

# 现代金矿成矿理论的若干进展

赵利青<sup>1</sup>, 李占芳<sup>2</sup>, 李志宏<sup>3</sup>, 郭俊华<sup>3</sup>, 袁茂森<sup>3</sup>

(1. 武警黄金地质研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 唐钢矿业有限公司 石人沟铁矿, 河北 遵化 064200; 3. 武警黄金第十二支队, 四川 成都 610036)

**摘要:**近十余年来, 现代金矿成矿理论研究取得了长足进展, 总结这些进展有助于开阔金矿研究和勘查思路。深入地研究了地球动力学背景对金矿成矿的控制, 建立了区域成矿学的基本理论, 提出了造山带型金矿的概念。岩浆热液和变质热液成矿理论获得了新的证据, 在金矿成矿作用过程中岩浆流体较普遍存在, 变质去挥发分作用所产生的大量热液是金矿成矿所需的低盐度流体。全球超大型金矿以中温热液型、浅成火山热液型金矿及砂金矿最为多见。从成矿系列理论发展到成矿系统理论, 强调了金与其他矿产资源之间的相互联系, 提出了铁氧化物型铜-金矿床和钨-锡成矿省内与侵入体有关的 2 种新类型金矿床。提出金的宇宙来源及撞击成矿理论。

**关键词:**金矿成矿理论; 地球动力学背景; 超大型矿床; 热液矿床; 撞击成矿

中图分类号: P618.51 文献标识码: A 文章编号: 1006-558X (2004) 02-0059-10

现代金矿成矿理论在全球构造与成矿<sup>[1]</sup>、深部过程与成矿<sup>[2]</sup>、超大型矿床研究<sup>[3~4]</sup>、流体成矿作用<sup>[5]</sup>、碰撞造山成矿<sup>[6]</sup>等方面取得了巨大进展。涂光炽<sup>[7]</sup>对上个世纪矿床事业进行了回顾, 翟裕生<sup>[8]</sup>对走向 21 世纪的矿床学做出了展望, 陈柏林<sup>[9]</sup>最近总结了金矿和金成矿作用的研究进展。在此笔者仅对金矿成矿若干重要进展进行论述, 这些进展对认识成矿理论和指导金矿勘查意义重大。

## 1 地球动力学背景是金矿成矿最重要的制约因素

板块构造的发展建立了超大陆旋回理论, 极大地推动了人们对地球演化历史的认识, 现在已经确定地质历史中存在过 2 个超

大陆, 即 1 300 ~ 900 Ma 的 Rodinia 和 200 ~ 180 Ma 的 Pangea 超大陆。板块的裂解、增生、俯冲、消减、走滑、碰撞等一系列地质作用极大地改变着地壳表层的面貌, 不同地质构造背景下可形成不同的矿床及矿床组合<sup>[10]</sup>, 同时矿床形成后可随地壳或地质体的运动而被改造 (包括抬升、剥蚀、消亡、掩埋、变形、变质、迁移或部分迁移等), 亦即对矿床的研究又扩展出对矿床形成后变化与保存的研究。

2 次大陆生长期间 (一是沿古生代 Gondwanan 边缘, 另一是 170 ~ 50 Ma 间的北太平洋洋盆) 形成的环太平洋同造山石英脉中集中了超过 42 亿盎司黄金<sup>[11]</sup>。长达 100 Ma 内数十个地体相对北美大陆西缘和欧亚大陆东缘的碰撞和增生, 形成了太平洋洋盆北部大量产出的晚侏罗世至始新世含金脉

收稿日期: 2003-12-23。李莉编辑。

基金项目: 中国科学院地质研究所与环境重大项目 (KZ951-B1-404) 基金资助

作者简介: 赵利青 (1965-), 男, 山西兴县人, 武警黄金地质研究所高级工程师, 博士, 从事金属矿产地质和找矿预测。



体。Gondwanan、北美、欧亚大陆边缘广泛分布的含金石英-碳酸盐岩脉,说明有大量流体的运移和集中<sup>[11]</sup>。岛弧形成过程中下部增厚地壳的熔融、板片旋转和伸展构造作用、板片窗相对弧前向海部分的向下俯冲都能提供产生成矿热液所需的热能<sup>[11]</sup>。

翟裕生<sup>[12]</sup>建立了区域成矿学的基本理论框架,其研究思路:以唯物辩证法、系统论和历史观为指导,以区域构造—成岩—成矿为主线,以成矿地质背景、成矿系统和成矿演化为基本内容,以边界、转换、耦合和叠加成矿等为理论基础,研究区域成矿的时空结构和矿床的形成与分布规律,为矿产预测和普查找矿提供了科学依据,并充实和丰富了地球系统科学的基础内容。

Groves 等<sup>[13]</sup>提出造山带型金矿 (Orogenic gold deposit) 的概念,以取代被广泛使用的中温热液金矿 (Mesothermal gold deposit)。造山带型金矿是指与不同时代变质地体有关

的汇聚板块边缘增生造山带和碰撞造山带内受挤压和走滑挤压变形作用形成的金矿床,它可形成于距地表 15 ~ 20 km 到近地表的独特的深度范围。他们认为太古宙金矿是大陆边缘变形事件的产物,给出的金矿大地构造模式见图 1 (图中弧和增生地体的侧向和垂向比例已经被放大以表示金矿的空间位置和相对形成深度) 和图 2 (该图被程式化以表示深度范围内矿床类型,并不意味着所有矿床类型或形成深度将在同一个系统中出现)。部分浅成低温热液脉、富金斑岩和夕卡岩矿床形成于处于挤压到伸展环境的岛弧和大陆弧浅部 (小于等于 5 km), 部分浅成低温热液脉及卡林型矿床形成于弧后地壳减薄和伸展作用的浅部地区; 相反中温热液金矿 (图 2 中的造山带型金矿) 定位于挤压到走滑挤压环境的近大陆岩浆弧的变形增生带内,并且遍布于上地壳 (图 2)。

