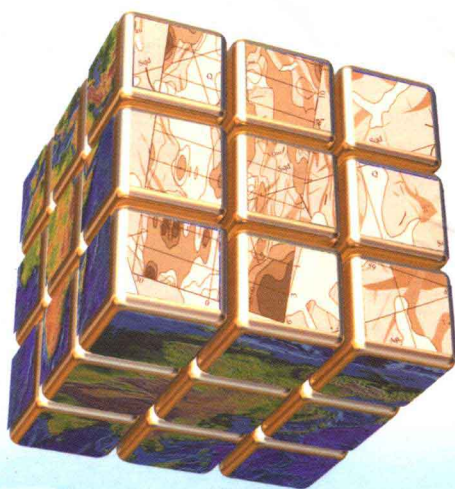


地电化学集成技术

寻找隐伏金矿的研究及找矿预测

罗先熔 王葆华 文美兰 欧阳菲 胡云沪 文雪琴 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

科技部国际合作重点项目(项目编号:2007DFA20910)

国家“十一五”科技支撑计划项目(项目编号:2006BAB01B08)

地电化学集成技术 寻找隐伏金矿的研究及找矿预测

罗先熔 王葆华 文美兰 欧阳菲
胡云沪 文雪琴 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2010

内 容 简 介

本书系统地论述了金的地球化学特点,地电化学集成技术基本原理、工作方法 & 特点,对地电化学集成技术条件进行了系统研究,介绍了在国内外 7 种不同类型厚层覆盖区开展的电化学集成技术找矿可行性试验研究,及在国内外 17 个矿区外围及深部开展的找矿预测研究,以及所取得的理论成果和找矿效果。

本书内容丰富,资料翔实、论证严密、条理清晰,可供找矿勘探、地球物理、地球化学等地球科学领域和相关学科的科研、生产人员及大专院校有关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

地电化学集成技术寻找隐伏金矿的研究及找矿预测/罗先熔等著. —北京:冶金工业出版社, 2010. 2

ISBN 978-7-5024-5043-4

I. ①地… II. ①罗… III. ①地电—地球化学勘探—应用—金矿床—成矿预测 IV. ①P618. 510. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 017055 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

策划编辑 张 卫

责任编辑 王雪涛 美术编辑 李 新 版式设计 张 青 孙跃红

责任校对 侯 璐 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5043-4

北京盛通印刷股份有限公司印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2010 年 2 月第 1 版, 2010 年 2 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 21.5 印张; 516 千字; 329 页; 1-2000 册

75.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

本书是桂林工学院隐伏矿床预测研究所在“十五”、“十一五”期间承担的国际合作项目、国家科技攻关项目以及中国地质调查局、武警黄金指挥部、山东招金集团、内蒙古自治区有色地质勘查局、广西黄金局等布置的多个科研项目的综合研究成果。项目研究时间为2002~2007年，主要工作内容是：(1)在各种不同景观区采用以地电化学为主的多种方法集成技术寻找隐伏金矿可行性试验研究；(2)各方法寻找隐伏金矿技术条件选择性试验研究及建立方法找矿综合模式；(3)在上述找矿可行性试验研究工作基础上，开展地电化学集成技术的深部找矿预测。在五年多的时间里，我们先后在澳大利亚 Challenger 金矿和 Kalkaroo 铜金矿，我国的新疆哈巴河赛都金矿、新疆哈密金矿、山东尹格庄金矿、安徽五河金矿、东北大兴安岭虎拉林金矿、吉林延边杜荒岭金矿、内蒙古巴彦哈尔金矿、内蒙古四子王旗金矿、广西高龙金矿、广西南乡金矿等10余个矿区分别开展了以地电化学提取测量为主的三种方法为一体的集成技术找矿试验研究，这三种方法为：(1)地电提取测量法；(2)土壤离子电导率测量法；(3)土壤吸附相态汞测量法。共完成测试剖面528条，采集地电提取样品13565件，采集土壤样品13949个。对所采集的全部样品做了离子电导率、热释汞测试分析，对地电提取样品全部做了金元素分析，部分样品做了Hg、As、Sb、Cu、Pb、Zn等元素分析。

