

矿床地球化学

中国科学院矿床地球化学开放研究实验室 著

地质出版社

矿床地球化学

——以岩浆岩型铜矿床为例——

—— —

矿床地球化学

中国科学院矿床地球化学开放研究实验室 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是有关矿床地球化学这门学科的专门论著,由三个部分组成:第一部分阐述了矿床地球化学的研究内容及研究动向;第二部分论述了矿床地球化学各个领域的基本理论及其在矿床研究中的应用;第三部分介绍了矿床地球化学的研究方法,并给出了某些典型矿床的实例分析。因此,本书是既有理论又有方法的矿床地球化学论著,适用于从事矿床地质工作的科研、教学及生产人员。

图书在版编目(CIP)数据

矿床地球化学/中国科学院矿床地球化学开放研究实验室著. - 北京:地质出版社,1997.5
ISBN 7-116-02272-4

I. 矿… II. 中… III. 矿床-地球化学 IV. P595

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 00381 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:江晓庆 谭惠静

责任校对:李 枚

*

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:34 字数:827000

1997 年 5 月北京第一版·1997 年 5 月北京第一次印刷

印数:1—400 册 定价:60.00 元

ISBN 7-116-02272-4

P·1704

前 言

在中国科学院矿床地球化学开放研究实验室成立的时候,学术委员会的委员们就商量着要合作写一本矿床地球化学的专著,以此作为开放实验室理论建设的一项工作。撰写此书的目的在于探讨当今矿床地球化学的研究动向、阐述矿床地球化学基本理论、介绍矿床地球化学的研究方法并给出某些典型矿床的实例分析,使之成为今后开展矿床地球化学研究的主要参考书。

经过几年的努力,这本专著终于完稿了,不久将与读者见面。本书分三个部分,共二十章。第一部分(绪论、第一章及第二章)叙述矿床地球化学的定义、研究任务及研究方向;第二部分(第三章—第十四章)论述矿床地球化学各个领域的研究内容及基本理论;第三部分(第十五章—第二十章)介绍矿床地球化学的各种研究方法。写作任务及审定工作主要由矿床地球化学开放研究实验室学术委员会的委员们分工承担,另外也约请国内有关专家撰写了部分章节,可以说,各章的作者都是各有关方面很有造诣的专家。各章的作者是:涂光炽(绪论),刘英俊(第一章),祁思敬(第二章),朱上庆(第三章),冉崇英(第四章),卢焕章、李院生(第五章),於崇文(第六章),王中刚、白正华(第七章),涂光炽、赵振华(第八章),王秀璋(第九章),陈先沛、祁思敬(第十章),范德廉(第十一章),廖士范(第十二章),杨蔚华、刘友梅(第十三章),卢焕章、池国祥(第十四章),李兆麟(第十五章),赵斌(第十六章),张哲儒(第十七章),杨敏之(第十八章),张国新(第十九章),刘友梅、杨蔚华(第二十章)。各章初稿完成后,先由各撰稿人对各章进行互审,并在学术委员会议上讨论、交流,最后由王中刚、王秀璋、冉崇英组成编辑小组进行汇总与统稿,并经涂光炽院士审阅定稿。矿床地球化学开放研究实验室主任李朝阳,副主任裘愉卓、胡瑞忠对本书的编辑出版给予了充分的支持。朱笑青、陈福协助完成了部分编辑工作。由于编辑组人员分散,再加上时间安排不当,致使编辑周期过长,延误了出版时间,我们深表歉意。好在我们得到了地质出版社的大力支持,在本书定稿后给予尽快地出版,这是我们要向他们表示深切谢意的。书中不当之处,敬请读者们指正。我们希望本书的出版能为矿床地球化学事业的发展贡献一份力量。

中国科学院地球化学研究所
矿床地球化学开放研究实验室
《矿床地球化学》编写小组
1995年10月

目 录

前 言

绪 论..... (1)

第一章 矿床地球化学基本问题与任务 (12)

第一节 成矿物质来源问题 (12)

第二节 成矿物质的运移 (21)

第三节 成矿物质的富集储存 (27)

第四节 矿石物质组分研究 (28)

第二章 地球演化与矿产的形成 (30)

第一节 概述 (30)

第二节 地球演化中成矿作用的长期变化 (31)

第三节 地质历史各阶段重要成矿作用 (40)

第三章 板块运动与成矿作用 (52)

第一节 作为成矿作用基础的板块构造理论 (54)

第二节 裂谷与成矿作用 (59)

第三节 沟-弧-盆系与成矿作用 (63)

第四节 碰撞带与成矿作用 (70)

第五节 中国板块构造及成矿作用初析 (73)

✓第四章 成矿物质来源 (79)

第一节 研究现状与进展 (79)

第二节 矿质的可能来源 (80)

第三节 矿质来源的判别标志及其研究方法 (86)

第四节 超大型矿床的物质来源问题..... (101)

✓第五章 成矿流体..... (109)

第一节 地壳中的流体..... (110)

第二节 流体和岩石的相互作用..... (116)

第三节 成矿流体举例..... (125)

第六章 成矿作用动力学..... (135)

第一节 水-岩相互作用的化学动力学 (136)

第二节 多孔介质中热液成矿作用的流体动力学..... (143)

第三节 断裂裂隙中热液成矿作用的流体动力学..... (147)

第四节 物理化学流体动力学与成矿作用..... (153)

第五节 构造物理流体动力学与成矿作用..... (160)

第七章 部分熔融、分异结晶及岩浆成矿作用..... (167)

第一节 岩浆成矿作用概述..... (167)

