

金矿床

地球化学勘查理论和方法

译文集

中国有色金属工业总公司北京矿产地质研究所

中国人民解放军基建工程兵黄金指挥部

地质矿产部情报研究所

一九八四年十月

金矿床 地球化学勘查理论和方法 译文集

中国有色金属工业总公司北京矿产地质研究所
中国人民解放军基建工程兵黄金指挥部
地质矿产部情报研究所

一九八四年十月

前 言

地球化学勘查方法对寻找肉眼难以辨认的金、银等贵金属矿床有其独特作用。近年来，国外金矿地球化学勘查工作日益受到重视，1982年，国际勘查地球化学学会还专门召开了以贵金属为主的化探学术讨论会。长期的找矿实践和大量的成功经验证明，地球化学找矿效果十分显著，理论上也在不断提高。为了了解国外有关金矿地球化学勘查的动向，我们搜集了1982年国际勘查地球化学学会编辑的贵金属化探文集以及苏、美、加、澳等国近几年有关金矿地球化学勘查理论和方法的专著和论文，选择有代表性的重要文章编译成册，供广大地质和勘查地球化学工作者参考，并献给中国地质学会勘查地球化学委员会金矿化探学术讨论会。

《译文集》内容可分为两大部分：一是有关金的化学性质，地球化学特征，金在内生作用中的迁移和沉淀机理，金的表生迁移形式和特征等；二是有关金的勘查地球化学方法，原生和次生分散晕的特征及评价方法，并选择相应的案例进行较为系统的介绍。这些内容对我国开展贵金属矿床的化探找矿工作，提高找矿经济效益，无疑有实际参考价值。

本文集由中国有色金属工业总公司北京矿产地质研究所、中国人民解放军基建工程兵黄金指挥部、地质矿产部情报研究所协商筹办，共同选题，分别组织翻译和校对工作。全书选辑的文章经欧阳宗圻审定；梁厚锋、吴传璧和刘泉清分别对译文集不同部分作了审核；朱关祥和张济民负责编辑工作；由中国有色金属工业总公司北京矿产地质研究所出版发行。

由于时间紧，水平有限，错误之处请读者批评指正。

编 者

一九八四年十月

金矿床地球化学勘查

理论和方法译文集

目 录

金的化学性质及其地球化学分布	(1)
金在热液中的迁移与沉积	(60)
新西兰近代热液系统及金的矿化作用	(66)
锡和金的共生组合	(71)
不同成因黄铁矿中金含量	(78)
金矿床中的汞	(87)
成矿作用中金—汞的关系、内生金矿床的地质特征和某些矿物中金分布	(94)
含金汞的矿石建造和金与汞的地球化学共性	(100)
成矿元素和金在前寒武系沉积——火山岩近矿蚀变晕中的分布	(106)
华盛顿州蛇绿岩中含金硅质——碳酸盐矿脉周围的富碱贫镍晕	(113)
金矿床的地球化学勘查	(121)
金的勘查地球化学	(137)
土壤中的金异常及其与内生矿床的联系	(145)
根据表生异常和氧化露头预测和普查内生金矿床的原则	(157)
金矿田包裹体气相成分的地球化学标志	(173)
内华达州卡林金矿床容矿岩石和矿石中的主要元素与微量元素	(181)
内华达州卡林金矿床中炭质在金沉淀中的作用	(186)
内华达州与卡林金矿床地质和成因有关的某些微量元素的统计学研究	(201)
西伯利亚近地表金矿建造的普查准则	(224)
论金—银建造的矿化发育区原生晕的多成因性	(232)
育空地区某些金——银矿床中的元素分布	(241)
在火山岩地区预测金—银矿化的基础	(254)
氧化锰是金银矿化的指示标志	(263)
在金银建造的矿床上形成岩石化学分散流的特征	(266)
一米宽的脉与一公里宽的晕——安略红湖区坎贝尔金矿和迪肯森金矿的围岩蚀变	(272)
不列颠哥伦比亚省夏洛特皇后岛圣诺拉金矿床地球化学找矿案例	(289)
萨拉伊尔地区金矿床的地球化学普查方法	(300)
雅库特某金矿床的地球化学和构造—地质控矿规律	(305)
应用水地球化学方法在普利巴米耶地区普查金矿化	(310)

金的潜蚀晕及其在秃山带普查工作中的利用.....	(314)
金的生物找矿方法.....	(317)
相似岩石化学异常的地球化学分类.....	(326)
根据地表取样数据确定金矿点垂直地球化学分带的经验.....	(332)
金——硫化物矿床详查中X射线法的应用条件和有效性.....	(338)
用选择萃取技术的感应耦合等离子体测定地质物料中的银、金、铋、镉、铜、铅和锌的初探.....	(342)

金的化学性质及其地球化学分布

金的普通化学性质

金(Au)原子序数79,原子量196.967,化合价(1, 3),比重19.32(20°C),熔点1063°C,蒸气压1300°K时为 9.92×10^{-9} atm, 2100°K时为 1.87×10^{-3} atm,升华热为 87.720 ± 210 卡/克分子(银的相应值为 68.010 ± 300 卡/克分子)。金具高电导、高热导、高延展性(1盎司金可打成300平方英尺的金箔)。