通过研究获得了以下主要成果：

(1) 掌握了各研究区的地电化学集成技术各参数背景特征，获得了不同景观区已知埋深100~400m不等的隐伏金矿上地电化学集成技术异常特征，并对已知隐伏金矿体上所测得的异常进行了综合分析研究；建立了以地电提取测量为主的集成技术综合找矿预测模式，得出了利用地电化学集成技术在南澳第四纪厚层覆盖区、东北原始森林区、西北荒漠戈壁区、内蒙古草原覆盖区、华

东第四系外来冲积物覆盖区、华南厚层残坡积覆盖区寻找隐伏金矿是可行的结论。

(2) 通过在研究区内反复进行地电化学集成技术参数的选择性试验研究,系统地总结出的一套适合于在各种不同景观区寻找隐伏金矿的最佳集成技术指标,为在各种不同厚层覆盖区的金矿预测提供了一套切实可行的集成技术操作体系。

(3) 在地电化学集成技术找矿可行性试验研究、方法技术条件选择性试验研究的基础上,在各种不同景观条件下的厚层覆盖区开展了面积性的找矿预测,先后发现了具有找矿前景的地电化学集成技术异常靶区 66 个,其中有 4 个靶区经深部工程验证见到了隐伏金矿,如广西横县南乡泰富金矿在 V 号地电化学集成技术异常带经槽探工程揭露,发现 5 个金矿体,平均品位 2.063×10^{-6} ,计算金储量 1738kg,潜在经济价值达 1 亿元以上。内蒙古虎拉林金矿经武警黄金部队在地电化学集成技术异常区施工钻孔 ZK6001 验证,发现有多条矿体存在,单矿体厚度最大为 12.52m,单样最高品位为 25.23×10^{-6} ,获得新增推断的内蕴经济资源量 (331) 1291kg,潜在的经济效益 1 亿元左右。内蒙古自治区有色地质勘查局在地电化学集成技术异常范围内进行工程验证找到了隐伏的金矿体,获得上亿元的找矿经济效益,达到了科研成果及时转化为生产服务的目的。

在地电化学集成技术研究过程中已向科技部、中国地质调查局、武警黄金指挥部、广西黄金局、山东招金集团、内蒙古自治区有色地质勘查局等单位分别提交了单向研究报告 8 个,这些研究报告均被有关部门在生产中采用,及时将科研成果转化为指导找矿运用,解决了实际找矿问题,达到了科研直接为生产服务的目的。

为及时总结地电化学集成技术研究的理论成果,在研究过程中已在国内外刊物上发表了 10 余篇研究论文,在两个国际会议上发布了两篇方法研究的学术论文和在全国性的学术会议上发布了 6 篇方法研究学术论文。这些研究成果的发表引起了国内外同行及有关媒体的极大关注,国内《人民日报》、人民日报社网络中心《创新与发展》、《科技日报》、《国土资源报》、《勘查导报》、

《中国有色金属专刊》、《广西日报》、《桂林日报》等媒体先后给予了报道, 澳大利亚 Australia Mining Monthly (January 2006 AMM; EXPLORE Newsletter 129 page 19; The Advertiser 8 July 2006) 和 CRC LEME Website: <http://crcleme.org.au/NewsEvents/index.html> 等多家媒体都做了相关报道, 收到了很好的社会效益。

本书共分9章, 第1~5章由王葆华执笔, 第6、9章由罗先熔、文雪琴、文美兰执笔, 第7、8章由罗先熔、欧阳菲、文美兰、胡云沪执笔, 全书由罗先熔统稿。

在方法研究过程中, 我院有四届本科生, 硕士、博士研究生共20多人参加了野外、室内工作。野外工作得到了澳大利亚 Challenger 金矿和 Kalkaroo 铜金矿、黑龙江东宁县金厂金矿、黑龙江黑河阿陵河金矿、新疆哈巴河赛都金矿、新疆哈密金矿、山东尹格庄金矿、安徽凤阳大庙金矿、安徽五河金矿、东北大兴安岭虎拉林金矿、吉林杜荒岭金矿、内蒙古巴彦哈尔金矿、内蒙古四子王旗金矿、广西高龙金矿、广西泰富金矿等矿山的大力支持和帮助。本方法研究被立为科技部国际合作重点项目(项目编号: 2007DFA20910)、中澳政府间国际合作项目(项目编号: 20050175)、国家“十五”科技攻关项目(项目编号: 2001BA609A-3)、国家“十一五”科技支撑计划项目(项目编号: 2006BAB01B08)、武警黄金指挥部项目。方法研究过程中, 国家“十五”科技攻关项目办公室、国家“十一五”科技支撑计划项目办公室、科技部国际合作司、中国地质调查局、武警黄金指挥部、山东招金集团、内蒙古自治区地质勘查局、广西泰富金矿以及澳大利亚的南澳大利亚州资源部等部门提供了研究经费。本专著的出版得到科技部国际合作重点项目: 矿产资源多元信息勘查技术开发及综合示范研究课题、有色及贵金属隐伏矿床勘查教育部工程研究中心、广西地质工程中心重点实验室等资助。对上述部门给予我们的大力支持和帮助在此表示衷心感谢。

