

深部流体成矿 系统

毛景文 李晓峰 张荣华 等著
王义天 赫 英 张作衡

中国大地出版社

内 容 提 要

本书是以国家重点基础研究发展规划项目(973)“大规模成矿作用和大型矿集区预测”课题“深部流体成矿系统”的研究成果为基础,结合国内外该领域的最新研究进展,比较全面地阐述了地幔流体及其成矿系统研究的现状。

书中探讨了地幔物质不均一性对表壳矿产形成的制约;实验模拟地幔流体从深部向浅部转移的形式及其化学动力学性质的变化;并以中国东部和扬子地台西缘为例,深入解剖了不同地质构造环境下大型矿集区的时空结构与地幔流体演化的耦合关系,建立了不同构造演化环境中地幔流体成矿系统。

本书可供矿床地质学、地球化学教学人员、科研工作者,以及高等院校的本科生和研究生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

深部流体成矿系统/毛景文,李晓峰,张荣华等著.
—北京:中国大地出版社,2005.4

ISBN 7-80097-744-7

I.深... II.毛... III.地幔-流体-成矿规律-研究 IV.P612

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第016463

责任编辑:程新 陈维平 谢大尉

出版发行:中国大地出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号 100083

电 话:(010)82329127(发行部) 82329007(编辑部)

传 真:(010)82329024

印 刷:北京纪元彩艺印刷有限公司

开 本:889mm×1194mm¹/₁₆

印 张:24

字 数:650千字

版 次:2005年4月第1版

印 次:2005年4月第1次印刷

印 数:1~1500册

书 号:ISBN 7-80097-744-7/P·50

定 价:88.00元

(凡购买中国大地出版社的图书,如发现印装质量问题,本社发行部负责调换)

序 一

自从《地壳中的流体》一书问世以来,流体研究已经成为地球科学家瞩目的重要课题。成矿流体的研究是地质流体的重要方面,是解决矿床地球化学基本问题的核心和关键所在。近20年来,地幔流体在地质过程中的作用日益受到人们的重视,成为地球科学研究的一个前沿课题。特别是超深钻探和海洋钻探等一些科学研究对深部流体活动现象的不断揭示,促使人们越来越重视地幔流体对地球各圈层地质作用的影响。

地幔流体是一种以 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 或 C-H-O 和碱金属元素以及其他挥发分F、Cl、S、P、卤素等组成的流体系统。地幔流体本身具有很强的物质溶解能力、充足的物质储量、庞大的流体库和稳定的热源供给,可以为成矿作用的持续进行和形成大型和超大型矿床以及大型矿集区提供物质和能量。

地幔流体与成藏成矿作用是当代成矿学研究的前沿课题,对它的研究才刚刚起步。作为一个独立的成矿系统,地幔流体成矿系统在经济地质学界还没有达成共识,是一个探索性极强的新方向。本书首次对地幔流体与成矿成藏作用进行了全方位系统的探索,建立了不同地质构造演化环境中地幔流体成矿系统。

作者在地球化学实验模拟地幔物质不均一性对表壳矿产形成的制约以及地幔流体从深部向浅部迁移的形式及其对物质携带能力实验的基础上,以中国东部和扬子地台西缘为例,深入解剖了不同构造环境下大型矿集区的时空结构与地幔流体演化的耦合关系。研究认为:①在地幔柱区、大陆裂谷区、大陆减薄区(或伸展带)和深大断裂及其次一级继裂(包括大型走滑断裂带中的拉分盆地)等地质环境中,地幔流体具有较强的活动性。②大规模金矿集中区的形成与富金岩石圈的金的亏损具有耦合关系,提出了地幔排气、深大断裂疏导和盆地储存是形成郯庐断裂两侧幔源气藏和金属矿产的一种重要方式。③华北克拉通及邻区在120Ma左右出现的大规模深部流体成矿事件与岩石圈快速减薄和软流圈上涌相耦合。由于岩石圈厚度大,地幔流体在不同部位活动的强烈程度不同,金矿的成矿作用表现出多样性。④扬子克拉通西缘在中新生代经历了板块俯冲、碰撞和后碰撞过程,形成各具特色的碓矿床、与碱性岩有关的稀有矿床和金矿床3种地幔流体成矿系统。

本书将地幔流体活动与成矿地球动力学环境有机地结合起来,把地幔流体作为寻找大矿、巨矿和大型矿集区的有效标志。不仅在理论上具有重要的创新性,而且在实践中也具有重要的经济意义。相信随着地幔流体成矿系统的建立和识别,可以为有效地指导地质勘查工作的部署,推动深部地质找矿工作的开展提供理论依据,为国家的经济建设服务。

愿本书的出版能够进一步推动全方位认识流体成矿作用和成矿过程研究,丰富找矿学研究内容。



2004年12月于北京

序 二

新书《深部流体成矿系统》是最近国家重点基础研究发展规划项目“大规模成矿作用与大型矿集区”重要课题之一完成后的问世专著。著者是该课题负责人毛景文以及李晓峰、赫英、张荣华、王义天、凌洪飞、胡华斌、张作衡等 19 位同行。他们是我国矿床学界主力部队的方面军之一。