第二节	部分熔融和分离结晶作用模型·····	(171)
第三节	应用实例·····	(196)
第八章	与花岗质岩浆有关的成矿作用·····	(203)
第一节	花岗质岩浆本身的成矿作用·····	(204)
第二节	花岗质岩浆作用于周围地质体而产生的成矿作用·····	(211)
第三节	矿床实例·····	(211)
第四节	与花岗岩有关的矿床的水平分带问题——双重因素成因说的重申·····	(221)
第五节	结论·····	(224)
第九章	改造成矿作用·····	(226)
第一节	概念与分类·····	(226)
第二节	改造作用的一些成矿理论问题·····	(232)
第三节	改造矿床的时空分布与演化·····	(242)
第四节	改造矿床的成矿机理及成矿模式·····	(244)
第十章	热水沉积成矿作用·····	(248)
第一节	热水沉积作用的概念及认识的演变·····	(248)
第二节	热水沉积矿床的地质地球化学特点·····	(252)
第三节	热水系统成矿的物理化学特征·····	(256)
第四节	我国若干热水沉积矿床·····	(261)
第十一章	缺氧环境与成矿作用·····	(266)
第一节	黑色岩系是缺氧环境的产物, 黑色岩系研究的理论与经济意义·····	(266)
第二节	黑色岩系形成的沉积环境及地球化学标志·····	(267)
第三节	缺氧环境、缺氧事件及黑色岩系的成因·····	(279)
第四节	缺氧环境与成矿·····	(283)
第十二章	风化成矿作用·····	(295)
第一节	研究历史及研究现状·····	(295)
第二节	风化成矿作用的环境与条件·····	(297)
第三节	风化成矿作用地球化学·····	(299)
第四节	风化矿床地球化学·····	(304)
第五节	小结·····	(311)
第十三章	生物与有机成矿作用·····	(314)
第一节	概述·····	(314)
第二节	生物成矿作用·····	(315)
第三节	有机质的成矿作用·····	(324)
第四节	生物与有机质成矿机理的讨论·····	(334)
第十四章	剪切带与成矿作用·····	(339)
第一节	引言·····	(339)
第二节	剪切带的特征及力学机制·····	(340)
第三节	剪切带与成矿作用的关系·····	(343)
第四节	剪切带中流体的地球化学特征·····	(354)

第五节 剪切带的控矿机理及其在找矿上的应用·····	(370)
第十五章 包裹体研究在矿床地球化学研究中的应用·····	(373)
第一节 矿物包裹体在各类矿床中的应用·····	(373)
第二节 包裹体研究方法·····	(389)
第三节 包裹体研究在地球化学找矿中的应用·····	(397)
第十六章 实验地球化学在矿床地球化学研究中的应用·····	(402)
第一节 概述·····	(402)
第二节 水·····	(402)
第三节 氯·····	(404)
第四节 氟·····	(411)
第五节 硫·····	(414)
第六节 实验结果应用·····	(420)
第十七章 热力学研究在矿床地球化学中的应用·····	(426)
第一节 成矿流体的化学平衡·····	(426)
第二节 矿物的溶解度·····	(433)
第三节 矿物相平衡·····	(435)
第四节 水-岩石相互作用的热力学模型 ·····	(444)
第五节 矿物固溶体·····	(447)
第十八章 微量元素研究在矿床地球化学中的应用·····	(457)
第一节 基本原理·····	(457)
第二节 基本数值、参数及其应用·····	(467)
第三节 微量元素地球化学在矿床地球化学应用中的发展趋势·····	(473)
第十九章 同位素研究在矿床地球化学中的应用·····	(475)
第一节 在确定成矿作用物理化学条件方面的应用·····	(475)
第二节 成矿流体的氧和氢同位素组成·····	(480)
第三节 确定成矿物质来源·····	(485)
第四节 矿床的成矿同位素年龄·····	(488)
第五节 稳定同位素在找矿工作中的应用·····	(491)
第二十章 生物、有机质成矿的研究方法·····	(495)
第一节 野外观测与采样·····	(495)
第二节 有机岩石学研究·····	(496)
第三节 成矿作用的有机地球化学研究·····	(500)
第四节 模拟实验·····	(511)
参考文献·····	(517)

绪 论

矿床地球化学是地球化学的一个分支学科，同时，它又是矿床学的一个分支学科。它的发展晚于矿床学，大致与地球化学同步。第二次世界大战以后，大量能源和矿产开发的需要推动了地球化学的发展。反过来，地球化学理论、方法的运用也有助于矿产资源的发现和开发。地球化学在矿产资源勘探与开发方面的运用便产生了矿床地球化学。

40年代以后，矿床地球化学得到迅猛发展，一是由于大量矿床被找到，有了发展学科的物质基础，另一重要原因是微粒微量分析技术、各种同位素测试手段、热力学及实验技术的引进。

地球化学是研究地球和部分天体化学组成、化学作用和化学演化的科学。但如果说矿床地球化学是研究矿床的化学组成、化学作用和化学演化的分支学科，那就显得目标狭窄了。无疑，矿床本身的研究是重要的。同样重要的是矿床形成以前的成矿过程及矿床形成后的保留、演化问题。这些研究都是围绕着矿床的形成而进行的，但不只是研究矿床本身。因此，将矿床地球化学定义为成矿作用的地球化学可能更合理一些。

50年代初，苏联学者萨乌科夫和我国学者侯德封等在他们的研究工作中将矿床的形成与 Hg、Mn 等成矿元素的地球化学行为结合起来，作为统一的成矿过程加以考虑。这就是矿床地球化学思想的萌芽。