作 者

2010年1月于桂林

目 录

1 金的地球化学	1
1.1 概述	1
1.2 金矿物简介	3
1.3 金矿床的主要类型	4
2 金在自然界的含量分布	6
2.1 金在岩石中的含量分布	6
2.2 金在土壤中的含量分布	8
2.3 金在水系沉积物中的含量分布	9
2.4 金在植物中的含量分布	10
2.5 金在动物体中的含量分布	15
2.6 金在天然水体中的分布	15
2.7 金在气体中的分布	16
2.8 金的地壳克拉克值与地表丰度	17
3 金的存在形式	19
3.1 金的内生存在形式、迁移与沉淀	19
3.1.1 内生金的来源	19
3.1.2 内生金的迁移与沉淀	20
3.2 金的表生存在形式	21
3.2.1 自然金颗粒	22
3.2.2 水溶形式金	31
3.2.3 不溶有机物结合和吸附的金(腐殖质)	33
3.2.4 胶体金和胶体吸附金	34
3.2.5 黏土吸附和可交换金	35
3.2.6 氧化物表面吸附和包裹金	35
3.2.7 硫化物包裹金	35
3.2.8 碳酸盐包裹金	36
3.2.9 石英硅酸盐晶格中的金	36
3.2.10 水中悬浮物金	36
3.2.11 气体中或气溶胶体金	36

3.2.12 微生物中的金	36
4 地电化学集成技术基本原理、工作方法等特点	38
4.1 地电化学提取测量法	39
4.1.1 离子晕形成机制以及地电提取测量法的基本原理	39
4.1.2 金离子晕形成机制以及地电提取过程中金的元素行为	41
4.1.3 地电提取工作方法、应用条件、地电异常特征	41
4.2 土壤离子电导率测量法	44
4.2.1 方法的基本原理	44
4.2.2 离子电导率异常的形成过程	44
4.2.3 离子电导率异常形成的理想模式	46
4.3 土壤离子电导率的工作方法及测量因素	47
4.3.1 工作方法	47
4.3.2 方法测量的影响因素、条件及真假异常判别	48
5 土壤吸附相态汞测量法	51
5.1 汞的物理化学性质	51
5.1.1 汞的物理性质	51
5.1.2 汞的化学性质	51
5.1.3 汞的地球化学性质	51
5.2 汞的赋存和迁移形式	52
5.2.1 汞的赋存形式	52
5.2.2 汞的迁移形式	52
5.3 汞气测量法的原理	53
5.4 气晕的形成机制	54
5.4.1 土壤中汞的来源	54
5.4.2 气晕的形成机制	55
5.4.3 汞的理想异常模式	56
5.4.4 吸附相态汞测量与汞气测量的区别	57
5.5 工作方法	58
5.5.1 野外工作	58
5.5.2 室内工作	58
5.6 仪器的工作原理	60
5.7 方法测量的影响因素	61
5.7.1 地质因素	61
5.7.2 气候影响因素	62
5.7.3 废石、废矿堆影响因素	62
5.7.4 样品加工测试过程的影响因素	62