金在周期表上属IB族(Cu、Ag、Au)。从金出现单价(氧化态、+1)这一点看,有点像IA族碱金属元素,但是它们之间的差异是明显的。从电子结构上看,它与镉、铊、铂有某些类似。铂比金仅少一个电子,能量差异较小。但是在自然环境下,除它们都趋向于自然态外,并没有亲密关系,金和IB族的汞,没有特殊相似性,但汞和金可形成汞齐。银和金在化学性质上有明显的区别。推测缘由,归因于原子序数57(La)和79(Au)之间的镧系收缩。常见的金存在形式见图1。

金可看作周期表上第三系列的过渡元素,尽管它尚没有满足过渡元素所具有的标准电子态(严格地说,过渡元素是d或f能阶上没有充满如镍,而金的5d轨道上已经充满)。金、铜、银的能阶特点见表1,元素及其离子、化合物的热力学特点见表2。

金通常有三种价态,即“0”价(自然态)、+1价(亚金)、+3价(正金)。2价和5价金可存在于络合物中,很不稳定,在自然条件下不可能出现。

一、“0”价金:

即自然状态的金,化学上属惰性(图2),与水 and 绝大多数酸不起作用,与氧和硫也不起作用。易与卤素起反应。金很容易溶解于下列介质:有空气存在的碱金属氰化物溶液;碱金属硫化物溶液;225°C的硒酸;含有碲酸、硫酸、磷酸的溶液;含有氧化剂如 MnO_2 的硫酸、盐酸溶液;以及少量碱金属硫代硫酸盐溶液。在氧化剂存在情况下,金可微溶于盐酸和 $CuCl_2$ 溶液以及含有氧化剂的 $FeCl_2$ 和 $FeSO_4$ 溶液中。

结晶学上Au与Ag、Cu、Pb属同族,均系立方面心排列的铜型结构— $4/m\bar{3}2/m$ 。这种结构与Fm $\bar{3}m$ 空间群相一致,其晶胞内含4个原子。四种纯金属的晶胞参数为:

	Cu	Au	Ag	Pb
$a_0 \text{ \AA}$	3.61496(18°C)	4.07825(20°C)	4.08548(20°C)	4.9496(20°C)

金的原子半径与银一致(1.48 Å),可与20%的银形成连续的Au—Ag混合晶胞。不过在自然界中看不到这种连续系列。金和铜(1.28 Å)原子半径不同,因此,自然金中含铜很少,自然铜中含金也很少。实验室中金与许多金属可形成合金,尤其是与银、铜、镍、铋、铂,可按任何比例与金掺和。金与汞的汞齐化,是汞与金之间的混合、浸润及表面反应的结果。汞在金中混熔的固溶度,按原子百分比约为35。

表1 金和铜、银的能阶特点

特 征	元 素	Cu	Ag	Au
外层电子构型		3d ¹⁰ 4S ¹	4d ¹⁰ 5S ¹	5d ¹⁰ 6S ¹
氧化价态 (括号内为不常见)		1, 2, (3)	1, 2, (3)	1, 3
负电性		1.9	1.9	2.4
离子电位 (eV)		Cu (I) 7.724 Cu (II) 20.29	Ag(I) 7.574 Ag(II) 21.48	Au(I) 9.223 Au(III) ~20
晶格能		Cu (I) 215 Cu (II) 630	Ag(I) 180	Au(I) ~183
原子半径 Å		1.24 (8)	1.40(8)	1.40(8)
(括号中为配位数)		1.28 (12)	1.44(12)	1.44(12)
离子半径 Å		Cu (I) 0.96 (6) Cu (II) 1.00 (8) Cu (III) 0.82 (6)	Ag(I) 1.13 Ag(II) 1.13(10) Ag(III) 0.97 (6)	Au (I) 1.37 Au (I) 1.37 Au(III) 0.78(4) Au(III) 0.91(6)
各种情况下的半径 Å		Cu (I) (在萤石中) 1.00 Cu (I) (在氧化物中) 1.05 Cu (II) (在萤石中) 0.87 Cu (II) (在氧化物中) 0.97 Cu (四面体共价键) 1.35 Cu (I) (水化) 1.70 Cu (II) (水化) 3.50	Ag (I) 萤石中 1.33 Ag (I) 氧化物中 1.35 Ag四面体共价键 1.53 Ag (I) 水化 1.70	Au (I) 水化 1.4
离子电位 (Z/r)		Cu (I) 1.00 Cu (II) 2.44	Ag (I) 0.88	Au (I) 0.73 Au (III) 3.53

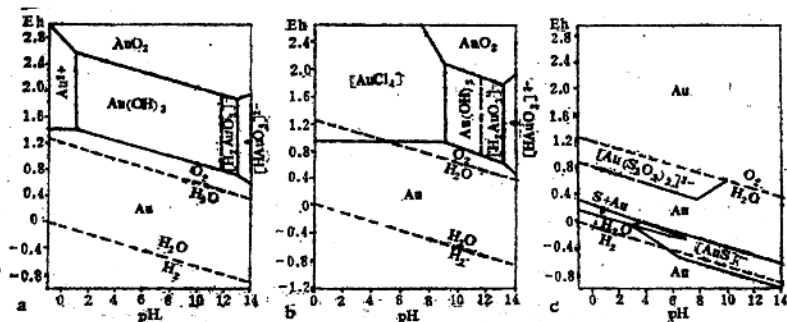


图1 常见的金存在形式的pH—Eh图

a. 25°C 1大气压 Au—H₂O体系, Au 的浓度 (全量) 为 10⁻⁴ M; b. 25°C 1大气压 Au—H₂O—Cl 体系, Au(III) 浓度 = 10⁻⁴ M, Cl⁻ = 2 M; c. 25°C 1大气压 Au—S 体系, S (全硫) 浓度 10⁻¹ M; 粗线条表示固体, 虚线条为可溶物质