一、矿床地球化学在国民经济中的作用

矿床地球化学为国民经济出力的直接体现是它可以为找矿评价服务。在这方面，研究成矿元素的共生组合可以起很大作用。例如，80年代在扬子地块西南缘的黔西南、桂西北、滇东地区和西北缘的川、甘边界接二连三地找到了一系列卡林型金矿床。之所以能在较短时间内取得较大进展，关键就是运用了在低温条件下 Au 可以与 Hg、Sb、As 等元素密切共生的原理。因而找金是在已知的 Hg、Sb、As（雄黄、雌黄、毒砂）矿田或矿带中进行的，这就可以大大缩减找矿的过程。同样，在黔桂滇汞锑带和汞矿床中找到铊的富集体也是运用 Tl 在低温条件下易与 Hg、Sb、As 等共生的机理的结果。

又如，对白云鄂博综合矿床的认识经历了多年的反复。20年代后期，当丁道衡先生发现它时，只知道它是铁矿。40年代末何作霖先生从铁矿中识别了两种稀土元素矿物。解放后对白云鄂博进行了勘探评价，对铁和稀土作了储量评价。50年代末，根据一定条件下 Fe 与 REE 及 Nb 之间的共生关系及若干铌矿物的发现，又补作了铌的评价工作。可以说，30多年对白云鄂博矿床地球化学的深入认识过程也就是扩大白云鄂博综合矿床经济价值的过程。

勘查地球化学，即化学探矿，就是利用成矿元素及与之共生的其他元素的异常含量进行矿产普查的。矿床地球化学的某些关于成矿元素共生的理论可以为勘查地球化学提供依据。

同样，对一定地区的成矿远景分析和预测，除应考虑宏观地质背景、控矿构造、古地理环境、岩浆活动、地层等因素外，对矿化及蚀变现象、元素共生组合等更细致的剖析也

是十分必要的。后者的内容已落入矿床地球化学的范围之内了。

矿床地球化学研究内容之一是矿床的各种分带问题，包括矿化、蚀变分带等。这里，元素特别是成矿元素的垂直分带研究对矿床的深部预测和开发十分重要。譬如陆相火山岩中产出的明矾石-高岭石型金矿床，常可见到上金下铜的垂直分带现象，在我国台湾金瓜石和福建紫金山两矿床中都可以观察到这种垂直分带。另一些较富银的陆相火山岩型矿床展示自上而下的金→银→铅锌垂直分带。这种垂直分带对预测深部矿化是有帮助的。

矿床地球化学研究内容之二是成矿元素的赋存状态。这是探讨成矿元素地球化学行为的基础，在理论上具有重要意义。同时，这也有助于矿石加工、合理选冶流程的选择。譬如，在很多原生金矿床中，金主要以自然金、银金矿等独立金矿物形式存在，并多与硫化物矿物有关，赋存于后者的边部、裂隙、晶隙中，这就为矿石破碎后的浮选、重选提供了依据。设想金以类质同象形式赋存于硫化物或硅酸盐矿物中，则上述矿石加工流程就必须完全改变，金就很难以机械选矿的方式回收了。

对精矿或矿石的直接冶炼来说，成矿元素的赋存状态也同样是设计合理流程的依据。

二、矿床地球化学可以促进地球科学的发展

矿床地球化学不仅可以给国民经济带来好处，也可以促进地球科学的发展，在理论上有所贡献。譬如，长期以来，人们将成矿作用与成岩作用完全等同起来。因为有岩浆岩、沉积岩和变质岩之分，也就带来了岩浆矿床（包括岩浆热液矿床）、沉积矿床、变质矿床（包括变质热液矿床）之分。岩石三分，矿床也三分，看起来很有道理，因为矿石只是一种较为特殊的岩石。这种理论统治了矿床学达百余年之久，只是近20年来，随着人们对成矿过程认识的深化，才感到成岩作用与成矿作用不是完全等同的。成岩作用涉及的元素都是岩石圈中含量高的常量元素，而成矿作用涉及的元素只有少部分是常量元素，主要的则是微量元素。常量元素成岩一般富集数倍即可，而微量元素成矿常需富集几个数量级。沉积作用、岩浆作用、变质作用可以成矿，但还有另外的地质作用可以成矿，却很难成岩。

在适合的地质和物理化学条件下，岩石中所含的呈分散状态的微量元素如Au、U、Cu等可以被由大气降水或海水下渗形成的热液所溶解并经过搬运、富集，在适合的构造软弱地带形成矿床。这种成矿作用，我们称之为改造作用。不少金矿床、铀矿床，还有一些其他金属矿床就是经过改造作用形成的。改造作用完全可以与沉积作用、岩浆作用和变质作用区分开，是另外一种成矿作用。

实际上，石油和天然气矿床也是改造作用的产物。分散在岩石中的有机质在一定条件下转变成烃类，并经过运移，在适当的构造或砂体中形成矿床。因此，严格地说，油气并非沉积矿床，在沉积成岩阶段并没有油气的富集。

改造成矿作用揭示了某些成气、成油、成矿物质可以经过活化被运移到数十至数百米、数公里、数十公里甚至数百公里以外的地方，然后富集成矿的规律。这从一个侧面说明了地壳物质运动的一定规律，从而丰富了地球科学的内容。

