

地球化学理论丛书

# 金的地球化学

刘英俊 马东升 著

科学出版社

地球化学理论丛书

# 金的地球化学

刘英俊 马东升 著

国家自然科学基金资助项目



科学出版社  
1991

## 内 容 简 介

黄金是我国的短缺急需矿种,一个黄金地质找矿的热潮正在中国大地上广泛兴起。为了适应黄金地质工作的发展需要,作者基于自己的科学研究成果,特撰写成本书。书中除提供了大量金的常用的基础地球化学数据资料外,还全面系统地阐述了金的基本地球化学特征,以新颖的学术观点,对金在各种地质作用过程中的成矿机制和富集规律,进行了广泛而深入的论述,指出了各重要类型金矿床的找矿新方向。该书内容丰富,理论联系实际,对提高找矿理论水平和更有效地扩大黄金资源,具有重要的参考价值。

本书可供广大黄金战线的生产、科研人员和地质院校的有关专业师生参考。

地球化学理论丛书

### 金的地球化学

刘英俊 马东升 著

责任编辑 谢洪源

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1991年11月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1991年11月第一次印刷 印张:25 1/2

印数:0001—830 字数:591 000

ISBN 7-03-002295-5/P·462

定价:29.50 元

## 序

在利用矿产资源方面,人类很早就和金建立了亲密联系。这似乎和黄金的实用性不相称,但却说明了人类在早期历史时期已有了很高的审美能力。几千年来,金的稀贵和相对稳定使它成为货币和首饰的主要原料,而砂金和岩金的开采在史前时期即已开始了。

但无论在中国还是在西方,在 30—60 年代的三十余年中,金却遭到了厄运。在我国,解放后许多矿种的地质及地球化学工作受到重视并得到快速的发展,但金却受到了冷遇,一直到 1976 年以后它才重新抬头。无独有偶的是,在加拿大、美国、澳大利亚、南非等主要产金国家,由于金价的下降(在 30 年代为 20 美元/盎司<sup>1)</sup>,以后略有上升,在 60 年代为 35 美元/盎司),因此金矿事业一蹶不振,金矿山成批关闭或减产。金矿地质和地球化学研究长期停滞不前;在 60 年代,人们对金矿成矿规律、形成条件、控矿因素等方面的认识还停留在 30 年代的水平。当时,大部分已知岩金矿床被认为是高温岩浆气液矿床。

60 年代末,美国解除了国家对金价的控制,金的价格迅猛上升(目前大致维持在 400 美元/盎司上下)。同时,其它金属及非金属市场价格总的趋势却是下降。这就大大刺激了西方国家矿业公司对金矿的寻找、开拓、提炼工作的开展。仅以 80 年代为例,在世界范围内发现的超大型金矿床(储量超过 100t) 占有同期发现的超大型金属矿床半数以上。以金矿床新类型的开拓为例,则自 60 年代末卡林金矿被发现的 20 年中,仅在美国内华达州被开拓的卡林型金矿床已在 40 个以上;矿床被发现和开拓速度之快,在矿业史上是罕见的。近 10 年来我国的黄金找矿及开拓事业也有较快的发展。

20 年来世界范围内大量岩金矿床的发现与开发,新的成批测试实验数据的积累以及现代成矿理论对金矿床的运用等,深化了人们对金的成矿模式、成矿的地质及物理-化学条件的认识。近几年来,几乎每年都召开全球性的金矿床学术讨论会,而在各种地质期刊中有关金的论文数量与日俱增。在找金的大热潮中,人们十分需要集其大成而又较概略地反映当代金矿地质和金的地球化学水平的论著。它既是找矿评价与理论钻研的产物,又可以反过来指导后者。

刘英俊教授等著的《金的地球化学》一书正合乎上述要求。作者前不久曾出版了《元素地球化学》一书,它涉及到众多元素,也包括了金。《金的地球化学》是在《元素地球化学》基础上高度深化的产物。

我相信,如果找金和作金矿科研的同志能人手一册,必要时读读,有空时翻翻,将会得益匪浅,起码可以长些知识(如金的地球化学性质并不象人们想象的那样稳定,金是在一定条件下相对活泼的元素),对找矿与成矿理论的了解也有好处。

涂光炽

1988 年 10 月 27 日

1) 1 盎司(金衡)=31.103 g,下同。

• i •

## 前 言

黄金在国民经济中占有突出重要的地位。黄金矿产的研究一直是地质科学中的一个重点课题。世界上无论是发达国家还是发展中国家,都以极大的注意力和采取一系列措施,积极进行金矿地质科研和找矿活动。80年代以来,一些大型金矿的相继发现,更新了人们对金矿成矿理论的原有认识,出现了新的思路和概念,改进和运用了许多找寻金矿的新技术、新方法,使整个世界进入了一个研究黄金矿产和大力开发黄金的新高潮。

我国产金和应用黄金的历史都很悠久。解放后,特别是近十几年来,我国的黄金事业出现了前所未有的蓬勃发展的新局面。但是我国的黄金地质研究比较薄弱,远不能适应黄金生产大发展的需要。鉴于迄今为止有关金的地质论著均属于矿床学方面,在我国尚没有一本能反映当今国内外关于金的地球化学研究所取得的最新成就和水平的书籍。因此,特著写本书,以期能推动金矿地质研究的深入开展,并在当前黄金地质找矿的热潮中,发挥其积极的作用。