Kerrick 等<sup>[14]</sup>认为有 6 种金矿床在区域

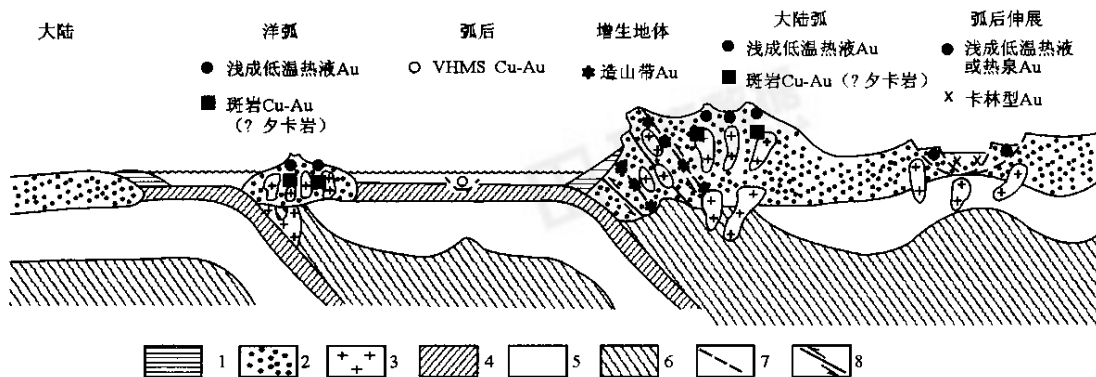


图 1 富金后成矿床的大地构造环境 (据 Groves 等, 1998)

1—增生楔 2—大陆壳 3—花岗岩类岩石 4—洋壳 5—地壳下面岩石圈 6—软流圈 7—伸展断裂 8—挤压断裂/逆冲

成矿省内产出几百到大于  $1\,000 \times 10^3$  kg 的黄金。这些矿床是造山带型金矿, 卡林、类卡林型金矿, 浅成低温热液型金-银矿, 斑岩型铜-金矿, 铁氧化物型铜-金矿, 富金火山块状硫化物型及沉积喷流型矿床 (SEDEX)。它们反映不同的地球动力学背景: 造山带型金矿一般产于 Cordilleran 型造山带走滑挤压

的俯冲—增生杂岩体内近地体边缘的地壳中部 (4 ~ 16 km), 也有部分产于板内地幔岩石圈拆沉或地幔柱上涌处。卡林和类卡林型金矿床产于伸展的汇聚边缘大陆弧或弧后的地壳浅部 (小于 4 km), 部分与岩石圈底部软流圈地幔柱上涌有关。浅成低温热液金矿床 (1 ~ 2 km) 和斑岩型铜-金矿床 (1 ~

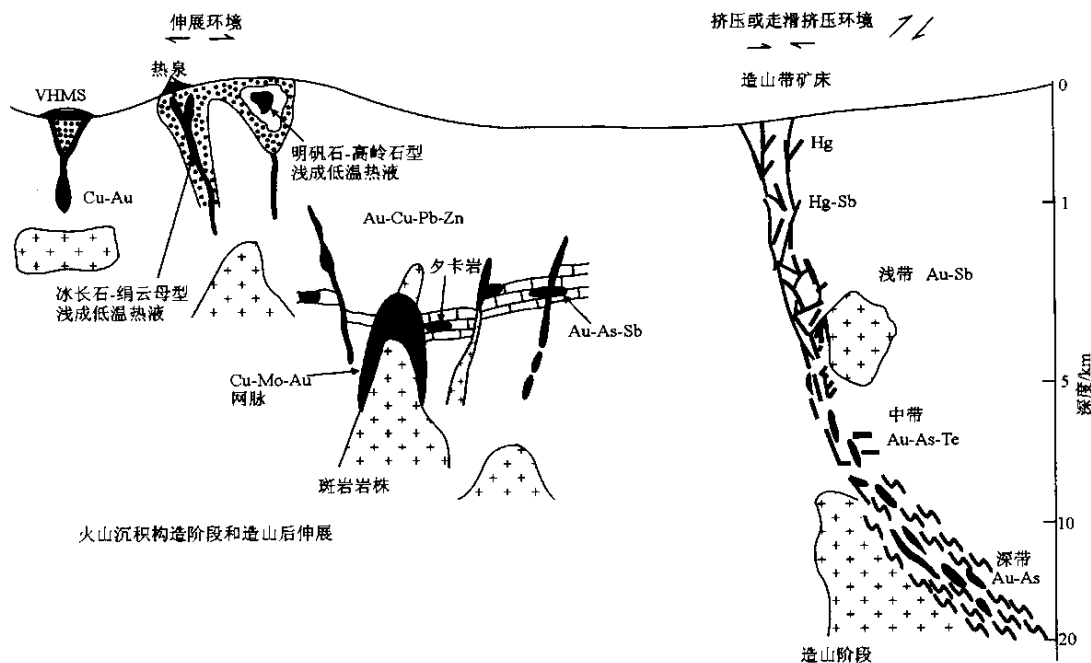


图2 汇聚板块边缘内热液金矿床形成深度和构造位置的地壳环境图示(据 Groves 等, 1998)