三、矿床地球化学发展的国际概况

这里不可能对国外矿床地球化学的发展和成就作全面介绍，只对若干重要新进展作扼要的说明。

1. 深钻和超深钻所揭示的若干与成矿作用有关的重要成果

近年来,无论在大陆和海洋均进行了若干深钻和超深钻工作,其成果对矿床地球化学无疑是重要的。这里仅举数例说明深钻,超深钻所取得的成绩。

原苏联曾在其西北缘科拉半岛古老深变质岩出露地带打了一口世界已知最深的井,深12km。根据已发表的总结资料,这一超深钻计划所取得的最主要成果是论证了此区太古宇在变质时,地温梯度为现在的5~7倍,即达到150~210℃/km。尽管可以认为在太古宙,地壳热状态同现在一样也是不均匀的,但这样高的古地温梯度无疑会对当时的成矿作用产生重要影响。

在乌兹别克穆龙套金矿区打的几口深钻,除了证明金矿化向深部延伸的情况外,还发现了硫化铁矿物在深部为磁黄铁矿且不含金,而在浅部则为黄铁矿,是主要载金矿物。这不仅勾画出了金矿化的深部界限,也说明了金的可能迁移与富集过程:深部黄铁矿在转换成磁黄铁矿的过程中一方面脱硫,一方面将其所载的金释放出来,金在向上迁移过程中遇到黄铁矿而停留下来。这样,金在上部的黄铁矿中得到进一步的富集。

蛇绿岩是地质历史时期洋壳的残余。蛇绿岩与一系列成矿作用有关,也是探寻地质历史时期构造活动的重要线索。在近年的海洋钻探工作中,在海底发现了与塞浦路斯、日本等地第三纪蛇绿岩剖面十分类似的近代蛇绿岩剖面。这将十分有助于研究蛇绿岩的演化与成岩成矿作用。

2. 洋底现代成矿作用的直接观察

70年代之后,通过深海潜水器,可以直接观测在洋底正在进行的成矿作用。人们首先在红海、太平洋中脊,之后在大西洋中脊、印度洋中脊和一些非洋中脊的深海槽(如冲绳海槽)的洋底看到硫化物矿床、硅化岩等的形成过程。这种观察,结合水-岩石实验、氢氧同位素研究等,逐渐形成并完善了新的海下环流成矿理论。

海水下渗流经洋壳的重要组成部分——玄武岩及其他岩石时,将其富含的Cu、Pb、Zn、Fe等元素活化(溶解)运移。海水下渗后逐渐被加热,这样热液便具有高的活化运移能力。热源是洋底火山喷发余热、洋中脊和热柱的强大热流等。海水下渗流经玄武岩等使海水的pH、 E_h 等改变,更加大了它的溶解能力。由于压力差等因素的驱使,携带大量被溶解的成矿物质的海水热液在洋中脊等处冒出洋底。由于突然减压、与较冷海水遭遇等原因,冒出洋底的热液中的金属及硅等便沉淀下来。冒出的洋底热液温度可高达400℃,具有很强的交代能力。在深海中以这种方式形成的矿床具有沉积矿床的各种特征,如层纹、层理、韵律等,但它又是在热水介质中形成的,因此,我们称之为热水沉积矿床。在西方文献中则用喷流-沉积矿床等字眼。

热水沉积矿床除了包括水体中的典型沉积矿床外,还包括热液尚未冒出海底时在固体介质中所形成的网脉状和浸染状矿化。这里,较高温度的交代作用比较普遍。

上述的过程,即海水下渗→被加热并淋滤、携带大量成矿元素→重新冒出海底成矿,就是洋底环流成矿理论的实质。近年来所进行大量的玄武岩-水作用实验证明了这种环流成矿方式的可能性。对第三纪形成的日本黑矿所作的氢、氧同位素研究说明下渗海水对成矿起了作用。

目前,对海相火山沉积建造中所赋存的块状硫化物矿床、硅铁建造中的条带状铁矿等,不少人倾向于认为,它们是海底环流作用形成的热水沉积矿床。

让我们简略回顾一下近50年来对海相火山沉积建造中所赋存的块状硫化物矿床的成

因见解的变化。在 50 年代, 岩浆热液成因是主流, 虽然矿床附近常缺失一定规模的岩浆岩, 但岩脉比较发育。60~70 年代, 火山热液、火山沉积等说法较多。但野外观察说明, 许多块状硫化物矿床形成时并未伴随火山活动。看来, 海底环流成矿, 或热水沉积成矿对解释块状硫化物矿床成因提供了新的思路, 也比较符合地质实际。

3. 成矿理论对发现超大型矿床所起的作用

寻找超大型矿床是一项综合性极强的工作。扎实的、细致的基础地质调查、填图, 合理的物、化探手段的采用是最关键的。另外, 成矿理论所导致的找矿思路也可以起重要作用。

储量惊人的南澳大利亚奥林匹克坝铜-金-铀综合矿床的发现就是一个实例。这个庞然大物赋存于元古宇中, 其上被 300m 厚的毫无矿化显示的古生界覆盖。合理的、综合磁力、重力方法的应用是找到这个深埋在地下的矿床的关键, 另外, 找矿思想则是宏观的向导。据 Haynes, 70 年代初, 西澳矿业公司地质组对南澳大利亚元古宇及古生界作了详尽的文献调研工作, 目的在于勾画出以沉积岩为主岩的铜矿床的可能产出地。理论依据是玄武岩遭受蚀变时的可将其中的大量铜释放出来, 释放出来的铜经过搬运可在附近盆地中形成铜矿床。为此, 选择了一些远景区, 每个区都有蚀变玄武岩分布。物探工作在奥林匹克坝一带发现了高重力异常, 当时也被认为是由蚀变玄武岩引起的。之后, 进行了详细的磁力、重力测量; 1975 年在重、磁异常交汇处打钻, 导致了这一巨大规模矿床的发现。经过后期工作, 确信高重力异常并非玄武岩引起, 而是来源于含大量赤铁矿的角砾岩。尽管如此, 新的找矿思路对发现奥林匹克坝矿床还是起了重要作用。