作者自70年代后期,开始从事黄金矿床的地球化学研究,对金的地球化学积累了较多的实际资料,本书可说是10年来有关金矿研究工作的总结。书中将不仅反映当代国内外金的地球化学研究的最新成就,而且在提供金的大量地球化学数据资料的基础上,着重提出作者在结合我国地质实际,长期进行金的地球化学研究中所形成的新见解和学术观点,以与国内外同行共同切磋、商讨。

在研究工作和本书撰写过程中,得到了国家自然科学基金会的经费资助,南京大学校领导 and 徐克勤等教授的热情关怀。涂光炽教授在百忙中审阅了部分文稿,得到甚多学术启迪,特别令人高兴的是,他在繁忙的公务中,乐于为本书作序,对作者鼓励极大;全书初稿完成后,承蒙李文达、杨敏之、赵斌等教授进行了审查,提出了许多宝贵意见并分别写了评议和出版推荐书,谨向他们致以深切谢意。

野外地质调查中,得到了地质、冶金、有色和黄金武警等系统所属队、所、矿山的大力帮助和支持;同时,本书是一项集体劳动的成果,南京大学地球科学系和教研室诸同事以及本专业广大研究生和大学生给予了协助和提供了有关资料;徐富林同志清绘书内所附图件,在此一并致以衷心谢忱。

由于金的地球化学相当复杂,涉及方面很多,许多问题尚待进一步深入研究探讨,加以时间和个人水平所限,因此书中缺点错误定所难免,恳祈读者批评指正。

作者 1988年12月20日

# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 序 .....                    | i   |
| 前言 .....                   | ii  |
| 第一章 绪论 .....               | 1   |
| 一、黄金的应用 .....              | 1   |
| 二、黄金的产量 .....              | 1   |
| 三、黄金的资源 .....              | 2   |
| 四、金的地球化学研究概况 .....         | 3   |
| 五、蓬勃发展中的我国黄金地质事业 .....     | 5   |
| 第二章 金的物理-化学性质和分析测定方法 ..... | 8   |
| 一、金的同位素 .....              | 9   |
| 二、金的物理特性 .....             | 10  |
| 三、金的主要化学性质 .....           | 11  |
| 四、金的主要化合物及其性质 .....        | 17  |
| 五、金的分析测定方法 .....           | 29  |
| 第三章 金的矿物及其晶体化学和矿物化学 .....  | 36  |
| 一、金在自然界中的赋存状态 .....        | 36  |
| 二、金的自然元素合金矿物 .....         | 40  |
| 三、金的碲化物和硒、硫化物矿物 .....      | 48  |
| 四、自然金和金-银系列矿物 .....        | 54  |
| 五、金成色的变化及其影响因素 .....       | 60  |
| 六、自然金中的杂质元素 .....          | 65  |
| 七、金矿黄铁矿的标型特征 .....         | 67  |
| 第四章 金在太阳系中的分布 .....        | 75  |
| 一、太阳系的金丰度 .....            | 75  |
| 二、陨石中金的分布 .....            | 76  |
| 三、月球中金的分布 .....            | 81  |
| 四、地球的金丰度 .....             | 88  |
| 五、金在太阳系物质中的分配 .....        | 93  |
| 第五章 火成岩及岩浆作用中的金 .....      | 95  |
| 一、金在火成岩中的分布趋势 .....        | 95  |
| 二、超基性岩类中的金 .....           | 98  |
| 三、基性岩类中的金 .....            | 100 |
| 四、中酸性岩类中的金 .....           | 101 |
| 五、华南花岗岩类中的金分布 .....        | 102 |
| 六、太古代地盾中花岗岩类的金分布 .....     | 104 |
| 七、火成岩主要造岩矿物和副矿物中金的分配 ..... | 105 |
| 八、金在硅酸盐熔融体系中的地球化学行为 .....  | 109 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第六章 沉积岩及表生作用中的金 .....        | 123 |
| 一、金在水圈中的分布 .....             | 123 |
| 二、金在大气中的含量 .....             | 126 |
| 三、金在土壤中的分布 .....             | 126 |
| 四、金在近代沉积物和风化产物中的分布 .....     | 129 |
| 五、风化过程中金的地球化学活动性 .....       | 130 |
| 六、金在表生作用中的迁移 .....           | 134 |
| 七、金在成岩过程中的活化转移 .....         | 138 |
| 八、金在沉积岩中的分布趋势 .....          | 140 |
| 九、金在土壤和风化壳中的沉淀富集 .....       | 143 |
| 十、硫化物矿床氧化带中的金 .....          | 145 |
| 十一、富含赤铁矿、褐铁矿和黄铁矿沉积岩中的金 ..... | 148 |
| 十二、黑色岩系和含碳沉积物中的金 .....       | 150 |
| 十三、含金砂、砾岩和砂金矿 .....          | 151 |
| 十四、含金浊积岩 .....               | 153 |
| 十五、海底火山含金沉积和热泉含金沉积 .....     | 154 |
| 第七章 金的胶体化学和生物有机地球化学 .....    | 155 |
| 一、金溶胶的形成 .....               | 155 |
| 二、胶体金的一般性质 .....             | 156 |
| 三、电解质对金溶胶的稳定和聚沉作用 .....      | 159 |
| 四、金在生物中的分布 .....             | 164 |
| 五、生物对金的吸收和浓集 .....           | 166 |
| 六、金的氨基酸络合物 .....             | 168 |
| 七、金的富里酸络合物 .....             | 169 |
| 八、硫的生物循环和金的表生迁移 .....        | 169 |
| 九、生物生氰过程和金的表生迁移 .....        | 170 |
| 十、金的生物化学成矿作用 .....           | 171 |
| 第八章 变质岩及变质作用中的金 .....        | 173 |
| 一、金在变质岩中的分布 .....            | 173 |
| 二、金在变质热液中的活化转移 .....         | 180 |
| 三、混合岩化花岗岩化过程中金的活化转移 .....    | 182 |
| 四、与金矿化有关的变质热液性质 .....        | 184 |
| 五、变质热液成矿作用中金的物质来源 .....      | 187 |
| 六、变质热液作用中金与贱金属的分离 .....      | 190 |
| 第九章 含金建造的地球化学 .....          | 195 |
| 一、含金建造的基本概念 .....            | 195 |
| 二、含金建造的类型及其演化序列 .....        | 196 |
| 三、含金建造的识别标志 .....            | 202 |
| 四、华南地区含金建造的特征和分布 .....       | 206 |
| 五、金在含金建造中的分布 .....           | 215 |
| 六、含金建造的微量元素分布特征 .....        | 228 |
| 第十章 金的热液成矿作用地球化学 .....       | 233 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 一、热液的主要来源和金矿化的关系 .....        | 233 |
| 二、与金矿化有关的成矿热液性质 .....         | 235 |
| 三、金在热液中的主要迁移形式 .....          | 244 |
| 四、金在热液作用中的沉淀富集 .....          | 249 |
| 第十一章 金的地球化学旋回 .....           | 258 |
| 一、金的地球化学旋回的若干特征 .....         | 258 |
| 二、金的内生作用地球化学循环 .....          | 261 |
| 三、金的表生作用地球化学循环 .....          | 264 |
| 四、金在地球化学旋回中富集成矿的时空演化特征 .....  | 266 |
| 第十二章 金矿床的同位素地球化学 .....        | 272 |
| 一、金矿研究中的同位素地质年代测定 .....       | 272 |
| 二、轻元素稳定同位素在各种主要岩类中的组成特征 ..... | 275 |
| 三、热液的同位素组成变化因素 .....          | 278 |
| 四、我国金矿床的同位素组成和分布特征 .....      | 279 |
| 五、金矿成矿溶液来源及其同位素组成特征 .....     | 283 |
| 六、稳定同位素地球化学在金矿研究中的应用 .....    | 285 |
| 第十三章 金的实验地球化学 .....           | 293 |
| 一、金的溶解度实验 .....               | 293 |
| 二、金的热液淋滤实验 .....              | 300 |
| 三、金在热泉条件下的沉淀动力学实验 .....       | 304 |
| 四、金的表生地球化学迁移-沉淀实验 .....       | 308 |
| 第十四章 金矿床的类型和成因模式 .....        | 313 |
| 一、金矿床的类型划分依据 .....            | 313 |
| 二、我国金矿床分类的特点 .....            | 317 |
| 三、成矿能量释放方式与金矿床端员类型的划分 .....   | 319 |
| 四、含金建造与金矿床分类和成因的联系 .....      | 323 |
| 五、内生金矿床的成因模式 .....            | 327 |
| 第十五章 金矿床的勘查地球化学 .....         | 349 |
| 一、金矿找矿中的勘查地球化学方法 .....        | 349 |
| 二、金矿床的原生地球化学异常 .....          | 361 |
| 三、金矿床的次生地球化学异常 .....          | 365 |
| 四、金矿床的综合地球化学找矿标志 .....        | 368 |
| 参考文献 .....                    | 374 |

