

文章编号:0258-7106 (2001) 01-0001-09

过去 20 年矿床事业发展的概略回顾*

涂光炽

(中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002)

提 要 文章概略回顾了过去 20 年在找矿和成矿理论研究方面获得的若干重要成就。指出这一阶段虽在一些国家存在矿业不景气,但找矿进展,特别是金、铜矿床,仍很出色。矿业大国都强调了超大型矿床的重要性。在成矿理论方面,主要就多样复杂的海底成矿,三大巨型成矿域,成矿模式,中酸性岩浆岩及有关成矿作用,层控矿床,同位素、微量元素及气液包裹体运用于成矿等问题的研究历史作了回顾。

关键词 找矿 成矿理论 海底成矿 巨型成矿域 成矿模式 中酸性岩浆岩及成矿 层控矿床 微量元素及同位素 流体包裹体

中图法分类号: P61

文献标识码: A

人们一提到 20 世纪 80~90 年代的全球矿业,便会情不自禁地与不景气联系起来。对矿业不景气,我们应当根据实际情况,作出客观的分析判断。笔者认为,矿业不景气在过去 20 年中确实存在,但有一定的局限性。这首先表现在受矿业不景气影响的国家主要是美、加、俄罗斯,澳大利亚也略遭波及,但另一些矿业大国,如巴西、南非等国家的矿业还有不少新发展。其次,不景气影响面主要是中、小型矿山,它们暂时停产;大学里与矿业有关的院、系生源减少,一些有影响的地学机构(如美国地质调查所)裁员等。但大型矿山,特别是油气及金矿并未受到波及。另外,美国出于战略储备的考虑,对一些矿种停采或缓采。

我们不应为这局部的、暂时的矿业不景气所困惑,而应看到矿床事业 80~90 年代在世界范围内的大踏步进展。这里所谓的矿床事业包括矿床的发现及成矿理论研究,即找矿与成矿。而矿业则指矿产开发、冶炼、加工、利用。矿床事业为矿产开拓奠定了部分物质基础。

下面,我们将从找矿和成矿两个侧面回顾 80~90 年代矿床事业的成就。

1 找矿成就

1.1 新矿床的发现

过去 20 年在全球范围内发现了众多新矿床,特别是金、铜、铀和铂族矿床。Sillitoe 于 1995 年出版了题为《过去 25 年来在环太平洋带发现和开发的贱金属和贵金属矿床》的专著(Sillitoe, 1995)。文中对这一时期发现的共计 54 个矿床作了概略发现经过与地质情况介绍,这些矿床都具中型以上规模。具体剖析一下 Sillitoe 的介绍,可以看出,这 54 个矿床绝大多数为铜矿床、金矿床,在矿床类型上多为斑岩铜矿及陆相火山岩型及沉积岩型(卡林型)低温热液金矿。据 Sillitoe,此带内有两个新找到的斑岩铜矿,因受市场上铜价格剧烈下降的影响,未曾详勘,因而未列入新发现矿床的清单中。

这里应当指出, Sillitoe 的环太平洋带主要涉及南北美洲西部及太平洋西南岛屿,完全未谈中国东部、西伯利亚东部及印度支那半岛,因而, Sillitoe 的环太平洋带是残缺不全的。即便如此, 25 年间找到 54 个中型以上的铜、金为主的矿床,应当是重要的进展。

以铜、金矿床找矿为主的找矿趋势和成就,在 80~90 年代的巴西、中东及我国均有不同程度的显示。如我国,古老花岗-绿岩带型金矿储量有了显著增加,新找到了土屋、阿舍勒、紫金山等大型-超大型铜矿床。

* 本文是国家攀登计划 A30 和 95-预-25 资助成果之一。

作者简介 涂光炽,男,1920 年生,中国科学院院士,主要从事超大型矿床、新疆成矿规律研究。

收稿日期 2001-01-11; 改回日期 2001-01-23。张绮玲编辑。

这里,顺便讨论富金的斑岩铜矿产出的地质背景与条件,这是近 20 余年围绕斑岩铜矿讨论最热烈的课题之一。已开采百余年的美国西部 Bingham 铜矿,矿石储量近 3 000 Mt,为斑岩铜矿中之佼佼者,它含 $w(\text{Cu}) = 0.73\%$, $w(\text{Au}) = 0.31 \text{ g/t}$ 。90 年代发现的印尼 Grasberg 斑岩铜矿,已探明矿石储量 1 730 Mt, $w(\text{Cu}) = 1.13\%$, $w(\text{Au}) = 1.22 \text{ g/t}$,是超大型铜矿,同时是超大型金矿。类似情况在近 20 年来已在全球多处发现。

笔者认为,有三种见解值得注意。Kesler(1973)提出,斑岩铜矿地处岛弧背景者富 Au,而产于大陆边缘者富 Mo。Sillitoe(1995)认为,富 Au 斑岩铜矿与贫 Au 者比较,不同处在于前者在钾硅酸盐蚀变带中含大量热液磁铁矿,说明有氧化岩浆热液参加。钙碱系列杂岩和碱性系列杂岩(包括 Shoshonite)均可产出富 Au 斑岩铜矿,但后者在单位岩石中含更多矿床。Muller 和 Groves(1993)则指出,在同一地质背景的斑岩中云母斑晶之含 Cl 和 F 量是关键指示,在富 Au 斑岩铜矿中,云母之 Cl 和 F 具高异常值。看来,这三种见解从不同角度和侧面探讨了斑岩铜矿的富 Au 问题,可能还会出现其他见解,它们需要通过找矿开发实践加以验证。