在我国, 在对西成盆地超大型铅锌矿的延伸进行预测和在确定与评价内蒙古四子王旗热水沉积型萤石矿床时, 层控矿床成矿理论也起了一定作用。

4. 新矿床类型的发现

经过百余年地质界及矿业界的共同努力, 一些主要金属如铁、铜、锰、铬、镍、铅、锌等的矿床类型已基本定型, 即很难再发现有重要意义的新矿床类型。如铜矿床类型多年来不外是砂岩型、斑岩型、夕卡岩型、块状硫化物型、陆相火山岩型等几种。在我国还可以加上东川型。70 年代奥林匹克坝超大型铜-铀-金综合矿床的发现在类型上突破了老框框, 但迄今为止, 在世界范围内还没有发现第二个在成矿元素组合、产出地质条件、矿化类型等方面与奥林匹克坝相类似的矿床。除奥林匹克坝这一特殊类型外, 多年来未见到有关铜矿床新类型的报道。

但对一些稀有金属、稀有元素来说, 由于它们在矿石中含量较低, 利用历史较短, 与它们有关的成矿作用在有些方面尚未被认识, 因而新矿床类型被发现的可能较大。这里, 以两个在 80 年代找到的新矿床类型为例, 说明在它们被发现的过程中, 新的成矿思路的作用。

多年来, 锆的工业矿物只有锆英石一种。锆英石的工业矿床类型也只有砂矿一种 (主要是海滨砂矿)。含锆英石较多的伟晶岩和碱性花岗岩迄今为止都尚未得到工业利用。长期以来人们一直认为锆矿床只能是锆英石的富集体。

80 年代在蒙古西部科布多附近的一个碱性花岗岩中发现锆含量很高 ($Zr\ 1.5\%^{①} \sim$

① 这里指质量分数, 即物质 B 的质量占混合物质量的百分比。质量分数 (w_B) 包括过去使用的 wt%, ppm (10^{-6}), ppb (10^{-9})。本书中凡含量以百分数、千分数、 10^{-6} 、 10^{-9} 表示且未加说明者, 均为质量分数。

2.5%)。有重要意义的是锆主要不以锆英石形式存在,而是以水硅钠锆石($\text{Na}_2\text{ZrSi}_6\text{O}_{18}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$)到水硅钙锆石($\text{CaZrSi}_6\text{O}_{18}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)的类质同象系列存在。这种含水的锆的硅酸盐矿物很可能不是岩浆结晶分异的产物,而是后期热液蚀变的结果,即锆英石遭受蚀变的产物。目前,对这个矿床的地球化学研究还在继续,但可以肯定的是,锆不仅在岩浆期富集于锆英石中,而且在一定条件下也可以在岩浆期后热液中搬运、富集。这是对锆的地球化学行为的新认识。

绿柱石矿床一般含于酸性伟晶岩中,而含铍花岗岩很少具工业开发价值。这些都说明铍的富集成矿只发生于酸性岩浆演化的晚期阶段。这几乎成了多年来铍矿床形成的唯一模式。但80年代在南美的发现动摇了这一成矿模式。

1981年在巴西中部偏西的Santa Terezinha的太古宙绿岩带中的科马提岩中找到绿柱石矿床,约1/10的绿柱石可达到国际标准的宝石级。科马提岩发育典型的鬃刺构造,岩石化学特征是 MgO 大于20%、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 小于0.9%、 TiO_2 小于0.9%、 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 大于1、 Cr 1750×10^{-6} 、 Ni 1240×10^{-6} 。科马提岩受到强烈的钾化,金云母、黑云母、滑石、碳酸盐很发育,甚至出现黑云母岩、绿泥石岩等。矿床附近有太古宙钾质花岗岩出露,但对此岩体与绿柱石矿床是否有成因联系这一问题,目前尚未进行研究。据了解,南美另一国家哥伦比亚也曾在太古宙绿岩带的科马提岩中发现绿柱石矿化。

5. 对若干矿床类型开展了系统而深入的地球化学研究

近年来国外矿床地球化学界对某些重要的、分布较广的矿床类型开展了系统而深入的地球化学研究,这对找矿评价、矿石加工利用及成矿理论均有重要意义。限于篇幅,此处只作极扼要的回顾。

在美国中西部密西西比河流域及附近出露若干大型—超大型铅锌-萤石矿床,主要赋存于古生界的碳酸盐岩建造中。经过仔细研究,这些所谓密西西比河谷型铅锌矿床都具下述地球化学特征:矿石放射成因铅十分富集,其 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 三组比值均高于世界上具同样地质环境、控矿条件、物质组成的铅锌矿床,如中国南方产于古生界—三叠系碳酸盐地层中的若干层控铅锌矿床;成矿温度小于 200°C ;气液包裹体中见 NaCl 子晶、石油等,盐度高,常大于15%^①。看来,其成矿环境长期处于稳定状态,成矿物质是壳源的,成矿流体与油田卤水有关。

不整合脉型铀矿床是70年代后主要发现于澳大利亚中北部和加拿大中西部的新铀矿类型。由于矿石品位高,矿床常赋存于中元古界不整合面之下,或在下元古界中,或在太古宙中。中元古界未变质,多见砂质岩石,而不整合面下岩石一般受到绿片岩相到初级角闪岩相的区域变质作用,有时含石墨层。矿化年龄大致为1300~1600Ma。成矿温度为中低温。在个别这一类型矿床中发现有工业含量的金和钯与铀共生,甚至是单一的含钯金矿床。这说明了稳定元素 Au 、 Pd 在一定条件下可以变得较活泼,且与活泼元素 U 共生。