6 地电化学集成技术——技术条件的选择性试验研究	64
6.1 地电提取测量法技术条件选择性试验	64
6.2 土壤离子电导率测量技术条件选择性试验	72
6.2.1 采样深度试验	72
6.2.2 样品加工粒度试验	72
6.2.3 分析样量选择试验	73
6.2.4 样品搅拌溶解时间试验	73
6.2.5 分析流程	73
6.3 土壤吸附相态汞测量方法技术条件的选择性试验	73
6.3.1 样品粒度试验	73
6.3.2 热释温度试验	74
6.3.3 热释时间试验	74
6.3.4 试样重量试验	74
7 不同类型覆盖区地电化学集成技术寻找隐伏金矿可行性试验研究	75
7.1 南澳大利亚第四系覆盖区	75
7.1.1 Challenger 金矿地电化学集成技术可行性试验研究	75
7.1.2 Kalkaroo 铜金矿地电化学集成技术可行性试验	77
7.2 东北原始森林覆盖区	81
7.2.1 大兴安岭虎拉林金矿地电化学集成技术找矿可行性试验研究	81
7.2.2 吉林杜荒岭金矿地电化学集成技术可行性试验研究	87
7.3 西北戈壁覆盖区	91
7.3.1 新疆哈巴河赛都金矿地电化学集成技术找矿可行性试验研究	91
7.3.2 新疆哈密金窝子-210 金矿区地电化学集成技术找矿可行性试验研究	93
7.4 青藏高原高寒湿润气候区——甘南忠曲金矿地电化学集成技术找矿可行性试验研究	99
7.4.1 矿区交通、自然地理概况	99
7.4.2 地质概况、地球化学特征、矿床地质特征	100
7.4.3 数据处理	106
7.4.4 忠曲矿段测网数据统计分析	109
7.4.5 CF 线示范性研究	109
7.5 华东冲积平原覆盖区	117
7.5.1 山东招远尹格庄金矿地电化学集成技术找矿可行性试验研究	117
7.5.2 安徽五河金矿地电化学集成技术找矿可行性试验研究	120
7.6 草原覆盖区——内蒙古巴彦哈尔金矿地电化学集成技术可行性试验研究	121
7.6.1 矿区地质概况简介	121
7.6.2 地电化学集成技术找矿可行性试验研究	122
7.7 南方残坡积覆盖区——广西南乡金矿地电化学集成技术找矿可行性试验	123

7.7.1 矿区地质概况简介	123
7.7.2 可行性找矿试验	124
7.8 结论	125
8 地电化学集成技术找矿预测研究	126
8.1 南澳大利亚 Challenger 金矿找矿预测研究	126
8.1.1 Challenger 金矿 A 线地电化学集成技术异常特征	126
8.1.2 Challenger 金矿 A 线地电化学集成技术异常评价解释	130
8.2 虎拉林金矿深部找矿预测研究	130
8.2.1 地电化学集成技术剖面异常特征	130
8.2.2 地电化学集成技术平面异常特征	134
8.2.3 异常评价与找矿预测	137
8.3 吉林杜荒岭金矿深部及外围找矿预测研究	139
8.3.1 金沟西区地电化学集成技术平面异常特征及找矿预测	139
8.3.2 金沟东区地电化学集成技术平面异常特征及找矿预测	144
8.3.3 2 号角砾岩筒地电化学集成技术异常平面特征及找矿预测	146
8.3.4 成矿预测	147
8.4 黑龙江省黑河市阿陵河上游岩金普查区找矿预测研究	148
8.4.1 工作区地质特征	148
8.4.2 地电化学集成技术异常特征	149
8.4.3 找矿评价及预测	156
8.5 黑龙江省东宁县金厂矿区找矿预测研究	157
8.5.1 工作区地质概况	157
8.5.2 金厂矿区已知金矿(化)体特征	157
8.5.3 地电化学集成技术异常特征	158
8.5.4 测区综合异常划分、成矿预测及评价	169
8.6 甘南忠曲金矿区找矿预测研究	171
8.6.1 元素地电化学集成技术平面异常特征	172
8.6.2 金元素与其他各种元素空间关系	185
8.6.3 异常靶区划分	187
8.6.4 找矿预测	190
8.7 甘肃天水包家沟金矿区找矿预测研究	191
8.7.1 矿区地质概况	191
8.7.2 地球化学特征	192
8.7.3 数据处理方法	197
8.7.4 各元素异常的分布特征	200
8.8 山东招远滦家河断裂找矿预测研究	247
8.8.1 西区地电化学集成技术异常特征	249
8.8.2 东区地电化学集成技术异常特征	249

