

第一篇

金的勘查地球化学原理

金在自然界各种介质中的含量分布、内外生存在形式、分散与迁移和地球化学异常模式构成了金矿勘查地球化学的理论基础。矿产勘查地球化学就是要利用研究元素含量的分布和变化,发现异常,建立模式,进行解释推断来寻找矿床。所以含量的研究可以为勘查地球化学提供基础的参考数据和异常解释依据;元素的存在形式、分散与迁移规律的研究是对所发现的现象或地球化学模式进行合理解释推断的基础;而金的物理化学性质又支配着金在自然界中的存在形式、分散与迁移方式;合理的采样原则是合理而有效的发现含量的分布特征和地球化学模式的前提。因此,金的物理化学性质、含量分布、存在形式、分散与迁移、异常模式和采样原则构成了金矿勘查地球化学的基础理论要素。

尽管对金地球化学的研究,特别是含量分布的研究,在 19 世纪中叶德国地质地球化学家 K.G.毕晓夫在他出版的三卷集著作《化学地质与物理地质学教程》(Bischof, 1855)中第一次整理了金的地球化学资料,对金的分布和性状做了很好的总结。但文中并没有给出有关金含量分布的数据。直到 19 世纪末,由于金分析方法的改进,才有了金含量分布的研究资料。F.W. 克拉克于 1908 年在他最伟大的著作《地球化学数据》中第一次有了地球化学元素含量的系统记录(Clarke, 1924)。在有关金属矿床一章中,他对金的地球化学做了当时完善的总结,并首次给出了金的含量分布数据。之后 A.E. 费尔斯曼于 1939 年在他的巨著《地球化学》的第四卷(Fersman, 1939)中更详细地总结了金的地球化学性质,并首次总结讨论了金的内外生迁移与沉淀机理。V.M. 戈尔德施密特于 1954 年出版了《地球化学》一书(Goldschmidt, 1954),作者在书中详细地讨论了金在岩石中的含量分布、金的结晶化学、金在风化和成壤中的行为,以及利用金银比值和硅铁比值计算了金在地壳中的丰度。但自 20 世纪 50 年代以后的近 20 年中,由于对金兴趣和对金矿开采在世界范围内的下降,几乎没有发表有关金的地球化学的论著。进入 20 世纪 70 年代末期,黄金价格的上涨刺激了金矿业和研究工作的再度振兴(Boyle, 1979)。从而有了两部有关金的地球化学专著的出版,一本为前苏联的彼德洛夫斯卡娅(1973)所著《自然金》,另一本是加拿大 Boyle(1979)所著《金的地球化学与金矿床》。前一本书由于语言的障碍,中国的读者几乎很少了解。其实书中内容相当丰富,有关于金的分析、金的溶解和迁移、金的分布与克拉克值以及金的内外生循环的系统阐述。Boyle 所著《金的地球化学与金矿床》一书在我国流行甚广,广泛被中国学者所引用,这是目前有关金的地球化学最权威的一部著作。

金地球化学研究历史中的各个阶段,都与分析技术的进步密不可分。利用火试金光谱分析金的检出限可达 $0.1 \sim 0.02 \mu\text{g/g}$ (普拉科逊, 1958)。利用预富积光谱分析和原子吸收分析,检出限可达 0.1 ng/g (陈绍仁, 1980)。而利用中子活化分析,金的检出限可达

0.01 ng/g(文森特等,1960)。近些年,利用激光单原子分析,已将金分析的检出限逼近到 pg/g 级(惠秦等,1992;王学求等,1993)。

这些高灵敏测试技术的使用可以使我们对金的含量,不仅是全量,还包括偏量,以及存在形式有了更进一步的了解。并且也不断地对金的地球化学数据和理论做出补充和修订。因此作者在这一篇里,主要将引用自 1979 年 Boyle 的著作《金的地球化学与金矿床》发表以后,特别是近些年,所积累的大量事实与数据,并结合前人的研究成果对金在自然界中的含量分布、存在形式、分散模式做出补充和修改,以便为现代金矿勘查地球化学提供更详实可靠的基础资料和更趋完善和适用的理论基础,同时对采样理论进行讨论。

第一章 金的地球化学概述

第一节 金的名称的起源

金可能是被人类所利用的第一种金属,由于它可以在砂矿中以自然金产出,因而不需要复杂的分离技术就能够将其分离出来。它的开采历史可以追溯到 6 000 年以前。在文明古国埃及、中国和印度,黄金很早就被用作装饰品和首饰。

金的名称“gold”来源于梵语“Jvalita”,由“jval”引申而来,意思是“发光”。其英文名称“gold”这个词可能是来源于古日耳曼语词根“ghel”,等于“gelb”黄色的意思,或“gulth”发光或闪光的金属。金的元素符号(Au)来源于其拉丁语名称“aurum”的缩写。

按照百科全书的定义,金就是一种黄色的金属。但不同的人却赋予了它不同的含义。对于地质学家它是从地壳中要寻找的有经济价值的贵金属矿床;对地球化学家它是具有错综复杂地球化学行为的稀有金属;对于经济学家和金融学家它是一种价值尺度;对于工程师它是现代电子工艺所广泛应用的一种必不可少的材料;对于珠宝商它是一种具有永久魔力可以赚钱的手段;对于女性它是戴在身上华贵而漂亮的饰物。

金是一种软的黄色金属,具有强烈的金属光泽,在所有的金属中无疑是最美丽的。密度大(19.32 g/cm^3)、熔点高($1\,063^\circ\text{C}$)、导电性和热导性在所有金属中仅次于银和铜(表 1-1-1)。是所有金属中延展性和柔韧性最高的,1 克的纯金可以拉成 25 km 长的金丝。金的标准蒸气压在 1 300 K 时为 0.001 Pa。升华热在 298 K 时为 $366.7 \pm 0.9\text{ kJ/mol}$ 。正是有了这些特性,自远古以来,金就是所有元素中最受人类珍爱的。起初用于珠宝首饰和装饰艺术品,大约在公元前 700 年用作交换手段的货币,而更近代和现代黄金除了它传统的装饰和货币作用外,还被广泛地应用于生产工艺和高科技材料领域。