表 2

金元素及其离子、化合物的热力学特点

分子式	状态	ΔH°	ΔF°	S°
Au(金属)	晶体	0.0	0.0	11.32
Au(I)	溶液		39.0	
Au(II)	溶液		103.6	
Au ₂ O ₃	晶体	19.3	39.0	30.00
H ₂ AuO ₃ ⁻			-45.8	
HAuO ₃ ²⁻	溶液		-27.6	
AuO ₃ ³⁻	溶液		-5.8	
Au(OH) ₃	晶体	-100.0	-69.3	29.0
Au(OH) ₃	溶液		-61.8	
AuCl	晶体	-8.40	-4.2	(24)
AuCl ₃	晶体	-28.3	-11.6	(35)
AuCl ₃ ·H ₂ O	晶体	-167.7	-123.3	(54)
AuCl ₄	溶液	-77.8	-56.2	61
AuBr	晶体	-4.4	-3.7	(27)
AuBr ₂ ⁻	溶液		-27.1	
AuBr ₃	晶体	-13.0	-5.9	(24)
AuBr ₃	溶液	-9.2		
AuBr ₄ ⁻	溶液	-45.5	-38.1	75
AuI	晶体	0.2	-0.76	(28.5)
Au ₂ P ₃	晶体	-24.1		
Au(CN) ₂ ⁻	溶液	58.4	64.4	29.5
Au(CNS) ₂ ⁻	溶液		57.7	
Au(CNS) ₄ ⁻	溶液		130.1	

ΔH° 标准形成热 (25°C, 千卡/mol), ΔF° 标准自由能 (25°C, 千卡), S° 嫡 (卡/度), () 为估计值

资料来源: Latimer (1952); 物理化学手册 Cleveland, Ohio (1972)

二、一价金

通常是直线型二配位。除AuCN外, 多数非络合物的一价金化合物不溶于水。一价金的氧化物Au₂O和Au(OH), 文献中曾有报道。但近年的工作对此提出了怀疑。一价金卤化物AuCl、AuBr、AuI在水中可以慢慢产生Au和AuCl₃、AuBr₃、AuI₃。AuF在水中不可能出现。在碱金属氯化物溶液中, AuCl可形成[AuCl₂]⁻络离子。在过量的Br、I溶液中, 一价Au可呈同样的络离子[AuBr₂]⁻、[AuI₂]⁻。金在碱金属氰化溶液中可形成[Au(CN)₂]⁻络离子。一价金硫化物Au₂S不溶于水 ($K_{\text{不稳}} = < 10^{-13}$) 而能形成稳定的胶体。在强酸中也不溶解。但溶于强氧化剂和王水、碱金属氰化物溶液中。一价金多硫化物与三价金化合物溶液反应, 可产生一价金硫代化合物, 如Na₄[Au₂S₃]、K₃[AuS₂]、K₅[AuS₃]。一价金氧盐不常见, 一价金的碳酸盐和硝酸盐不存在, 其硫酸盐是否存在尚有疑问。总之, 一价金在水溶液中以其存在大量稳定的络合物为特征, 如[AuCl₂]⁻、[Au(CN)₂]⁻、[Au(S₂O₃)₂]⁻, 并且已经知道大量的一价金与S、As、Sb配位的络合物, 如[AuS]⁻、

“0”价金:

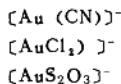
自然界中呈自然金及某种合金存在(如在金银矿中),也可呈各种碲化物和一价金碲化物,均可呈胶体及细分散状态迁移。然而,“0”价金是不活动的。

非活动态:

自然界存在一价金化合物尚未发现,一价金络合物可在富Fe—Mn氧化物的含水凝胶中呈吸附态存在,并呈各种类型有机质如泥炭、腐殖质等存在

一价金:

只能呈离子态出现在一价金的络合物中



活动态:

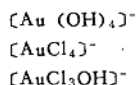
基本上呈可溶态或一价金络合物的吸附态被有机和无机质衍生物吸附,也可呈天然的无机和有机质胶体存在(如石油中)

非活动态:

自然界的三价金化合物尚未发现,三价金络合物以富含Fe—Mn氧化物的凝胶或多种有机质如泥炭、腐泥、腐殖质吸附形式存在

三价金:

只能呈阴离子形式普遍存在于三价金的络合物中



活动态:

基本上呈可溶的或为有机质和无机质衍生物的吸附态、三价金络合物存在,也可呈有机或无机胶体如石油的吸附态存在

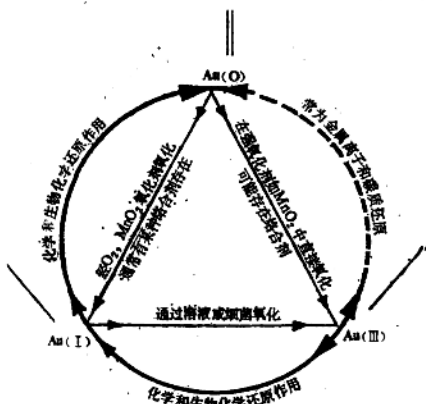


图2 自然条件下金的循环演化图

$[\text{AuS}_2]^{3-}$ 、 $[\text{AuS}_3]^{4-}$ 、 $[\text{AuSb}]^{2-}$ ，以及硫代砷、锑络合物，如 $[\text{Au}(\text{AsS}_3)]^{2-}$ 、 $[\text{Au}(\text{SbS}_3)]^{2-}$ 。在内生活动中对金的转移可能很重要。

一价金也可以形成若干有机金属化合物和螯合物，如磷化氢、砷化氢、硫醇化物 (mercaptide) 和甲基化络合物和螯合物，它们在腐殖质中尤为富集。

三、三价金

通常呈平面正方形配位，尽管它有较高的配位数，如配位数为 5 的三角双锥、配位数为 6 的正八面体配位。有些三价金络合物可与 $\text{Cu}(\text{II})$ 和 $\text{Ag}(\text{II})$ 类质同像。多数三价金化合物是强氧化剂。含 $[\text{AuCl}_4]^-$ 的溶液加碱可获得 $\text{Au}(\text{OH})_3$ ，它相当于水化物，能脱水形成 $\text{AuO}(\text{OH})$ ，而最终呈 Au_2O_3 。这些氧化物具两性，酸性溶液中呈 $[\text{Au}(\text{OH})]^-$ 或 $[\text{AuO}_2]^-$ (不稳定)，可产生相应的盐，如 $\text{KAuO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 。三价金氢氧化物在用强碱处理后，可产生另外一种金酸盐系列，用 AuO_3^{3-} 离子来表示，如 Na_2HAuO_3 、 Na_3AuO_3 。

三价金与卤素可形成卤化物。三价金氟化物在水中不稳定，很快分解。 AuCl_3 、 AuBr_3 可溶于水并水化而形成如 $[\text{AuCl}_3\text{OH}]^-$ 。当有过量的氯、溴化合物离子存在时，可形成 $[\text{AuCl}_4]^-$ 、 $[\text{AuBr}_4]^-$ 络离子，三价金卤化络合物稳定性顺序为 $\text{I} > \text{Br} > \text{Cl} > \text{F}$ 。

三价金含氧盐不稳定，实验室可制备出 $[\text{Au}(\text{NO}_3)_4]^-$ 、 $[\text{Au}(\text{SO}_4)_2]^-$ 。硒酸金和亚硒酸金， $\text{Au}(\text{SeO}_4)_3$ 、 $\text{Au}(\text{SeO}_3)_3$ 比较稳定。

三价金氰化物，在过量的氰化物溶液中，可形成 $[\text{Au}(\text{CN})_4]^-$ 、 $[\text{Au}(\text{CN})_5]^{2-}$ 和 $[\text{Au}(\text{CN})_6]^{3-}$ 络离子。

三价金硫化物 Au_2S_3 ，在水中不稳定，很快还原生成 Au_2S 和 S 。 $\text{Au}(\text{III})$ 溶解于碱性硫化物和多硫化物溶液中，形成硫代金酸盐，并进一步分解形成稳定的一价金硫代金酸盐。

三价金也可形成各种有机络合物，呈络阴离子。也可形成大量的有机金属化合物和螯合物，对金在表生和有机环境下的转移很重要。但当前对此研究不够，所知甚少。

在溶液中，金很容易被几乎所有的金属元素、金属离子和各种化合物所还原。在自然环境中，最有利的是 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} ，以及大量有机化合物，包括柠檬酸、醋酸及其盐类。

当金的稀溶液被还原时，很容易形成胶体，其颗粒大小受浓度、温度和 pH 控制。pH 低，易呈大颗粒，高则呈小颗粒。金胶体具憎水性并带负电。1951 年，Turkevich 的研究认为，形成金胶的成核剂与还原剂是一致的，金胶的形成服从指数规律，胶粒大小和分布特征决定金胶的数量、成核作用和生长规律。

金可形成大量的络合物。有硫化物络合物，如 $\text{Na}[\text{AuS}] \cdot \text{H}_2\text{O}$ (金的硫化物往往是 Au_2S 和 Au_2S_3 的混合物)；有二硫化络合物，如 Ag_3AuS_2 、 $\text{Ag}_3\text{AuS}_2 + \text{AgAuS}$ ；有若干碲化物、硒化物和碲化物的混合物 (Ag_3AuSe_2 和 Ag_3AuTe_2)；有各种碲化物的卤化物 AuXTe_2 ($x = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$)。其中某些二硫化络合物比较稳定，自然界中可以出现，并呈矿物。金的锑化物 AuSb_2 在自然界可呈 fischerite 矿物 (一种亚金酸锑和金—银碲化物) 存在。

金与碲、铋有明显的亲合性，对锑较差。其原因是金与碲、铋化合物能形成稳定的电子构型。碲、铋、锑原子有着较大的半径，金在它们的晶格空隙被俘获形成紧密堆积。这是戈尔德斯密特在阐明金与这些元素亲合力时早就注意到的。

