

文章编号: 0258-7106 (2002) 02-0097-09

从一个侧面看矿床事业的发展^{*}

——若干重要矿床领域的新进展及找矿思维的开拓

涂光炽

(中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

摘 要 文章回顾了斑岩铜矿、铜镍硫化物矿床、暗色岩及有关矿床、以沉积岩为容矿岩石的 MVT 型及 SEDEX 型铅锌矿床和金刚石矿床等在地质背景、类型拓展、成因机制和找矿前景等方面的研究进展与认识。

关键词 斑岩铜矿 暗色岩 铜镍硫化物矿床 MVT SEDEX 金刚石矿床

中图分类号: P61

文献标识码: A

为纪念中国地质学会成立 80 周年,矿床专业委员会嘱我撰写有关 80 年来矿床学发展的回顾性文章,这是对我的信任和委托,故欣然从命。但多次提笔,却总感为难。原因是近年来已有多篇这类文章出现。最近发表的翟裕生先生撰写的“矿床学的百年回顾与发展趋势”(翟裕生,2001)涉及了矿床学的诸多领域,其分析系统扼要。本人也就此发表了若干篇论文(涂光炽,1991;1995;2001),现再写,势必重复。

思之再三,笔者决定不再就矿床学诸分支领域的成就作剖析、回顾,而是想换一个方式,即围绕若干重要矿床领域及与之有关的找矿思维作一些追忆与探讨。

这样,文章就更改为目前的题目。为与本专辑其他文章更好地配合,本文将着重讨论国外进展。

1 斑岩铜矿——横向发展和纵深开拓

在世界范围内,斑岩铜矿多年来一直居铜储量和产量的首位。对该类矿床的找矿工作在过去 80 年卓有成效。1920 年前后,仅在美国西南有少数几个斑岩铜矿被开发,而如今全球开采中的斑岩铜矿数目已超过 200 个。

早年,在俄文文献中找不到“斑岩铜矿”一词,代替它的是细脉浸染状矿床。在西方,“斑岩铜矿”的名称在矿床界普及也不过是 1940 年以后的事。按

照 Kirkham(1997)的说法,斑岩铜矿可划分为 Cu, Au, Cu-Au, Cu-Mo 和 Cu-Mo-Au 五大类,这比 30 年前的仅分为 Cu 和 Cu-Mo 两大类有了很大的发展。另外,今天斑岩矿床的概念除了包括斑岩铜矿和斑岩钼矿外,还包括斑岩锡矿、斑岩钨矿、斑岩铅锌矿等。但同时也应看到,斑岩型的锡、钨、铅锌矿床目前只局限于个别实例,经济意义有限。只有斑岩铜矿和斑岩钼矿分布广、个数多,工业价值重要。

斑岩铜矿主要分布于环太平洋、特提斯和中亚三大全球性成矿域中。矿床的形成时代多为中、新生代,少数为晚古生代,个别为元古代。这一时空分布特点使得斑岩铜矿成为研究板块活动与成矿关系的最佳对象。当然,这并非易事,但研究其他矿床类型与板块构造的关系就更为难上加难了。

Kirkham(1997)认为斑岩铜矿可形成于板块消减之岛弧背景中,也可形成于消减后之弧-弧、弧-大洋高原、弧-大洋中脊、弧-大陆之碰撞中。有些斑岩铜矿则可形成于裂谷和其他拉张环境,如美国西部盆地岭区中的一些斑岩铜矿。

由于大量斑岩铜矿分布于钙碱性岩浆或碱性岩浆活动相当剧烈的宏观背景中,而矿床产出部位多在中酸性小岩体(斑岩体)的顶部和围岩中,因而,1960 年以前,矿床界几乎一致的看法是,斑岩铜矿是典型的岩浆热液矿床。之后,对围岩蚀变的深入研究,氢、氧稳定同位素和气液包裹体等测试手段的引进,加上矿床形成的浅成部位,逐渐使人们重视大气

^{*} 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 2001-12-21; 改回日期 2002-03-25。李岩编辑。

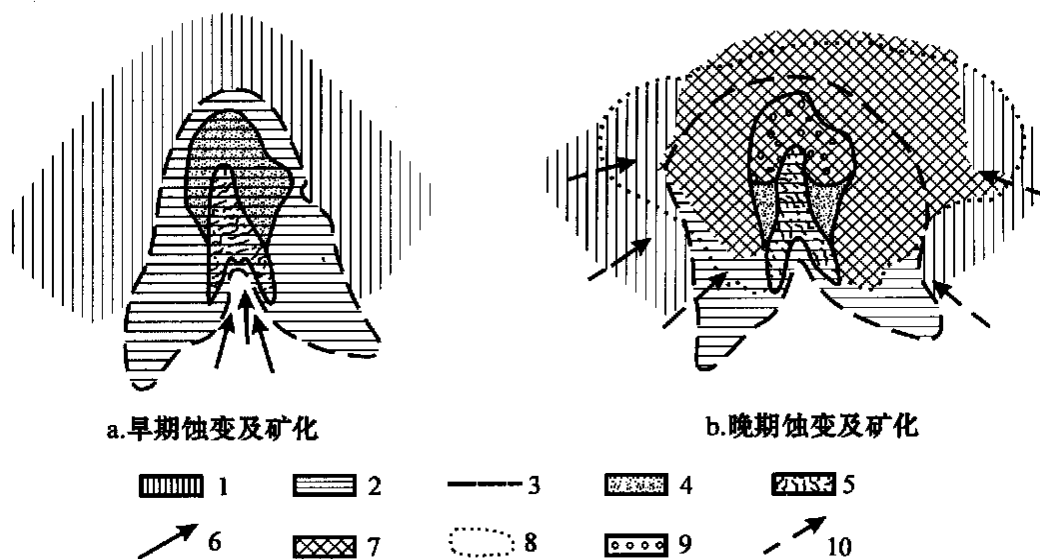


图 1 斑岩铜矿成矿及蚀变作用与成矿流体演变关系(据 Gustafson et al., 1975)