表 1-1-1 金的特性
Table 1-1-1 Gold property

金 gold(英语) aurum(拉丁语) jvalita(梵语)	
元素符号	Au
密度	$19.32\text{ g/cm}^3(20^\circ\text{C})$
熔点	$1\,063^\circ\text{C}$
沸点	$2\,660^\circ\text{C}$
原子序数	79
相对原子质量	196.97
价态	0, 1, 3

(续表)

金 gold(英语) aurum(拉丁语) jvalita(梵语)	
原子半径	0.14 nm(8), 0.144 nm(12)
离子半径	0.137 nm(+1), 0.085 nm(+3)
电负性	2.4
电离势	0.73 eV(+1), 3.3 eV(+3)
外层电子排布	5d ¹⁰ 6s ¹
天然同位素	¹⁹⁷ Au

正是由于它的自然魔力和永恒的价值,吸引人们顶严寒、冒酷暑,远涉重洋,跨越崇山峻岭,穿越戈壁沙漠、茂密森林,更有一些不愿忍受恶劣自然条件的人——炼丹术士,想在家里“制造”金子。尽管炼丹术士企图利用调制配料和药剂来制造金子的梦想最终破灭,但他们无数次的试验却奠定了现代化学的基础,在化学的产生和发展过程中起着决定性的作用。因此在某种意义上说,对黄金的渴望大大影响人类的历史。

第二节 金的地球化学概述

金位于元素周期表上第6周期IB族,这一族里还有铜和银。金的原子序数79,相对原子质量196.97,密度19.32 g/cm³(20℃),熔点1063℃,化合价0、1、3,原子结构为1s²2s²2p⁶3s²3p⁶3d¹⁰4s²4p⁶4d¹⁰4f¹⁴5s²5p⁶5d¹⁰6s¹。由于外电子层具有充满的5d电子亚层,所以5d轨道上的电子不易失去,而6s电子由于4f的屏蔽作用很微弱和电子的钻穿效应,6s亚层电子也不宜丢失,故金的电离能和电负性很大。这就决定了金主要以自然元素状态产出。

金通常有下列三种氧化态: Au(0)(自然金), Au(I)(一价金), Au(III)(三价金)。Au(II)(二价金)和 Au(V)(五价金)这两种氧化态金也发现存在某些复杂结构中(Bergendahl, 1975)这两种相对都不稳定,在自然界中并不存在。

Au(0)自然金是各种金属中化学惰性最强的,既不受水和大多数酸的影响,也不受氧和硫酸的腐蚀。但在存在氧化剂条件下,能很容易与卤素溶液发生反映,如王水,生成络合物。金在有空气存在时很容易在碱金属的氧化物中溶解,而很难在碱金属的硫化物中溶解。易溶于含有MnO₂之类氧化剂的硫酸溶液和盐酸溶液中。金可以与汞形成一种叫做金汞齐的化合物。

自然金虽然有最强的化学惰性,这种很强的化学惰性决定了它在自然界中主要以自然金状态产出,但这并不意味着自然金就是不活泼的,近些年的研究发现当它呈胶体形式和超微细粒弥散形式存在时具有很强的活动能力。这种呈超微细的亚微米和纳米级颗粒的很强活动性的事实已经被发现,但它的机理我们目前还无法认识,可能是金属小到了纳米级一切性质都发生了本质的变化。

Au(I)和Au(III)的化合物中电子构型分别为d¹⁰和d⁸,并且由于氧化电位高,所以主要显示共价性,这表现在天然化合物碲化物和碲化物就是如此。由于氧化电位高,在水中是不稳定的,金的水化学基本上就是络离子化学。它们络合物的稳定性随着配位基原子电负性的增高而降低。例如卤族元素的电负性是F > Cl > Br > I,金的卤素络合物稳定性

依次是 $I > Br > Cl > F$ 。同样金与 VA 和 VIA 族原子形成络合物的稳定顺序依次是 $Bi > Sb > As$ 和 $Te > Se > S > O$ 。这就说明了为什么金的碲化物、锑化物和铋化物足够稳定，能呈矿物在自然界中产出。而我们却找不到天然存在的金的硫化物、氧化物和砷化物。

金有许多在水溶液中稳定的络合物，常见的有 $AuCl_2^-$ 、 $AuCl_4^-$ 、 $Au(CN)_2^-$ 、 $Au(S_2O_3)_2^{3-}$ 和 $Au(OH)_4^-$ 。除此之外金还可以形成许多有机化合物和螯合物。

金能以三价和一价离子存在于水溶液中，但这两种离子态金具有很高的离子电位， Au^+ ，9.2 eV； Au^{3+} ，30 eV。所以它们在水中极不稳定，可以与水中各种络合剂形成络合离子。

传统上，人们将金看做在表生条件下是不溶的金属，呈机械形式搬运。进入 19 世纪人们发现许多现象与这一传统的机械搬运的观点不符。例如，发现有大量的实例表明砂金矿与其供应源有相当大的距离，这和金的机械搬运的事实不符；在砂金中的块金或狗头金比原生金颗粒要大得多，这说明金经历了次生加大；一些次生金的纯度要比原生金高，说明金在搬运过程中，经历了溶解改造；许多次生金具有明显的胶体晕圈结构，并且从颗粒内心到边缘所含的物质成分存在差异，证明金经历了重新溶解、搬运和沉淀。一系列的试验证明金具有可溶性，并在环境改变时重新沉淀下来。Landsweert(1869)用试验证明金在存在有机物的还原条件下能从稀的含金卤化物中沉淀出来。随后 Clarke(1908)强调 Cripple Creek 金矿中的金能被铁的硫酸盐、氯化钠和硫酸溶解，并在有机物存在的条件下重新沉淀。Smith(1943)和 Krauskopf(1951)都用试验证实金在低 pH 值和低温下能在氯化钠溶液中溶解和沉淀。这些发现和试验都表明金在表生条件下具有可溶性，可以呈化学形式分散；打破了长期以来金是惰性的理论，为现代勘查地球化学奠定了理论基础。