本人于 2004 年曾参加此大项目的大连最后验收会，听过他们的汇报。现在又再次拜读了他们的这一最终报告，心中甚是欣慰，感到这是多年来少见的一个战略性成果：

(1) 视域开阔，具有纵横驰骋的经纬气度。他们不受狭窄专业知识的局限，打破学科界限的束缚，跨越大半个中国大陆北方、南方各类大地构造单元，涵盖各类元素（Au、Te、W、Sn、Mo、Fe、Cu、Pb、Zn 和 U 等等）成矿、超脱了种种热液矿化类型（夕卡岩型、斑岩型、石英脉型、蚀变岩型、韧性剪切带型和爆破角砾岩型等等），甚至冲开金属成矿与油气成藏的壁垒，进行了过去很少见如此广泛的成因考察。这是一次建筑在过去几十年矿床、矿田个论精细解剖基础上的理论大综合和升华；这是今后矿床学发展中由个论解析（已经反复搞了几十年）走向集成整合形成一个成矿整体理论体系的里程碑。课题的总体布局和组织是好的。

(2) 书中所得的主要结论是属于基本理论上的推进和创新。它不是一般的战术性发现而是直接向国际上统治成矿学长达一个世纪之久的岩浆分异热液成矿论权威理论的挑战，有根有据地论证了热液矿床是上升的地幔流体和排气形成的重大结论。中国人再也不是老跟着外国同行身后模仿、标榜，而是独立思考，自主开拓。应当说，敢于做到这一点是相当不容易的，要有足够的学术勇气。因为迄今为止，这方面还存在着许多的歧见和阻力。此书的作者之所以表现出这般勇气，那是由于他们的确拥有足够的证据，抓住了真理内核。本人认为，只要在学坛上兴起这种不迷信、不盲从的学风，中国矿床学界就会出现一个崭新的天地。现在是时候了！我们完全有条件和有能力来开拓一个新时代。今后有许多新东西有待发现。

(3) 此书在战役的突破口选择上也大有可圈可点之处。著者们颇有见解地把矿床形成和分布与地壳拉张伸展减薄、上地幔软流体隆升这一大地构造背景相联系。这正是全部成矿规律的要害所在。地幔流体并非到处发育，主要发源地是此软流体。大量所得成果表明，这个联系很成功，热液来自上升的地幔流体，这才有了扎实的幔壳动力学的理论基础。他们通过巧妙的搭桥法集中战力，牢牢地抓住了成矿区内成岩、成矿的年龄测定与中国大陆（特别是东部和中部）中生代由挤压经压张交替的总体松弛过渡，直到拉张伸展的大地构造运动变格相匹配，确立了相应的地壳加厚挤压中的岩浆侵入，经过渡阶段中的脉岩系侵入和交代同在，直到拉张环境中的大规模热液成矿。此中著者们列举了各地区的热液特征、种种同位素变动的幔源标志等等实际资料，作为主论的依据和支撑。小秦岭金矿区热液的 H、O、C、³He、温度、压力在垂向上由深到浅的规律变化，令人信服地展示出热液自深向浅的迁移轨迹；气液包裹体中反映热液成分的 Na⁺、K⁺、Cl⁻、F⁻，深度越大，浓度越高，雄辩地证实了富碱、富挥发分、富矿化剂的成矿热液来自深部流体。

(4) 地幔流体和地壳流体无论在状态、成分，还是在结构上都有显著区别，它既不是水液，也不是岩浆（此水液和岩浆皆是地幔流体与幔壳岩石圈反应后的派生产物）。地幔流体是一种超临界态的流体，只有在实验室的实验装置中才能直接加以观察和测量。实验证明，深部流体（包

括典型的气相迁移)与岩石的反应乃是热液获取矿质的主要来源。此专题关于成矿规律的地质、矿床形成理论见解,是得到实验结果佐证的。

总之,地幔流体上升到浅部减压、降温、发生相变成为热液这一判断,并不因为大地构造部位、成矿元素的种类以及矿化类型的差别而改变,这绝非偶然。历史上,尽管众多研究者于不同时期,出于不同目的,采用不同研究方法,甚至具有不同成因观点,但大量的实际资料类似千百条信息光束如此协调地共同聚焦于一点,大大增强了理论的亮度和结论的抗驳力。此书的出版将在推动矿床学发展上发挥重大作用。