1—青盘岩化; 2—钾硅酸盐化; 3—硫酸盐界线; 4—黄铜矿化; 5—斑铜矿-黄铜矿化;
6—岩浆热液; 7—绢云母化; 8—黄铁矿化; 9—黄铁矿-斑铜矿化; 10—大气降水

Fig. 1 Porphyry Cu deposit: magmatic and hydrothermal mineralization and alteration

a. Early alteration and mineralization; b. Later alteration and mineralization. 1—Propylitization; 2—K-silicicization; 3—Sulfate boundary; 4—Chalcopyritization; 5—Bornitization-chalcopyritization; 6—Magmatic hydrothermal fluid; 7—Sericitization fluid; 8—Pyritization; 9—Pyritization-bornitization; 10—Meteoric water

降水在斑岩铜矿形成中,特别是在后期的不可忽视的作用。这里,引用了 Gustafson 等(1975)的斑岩铜矿的早期及晚期成矿模式图解(图 1)。从图 1 中可以清楚地看出在成矿过程中成矿流体的演化。Gustafson 等的见解在今天仍为不少斑岩铜矿工作者所接受。

尽管人们早已知道世界上最早开发的美国超大型 Bingham 斑岩铜矿拥有 900 多吨的金储量,但真正形成寻找富金斑岩铜矿的热潮还是近 20 年来的事情,其中最显著的成就是 1988 年在印度尼西亚的 4 000 多米高山地带找到的 Grasberg 斑岩铜矿,它的金储量将近 1 600 t。

伴随着富金斑岩铜矿的寻找与发现,关于富金机制与此类斑岩铜矿产出的地质背景问题开始成为讨论的焦点。较早, Kesler(1973)提出,产出于岛弧的斑岩铜矿富金,而产出于大陆边缘者富钼。后期一些批评者指出,这种分布情况确实存在,但例外并不鲜见,如北智利富金斑岩铜矿与贫金者常相伴而生(Sillitoe, 1998)。

Sillitoe(1998)从岩浆及岩浆热液的氧逸度出发,认为贫金与富金斑岩铜矿之主要差别在于后者含多量磁铁矿,它意味着氧化岩浆及岩浆热液,这种

岩浆由于其氧逸度较高,所产生之硫化物量少,因而附着于它们的金主要在热液中富集,形成富金斑岩。Sillitoe(1998)给出了富金斑岩铜矿、富钼斑岩铜矿与岩浆分异程度及氧逸度之关系图解(图 2)。他认为,高氧化及分异差的岩浆对金的富集最有利。

Muller 和 Groves(1993)从构造背景和岩浆碱质出发,提出富金斑岩铜矿和陆相火山岩型低温热液金矿及金铜矿主要产于晚大洋弧、大陆弧及后碰撞弧中之钾质火山岩系中。

斑岩铜矿与陆相火山岩型低温热液金矿床的关系是矿床界十分关注的问题。在宏观地质背景上,它们都主要分布于环太平洋、特提斯和中亚 3 大成矿域中,两者都可能与类似的板块活动机制有关。有时,在较小的范围内还可以看到两者的密切空间联系,如菲律宾北吕宋岛的 Lepanto 火山岩型低温金矿大致处于 Far Southeast 斑岩铜矿侧向上盘位置。最近 Arribas Jr.等(1995)对这两个相邻矿床作了较详细的年代学工作。他们主要采用 K-Ar 法对两者的新鲜全岩和各种热液矿物作了较多测定,找出两者的前矿化和后矿化火山岩年龄分别为 2.2~1.8 Ma 和 1.2~0.9 Ma,成矿热液活动时间为 1.5~1.2 Ma,另外, Lepanto 的明矾石与 Far Southeast 热液黑

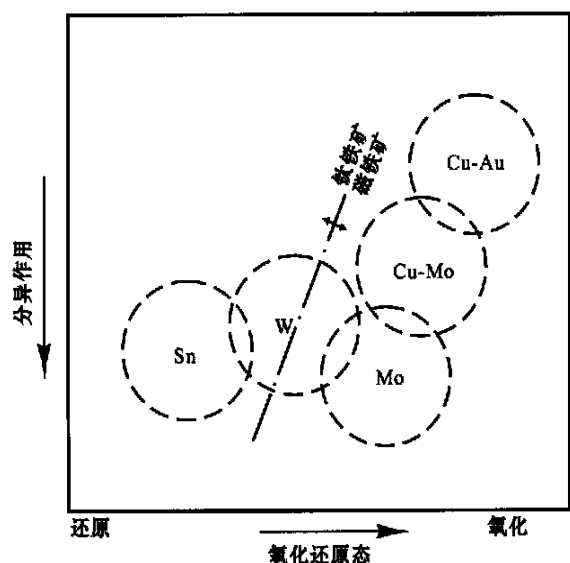


图 2 斑岩 Cu-Mo、斑岩 Cu-Au 矿床的岩浆分异程度与氧化还原态关系图(据 Sillitoe, 1998)

Fig. 2 Relationship between magmatic differentiation and redox state of porphyry Cu-Mo deposits and porphyry Cu-Au deposits

云母、伊利石年龄一致。Arribas Jr. 等认为,这两个矿床密切的时空关系和若干共同的地球化学特征说明两者都来自同一热液成矿体系。这里,还应当指出, Lepanto 是富铜的低温热液金矿,而 Far Southeast 则是富金的斑岩铜矿。

但上述北吕宋的实例可能并不典型,因为更常见的情况是大范围内只有一种矿床类型出现。如在日本列岛,陆相火山岩型低温热液金矿床相当发育,还产出超大型菱刈(Hishikari)矿床,但至今尚未发现斑岩铜矿。1979 年日本矿山地质学术年会还专门讨论了这一问题。斑岩铜矿引起矿床界和找矿单位的普遍关注,其核心问题是它们形成大型-超大型规模的机率很高。Kirkham(1994)指出,在全球约 20 个铜金属储量大于 1 000 万吨的特大铜矿床中,80% 为斑岩铜矿及砂页岩型层状铜矿。我国川西玉龙铜矿带、赣北德兴铜矿田,以及新发现的新疆土屋—延东铜矿带等,其铜储量及资源量都主要由少数大型-超大型斑岩铜矿提供。