4 km)定位于大陆边缘弧或洋内弧的地壳浅部。铁氧化物型铜-金矿床形成于地壳中部到浅部(1~6 km),与伸展的克拉通内非造山的岩浆作用有关;元古宙的铁氧化物型铜-金矿床位于难熔的太古宙地幔岩石圈向薄的元古宙地幔岩石圈的转变部位。富金火山块状硫化物型矿床是大陆弧后或洋内弧后海底或近海底的热液沉积。

## 2 岩浆热液和变质热液成矿的新证据

最近的矿床学和活动热液系统的研究表明,岩浆流体通常是存在的,但是由于大量大气降水的晚期叠加,岩浆流体的标志可能被掩盖、抹掉<sup>[15]</sup>。Ulrich 等<sup>[16]</sup>用 LA-ICP-MS 技术研究了世界上品位最富的印度尼西亚 Grasberg 斑岩铜-金矿和阿根廷巨型 Alumbrera 富金铜矿石中的最高温和最高盐度卤水包裹体,结果表明,高温卤水的 Au/Cu 值与相应矿床金属量之比一致,巨量金属的

供应(bulk metal budget)受进入流体组分的根本控制,后者可能还受下伏岩浆房的结晶作用控制。

来自活动热液系统的证据以及野外和实验室的研究成果清楚地指出,岩浆对于热液流体贡献了水、金属及其配位体等组分<sup>[15]</sup>。岩体与矿床距离较大时,大气降水逐渐占据主导地位,但仍有证据暗示着清晰的插曲性的以高压蒸汽形式存在的岩浆组分的加入,它们的通量虽然远小于大气降水,但对于成矿作用可能是关键性的<sup>[15]</sup>。Hannington 等<sup>[17]</sup>对现代海底含 Au 热液沉积进行了综述。大洋中脊的热液循环可使海水渗透到洋壳下部 2~3 km 处,并在壮观的“黑烟囱”喷出之前加热到约 400 ℃。其中矿物形成的年龄分布与热液体系的间歇式活动一致<sup>[18]</sup>。日本现代地热的开发表明,某些生产热井可产出含金沉淀物,主要的沉淀作用常发生在井口控制阀向下游的管道里<sup>[19]</sup>。日本 Okuaizu 地热厂套管内沉淀的矿物有硫锰矿、砷锑矿、



深红银矿、方黄铜矿、黝铜矿、黄铜矿、方铅矿、纤锌矿、闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿<sup>[20]</sup>，控制阀处沉淀有银黝铜矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿及高含量 Au<sup>[21]</sup>。Osorezan 热泉则是一个处于活动中的现代热泉型金矿，它具有令人惊奇的高含量 Au<sup>[22]</sup> ( $6.510 \times 10^{-6}$ )。较年轻的侵入体可能引发了该地热系统 EW 向破裂、热液喷发和大规模的金及贱金属矿化<sup>[19]</sup>。

与侵入体有关的金矿床是 Sillitoe 多年来研究的一个课题<sup>[23-24]</sup>，可分为 5 种类型<sup>[23]</sup>：赋存于侵入体内的网脉状/浸染状矿床，包括斑岩型和非斑岩型；碳酸盐岩围岩中的夕卡岩型和非夕卡岩型；非碳酸盐岩围岩中的网脉、浸染状和交代矿床；赋存于围岩中的角砾岩筒；侵入体和围岩中的矿脉。

向上可过渡到赋存于火山岩中的浅成低温热液矿床。与侵入体有关的脉状金矿有如下地球化学组合<sup>[24]</sup>：Au-铁氧化物-Cu；Au-Cu-Mo-Zn；Au-As-Pb-Zn-Cu；Au-Te-Pb-Zn-Cu；Au-As-Bi-Sb。它们反映了与具有不同构造环境特征有关的侵入体的成分（图 3）。Au-铁氧化物-Cu 和斑岩 Cu-Au 组合都与侵入于俯冲岛弧内的高氧化钙碱性侵入体有关，而 Au-As-Pb-Zn-Cu 组合似乎与形成于类似环境的低氧化侵入体有关。Au-Te-Pb-Zn-Cu 组合和浅成低温热液组合极为相似，与弧后高氧化碱性侵入体有关。相反 Au-As-Bi-Sb 组合和新近认识到的赋存于侵入体内的部分 Au-Bi-W-As 组合与介于磁铁矿和钛铁矿系列之间相对还原的侵入体有关，这种侵入体可能赋存大量可采金矿床，在俯冲间歇期沿岛弧