金在水体系、Cl 体系和 S 体系的 Eh - pH 值的动力学行为如图 1-1-1 所示。

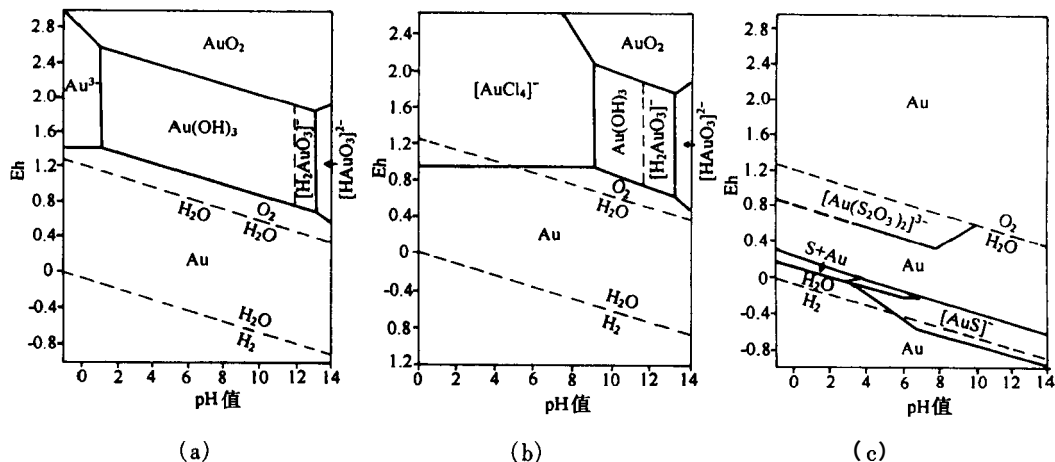


图 1-1-1 金在水体系、Cl 体系和 S 体系的 Eh - pH 值图

(Boyle, 1979)

Fig.1-1-1 Eh - pH of Au in H_2O , Cl and S solution

(a) Au - H_2O 体系, 25 °C 和 1 大气压, 金浓度 10^{-4} mol/L。 (b) Au - H_2O - Cl 体系, 25 °C 和 1 大气压, $Au(III)$ 浓度 10^{-2} mol/L, Cl^- 2 mol/L。 (c) Au - S 体系, 25 °C 和 1 大气压, S 浓度 10^{-1} mol/L。

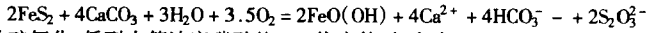
许多研究者认为金在表生环境中的活动性、溶解、迁移与沉淀取决于硫的络合物、氯的络合物和有机络合物(Butt, 1989; 表 1-1-2)。

表 1-1-2 金的溶解与沉淀机制(Butt, 1989)

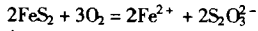
Table 1-1-2 Gold solution and precipitation mechanisms

硫的络合物

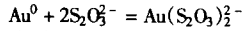
黄铁矿氧化:在高浓度碳酸盐和碱性,中等氧化还原电位



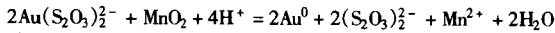
黄铁矿氧化:低到中等浓度碳酸盐,pH 值中等,氧存在



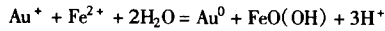
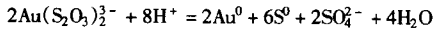
金溶解:



金沉淀:氧化和酸性条件下

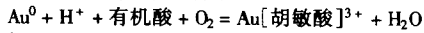


金沉淀:还原,酸性条件下

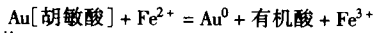


有机络合物

金溶解:在中酸性,氧化条件下

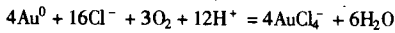


金沉淀:还原环境

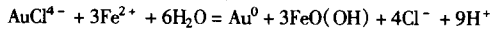


氯的络合物

金溶解:酸性,氧化,含盐条件



金沉淀:稀释,碱性或还原条件



上述化合物尽管在金的溶解与搬运作用中起着重要的作用,但生物作用对金在表生条件下的溶解和迁移可能起着某种直接或间接的作用。生物体的死亡分解可以产生各种有机质,而有机质可以溶解金;同时生物体,如植物和微生物可以在代谢过程中直接吸收金,使金转化为另外的形式。在各种化合物或生物对金的溶解和转化过程中,金颗粒的大小可能是至关重要的因素之一。极细的颗粒金易于溶解,而相对粗颗粒金却比较稳定,不易被溶解与迁移。根据近年来的研究,金的搬运不一定需要上述化学溶解过程,可能超微细状态的金本身具有极强的活动能力,可以呈 Au^0 迁移,并在适当的条件下沉淀。

金在自然界的相互转化过程和循环见图 1-1-2。这一循环和转化过程只概括了 $\text{Au}(0)$, $\text{Au}(\text{I})$ 和 $\text{Au}(\text{III})$ 之间的转化。事实上这三种形式金的转化是极其复杂的,可以从原生到次生,从深部至浅部,固体—液体—气体之间,岩石—土壤—植物之间相互转化等。