8.9 安徽五河金矿深部找矿预测研究	250
8.10 安徽省凤阳县大庙金矿区找矿预测研究	252
8.10.1 工作区地质概况	252
8.10.2 找矿预测研究	253
8.11 新疆金窝子金矿-210 矿区深部找矿预测研究	282
8.11.1 金矿点赋存区域的地电提取法勘查效果	283
8.11.2 已知矿点外围进行的找矿预测	285
8.12 内蒙古巴彦哈尔金矿深部找矿预测研究	285
8.12.1 1 号部面线地电化学集成技术异常特征	286
8.12.2 3 号部面线地电化学集成技术异常特征	287
8.12.3 地电化学集成技术异常解释	288
8.13 内蒙古四子王旗三元井金矿区深部找矿预测	289
8.13.1 研究区地质概况	289
8.13.2 地电化学集成技术异常特征	290
8.13.3 三元井测区地电化学集成技术异常划分及评价	293
8.14 广西高龙金矿深部找矿预测研究	294
8.14.1 矿区地质概述	294
8.14.2 地球化学概述	294
8.14.3 异常分析与解释	295
8.15 广西横县南乡泰富金矿找矿预测研究	297
8.15.1 工程控制区的异常验证	297
8.15.2 未知区找矿预测	298
8.16 广西兴安金石金矿找矿预测研究	299
8.16.1 地电化学提取金异常	299
8.16.2 吸附相态汞异常	300
8.17 广西融水县有富多金属矿区找矿预测研究	301
8.17.1 工作区地质概况	301
8.17.2 地电、地球化学特征	302
8.17.3 已知矿化体特征	303
8.17.4 数据处理方法	303
8.17.5 找矿预测评价	307
9 结论	326
9.1 取得的成果	326
9.2 应用前景	327
参考文献	328

1 金的地球化学

1.1 概述

金位于元素周期表第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 19.32g/cm^3 （ 20°C ），熔点 1063°C ，化合价0、1、3，原子结构为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 4f^{14} 5s^2 5p^6 5d^{10} 6s^1$ 。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亚层电子也不易丢失，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： $\text{Au}(0)$ （自然金）、 $\text{Au}(\text{I})$ （一价金）、 $\text{Au}(\text{III})$ （三价金）。 $\text{Au}(\text{II})$ （二价金）和 $\text{Au}(\text{V})$ （五价金）这两种氧化态金也被发现存在于某些复杂结构中（Bergendahl, 1975），但相对都不稳定，在自然界中并不存在。

$\text{Au}(0)$ （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，也不被氧和硫酸腐蚀。但在存在氧化剂条件下，能很容易与卤素溶液发生反应，如在王水中生成络合物。金在有空气存在时很容易在碱金属的氧化物中溶解，但很难在碱金属的硫化物中溶解，易溶于含有 MnO_2 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不活泼，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，但它的机理目前还无法认识，可能是金属小到了纳米级很多性质都发生了本质的变化。

$\text{Au}(\text{I})$ 和 $\text{Au}(\text{III})$ 的化合物中电子构型分别为 d^{10} 和 d^8 ，并且由于氧化电位高，所以主要显示共价性，金的天然化合物铋化物和碲化物就是具有这种特性。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，它们配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 $\text{F} > \text{Cl} > \text{Br} > \text{I}$ ，金的卤素配合物稳定性依次是 $\text{I} > \text{Br} > \text{Cl} > \text{F}$ ，同样金与VA和VIA族原子形成配合物的稳定顺序依次是 $\text{Bi} > \text{Sb} > \text{As}$ 和 $\text{Te} > \text{Se} > \text{S} > \text{O}$ ，这就说明为什么金的碲化物、铋化物和铋化物足够稳定，能呈矿物在自然界中产出，但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配合物，常见的有 AuCl_2^- 、 AuCl_4^- 、 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 、 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)^-$ 和 $\text{Au}(\text{OH})_4^-$ 。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^+ ， 9.2eV ； Au^{3+} ， 30eV ，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。

19 世纪以前,人们将金看作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、氯化物和硫酸溶解,并在有机物存在的条件下重新沉淀。Smith (1943) 和 Krauskopf (1951) 都有试验证实,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 所示。