自然界某些常见的金盐和化合物稳定常数见表 3。

表 3

自然界某些常见的金盐和化合物稳定常数

化合物或元素	水中溶解度 g/100g, c(25℃)	其它溶剂中的溶解度
Au	不溶	溶于王水、KCN、热硫酸， 不溶于酸和碱中
AuBr	不溶	不溶于酸，溶于NaCN
AuBr ₃	微溶	溶于HCl、HBr
AuCl	微溶	溶于HCl、HBr
AuCl ₃	6g	
AuCN	微溶	溶于KCN、NH ₄ OH，不溶于碱
H[Au(CN) ₄]·3H ₂ O	易溶	
AuI	微溶	溶于KI
AuI ₃	不溶	溶于碘化物
H[Au(NO ₃) ₄]·3H ₂ O	可溶	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和稀HNO ₃
Au ₂ P ₃	不溶	不溶于HCl和稀HNO ₃
Au ₂ Se ₃	不溶	
Au ₂ S	不溶	溶于王水、KCN，不溶于酸
Au ₂ S ₂	不溶	溶于Na ₂ S
AuTe ₂	不溶	

取自：物理化学手册 53rd ed; Chemical Rubber Co, 1972.

四、金的同位素

自然界只有一种金的稳定同位素 Au^{197} ，其半衰期大约是 3×10^{16} 年。目前所知，有20多个人造放射性同位素，其半衰期都很短，不超过185天。鉴于这种情况，就不详细讨论了。

金在陨石、矿物、岩石、土壤中的分布

一、金在陨石中的分布

1959年，Green根据Suess和Urey (1956)的资料，将金的宇宙丰度值定为0.000534ppm，或每 10^{10} Si原子有0.145金原子。近年来，Cameron (1959)、Clayton (1961)、Baedeker (1956)、Cameron (1968)分别定为0.145、0.13、0.18、0.2金原子(每 10^{10} Si原子)。金在陨石、玻陨石和月球中的含量值见表4。从表4可以看出，金是陨石中微迹元素。铁陨石和球粒陨石的金属相中金含量最高，说明金明显亲铁陨石。陨石硅酸盐相含量低，而硫化物相(陨硫铁)就相当高，表明了金的高亲硫性和低亲石性。球陨石中Au/Ag比值稳定在1，而在陨铁中的比值很高(达40)，在陨硫铁相中只有0.05。因此，金与银相比，具明显的亲铜性而低亲铁性。所分析的地球外物质中，没有自然金存在。据推测，在陨石中，多数金存在于金属相中(主要是Ni—Fe相)出现，部份在硫化物相中，也可能有一些在氧化物相，如在磁铁矿、钛铁矿、铬铁矿中，呈分散相或进入晶格中。

表4

金在陨石、玻璃石和月球中的含量值

陨石类型及产地	元素	样品数	含量范围	X	S	G	X _g	S _g
				(ppm)				
球粒陨石 (全世界)	Au	246	0.0170-1.6000	0.2225	0.1427	0.1998	-0.6994	0.1881
	Ag	34	0.0330-0.5700	0.1769	0.1484	0.1285	-0.8911	0.3542
	Au/Ag			1.2578		1.5549		
球粒陨石: 阿比	Au	1	0.25					
木通	Au	1	0.96					
候门岛	Au	1	0.94					
球粒陨石金属相 (全世界)	Au	52	0.4480-2.9000	1.5085	0.6016	1.3846	0.1413	0.1686
球粒陨石非金属 (硅酸盐) 相	Au	47	0.0004-0.0910	0.0199	0.0161	0.0125	-1.9030	0.4788
无球粒陨石 (全世界)	Au	11	0.0005-0.2800	0.0310	0.0330	0.0053	-2.2775	0.7186
铁陨石 (铁和硅酸盐各50%) (全世界)	Au	7	0.0400-2.0000	0.9143	0.7262	0.5318	-0.2743	0.8053
陨铁 (Fe) (全世界)	Au	291	0.0550-8.7440	1.2050	0.8999	0.9597	-0.0179	0.3102
	Ag	87	0.0050-0.1320	0.0301	0.0316	0.0174	-1.7597	0.4717
	Au/Ag			40.0332		55.155		
陨铁: Annahcini	Au	1	0.9					
	Ag	1	0.07					
	Au/Ag		12.85					
Skookum	Au	1	0.5					
	Ag	1	0.15					
	Au/Ag		3.33					
Madoc	Au	1	0.7					
	Ag	1	0.03					
	Au/Ag		23.33					
陨硫铁硫化物相 (全世界)	Au	16	0.0700-8.0000	0.9787	1.9217	0.4128	-0.3842	0.5405
	Ag			±18				
	Au/Ag			0.054				
玻璃石 (全世界)	Au	15	0.0003-0.0242	0.0081	0.0080	0.0040	-2.4020	0.6296
	Ag	8	0.2500-0.5000	0.4063	0.1294	0.3856	-0.4139	0.1558
	Au/Ag			0.0199		0.0104		
月岩和月壤	Au	529	0.0000025-0.08700	0.00485	0.00855	0.00173	-2.7613	0.8021
	Ag	299	0.0001-10.7600	0.0980	0.6689	0.0052	-2.2819	0.9077
	Au/Ag			0.04949		0.3327		
月岩	Au	292	0.0000025-0.0870	0.0047	0.0090	0.0011	-2.9803	0.9478
	Ag	166	0.0001-10.7800	0.0933	0.8440	0.0027	-2.5622	0.8602
	Au/Ag			0.0501		0.4074		
月壤和月尘	Au	237	0.000011-0.0737	0.0051	0.0080	0.0031	-2.5161	0.4718
	Ag	133	0.0002-3.0800	0.1039	0.3458	0.0117	-1.9321	0.8445
	Au/Ag			0.0491		0.2650		
月球金属粒	Au	53	0.050-19.000	1.5332	2.5940	0.7737	-0.1114	0.5564
	Ag	1	0.0730	0.0730		0.0730		
	Au/Ag			21.003		10.599		