杜乐天

2004年12月14日

前 言

“深部流体成矿系统”（编号 1999CB403211）是国家重点基础研究发展规划项目“大规模成矿作用与大型矿集区预测”的课题之一。在该项目设立时主要涉及 5 个研究方面（包括 15 个研究课题）：①不同类型大规模成矿作用的物质与时空特征；②大规模成矿作用的动力学过程；③典型大型矿集区精细结构解剖；④不同尺度成矿体系中巨量成矿物质的来源、输运和卸载；⑤大型矿集区与隐伏巨矿预测的新理论和新方法。本课题与另外两个课题（编号 1999CB403209 和 1999CB403210）一道从不同来源流体角度探讨矿床的形成过程，回答为什么巨量金属在某一短时间内聚集在一个区带中几个面积很小的地区，建立成矿模型，提出找矿标志。

流体在成矿过程中扮演着十分重要的角色。它既是能量传递的媒体，也是成矿物质输运和交换的重要介质。流体的形成、运移和淀积基本上反映了整个成矿过程。现代成矿学研究表明，地球流体几乎无处不存在。在 Kolar 半岛的超深钻掘进到 12km 处仍然发现富含金属元素的流体在流动。对于成矿流体研究，人们最早注意到岩浆流体。由于火山喷发总是伴随着滚滚浓烟似的气体，即使熔体在凝固过程也有大量的气体蒸发。岩浆分异演化与金属矿床成矿作用形成的斑岩型、夕卡岩型、伟晶岩型、云英岩型及其丰富多彩的脉状矿床是经济地质学者长期研究的课题。自 20 世纪 60 年代以来，大量的岩浆岩及其相关流体的氢、氧同位素研究表明，在岩浆流体成矿系统早期成矿以岩浆流体为主，但中晚期通常有不同比例的大气降水的混入，即使是发育于斑岩体内外接触带的斑岩铜矿都显示出有大气降水，甚至在一些矿床中成矿晚期流体以大气降水为主。到目前为止，一系列与岩浆作用有关的流体成矿系统研究已经相对比较成熟，例如斑岩-夕卡岩铜（钼）矿系统、浅成低温热液金（铜）矿成矿系统、夕卡岩-云英岩钨-锡-多金属成矿系统以及各种类型的脉状矿床成矿系统。20 世纪 60~70 年代在红海、东太平洋北纬 21°所进行的海底调查中发现海底热水活动正在形成块状硫化物矿床，以后又在冲绳海槽和西南太平洋发现类似的海底成矿作用，目前已经发现几百个正在活动的海底喷流热卤水池。正是这些重要的发现引导科学家将今论古，对古代同生矿床形成过程有了深刻的认识。今天大家对于在地质历史中形成的以火山岩为主岩的块状硫化物矿床（VMS 或 VHMS 型）和以沉积岩为容岩的块状硫化物矿床（SEDEX 型）研究已经获得了共识。最近几年，更多研究发现，海底喷流成矿系统的下部往往有岩浆房的存在。岩浆房不仅是驱动海水对流循环的能源，而且也有大量岩浆流体参与到成矿系统，甚至在海底形成的块状硫化物系统与毗邻的岛弧或大陆边缘的浅成低温成矿流体系统受同一断裂的控制。另外，在大陆环境往往形成密西西比型铅-锌矿和卡林型金矿，这些矿床过去通常被称为超远成热液矿床及沉积改造矿床，其基本特点是由地壳流体所形成，通常认为这类矿床的形成过程是在大陆断陷盆地或伸展盆地中由盆地流体长距离运移，萃取成矿元素和沉淀成矿。通过对现代盆地流体系统的监测，这一流体成矿系统越来越为人们所信服。不过，David Leach 通过对 19 个密西西比型铅-锌矿的研究，提出大部分矿床不是盆地演化过程中流体活动的产物，而主要形成于与造山带相联系的台地碳酸盐岩内流体活动的结果。

与前 3 种类型相比，地幔流体成矿研究则刚刚起步，作为一个独立的成矿系统在经济地质学界还没有达成共识，是一个探索性极强的新方向，有待于更多开拓性研究工作。在我国，关于地幔流体与成矿的研究开始于国家自然科学基金重点项目“地幔流体与软流层（体）地球化学”中的一个课题。研究者主要剖析了白云鄂博稀有-稀土-铁矿床以及涉及的南天山且尔布拉克蛭石矿

床。本次研究是在前人工作的基础上对于地幔流体与成矿进行了全面探索。由于考虑到中国东部中生代很多矿床的形成是岩石圈大减薄的表壳响应,可能有地幔流体参与成矿或出现地幔流体的独立成矿系统,因此将工作重点放到东部地区。自中生代以来,中国东部经历了扬子地块、华北地块碰撞对接和造山,地球动力学主应力场大调整和岩石圈大减薄几个重大地质事件。大量矿床形成于后造山或后碰撞伸展环境(190~160Ma)、地球动力学主应力场大调整晚期的伸展阶段(140Ma)和岩石圈快速减薄过程(华北及邻区120Ma左右;华南110~80Ma)。由于地球动力学主应力场大调整晚期的伸展阶段(140Ma)形成的矿床几乎都是与I型或同熔型花岗岩有关的斑岩型-夕卡岩型-层状交代型Cu-Mo-Au-Fe-W矿床,因此此次工作对于地幔流体研究主要针对后碰撞伸展期和岩石圈大减薄对应的成矿事件。在华南地区重点放到铀矿床和扬子地块南缘和西缘中新生的成矿作用。同时,还研究了地幔物质不均一性对表壳矿产形成的制约以及实验研究了地幔流体从深部向浅部转移的形式及其对物质携带能力。经过几年研究,取得的主要进展如下:

1. 研究发现,地幔物质不均一性与大型矿集区的形成在物质上具有耦合关系,查明二氧化碳气藏的形成过程为地幔岩浆排气、深大断裂疏导与在盆地隆起部位储集成藏,还初步提出金与CO₂具有同源性

(1)通过对地幔岩包体及其寄主岩的地质地球化学研究,发现中国东部地幔岩包体中的金在空间分布上具有非均一性,金含量高的样品与地壳中的金矿集中区有对应关系,反映中国东部金的成矿省与岩石圈地幔金的地球化学省是基本耦合的,岩石圈地幔中的金作为物质基础可能对地壳中金矿床和金矿集中区的形成与分布有重要贡献。提出富金岩石圈的消耗与大规模金矿集中区形成之间具有耦合关系。

(2)在胜利油田火山岩中区别出石英拉斑玄武岩类、橄榄拉斑玄武岩类和碱性橄榄玄武岩类等不同岩石类型,论证了碱性橄榄玄武岩类源自地幔,以富碱富轻稀土富大离子亲石元素为特征。区内的二氧化碳气藏正是这些地幔岩浆的排气作用的结果。二氧化碳气体来自深部,沿断裂上升,保存于盆地的隆起部位。此外,还在二氧化碳气藏区火山岩中发现了高含量的金,讨论了幔源岩浆去气与二氧化碳气藏及有关金矿化形成之间的关系,提出二氧化碳气藏区火山岩中高含量的金可能与源自地幔及其岩浆去气的二氧化碳有密切的成因联系。在上述研究基础上讨论了在胜利油田盆地内外找寻不同类型天然气和贵金属资源的可能性。

2. 实验研究结果表明,在高温高压条件下,地幔流体(或深部流体)处于超临界状态,超临界流体对物质具有极强的溶解性。深部流体与岩石相互作用是获取金属的一种主要来源。在跨越超临界态时出现矿物与水的反应化学动力学的涨落,这是导致金属元素卸载和堆积成矿的重要因素之一。实验还证明,高温的气相可以携带金属迁移,如金、钨、锡、铜等元素,这对运用地气方法或深穿透地球化学方法探测隐伏矿提供了理论依据

(1)地球深部流体在高温高压下的存在方式和性质随深度的改变而改变,导致流体在岩石圈内由深到浅在不同层次里发生的化学动力学过程的变化。深部流体处于高温高压下,多属于超临界流体。地面所获得的流体多是常压的低温样品,地热区可获常压高温流体样品。但是要正确认识流体在深部的性质还需要进行高温高压的原位实验研究以及研究深部流体进入地壳过程的模拟实验。深部流体从高温高压下进入低温低压过程,一定会遇到水的临界态的条件(22MPa和374℃)。为此,实验研究了压力在22MPa条件下、温度从400℃到25℃范围内,岩石或矿物与水溶液的反应动力学。实验发现,在跨越水的临界态时,出现矿物与水的化学反应动力学的涨落。发现在近临界态时,有最大反应速率(如硅)。但是由于元素化合物键的性质的不同,在温度变化时,它们的释放速率是不同的。于是出现不一致溶解过程。实验证明,跨越水的临界态时,出现矿物与水的反应动力学的涨落是导致矿石的形成原因之一。

(2) 实验证明跨越水的临界态时, 含金属的流体会出现气体与液体的相分离。金属重新分配到气或液相里。实验证明, 高温的气相可以携带金属迁移, 如金、钨、锡、铜等元素。同时也进行了压力在 22MPa 条件下、温度在 400℃ 到 25℃ 范围里水与玄武岩的实验研究, 发现水在 300℃ 到 400℃ 时可以溶解大量岩石里的成矿元素, 如铜、铅、锌等。结果显示, 深部流体与岩石相互作用是成矿金属的一个重要来源。地球深部流体在高温高压下、随深度的改变而改变着自己的化学动力学性质。

3. 研究表明, 在印支晚期中国东部及邻区几个板块先后碰撞对接, 岩石圈受挤压增厚; 而侏罗纪开始后造山阶段, 挤压与伸展交替出现。在这一时期花岗岩大范围侵位, 呈东西向分布, 是中国东部最为宏大的花岗岩侵位事件。侏罗纪花岗岩主要属于地壳重熔型, 是大厚度岩石圈在挤压松弛期或伸展期软流圈沿深大断裂多幕式向地壳涌动, 导致地壳物质重熔成花岗岩浆及其侵位的结果。由于岩石圈厚度大, 地幔流体在不同部位活动的强烈程度不同, 其被稀释的程度也不同。在这种大背景下, 就金矿而言, 成矿作用出现多样性, 有以冀西北东坪为代表的地幔流体明显参与成矿, 有以西秦岭为代表的地幔流体与地壳流体混合成矿, 以及以鲁西为代表的以大气降水为主的浅成低温热液成矿系统