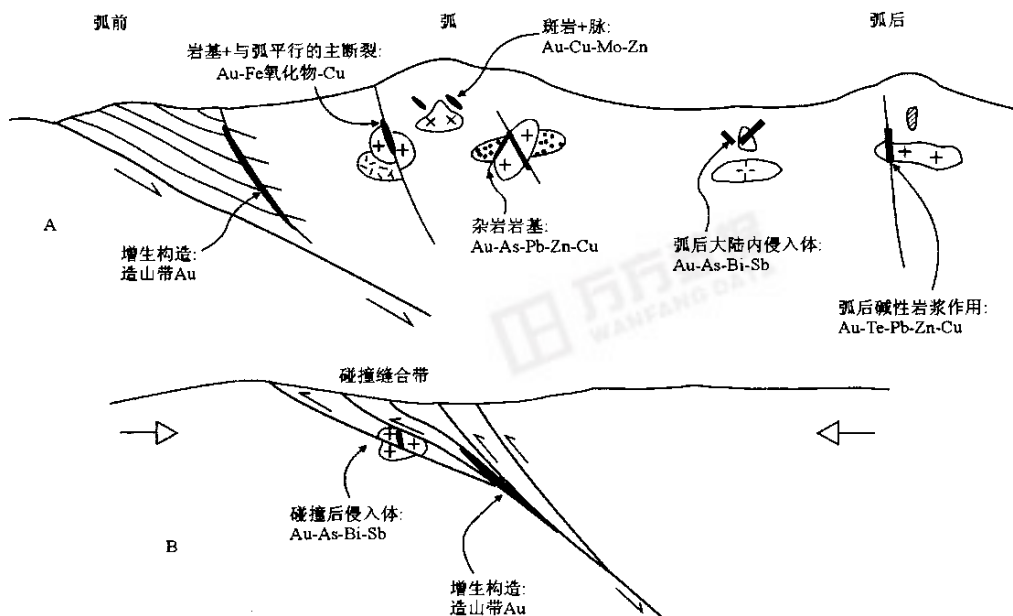


图 3 与侵入体有关的金矿和造山带型脉状金矿床的构造环境示意图（据 Sillitoe 等，1998）

A—岛弧和弧后地体中与侵入体有关的金矿及其造山带型金矿；B—大陆碰撞环境与还原型侵入体及其有关的脉状金矿床和造山带型金矿

向陆一侧侵位或者侵位于大陆碰撞环境。

Berger 和 Bagby<sup>[25]</sup>提出卡林型矿床形成模式中夕卡岩型矿化与卡林型金矿化之间

有着时间和空间联系。Thompson 等<sup>[26]</sup>研究了已知钨/锡矿化岩浆省内与侵入体有关的金矿床，其元素组合为 Bi-W-As-Sn-Mo-Te-



Sb, 与钨-锡成矿省有关的金矿床位于克拉通边缘、相对于大陆边缘弧向陆或弧后位置、大陆碰撞造山带, 它们与长英质穹隆、岩株或中等氧化状态 (介于磁铁矿与钛铁矿系列之间) 的侵入体有关 (图 4)。

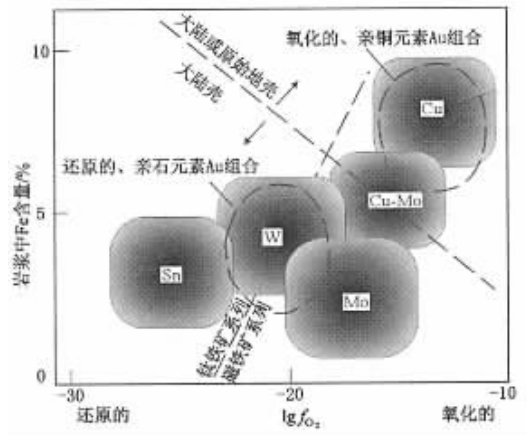


图 4 与岩浆-热液铜、铜-钼、钼、钨、锡矿化相伴的钙碱性、碱性岩浆岩 Fe 含量和氧化状态的概略图解 (据 Thompson 等, 1999)

Fournier<sup>[27]</sup>讨论了岩浆-浅成低温热液环境中与流体从塑性到脆性岩石运动有关的热液作用。火山杂岩之下 2~6 km 处岩浆的反复侵位导致了大量围岩具有相当高的温度 (大于 400 °C), 使地壳岩石在正常应变速率下表现为塑性。在最小主应力为静岩载荷的地方, 从正在结晶的岩浆中出溶的超盐度卤水和气体在静岩压力作用下呈水平透镜状聚集于塑性岩石中。相对由不渗透物质组成范围狭窄的自密闭带将静岩压力地区与静水压力作用下的具有天水热液循环的脆性岩石区分开。向上巨涌的岩浆会临时增加局部岩石的应变速率, 作为对很小应力差异的响应, 导致先前形成的塑性岩石遭受剪切而破坏。这样超盐度卤水和气体从正常塑性地区快速排入脆性、低温低压区域, 作为岩浆流体减压和冷却的结果形成浅成低温热液矿床。

在高温 (大于 200 °C) 环境, 由低盐度

(小于等于 10%) 还原流体形成的原生金矿床占目前已开发的 90%<sup>[28]</sup>。这些低盐度含 Au 流体存在于各种时间、空间、岩石序列和构造环境中, 更容易用镁铁质和 (或) 杂砂岩序列的变质去挥发分作用解释。许多产于太古宙绿岩、板岩带的金矿, Witwatersrand 金矿, 可能还有浅成热液金矿都可以用变质去挥发分作用产生的低盐度流体解释<sup>[28]</sup>。

Stuwe<sup>[29]</sup>讨论了不同构造作用下地壳不同深度变质去挥发分和变质作用之间的时间关系。许多内部加热地体 (如 Barrovian) 是“深部-晚期” (在晚期, 深部出现最强变质和去挥发分作用) 型地体, 其深部在变质作用中产生和释放变质流体, 在浅部以“变质后”石英脉形式产出。相反下部岩浆的加热作用是“深部-早期”型。在浅部处于剥蚀、同时深部加热的许多变质地体中, “深部-晚期”和“深部-早期”共同发生作用。如果浅部剥蚀和深部加热具有相似的持续时间, “深部-晚期”特点占有优势, 不同地壳水平可能出现强变质作用的双模式年龄分布: 上部地壳将经历早期但大多同时的变质作用, 下部地壳经历的变质作用则要晚得多。它特别有利于下地壳大范围变质及同时发生的去挥发分作用晚于浅部的变质作用。因而它导致了低级变质冷却岩石中的晚期渗透“事件”。广泛存在的“变质后”流体的渗透和矿化作用可能指示 (但不是必然) 矿化流体与这样的变质事件有关。

产于新西兰 Otago 片岩中的 Macraes 矿床有相当数量的金沉淀在近脆-韧性过渡带的糜棱岩化碎裂岩中 (没有石英脉<sup>[30]</sup>), 更多的金矿则产出于晚期脆性构造的石英脉中。构造和矿物数据表明, 片岩带从接近变质深度 (15~20 km) 抬升通过脆-韧性过渡带 (约 10 km, Sibson, 1977) 到脆性区域的过程中持续发生热液活动。最初流体是弥漫性的, 逐渐集中到数量较少、渗透性较高的



