期 表 表1-1

周期	I A	II B											III A	IV A	V A	VI A	VII A
1	H																
2													B	C	N	O	F
3	Na	Mg	III B	IV B	V B	VI B	VI	VII			IB	II B	Al	Si	P	S	Cl
4	K	Ca				Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn			As	Se	
5						Mo		Ru	Rh	Pd	Ag			Sn	Sb	Te	
6			La—Lu			W		Os	Ir	Pt	Au	Hg		Pb	Bi		
7						V											

金的原子序数为79，原子量196.91，熔点1063°C，沸点2966°C，它只有一种天然稳定同位素 Au^{197} 。金的电子层构型为 $4f^{14}5d^{10}6s^1$ 。价电子层为 $5d^{10}6s^1$ ，最外层电子是一个，次外层电子是10个（表1-2）。

金、银、铜电子层结构表

表1-2

元素	原子序	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	5g	6s	6p	6g
Au	79	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10			1		
Ag	47	2	2	6	2	6	10	2	6	10		1							
Cu	29	2	2	6	2	6	10	1											

在元素周期表中金的左边为Fe、Co、Ni、Pt族等亲铁元素，右邻Zn、Cd、Hg、Pb、As、Sb、Bi、S、Se、Te等亲硫元素，因此，金既有亲硫性，又有一定的亲铁性。

金在元素周期表中位于镧系元素之后，金原子内部 $4f^{14}$ 电子亚层全部充满，引起镧系收缩。随着核电荷（外层电子数）的增加很多，而原子半径增加不大，导致核电荷对外层价电子吸引力增强，因而金的外层价电子不易失掉。因此，金具有高电离势、高电负性及高氧化

一还原电位的化学特性，不易形成离子，常以原子状态存在，金在自然界中呈自然元素或金属互化物产出（表1-3）。

铜族元素地球化学参数表

表1-3

元素	电子构型	原子量	原子半径 (nm)	离子电价形式	配位数	离子半径 (nm)	电离势 (eV)	电负性	离子电位	亲铁性	亲硫性
Cu	3d ¹⁰ 4s ¹	63.57	0.128	Cu ⁺	6	0.096	7.7	1.8	1.04	弱	强
					8	0.100					
				Cu ²⁺	6	0.072	20.3	2.0	2.78		
Ag	4d ¹⁰ 5s ¹	107.88	0.144	Ag ⁺	8	0.131	7.54	1.8	0.79		
					10	0.134					
				Ag ²⁺	6	0.089	21.4		2.25		
Au	5d ¹⁰ 6s ¹	197.2	0.144	Au ⁺	10	0.146	9.18	2.3	0.79		
					12	0.149					
				Au ³⁺	6	0.085	30.00		3.53	强	弱

金在元素周期表中，与铜、银同属于铜族元素，电子构型相同，原子半径、电负性、电离势和晶格类型比较近似。铜族元素中，金原子核对外层价电子的吸引力很强，金的电离势比铜、银高得多，不易失去外层价电子，呈自然元素产出，而铜、银易成正一价离子，形成化合物矿物。铜族元素中，金与银的原子半径、离子半径十分接近，晶格类型相同，晶胞棱长也近于相等；自然界中金与银常密切共生，一般金矿物中均含一定量的银，形成连续的同质同象系列或金属互化物。金、铜虽同属一族元素，晶格类型也相同，但金与铜原子半径差值较大，只能形成有限的类质同象或金属互化物。

金和铂族元素在元素周期表中的位置相近，金与铂族元素外层电子构型相似。在还原条件下，金与铂族元素的地球化学性质相似，在与基性—超基性岩有关的矿床中密切共生，形成多种金与铂族元素的金属互化物。

除铜族、铂族元素之外，在元素周期表中，还有一系列与金位置相近、关系很密切的元素：Mn、Fe、Co、Ni、Zn、Hg、Sn、Pb、As、Sb、Bi、Se、Te、S、Cl等。金与铋、铊、汞形成金属互化物；金与硒、碲形成金矿物；铁、钴、镍、铅、锌、砷等元素常形成硫化物，成为金矿床主要矿物组合。