(1) 冀西北金矿集区位于一个变质核杂岩内, 主要出现在水泉沟碱性杂岩南部的内外接触带。出露地层为太古宙基底变质岩系和中元古代浅变质沉积岩以及覆盖在前两种地层和碱性杂岩体之上的侏罗纪盆地火山岩。由于以东坪为代表的金矿是一种碲化物金矿, 类似于美国中西部和西南太平洋岛弧中的与碱性杂岩有关的浅成低温金矿床。因此, 人们曾长期认为东坪金矿与水泉沟碱性杂岩之间存在着成因联系。但是, 放射性同位素测年表明水泉沟杂岩的年龄为 327Ma, 而东坪金矿的成矿年龄仅为 180~170Ma, 两者之间存在 150~160Ma 的时间间隔。东坪等金矿的成矿流体包裹体异常发育, 不仅气泡大, 而且在显微镜下观察 CO₂ 气体和液体相当丰富, 为典型的 CO₂-H₂O 型流体。氦同位素测定结果显示出 $^3\text{He}/^4\text{He}=2.1\sim 5.2\text{Ra}$, 即使在破碎蚀变岩型矿石中有 ^4He 增加的样品中其 $^3\text{He}/^4\text{He}=0.3\sim 0.8\text{Ra}$, 都明显高于地壳流体。事实上, 碲在地核和地幔的含量远远高于地壳, 高度富碲本身就是地幔来源的良好证据。在整个东坪矿田, 硫同位素也表现出典型的地幔来源, 氢、氧同位素也有比较清楚的显示, 即成矿流体主要来自岩浆。但是由于在成矿时期未见同时代的岩浆活动, 这种可能性也可以排除。成矿流体来自变质流体的可能性也不存在, 由于主要变质事件发生在太古宙末期。因此, 东坪金矿是在侏罗纪后造山伸展期, 地幔流体上涌过程中形成的矿床。

(2) 西秦岭地区剪切带型金矿床的赋矿围岩为绿片岩相浅变质岩和强烈变形的泥盆系以及三叠系和寒武系岩石。金矿床在空间上明显受多级构造系统控制, 其展布受区域深大断裂的控制, 具体产出于次级构造中, 多数矿床受大型剪切带以及大型剪切带内或旁侧的褶皱所控制。矿石类型以破碎蚀变岩型、构造蚀变岩型和石英脉型为主。

形成金矿的流体包裹体总体上呈现出不混溶、高温、低盐度和富 CO₂ 等特征。金矿床多数具有较高的主成矿期成矿温度, 而且从南秦岭到中秦岭, 即从南向北, 温度有逐渐增高的趋势, 主要温度范围从 200℃~300℃ 变化为 260℃~400℃。除了在双王和八卦庙等矿床偶尔发现少量的高盐度流体包裹体外, 流体盐度值总体上以 8wt%~10wt% NaCl 为峰值, 属于 H₂O-CO₂ 低盐度体系。流体中 CO₂ 的相对摩尔百分数为 15%~66%, H₂O 的相对摩尔百分数为 33%~84%, NaCl 的相对摩尔百分数为 0.2%~1.8%。流体的总密度主要为 0.63~0.87g/cm³。马鞍桥金矿床矿石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值的主要范围为 -4.1‰~-7.0‰; 双王金矿床矿石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值多数位于 -5.6‰~-7.8‰; 八卦庙金矿矿石铁白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 -1.91‰~-4.87‰; 李坝、金山和三人沟等矿床方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要为 -4.10‰~-6.43‰之间; 阳山金矿床矿化方解石-石英脉的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -2.19‰~-8.36‰。这些组成特点表明金矿床的碳可能具有相同的来源

——地幔，这进一步说明矿区富 CO_2 的流体可能来自地幔。这些矿床氢、氧同位素组成范围差异较大，但总体上 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值主要集中分布于 $+5\text{‰} \sim +15\text{‰}$ 之间， δD 主要集中于 $-60\text{‰} \sim -90\text{‰}$ ，表明以岩浆水为主，也有变质水和大气降水参与。八卦庙金矿床矿石中钾长石氮同位素值与矿区外围的花岗质岩的氮同位素值 ($+2.4\text{‰} \sim +8.91\text{‰}$) 相近，反映出矿体中的氮同位素特征与侏罗纪花岗岩的密切关系。区内围岩的硫主要来自沉积，而矿石硫则具有地层硫与岩浆源的混合特征。稀土元素的特点反映出这些金矿床均与岩浆活动有一定的关系，深部物质可能与岩体有密切的关系。因此，西秦岭地区金矿床形成时虽然有地幔流体参与成矿，它与地壳重熔型岩浆有关流体及其地壳流体混合作用明显。