1.2 新矿床类型的开拓

80~90 年代,Au、U、金刚石等矿床新类型的开拓,使它们的储、产量得到迅猛的发展。

维持了 40 年之久的低金价,即 35 美元/盎司,于 1974 年后得到解除,之后金价飞快上涨,1980 年达到 800 美元/盎司,这极大地激发了找金热潮。与此同时,人们对金矿床的认识有了相应的变化,即突破了岩金矿床就是石英脉型金矿床的传统束缚(除古砾岩型金矿等少数矿床外)。进入 70 年代中期,形成了石英脉型与蚀变岩型两者并举的局面,这就大大加速了金储量的增加,特别对古老花岗-绿岩带型金矿,更是如此。

美国卡林型金矿的发现虽可追索到 60 年代末,但进入规模找矿和开发主要始于 80 年代。我国西南扬子克拉通边缘的卡林型金矿也是在 80 年代后才有较多的发现。澳大利亚、巴西、太平洋西南诸岛屿的红土型金矿和前述富 Au 斑岩铜矿及斑岩金矿的发现都是 80 年代的事。

20 余年前国内外对铂族的提取(除砂铂矿外),主要来自 Cu-Ni 硫化物矿床,少量来自铬矿床,两者均与镁铁岩-超镁铁岩有关,铂族为综合回收对象。

70 年代中期,两个大面积层状基性杂岩体(南非和美国西部 Stillwater)中的铂族开始试投产,80 年代进入规模开发,独立铂矿床首次出现,它们的铂族储量和产量均在世界前列。

90 年代,铂族在矿床类型、产地、储量等几个方面均有极重要突破。值得一提的是,在若干黑色岩系金矿床、铜矿床中都发现了可观的铂含量,它们的经济效益有可能超过主元素。

80 年代铀矿床有了新的突破,分别在加拿大中西部和澳大利亚北部发现了两个不整合型铀矿密集区。这种新类型矿床产于深变质太古宇或古元古界(常含石墨)与上覆浅变质或未变质中新元古界之间的不整合面附近。它们的特点是既大又富,开发它们使加拿大、澳大利亚成为世界主要产铀和储铀国家。

近 20 年来可就地浸出的砂岩铀矿成为找铀重要对象。可利用的矿石品位较低,经济效益较高,而且可以减少开发过程中对环境的污染。看来,在新的世纪,地浸不仅对铀,而且对铜、钼等金属矿的开发都会起一定作用。

1979 年在澳大利亚西北部的 Argyle 发现了赋存于钾镁煌斑岩中的金刚石,1985 年开始工业开发,从而结束了多年来金伯利岩是金刚石唯一寄主岩石的历史。目前,Argyle 已成为世界上金刚石产量最高的矿床之一,但多为低级宝石或工业用品种。

1.3 对超大型矿床的特别关注

在矿床界和矿业界,人们一直关注超大型矿床的寻找,因为它们不仅能带来巨大的经济效益,而且还可以建立重要的矿业基地。从 1987 年温哥华举行的国际地球物理和大地测量会议后,对超大型矿床给予了更高度的重视。这主要表现于在美、加、俄、澳等国举行的一系列围绕超大型矿床的讨论会、短训班,大型研究课题的展开和各种专著的出版。我国自 90 年代起也兴起了此项工作。

从寻找超大型矿床着眼,各国学者不约而同地关注下列问题:

(1) 超大型矿床的类型选择性:每种金属和非金属矿床都囊括多种类型,如铁矿有夕卡岩型、海相火山岩和火山沉积岩型、陆相火山岩型、与镁铁-超镁铁杂岩有关的钒、钛、磁铁矿型、古老条带状 BIF 铁矿型、鲕状赤铁矿型等。但每一矿种的超大型矿床常只局限于少数类型,即超大型矿床具选择性(涂光炽等,2000;裴荣富等,1994)。

Sangster(1994)提出,世界级 Pb-Zn 矿床主要赋存于沉积岩中,矿床类型为密西西比河谷型(MVT)和喷流沉积型(SEDEX),两者合计占 Pb、Zn 产量及储量的约 2/3。SEDEX 型矿床数目虽少,但单个矿床储量巨大,而 MVT 型单个矿床不易与 SEDEX 型相仲伯,但后者可形成密集区,其中 Pb-Zn 矿床总数可达 300,因而金属总量也很庞大。MVT 型矿床多赋存于古生界及三叠系中,而 SEDEX 型则多产于元古宇。

Kinkham(1994)指出,世界级铜矿多为斑岩型和产于沉积岩中的层状矿床。涂光炽(2000)强调了超大型锡矿多为锡石硫化物型,而超大型钼矿多为斑岩型。

(2) 特定超大型矿床类型的寻找:1976 年于澳大利亚南部找到 Olympic Dam 矿床,其 Cu、Au、U、Ag、Co、REE、Fe 等金属量达超大型规模。之后,主要在美国、加、俄等国掀起了找 Olympic Dam 型矿床的热潮。美国着眼于密苏里州东南,加拿大则看中了西北邻地的大熊地区,它们与澳南地质背景相似,且有 Cu、Au 等矿化显示,但迄至今日,找矿效果尚不明显。

(3) 80~90 年代重要超大型矿床的发现及启迪:从过去 20 年中找到的超大型矿床吸取经验,我们可以得出以下启示:

① 空白地区找矿潜力仍十分巨大。1993 年在加拿大最东部纽芬兰地区 Voisay's Bay 找到的铜镍钴硫化物矿床,初步探明储量已达超大型规模。矿化线索是通过直升飞机低空飞行发现的。

② 注意新类型矿床。加拿大东部 Atibiti 地区花岗-绿岩带型金矿很发育。80 年代之前,人们只注意寻找和开发其中的石英脉型金矿床。70 年代末蚀变岩型金矿才引起了关注,这一找矿思路的开拓很快就导致金储量达 600 t 的 Hemlo 矿床的发现,该矿床座落于一条重要公路的两侧,但在过去从未引起注意。

③ 80 年代日本菱刈超大型金矿的出现是老矿有意识向深部开拓的产物。它是一个陆相火山岩型低温热液矿床。长期以来,矿山开发局限于火山岩中的矿体。之后,才发现火山岩体下面沉积地层中的不整合面控制了更多的金矿化。这一发现使老矿复活,而且达到超大型规模。一些陆相火山岩型金矿的工业金矿化常超越了火山岩体,这是值得注意的现象。

④ 矿床密集区内仍需努力找矿。不整合型铀矿床是大而富的铀矿,它们于 80 年代初被发现,但到目前为止,只局限于北澳大利亚及中加拿大两个面积不大的矿床密集区内。有意思的是 90 年代人们继续在密集区内找到新的超大型矿床,如北加拿大的麦克阿瑟河铀矿床。

⑤ 中亚成矿域的斑岩铜矿床和陆相火山岩型低温热液金矿床特别值得关注。两者都有跨越国界,长达千公里以上的成矿带,而且在近期都有大型-超大型矿床的发现。前者的实例是哈密土屋一带,后者的实例是乌兹别克斯坦的可克帕他斯超大型金矿和伊犁地区阿希大型金矿。

2 成矿理论成就

80~90 年代在成矿理论诸领域,如矿床成因、成矿机制、时空展布诸方面取得了令人瞩目的进展。这里,为了讨论的方便,试将这一重要领域的成就分解为下述的若干侧面:

2.1 多种多样海底成矿的直接观察及深入研究

70 年代人们借助于深海潜深器在太平洋中脊直接观察到正在进行的现代洋底成矿作用。这种成矿作用大致起始于洋底海水下渗,流经沉积层及下伏的玄武岩层,在渗流过程中汲取了一些金属元素,并将它们搬运到压力释放处,即洋中脊,并会同自中脊上溢的含矿岩浆热液,形成了黑烟囱、白烟囱等成矿产物。这种成矿作用被冠之以沉积喷流作用(Sedimentary Exhalative Processes)或热水沉积作用(Hydrothermal Sedimentary Processes)。含矿热液运行的驱动力为蕴育在洋壳中的地热能。

现代海底成矿作用的揭示给矿床界以有关成矿思路的新启迪。进入 80~90 年代,在一些实验室进行了喷流成矿的模拟,并在太平洋、大西洋、印度洋等洋中脊的若干地方都观察到这种正在进行的成矿作用。另外,对今天大陆上出现的某些矿床类型、成矿现象及蚀变岩石,人们也试图与洋底喷流成矿进行对比。如对早前寒武纪形成的条带状铁矿床,火山岩、火山沉积岩中的块状硫化物矿床,某些呈层状展布的钠长石岩、电气石岩等,一些学者倾向于古老洋底沉积喷流成因。

现代海底成矿作用是多样的、复杂的。除了与洋中脊有关,成矿物质来源于洋壳玄武岩的喷流成矿,以及人们早已熟知的深水铁锰结核及结壳以外,

最近报导的产于高硅质酸性火山岩破火山口的硫化物矿床引起了人们的关注。

1999 年《科学》杂志发表了一篇题为“一个产于海底硅质破火山口的黑矿型多金属硫化物矿床”的文章(Lizasa et al, 1999), 报道了利用深海潜深器于东京之南约 400 km, 水深 1 210~1 360 m 处, 找到了一个规模大致为 400 m×400 m×30 m, 异常富 Au、Ag 的硫化物矿床。含矿破火山口是成带分布的 9 个第四纪破火山口中的一个。含矿破火山口直径为 7 km, 主要由流纹质熔岩、角砾岩、浮岩组成, 其 $w(\text{SiO}_2) = 71\% \sim 74\%$ 。37 个矿石样之金属平均含量: $w(\text{Au}) = 20 \times 10^{-6}$, $w(\text{Ag}) = 1\,213 \times 10^{-6}$, $w(\text{Zn}) = 21.89\%$, $w(\text{Cu}) = 5.54\%$, $w(\text{Pb}) = 2.27\%$ 。从矿床在海底出露的面积估算, 矿石量大于世界范围已知 432 个黑矿床的 80%。该文作者主要为日本地质调查所成员, 他们认为, 前弧破火山口中大型黑矿床的新发现展示了海底众多硅质破火山口的找矿前景。

2.2 三大巨型成矿域的确立与深入研究

全球范围的环太平洋成矿域和特提斯成矿域早在 50 年代已确立。中亚成矿域的提出在文献中也早已出现, 但由于各种原因, 关于此成矿域的具体找矿成果及成矿规律研究则报道甚少。因此, 十余年前在讨论全球巨型成矿域时人们只认定环太平洋及特提斯。苏联解体后, 中亚成矿域面貌逐渐明朗。一些讨论全球性成矿问题的国际学术会议已明确认定三大巨型成矿域。如 1998 年底在澳大利亚举行的“斑岩和热液铜和金矿床——全球展望”讨论会(Porter, 1988)及短训班中, 中亚成矿域是报告和议论重点之一。笔者(涂光炽, 1999)发表的《初议中亚成矿域》一文所依据的若干素材即来源于此会议文集。