# 第一章 绪 论

## 一、黄金的应用

黄金在远古时代就已被发现和利用。由于其特殊的物理-化学性质——不氧化和制成品美观,从而使人们在人类社会出现初期,即组织开采并用于日常生活。现代黄金的应用,是建立在它的化学稳定性、很高的导电性、光泽、很大的密度和延展性上的。

黄金在医学上的应用越来越广,如应用于牙科治疗等。近年来,放射性金被广泛应用。在石油化工中金作为催化剂代替铂;尖端工业上黄金用作焊接和电工仪表;黄金的各种合金形式,在机械中的应用正逐年推广。

目前,大量的黄金是作为货币基金而被储存。由于黄金至今仍是国际贸易结算手段和货币使用的基础,因此,在国际上,一个国家的货币若没有黄金做后盾,那么信誉就成问题。黄金对加强国力起着很大作用。所以各国都设法增加自己的黄金储备。各国政府的储备以美国为最多,其余依次为联邦德国、瑞士、法国、意大利、苏联、荷兰、比利时等国。

根据 1982 年统计,黄金的用途如表 1-1 所列。

表 1-1 黄金在西方国家的用途(%)<sup>a)</sup>

| 国家<br>用途  | 美 国 | 日 本 | 欧洲共同体国家 | 其它西方国家 |
|-----------|-----|-----|---------|--------|
| 首饰        | 44  | 44  | 76      | 73     |
| 电子仪器      | 19  | 30  | 5       | 1      |
| 牙科        | 8   | 12  | 7       | 2      |
| 其它工业和装饰用途 | 17  | 14  | 3       | 1      |
| 铸币及大宗投资款项 | 12  | 1   | 9       | 23     |

a) 据地质科技参考资料,1985 年第 28 期。

黄金的价格与其产量和需求变化有密切联系。近十余年来,金的价格变化较大,但不管怎样,黄金的支付能力在不断提高。

## 二、黄金的产量

到 1985 年底为止,世界黄金总产量累计为 125 000t (Woodal, 1988)。1984 年全世界总共生产黄金约 1 437t。这些产量主要来自南非、苏联、加拿大、巴西、美国、澳大利亚、菲律宾、巴布亚新几内亚、津巴布韦和加纳等国(表 1-2)。其中产量最大的是南非和苏联,分别为 690t 和 286t, 合计占世界总产量 68% 左右。我国也是重要的生产黄金的国家,近年已进入世界产金国的前列。