注: X算术平均值; S标准离差; G几何平均值; X_g和S_g分别为log₁₀的平均值和标准离差

金、银、铂在地壳中的丰度对比情况见表5。

表 5 金、银、铂在地壳中的丰度对比

地 壳 单 元	Au	Ag	Pt
深 洋 区	0.004	0.098	0.095
浅 洋 区	0.0029	0.082	0.05
大陆地盾区	0.0034	0.067	0.031
褶皱带区	0.0038	0.062	0.022
洋 壳	0.0035	0.091	0.075
陆 壳	0.0035	0.065	0.028
地 壳	0.0035	0.075	0.046
结 晶 岩	0.0036	0.077	0.049
沉 积 岩	0.0051	0.065	—

取自：黎、姚（中国）1966 单位：ppm

二、金在矿物中的分布

金的矿物，大多数是自然金和金的碲化物。常见的金矿物见表6。

自然金有各种不同的晶体，最常见的是平行晶簇以及双生连晶，呈60°平行于晶棱，或与（111）晶面斜交。通常也有网状、树枝状、纤维状、丝状、苔藓状和海绵状。金的块状体，包括块金、无光泽的金粒、鳞片金以及细分散状粒金（所谓芥末金、颜料金）。自然金的纯度用成色来表示（即样品中纯金所占的比例用‰表示，成色为900的自然金，即含金90%）。自然金一般是相当纯的，但也含某些Ag、Cu、Fe以及其它痕量和微量元素。自然金晶体和颗粒含有许多包体，如伴有脉石矿物黄铁矿、白云石、黄铜矿、碲化物等。

原生和次生的自然金在痕量和微量元素上有较大的变化。氧化带和砂金中的自然金与相应的原生自然金相比，后者含有银和其它痕量元素。砂金常常出现相当纯净的金边（金环），因为银和其它元素被浸滤。某些氧化带中的自然金也可能出现这种金边效应（rim effect）。

1970年，Antweiler和Sutton分析测定了采自美国八个州（包括阿拉斯加）和巴西等地的67个金脉脉和砂金样品，发现最常见的元素是Ag、Cu、Fe、Ti，其次是Pb、Pd、Bi、V、Ni、Co、Ti、Zr、La、Y和Cr在砂矿中常见。

根据光片和薄片、光谱、化学、电子探针的研究，多数金属和半金属元素如Ag、Cu、Fe、Ni、Hg、As、Sb、Bi、Te、Pd、Pt等，可以进入自然金的结构中，以格点存在。也有呈杂质在矿物微小包体中，如存在于石英、碳酸盐矿物、绢云母、硫酸盐、碲化物、碲化物中。

自然金的变种有以下几种，其中多数是加上所含金属的字头来命名的：

银金矿：浅黄色，含Ag 5—15%，有Au—Ag完全替代系列，即自然金—银金矿—金银矿—自然银。

铜金矿：含微—痕量的铜，有的文献报道含Cu 0.1~20%，有的甚至含40%的铜，分子式为CuAu_{2.6}，产在红砷镍矿的铬铁矿中，呈不规则粒状，并观察到Cu₃Au、CuAu₄形式的金铜矿。

表 6

常见的金矿物

自然元素、合金、金属互化物:

自然金:

银金矿 (electrum)	Au
铜金矿 (Cuproauride)	(Au, Ag) 含 Ag 5—15%
钯金矿 (Porpezite)	(Au, Cu)
铑金矿 (Rhodite)	(Au, Pd)
铱金矿	(Au, Rh)
铂金矿	(Au, Ir)
铋金矿	(Au, Pt)
金汞齐	(Au, Bi)
黑铋金矿 (Maldonite)	Au ₂ Hg ₃ (?)
金铜矿 (Auricupride)	Au ₂ Bi
钯铜金矿	AuCu ₃
	(Cu, Pd)Au ₂

硫化物:

碲金银矿 (Uytenbugaardite)	Ag ₃ AuS ₂
------------------------	----------------------------------

碲化物:

碲金矿	AuTe ₂
碲金银矿 (Krennerite)	(Au, Ag)Te ₂
亮碲金矿 (Montbrayite)	(Au, Sb) ₂ Te ₂
碲金银矿 (Petzite)	Ag ₃ AuTe ₂
板碲金银矿 (Muthmannite)	(Ag, Au)Te
针碲金银矿 (Sylvanite)	(Au, Ag) ₂ Te ₄
碲铜金矿 (Kostovite)	AuCuTe ₂
叶碲金矿 (Nagyagite)	Pb ₃ Au(Te Sb) ₄ S ₉₋₁₁

铋化物:

方铋金矿 (Aurostibite)	AuSb ₂
--------------------	-------------------

硒化物:

硒金银矿 (Fischesserite)	Ag ₂ AuSe ₂
----------------------	-----------------------------------

碲酸盐:

碲酸金 (?)	(?)
---------	-----

钯金矿: 含Pd 5—10%, 呈固溶体出现。据报道钯金矿具面心立方格子, 乳白色, 常与铂、钯矿物相伴生。

铑金矿、铱金矿和铂金矿: 分别含34—43%的铑、30%的铱、10%的铂。这些矿物尚需进一步精确鉴定。可能属Au—Os—Ir—Pt的中间产物。

黑铋金矿 (或称铋金矿): 自然金含微量 (3%±) 的铋, 可能呈固溶体存在。早先认为它是一种Au—Bi的金属互化物Au₂Bi。法国 Salsigne 的黑金矿经研究发现含 Au 64.58%, Bi 35.72%, 分子式接近 Au₂Bi, 它是在温度间隔很小的范围内形成, 从Au—Bi相图上看, 其沉淀温度≤373°C。因此, 黑金矿可作为地质温度计。

钯铜金矿 (Palladium—Cuproauride): 这是在苏联 Talnakh 铜—铋矿床中发现的新矿物, 为一种金属互化物 (Cu, Pd)₃Au₂, 并含有痕量和微量的Rh、Ag、Bi和Ni。

后生自然金的形态变化较大,有结核状、层纹状、团块状、蠕虫状、树枝状、结晶状、水滴状包体、粉末状集合体(芥末金)及海绵状块金。一般说,深成金矿床呈结晶状产出的少,而近地表形成的结晶状金常见。后生自然金的颗粒大小变化也很大,从 $<1/1000$ 盎司到1000多盎司。前寒武纪和古生代深成金矿颗粒大小均一,近地表金矿颗粒大小变化很大。

自然金具气体包体,90%是 CO_2 及 N_2 ,气体压力估计在5~20大气压。

在金矿石中,经常发现痕量碲,呈碲化物存在,是金银矿床的重要矿石矿物。如西澳的Kolgoorlie、Mulgabbie,罗马尼亚的Nagyag和Brad等地,都富产Au—Ag碲化物。碲化物的金矿物有碲金矿、针碲金银矿、碲金银矿、碲银矿等。根据实际分析Au—Ag碲化物的结果,说明这些矿物多数含金较纯。只有微量的S、Se、Sb、As,可能替代Te,并发现有Cu、Fe、Ni、Co、Pb、Sn、Hg、W、Mo、Bi。碲的同位素 Te^{130} 是放射性同位素,二次 β 衰变产生 Xe^{130} 。因此,可利用碲矿物的这种特征进行金—银矿床年龄测定。1972年, Srinivasen等人测定了 Te^{130} 二次 β 衰变的半衰期为 $2.83 \pm 0.30 \times 10^{21}$ 年。碲矿物很少与碲化物伴生。如印尼Salide金矿石含碲银矿很高,但也未发现碲化物与碲化物伴生。碲碲化合物不相容的原因,可能是沉淀金—银碲化物的溶液抑制碲的带入,反之亦然。碲化物常出现在火山岩系中与安山岩、玄武岩紧密相伴,出现在火山岩中的黄铁矿化、硅化、碳酸盐化石英脉中。石英和黄铁矿脉中金的碲化物生成顺序常为:碱金属硫化物—碲化物—自然金。在有些矿床内,金和碲可同时析出。

铋金矿:常与有辉铋矿及其它铋矿物的金矿床紧密伴生。铋金矿常常呈自然金粒的环圈,生成比金晚。如苏联Bestyabe金矿田的铋金矿围绕自然金呈反应边,这是在还原条件下,金与铋溶液作用形成的。探针分析铋金矿的结果,含Au44.52、Ag0.12、Cu0.08、Sb52.73、As1.73(重量%)。1971年, Barton研究得出结论:铋金矿只能在硫的活度相当低的低温条件下稳定。它们的形成温度为 125°C 。

金在其它矿物中,如硅酸盐、氧化物、硫酸盐、碳酸盐、卤化物、硫化物中的分布,都系痕量—微量级。据探针研究,金在许多矿物中呈自然金,也有金的碲化物、铋化物。有的金可进入矿物格架中。

1. 硅酸盐中的金

表7列出了1950年以来硅酸盐矿物中金的分析数据。从表中可以看出,硅酸盐中的金在0.00002~0.924ppm。从石英—长石—云母—闪石—辉石—橄榄石系列中,金的含量与硅酸盐矿物无明显的关系。有人报道,在暗色硅酸盐矿物中金稍高,可能金代替铁。

2. 自然元素中的金

自然元素中的金含量见表8。从表8中可以看出自然元素中的金含量,金属元素比非金属元素(如C、S)要高。

自然砷、自然铋中含金高,呈包裹体。自然铋含金低,在格架中。石墨中的金呈晶粒状。自然铜含金低,在格架内。自然银中的金替代银,可以构成金银矿—自然金完全系列。铂族元素中的金可在格架内,也可呈游离金与自然铂族元素共生,有的呈薄膜、粉霜状覆盖于自然铂族矿物之上。自然碲中含金低,但碲化物中含金高。自然硫中的金呈自然金,有些含铜黄铁矿床铁帽中的自然硫含金高达8200ppm,这种金呈粒状(直径10~100 μ)。