斑岩型矿床、块状硫化物矿床、低温热液矿床的广泛分布是三大巨型成矿域的共同之处, 它们提供了贵金属与有色金属的重要来源。在理论上, 三大成矿域是研究板块构造与成矿关系的理想场所。从目前情况看, 在铜、金、钼等金属产量与储量上, 环太平洋带雄居榜首, 但另二个成矿域在工作及研究程度上均远逊于环太平洋带, 因而潜力很大。

三个巨型成矿域的地理范围及囊托的成矿时代都存在不少争议, 争议本身深化了对成矿域的认识。每个巨型成矿域都包括若干颇有特色、著称于世的成矿区带。如环太平洋成矿域的美国西部科地勒那

成矿带, 以斑岩铜矿、斑岩钼矿、卡林型金矿、陆相火山岩型金矿的大量存在为特色。特提斯成矿域中的金沙江—红河成矿带的斑岩铜矿、与碱性岩浆杂岩有关金矿是人们关注对象。中亚成矿域乌兹别克南天山成矿带的穆龙套型金、银、钨矿是仅次于南非的全球第二大含金盆地, 中国东天山土屋—康古尔成矿带则蕴育着铜、金的诱人前景。

与以年轻的新生代造山带为主要地质背景的环太平洋及特提斯成矿域相比较, 中亚成矿域具下列特点:

(1) 中亚成矿域自中元古宙即开始发育。中国内蒙狼山地区的几个大型-超大型多金属矿床、白云鄂博矿床、西伯利亚南缘的干谷金-铂矿床、霍罗德累、格雷夫斯克等超大型铅锌矿床都主要形成于中元古代。

(2) 成矿高潮则发生于海西晚期, 中国土屋、蒙古额登勒、哈萨克斯坦阿克图盖等超大型斑岩铜矿床, 众多的陆相火山岩型低温热液金矿床等均在这一时期形成(如乌兹别克斯坦可克帕他斯)。

(3) 本成矿域岩石圈的多期次拉张、多期次裂谷形成导致多期次蛇绿岩、富碱岩浆杂岩、高 ϵ_{Nd} 值花岗岩类及巨厚黑色岩系的发育与广布。这一岩石圈发育特点在环太平洋和特提斯带是缺失的。

(4) 穆龙套金矿、干谷金矿、宗毫巴金矿、库姆托尔金矿等超大型金矿均赋存于黑色岩系。这一特点在世界范围也属罕见。

2.3 成矿模式(或矿床模式)研究的重要性得到全球共识

有关成矿模式的讨论文章, 在 20 世纪 50 年代以后的地质文献中已陆续出现, 但系统的专著性成果则主要见诸于 80 年代。短短的几年中, 在美、加、前苏联, 几乎是不约而同地出版了一系列专著, 其中, 最引人注目、涉及面广、总结性强的著作要算美国地质调查所 Cox 和 Singer(1986)合写的《矿床模式》(Mineral Deposit Models)。它以全球近 4000 个矿床研究素材为基础, 给出了 88 个矿床描述性模式。这本书的另一特点是提出了 60 个品位与吨位模式。

所谓成矿模式(或矿床模式)并没有十分严格的定义, 它是有关某一矿床或某一矿床类型中客观存在的, 可供描述的各种资料及参数的集合、抽象和概括。可供描述的资料及参数包括矿床产出的地质背景、矿体产状形态、矿石物质组成、围岩蚀变、控矿因

素等。这一部分相对较定型,它们的概括不仅有利于同类型矿床的对比,对找矿预测也很有帮助。另外,成矿模式也可以包括矿床成因,这一部分较难定型,它随着成矿理论水平的提高,成矿规律的深入研究等将会有所发展和改变。成矿模式的表达,一般要求文字与图表并重,文字宜言简意赅,图表要醒目准确。

成矿模式的建立过程常起始于单个矿床,特别是典型矿床的描述性概括,与其他类似矿床的对比,最终谋求同一类型矿床的概括。这一方面很成功的实例有斑岩型矿床、密西西比河谷型铅锌矿床等成矿模式的建立。它们在回顾已知、预测未知方面均起了重要作用。

这里,笔者想引用 P. B. Barton 为 Cox 及 Singer 的《矿床模式》一书所写的前言中的一句话:“即使基于一个错误的模式,也可能进行成功的勘查”。作为实例,Barton 列举了加拿大东部与火山活动有关的块状硫化物矿床和美国田纳西州以碳酸盐岩为容矿岩石的铅锌矿床。笔者在这里可以再加一个重要实例:南澳大利亚 Olympic Dam 最早几个钻孔的设计主要根据深部地球物理探矿资料和玄武岩可以淋滤出大量铜并堆积于附近的找矿思路。勘探和矿山开拓实践证明 Olympic Dam 深埋于 300m 厚无矿化蚀变古生代地层之下,产于元古宙碱性花岗岩中破碎角砾岩带,是超大型 Cu-Au-U-Ag-Co-REE-Fe 矿床。勘探非常成功,但原来的模式,即玄武岩淋滤出大量铜,却是错误的。