目前,有关大型-超大型斑岩铜矿的形成机制问题,很少见诸讨论。看来,斑岩铜矿发育的宏观背景,即其与板块活动和大断裂的密切联系是需要认真考虑的。Roedder(1984)提供的各地斑岩铜矿的气液包裹体综合数据,即均一温度 500 ~ 700 °C,盐度

[$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$] 40% ~ 70%, 暗示超临界高盐度流体的可能存在,后者在搬运大量金属中的重要性,是应当从野外和实验角度加以检验的。

20 世纪 30 ~ 40 年代主要根据美国西南部斑岩铜矿的研究成果提出了矿床可以发生次生富集作用的观点。在铜矿床的垂直剖面上,地表与浅部为氧化带,铜主要产生淋溶作用,向下运移。含铜溶液与原生矿石遭遇,使黄铁矿、黄铜矿等被交代,铜沉淀并形成富铜矿物,如辉铜矿、铜蓝等。这样,次生富集矿石的铜含量可以高于下面的原生矿石。斑岩铜矿的近乎垂直的筒状、漏斗状矿体及美国西南、西部的干旱气候有利于次生富集带的发育,而这对于工业利用是十分重要的。

2 铜镍硫化物矿床——地质背景的千差万别

铜镍块状硫化物矿床是镍的最主要来源,也是铜的重要来源之一,其加工副产品铂族元素也具有很高的经济价值。矿床赋存于镁铁质-超镁铁质岩浆岩中。

对这种重要而且分布较广的矿床类型,在 80 年前矿床界的共识是岩浆不混熔矿床,但岩浆热液也起着关键的作用。这种矿床中的热液成矿作用是首先在 Sudbury 被观察到的,之后在不少矿床中也观察到了。

经过多年实践的检验,岩浆分凝和岩浆热液在铜镍硫化物矿床形成中所起的不可替代的作用已为矿床学界所接受。与此同时,人们也发现,产出这种矿床类型的地质背景丰富多彩,千差万别。

首先,Dietz 于 1964 年提出庞大的 Sudbury 构造和铜镍矿石不是来源于地壳深部或地幔,而是由陨石冲击形成的(Dietz, 1964)。Dietz 假设,一个含铜的铁陨石冲击了 Sudbury,形成直径达 50 km 的陨石坑,引起围岩的角砾化和大量冲击锥的形成。按照 Dietz 的看法,铜镍矿石来自天外,而矿床的石英闪长岩围岩则是冲击高温熔融岩石结晶形成的。冲击还使下地壳产生岩浆,它们上侵后成为矿区内的另一种重要岩石——苏长岩。

无疑,Dietz 的天外来客见解震撼了矿床界和天文界。支持者和反对者都展示了各自的证据和认识,进行热烈的讨论。1992 年和 1997 年仅在 Sud-

bury 就举行了两次命名为“Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution(大型冲击作用与行星演化)”的学术讨论会。

由于发现了更多的冲击证据,如“角砾岩墙”,冲击时产生大量角砾下降后形成的特殊建造等,使得天外来客论似乎占了上风。目前,较流行的看法是,天体冲击说是可以成立的,但铜镍矿石并非从天而降,而是冲击以后巨大的能量引发了某些地壳岩石的熔融,之后结晶分异,产生镁铁岩-超镁铁岩及铜镍矿床。

笔者不可能在这篇短文中作详细讨论,但可以介绍若干支持天外来客论的新的微观证据。Becker 等于 1994 年在 Sudbury 的 Onaping 建造中找到 10^{-6} 级的 Fullerenes(富氏碳),即 C_{60} (Becker, 1994)。两年后同一作者在 Sudbury 的 C_{60} 中发现氦具地外来源的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值。据 Naldrett 报道(Naldrett, 1994), Masaitis 等在 Onaping 建造中找到了 6 粒金刚石,粒径 50~100 nm,结晶形态类似在其他陨石坑中所见。还有人利用钌同位素比值论证了 Sudbury 矿石和围岩的壳源成因。

多年来 Sudbury 的镍储量一直居世界首位,研究者也始终将它作为典型实例对待,但上述冲击论起来造反并取得了成功。这就使 Sudbury 成为在产出的宏观地质背景上一个非常不典型、非常特殊的实例。

镍储量居全球第二位的俄罗斯 Noril'sk 矿床在产出的地质背景和形成机制上也有特殊的一面。这个超大型矿床与西伯利亚大面积暗色岩建造有关,赋存于暗色岩建造的侵入相岩石中。Naldrett (1994) 认为,暗色岩中的部分溢流玄武岩中 Cu, Ni 和 PGE 严重贫化,这主要是玄武岩与后期侵入岩浆接触后,大量 Ni, Cu, PGE 等自玄武岩中转移到侵入岩内的结果。因此,侵入相岩浆富集了 Ni, Cu, PGE 等并在以后形成超大型铜镍硫化物矿床。

在 Noril'sk 铜镍矿床形成机制中另一有趣的问题是硫同位素组成。两位俄国人 Godlevski 和 Grinenko(1963)发现这个矿床中的硫化物矿物都具有高正值的 $\delta^{34}\text{S}$,说明 S 不是来自基性-超基性岩浆,而是来自地层。他们认为,岩浆穿过富含硫酸盐的地层时,硫酸盐被还原为硫化物。这展示了硫的壳源性质,是岩浆侵入到地壳中,同化大量硫酸盐的结果,同时也说明了 Noril'sk 矿床或矿物质的多源性。上述 Naldrett 关于 Noril'sk 贫化玄武岩中的有用金