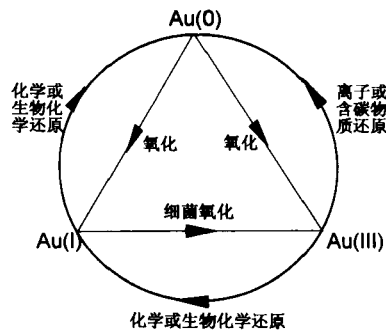


图 1-1-2 金在自然界中的相互转化和循环

(Boyle, 1979)

Fig.1-1-2 Cycle of gold interconversion in nature

第三节 金矿物简介

在自然界,金主要以自然金产出,或与银、铜和铂族元素形成天然合金。也有几种与碲和锑形成的化合物,最常见的是针碲金矿、碲金矿、碲金银矿和方锑金矿。金的各种最常见的矿物如表 1-1-3 所列。

表 1-1-3 常见的金矿物

Table 1-1-3 Gold minerals

矿物名称	化学式	颜色	硬度	密度
金(gold)	Au	金黄色	2.5~3	19.3
银质金(electrum)	AuAg	黄色	2.5~3	12~19
碲金矿(calaverite)	AuTe ₂	淡黄至银白色	2.5	9.4
白碲金银矿(sylvanite)	(Au, Ag)Te ₂	银白	1.5~2	8~8.2
叶碲矿(nagyagite)	Pb ₅ Au(Te, Sb) ₄ S ₃₋₈	深灰色	1~1.5	6.8~7.2
针碲金银矿	(Au, Ag)Te ₄			
方锑金矿	AuSb ₂			
硒金银矿	Ag ₃ AuSe			
铜质金	AuCu			
钯质金	AuPd			
铑质金	AuRh			
铱质金	AuIr			
铂质金	AuPt			
铋质金	AuBi			

金的主要矿石矿物是自然金、方锑金矿和各种碲金矿。自然金能结晶成各种形状,常见的有粒状、鳞片状、网状、树枝状、线状、海绵状等。金的颗粒大小变化很大,一般从小到不足千分之几 g,大到数十 kg。砂金通常呈圆状或片状,大的被称作“狗头金”。世界上最大的狗头金,名字叫“受欢迎的陌生人”,重达 70.8 kg,体积 17 cm×40 cm×70 cm,于 1869 年发现于澳大利亚的维多利亚。我国迄今为止发现的最大块狗头金重 2.16 kg,于 1963 年发现于湖南。自然金的纯度是用成色来表示的,一般规定成色就是用千分数表示试样中纯金占的比例,如 900 成色即意味着纯金占 90%,但更通常使用的是以 K 为单位的 24 分法表示,如 24K 即纯金,含金 100%,18K 含金 75%。有些矿床自然金是相当纯的,但更普遍的是含有银、铜等元素。微量金也可以呈包裹体和晶格形式分散在造岩矿物中。

第四节 金矿床的主要类型

金矿床可以在广泛的热液条件下形成原生金矿,并能通过表生作用再度富积形成砂金矿。因此,金矿床的类型是相当广泛的。金矿床的分类比较流行的主要有建立在成因基础上的分类和建立在地质环境和地球化学环境基础上的分类。如中国地质学会矿床地质委员会贵金属专业组使用的是前一种分类方案(表 1-1-4),而以 Boyle 为代表的地球化学家使用的是后一种。

表 1-1-4 中国金矿床成因分类
Table 1-1-4 Categories of gold deposits

大类	类型	亚类
内生	岩浆—热液	重熔岩浆—热液
		混合岩化—重熔岩浆—热液
	火山—热液	潜火山—热液
		火山—热液
	沉积—变质	硅铁建造变质—热液
	变质—热液	古老绿岩系—热液
		含碳质碎屑岩系—热液
	地下热卤水溶滤	碳酸盐岩系—热水溶滤
		碎屑岩系—热水溶滤
外生	风化壳	残余金矿床
		残坡积砂金矿床
	表生风化沉积再生富积	冲击砂金矿床
		洪积砂金矿床
		岩溶砂金矿床
		冰积砂金矿床
		砾岩砂金矿床

据中国地质学会矿床地质委员会贵金属专业组,引自《中国矿床》经简化。

Boyle 的金矿床分类:

(1)含金的斑岩岩墙、岩床和岩株 含金的粗粒花岗岩体、细晶岩和伟晶岩。

(2)含金的夕卡岩型矿床。

(3)产在火山岩地层裂隙、断裂、剪切带、叠席带和角砾岩中的金—银和银—金矿脉、网脉、岩筒和不规则的硅化矿体。

(4)产在沉积岩层的断裂、裂隙、层理面不连续带和背斜上的剪切带、拖曳褶皱、压碎带和裂隙中的含金矿脉、矿络、叠席脉和鞍状矿脉;以及化学性质有利的岩层中断裂和裂隙附近的交代型板状矿体和不规则矿体。

(5)产在由沉积岩、火山岩和各种火成侵入岩和花岗岩化岩石组成的复杂地质环境中的金—银和银—金矿脉、矿络、网状脉、硅化带等。

(6)火成岩、侵入岩、火山岩和沉积岩中的侵染状和网脉状金—银矿。

(7)石英卵石砾岩和石英岩中的金矿床。

(8)砂矿 残积砂矿、冲积砂矿、古残积砂矿和古冲积砂矿。

(9)金的其他来源。

以上分类都是含有某种成因意义,而实际上有时成因是很难做出判断的。对于矿业公司或找矿者来说,根据矿床的最显著特征或具有代表性的矿床来进行分类用得更为广泛,如石英铀砾岩型金矿、卡林型金矿、穆龙套型金矿、霍姆斯塔克型金矿、绿岩带型金矿