西方国家 1986 年产金 1 281.8t, 预计到 1990 年产量达 1 500—1 600t。东欧、苏联

表 1-2 世界主要产金国的黄金产量 (t)

| 国家或地区       | 1970    | 1980  | 1981  | 1982    | 1983  | 1984  | 1985 <sup>a)</sup> |      | 1986 <sup>a)</sup> |      | 1987 <sup>b)</sup> |      | 1988 <sup>c)</sup> |      |
|-------------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|--------------------|------|--------------------|------|--------------------|------|--------------------|------|
|             |         |       |       |         |       |       | 产量                 | %    | 产量                 | %    | 产量                 | %    | 产量                 | %    |
| 南非          | 1 000   | 675   | 662   | 664.1   | 679.9 | 689.9 | 674.16             | 45   | 690.30             | 44.5 | 690.30             | 43.4 | 690.30             | 43.1 |
| 苏联          | 346.7   | 290   | 300   | 295.4   | 283   | 286.1 | 273.63             | 18.6 | 279.85             | 18.1 | 286.07             | 18.0 | 289.18             | 18.1 |
| 加拿大         | 74.9    | 48    | 55    | 64.7    | 70.9  | 77.2  | 90.17              | 6.10 | 105.72             | 6.8  | 111.94             | 6.9  | 111.94             | 7.0  |
| 巴西          | 9.0     | 35    | 38    | 34.8    | 44.1  | 59.7  | 46.64              | 3.10 | 49.75              | 3.3  | 55.97              | 3.5  | 55.97              | 3.5  |
| 美国          | 54.2    | 30    | 40    | 45      | 57.4  | 58.7  | 74.62              | 5.0  | 102.61             | 6.6  | 118.16             | 7.4  | 124.38             | 7.7  |
| 澳大利亚        | 19.5    | 17    | 18    | 26.7    | 29.2  | 32.2  | 46.64              | 3.1  | 52.86              | 3.3  | 55.97              | 3.4  | 55.97              | 3.4  |
| 菲律宾         | 18.7    | 22    | 26    | 25.9    | 25.5  | 28.3  | 其它 国家              |      | 其它 国家              |      | 其它 国家              |      | 其它 国家              |      |
| 巴布亚新<br>几内亚 | 0.7     | 14.1  | 18    | 17.7    | 18.1  | 22.1  | 202.12             | 13.7 | 199                | 12.8 | 202.12             | 12.7 | 199                | 12.5 |
| 津巴布韦        | 15      | 11    | 12    | 13.3    | 13.3  | 13.3  |                    |      |                    |      |                    |      |                    |      |
| 加纳          | 21.9    | 13    | 14    | 10.2    | 9.4   | 10    |                    |      |                    |      |                    |      |                    |      |
| 世界总计        | 1 638.3 | 1 288 | 1 323 | 1 337.2 | 1 385 | 1 437 |                    |      |                    |      |                    |      |                    |      |

a), b), c) 据中国地质报 1986.10.17 公布的预测统计资料; %指占世界总产量百分数。

等国以及我国的年产量估计为 350—400t。因此,到 2000 年前后,世界黄金的年产量将达 2 000t 左右 (Woodal, 1988)。主要产金国或地区 1986 年年产量和近期、未来的年产量估计值如下: 南非 1986 年年产量 640t,到 2000 年将达 800t;加拿大 1986 年年产量 107t,预计 1990 年将进一步增长;美国 1986 年年产量 79t, 预计 1990 年将达 150t, 澳大利亚 1986 年产金 75t, 预计 1990 年前将达 100t 年产量。 预计苏联在 1990 年将增加到 310—500t。

其它地区最有发展前景的是环太平洋带(包括中美洲,美国和加拿大除外),1986 年该地区产金 200t,近年来,该地区发现了许多浅成热液金矿,黄金生产将有很大发展。巴西的金矿业近年发展迅速,产量将会继续增加。在非洲(除南非外),津巴布韦、加纳和扎伊尔是主要产金国,近年来的年产量保持在 50t 左右,由于政府鼓励私人企业采金,预计年产量也肯定会增加。亚洲的其它产金国年采金约 30t,主要分布于印度和朝鲜南部等地区。

黄金工业的历史是以早先的开采砂矿,并随着砂矿的枯竭而向开采岩金矿过渡为特征的。在 19 世纪中叶以前,砂金是金的重要来源,而现在在资本主义国家则仅有 10% 的金采自砂矿,代之为目前各种各样的原生矿床类型。

### 三、黄金的资源

有关世界产金国的资源储备的资料是不完全的。根据英国《矿产手册》1984 年公布的世界黄金储量为 34 245t,资源量为 71 500t。储量分布情况如表 1-3。

由表 1-3 可见,世界的黄金储量(中国除外)主要分布在南非、苏联、美国、加拿大、巴西等国,以上五个国家金的储量占世界总储量的 84.3%,其中以南非和苏联储量最多,占世界总储量的 70% 以上。