(3) 鲁西平邑地区的金矿床主要有隐爆角砾岩型 (以归来庄金矿为代表) 和碳酸盐岩层状细浸染型 (以磨坊沟金矿为代表) 两种类型。包裹体的研究表明：两种类型矿床的包裹体均为气液两相盐水溶液，均一温度在 $103\text{℃} \sim 250\text{℃}$ 之间，冰点变化范围较大，在 $-2.5\text{℃} \sim -13.5\text{℃}$ 之间，对应的盐度在 $4.65\text{wt}\% \sim 17.26\text{wt}\% \text{NaCl}$ 之间。同位素研究结果显示：矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $-0.71\text{‰} \sim +2.99\text{‰}$ 之间， $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值在 $-7.3\text{‰} \sim 0.0\text{‰}$ 之间， δD 在 $-48\text{‰} \sim -70\text{‰}$ 之间， $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值在 $-4.3\text{‰} \sim 8.3\text{‰}$ 之间。硫和碳同位素研究表明，成矿流体来源于地幔，氢和氧同位素则显示有较多的大气降水混入。铜石岩体主要由中-细粒闪长岩和二长斑岩两套岩石组成，通过对斑状细粒闪长岩中单颗粒锆石 18 个样品点的分析，获得了两组谐和年龄数据，其中有 10 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $167.9 \sim 183\text{Ma}$ ，加权平均值为 $(175.7 \pm 3.8) \text{Ma}$ ，由此说明铜石岩体形成于 $(175.7 \pm 3.8) \text{Ma}$ 。根据铜石岩体的成岩年龄推断成矿年龄，鲁西平邑地区的金矿大约形成于 $170 \sim 160\text{Ma}$ 之间，发生于中国东部 $200 \sim 160 \text{Ma}$ 大规模成矿事件的末期。磨坊沟金矿产在前寒武纪花岗绿岩体与寒武系地层间拆离滑脱带附近，矿层顶板发育的 NW 向层间次级拆离滑脱带中断坪和断坡构成了矿体的容矿空间。归来庄金矿则受控于近东西向的反向铲状断层。磨坊沟金矿和归来庄金矿床的空间分布特点、矿物共生组合和硫、氢、氧稳定同位素特征均显示了相同的特点。鲁西平邑地区的金矿是在相同的伸展构造体制下不同的构造部位形成的浅成低温热液矿床。

4. 研究提出白垩纪中期在中国东部发生了岩石圈快速减薄过程，而且华北及其邻区与华南地区快速减薄的时限有一定的差别，前者在 120Ma 左右，后者基本上在 $110 \sim 80\text{Ma}$ 之间。在岩石圈快速减薄期间，软流圈上涌到上地壳，导致地壳区域地热增温，地幔脱气，岩浆活动及火山喷发，岩浆流体、地幔流体与大气降水的混合。在这种大背景下，地幔流体源源不断地沿深大断裂向上涌动，大面积参与成岩成矿过程。从胶东地区、小秦岭—熊耳山地区，扬子地块南缘 (或江南古陆南缘) 到华南地区，以金和铀为代表的矿床毫不例外地显示出地幔流体在成矿中的积极作用

(1) 鉴别出小秦岭—熊耳山地区中生代的构造演化发育两期伸展作用：①第一期近垂直于核体边界的正向伸展滑脱运动的时限为晚三叠世中期 ($221 \sim 216\text{Ma}$)，这是由于地壳加厚、重力势能差增大和挤压应力减弱而发生的同造山伸展作用，区域构造体制也随之由挤压向伸展转换；②第二期伸展为后造山伸展作用，是在陆内演化阶段由深部过程-岩石圈拆沉作用控制下的产物，即拆沉作用导致软流圈热物质上涌和地幔楔部分熔融引起上部地壳的伸展隆升，其活动时限为早白垩世 ($135 \sim 123\text{Ma}$)。区内发育的金矿床类型有石英脉型 (蚀变岩-石英脉复合型)、蚀变千糜岩型、蚀变碎裂岩型 (构造蚀变岩蚀变型)、爆破角砾岩型 (浅成低温热液型) 等，其中石英脉型是本区主要成矿类型。本区成矿流体的气相组分主要为 H_2O 、 CO_2 和少量的 H_2S 、 CH_4 、 N_2 、 H_2 、 CO 和 He 等。液相组分中的阴离子主要为 Cl^- 、 F^- 、 HS^- 、 SO_4^{2-} 、 S^{2-} 和 HCO_3^- 等，阳离子主要有 Na^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 等。流体组分特征显示出与幔源流体组成的相似性，同时普遍发育的