和火山岩一次火山岩型金矿等。因为这些典型矿床储量巨大，对于寻找类似的超大型矿床具有重要的借鉴意义。

石英铀砾岩型金矿：典型这种矿床产于南非维特瓦特斯兰德盆地的石英砾岩中。是已知世界上储量最大的金矿床。这一矿床的典型特点是含有工业品位的铀、钍和稀土元素。

卡林型金矿：这类矿床因发现于美国内华达州的卡林地区而得名。矿床产于碳酸盐岩地层中，富含 As、Sb、Hg 和 Tl。世界上两大卡林型金矿的密集区，一个是美国的内华达州，另一个是中国的滇黔桂三角区。

穆龙套型金矿：产于浅变质含碳质碎屑岩中。穆龙套金矿位于乌兹别克斯坦扎拉夫尚市。除穆龙套以外，这类矿床具有超大规模的还有：大乌子套、考可帕达司、阿玛大伊、宗毫巴和奥林匹亚达等，都位于前苏联境内。我国的南天山有可能存在这类超大型矿床。

霍姆斯塔克型金矿：霍姆斯塔克金矿位于美国南达科他州的利德地区。产于前寒武纪含铁硅质岩建造中。

绿岩带型金矿：这类矿床因产于太古宙绿岩带中而得名。也有人称作花岗岩—绿岩带型金矿。典型的有加拿大的赫姆洛金矿，中国的胶东地区金矿等。

火山岩一次火山岩型金矿：这类金矿具超大型规模的有俄罗斯的达拉松、中国台湾的金瓜石等。

第二章 金在自然界的含量分布

有关金在自然界各种物质中的含量分布资料在 Boyle 的经典著作《金的地球化学与金矿床》一书中虽已有系统的总结。但该书著于 1976 年,所引用的数据都是 20 世纪 70 年代以前的成果。而近年来对金的研究,特别是由于现代超灵敏测试技术的发展,原来所获得的结果在很大程度上已不可信。原来被教科书或著作所引用的经典含量值,普遍高于近些年所获得的结果。造成原结果偏高的主要原因有下列两点:一是 20 世纪 70 年代以前对 ng/g 级金的分析技术尚未出现或不成熟,也就是说使用的金分析方法检出限比较高,故低含量 ng/g 级至亚 ng/g 级的金无法检测出来,这样势必造成本来含量应更低的样品,由于受到检出限的限制,分析出来的数据偏高;二是从事这方面研究的大都是矿床地球化学家,由于他们所研究的目标都是在矿田或成矿带或矿源层范围内,从勘查地球化学的角度来看,也就是说样品采自于地球化学异常范围内,即使离矿床很远,也有可能落到地球化学省范围内,而不是真正的背景含量值。近些年随着勘查地球化学由战术转向战略,勘查规模不断扩大,大量样品采自于真正的背景区,这样使我们有机会获得各种地质体的背景数据,同时高灵敏分析方法的使用使我们可以真正获得地质体中金的真实含量分布的信息。本章将列举出金在各种天然物质中含量分布的最新结果,但为了便于读者阅读查询和对比,也将同时列出一些经典著作中所给出的结果。

第一节 金在岩石中的含量分布

有关金在岩石中的分布在许多著作和文章中都有所涉及和描述,在 Boyle(1979)的著作《金的地球化学与金矿床》中 Wedepohl(1974)的《地球化学手册》中有系统的总结。本书只选择一些有代表性的主要大类岩石中金的含量数据列入表 1-2-1。

但这里需要指出的是各个研究人员所给出的金在岩石里的含量结果相差很大,Boyle(1979)给出的含量普遍偏高。相差较大的原因有如下几个方面:①岩石本身的不均匀性;②样品的代表性差,所选择的样品并不能代表一个地区的真实全貌,而只是局部的结果;③分析方法的差异,分析方法灵敏度低;④人为因素影响,受研究人员工作内容所局限,往往样品的采集是在矿区周围,即使远离矿体也是在区域异常或地球化学省异常范围内,故含量结果严重偏高,并不是岩石中金的背景含量。Roslyakova 等(1975)在估计区域背景含量时就已经考虑到矿床的影响,故只计算离已知矿床 10 km 以上的样品,但最远也只不过离已知矿床 50~80 km。

中国自 1978 年开展区域化探全国扫面以来(谢学锦,1979),为配合这一使用水系沉积物测量的地球化学全国填图计划,同时也沿路线采集了不同层位的岩石样品。鄯明才等(1990)根据大量分析数据的统计结果,并结合岩石标准样的制备,得出中国各类岩石样

表 1-2-1 金在岩石中的含量分布
Table 1-2-1 Abundance of gold in rocks

岩石类型	金平均含量 (Boyle, 1979)	含量范围 (Boyle, 1979)	含量范围 (Roslyakova, 1975)	金平均含量 (鄢明才等, 1990)	含量范围 (鄢明才等, 1990)
酸性岩	10.6	0.1 ~ 2 900	1.0 ~ 6.0	0.45	0.13 ~ 3.4
中性岩	8.7	0.1 ~ 350		0.72	0.20 ~ 1.5
岩浆岩 基性岩	20.0	0.1 ~ 680		0.65	0.14 ~ 3.3
超基性岩	11.4	0.2 ~ 780		1.34	0.45 ~ 3.3
碱性岩	3.4	0.1 ~ 13.5		0.93	0.36 ~ 1.7
砂岩	57.0	0.2 ~ 430	3.0	0.67	0.07 ~ 3.9
沉积岩 页岩	8.0	0.1 ~ 800		0.85	0.12 ~ 2.3
碳酸盐岩	7.0	0.2 ~ 88.9		0.21	0.08 ~ 0.9
千枚岩	2.2	0.9 ~ 15.0	1.0 ~ 5.4	0.87	0.24 ~ 3.6
片麻岩	3.1	0.2 ~ 300		0.82	0.24 ~ 3.9
变质岩 变粒岩				0.65	0.19 ~ 1.9
斜长角闪岩				0.84	0.42 ~ 3.1
其他				0.34	0.18 ~ 3.1
火山岩			0.5 ~ 10.0		