属迁移到侵入岩的问题尚需作更多的剖面地球化学工作及实验才能验证,但硫的壳源无疑可以确定。之后,其他铜镍硫化物矿床,包括超大型矿床,如加拿大的 Thompson 也有 $\delta^{34}\text{S}$ 为高正值的报道。

20 世纪 60 年代对传统的铜镍硫化物矿床成矿理论的冲击接二连三地出现。除了 1963 年壳源硫的提出和 1964 年 Sudbury 天外来客说的冲击外,1966 年开始在西澳大利亚发现了一系列产于超镁铁质火山岩中的铜镍硫化物矿床。据 1981 年 Ross 和 Travis 的报道(Ross et al., 1981), 60~70 年代在西澳共找到 56 个 $w_{\text{Ni}} \geq 0.8\%$ 的该类矿床。一般习惯于将这种新类型的铜镍矿床称为 Kambalda 型矿床,它的出现引发了一系列有关成矿理论的讨论。

铜镍矿床产在超基性火山岩(或称科马提岩)底部,如果岩流覆盖负地形,则在洼地矿化更富集一些。如果矿层加厚,含矿的科马提岩也加厚。这种矿床上部由浸染状矿石组成,下部则多为块状矿石,两者界线清晰。矿体和围岩界线也很清晰。

从该矿床类型被发现一直到现在,岩浆分凝成矿说一直占主流地位,但也有人提出喷流的见解。

从上述简略的介绍与回顾可以看出铜镍硫化物矿床都与镁铁-超镁铁岩存在密切关系,但在地质背景、形成机制方面则是多种多样的。

3 暗色岩——成矿从零走向丰富多采

暗色岩(trap),也称溢流玄武岩(flood basalt), 80 年前人们谈到它时,总是想到印度西部德干高原出露的暗色岩。虽对这个形成于白垩纪与第三纪之间的庞然大物作了较多的岩石学和岩石化学研究,但并没有引起人们很大的兴趣,原因之一是它相当单调,缺少工业意义的矿化;原因之二是类似的暗色岩在世界其他地方较少出露,即或出露,面积也不大。

但是,随着岁月的流逝,人们逐渐改变了上述看法。首先,在亚洲东部找到了两个大面积的暗色岩分布区:中国西南峨眉山玄武岩和东部西伯利亚暗色岩,前者覆盖面积达 50 万平方公里,后者则更大一些。在世界其他地区也找到若干面积较小的暗色岩。更重要的是,通过多年 DSDP(深海钻探计划)和 ODP(大洋钻探计划)的作业,在大洋深处找到了若干大面积暗色岩,如印度洋中南部的 Kerguelen-Broken Ridge 暗色岩,分布面积达 230 万平方公里,太平洋西南的 Ontong Java 暗色岩,面积也达 190 万平

方公里。还有若干面积较小的暗色岩分布区。这些大面积的洋底溢流玄武岩无疑会对当时洋底生物群、成矿作用、洋流,甚至海洋与大气产生一定的影响。

可以说,发现多个大面积陆上和海下溢流玄武岩是近 30 年来固体地球科学领域的重大成就之一。大面积暗色岩区已被正式命名为大火成岩省(Large Igneous Province),对它的探索将是新一轮大洋钻探计划的重点课题之一。

与此同时,暗色岩的含矿性也引起了人们的关注。暗色岩主要由镁铁质火山岩,即玄武岩及镁铁质-超镁铁质侵入杂岩组成。前者呈面型展布,分布面积大,后者则多呈线型展布,分布面积小。从含矿性看,基性火山岩中常见一些低品位浸染状铜矿化,目前尚未见到工业矿化的报道。但基性侵入杂岩的含矿性,尽管工作和研究程度不够高,其重要性和独特性已是勿容置疑的了。

在 20 世纪 80 年代末美国经济地质学会出版的“与岩浆有联系的矿床”专著中,有命名为“与溢流玄武岩有联系的矿床”的专门章节,由 A. J. Naldrett (1987) 执笔。文中主要讨论了两个矿床,即俄罗斯的 Noril'sk 铜镍铂族矿床和美国明尼苏达州的 Duluth 矿床,后者因品位较低,尚未进行开发。

对 Noril'sk 铜镍硫化物矿床,我国有较多介绍,本文不再赘述。与西伯利亚暗色岩有关的矿化中还需要对 Angara Ilim 式铁矿作一简述。它是热液矿床,受断层控制,矿石和围岩中常见夕卡岩类矿物,如透辉石、石榴子石、绿帘石等。铁矿石的有用矿物是磁铁矿,它富镁, MgO 含量可达 6%,故常用镁磁铁矿一词。对矿床成因的倾向性意见是,侵入相暗色岩上升时,受到此区广布的下古生界含盐层的作用,暗色岩中的 Fe 与地层中的 Cl 结合,形成易溶相,并可将 Fe 搬运较远距离。这种特殊的铁矿分布较广,开发情况不明(Smirnov, 1993)。

我国川西攀枝花地区分布与峨眉山玄武岩同源的侵入相镁铁质-超镁铁质杂岩,此杂岩带呈近南北走向,长约 200 km,岩体在杂岩带中断续分布。经过多年普查勘探,已确定在杂岩中存在攀枝花、红格、太和等超大型钒钛磁铁矿矿床和为数甚少的铜镍硫化物矿床(如力马河),还有铬铁矿化、铂族矿化的线索。

值得指出的是攀枝花地区的镁铁质-超镁铁质杂岩的层状结构(条带状、条纹状、韵律层等)十分发

育,颇似晚太古代-早元古代的南非 Bushveld 杂岩,而且,含矿性也有一定的可比性。无疑,南非的经验可以借鉴。

大面积,也是大容积玄武岩浆在地球深部的形成并被驱赶至地表,形成溢流及与之有联系的侵入相镁铁质-超镁铁质杂岩,都涉及到极为巨大的物质流和能量流,概括起来便是近年来固体地球科学的热门话题——地幔柱所要讨论的内容。有人认为地幔柱的根扎在下地幔,甚至可能更深,扎在核幔交界的“D”层。