对我国矿床,主要是金属矿床,陈毓川、朱裕生等(1993)也写出了《中国矿床成矿模式》专著。

2.4 中酸性岩浆岩类及其含矿性研究进入一次新高潮

White 和 Chappel(1974)提出的将花岗岩类划分为 S 型(原岩是沉积岩)和 I 型(原岩是火成岩)的方案引发了国内外对花岗岩类研究与交流的热潮。80 年代仅在我国就召开了三次国际讨论会。为了缅怀 Hutton 对花岗岩类研究所起的奠基作用,以他命名的专门讨论中酸性岩浆岩类的 Hutton 研讨会(Hutton Symposium)也举行了四次。这些会议的内容涉及中酸性岩浆岩产出的地质背景、成因机制、分类方案、岩石学、地球化学、含矿性与对比研究等问题。

White 和 Chappel 的分类方案立足于澳大利亚东南 Lachlan 造山带花岗岩类的研究。主要以我国东南地区花岗岩类为对象,我国学者也提出了分类

意见,如徐克勤等(1984)的改造型及同熔型,王联魁的南岭型及长江中下游型,以及壳源型、壳幔源型等。石原舜三(1977)根据日本情况划分了钛铁矿型及磁铁矿型两种花岗岩类类型。以上分类方案有的强调物质来源,有的以形成机制为依据,有的立足于地理分布,有的则以铁的氧化物矿物作划分标准。有趣的是这些方案有异曲同工、殊途同归之处,即 S 型大致相当改造型、壳源型、南岭型和钛铁矿型,而 I 型则相似于同熔型、壳幔源型、长江中下游型和磁铁矿型。80 年代涂光炽指出(涂光炽等,1984),中国南方存在两条富碱侵入岩带,它们包括了 A 型花岗岩。

在前苏联,塔乌孙发表了《花岗岩类的地球化学分类及含矿性》专著(Tauson, 1977)。塔乌孙认为,不同成因和地质背景产出的花岗岩类在岩石化学、矿物组成、结构构造等方面常差别不大,很难将它们作为判别依据,但不同花岗岩类的微量元素组成却具明显特征,特别是某些微量元素比值颇有指示意义。塔氏给出了不同成因花岗岩类,即来自基性岩浆结晶分异的,来自地壳深熔的和来自花岗岩化或超变质作用的。以此为依据,划分了花岗岩类的九种地球化学类型并给出了它们的微量元素组成。他强调指出:综合的微量元素组成特征可作为判别地球化学类型的依据。西方一些学者如 Pearce, 也十分强调微量元素组成对不同地质体的判别作用。

钨、锡的石英脉型、云英岩型、矽卡岩型矿床常与 S 型花岗岩有关,而铜、金、铁的斑岩型、矽卡岩型、火山岩型矿床则多与 I 型花岗岩有关,这个规律存在于我国南方,也可以在南非的加里东期 Saldania 花岗岩带观察到(Scheepers, 1999)。

过去 20 年中,两类中酸性岩浆岩特别引起人们的兴趣与关注。一类是橄榄玄粗岩(shoshonite)及与之相当的富钾侵入岩。另一类是相对富钠的 adakite,具一定地球化学特征,可能来源于下地壳的重熔上侵。这两类中酸性岩浆岩以它们与不同类型 Cu、Au 等金属矿床的时空与成因联系及它们在岩石圈演化中所扮演的角色而引起人们的关注。由于这两类岩石及其组合都是最近提出的,关于它们的含义、时空分布与地质意义都有不少争议。

在一篇题为《钾质火成岩橄榄玄粗岩与 Au-Cu 矿床之直接与间接联系》的文章中,Müller 和 Groues (1993)认为太平洋西南诸岛屿及智利分布的若干超大型斑岩 Cu-Au 矿床及陆相火山岩型低温热液 Au 矿床都与橄榄玄粗岩和富钾侵入岩存在一定联系。

这种富钾岩石 F、Cl 含量和大离子亲石元素含量较高,而高场强元素含量则较低。

在最近举行的一次国家重点基础规划项目“大规模成矿作用与大型矿集区预测”年度工作汇报会上,我国一些学者(张旗等,2001)提出德兴、沙溪斑岩铜矿、长江中下游铜、金、铁矿可能与 adakite 有关。下地壳 adakite 岩浆的形成与上侵还可能引发中生代中国东部岩石圈减薄。

无疑,在过去的 20 年,有关中酸性岩浆岩的类型划分、形成机制、环境制约和成矿联系等方面均取得了十分重要的进展,但也应看到,还存在不少有待系统和深入研究的领域。还应当注意,花岗岩类的发育与演化常受地区因素的制约。譬如,赣南、桂北一些赋存石英脉型钨锡矿床的花岗岩与新疆阿拉套喀孜别克赋存云英岩型锡矿的花岗岩在宏观上都属于 S 型钙碱性黑云母花岗岩,岩石化学与矿物组成很近似,但前者一般 $\epsilon_{Nd} < -10$,而后者 $\epsilon_{Nd} = +2.2$,暗示在花岗岩成岩物质来源方面存在差异,这与两个地区的地质发育有关。

2.5 层控矿床研究的兴起

过去 20 余年国内外层控矿床研究达到高峰,具体表现是两个大型专著的出版。其一是 10 大卷《Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits》(Wolf, 1976~1981),其二是三大卷《中国层控矿床地球化学》(涂光炽等,1984,1987,1988)。

《Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits》大多数已译成中文出版。中译书名是《层控矿床和层状矿床》,显然,Handbook(指南)被省掉了。顾名思义,该专著主编之所以将书命名为 Handbook,是希望它在出版后成为搞层控矿床的重要工具书。无疑,这一目的是达到了,因为 10 大卷著作论述了层控矿床的各个方面,包括含义、分类、形成机制(风化、淋滤、变质等)、区域性研究、不同矿床类型的剖析、典型矿床的深入探讨,及某些矿床组份、微量元素和同位素地球化学论述。专著采用了论文集的方式,数十位论文作者均系当代知名矿床学家,他们总结了层控矿床的最新进展,使全书可以起到层控矿床重要工具书和参考书的作用。

两部专著虽都以层控矿床为研究对象,但侧重点、理论、方法、甚至定义、分类都有一定差别。Wolf 主编的专著包括了典型的沉积成岩矿床,如磷块岩矿床,各篇论文均取材于已获得的资料,因为所涉及的矿床多系较老矿山,工作及研究程度较高,论文作

者并未再以此为基础,进行新的研究。该专著讨论的主要是西欧和北美的矿山,在此界限之外的仅有南非等极少数地区。

如果说《Handbook of strata-bound and stratiform ore deposit》是论文集,则在中国出版的《中国层控矿床地球化学》是较完整的遵循一定大纲编写的,是与中国大陆实际成矿地质相结合的矿床专著。由于篇幅关系,它更多地涉及地球化学内容,因而地质背景相对少一些。还有一些原因,这本书覆盖的矿床多在中国东部。另外,这本书的写成伴随了大量的各种测试工作。

时至今日,对层控矿床的定义、涵盖范围、主要研究内容等,在国内外学者中尚存在多种不同看法。对层控矿床形成机理的侧重点也不尽相同。在《中国层控矿床地球化学》一书中,一根贯穿全书的主线是改造成矿作用。这种成矿作用有别于传统的、人们早就识别的沉积成矿、变质成矿和岩浆及岩浆热液成矿。由于中国东部岩石圈在地质历史早期经历多次变动,而在中生代燕山运动时,变动更强烈一些,这就为改造成矿提供了良好场所。

这两个大型矿床著作都对矿床,特别是层控矿床的研究历史作了较深刻的刻画。在对若干层控矿床认识的过程中,内生与外生的重要性常是交替出现的,同样,同生与后生、浅成与深成的争论也常具高频率。但这两大著作的不少作者都发现,在层控矿床形成的概念中,实际上融合了内生与外生,同生与后生,看似相互排斥,实则相辅相成的地质作用。看来,至少在部份层控矿床中,内生与外生,同生和后生都可能在矿床形成的一定阶段或在一定部位起作用。譬如,作为层控矿床最简单的实例—砂岩铜矿,在它早期的沉积阶段已有了矿化线索,但不一定成矿,而富集到工业要求,常发生于后期的构造错动及活化,实际上是融同生与后生、外生(沉积成岩)与内生(构造改造)两种作用于一体。在前述的洋底沉积喷流成矿全貌中,海底热泉喷口处以沉积方式形成硫化物堆积,而在热液未冒出喷口前,可以充填交代方式,形成筒状矿体,这是在空间上融外生与内生于一体的例子。

2.6 同位素及微量元素组成特征的认识在了解成矿过程及物质来源等问题上起着日益重要的作用

考虑到同位素及微量元素在成矿理论应用方面涉及面甚广,这里将只举若干实例加以说明。流行

多年的赋存于镁铁质-超镁铁质杂岩中的铜镍硫化物矿床的传统成矿模式要求地幔部分熔融,结晶分异,形成硅酸盐熔浆与硫化物熔浆的不混熔,铜镍及铁的硫化物得以富集成矿。这一成矿模式的必要条件是:所有成矿物质都来自地幔。

但是,在全世界五个镍储量超过百万吨的超大型铜镍硫化物矿床中,却有三个,即俄罗斯的 Noril'sk,加拿大的 Thompson 和澳大利亚的 Kambalda,其矿石硫同位素组成(Eckstrand et al., 1994)却指示硫来源于海水硫酸盐,而非地幔。这种地壳来源的硫使得人们修改了传统的铜镍硫化物矿床成矿理论,成矿物质并非都来自地幔,硫化物的形成与富集也有可能在地壳介质中进行。

花岗-绿岩带型金矿床是加拿大、澳大利亚、巴西和我国最主要的金矿类型。它们都具储量大、产值高、远景佳的特点。在成矿地质背景、控矿因素、矿石组成、蚀变类型诸方面也很相似。一般认为,这种矿床类型的金主要来自古老的绿岩,即中基性火山岩。

但是,20年来大量的同位素定年工作说明加拿大、澳大利亚、巴西的花岗-绿岩带型金矿主要形成于新太古代,金矿年龄滞后于围岩约一亿年。但在中国东部,无论胶东、豫西、华北克拉通北缘,这种类型金矿的主成矿期却是中生代,较围岩滞后了20多亿年。目前,中外地质界都在思考、议论这一巨大时差原因之所在。倾向性的意见是:不同时差反映了各个地区在晚太古代花岗-绿岩带形成后的地壳不同演化历史。在加拿大东部、澳大利亚西部和巴西东北部,新太古代以后的地壳活动相对平稳,古老的成矿区镍得以保留,而在中国东部,天翻地复的燕山运动使古老的金活化、搬运、再次富集成矿。中国东部花岗-绿岩带型金矿年龄是它们改造成矿的年龄。这说明了成矿年龄也可以从一个侧面反演特定地区地壳演化历史。