二、金的化学性质

金的电离势、电负性和氧化还原电位高，从而决定了金的惰性，它常呈原子状态存在于自然界中。金在空气、水中不氧化，不溶于水和单一酸，化学性质很稳定。

金的惰性很大，在常温或高温下，都不与氧起化学反应，也不能与硫直接起作用，常温下与单一无机酸均不起化学反应；但金溶解于王水等混合酸，金与王水的化学反应式如下：

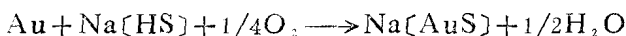


金在王水中先被氧化为三价金离子 Au^{3+} ，再与氯离子结合生成金氯络阴离子 $[\text{AuCl}_4]^-$ 。

金还可溶解于硫酸、硒酸、碲酸的混合酸、含碱金属卤化物的铬酸、 $150 \sim 300^\circ\text{C}$ 的硒酸、盐和过氧化氢的混合物、含碱金属硫化物、氰化物溶液，以及硫代硫酸盐 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液等。含 Fe_2O_3 、 MnO_2 等强氧化剂的盐酸或硫酸也可溶解金，其化学反应方程式为：



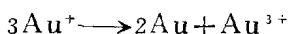
在氧化条件下，金与 $\text{Na}[\text{HS}]$ 反应生成可溶性硫金酸钠络合物，其化学反应方程如下：



由上述可见，在强氧化条件下，当存在 Fe^{3+} 、 Mn^{4+} 、 Cl^- 、 S^{2-} 、 $[\text{HS}]^-$ 、 As^{5+} 等强氧化剂时，才能使金属态的金变为离子态的金，也就是使金活化转入溶液，为金在自然界中的活化、迁移和富集变为可能。

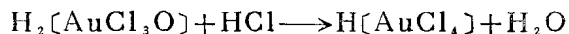
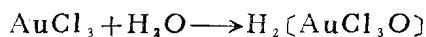
金常见的价态有 0 价 (Au^0)、正一价 (Au^+ 或 AuI)、正三价 (Au^{3+} 或 AuIII) 三种。

金可以 Au^+ 、 Au^{3+} 氧化态出现，但金在自然界中很少出现以一价、三价离子态存在的稳定化合物。 Au^+ 呈简单阳离子在水中不稳定， AuCl 在水中也要分解，产生歧化反应：



在水中 Au^+ 只有以络离子形式出现，才能稳定存在。例如： $[\text{AuS}]^-$ 、 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^+$ 、 $[\text{AuCl}_2]^-$ 、 $[\text{AuS}_2]^{3-}$ 、 $[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)]^-$ 等。

Au^{3+} 在水溶液或酸性或碱性溶液中都形成稳定的络阴离子，例如：



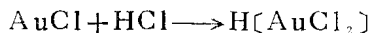
Au^+ 、 Au^{3+} 两种离子在水中很不稳定， Au^+ 的氯化物在水中生成金属金和 Au^{3+} 的氯化物。 AuBr 、 AuI 与 AuCl 性质相似。 Au^{3+} 在水中也要产生水化作用，在酸性条件下，也要生成 Au^{3+} 的氯络合物。 Au^+ 的特点是水溶液中呈稳定的络合物，大多数有单体特性，例如 $[\text{AuCl}_2]^-$ 、 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^+$ 、 $[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)]^-$ 。 Au^+ 还有含替换硫、砷、锑的配合基的许多络合物，例如 $[\text{AuS}]^-$ 、 $[\text{AuS}_2]^{3-}$ 、 $[\text{Au}_2\text{S}_3]^{4-}$ 、 $[\text{AuSb}]^{2-}$ 以及 $[\text{Au}(\text{AsS}_3)]^{2-}$ 、 $[\text{Au}(\text{SbS}_3)]^{2-}$ 等硫代亚砷酸络合物的生成，对金的迁移富集起着非常作用。

Au^{3+} 化合物大都为强氧化剂。 Au^{3+} 的氢氧化物 $\text{Au}(\text{OH})_3$ 可以将碱金属氢氧化物加入氯金酸盐 ($\text{Na}[\text{AuCl}_4]^-$) 溶液中获得。