构造带中。

Findlay<sup>[31]</sup>强调石香肠构造模式是矿石就位的重要组织者,它对矿化类型、地壳尺度的大地构造环境都具有控制作用,但对矿床的控制仍然没有达成共识,但它是其他公认成矿模式的有用构造格架。石香肠构造的扩容带提供了一种或另一种活动的、地球化学性质相似的成矿流体侵位的合理场所。

### 3 超大型矿床成矿理论研究现状

超大型矿床可分为常规与非常规 2 类<sup>[4,32]</sup>,前者在分布规律,物质组成,形成机制等方面与同类型之其他超大型和大、中、小型矿床并不存在本质上的差别,而且它们常共存于一个成矿带内,如超大型斑岩铜矿;后者则不然,在全球十分稀少,呈点型分布,如白云鄂博稀土-铁-铌矿、柿竹园钨-铋-锡-钼矿、大厂锡-锑-铅-锌矿、富兰克林炉锌矿等,它与地质历史中一些罕见的事件作用及其耦合有关。裴荣富等<sup>[33~34]</sup>认为特大型矿床对成矿元素(矿种)、成矿类型、成矿时代、成矿背景等均具有十分明显的选择性,称之为特大型矿床成矿偏在性,受异常成矿构造聚敛场的控制,并将我国陆上异常成矿构造聚敛场归纳为太古宙—元古宙同剪切形变,中元古—古生代“三同一体”(成矿同生断裂、成矿同生不协调褶皱、成矿同生角砾岩在时空上的最佳耦合),中生代“行、列、汇”,新生代多阶段“汇流”4 个聚敛场。以我国大型矿床规模下限的 5 或 10 倍为标准统计,我国 48 种主要矿产有 198 个特大型矿床<sup>[35]</sup>。

Laznicka<sup>[36]</sup>在统计 486 个巨型、61 个超巨型矿床后,建立了巨型矿床数据库 GL-ANTDEP,引入“吨位聚集指数”(矿床金属吨位与该金属克拉克值之比)的概念,给出大型、巨型、超巨型矿床的金属量吨位定量指标和巨型矿床类型,有关岩浆类型,成矿

时代的定量研究。如大型、巨型、超巨型金矿的金金属量分别大于  $25 \times 10^3$ ,  $250 \times 10^3$ ,  $2\,500 \times 10^3$  kg,全球 99 个巨型金矿,其中 13 个巨型金矿同时也是巨型铜矿,并分别有 2 个巨型金矿同时也是巨型铀矿和巨型铋矿,有 2 个巨型金矿同时也是巨型铜矿和巨型铀矿,Witwatersrand 盆地同时也是巨型铀矿。它们包括 61 个中温热液型、17 个沉积碎屑型、16 个浅成火山热液型、3 个火山热液或热液沉积型、1 个硫化物风化型、1 个热液沉积型。上述 99 个巨型金矿床中有 6 个与偏铝质花岗闪长岩-石英二长花岗岩相伴产出,2 个与闪长岩-二长岩相伴产出,1 个与正长岩-粗面岩相伴产出。其中 24 个金矿形成于太古宙,分别有 4 个形成于新元古代、古元古代,2 个形成于中元古代,5 个形成于志留—泥盆纪,9 个形成于石炭纪,7 个形成于侏罗纪,8 个形成于早白垩世,2 个形成于晚白垩世,5 个形成于早第三纪,21 个形成于晚第三纪,8 个形成于第四纪。

### 4 从成矿系列到成矿系统理论的发展以及不同矿产资源之间的关系

矿床成矿系列是在一定地质时期和一定地质环境中,在一定的主导地质成矿作用下形成的,在时间、空间、成因上都有密切联系,但其具体生成条件存在差异的一组(2 个以上)矿床类型的组合(程裕淇,1993)。成矿系统是指在一定的时空域中,控制矿床形成、变化和保存的全部地质要素和成矿作用动力过程,以及所形成的由矿床系列、矿化异常系列构成的整体,是具有成矿功能的一个自然系统<sup>[12]</sup>。於崇文从复杂性科学的角度,探讨了成矿动力系统的自组织临界性,建立了成矿作用动力学<sup>[37]</sup>。成矿系统包括成矿系列,成矿系统研究的时间和空间尺度都比成矿系列大,有利于从根本上掌握成矿控制规律、全面指导矿产勘查和开

发<sup>[12]</sup>。成矿系统的基本要素是成矿物质、成矿流体、成矿能量、成矿流体的输运通道、矿石堆积场所。成矿系统的产物包括矿床、矿点、矿化点、蚀变、各种介质中的异常等。翟裕生<sup>[12]</sup>按照构造动力体制（伸展、挤压、走滑、隆升、沉降、大型韧性剪切、大型陨石撞击）划分成矿系统大类（巨系统），按成矿机理划分成成矿系统类（分为岩浆、热液、沉积、生物、改造），按含矿建造及成矿空间划分成成矿系统。

金属、非金属、盐类、煤、石油、天然气等矿产资源之间的有机联系被不断发现和研究，涂光炽（1995）用图解的形式总结了这种联系（图5）。他指出油气从生油层转移到储油层的道理类似于金属从矿源层（岩）转移到矿床的道理；某些油气藏中有 Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb, Zn 等金属元素，甚至富集形成工业规模都是可能的；盐类矿床可溶解进入成矿热液参与金属成矿；金属与非金属矿床的联系则更普遍而密切，如湖南柿竹园钨、铋、锡、钼矿床同时也是一个萤石矿床，某些陆相火山岩型铅-锌矿床与一些独立的叶蜡石、粘土、沸石等矿床形成一定的矿床组合。