单位: ng/g。

品中金的含量分布。鄢明才等(1997)系统地采集了成千上万个不同类型岩石样品,并进行了组合分析,给出了中国东部不同种类岩石中金的含量分布(表 1-2-2)。这个结果应是目前国内外最权威的数据,因为样品的采集具有广泛的代表性;使用组合样进行分析,消除单个样品代表性影响,剔除离群值,不受矿化矿体等影响,每一个组合样品都是使用多种方法同时进行分析,相互校对;使用标样进行监控。这一结果可以基本代表金在岩石中的真实背景含量分布。

不同的研究者尽管所得结果相差较大,但一个总的趋势是金在岩浆岩石中的含量,由酸性至超基性岩石有所增加。在沉积岩中的碳酸盐岩中金的含量最低,泥质岩和页岩中含量最高,这与泥质岩和页岩中存在大量有机质对金的吸附作用有关。在各类变质岩中金的差异很小。金在岩石中的赋存状态可能有下列几种:一是呈自然金的形式;二是以中性原子形式分散在造岩矿物中;三是以离子或原子进入造岩矿物晶格中。一、二两种形式的金可以较容易被活化转移成矿或进入表生介质中。

表 1-2-2 各类岩石中金平均含量
Table 1-2-2 Abundance of gold in rocks

岩石类型			原始样品数	组合样品数	金含量
火成岩	酸性岩 (0.53)	花岗岩	7 088	880	0.48
		花岗闪长岩	1 995	252	0.70
		英云闪长岩	287	42	0.73
		英安岩	288	14	0.35
		流纹岩	857	56	0.42
	中性岩 (0.81)	闪长岩	357	58	1.0
		二长闪长岩	505	76	0.62
		安山岩	334	32	0.96
	基性和超基性岩 (0.90)	辉长岩	435	49	0.73
		二长辉长岩	38	6	1.0
		橄榄辉长岩	97	10	2.5
		辉绿岩	174	26	0.7
		玄武岩	878	79	0.75
沉积岩	砂岩 (1.0)	石英砂岩	5 720	425	1.0
		长石石英砂岩	1 373	111	0.8
		长石砂岩	227	21	0.7
		粉砂岩	534	51	1.3
		钙质砂岩	538	42	0.98
		凝灰质砂岩	261	23	0.92
	泥质岩 (1.4)	粉砂质泥质岩	359	32	1.2
		钙质泥质岩	255	29	1.3
		碳质泥质岩(页岩)	31	7	3.0
	碳酸盐岩 (0.47)	石灰岩	1 866	151	0.48
		白云岩	838	55	0.43
		泥灰岩	426	45	0.70
变质岩		板岩	1 022	90	1.2
		千枚岩	230	27	0.93
		片岩	753	57	1.2
		片麻岩	1 786	201	0.65
		变粒岩	901	82	0.88
		麻粒岩	133	19	1.2
		斜长角闪岩	628	77	1.2
		大理岩	400	38	0.42
		石英岩	189	14	1.5

单位: ng/g。

第二节 金在土壤中的含量分布

金在土壤中的含量资料很有限，但近几年随着寻找隐伏矿的需要，越来越多的有关金在土壤中的分布数据开始陆续有所报道。有关金在土壤中的存在形式和各种形式的含量分布我们将在下面有关章节中进行专门讨论。现就全量分布做一综述。

文献中有关金在土壤中含量的数据非常零散。表 1-2-3 列出了一些金在土壤中含量的数据。

表 1-2-3 金在土壤中的含量
Table 1-2-3 Abundance of gold in soils

土壤类型	金含量(ng/g)	采样地点	资料来源
腐殖土	100	德国	Goldschmidt 等(1933)
多种	100	捷克	Nemec(1936)
多种	200 ~ 600	捷克	Babicka(1943)
灰色土	10	北极岛	Crocket(1973)
土壤	<5	加拿大	Boyle(1976)
多种	1.5	中国	鄢明才等(1990)
多种	2.0	中国	郑春江等(1992)
多种	2.9	山东	王学求等(1994)
沙漠土	1.6	新疆	王学求等(1995)
草原土	2.0	四川	王学求等(1995)
红土	3.0	广西	王学求等(1995)
砖红土	3.0	澳大利亚	王学求等(1995)
多种	2.7	美国加州	WXYZ GEO-TECH(1996)

从表 1-2-3 中可以看出 20 世纪 40 年代以前所获得的数据明显偏高，偏高达两个数量级。这是由于过去不可靠的金分析造成的。郑春江等（1992）研究中国全国范围内土壤中金的背景值是 2.0 ng/g。鄢明才等(1990)在辽宁、江西和山东采集了 83 件组合样品，测得金的含量在 0.19 ~ 4.0 ng/g 之间，剔除 3 倍离差后得出金的平均值 1.5 ng/g。王学求等(1993)在山东全省 160 000 km² 采集了 212 件土壤样品，其中分析了北部冲积平原 89 件样品得出金的平均含量 2.9 ng/g。我们在广西喀斯特地区采集的 120 余件样品，金的背景含量约是 3.0 ng/g。川西北若尔盖草原金的背景含量是 2.0 ng/g 左右。新疆沙漠区金的背景含量是 1.6 ng/g 左右。美国 WXYZ GEO-TECH 公司对美国加利福尼亚州北部约 120 000 km² 所做的 350 余件土壤样品统计结果显示金的平均含量是 3.0 ng/g 左右。土壤的背景值，尽管在不同的景观条件下有所差异，但基本上应在 2.0 ~ 3.0 ng/g 左右。