钾长石化、硅化和黄铁绢英岩化,也指示了成矿流体中可能存在来自幔源的碱质和硅质。由于构造环境、温压条件和围岩岩性等的不同,成矿流体的组分也表现出一定的差别,从而导致矿化类型的差异。H、O、S、C、He、Ar 同位素组成表明,本区成矿流体的初始来源以地幔为主。起源于深部的幔源流体与后期加入的壳源流体和大气水形成的多源流体混合作用、成矿流体运移过程中与途经围岩之间发生的水-岩相互作用以及中基性岩脉发育过程中伴随的地幔去气作用使 SO_2 和 CO_2 等挥发组分进入成矿流体系统而起到矿化剂的作用等等因素,最终导致成矿元素在剪切构造带中的扩容空间中富集沉淀。

(2) 胶东是我国最大的金矿集区,区内金矿床可以分为3种类型,即石英脉型、破碎蚀变岩型和胶莱盆地北缘拆离带中的角砾岩型。挑选玲珑、焦家、三山岛、仓上、望儿山、大尹格庄、邓格庄、蓬家乔、发云乔和大庄子10个矿床中成矿主期的黄铁矿、绢云母和钾长石进行了硫、氢、氧同位素测试,还对个别矿床成矿晚期的碳酸盐矿物进行了碳、氧同位素测定,同时对测定了玲珑花岗岩和郭家岭花岗闪长岩中黑云母和钾长石的氢、氧同位素。石英脉型、破碎蚀变岩型和角砾岩型成矿流体的 δD 值变化分别为 $-52\text{‰} \sim -85\text{‰}$ 、 $-48\text{‰} \sim -86\text{‰}$ 和 $-58\text{‰} \sim -86\text{‰}$,相应的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $2.1\text{‰} \sim 6.4\text{‰}$ 、 $4.2\text{‰} \sim 9.7\text{‰}$ 和 $1.0\text{‰} \sim 2.2\text{‰}$ 。它们的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值分别为 $-3.2\text{‰} \sim -6.4\text{‰}$ (平均 -4.4‰)、 $-3.4\text{‰} \sim -6.2\text{‰}$ (平均 -5.5‰) 和 $-0.1\text{‰} \sim -4.8\text{‰}$ (平均 -2.2‰)。这些数据表明,金矿虽然产出形式有所差别,但都是由地幔排气作用形成的同一深部流体库中的流体向上涌动,与围岩发生强烈水-岩反应和与地壳流体混合,通过交代和沉淀成矿。胶东金矿形成时代 ($115 \sim 123\text{Ma}$) 晚于侏罗纪玲珑式花岗岩 ($160 \sim 150\text{Ma}$) 和白垩纪郭家岭式花岗闪长岩 ($130 \sim 126\text{Ma}$),与煌斑岩墙及其他中基性岩墙同时生成 ($121 \sim 114\text{Ma}$)。与郭家岭岩体有关的围岩蚀变以钠质交代作用为主,金矿化与煌斑岩墙相同,具有富 CO_2 流体和伴随着以钾交代为特征的蚀变作用以及 Sr-Nd 同位素特征,都是中生代岩石圈快速减薄过程的地壳浅部响应。

根据稀有气体同位素测试计算得出石英脉型金矿的幔源氦比例范围为 $13.48\% \sim 27.14\%$,平均值 19.94% ;破碎蚀变岩型金矿的幔源氦比例范围为 $9.47\% \sim 27.87\%$,平均值 18.68% ;角砾岩型金矿的幔源氦比例范围为 $6.10\% \sim 22.22\%$,平均值 14.26% 。

(3) 华南铀矿与花岗岩和火山岩有着密切的空间分布关系,一般认为是地壳流体的产物。尽管也有人运用碳、氧同位素数值推测这些铀矿在形成过程有地幔流体的参与,但是由于碳、氧同位素的多成因解释,导致这种推断未引起重视。本次工作对江西相山和广东下庄两个大型铀矿的成矿过程进行了解剖研究,获得了地幔流体参与成矿的重要信息:①在相山矿区与铀矿密切共生的萤石具有高含量 Sr ($295 \times 10^{-6} \sim 1136 \times 10^{-6}$),也明显富集碱金属、REE、LILE、HFSE 和 U、Th 放射性元素。这些特点不同于围岩花岗质岩石和相应的火山岩,而类似于区内的煌斑岩。②在相山矿区地幔来源特征性元素磷高度富集,富铀胶磷矿广泛分布。③成矿流体为 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型, CO_2 的碳同位素表明为地幔来源。④相山矿区黄铁矿的氦同位素值 $^3\text{He}/^4\text{He} = 0.10 \sim 2.02\text{Ra}$,下庄矿区为 $^3\text{He}/^4\text{He} = 0.06 \sim 0.79\text{Ra}$,明显高于地壳流体,为地壳流体与地幔流体的混合流体。⑤两个矿区内基性岩墙都相当发育,下庄矿田中辉绿岩墙和煌斑岩墙是成矿的主要围岩。辉绿岩的 Sr-Nd 同位素表明它们来自相对富集地幔。这些基性岩墙的成岩年龄为 $125 \sim 101\text{Ma}$,与华南地区岩石圈大规模伸展时限相吻合。⑥测定相山和下庄铀矿的主要成矿作用发生于 $102 \sim 98\text{Ma}$ 和 $(82.5 \pm 1.3)\text{Ma} \sim (81.2 \pm 7.7)\text{Ma}$,明显晚于它们各自区内的主岩——花岗闪长岩 (135Ma) 和高铝花岗岩 ($189.1 \pm 0.7\text{Ma}$),而相对接近于基性岩墙的侵位时代。最近研究表明,在岩石圈下部存在一个不连续的富含放射性生热元素的富集圈。在岩石圈伸展过程,这些元素被地幔流体携带到浅表,由于压力骤降和挥发组分等矿化剂的逸散,或与地壳流体发生