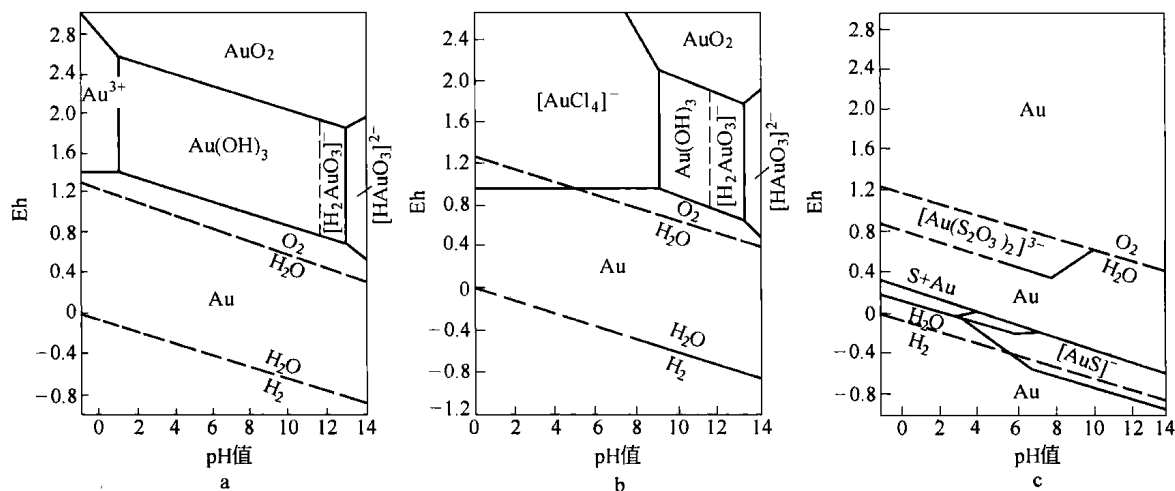


图 1-1 金在水体系、Cl 体系和 S 体系的 Eh-pH 值图

a—Au-H₂O 体系, 25℃ 和 0.1MPa (1 大气压), 金浓度 10^{-4} mol/L; b—Au-H₂O-Cl 体系,

25℃ 和 0.1MPa (1 大气压), Au(III) 浓度 10^{-2} mol/L, Cl⁻ 2mol/L;

c—Au-S 体系, 25℃ 和 0.1MPa (1 大气压), 硫浓度 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配合物、氯的配合物和有机配合物 (Butt, 1989; 表 1-1)。

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,使金转化成另外的形式。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,不易溶

解和迁移。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。

表 1-1 金的溶解与沉淀机制（Butt，1989）

配合物	反 应
硫的配合物	黄铁矿氧化：高浓度碳酸盐和碱性，中等氧化还原电位 $2\text{FeS}_2 + 4\text{CaCO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} + 3.5\text{O}_2 = 2\text{FeO}(\text{OH}) + 4\text{Ca}^{2+} + 4\text{HCO}_3^- + 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$
	黄铁矿氧化：低到中等浓度碳酸盐，pH 值中等，氧存在 $2\text{FeS}_2 + 3\text{O}_2 = 2\text{Fe}^{2+} + 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$
	金溶解： $\text{Au}^0 + 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-} = \text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{2-}$
	金沉淀：氧化和酸性条件下 $2\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{2-} + \text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ = 2\text{Au}^0 + 2(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{2-} + \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$
	金沉淀：还原，酸性条件下 $2\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{2-} + 8\text{H}^+ = 2\text{Au}^0 + 6\text{S}^0 + 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O}$
	$\text{Au}^+ + \text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Au}^0 + \text{FeO}(\text{OH}) + 3\text{H}^+$
有机配合物	金溶解：在中酸性，氧化条件下 $\text{Au}^0 + \text{H}^+ + \text{有机酸} + \text{O}_2 = \text{Au}[\text{胡敏酸}]^{3+} + \text{H}_2\text{O}$
	金沉淀：还原环境 $\text{Au}[\text{胡敏酸}] + \text{Fe}^{2+} = \text{Au}^0 + \text{有机酸} + \text{Fe}^{3+}$
氯的配合物	金溶解：酸性，氧化，含盐条件 $4\text{Au}^0 + 16\text{Cl}^- + 3\text{O}_2 + 12\text{H}^+ = 4\text{AuCl}_4^- + 6\text{H}_2\text{O}$
	金沉淀：稀释，碱性或还原条件 $\text{AuCl}_4^- + 3\text{Fe}^{2+} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Au}^0 + 3\text{FeO}(\text{OH}) + 4\text{Cl}^- + 9\text{H}^+$