加拿大东南阿比蒂比太古宙绿岩型金矿床可能是目前研究程度最高的金矿群落。在众多的研究成果中值得关注的是:金矿成矿滞后于成岩数千万年到100~200Ma左右,多发生于新太古代到古元古代;金矿多形成于中温阶段($200\sim 350^\circ\text{C}$);金矿床可赋存于绿岩带的任何岩类中,如一些重要金矿产于此带中的太古宙正长岩中。

① 盐度即质量分数,一般指相当于 NaCl 的盐类物质的质量分数($w_{\text{NaCl eq.}}$),下同。

四、矿床地球化学在国内的发展概况

近 30 年来, 国内矿床地球化学事业发展很快, 这里只选择若干方面简略讨论。

我国矿床地球化学事业的发展是和“任务带学科”的方针密切相关的, 因此大量工作与主要成果均和生产任务有关。这点可通过若干实例加以说明。

多年来我国东部进行的找铀与铀矿床研究成果说明, 由于我国岩石圈发育的若干特点, 我国的铀矿床在成矿机制、成矿时代、矿床类型等方面与世界一些主要储铀及产铀国家不同。如南非、加拿大、澳大利亚等国家均产出古砾岩型铀矿和不整合脉型铀矿, 这两种矿床类型占它们储、产铀量的大部分。我国则以火山岩型和花岗岩型铀矿为主, 也有碳硅泥岩型及砂岩型铀矿。在铀矿形成时代方面, 南非、加拿大、澳大利亚等国均以 1500~2500Ma 为主, 我国则多为中生代末和新生代。一老一新, 相差悬殊。这种中国和西方铀矿床地球化学主要差别的制约因素是地壳活动的频率及强度。

70 年代进行的寻找富铁矿的工作促进了铁矿床地球化学研究的发展。初步归纳一下, 大致有如下的进展: 我国有岩浆型铁矿床的发育; 热水沉积型铁矿床在我国有一定分布; 除古老条带状铁矿外, 还有海南石碌、甘肃镜铁山、新疆式可布台和莫托沙拉等类型, 其地球化学特点是铁矿层之下可出现铜矿化 (镜铁山、陈家庙、石碌等), 之上则有锰矿化的发育, 有时铁矿层之间还可以有铅锌矿化; 从氢、氧同位素组成看, 我国前寒武纪条带状铁矿中的富铁矿石主要有两种成因, 一为沉积成因, 即与贫铁矿石相同, 一为后期大气降水热液改造成因。与乌克兰、澳大利亚、美国、加拿大等产铁国家不同, 我国条带状铁矿多形成于太古宙, 而不是古元古代, 组成上多为氧化矿石, 变质深, 不象元古宙铁矿组成上多硅酸盐相、碳酸盐相, 且变质浅, 后者较易形成风化壳型富铁矿; 我国陆相火山岩型铁矿有一定发育; 我国沉积菱铁矿床常受到后期改造, 带有某些中低温热液矿床的面貌等。

70 年代后期层控矿床地球化学在我国方兴未艾。提出的层控矿床 (不包括沉积矿床) 的成矿作用至少有五种, 即改造、热水沉积、沉积-变质、沉积-岩浆叠加、沉积-风化及上述作用的复合。由于我国地壳发育的若干特点, 成矿作用多种多样, 导致层控矿床发育较多, 其中有一些是国外少见的, 如热水沉积成因的内蒙古四子王旗萤石矿床、川鄂湘赣二叠系中的黑滑石矿床、黔东南湘西下寒武统中的重晶石矿床等, 改造成因的众多层控金矿、汞矿、锑矿等。我国不同时代不纯碳酸盐地层的广泛分布使其中赋存的层控矿床较多, 如南方的铅锌矿、汞矿、菱铁矿、雄雌黄矿、水晶矿床等。层控矿床成矿作用是内生和外生作用的统一, 过去的某些争论常常是由于只强调了一种作用而忽视了另一种作用而造成的。

近十余年来由于我国金矿事业的迅速发展, 金矿地球化学成果较多, 对金矿床的时空展布、形成机制与成因模式等方面的认识较过去更深刻一些。在地球化学方面我国金矿常具下述特点: 金矿多无成矿专属性, 可赋存于任何种类岩石中, 但在一定地区常较多地产出于某一类岩石中; 无论何种类型金矿床在我国形成时代均较新, 如绿岩型金矿在加拿大、澳大利亚、巴西、南非等主要产金国家皆形成于新太古代—古元古代, 而我国北方绿岩型金矿成矿时代多在中生代; 在金矿床中, 金多呈独立矿物 (如自然金、银金矿、碲金矿等) 形式出现, 即使它们粒度甚小 (仅 $0.1 \sim 0.01 \mu\text{m}$), 也是如此 (大量观察说明这些微细金矿物多在硫化矿物边缘以及裂隙、晶隙中出现。对金矿石用多种微束方法分析均

未找到金在矿物中以类质同象形式出现的证据)；我国砂金矿床密集区多在高寒冻土地带，与原生金矿无空间联系；金的化学搬运意义决不亚于机械搬运；金在中低温条件下可以活化、迁移、富集成矿，我国绿岩型金矿床多属中温矿床，而卡林型金矿多属中低温矿床，这些矿床的矿物共生组合与围岩蚀变类型也证实了这一点；有机质及生物（如细菌、藻类）在某些类型金矿床的形成中扮演了重要角色。