Au^+ 、 Au^{3+} 常与 Cl^- 、 $[\text{HS}]^-$ 、 S^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 Br^- 、 I^- 、 CN^- 、 $[\text{CNS}]^-$ 等形成易溶络合物。

金与卤族元素在加热条件下反应生成金的一价或三价卤化物，如 AuF_3 、 AuCl_3 或 AuF 、 AuCl 。金与卤族元素结合的倾向性按 $\text{Cl}^- \rightarrow \text{Br}^- \rightarrow \text{I}^-$ 顺序增强。

一价金的卤化物可溶于相应的氢卤酸或碱金属卤化物溶液，形成 $\text{H}[\text{AuCl}_2]$ 或 $\text{Na}[\text{AuCl}_2]$ 等络合物，然后分解为 $\text{H}[\text{AuCl}_4]$ 或 $\text{Na}[\text{AuCl}_4]$ ，其反应式如下：



金的主要化合物溶解度

表1-4

化 合 物	在水中的溶解度 g/100ml (25°C)	在其他试剂中的溶解度
Au	不溶	溶于王水、KCN、热H ₂ SO ₄ 、不溶于一般单酸、强碱
AuBr	不溶	在一般酸中离解、溶于NaCN
AuBr ₃	微溶	
AuCl	极微溶	溶于HCl、HBr
AuCl ₃	68	
AuCN	极微溶	溶于KCN、NH ₄ OH；不溶于强碱
HAu(CN ₄)·3H ₂ O	极易溶	
AuI	极微溶	溶于KI
AuI ₃	不溶	溶于碘化物
H[Au(NO ₃) ₄]·3H ₂ O	可溶、离解	溶于HNO ₃
Au ₂ O ₃	不溶	溶于HCl、浓HNO ₃ 、NaCN
Au ₂ O ₃ ·xH ₂ O	5.7×10^{-11}	溶于HCl、NaCN、浓HNO ₃
Au ₂ P ₃	不溶	不溶于HCl、稀HNO ₃
Au ₂ Se ₃	不溶	
Au ₂ S	不溶	溶于王水、KCN；不溶于一般酸
Au ₂ S ₃	不溶	溶于Na ₂ S
AuTe ₂	不溶	



Au(II)的卤化物较Au(I)卤化物稳定；AuCl₃溶于水，AuBr₃溶于水，AuI₃不溶于水。Au³⁺与相应的氢卤酸、碱金属卤化物反应可生成可溶性H[AuCl]、Na[AuCl]、K[AuCl]等络合物。

金的氢氧化物具有两性：AuOH是一种弱碱，而Au(OH)₃也是一种弱酸。总的说来，其酸性比碱性稍强，称**金酸**，它可溶于碱中生成金酸盐，例如NaAuO₂、KAuO₂。它与酸作用生成金盐。

亚铁盐、Na₂S、H₂S、SO₂、木炭、离子交换树脂、草酸、甲醛、葡萄糖等有机物均可还原金的化合物而沉淀出金。

有关金的主要化合物溶解度和金的热力学数据见表1-4、1-5。

第二节 金在地壳中的丰度

一、金在地壳中的克拉克值及其浓集系数

金是一种极分散的元素，它在地壳中的含量极低。地壳中金元素的克拉克值为：(1) 维诺格拉多夫算得 $4.3 \times 10^{-7}\%$ (丰度值4.3ppb)；泰勒算得 $4 \times 10^{-7}\%$ (丰度值4ppb)，费尔斯曼算得 $5 \times 10^{-7}\%$ (丰度值5ppb)。以上所列地壳中金元素的丰度值据大陆岩石样品分析所得出，忽略了占地球表面积71%的海洋地壳。我国学者黎彤等算得金在地壳各单元的丰度为：深洋区4ppb、浅洋区2.9ppb、地盾区3.4ppb、褶皱区3.8ppb、洋壳3.5ppb、陆