Au 可以与 Ag, Cu, Hg, PGE, Ni, Co, Fe, Sn, Pb, Bi, Sb 等形成类质同象<sup>[38]</sup>，由此推论金矿化也可以与这些金属矿化相伴产出，出现 Au-Ag-Cu, Au-Hg, Au-PGE,

Au-Fe, Au-Pb, Au-Sb 组合（这些组合在自然界已经存在），根据已发现的金矿化类型还有 Au-W (Mo), Au-Te, Au-U 组合，以及更为复杂的上述组合的混合组合，如奥林匹克坝出现 Cu-U-Au-Ag-REE-Co 组合。传统地球化学理论认为，在自然界 Au 常与亲 S 元素共同迁移和富集，而与亲 O 的 Sn, REE, Nb, Ta 等分离，但奥林匹克坝铜-铀-金-银-稀土-钼矿床的发现使这一说法不攻自破。Hitzman 等<sup>[39]</sup>提出了铁氧化物-铜-铀-金-稀土这一新的金矿类型，Kerrich 等<sup>[41]</sup>称为铁氧化物-铜-金矿床。白云鄂博铁-稀土-铌-钍-萤石矿床可能也属铁氧化物-铜-金矿床这一类型，其金矿化应予以研究，已在该矿区发现了白云鄂博北矿蚀变岩型金矿<sup>[40]</sup>和其北东 5 km 处产出的赛乌素石英脉型金矿<sup>[41]</sup>，金矿与白云鄂博铁-稀土-铌-钍-萤石矿床均产于元古宇白云鄂博群中，金矿的独立产出是否因为原共生矿在晚期构造-岩浆作用下的分离？大水独立碓矿<sup>[42]</sup>实际上是 Te-Au-Bi-Cu-Ag 组合矿床。胶东界河等金矿也发现了晶隙金和裂隙金常与辉碓铋矿、黄铜矿、方铅矿等共生<sup>[43]</sup>，应注意对金矿床伴生碓矿的评价研究。叶蜡石化、明矾石化、高岭土化等可能是高硫型浅成低温热液金（银、铜）矿的指示。

金的地球化学组合规律是评价铜、银、铅-锌、钨（钼）、铀、铁、镍、锑-汞、硫铁矿、叶蜡石等矿床含 Au 性的依据，同时要注意元素之间类质同象的传递效应，如 Ag 在 Pb 和 Au 之间的传递，Au, Ag, Cu 之间更为普遍的共生关系等。

## 5 金的宇宙来源及撞击事件与金矿成矿的关系

已知陨石的 Au 含量比地壳高<sup>[44]</sup>，一般都达  $0. n \times 10^{-6}$ ，而一些铁陨石的 Au 含量相当于金矿石的品位，达  $n \times 10^{-6}$ 。据刘英

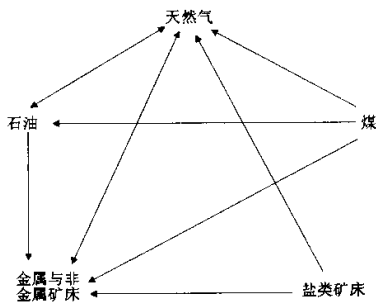


图5 不同矿产资源之间的联系（据涂光炽，1995）



俊<sup>[44]</sup>估计, 4 000 Ma 内宇宙物质带来的金是地壳中黄金总量的 1.3% 以上, 形成直径为 20 km 撞击构造的巨型陨石即可为陨落地带带来约  $500 \times 10^3$  kg 金。地壳中已知最大、最古老的撞击构造分别位于南非 (阿扎尼亚) 的 Vredefort 和加拿大的肖德贝里 (Sudbury), 其直径为 140 km 左右, 时间在 1 800 ~ 2 000 Ma 之间, 前者产出世界上最大的金矿, 后者形成镍-铜-钴-金-铂矿。多数研究者认为肖德贝里矿床与陨石撞击有关。

近年来, 撞击构造研究成为一个热点, 它可能与多种矿产有关, 包括金刚石、金、银、铜、镍、钴、硒、碲、铅、锌、PGE、稀土、铀、钍、石油、煤、天然气等<sup>[45]</sup>。地外天体的撞击可以引起地球一系列的地质作用 (可能包括板块分裂、岩浆喷发、岩浆溅射、变质作用、地震等) 和环境灾变 (可能包括气温升高、油气和植被燃烧、大气缺氧、冰川消融、海平面上升、大量生物的死亡等), 同时, 不同的撞击会造成规模、类型、影响程度不同的结果, 由于一系列地质作用的发生和环境变化的耦合, 可能会导致大规模成矿作用的发生。撞击构造与金矿成矿研究将会得到进一步发展。

此外, 近年来在成矿流体研究方面, 大规模流体的存在与运移、巨型矿床与流体的关系、成矿流体输运动力学、建立热液成矿反应体系以及成矿流体成分测试技术等方面取得了重要进展<sup>[5]</sup>, 精确定年技术<sup>[46]</sup>、成矿作用的计算机模拟<sup>[47]</sup>也取得了很大进展。构造控矿模拟实验表明<sup>[48]</sup>, 在构造作用的热动力条件下, 金还可以塑性流体或碎裂流的形式活化迁移, 在裂隙交汇或张开的部位沉淀。纳米级金可能广泛存在, 其活化、迁移、吸附、聚集规律等有待进一步研究。