世界黄金储量在近 10 年中的增长,是由于将贫矿列入开采以及所有采金国都加强了金矿地质勘探工作。据估计,世界现有的黄金储量使用年限为 27 年左右。 应该指出的

表 1-3 世界黄金储量分布

| 国家或地区 | 黄金储量<br>(t) | 所占百分比<br>(%) | 国家或地区 | 黄金储量<br>(t) | 所占百分比<br>(%) |
|-------|-------------|--------------|-------|-------------|--------------|
| 南非    | 18 040      | 52.7         | 澳大利亚  | 560         | 1.6          |
| 苏联    | 6 220       | 18.2         | 津巴布韦  | 465         | 1.3          |
| 美国    | 2 645       | 7.7          | 日本    | 220         | 0.6          |
| 加拿大   | 1 245       | 3.6          | 加纳    | 125         | 0.4          |
| 巴西    | 715         | 2.1          | 其它    | 3 390       | 9.9          |
| 菲律宾   | 620         | 1.8          | 世界总计  | 34 245      |              |

是,由于黄金价格的增长速度高于成本和生产技术的改进,大多数目前开采的金矿山应能继续生产,一直能开采到超过其公布的储量。黄金生产更多地是取决于黄金价格和管理部门及政府的政策,而与产金区的黄金自然实存量关系并不大。

从近年来的地质勘探和科学研究情况来看,我国的黄金资源并不贫乏,而是资源远景良好,是一个极有潜力的黄金大国。

#### 四、金的地球化学研究概况

金是一个具有相当复杂的地球化学行为的典型微量成矿元素,它与一些常见的矿种有较大的区别。同时金又是一个成矿时代最早、成矿富集期延续最长、成矿作用最多多样化的贵金属,其矿床形成与地球、地壳的演化关系密切,因而对其研究长期引起广大地球化学和矿床地质工作者的普遍重视。

由于金的地球化学研究的困难性以及金在国民经济中的重要地位,因此早期有关金的论著主要限于金的矿床学方面,并发表一些有关金的分布的若干零星资料。近年来,由于测试手段的改善和金矿热潮的兴起,才涌现了较多有关金的地球化学方面的论述,并出现了 Boyle (1979) 的《金的地球化学及其矿床》为代表的系统专著。目前,虽然对金的地球化学和成矿特点有一定了解,但与其它重要成矿元素相比,则仍十分薄弱,在不少方面尚存在着模糊认识和分歧。

以下就金的定量地球化学和成矿地球化学两个有关金的地球化学的最基本问题的研究情况,作些回顾和介绍,从中可以了解到金的地球化学的研究概况。

金的定量地球化学研究,即测定金在各种天然物质中的分布量,长期来一直在金的地球化学研究中占着很大比重和重要地位。这方面的研究,乃是金的地球化学研究的基础。

有关金的定量地球化学研究,大致可划分为三个历史阶段。

(1) 初期阶段 从现代地球化学的诞生到本世纪 20 年代。在该阶段早期,开始对各种天然物质的金含量进行测定;在晚期,则进行了较系统的测定和归纳统计,并首次半定量地确定了金的地壳丰度为几个 ppb。由于当时分析手段和取样范围的限制,未能提出定量的地壳丰度值。Clark 等的《地球化学资料》(1924)的发表,标志了该阶段的完成。在该阶段中,Haber(1927, 1928)最早对海水中的金含量进行了广泛的研究,并得出了较精确的海水的金丰度。

(2) 完善阶段 从本世纪 30—60 年代。这是地球化学奠基和蓬勃兴起的阶段,地

球化学的重要经典著作都是在该时期出现的。在这一阶段中,金的定量地球化学研究取得了重大进展。继费尔斯曼首次提出金的地壳丰度为 5ppb 之后, Goldschmidt(1954); Виноградов (1962); Taylor(1964)和黎彤等(1965)分别提出了 5, 4.3, 4 和 3.5ppb 的克拉克值。至此,基本确定了金的地壳丰度为 3.5—4ppb。同时还基本了解了金在陨石中的分布状况,并得出了金在主要岩类中的平均含量 (Turekian *et al.*, 1961; Виноградов, 1962)。

(3) 现代发展阶段 自 60 年代起至今。进入该阶段后,金的定量地球化学研究无论在测试手段的改进,研究范围的扩大,数据质量的提高和成果发表数量的增加等方面,都远胜于完善阶段。其成果对近代金的地球化学和金矿床的成因研究以及其它领域的研究进展均有重大影响。该阶段有关金的定量地球化学研究的重大成果有以下几点:

中子活化技术测定微量金获得进一步普及,其它微量金分析方法也得到了改善,从而大大提高了金的分析测定的精确度和灵敏度;对月球样品进行了大量测试,提出了月球和月核的金丰度;海洋地质和海洋成矿作用研究的进展,便得到一批大洋岩石和沉积物的金含量数据,弥补了以往计算克拉克值主要依据陆壳样品的局限性,得出了一些新的有关金在岩石中分布规律的认识;由于前寒武纪地质、深部地质和宇宙化学的进展获得的新资料,得到了依各种不同方法计算的地幔和地核的金丰度;对我国、加拿大、非洲南部、澳大利亚等地与金矿有关的沉积和火山-沉积建造的金含量分布进行了大范围的系统研究,获得了有意义的金的区域地球化学资料。

金的成矿地球化学包括金的各种作用地球化学,是金的地球化学中另一个重要基础研究领域,它是金矿成因理论赖以建立的主要依据。对金的成矿地球化学来说,很显然,其发展和变革乃受约于 200 年来地质学和矿床学认识观演变的深刻影响。回顾起来,该领域也大致可分为以下三个大的发展阶段。

(1) 初级阶段 从 19 世纪下半叶到 19 世纪末。此时,地质学本身正处于早期肉眼观察和现象推理的原始阶段。金与其它金属连同各种岩石的成因一起,在成因上分为水成论和火成论两大派别。