第三节 金在水系沉积物中的含量分布

金在水系沉积物中的含量分布资料在过去已有大量报道,但大都是一些局部地区的资料。这些局部的数据由于受到矿化、高背景岩体等局部因素影响所得到的金的含量分布并不能代表金在水系沉积物中的总体分布规律。这里我们只引用中国区域化探全国扫面计划所得出的一些大范围、全国性的资料。因为这些数据是非常可靠的,分析方法不仅灵敏度高,而且有严格的质量监控。

鄢明才等(1990)根据7个1:20万化探图幅7784个组合样的统计得出金的含量范围在0.2~7.6 ng/g之间,剔除3倍离差以后,平均值为1.2 ng/g。王学求(1990)根据全国416个1:20万图幅,每个图幅取一个平均值(每个图幅面积大约7000 km²,平均约有1200个组合样金的分析数据)得出这些图幅金的平均值最低是位于海南省的某图幅金的平均值只有0.5 ng/g,最高是位于山东省某图幅金的平均值是16.8 ng/g。剔除大于3倍离差以后,最低是0.5 ng/g,最高是3.7 ng/g,平均值为1.3 ng/g。任天祥等(1993)根据全国400余万 km²的统计金的背景值1.3 ng/g。从不同研究人员所做的统计结果来看,金在水系沉积物里的背景含量非常一致。因此作者认为中国水系沉积物金的丰度应是1.2~1.3 ng/g(表1-2-4),这一结果可以用作水系沉积物测量时衡量金的富积或贫化的标准。

根据区域化探全国扫面资料还统计了中国不同景观地区,金的背景含量分布(表1-2-5)(谢学锦等,1996)从表中可以看出岩溶地区金的背景含量最高,森林沼泽地区金的含量最低。

表1-2-4 中国水系沉积物中金的背景值

Table 1-2-4 Background values of gold in stream sediments

资料来源	鄢明才等(1990)	王学求(1990)	任天祥等(1993)
样品数	7个1:20万图幅 (7784个样品)	416个1:20万图幅 (约50万件分析样品)	400余万 km ² (约60万件分析样品)
平均值	1.2	1.3	1.31

表1-2-5 中国不同景观区水系沉积物中金的背景值

Table 1-2-5 Background values of gold in stream sediments in various settings

景观条件	湿润低山丘陵	高寒山区	干旱荒漠	森林沼泽	岩溶
样品数	12048	9327	3114	2134	2995
背景值	1.66	1.21	1.23	1.02	1.67

单位:ng/g。

我国几大河流和浅海沉积物中金的含量与水系沉积物中金的含量比较接近(表1-2-6)(鄢明才等,1997)。我们可以看出中国三大水系中金的含量从北向南逐渐增高。这和金在土壤中的含量由北方到南方在逐渐增高是一致的。这和南方热带淋滤作用使金富积有关。

表 1-2-6 中国几大河流沉积物和浅海沉积物中金的背景值

Table 1-2-6 Background values of gold in the large river and sea sediments in China

	长江沉积物	黄河沉积物	珠江沉积物	浅海沉积物
含量	0.9	1.1	1.5	1.1

单位: ng/g。

第四节 金在植物中的含量分布

有关金在各种植物中的含量分布资料在下列著作中有比较广泛的介绍。 Jones(1970)列举了 100 多种植物中金的含量, Brooks(1982)对这些数据进行了换算, 都换算成植物干体中的含量(表 1-2-7)。

表 1-2-7 植物干体中金的含量

Table 1-2-7 Gold values in plants

序号	植物种属	类型	器官	产地	样品数	金含量 (ng/g)	参考来源
1	多叶薔	草本植物	全部	前苏联	1	< 0.1	RR
2	舟形乌头	草本植物	全部	奥地利	2	15 ~ 60	KHS
3	小糠草	草	全部	前苏联	1	0.09	RR
4	纤细翦股颖	草	全部	英国	1	1.7	GPM
5	芒翦股颖	草	全部	前苏联	1	0.12	RR
6	葱	草本植物	全部	奥地利	2	7 ~ 20	KHS
7	矮桤木	树	全部	前苏联	1	< 0.1 ~ 27	RR
8	蝶须	草本植物	全部	前苏联	1	120	RR
9	峨参	草本植物	全部	前捷克斯洛伐克	1	870	B
10	熊果	草本植物	根	加拿大	1	2.5	GBW
11	Arctotus erythrocarpa Small ptarmiganberry	草本植物	全部	前苏联	1	0.4	RR
12	野艾	草本植物	全部	前苏联	1	0.2	RR
13	野艾	草本植物	全部	前苏联	1	4250	AT
14	欧细辛	草本植物	全部	前捷克斯洛伐克	1	500	B
15	Astragene ochotensis Pall (clematis)	草本植物	全部	前苏联	1	26	RR
16	塔瓦琼楠	树	叶	新西兰	4	15 ~ 21	WB
17	丛枝桦	树	叶	前苏联	1	< 0.1	RR
18	杂种桦	树	细枝	前苏联	17	< 0.1 ~ 85	RR
19	小叶桦	树	细枝	前苏联	17	< 0.1 ~ 125	RR
20	矮桦	灌木	叶	英国	5	0.8 ~ 9.1	GPM
21	白桦	树	细枝	前苏联	7	< 0.1 ~ 65	RR
22	白桦	树	树液	前苏联	?	0.002 ~ 0.13	KP

(续表)