3. 银和贱金属碲化物和碲化物中的金

表 7

1950年以来硅酸盐矿物中金和银的分析数据

矿物名称及产地		Au(ppm)	Ag(ppm)
石英: 苏联	阿尔泰及外贝加尔湖	0.006~0.0042	
	阿尔泰—萨扬	平均 0.00003	
	哈萨克斯坦	0.0011~0.0012	
	阿尔泰、外贝加尔湖、乌拉尔	0.0016	
	乌拉尔	0.0017	
美国	蒙他那 海伦那(石英和长石)	0.008~0.176	
加拿大	魁北克 白金汉	<0.01	<0.05
	安大略 兰斯塘(晶体)	<0.01	<1.0
长石: 苏联	阿尔泰及外贝加尔湖	0.0002~0.0005	
	阿尔泰—萨扬	0.004	
	阿阿尔—萨扬	0.018	
	哈萨克斯坦	0.0013~0.0052	
	阿尔泰、外贝加尔、乌拉尔	0.0016~0.0017	
	乌拉尔	0.0016~0.0017	
	加拿大 安大略 伊奥克莱尔(钠长石)	<0.01	<0.5
魁北克	维尔奈夫(钠长石)	<0.01	<0.5
	安大略 巴斯罗斯特(微斜长石)	<0.01	<0.5
	波特兰(微斜长石)	<0.01	<0.5
	南 岛 (钙长石)	<0.01	<0.5
副长石: 加拿大	安大略 戴维斯山(霞石)	<0.01	<0.5
	安大略 奈通夫(霞石)	<0.01	0.5
	安大略 班克洛夫特(方钠石)	<0.01	<0.5
白云母: 苏联	阿尔泰—萨扬	0.0038	
	乌拉尔	0.0109	
黑云母: 苏联	阿尔泰—萨扬	0.004	
	哈萨克斯坦	0.001~0.0119	
	乌拉尔	0.0018	
美国	蒙他那 海伦那	0.002~0.924	
角闪石: 苏联	阿尔泰—萨扬	0.0059	
	哈萨克斯坦	0.0026~0.0201	
	乌拉尔	0.0016	
英国	蒙他那 海伦那(普通角闪石)	0.003~0.832	
加拿大	安大略 维尔伯福斯	<0.01	<0.5
辉石: 苏联	哈萨克斯坦	0.0137~0.024	
加拿大	安大略 波尔矿	<0.01	
绿泥石: 苏联	阿尔泰 外贝加尔湖、乌拉尔	0.0030	<0.5
橄辉石: 苏联	阿尔泰—萨扬	0.014	
绿帘石: 苏联	阿尔泰 外贝加尔、乌拉尔	0.0026	
电气石: 苏联	阿尔泰—萨扬	0.012	
柞石: 苏联	阿尔泰—萨扬	0.0039	
石榴石: 加拿大	魁北克	0.01	<0.5
苏联	乌拉尔	0.0052	
锆石: 加拿大	安大略 沙拉马克	0.01	<0.5

表 8

自然元素中的金含量

自然元素和产地	Au(ppm)	Ag(PPm)	Au/Ag
As (自然砷)			
德 国 安德里士堡 哈茨	150	>1000	<0.1
马来西亚 蛇 沙撈越	20—40	30—50	0.75
德 国 图林根	5	1	5
(As, Sb) (砷锑矿)			
加 拿 大 不列颠哥伦比亚 阿特林	500	—	—
阿特林	421	294	1.43
Sb (自然锑)			
美 国 加利福尼亚 科恩	35.2	0.7	59.2
加 拿 大 新斯科舍省 西高尔	12.0	0.3	40.0
Bi (自然铋)			
德 国 萨克森 Altenberg	0.03	3.5	0.008
加 拿 大 安大略 O'Brien 矿山	0.050	318	0.0001
澳大利亚 西南威尔士	1.8	3.5	0.51
C (石墨)			
加 拿 大 安大略 黑Donald矿山	0.035	<0.5	>0.07
魁北克 白金汉	0.020	<0.5	>0.04
C (金刚石)			
苏 联 全国各地	0.00056—0.0031		
Cu (自然铜)			
挪 威 Kviteseid	200	>1000	<0.2
加 拿 大 安大略 雷湾区Indian矿	0.02	41	0.0004
美 国 密执安 Pewabic bed	<0.01	73.5	<0.0001
各 地	2—3%		
Ag (自然银)			
挪 威 Kongsberg	40	98.45%	<<1
加 拿 大 安大略 Novo Scotia矿山	3.0	99 + %	—
加 拿 大 安大略 Castle Tretheway	4.1	99 + %	—
加 拿 大 西北地区 Echo Bay矿	13.5	99 + %	—
金银矿 (Kustelite)	0—30%	—	—
Fe (自然铁)			
格 陵 兰 Oviak Disko	1—5	5—10	0.4
德 国 Buhl	0.5	5—10	0.06
Zn (自然锌)			
加 拿 大 育空地区 Keno山	测不出	痕量	—
Pb (自然铅)			
各 地	痕量	痕量	—
Hg (自然汞)			
各 地	痕量—微量	痕量—微量	—
Os, Ir (铱银矿)			
澳大利亚 西南威尔士	800	—	—
苏 联 乌拉尔	>1000	600	>1.6
各 地	9000	—	—