五、矿床地球化学的若干重要生长点

学科生长点指带有突破性的理论或见解的新进展。生长点的提出可以带动整个学科向前发展。每个学科在其向前迈进的过程中都会逐渐提出若干有别于其他学科的生长点。

矿床地球化学的生长点大致有如下几个。

1. 多成因论

多成因论指矿床在成矿物质来源、成矿作用和成矿过程等若干方面常不是单一的，而是多种的。这主要指某一类型矿床而言，至于某一具体矿床，则有可能是单一成因或多成因的。

多成因论是近 20 余年来在许多国家矿床地球化学界议论较多和引人注目的论点。看来，对这一问题已取得了共识，因为，某些看来成因比较单一且无争议的矿床类型都有可能多成因的。

试以铜镍硫化物矿床为例。它是超镁铁—镁铁质岩浆发生熔离作用的产物，出现于岩浆期和岩浆热液早期。许多铜镍硫化物矿床是这样形成的，也是多年来公认的唯一成矿模式。

但这一模式并不能套用于所有产于基性岩—超基性岩中的铜镍硫化物矿床。譬如，这一成因模式认为，Cu、Ni、S 等主要成矿元素都来源于基性、超基性岩浆。在 20 多年前，对这一点是没有争议的。但近年的工作发现若干超大型铜镍硫化物矿床中的硫并非主要来自岩浆，而是来自围岩中的硫酸盐。俄罗斯诺里斯克铜镍矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为大的正值，远离基性岩浆的零值附近，而与围岩三叠系中硫酸盐的还原硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相当，这说明除了岩浆来源的硫是当之无愧的硫源以外，对某些铜镍矿床还应考虑来自地层中的硫。

诱导岩浆进行熔离作用致使铜、镍富集成矿的机制可能也不止一种。如有人指出，加拿大肖德贝里超大型铜镍矿所在的基性岩—超基性岩的岩浆的熔离及分异机制是由于陨石冲击作用引起的。除了矿床围岩中所发现的大量冲击锥、冲击角砾岩之外，含矿基性、超基性岩的稀土配分模式也不同于地幔岩石的，而带有地壳混染的特点。这些都说明了不应排除陨石冲击诱发岩浆熔离及分异的可能。

甚至，某些岩体中铜镍矿化的非岩浆和非岩浆热液成因也是应予以考虑的。目前，至少已在美国西北的怀俄明州及加拿大东部安大略省找到两处产于基性岩中的铜—镍—铂族矿化，它们与岩浆熔离或岩浆热液没有直接成因联系。首先，这两处的矿化都受糜棱岩化及破碎带复合交汇部位的控制，表明矿化发生于岩体固结之后。其次，矿石具充填交代结构，而不具岩浆不混熔产生的结构、构造，如海绵陨铁结构、乳滴状不混熔结构等。矿石测温工作说明，矿化形成的温度小于 335°C ，即处于中低温阶段，这与围岩蚀变以硅化、绿泥石化、绢云母化为主的现象也是一致的。另外，铂、钯以碲化物和碲铋化物为主，也说明其形成温度不高。

与稀土元素类似，铂族的六个元素化学性质十分相似，但在中低温条件下的热液运移

中可能导致较大的分馏。在上述两处矿床中,矿石具高含量Pd,Pt 为次,Pd : Pt 比为18 : 1,而Pd : Pt : 其他铂族元素则为1800 : 100 : 1,这说明了在中低温条件下钯具有很大的活动性,与一些同样也是中低温条件下形成的不整合脉型铀矿所含铂族元素以钯为主的报道也是一致的。这些实例说明在铂族元素中至少铂、钯可以在非岩浆热液中搬运和富集成矿,铜、镍就更不用说了。

关于夕卡岩和夕卡岩矿床的多成因问题,作者曾于1976年就作过论述。当时确认,在若干条件下都可发育夕卡岩和夕卡岩矿床,即酸性岩浆岩与碳酸盐岩石接触带、火山岩与次火山岩接触带、区域变质岩和混合岩化岩石接触带等。近年来,又论述了某些夕卡岩铅锌矿床之Pb、Zn、Mn等至少部分来自地层和日本若干夕卡岩矿床形成过程中有大气降水参与的观点;论证了长江中下游某些夕卡岩是由酸性岩浆直接贯入形成的,而非岩浆热液起因。看来,夕卡岩和夕卡岩矿床在物质来源、成矿作用和成矿过程等方面决非过去设想的那样单一。

又譬如,花岗岩类的成矿作用也是多种多样、多成因的,并不象过去设想的那样单一,即局限于考虑岩浆期后气液的成矿作用。近年来的大量工作证明,这种成矿作用只是花岗岩类多种成矿作用的一种。其他成矿作用还有:已固结的花岗岩类经热液淋溶,某些元素因此而被活化、运移并富集成矿(实例是华南花岗岩型铀矿床);花岗岩类的侵入导致被侵入地质体中某些元素的活化而富集成矿(实例是某些绿岩带中花岗岩侵入体周围的金矿床);某些沉积矿床被后期花岗岩叠加后,物质组成发生变化,变成另一种矿床(如湖南棠甘山沉积碳酸盐锰矿床受后期花岗岩作用,局部形成硫化锰矿床);花岗岩型风化壳矿床(如一些高岭土矿床等)。