金的热力学数据表 表1-5

化学分子式	物态	ΔH	ΔF°	S°
Au ⁰	c	0.0	0.0	47.3
Au(I)	aq		163.0	
Au(II)	aq		433.0	
Au ₂ O ₃	c	80.7	163.0	125.4
H ₂ AuO ₃ ⁻	aq		-191.4	
HAuO ₃ ²⁻	aq		-115.4	
AuO ₃ ³⁻	aq		-24.2	
Au(OH) ₃	c	-418.0	-289.7	121.2
Au(OH) ₂	aq		-258.3	
AuCl	c	-35.1	-17.6	100.3
AuCl ₃	c	-118.3	-48.5	146.3
AuCl ₃ ·2H ₂ O	c	-700.9	-515.4	225.7
AuCl ₄	aq	-325.2	-234.9	254.9
AuBr	c	-18.4	-15.5	112.9
AuBr ₂ ⁻	aq		-113.3	
AuBr ₃	c	-54.3	-24.7	100.3
AuBr ₃	aq	-38.5		
AuBr ₄ ⁻	aq	-190.2	-159.3	313.5
AuI	c	0.8	-3.2	119.1
Au ₂ P ₃	c	-100.7		
Au(CN) ₂ ⁻	aq	244.1	269.2	123.3
Au(CNS) ₂ ⁻	aq		241.2	
Au(CNS) ₄ ⁻	aq		543.8	

注： ΔH° —25℃时标准生成热(kJ)
 ΔF° —25℃时标准生成自由能(kJ)
 S° —25℃时物质生成热力学熵值(J/K)
 c—晶体
 aq—在水溶液中

IB族元素原子结构参数表 表1-6

元素	原子序数	中子数/质子数	原子量	地壳丰度(ppb)
铜	29	1.2±	63(65)	63000
银	47	1.3±	107(109)	75
金	79	1.5	197	3.5

(据黎彤, 1965)

金的克拉克值高低影响金在地壳中的迁移富集和分散等地球化学行为, 因为在同样成矿条件下, 金丰度高的地区一般更容易富集成矿, 成矿条件再好, 若无矿质来源也无法成矿。

壳3.5ppb、地壳3.5ppb。

据统计, 金在地球中的总量为 $48 \times 10^{14}t$, 它在地球中分布是极不均匀的: 地核铁镍物质中, 金的平均含量为0.005%(50g/t), 含金量占地球总含金量的98.4%, 为68100亿吨; 地球过渡带硫化物圈中, 金的平均含量为0.5~1g/t, 其含金量占地球总含金量0.48%; 地壳中, 金平均含量为0.0035g/t, 含金量达960亿吨; 在海水中, 金平均含量为0.001~0.04 mg/m³。

金在地壳中的丰度很低, 金的地壳丰度值为0.0035g/t(3.5ppb)(黎彤, 1965年), 它仅相当于银的1/21, 铜的1/18000, 铂的1/13, 汞的1/25。在贵金属元素中, 金的地壳丰度最低, 远低于其他有色金属。

金的地壳丰度极低的原因决定于金本身的地球化学性质, 由于金是亲铜元素, 又具有较强的亲铁性, 因此在地球分异演化过程中向地球内部铁镍地核富集, 几乎极大部分金都进入了地核部分。根据黎彤的计算, 地球各个层壳中金的丰度随着深度的增加而增高: 地壳5.5ppb、上地幔5ppb、下地幔5ppb、地核2600ppb。造成金

的地壳丰度低的另一个原因是由于金在周期表中的位置和金元素的原子构造特点所决定的, 随元素原子核内部构造的复杂程度加大, 元素的丰度减少。金在周期表中位于IB族中, 其原子核内构造更复杂, 所以金的地壳丰度远比同族元素铜、银低(表1-6)。

金及有关元素的浓集系数对比表

表1-7

元 素	克拉克值 (%)	最低可采品位 (%)	浓集系数
Fe	5~6	30	5~6
Cu	1×10^{-2}	0.5	50
Zn	5×10^{-3}	3	600
Pb	1.6×10^{-3}	1	625
Ag	1×10^{-5}		2000
Au	4×10^{-7}	0.0003	750
		0.0002	500
		0.0001	250