## 6 小 结

### 1) 地球动力学背景对金矿成矿具有重

要控制作用。区域成矿学基本理论的建立、造山带金矿概念的提出、6 种具有重要经济意义金矿床 (造山带型、卡林和类卡林型金矿, 浅成低温热液金-银矿, 斑岩型和铁氧化物型铜-金矿, 富金块状硫化物型和沉积喷流型金矿床) 产出构造环境的总结等对认识不同类型金矿床的构造环境及指导勘查具有重要意义。

2) 岩浆热液和变质热液成矿理论的新证据说明, 热液矿床形成过程中岩浆流体、变质热液所发挥的重要作用与区域地质构造演化密切相关。

3) 铁氧化物型铜-金 (铀-稀土) 矿床和钨-锡成矿省内与侵入体有关的金矿化, 是 2 种新类型的金矿化, 应加强其研究和勘查。

4) 全球巨型金矿 (大于  $250 \times 10^3$  kg, 99 个) 以中温热液型、浅成火山热液型金矿及砂金矿最为多见; 成矿时代以太古宙、晚第三纪为主, 其次为石炭纪、侏罗纪、早白垩世、第四纪, 其他时代也有产出。

5) 成矿系统理论和不同矿产资源之间相互联系是全面深刻认识金矿化的必然。多种金属、非金属矿床的金矿化都需要重新认识 and 评价。

6) 金的宇宙源及撞击成矿是金矿成矿重要的研究方向之一。

## 参考文献:

- [1] 李上森, 于华. 矿床地质研究的一些进展与问题 [J]. 前寒武纪研究进展, 1998, 21 (2): 1-12.
- [2] 沈远超, 邹为雷, 曾庆栋, 等. 矿床地质学的发展趋势——深部构造与成矿作用 [J]. 大地构造与成矿学, 1999, 23 (2): 180-185.
- [3] 赵振华, 刘秉光, 李朝阳. 我国与寻找超大型矿床有关的基础研究进展 [J]. 地球科学进展, 2001, 16 (2): 184-188.
- [4] 涂光炽. 超大型矿床的寻找与研究的若干进展 [J]. 地质前缘, 1994, 1 (3-4): 45-53.
- [5] 张连昌, 赵伦山. 成矿流体研究的若干进展与动态 [J]. 地质与勘探, 2001, 37 (1): 7-10.





- [6] 陈衍景, 陈华勇, 刘玉琳, 等. 碰撞造山过程内生矿床成矿作用的研究历史和进展 [J]. 科学通报, 1999, 44 (16): 1 681-1 689.
- [7] 涂光炽. 过去 20 年矿床事业发展的概略回顾 [J]. 矿床地质, 2001, 20 (1): 1-9.
- [8] 翟裕生. 走向 21 世纪的矿床学 [J]. 矿床地质, 2001, 20 (1): 10-14.
- [9] 陈柏林. 金矿床和金成矿作用研究进展 [J]. 地质论评, 2001, 47 (1): 111-112.
- [10] 葛良胜, 武玉海. 板块构造环境对金矿成矿的控制作用 [J]. 黄金地质, 1996, 2 (3): 6-13.
- [11] Goldfarb R J, Philips G N, Nokleberg W J. Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific Rim [J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 185-218.
- [12] 翟裕生. 区域成矿学 [M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [13] Groves D J, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Oro-genic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 7-27.
- [14] Kerrich Robert, Goldfarb Richard, Groves David, et al. The characteristics, origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces [J]. Science in China (Series D), 2000, 43 (Supplement): 1-68.
- [15] 刘伟. 岩浆流体在热液矿床形成中的作用 [J]. 地质前缘, 2001, 8 (3): 203-215.
- [16] Ulrich T, Gunther D, Heinrich C A. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits [J]. Nature, 1999, 399: 676-679.
- [17] Hannington M D, Herzig P M, Scott S D. Auriferous hydro-thermal precipitates on the modern seafloor [A]. Foster R F. Gold metallogeny and exploration [C]. London: Blackie and Son Ltd, 1991. 249-281.
- [18] You C-F, Bickle M. Evolution of an active sea-floor massive sulfide deposit [J]. Nature, 1998, 393: 668-671.
- [19] Izawa Eiji, Aoki Masahiro. Geothermal activity and epithermal gold mineralization in Japan [J]. Episodes, 1991, 14 (3): 269-273.
- [20] Imai H, Adachi M, Takahashi M, et al. Sulfide mineraliza-tion in Oku-Aizu geothermal field, with the genetical relation to the epithermal gold deposits (In Japanese) [J]. Mining Geology, 1988, 38: 291-301.
- [21] Nitta T, Adachi M, Takahashi M, et al. Heavy metal pre-cipitation from geothermal fluid of 87N-15T production well in the Okuazui geothermal field, Tohoku District, Japan (In Japanese) [J]. Mining Geology, 1991, 41: 231-242.
- [22] Aoki M, Thompson M. The Osorezan hydrothermal system, Japan: Gold bearing hot springs (part 2) [J]. Geothermal Resources Council, Transactions, 1990, 14: 1 365-1 369.
- [23] Sillitoe Richard H. Intrusion-related gold deposits [A]. Foster R F. Gold metallogeny and exploration [C]. London: Blackie and Son Ltd, 1991. 165-209.
- [24] Sillitoe Richard H, Thompson John F H. Intrusion-related vein gold deposits: types, tectonic-magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits [J]. Resource Geology, 1998, 48 (4): 237-250.
- [25] Berger B R, Bagby W C. The geology and origin of Carlin-type gold deposits [A]. Foster R F. Gold metallogeny and exploration [C]. London: Blackie and Son Ltd, 1991. 210-248.
- [26] Thompson J F H, Sillitoe R H, Baker T, et al. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces [J]. Mineralium Deposita, 1999, 34: 323-334.
- [27] Fournier Robert O. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the mag-matic-epithermal environment [J]. Econ. Geol., 1999, 94: 1 193-1 211.
- [28] Philips G Neil, Powell R. Link between gold provinces [J]. Econ. Geol., 1993, 88: 1 084-1 098.
- [29] Stuve Kurt. Tectonic constraints on the timing relationships of metamorphism, fluid production and gold-bearing quartz vein emplacement [J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 219-228.
- [30] Craw D, Windle S J, Angus P V. Gold mineralization with-out quartz veins in a ductile-brittle shear zone, Macraes Mine, Otago Schist, New Zealand [J]. Mineralium Deposita, 1999, 34: 382-394.
- [31] Findlay D. Bouinage—A key to an organizing principle for the formation of ore deposits [J]. Econ. Geol., 1998, 93: 671-682.
- [32] 涂光炽. 试论非常规超大型矿床物质组成、地质背景、形成机制的某些独特性——兼论非常规超大型矿床 [J]. 中国科学 (D 辑), 1998, 28 (增刊): 1-6.
- [33] 裴荣富, 吴良士, 熊群尧, 等. 中国特大型矿床成矿偏在性与成矿构造聚敛场 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [34] 裴荣富, 叶锦华, 梅燕雄, 等. 特大型矿床研究若干问题探讨 [J]. 中国地质, 2001, 28 (7): 9-15.
- [35] 梅燕雄, 朱裕生, 叶锦华. 中国超大型矿床的若干统计特征 [J]. 地球学报, 1997, 18 (4): 358-366.
- [36] Laznicka Peter. Quantitative relationships among giant de-