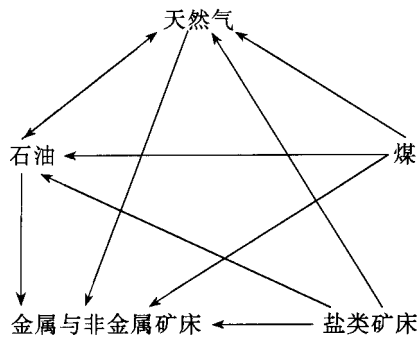
2. 金属矿床、非金属矿床、盐类矿床、煤、石油、天然气等矿产资源之间的有机联系

长期以来,地学界对金属矿床、非金属矿床、盐类矿床、煤、石油、天然气等矿产资源是分别处理、分别研究的(只有油、气是统一在一起的),很少考虑它们之间存在着内在的有机联系。这种分割局面,在我国由于生产、教学和科研的分工与各自为政,更加突出一些。

譬如,在过去,找煤的与找油的是不碰头的,因为含油盆地与含煤盆地无论在时代、组成、发育历史、有机质类型等宏观和微观方面都不相同。当然,油气与金属矿床就更风马牛不相及了。至于盐类矿床和金属矿床,人们也很少从形成机制方面考虑它们之间的联系。

但是在自然界,无论是在有机世界或无机世界,它们是统一的、互相联系的。近20年来人们的实践完全证明了这一点。下面,试以一个简单图解来说明已被人们认识到的某些联系,相信随着时间的推移,更多的、非表面的联系将会不断被发现。

首先,煤系中分散的有机质可以转化为气态或液态烃,经过运移富集形成油气藏,即所谓的煤成气和煤成油。据了解,我国已知天然气储量中约有1/3是煤成气,这充分说明了煤成气作用的重要性。新近开发的吐鲁番-哈密盆地



是煤成油的实例。至于盐类矿床，它们与碳酸盐岩一样，具备了生油和生气的可能。

再来看油气与金属成矿的联系。70年代在从欧洲北海向东经过荷兰、德国北部直到波兰北部的上古生界成煤带或气藏中发现了汞，仅在前东德的土地上，天然气中的汞含量就达4000t，如按我国汞矿规模归类，是四个大型汞矿床的汞储量。这就是说，天然气藏同时是汞矿床。反过来，在国内外一些汞矿床的气液包裹体中也发现了甲烷。在黔东湘西汞矿带的含矿地层——寒武系中找到不少固态沥青脉。傅家谟等曾论证了这些汞矿床曾经同时是古油气藏，后者为后期地壳运动所破坏，液态烃转化为气态和固态的有机质。

油气形成工业聚集的机制类似于某些金属成矿的机制，即地层中分散的有机质转化为烃类之后迁移富集而形成油气藏，与地层中分散的金属活化转移而富集成矿的过程具有同一性。这样，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。当然，也存在若干重要不同点。由于矿源层常含较丰富的有机质，而金属又常为有机质所吸附甚至形成金属的有机化合物（如钒卟啉等），因而在某些情况下金属成矿和有机质成油气之间的关系就更密切了。因此，在某些油气藏中有Au、Ag、Hg、Sb、As、Pb、Zn等金属的相对富集是完全可能的，富集而形成工业规模也是应予以考虑的。

同样，煤系中分散有机质有可能与某些分散态金属共生。在后期地质作用中，富集了的金属，如某些可呈气态或易溶态搬运的金属，可以赋存于煤成气中，也可以形成独立的金属矿床。煤层本身，特别是晚近形成的褐煤中Ge、Ga、U等金属元素含量可能较高，因而其利用价值很高。

盐类矿床被视为化学沉积矿床，是典型的外生矿床，似乎不可能与内生矿床有成因联系。但在某些红色沉积盆地中，层控砂岩铜矿之上盘或下盘常有盐层出露，因而不排除在铜的后期改造富集阶段，卤水起了一定作用。邯邢式铁矿的成矿作用与闪长岩类的钠长石化关系密切（钠长石化愈强烈，铁矿化愈佳），而闪长岩类的钠化被认为与其侵入到中奥陶统的含盐建造有关。闪长岩与盐溶液的相互作用导致闪长岩类中Fe的析出、富集，而Na则与Si结合，形成钠化。从邯邢式铁矿中所赋存的黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 常具高正值来看，硫来源于地层。

卤水中可含大量天然气，形成重要气藏。

在自然界，金属矿床与非金属矿床的联系就更普遍而密切了。首先，不少重要金属矿床同时就是重要非金属矿床。譬如，湖南柿竹园矿床是一个大型—超大型钨铋锡钼矿床，同时它也是一个规模很大的萤石矿床。可以回收大量黄铁矿的铅锌矿床是相当多的。它们既是金属矿床，也同时是非金属矿床。

若干非金属矿床的工业矿物常是金属矿床的蚀变矿物。如某些陆相火山岩型铅锌矿床中发育了叶蜡石化、粘土化、沸石化等蚀变类型，铅锌矿床在空间上与一些独立的叶蜡石矿床、粘土矿床、沸石矿床等形成一定的矿床组合。这种密切的空间与成因联系不仅对找矿有重要意义，而且对探讨陆相火山岩的成矿机制与规律必有所裨益。

形成金属矿床的若干重要机制，如改造作用和热水沉积作用等在非金属矿床的形成过程中也同样重要。如一些水晶矿床、冰洲石矿床等就是改造成矿作用的产物。

3. 成矿作用的演化

地球化学既是研究地球及若干天体的化学组成、化学作用和化学演化的学科，则成矿的化学演化应当是矿床地球化学研究的内容之一。对这一内容的研究不仅有重要理论意