(2) 岩浆论阶段 主要为 20 世纪上半叶期间。在该阶段中,大批著名的矿床学家将大多数原生金矿床的成因都以岩浆热液理论来解释。他们有的认为金来自基性岩浆的结晶分异作用,有的主张较酸性的岩浆是金的成矿来源。该阶段的最大特点是岩浆论作为金的成矿的主导思想,而其它理论(如侧分泌论),则几乎销声匿迹。但从 40 年代起,以花岗岩成因的论战为开端,金和其它重要成矿元素的矿床成因岩浆论即开始受到怀疑和批判,进入 50 年代后则逐渐让位于具有更多“水成论”色彩的新成矿理论。在岩浆论阶段,金的成矿地球化学研究主要偏重于岩浆热液作用,对其它作用过程的地球化学,则研究甚少。

(3) 现代地球化学研究阶段 从 50 年代起到目前。虽然在本阶段的早期(50—60 年代),金矿成矿作用的研究特点是侧分泌论占显著地位,并与花岗岩化作用一起,进行解释有关金矿特别是绿岩带金矿的成因。但是现代成矿地球化学和矿床学领域的重要特征和学术指导思想,乃是经典岩浆论让位于多元化(多来源、多阶段、多成因)成矿理论。该阶段发展到当前时期,尤其近十余年来,可以说是金矿成矿研究史上研究气氛最活跃、研究规模最宏大、研究手段最多而先进、理论依据最雄厚的高潮时期。这主要是由于地质科

学和地球化学大量涌现的新成果、新概念和世界性的黄金需求热潮造成的。在这方面,金的定量地球化学研究成果和一些重要的金的地球化学分支领域(如同位素地球化学、稀土元素地球化学、实验地球化学和宇宙化学等)的发展,对金的成矿地球化学研究及各种新成矿理论的形成起着重要作用。这些令人耳目一新的测试数据和实验资料,深刻地影响了人们对金的成矿地球化学研究和金矿床成因研究中的思考方式和观念变革。

当代金的成矿地球化学和金矿成因理论研究具有以下特点和成果进展:

强调早期海底火山-沉积作用、变质分选作用、陆源碎屑沉积作用、热泉及其沉积作用和其它表生、共生过程在提供成矿物质来源方面的重要性,即越来越重视金的变质作用和各种沉积作用的地球化学研究;对矿源层(岩)和金的沉积建造给予了较大的重视,它们在后期地质过程中易于被萃取、活化而提供金源,认为金矿就是在这些矿源层(岩)中或其附近,通过各种中间环节,如区域变质和混合岩化、地下水或热卤水、火山作用等,在有利情况下逐步富集而形成的;金的成矿实验表明,金从矿源层(岩)发生活化和迁移的主要形式,是在不同酸碱度、各种成因的热水溶液内,以各种金络合物(主要呈硫、氯和氢氧根络合物)的形式进行的,其次是低温水溶液中的金络合物、胶体、极微细粒乃至机械碎屑,当介质的物理-化学条件改变时,金则产生沉淀富集;金矿成矿的共同条件与形成机制,系包括矿源、能源、介质和空间几方面的基本成矿条件,具备这些条件才有可能形成金矿,各项基本条件的差异,则是形成不同类型和不同规模金矿床的根据,据此现已建立了许多重要金矿类型如太古代绿岩带金矿、浅成热液金矿、卡林型金矿、兰德型金矿、含金块状硫化物矿床、红土型金矿和板岩带型金矿等的成矿概念模型;对火成岩类型来说,继续重视超镁铁质岩和镁铁质岩对金矿成因的重要性,尤其是对太古代的独特岩类——科马提岩的地球化学研究。对花岗岩类和中酸性次火山岩,在许多成矿模式中被作为使金产生活化转移的重要机制之一;此外,在金矿成矿研究中,还强调深大断裂和韧性剪切带以及有关的构造扩容空间对矿床的控制作用,较为重视构造运动机制及区域和局部的构造地球化学研究;同时,强调金矿形成的长期性、继承性和多阶段性;并且在全球范围内广泛使用勘察地球化学找金方法,并与成矿地球化学研究结合,建立相应的金矿找矿模式。

## 五、蓬勃发展中的我国黄金地质事业

我国是世界上产金最早、使用黄金的历史最久的少数国家之一,对黄金地质研究工作也有较长时间。解放后,特别是近十几年来,在黄金的地质科研和找矿勘探中取得了重大成就,发现了一些新的金矿类型,黄金生产发展很快,我国的黄金事业正呈现出一派欣欣向荣的局面。但是,我国的金矿工作起步较晚,系统的黄金地质研究还比较薄弱,尚不能适应我国“四化”建设的发展需要。当前,国民经济建设的新形势向我们提出了更高的要求,目前我国黄金无论是产量还是储量都还不够多。因此,加强黄金矿床地质的研究,积极开展金矿的普查勘探,仍是我国广大地质工作者的一项光荣使命和迫切任务。

我国政府对黄金地质工作十分重视,制订了一系列奖励政策,提出了黄金发展的战略目标,采取了相应措施,认真贯彻落实。广大地质工作者正热烈响应党和国家关于科技人员参加国家黄金事业的号召,以极大的积极性投身于黄金生产大发展的洪流中来。目前,正进入黄金发展的新时期,几乎全国各地质研究单位和地质院校均有金矿研究专题,均争

相为我国的黄金事业做出自己的贡献。

从地质工作的角度来看,加速地质找矿和金矿普查勘探,仍是发展我国黄金事业的关键。为使我国黄金资源开发具有重大的突破和开拓性的进展,重要的任务是加强基础地质研究,提高金矿的找矿理论水平,狠抓大型、特大型金矿类型的成矿规律研究,建立新的更多的黄金基地。