(据陈光远, 1985)

金在陨石中的平均含量表

表1-8

陨 石 类 型	样品数	金的平均含量 (ppm)	
球 粒 陨 石	碳质球粒陨石	16	0.17
	顽火球粒陨石	9	0.34
	LL群球粒陨石	6	0.16
	L群球粒陨石	40	0.18
	H群球粒陨石	24	0.22
无球粒陨石	贫钙无球粒陨石	4	0.012
	富钙无球粒陨石	26	0.0145
铁 陨 石	140	1.15	

(据魏德波尔, 1974)

金的浓集系数,就是用金的克拉克值除其最低可采品位所得商数。金的浓集系数与铅、锌相当,而远低于银(表1-7)。金与银虽然同为贵金属,但在成岩、成矿作用中金分散度远比银高,故与银相比较,金可在更广泛的地质物理化学条件的范围内分散而不成矿,或在更广泛的地质物理化学条件的范围内集中,形成更多成因类型的矿床。通过元素浓集系数的比较可以发现,各种元素在地壳中倾向集中的能力相差很悬殊。例如,Fe的浓集系数为5~6,说明铁在形成矿床时也只不过比克拉克值富集5~6倍。但是许多稀有元素都有极高的浓集系数,铜的浓集系数高于铁10倍,铅、锌高于铁约100倍,说明铜、铅、锌等有色金属不象铁那样易分散于造岩矿物中,而比较容易在成矿作用中富集。银的浓集系数

高于铁近400倍,故它只在成矿作用某阶段富集,一般只富集于中低温热液矿床及其表生带。

与上述其它元素相比,金在地壳中的含量最低,若金的最低可采品位为 1g/t ,它的浓集系数降为250,只比铁高出40~50倍,它既可随铁富集,又可随铁而分散。它们的相似性可使两种元素的矿床互相重叠,它们的差异性又使金矿床远远超出铁矿床或铁矿带的范围,与后者毫无成因上或空间上的联系(表1-7)。

二、金在地壳物质中的分布

金在地壳中分布是比较均匀的,表现在各类岩石中金的平均含量和地壳各构造单元中金的平均含量均在同一数量级范围内。金在地壳物质中均匀分布的原因,可能与金主要呈原子状态产出有关。金可呈微粒状态散布于各种造岩矿物及其间隙中。例如,在橄榄石、辉石、角闪石、云母、长石、石英等造岩矿物中以及磁铁矿、电气石、榍石等副矿物中,都普遍含有微量金,其平均含量多近于 10^{-3}g/t 的数量级;因此,金在各类岩石中的含量也属于同一数量级。

(一) 金在陨石中的分布

据大约275个陨石样品中金的分析资料,各类陨石中金的平均值从 0.012ppm (球粒陨

岩浆岩中的平均含量表

表1-9

岩石类型	岩石名称	金平均含量 (ppb)	
深成岩	花岗岩	1.7	
	花岗闪长岩	3.0	
	长英岩 (花岗岩及云英岩脉)	4.2	
中性岩	闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩	3.2	
基性岩	辉长岩 (辉长-闪长岩)	4.8	
超基性岩	纯橄岩、橄橄榄岩	6.6	
火成岩及浅成岩	酸性岩	流纹岩、英安岩、糜细岩、黑曜岩	1.5
	中基性岩	玄武岩、安山玄武岩、安山岩 粗面安山岩	3.6

(根据美国地球化学手册)

岩浆岩中金的平均含量

一般都从超基性岩、基性岩、中性岩到酸性岩有规律的降低 (表1-9)。某些超基性岩,特别是纯橄岩、辉橄岩中平均含金量最高21.3ppb (莫伊森科, 1971年)。花岗岩中含金最低, 只有1.7ppb (华南花岗岩类中金的丰度为1.4~3.3ppb)。金在不同岩类中的分布情况均反映出金的亲铁性。暗色侵入岩分异过程中金的含量与岩石中铁的含量有关。岩浆从超基性岩向酸性岩演化过程中, 金含量递减。在地球的岩浆岩中, 从酸性岩到超基性岩, 从地壳至地核, 金含量向地球深部递增, 说明金质来源是深源的。