20年来同位素定年在矿床学的应用中无论在方法上和测定对象上都趋向于多样化。测定对象除矿石和蚀变矿物外,近年来对金属矿物和其他有用矿物也作了有益尝试。如对美国密西西比河谷型铅锌矿床, Nakai 等(1993)用 Rb-Sr 法测定闪锌矿年龄, Chesley(1994)用 Sm-Nd 法测定萤石年龄。二者测定值还不够稳定。近来,运用 Re-Os 法较成功地测定了辉钼矿年龄,但用于其他硫化物难度较大。

Müller 和 Groves(1993)区分了五种钾质火山岩

产出的构造背景,即板内、大陆弧、后碰撞弧、始大洋弧和晚大洋弧。他们研究了这五种不同构造背景产出的钾质火山岩的微量元素组成特征,提出了 LILE(大离子亲石元素)、轻稀土元素、HFSE(高场强元素)及 c_{Zr}/c_{Al} 、 c_{Ti}/c_{Al} 比值在板内钾质火山岩最高,在大陆弧及后碰撞弧居中,而在大洋弧最低。始大洋弧与晚大洋弧之钾质火山岩可依 Pb、Zn 和 Nb、La 含量判别,它们在晚大洋弧含量高。据说,以这种微量元素组成特征区分不同构造背景,其准确率可达 90%~95%。Müller 和 Groves 认为斑岩 Cu-Au 矿床、低温热液陆相火山岩型 Au 及 Au-Cu 矿床主要局限于晚大洋弧、大陆弧和后碰撞弧中之钾质火山岩系中。

2.7 流体包裹体研究的普及与提高

矿石和矿物中流体包裹体研究对了解成矿流体、搬运媒介、成矿环境等有很大帮助,方法简单易行,设备耗资不多,理论上也较成熟,因而早已成为矿床工作者的必要研究手段。在过去20年中,这一方法在矿床界应用已相当普及并有不少提高。包裹体研究的重大进展部分体现于包裹体大师 Roedder(1984)的《流体包裹体》专著。这是美国矿物学会主持的一件浩大工程。全书篇幅达640余页,列出参考文献2000件。书中除展示了 Roedder 数十年来在该领域的重要贡献外,还列举诸如气液包裹体研究奠基人之一,苏联学者耶尔马科夫等人的工作成果。

专著对矿床中包裹体研究给予了很大份量,涉及的矿床类型包括密西西比河谷型 Pb-Zn 矿床(MVT)、黑矿、斑岩矿床、低温热液金矿床、矽卡岩矿床以及一些 W、Sn、U 矿床,还有各种变质矿床。这里只概略介绍 MVT 和斑岩矿床两部分。通过介绍,读者可以了解到同一类型矿床包裹体的若干共同特征,这对于全面推敲矿床成因、定位、找矿都是重要的。

Roedder 主要研究了著名于世的美国及西欧、北欧的 MVT。Roedder 发现,它们的流体包裹体有惊人的相似性,表现在:

- 流体密度 $\rho > 1 \text{ g/cm}^3$, 有时 $\rho > 1.1 \text{ g/cm}^3$ 。
- 流体总压力低,但大于卤水蒸气压。
- 流体温度一般为 $100 \sim 150^\circ\text{C}$, 很少到 200°C , 晚期方介石 $t < 100^\circ\text{C}$ 。
- 流体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) > 15\%$, 甚至 $w(\text{Na-Cl}_{\text{eq}}) > 20\%$, 但很难观察到 NaCl 子矿物,可能因存在较多其他元素正离子之故。离子浓度: $c_{\text{Cl}} > c_{\text{Na}} >$

$c_{Ca} > c_K > c_{Mg} > c_{Ba}$

e. 有机组分普遍存在,可呈 CH_4 ,或油滴状或溶于流体中。

f. 流体流速很慢,约数米/年。

Roedder 涉及的斑岩矿床主要产于南北美洲西部及太平洋西南诸岛、前苏联、中国玉龙。除我们所熟知的斑岩型 Cu、Mo、Cu-Mo、Cu-Au 矿床外,还包括玻利维亚一些斑岩 Sn 矿。同样, Roedder 也强调指出了这些斑岩矿床流体包裹体的某些一致性:

a. 温度多落入 $500 \sim 700^\circ\text{C}$, 也有极少 $t > 800^\circ\text{C}$ 和 $t < 500^\circ\text{C}$ 的。

b. 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) = 40\% \sim 60\%$ 居多, 有的 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 高达 $70\% \sim 80\%$ 。从 Roedder 列出的表可察觉到, 美国西部超大型斑岩铜矿流体盐度为 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) = 35\%$ 。总体看, 太平洋西南诸岛斑岩矿床流体盐度大于美国西部。

c. 普遍存在沸腾现象, 流体中存在至少两相包裹体。

d. 子矿物种类多、出现频率高。常可见钾石盐、硬石膏、赤铁矿、 CO_2 和各种硫化物矿物。

Roedder 从流体包裹体这一重要侧面, 剖析了 MVT 和斑岩型矿床的成矿特征与机制。

小 结

从前述可以明显看出, 过去 20 年来世界范围的找矿及成矿理论研究均取得了十分喜人的进展。由于篇幅及其他原因, 本文在讨论成矿理论建树时, 只涉及了海底成矿、巨型成矿域、成矿模式、花岗岩类与成矿、层控矿床、微量元素、同位素、流体包裹体的运用等几个方面。还有若干重要领域, 如生物成矿与有机质成矿、区域成矿规律、成矿实验、成矿动力学等, 它们内容十分丰富, 难于在短文中概括。还有一些分支, 如超临界流体与成矿、冲击成矿、基底与成矿、泛大陆拼合、裂解与成矿等, 前景良好, 但目前尚处于探索阶段, 本文也暂割爱。