4 沉积岩——铅、锌矿床的主要容矿岩石

在自然界 Cu, Pb, Zn 三种有色金属中,太古代和早元古代形成的矿床中 Cu, Zn 常共生, Pb 基本不出现,如加拿大 Atibiti 带的一些 Cu-Zn 矿床和我国辽宁红透山矿床。中元古代及以后则主要是 Pb, Zn 密切共生,而且,它们多以沉积岩为容矿岩石。

据 Sangster(1994)报道,赋存于沉积岩(包括成岩后又受到变质的)中的密西西比河谷型(MVT)及沉积喷流型(SEDEX 或称热水沉积) Pb-Zn 矿床,其储量与产量可占 Pb, Zn 总储量与产量的 1/2 到 2/3。又据 Large(1999)介绍,仅澳大利亚北部 SEDEX 型 Pb, Zn 的资源量就达 1.2 亿吨,而美国 MVT 型 Pb-Zn 资源量达 0.85 亿吨。可见沉积岩容矿对 Pb, Zn 来说是十分关键的。

人们对上述两种类型 Pb-Zn 矿床的成因认识经历了有趣的变化。20 世纪前半叶,它们被普遍认为是岩浆热液矿床,主要依据是部分矿体切穿地层,这使沉积成矿难于成立。不是外生,就一定是内生,是当时成矿思路的主流。但使岩浆热液成矿论者感到困惑的是,在矿床所在的范围内常找不到较具规模的岩浆岩,只偶尔出现一些中基性岩脉。当时,流行的岩浆热液矿床分类方案是 Lindgren(1933)提出的高温、中温、低温方案。这些矿床附近常有侵入岩或火山岩的发育。而 MVT 型矿床分布地区只有大片的沉积岩。20 世纪 30~40 年代曾在美国流行了一阵子的“远温(Telethermal)矿床”一词便是针对 MVT 型矿床的。远温说法力图解释 MVT 型矿床的成因难题,但并没有成功。

20 世纪后半叶人们逐渐摆脱了岩浆热液论的束

缚。结合矿床地质特征和过去未为人知的若干成矿作用的揭示,提出了新的认识。

SEDEX 是 Sedimentary Exhalative 的缩写,即沉积喷流。SEDEX 型 Pb-Zn 矿床的提出无疑受前—世纪 70 年代后多处洋底热液成矿作用直接观察及推论的启迪。SEDEX 型 Pb-Zn 矿床多产于裂陷槽巨厚沉积地层中,矿床主体呈整合态、层状、透镜状,矿石层理层纹发育,具沉积矿床面貌。矿床下盘可见垂直矿体的小脉、细脉,其中也有矿化,它们被解释为洋底热液搬运成矿金属的通道。含矿地层可夹有钠长石岩、电气石岩、绿帘石岩等热液蚀变交代产物。这样,SEDEX 矿床的面貌似沉积矿床,却伴随了强烈的蚀变,成矿物质也主要来自洋底,而非大陆。矿床形成大致与围岩同时或稍晚。

澳大利亚是 SEDEX 型 Pb-Zn 矿床最发育的国家。据 Large(1999)报道,全球 15 个最大的 SEDEX 型 Pb-Zn 矿床中,7 个位于澳大利亚境内。澳大利亚学者在这方面的贡献也更多一些(Russell, 1981; Large, 1999)。

MVT 型 Pb-Zn 矿床的容矿岩石虽也是沉积岩,但主要是碳酸盐岩,其中白云岩或白云石化石灰岩更多见一些。矿床多赋存于古老克拉通的盖层中。控矿断层发育,有的矿床具层控特征。它们主要产于显生宙碳酸盐岩中,大面积内不见古生代、中生代花岗岩类。

从 MVT 这一名称可以看出矿床大量展布于美国密西西比河流域,特别是河的西侧。由于储量大、开发早,矿床研究程度相对较高。自远温成矿论销声匿迹后,代之而起的主要是盆地卤水侧向运移成矿论。这一见解主张,由于水头作用(hydraulic head)(Sverjensky, 1981)和沉积物压实作用,使得携带金属的粒间水被挤出,并作侧向运移到盆地边缘或盆地中古隆起附近沉淀出 Pb, Zn, 形成矿床。一般认为,由于卤水温度较低,不可能同时携 Pb-Zn 及 S 运行,故成矿主要发生于两种溶液(一种含 Pb-Zn, 一种含 H₂S)的混合过程中。还有人提出,卤水具油田卤水性质;大量 MVT 型 Pb-Zn 矿床的气液包裹体测温 and 成分测定结果支持了这一见解:气液包裹体的均一温度多落入 70~150℃ 区间,盐度[$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$]常大于 15%,包裹体中可以见到细粒油气和有机质(Roedder, 1984)。

实际上,以沉积岩为容矿岩石的 Pb-Zn 矿并不只有 SEDEX 和 MVT 两种类型。另有一种可称之

为砂岩铅矿的矿床是分布较广(主要在欧洲)、组成颇为特殊的 Pb-Zn 矿床。它主要产于不整合面上的石英岩或砂岩中,在组成上几乎是单一的 Pb,只偶尔在矿床上盘出现少量的 Zn。不整合面下的岩石常含较多长石。有人认为 Pb 来源于富含长石的岩石。