根据谢尔巴科夫的意见, 金的化学键性特点表明, 金有利于进入离子键程度最小的网状结构的铁镁硅酸盐。金以类质同象存在其含量最高的矿物是辉石及相应的超基性岩、基性岩。

金矿化与岩浆作用关系的研究表明, Au的主要携带者乃是玄武岩、基性、超基性岩。

据A. A. 马拉克谢夫的看法, 岩浆向酸性演化和它有关的成矿流体, 其成分演化顺序是 $H_2S-HCl-NH_3-SO_2-H_2O-P_2O_5-HF-Li_2O-B_2O_3$ 。岩浆演化至后期超酸性钾质花岗岩, 系列末端挥发组分越占优势。金和前几种流体组分亲和力强, 组成稳定络合物, 有利于金的迁移富集。因此, 金矿床一般与花岗岩类岩浆作用早期和中期形成的中酸性闪长岩、花岗闪长岩、斜长花岗岩等有关。

金在高温还原条件的岩浆中, 不能富集成矿床。但在岩浆分异充分, 挥发组分相对富集的条件下, 金是分散自然元素状态产出。在重力分异下, 金可在岩浆熔体底部迁移, 与硫化物一起形成伴生金矿。如基性超基性岩中的铜镍金矿床。例如青海德尔尼岩浆熔离硫化物金矿床、加拿大肖德贝里铜镍硫化物矿床。

(三) 金在变质岩中的分布

金在变质岩中的分布广泛, 金含量变化范围也较大。根据魏德波尔的资料, 金在主要变

石)到1.15ppm (铁陨石)。富钙和贫钙无球粒陨石中 Au 的平均含量十分相近 (分别为 0.012、0.0145ppm), 含量都很低。铁陨石含金最高, 约为顽火辉石球粒陨石中的3倍, 碳质球粒陨石中的6倍, 表明金的亲铁性较强 (表1-8), 金在地壳分异演化过程中向地球内部富集。金矿物质来源是深源的理论可从陨石含金资料得到证实。

(二) 金在岩浆岩中的分布

各类岩浆岩中金的含量大约为1.5~6.6ppb。不论深成岩或火山岩中金的平均含量一

质岩中的平均含量见表1-10。在泥板岩、板岩、角岩、片岩、片麻岩及变质碳酸盐岩中，含金量平均为1~5ppb，其中角岩含金量较高：8.5ppb，次为石英岩：5ppb。表明区域变质中，绿片岩相含金量明显增高，接触变质带内角岩含金量高于岩体。据吉林夹皮沟三道沟组变质岩分析测试资料表明，角闪岩、斜长角闪岩和斜长角闪片麻岩中金的含量较高，平均为117ppb。随岩石混合岩化程度增高，含金量显著降低，条痕状混合岩中含量为18ppb，均质混合岩为3ppb，混合花岗岩仅2ppb（表1-11）。

（四）金在矿床矿物中的分布

金在矿床矿物中含量较高，尤其是硫化物中金含量最高，在不同类型矿床矿物中金含量

我国吉林变质岩含金量 表1-11

岩石类型	金含量 (ppb)
角闪岩、斜长角闪岩、斜长角闪片麻岩	117
条痕状混合岩	18
均质混合岩	3
混合花岗岩	2
结晶灰岩	100
粉砂质岩类	140
含碳泥质岩类	100
硅质板岩	580

（据吉林冶金地质勘探公司，1979）

又有较大的变化。铁的硫化物中含金性顺序为：毒砂>黄铁矿>磁黄铁矿>白铁矿>镍黄铁矿。多金属硫化物中金含量：黄铜矿>闪锌矿>方铅矿。脉石矿物、浅色矿石矿物中金含量：石英、玉髓>白钨矿>铁白云石>白云石。蚀变矿物中金含量：高岭石、含水高岭石>伊利石。针铁矿、褐铁矿在风化带中含金量低于蚀变带中的含量。产生以上矿物中金含量排列顺序规律，主要原因在于硫在周期表中比硫更接近于金，铜与金同属铜族元素，溶解、搬运石英的碱度高于白钨矿、白云石、伊利石、高岭石等蚀变矿物的碱度也高于针铁矿与褐铁矿（表1-12）。