- posits of metals [ J ]. *Econ. Geol.*, 1999, 94: 455-473.
- [ 37 ] 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等. 成矿作用动力学 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1998. 1-23.
- [ 38 ] 赵利青. 元素的类质同象简表 [ J ]. *黄金地质*, 1996, 2 ( 4 ): 39-42.
- [ 39 ] Hitzman M W, Oreskes N, Einaudi M T. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide ( Cu-U-Au-REE ) deposits [ J ]. *Precambrian Research*, 1992, 58: 241.
- [ 40 ] 国家黄金管理局, 武警黄金地质研究所. 中华人民共和国黄金矿产图集 [ R ]. 河北 廊坊: 武警黄金地质研究所, 1992.
- [ 41 ] 郭砚田. 内蒙古赛乌素金矿床地质特征 [ A ]. 寸圭, 陈纪明. 中国典型金矿床 ( 第二集 ) [ C ]. 北京: 地质出版社, 1995. 68-83.
- [ 42 ] 银剑钊. 世界首例独立碲金矿床的成矿机理及成矿模式 [ M ]. 重庆: 重庆出版社, 1996. 90-91.
- [ 43 ] 赵利青, 李自杰, 苑保钦, 等. 山东省界河金矿床地质特征及成矿预测 [ J ]. *黄金地质*, 1995, 1 ( 4 ): 25-31.
- [ 44 ] 中国科学院矿床地球化学开放研究实验室. 矿床地球化学 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1997. 1-11, 19-20.
- [ 45 ] 覃功炯. 国内外对天体撞击地球的撞击构造研究的新进展 [ J ]. *地学前缘*, 2001, 8 ( 1 ): 345-352.
- [ 46 ] 方金云, 姚书振. 成矿过程可视化研究进展 [ J ]. *地质科技情报*, 1999, 18 ( 3 ): 67-71.
- [ 47 ] 谢桂青, 胡瑞忠. 金矿床测年方法的某些进展 [ J ]. *地质地球化学*, 2001, 29 ( 1 ): 57-62.
- [ 48 ] 中国科学院黄金科技工作领导小组办公室. 中国金矿研究新进展, 第一卷 ( 上篇 ) [ M ]. 北京: 地震出版社, 1994. 46-54, 280-324.

## Some progress on modern metallogenic theory of gold ore deposits

ZHAO Li-qing<sup>1</sup>, LI Zhan-fang<sup>2</sup>, LI Zhi-hong<sup>3</sup>, GUO Jun-hua<sup>3</sup>, YUAN Mao-sen<sup>3</sup>

( 1. *Gold Geological Institute of CAPF, Langfang 065000, Hebei, China*; 2. *The Shirengou Iron Ore Deposit of Tangshan Iron & Steel Mining Industry Co., Ltd., Zunhua 064200, Hebei, China*; 3. *No.12 Gold Geological Party of CAPF, Chengdu 610036, Sichuan, China* )

**Abstract** : Some great progress on modern metallogenic theory have been made during the last ten years. Summarizing the progress is helpful to extend the thoughts of study and exploration on gold deposits. More research works have been done on how that geodynamic setting controls gold metallogeny. Basic theory of regional metallogeny has been established. Theory of orogenic gold deposit was put up. New evidence for magmatic and metamorphic hydrothermal metallogeny has been found, that is magmatic fluid exists more popularly during gold metallogenic process. Low-salinity fluid produced during metamorphic devolatilization is necessary to form many hydrothermal gold deposits. Most of superlarge gold deposits are mainly mesothermal, placer and epithermal type deposits. Metallogenic systems evolves from metallogenic series and emphasize on the relationship between gold deposits and other mineral resources. Two new types of gold deposits, iron oxide-copper-gold and intrusive-related gold deposits in tungsten and tin province are put forward. Theory that gold originates from the universe and impact metallogenic process has been put forward.

**Key words** : gold metallogenic theory; geodynamic setting; superlarge deposit; hydrothermal deposit; impact metallogeny