我国最大的铅锌矿——滇西金顶也以沉积岩为容矿岩石,包括砂岩和角砾岩。它的独特之处在于:成矿时代很新,在第三纪;矿床距板块缝合线不远,是否在成因上与板块构造有联系?另外,处于相似时空背景中的矿床尚未发现第二个。难道是“只此一家,别无分店”?SEDEX 型和 MVT 型 Pb-Zn 矿床都有形成密集区的现象。SEDEX 型密集区的实例有澳大利亚中、北部和我国内蒙狼山地区,两者都产于中元古代碎屑岩中,矿石组成,特别是铅同位素组成十分类似。两者的少数矿床铜含量甚高,也引起人们的关注。MVT 型 Pb-Zn 矿床在美国中西部分布广泛,包含若干个密集区。我国滇、黔、川接壤地带,如会理、会东、会泽,也存在密集区。对沉积岩容矿的 Pb-Zn 矿床来说,成矿理论的薄弱环节是成矿金属的来源问题。SEDEX 型 Pb-Zn 矿床的物质来源是洋底火山岩系,主要为中基性。按理,它应当衍生 Cu-Zn 矿化,而不是 Pb-Zn 矿化。很少有人研究 MVT 型 Pb-Zn 矿床的物质来源问题,一则缺少理论指导,二则工具、方法不足。饶有趣味的是一些 MVT 型 Pb-Zn 矿床具高含量放射成因铅(如美国中西部 MVT 型和我国金沙、茂租等矿床)。如何解释这一异常现象尚在探索之中。另外,对 MVT 型 Pb-Zn 矿床应当关注若干分散元素如 Ge, Cd, Tl 等的分布与含量问题,这对增加经济效益有好处。

5 20 余年来在金刚石产地、矿床类型及成因研究等方面取得的重大进展

一直到 20 世纪 70 年代以前,人们都以为原生金刚石矿床只赋存于金伯利岩中。很长一段时期,除砂矿外,金刚石主要发现于非洲南部、中部及西伯利亚雅库特地区的金伯利岩中。对若干著名的金伯利岩筒,如南非的佩雷米尔、雅库特的和平、成功等都倾注了众多研究力量。有关金伯利岩的岩石学、与金刚石伴生的矿物组合、金刚石矿床的成因和找矿模式等研究都立足于几个典型金伯利岩体上。

20世纪70年代末,这一局面开始被打破,在澳大利亚西北部钾镁煌斑岩中找到了金刚石矿床。人们的找矿视野扩大了,开始注意到其他地幔来源的岩石。这里,可以举两个例子。

Dibaev(1998)报道了1996年于乌兹别克斯坦南鲁拉套发现的产于碳酸岩中的金刚石矿化。这些碳酸岩有的呈岩墙状,最宽6 m,最长1 000 m,另有两个爆破岩筒,最大直径200 m。除碳酸盐矿物外,硅酸盐类矿物也大量存在。副矿物中见锆石、金红石、刚玉、萤石、金、石墨、金刚石等。金刚石分布极不均匀,在15~20 kg的样品中,最多可能含数百粒。金刚石粒径0.05~0.2 mm,晶形多为八面体或其聚形,颜色多黄绿。碳酸岩岩体与围岩呈侵入接触,界线清晰,围岩轻度角岩化。但碳酸岩本身自变质剧烈,包括钠长石化、角闪石化、沸石化、绿泥石化、硅化等。碳酸岩中方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-4.3‰~-5.2‰,其气液包裹体中 CO_2 、CO、 CH_4 等量,但 H_2O 含量低。作者认为,此处碳酸岩为幔源岩石,值得注意工业金刚石矿床存在之可能性。

另一在非金伯利岩之超镁铁岩中找到金刚石矿化的最新实例是Kaminsky等于1998年提供的(Kaminsky,1998)。矿化见于加拿大一处云煌岩中。此云煌岩呈岩墙状,同位素年龄2.6~2.8 Ga,它侵入到年龄为2.9~3.1 Ga的片麻岩中。云煌岩中之金刚石晶体粒径为0.08~0.5 mm,最常见者为0.25 mm,颜色多黄绿,亦有深绿、褐色者,常见晶形为五角十二面体,似立方体,少见八面体。

以上两处的非金伯利岩中的金刚石矿化尚未见到最近进展的报道,它们是否将拓展成金刚石工业矿床,目前也是未知数,但Lavrova等于1999年出版的大型专著《金刚石矿床的新成因类型》(俄文)(Lavrova,1999),却为读者展示了一个不是出于超镁铁岩,而是赋存于超高压变质岩中的金刚石工业矿床。

据Lavrova等(1999)介绍,北哈萨克斯坦可克切他夫金刚石矿床赋存于元古代深变质岩中。产金刚石之变质岩多为石榴石黑云母片麻岩,也有石榴石辉石岩和富含石英或碳酸盐的变质岩,但深变质岩中所夹榴辉岩则不含金刚石。有趣的是,富金刚石部位受断裂控制,同时也富石墨,两者似存在同步关系,沿断裂旁侧石墨可达1%,向外逐渐降低。金刚石颗粒较细,一般20~40 μm ,大于100 μm 者甚少,但偶然出现1 mm者。本矿床被发现与附近砂矿中

存在较粗颗粒金刚石有关。金刚石可包裹于石榴石或其他矿物中,也可产于富绿泥石、绢云母之基质中。金刚石颗粒多具立方体晶形,较少为立方体与八面体之聚形。骨架状与似圆形晶形较常见,颜色多浅黄绿色。

可克切他夫矿床经历了正规勘探,给出了30亿克拉的金刚石储量,常可见每吨数百克拉的品位。

据笔者所知,可克切他夫是目前在超高压变质岩中所找到的唯一具工业品位的金刚石矿床。但在挪威、西阿尔卑斯、大别山、乌拉尔等处的超高压变质岩中,可偶见或罕见金刚石及另一超高压矿物——柯石英。值得一提的是,距可克切他夫不远处,不久前找到了另一可能具工业意义的金刚石矿床。

这里,还应补充一下近10年来世界范围内新开拓的产于金伯利岩中的重要金刚石矿床。一个是俄罗斯的阿尔汉格尔斯克,这一产区位于俄西北白海附近,最近出版的专著《The Arhangel'sk Diamond-bearing Province》(俄文)(Bogatukov,2000)用“УНИКАЛЬНЫЙ”(巨大)这一俄文单词形容金刚石矿田的规模。另一新产地是加拿大,它包括了Etaki和Diavik两个矿床。据Bizzi(1999)报道,Etaki在1998年投产,预期年产将达350万克拉;Diavik规模更大,建成后可年产600~800万克拉。