第三节 金在成矿作用中的主要地球化学性质

一、金的亲铁性

金是强烈亲铁元素。金的亲铁性表现在：地球中的金主要富集于地核中，地核的铁镍核心含金为地壳硅酸盐成分的650倍；铁陨石含金为球粒陨石的5倍，为无球粒陨石的180倍，为玻陨石的200倍。球粒陨石中金属相又为非金属硅酸盐相的100多倍（表1-13）。

岩浆岩中镁铁岩类含金比硅铝质岩高数倍，镁铁矿物比硅铝矿物高数至数十倍，磁铁石英岩、铁白云石大理岩也含较高的金。例如磁铁矿含金达0.048g/t，辉石含金0.016g/t，橄榄石含金0.014g/t。我国夹皮沟金矿磁铁矿含金达20g/t。

主要变质岩中金的平均含量表

表1-10

岩石类型	金的平均含量 (ppb)
泥板岩、板岩	1.0
角闪岩	8.5
片岩	2.2
片麻岩	3.9
石英岩	4.9
碳酸盐类岩石	1.5

（据魏德波尔，1974）

金在矿石、脉石、蚀变及风化矿物中的分布

表1-12

矿物名称	金最高含量 ppm	金平均含量 ppm	样品数	出现最高金含量的矿床类型
毒砂	(600)	—	—	热液矿床
黄铁矿	398 (2235.29)	0.5~211	445 (1)	含金石英脉(斑岩金矿)
胶状黄铁矿	(350.6)	—	(1)	斑岩金矿床
辉钨矿	(120)	(110)	(62)	钨钨金矿床
磁黄铁矿	54	0.08~12.6	34	铜镍硫化物矿床
黄铜矿	32 (748)	0.07~22 (40)	131 (—)	铅锌矿(热液矿床)
方铅矿	(45.65)	0.6~12	22 (1)	矽卡岩金铜矿
闪锌矿	—	1.3~23	8	含金石英脉
白铁矿	(16.85)	(6.03)	(3)	斑岩金矿
镍黄铁矿	9.4	2.0	5	铜镍硫化物矿床
雌黄	(7.758)	—	(1)	钨钨金矿床
石英	(154.38)	—	(1)	斑岩金矿
白钨矿	(24)	—	(1)	钨钨金矿床
铁白云石	(24.6)	—	(1)	斑岩金矿
白云石	(5.8)	—	(1)	斑岩金矿
伊利石	(15.67)	—	(1)	钨钨金矿床
高岭石	(44)	—	(1)	汞金矿床
水高岭石	(44)	—	(1)	汞金矿床
针铁矿	(0.63)	—	(1)	斑岩多金属矿床
褐铁矿	(10)	—	(1)	汞金矿床
针铁矿—褐铁矿	(10)	—	(1)	汞金矿床
铬铁矿	5.4	3.4	4	橄榄岩

(据陈光远; 1985)

金在陨石及地球中的分配(ppb)

表1-13

测试对象	分析个数	含量范围	算术平均值	几何平均值	文献
球粒陨石(世界)	246	17.0~1600.0	222.5	199.8	
球粒陨石金属相(世界)	52	448.0~2900.0	1508.5	138.4	
球粒陨石非金属相(世界)	47	0.4~91.0	19.9	12.5	Boyle
无球粒陨石(世界)	11	0.5~280	31.0	5.3	R.W.
铁石陨石(50%Fe)(世界)	7	40.0~2000.0	914.3	531.8	(1979)
铁陨石(世界)	291	55.0~8744.0	1205.0	959.7	
陨硫铁(硫化物相)(世界)	16	70.0~8000.0	928.7	412.8	
玻陨石(世界)	15	0.3~24.2	8.1	4.0	
地核			2600.0		
地幔			5.5		黎彤
地壳			4.0		(1976)
地球			300		