参考文献

- 陈毓川, 朱裕生, 等. 1993. 中国矿床成矿模式[M]. 北京: 地质出版社.
- 裴荣富、吴良士. 1994. 特大型矿床成矿偏在性研究的新进展[J]. 矿床地质, 13(2): 155.
- 涂光炽等. 1984, 1987, 1988 中国层控矿床地球化学(I、II、III卷)[M]. 北京: 科学出版社
- 涂光炽, 张玉泉, 赵振华. 1984. 华南两个富碱侵入岩带的初步研究 花岗岩地质和成矿关系(徐克勤, 涂光炽主编)[M]. 南京: 江苏科学技术出版社 21~31
- 涂光炽. 1999 初议中亚成矿域[J]. 地质科学, 34(4): 397~404.
- 涂光炽等. 2000 中国超大型矿床(I)[M]. 北京: 科学出版社
- 徐克勤, 涂光炽, 裴荣富, 等. 1984. 华南花岗岩成因与成矿花岗岩地质和成矿关系[M]. 南京: 江苏科学技术出版社 1~20
- 张旗, 王炎, 钱青. 2001. 中国东部晚中生代埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 17(2)(出版中)
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geology, 8: 173~174
- Chesley J T, Halliday A N, Kyser T K, et al. 1994 Direct dating of Mississippi valley-type mineralization: use of Sm-Nd in fluorite[J]. Econ. Geol., 89: 1192~1199.
- Cox D P, Singer D A. 1986 Mineral Deposit Models[J]. U. S. Geological Survey Bulletin
- Eckstrand O R, Hulbert L F. 1994 World class magmatic nickel deposits[M]. Geological Survey of Canada Minerals Colloquium, 1.
- Ishihara S. 1977 The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks[J]. Mining Geology, 27: 293~305
- Kesler S E. 1973. Cu, Mo and Au abundances in porphyry copper deposits[J]. Econ. Geol., 68: 106~112
- Kirkham R V. 1994 World class porphyry and sediment-hosted stratiform copper deposits[J]. Geological survey of Canada Minerals Colloquium, 1.
- Lizasa K, Fiske R S, Ishizaka O, et al. 1999 A Kuroko-type polymetallic sulfide deposit in a submarine silicic caldera[J]. Science, 283: 975~977
- Muller D, Groves D I. 1993. Direct and indirect associations between potassic igneous rocks, shoshonites and gold-copper deposits[J]. Ore Geology Reviews, 8: 383~406.
- Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, et al. 1993 Rb-Sr dating of sphalerite from Mississippi Valley-type ore deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57: 417~427
- Porter T M. 1998. Porphyry and hydrothermal copper and Gold deposits—A global perspective[M]. Australian Mineral Foundation
- Roedder E. 1984 Fluid Inclusions[J]. Reviews in Mineralogy, 12: 25~35.
- Sangster D F. 1994 World class MVT and SEDEX Pb-Zn deposits[J]. Geological Survey of Canada Minerals colloquium, 1
- Scheepers R. 1999. Granite evolution and mineralization in the Saldania mobile belt, South Africa[A]. 4th Hutton Symposium[C]. 241
- Sillitoe R H. 1995. Exploration and discovery of base and precious metals deposits in the Circum Pacific region during the last 25 years[J]. Resource Geology Special Issue, 19
- Tauson L V. 1977. Geochemical types and ore potential of granitoids Nauka[M]. (in Russian).
- Wolf K H. 1976-1981 Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits[M]. (in ten volumes) Elsevier Company

The Development of the Mineral Deposit Prospecting and Research Work in the Past Twenty Years: A Brief Review

Tu Guangchi

(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

Key words: prospecting, metallogenic theory, submarine ore-forming process, huge metallogenic provinces, metallogenic model, intermediate model, intermediate-acid magmatic rocks and mineralization, stratabound deposit, trace elements and isotopes, fluid inclusion

Abstract

In this paper, a brief review is given on some significant achievements gained in prospecting work and metallogenic researches in the past twenty years. It is pointed out that advances in the prospecting work, especially for gold and copper deposits, have remained quite splendid in spite of depression of mining industry in some countries. Big mining power have all emphasized the importance of superlarge deposits. In the aspect of metallogenic theories, this paper mainly presents retrospects of the research history of such problems as varied and complex submarine ore-forming processes, three huge metallogenic provinces, metallogenic models, intermediate-acid magmatic rocks and their related ore-forming processes, stratabound deposits and the application of isotopes, trace elements and fluid inclusions to metallogenic studies.

1999 年影响因子总排序前 100 位的地学类期刊

名次	期刊名称	影响因子	总被引频次	名次	期刊名称	影响因子	总被引频次
1	矿床地质	1.487	312	49	地学前缘	0.653	296
3	第四纪地质	1.195	361	57	岩石学报	0.625	360
15	地质学报	0.848	544	73	岩矿测试	0.567	237
21	地质论评	0.807	624	95	地球科学	0.515	538
28	地球学报	0.756	216	95	地球化学	0.515	332
43	地球物理学报	0.688	793	97	地质科学	0.513	393

摘自《1999 年度中国科技期刊引证报告》, 中国科学技术信息研究所, 2000 年 11 月。