从前述可以看到近20余年来金刚石的找矿工作的确取得了重大突破。金刚石产地已从传统的中-南非洲(雅库特地区)拓展到俄罗斯欧洲部分、澳大利亚西北、加拿大北部和哈萨克斯坦北部。超镁铁质岩和地幔岩除金伯利岩外,在钾镁煌斑岩、云煌岩、碳酸岩中均发现了金刚石工业矿床或矿化。更重要的是走出了深成岩浆岩禁区,在变质岩中也找到了金刚石工业矿床。

以金刚石作为矿物而论,它的产出背景与空间比许多矿物都要宽阔。一些陨石和陨石坑中都可以观察到星星点点的金刚石。在若干超高压变质岩出露地区,如挪威西部、捷克、西阿尔卑斯和大别山等地也曾有个别金刚石出现的报道,但人们很难设想它们会形成工业矿床。可克切他夫矿床的发现,除了它的经济意义外,也拓宽了金刚石的找矿视野和成因思路。

这里,简略回顾人们对金刚石矿床成因的各种设想。30多年以前,主要基于对南非佩雷米尔、西伯利亚和平、成功等岩筒的研究,矿床界的普遍认识是,金伯利岩与所含的金刚石是母子关系,即金伯利

岩浆结晶过程中晶出了金刚石。这似乎是言之有理,持之有据的。但逐渐,人们对这一见解产生了怀疑。主要疑点是:①在一些岩筒金伯利岩中的榴辉岩捕虏体中也找到了金刚石。②南非某些金伯利岩给出了 0.1 Ga 左右的同位素年龄值,但金刚石却老得多,年龄值是 3.0 ~ 3.2 Ga。这一母子年龄倒置现象在其他地区也发现了。目前,倾向性的意见是,金伯利岩是金刚石的寄主岩石:当金伯利岩浆上升时捕虏了榴辉岩,并携带了地幔深处早已晶出的金刚石。这一见解说明了金伯利岩与金刚石的关系,但也产生了新的问题:为什么一些地区的金刚石具太古代年龄,而金伯利岩却是白垩纪形成的?看来,这一问题只有从地球演化的宏观背景的纵深研究中寻求答案。有人认为,大量太古代金刚石的形成可能与当时剧烈而频繁的天体撞击有关,而白垩纪的金伯利岩之所以广布可能和超级地幔柱活动有关。

至于可克切他夫矿床的成因问题则更是众说纷纭,莫衷一是。Lavrova(1999)根据氢、氮和碳同位素研究,认为金刚石是在地壳,而非地幔中形成的。矿床受构造控制,也说明是变质后形成的。Lavrova(1999)借鉴人造金刚石的若干实验成果,提出金刚石可能在低压条件下呈气相搬运。Marakushev(1998)提出,金刚石仍是岩浆成因,由榴辉岩携带并侵入到变质岩中,之后它们共同经历了变质。这两种见解都否认了可克切他夫的变质成因,但却都没有解释,为什么矿床偏偏赋存于深变质岩中。

6 结束语

应该说,过去 80 年全球矿床事业的发展是相当丰富多彩的,它涉及了诸多方面。本文仅能就少数矿种的若干领域进行扼要的回顾与探讨。除参考借鉴以外,本文也可以引发一些问题与思考。如,为何斑岩矿床(Cu, Cu-Au, Cu-Mo, Mo)形成大型-超大型的机率很高?两个形成时代相距甚近的暗色岩系(Noril'sk 和峨眉山玄武岩),一个丰产铜、镍和铂族,另一个却赋存 4 个超大型钒钛磁铁矿矿床,引起成矿作用如此巨大差异的原因及机制何在?全球最大的 3 个铜镍硫化物矿床(Sudbury、金川及 Noril'sk)都产在古老克拉通周边裂谷中,这种特殊产出意味着什么?MVT 型与 SEDEX 型铅锌矿床常形成矿集区,如川滇黔接壤地带和内蒙古狼山地区,矿床成群而不是单个出现,何故?金刚石矿床形成的环境