序号	植物种属	类型	器官	产地	样品数金含量 (ng/g)		参考来源
23	小乌毛蕨	灌木	叶	新西兰	1	35	WB
24	短舌菊	灌木	叶	新西兰	3	12 ~ 65	WB
25	蓝点拂子茅	草	全部	前苏联	9	3.4 ~ 34	RR
26	拉拍拂子茅	草	全部	前苏联	14	< 0.1 ~ 275	RR
27	炳状苔草	藁属植物	全部	前苏联	3	10.2 ~ 408	RR
28	曼吉苔草	藁属植物	全部	前苏联	1	0.5	RR
39	Cosilleaminate gough	草本植物	根	加拿大	1	2.3	GPW
30	卷耳	草本植物	叶	英国	1	6.4	GPM
31	沼蓟	灌木	叶	英国	1	26	GPM
32	白铁线莲	灌木	全部	前捷克斯洛伐克	5	350 ~ 30 000	B
33	亮叶可波茜	灌木	叶	新西兰	2	15 ~ 30	WB
34	粗状可波茜	灌木	叶	新西兰	7	15 ~ 65	WB
35	牡丹叶紫堇	草本植物	全部	前苏联	2	33	RR
36	山楂属植物	灌木	叶	前苏联	1	2.9	TGLN
37	双生隐盘片	草本植物	全部	前苏联	1	112	KLK
38	灰叶榛	灌木	全部	前捷克斯洛伐克	3	< 0.1 ~ 1 000	B
39	桦叶榛	灌木	叶	英国	1	9.9	GPM
40	刺头菊	灌木	全部	前苏联	1	50	KLK
41	金老梅	草本植物	全部	前苏联	1	60	RR
42	曼陀罗	草本植物	全部	前捷克斯洛伐克	1	468	B
43	糙树蕨	蕨类植物	叶	新西兰	11	8 ~ 70	WB
44	异果芥	树	叶	前苏联	2	0.25 ~ 13	KLK
45	多瓣木	草本植物	叶	英国	1	1.6	GPM
46	欧洲鳞毛蕨	草本植物	叶	英国	1	3.5	GPM
47	亚洲岩高兰	灌木	全部	前苏联	5	< 0.1 ~ 50	RR
48	细叶柳叶菜	草本植物	全部	前苏联	15	< 0.1 ~ 120	RR
49	问荆	草本植物	全部	美国	12	18 ~ 58	CSB
50	问荆	草本植物	全部	加拿大	11	< 1 ~ 8	D
51	问荆	草本植物	全部	加拿大	16	< 0.8	BHR
52	木贼	草本植物	全部	美国	1	64	CSB
53	淤泥木贼	草本植物	全部	美国	2	56	CSB
54	滨海木贼	草本植物	全部	美国	1	33	CSB
55	大问荆	草本植物	全部	前捷克斯洛伐克	1	372 000	B
56	大问荆	草本植物	全部	前苏联	2	< 0.1 ~ 27	RR
57	草问荆	草本植物	全部	前苏联	4	< 0.1 ~ 10	RR

(续表)

序号	植物种属	类型	器官	产地	样品数	金含量 (ng/g)	参考来源
58	草 问 荆	草本植物	全部	美国	2	24 ~ 38	CSB
59	木贼的一种 (可能是问荆)	草本植物	全部	加拿大	4	28 ~ 56 2 392	WD BY
60	林下木贼	草本植物	全部	美国	1	26 ~ 65	CSB
61	兴安木贼	草本植物	全部	美国	2	54	CSB
62	四基石南	灌木	叶	英国	1	2.0	GPM
63	姜软飞蓬	草本植物	全部	前苏联	1	< 0.1	RR
64	小花小米草	草本植物	叶	英国	1	4.3	CPM
65	紫羊毛	草	全部	英国	1	1.4 ~ 95	GPM
66	对叶盐蓬	草本植物	叶	苏联	6	260	KLK
67	粗壮云香草	草本植物	叶	前苏联	1	600	KLK
68	泽常春藤	灌木	叶	英国	1	6.3	GPM
69	刺稗野大麦	草	全部	前苏联	1	232	RR
70	刺稗野大麦	树	细枝	圭亚那	1	8	L
71	刚毛鸢尾	草本植物	全部	前苏联	1	< 0.1	RR
72	欧洲刺柏	树	细枝	加拿大	8	< 1 ~ 20	WD
73	沙地柏	树	细枝	前苏联	2	0.2 ~ 0.5	TGLN
74	兔唇花	灌木	叶	前苏联	1	3 000	KLK
75	落叶松	树	全部	前苏联	8	< 0.1 ~ 130	RR
76	喇叭茶	灌木	全部	前苏联	39	< 0.1 ~ 250	RR
77	南鳞子莎	灌木	叶	新西兰	4	10 ~ 65	WB
78	雪花水仙	草本植物	全部	前捷克斯洛伐克	1	750	B
79	北极花	草本植物	全部	前苏联	4	< 0.1 ~ 300	RR
80	蓝果忍冬	灌木	全部	前苏联	6	< 0.1 ~ 175	RR
81	铜钱叶忍冬	灌木	全部	前苏联	2	14 ~ 34	TGLN
82	宽叶羽扇豆	草本植物	叶	英国	1	1.7	GPM
83	舞鹤草	草本植物	叶	前苏联	1	105	RR
84	水薄荷	草本植物	叶	英国	1	50	GPM
85	薄荷	草本植物	全部	前捷克斯洛伐克	1	15 000	B
86	小蓬	灌木	叶	前苏联	1	50	KLK
87	北蜂斗菜	草本植物	全部	前苏联	1	< 0.1	RR
88	四叶重楼	草本植物	叶	前苏联	1	< 0.1	RR
89	拉不拉多马先蒿	草本植物	全部	前苏联	1	60	RR
90	欧洲云杉	树	针叶	英国	2	0.6 ~ 4.1	GPM
91	西伯利亚云杉	树	针叶	前苏联	4	< 0.1 ~ 42	RR
92	蜜蜂花	灌木	根	加拿大	1	3.1	GPW