作为地质科学的新兴分支——地球化学,在金矿的地质研究中,可以起着独到的重要作用。由于金在地壳中的含量十分低微,且分布极不均匀,因此对金矿床成矿的许多基本问题的研究,在很多场合下,均借助于以现代分析测定和实验为手段的地球化学方法得以完成。

当前,有关金矿的基础地质研究,需要进行各区域内金的本底调查,查明矿质来源,研究成矿作用中有利于金的迁移、沉淀的条件,以及确定矿床的找矿标志,这在很大程度上均属于地球化学的研究内容。

金矿不同于其它矿种的特点之一,是其层控性质十分明显,目前多数人都同意这样的观点,即在金的矿化集中区内,存在有含金丰度较高或金的赋存形式易于活化迁移的矿源层(岩),它们是金矿形成的重要物质来源,许多金矿均直接或间接与之相关。因此,应注重研究金的矿源层(岩)或含金建造地球化学,在金矿的区域成矿条件分析、成矿区域和找矿工作中都应充分考虑和重视金的成矿这一最根本的地层围岩前提。同时,从目前已有资料来看,金矿类型尚未定型,金矿对岩石几乎无什么选择性,各类岩石均产出金矿,无论是变质岩、沉积岩还是火成岩中都可有甚至大型矿床的赋存。因此,通过岩石金本底的调查,还将有可能发现具有我国地质特色的新的重要金矿类型。

现知金在适宜的地质作用中,表现有一定的活动性,金在不同介质条件下的溶解度和迁移富集的物理-化学环境的研究,以及相应地对金矿床的地球化学实验,有助于对金的成矿作用本质和成矿规律的深入了解。每一类型金矿床都具有特定的形成条件和地质地球化学特征,系统深入地研究成矿过程中金的地球化学行为和各类金矿床中金的地球化学,乃是建立地区性或全国性成矿模式的基础。此项研究对金矿来说,无论在成矿理论水平的提高方面还是找矿实践方面,都具有重要意义。

还应指出的是,无论是从全球范围还是主要产金国来看,金矿床普遍在产出上具有成群、成带分布的特点。例如加拿大安大略省北部金矿带、非洲南部金矿带和澳大利亚西部金矿带等都是举世闻名的实例。我国的胶东、东秦岭和粤西云开等也同样是著名的金矿化集中区。这清楚地显示出金的地球化学省的存在,金在这些地球化学省内的成矿,则是有规律可循的。从而表明结合大地构造单元和区域成矿背景的区域地球化学研究的必要性。依据区域地球化学资料编制的成矿区划图件,对于了解全国或大区域金矿资源远景预测和指导找矿工作,起着直接和重要的作用。在最有远景的金地球化学富集区内,加强工作部署和深入研究,将会导致新矿床的发现,取得显著的找矿效果。

在金矿找矿工作中,业经实践证实,地球化学找金即所谓“化探找金”,是一种经济、直接、有良好成效的找矿方法。目前已知各类金矿床都伴生有原生和次生地球化学异常,根据这两种地球化学异常,可以建立直接的金矿找矿模式。当前的任务是,除了对应用尚不够广的已有各种化探方法进行研究、试验和扩大使用外,尤为重要的是要不断开辟新领域,加强对化探找金新方法的研究和应用,并与其它现代勘查手段紧密配合。在蓬勃发展

中的我国黄金地质研究工作中,一个地质、化探、物探和遥感等多学科协同作战、发挥各自学科优势的大好局面正在形成。

总之,我国地域辽阔,黄金的成矿地质条件优越,黄金的潜在资源丰富,只要齐心协力,加强工作,随着科学研究的不断深入和找矿勘探工作的广泛开展,无疑将会发现更多、更大、更富的金矿床。我们完全有信心在不久的未来,我国将步入世界黄金大国之列。

## 第二章 金的物理-化学性质 和分析测定方法

几乎从人类的文明历史一开始,人们对金的一些简单物理性质就已有所认识,例如其颜色、硬度和高度的可塑性及延展性等。目前已对金的各种物理性质作了广泛的测定和相当深入的研究。但是在金的化学性质方面,由于长期以来金主要只限于作为货币和首饰,因此与其它发现较早的元素相比,金化合物的应用和研究较少。可以说,自从古代炼金术士们消失之后,金的化合物一直没有象其它稀有金属那样被详细研究过。长期以来,金的化学研究主要限于二次配位的一价金和四次配位的三价金化合物,以及一些合金或金属互化物。

20 世纪 50 年代以后,这种状况开始有所改变,金的化学研究有了较大的进展。例如一价和三价金的高配位数络合物已得到研究,并发展了新的二价金和四价金的化学。在金的有机化学方面进展较明显,制备和合成了许多新的络合物和簇状化合物。由于各种现代波谱方法(红外光谱、拉曼光谱、核磁共振光谱、穆斯堡尔光谱和核四极共振光谱等)精细结构分析技术的引用,因此已对一些化合物和络合物的键性和结构等性质有了进一步的了解。

金的化学研究的进展,为地球化学研究提供了新的基础资料和新的研究手段及思路。然而,金的化学研究毕竟完全是在实验室中,在人为控制试剂浓度和其它有关实验条件的情况下进行的。这与我们所关心的金在自然环境中的地球化学条件经常相差甚远。因此,为了能将已有化学成果正确地应用于地球化学研究之中,就要求我们在利用有关金或其它元素的化学研究资料时,应结合地质环境的各种边界条件,着重注意以下若干方面:

1) 有关化合物合成和分解的物理-化学条件,主要包括温度、压力和反应介质的性质——pH 值和  $Eh$  值等,以及反应所要求的试剂浓度,利用这些参数可以判断和预测有关化合物在自然条件下存在的可能性。

2) 有关化合物生成的反应物与该化合物分解产物的性质和稳定条件,它涉及有关元素的存在形式转换过程,以及转换中所要求的条件。

3) 有关元素及其化合物在水中的溶解度和与水的反应情况,水在自然界中是最重要的溶剂。

4) 有关元素及其化合物与氟、氯、氧、硫和二氧化碳等矿化剂,以及它们在自然界中的常见伴生元素、伴生化合物和天然常见有机物之间的反应情况,这些可能与该元素在自然界中的迁移、沉淀过程有关,有时在矿床成因方面或许也具有潜在的研究意义。

5) 有关元素、化合物及其反应的化学热力学和动力学参数,这是地球化学研究中用于热力学计算,从而对地球化学过程进行论证和预测的基本资料。

根据上述考虑,在对金的化学特征作一般性介绍的同时,本章旨在突出那些与金的地

球化学行为可能有关的化学性质,以期通过对这些来自化学实验室的研究成果的介绍,能为金的地球化学研究提供一些必要的背景知识。同时,也将涉及那些与金的主要应用、提取和测试有关的物理特征和化学性质,有时也顺带介绍一些常识性知识。与金的天然矿物有关的内容,则主要在第三章中讨论。对于化学知识了解较少的地质工作者来说,欲系统掌握金的地球化学,这些基础是必须具备的。

## 一、金的同位素

金在自然界里只有一种同位素  $^{197}\text{Au}$ ,它由 79 个质子和 118 个中子组成。另外,目前已发现了 29 种金的人工同位素,它们的半衰期和衰变方式如表 2-1 所列。金的所有 30 种同位素中,只有  $^{197}\text{Au}$  是非放射性的,其原子量为 196.9666。

表 2-1 金的同位素

| 同位素 <sup>a)</sup>            | 半衰期     | 衰变方式 <sup>b)</sup>           | 衰变能(MeV) <sup>c)</sup> |
|------------------------------|---------|------------------------------|------------------------|
| $^{177}\text{Au}$            | 1.35s   | $\alpha$                     |                        |
| $^{178}\text{Au}$            | 2.65s   | $\alpha$                     |                        |
| $^{179}\text{Au}$            | 7.25s   | $\alpha$                     |                        |
| $^{181}\text{Au}$            | 11.55s  | $\alpha, \text{EC}$          |                        |
| $^{183}\text{Au}$            | 45.5s   | $\alpha$                     |                        |
| $^{185}\text{Au}$            | 4.3min  | $\alpha, \text{EC}$          |                        |
| $^{186}\text{Au}$            | 12min   | $\text{EC}, \gamma$          |                        |
| $^{187}\text{Au}$            | 8min    | $\alpha, \text{EC}$          |                        |
| $^{188}\text{Au}$            | 8min    | $\text{EC}, \gamma$          |                        |
| $^{189}\text{Au}$            | 29.7min | $\text{EC}, \gamma$          |                        |
| $^{189}\text{Au}^{\text{m}}$ | 4.7min  | $\text{EC}, \gamma$          |                        |
| $^{190}\text{Au}$            | 39min   | $\text{EC}, \gamma$          | 4.4                    |
| $^{191}\text{Au}$            | 3.2h    | $\text{EC}, \gamma$          | 2.0                    |
| $^{192}\text{Au}$            | 5.0h    | $\text{EC}, \beta^+, \gamma$ | 3.24                   |
| $^{192}\text{Au}^{\text{m}}$ | 3.9s    | $\gamma$                     |                        |
| $^{193}\text{Au}$            | 17.5h   | $\text{EC}, \gamma$          | 1.1                    |
| $^{194}\text{Au}$            | 39.5h   | $\text{EC}, \beta^+, \gamma$ | 2.51                   |
| $^{195}\text{Au}^{\text{m}}$ | 31.0s   | $\beta^+, \gamma$            | 0.318                  |
| $^{197}\text{Au}$            | 183d    | $\text{EC}, \gamma$          | 0.227                  |
| $^{196}\text{Au}^{\text{m}}$ | 9.7h    | $\gamma$                     |                        |
| $^{196}\text{Au}$            | 6.2d    | $\text{EC}, \beta, \gamma$   | 1.48                   |
| $^{197}\text{Au}^{\text{m}}$ | 7.5s    | $\gamma$                     | 0.409                  |
| $^{197}\text{Au}$            | 稳定      |                              |                        |
| $^{198}\text{Au}$            | 2.70d   | $\beta, \gamma$              | 1.374                  |
| $^{199}\text{Au}$            | 3.15d   | $\beta, \gamma$              | 0.46                   |
| $^{200}\text{Au}$            | 48.4min | $\beta, \gamma$              | 2.21                   |
| $^{201}\text{Au}$            | 26min   | $\beta, \gamma$              | 1.5                    |
| $^{202}\text{Au}$            | 30s     | $\beta, \gamma$              |                        |
| $^{203}\text{Au}$            | 55s     | $\beta, \gamma$              |                        |
| $^{204}\text{Au}$            | 4.05s   | $\beta, \gamma$              |                        |

a) m = 亚稳定态; b)  $\alpha$  =  $\alpha$  粒子发射, EC = 电子俘获,  $\beta^+$  = 正电子发射,  $\beta$  = 贝塔粒子(电子)发射,  $\gamma$  = 伽马辐射; c) 据 Johnson 等 (1973)。