与条件可能有哪些?若再深思下去,肯定会有更多的问题,我们不妨对这些问题进行思考和探讨。

References

- Arribas A Jr., et al. 1995. Contemporaneous formation of adjacent porphyry and epithermal Cu-Au deposits over 300 ka in northern Luzon, Philippines[J]. *Geol.*, 23(4): 337 ~ 340.
- Becker L, et al. 1994. Fullerenes in the 1.85 billion year old Sudbury impact structure[J]. *Sci.*, 265: 642 ~ 645.
- Becker L, et al. 1996. Extraterrestrial helium trapped in fullerenes in the Sudbury impact structure[J]. *Sci.*, 272: 249 ~ 252.
- Bizzi L A. 1999. Diamond exploration: why, where and how[A]. In: Stanley C J, ed. *Mineral deposits: processes to processing*, v. 1[C]. *Proceedings of 10th IAGOD Symposium*, Balke ma. 619 ~ 622.
- Bogatukov O A, et al. 2000. The arhangelsk diamond-bearing province [M]. Moscow: Moscow State Univ. Press. 522p (in Russian).
- Dibaev F K, et al. 1998. Thermochemical characteristics of fluids and genesis of diamond-bearing carbonatite[A]. S. Nura mu, Special Issue, *International Symposium, Mineral-forming fluids and ore genesis*[C]. 20 ~ 23 (in Russian).
- Dietz R S. 1964. Sudbury structure as an astrobleme[J]. *J. of Geol.*, 72: 412 ~ 424.
- Godlevski M N and Grinenko L N. 1963. Some data on the isotopic composition of sulphur in the sulphides of the Noril'sk deposit[J]. *Internal. Geochem.*, 1: 35 ~ 41.
- Gustafson L B and Hunt J P. 1975. The porphyry copper deposits at El Salvador, Chile[J]. *Econ. Geol.*, 70(5): 857 ~ 912.
- Kaminsky F V, et al. 1998. Diamondiferous minette dykes from the Parker Lake area, N. W. T, Canada[A]. *Symposium of the 7th International Kimberlite Conference*[C]. 392 ~ 394.
- Kesler S E. 1973. Cu, Mo and Au abundances in copper porphyry deposits[J]. *Econ. Geol.*, 68: 106 ~ 112.
- Kirkham R V. 1994. World class porphyry and sediment-hosted stratiform copper deposits[A]. *Geol. Survey of Canada Min. Colloquium*, 1 ~ 2[C]. Ottawa: Ottawa Congress Centre.
- Kirkham R V. 1997. Giant Cu and Au porphyry deposits: Geological parameters and economic importance[A]. *Symposium of the PDAC 65th Convention*[C]. Toronto.
- Large R R. 1999. Evidence for pulsed brine exhalation in the formation of giant proterozoic stratiform sediment-hosted Zn-Pb-Ag deposits of Northern Australia[A]. In: Stanley C J, ed. *Mineral deposits: processes to processing*, v. 3 ~ 6[C]. *Proceedings of 10th IAGOD Symposium*, Balke ma.
- Lavrova L D, Pechnikov V A, Pleshakov, et al. 1999. A new genetic type of diamond deposits[M]. Moscow: Scientific World. 221 p (in Russian).
- Lindgren W. 1933. *Mineral Deposits*[M]. 4th ed. N. Y.: Mc Graw-Hill. 930 p.
- Marakushev A A, et al. 1998. Genetic types of diamond mineralization

- [J]. Chinese J. of Geochem., 17(1): 12 ~ 28.
- Muller D and Groves D J. 1993. Direct and indirect associations between potassic igneous rocks, shoshonites and gold-copper deposits[J]. Ore Geol. Rev., 8: 383 ~ 406.
- Naldrett A J. 1987. Ores associated with flood basalts[A]. In: Whitney J A and Naldrett A J, ed. Ore deposition associated with magmas [C]. Rev. in Econ. Geol., 4. Soc. of Econ. Geol. 103 ~ 118.
- Naldrett A J. 1994. Ni-Cu-PGE deposit of the Noril'sk region: a model for other world class magmatic sulphide deposits[A]. Geol. Survey of Canada Min. Colloquium, 4 [C]. Ottawa: Ottawa Congress Centre.
- Roedder E. 1984. Fluid Inclusions[J]. Rev. in Mineral., 12: 415 ~ 425, 439 ~ 453.
- Ross J R and Travis G A. 1981. The nickel sulphide deposits of western Australia in global perspective[J]. Econ. Geol., 76: 1291 ~ 1329.
- Russell M J, et al. 1981. The genesis of sediment-hosted, exhalation Zn, Pb deposits[J]. Mineralium Deposita, 16: 113 ~ 127.
- Sangster D F. 1994. World class MVT and SEDEX lead-zinc deposits [A]. Geol. Survey of Canada Min. Colloquium, 1 [C]. Ottawa: Ottawa Congress Centre.
- Sillitoe R H. 1998. Major regional factors favoring large size, high hypogene grade, elevated Au content and supergene oxidation and enrichment of porphyry copper deposits[A]. In: Porter T M, ed. Porphyry and hydrothermal Cu and Au deposits — A global perspective [C]. Conference Proceedings. Australia: Australian Mineral Foundation. 21 ~ 34.
- Smirnov V I. 1993. Studies of mineral deposits[M]. Moscow: Mir Publishers.
- Sverjensky D A. 1981. The origin of a Mississippi Valley-type deposit in the Viburnum Trend SW Missouri[J]. Econ. Geol., 76: 1848 ~ 1872.
- Tu G Z. 1991. New achievements in the studies of ore deposits[J]. Yearbook, Mineral Deposits Geochemistry Open Laboratory, Chinese Academy of Sciences. 1 ~ 11 (in Chinese).
- Tu G Z. 1995. A short review on the studies of ore deposits in the past 30 years[A]. In: Wang H Z, ed. Reviews on the developments of geological sciences[C]. Beijing: Press of China Univ. of Geosci. 126 ~ 134 (in Chinese).
- Tu G Z. 2001. The development of the mineral deposit prospecting and research work in the past twenty years: A brief review[J]. Mineral Deposits, 20(1): 1 ~ 9 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S. 2001. Hundred years' retrospect and developing trend of mineral deposit geology[J]. Advance in Earth Sci., 16(5): 719 ~ 725 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 涂光炽. 1991. 矿床学的新进展[J]. 中国科学院矿床地球化学开放实验室年报, 1 ~ 11.
- 涂光炽. 1995. 回顾 30 年来的矿床学[A]. 见: 王鸿祯主编. 中国地质学科发展的回顾[C]. 北京: 中国地质大学出版社. 126 ~ 134.
- 涂光炽. 2001. 过去 20 年矿床事业发展的概略回顾[J]. 矿床地质, 20(1): 1 ~ 9.
- 翟裕生. 2001. 矿床学的百年回顾与发展趋势[J]. 地球科学进展, 16(5): 719 ~ 725.

Glimpse of Past Achievements in Ore Exploration and Research Work

Tu Guangzhi

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

Abstract

A glimpse of achievements made in the last century in ore exploration and research work is given in this paper. A review is made on such types of mineral deposits as porphyry Cu and Cu-Au deposits, massive Ni-Cu sulfide deposits, trap and related mineralizations, MVT and SEDEX Pb-Zn deposits and diamond deposits. Emphasis is put on discussions of geological settings, ore-forming mechanisms and general perspectives.

Key words: porphyry copper deposits, trap, Cu-Ni sulfide deposits, MVT, SEDEX, diamond deposits