金在自然界的相互转化过程和循环如图 1-2 所示。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。

1.2 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，也有几种与碲和铋形成的化合物，最常见的是针碲金矿、碲金矿、碲金银矿和方碲金矿。金的各种最常见的矿物如表 1-2 所示。

金的主要矿石矿物是自然金、方碲金矿和各种碲金矿。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克，大到数十千克。砂金通常呈试样圆状或片状，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 70.8kg，体积 17cm × 40cm × 70cm，于 1869 年发现于澳大利亚的维多利亚。迄今为止我国发现的最大块狗头金重

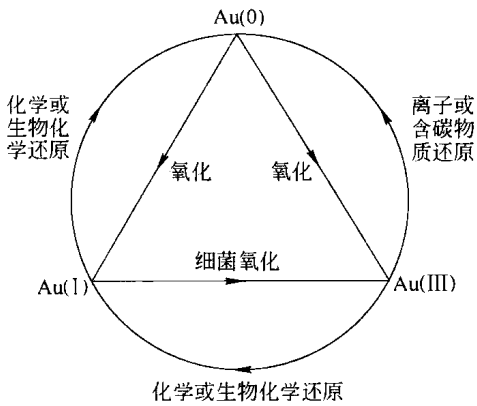


图 1-2 金在自然界中的相互转化和循环

2. 16kg, 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 成色表示纯金占 90%; 但通常使用的是以 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。

表 1-2 常见的金矿物

矿物名称	化学式	颜 色	硬 度	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
金	Au	金黄色	2.5 ~ 3.0	19.3
银质金	AuAg	黄 色	2.5 ~ 3.0	12 ~ 19
碲金矿	AuTe ₂	淡黄色至银白色	2.5	9.4
白碲金银矿	(Au, Ag)Te ₂	银 白	1.5 ~ 2.0	8.0 ~ 8.2
叶碲矿	Pb ₅ Au (Te, Sb) ₄ S ₅₋₈	深灰色	1.0 ~ 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			

1.3 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集形成砂金矿, 因此, 金矿床的类型是相当广泛的。比较流行的金矿床的分类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 1-3), 而以 Boyle 为代表的地球化学家使用的是后一种。

表 1-3 中国金矿床成因分类

大 类	类 型	亚 类	大 类	类 型	亚 类
内 生	岩浆—热液	重熔岩浆—热液	外 生	风化壳	残余金矿床
		混合岩化—重熔岩浆—热液			残坡积砂金矿床
	火山—热液	潜火山—热液		表生风化沉积 再生富积	冲积砂金矿床
		火山—热液			洪积砂金矿床
	沉积—变质	硅铁建造变质—热液			岩溶砂金矿床
	变质—热液	古老绿岩系—热液			冰积砂金矿床
		含碳质碎屑岩系—热液			砾岩砂金矿床
	地下热卤水 溶滤	碳酸盐岩系—热水溶滤			
		碎屑岩系—热水溶滤			

注: 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 的金矿床分类如下:

- (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) 含金的硅卡岩型矿床。
- (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进行分类用的更为广泛, 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-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: 这种典型矿床产于南非维特瓦特斯兰德盆地德石英砾岩中, 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 Te。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。

穆龙套型金矿床: 产于浅变质含碳质碎屑岩中。穆龙套型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-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。

2 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靠。以前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、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, 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。

2.1 金在岩石中的含量分布

金在岩石中的分布在许多著作和文章中都有涉及和描述, 在 Boyle (1979) 的著作《金的地球化学和金矿床》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 2-1。

表 2-1 金在岩石中的含量分布 (ng/g)

岩石类型		Boyle, 1979		含量范围 (Roslyakova, 1975)	鄢明才, 1990	
		金平均含量	含量范围		金平均含量	含量范围
岩浆岩	酸性岩	10.6	0.1 ~ 2900	1.0 ~ 6.0	0.45	0.13 ~ 3.4
	中性岩	8.7	0.1 ~ 350		0.72	0.20 ~ 1.5
	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
沉积岩	砂岩	57.0	0.2 ~ 430	3.0	0.67	0.07 ~ 3.9
	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