混合, 导致铀沉淀成矿。

(4) 扬子地块(或扬子克拉通)南缘金矿带虽然呈东西向分布, 但是几乎所有的矿床都受 NNE 向断裂及其边部次一级断裂的控制。具体控矿构造主要为韧-脆性剪切带, 赋矿围岩为中晚元古代和寒武纪碎屑岩, 矿区内很少有花岗岩的出现, 矿化元素组合一般为 Au-As、Au-Sb-As 和 Au-Sb-Hg。尽管有不同程度的地壳流体和其他物质加入到成矿系统, 但这些金矿床的氢、氧、硫同位素一致表明有成矿流体来自地幔。位于莲花山大断裂(可能为郯庐大断裂的南延部分)西侧的万古金矿的成因可能代表了该带中大多数矿床的形成过程。产于东西向剪切带中的石英大脉型和破碎蚀变岩型金矿的成矿流体为 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型, 无论是液相还是气相都富有 CO_2 ; 氢、氧同位素值分别为 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 7.4\text{‰} \sim 10.9\text{‰}$ 和 $\delta\text{D} = -56\text{‰} \sim -64\text{‰}$; 氦同位素测定表明 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $3.5 \sim 9.8\text{Ra}$; 这些数据反映出相对原始的地幔流体的特点。迄今为止, 对于扬子地块南缘这组金矿床的形成时代仍然颇有争议, 报道有加里东期、海西期和燕山期几组成矿年龄, 但都不是精确测年的结果。由于控矿构造主要表现为中晚燕山运动的产物, 因而主成矿期也应该为燕山期。因此, 在白垩纪郯庐大断裂及其南延部分可能是导通地幔的深大断裂, 地幔流体沿其向上运移, 在盆地形成 CO_2 气藏和氦气藏, 在山区的适宜地段形成这些金属矿床, 万古金矿就是一个少见的典例。

5. 扬子地台西缘在地质演化过程中经历过多次的开合过程, 中生代特提斯洋的开裂、俯冲和闭合以及印度板块与亚洲板块碰撞后造山都在该区留下深刻的印痕。自从白垩纪以来, 在扬子地台西缘地区发育有世界罕见的大水沟独立碛矿床、与碱性岩浆活动有关的稀土矿床、剪切带型金矿。这 3 种成矿系统与地幔活动关系密切, 地幔流体不同程度地参与成矿作用, 形成 3 种各具特色的地幔流体成矿系统

(1) 地幔流体与金矿成矿系统: 自北而南可以划分为 3 个金矿矿集区, 即北段的大渡河矿集区、中段的石棉矿集区和南段的锦屏山矿集区。大渡河矿集区主要分布于前震旦纪基底, 受网络状剪切系统控制。矿化带多数沿 NNE-NE 向剪切带展布; 石棉矿集区主要产于上震旦统与泥盆系之间及其内部的次级顺层剪切带中; 锦屏山矿集区主要产于滑脱构造带的花岗质糜棱岩带, 呈串珠状分布。这些金矿主要是含金石英脉型。在扬子地台西缘 3 个不同的矿集区, 这些含金石英脉型矿石中石英所表现出的伸展环境也不一致。例如, 石棉金矿石英所表现出来的主要为高温韧性流动的拔丝状石英条带, 局部叠加石英低温颗粒边界迁移重结晶; 缅甸洼金矿主要表现为石英低温颗粒边界迁移重结晶; 而大渡河矿集区黄金坪金矿则是在石英低温颗粒边界迁移重结晶的基础上, 叠加微劈理化, 蚀变的绢云母沿微劈理化裂隙充填。这些石英的特点, 说明扬子地台西缘金矿伴随剪切带的演化而形成, 并且主要与剪切拉分有关。

石英流体包裹体测温结果显示这些金矿的成矿温度变化较大, 为 $140^\circ\text{C} \sim 340^\circ\text{C}$; 成矿流体盐度变化范围为 $1.7\text{wt}\% \sim 14.5\text{wt}\% \text{NaCl}$; 密度变化范围为 $0.51 \sim 1.03\text{g}/\text{cm}^3$ 。成矿流体组分为 $\text{H}_2\text{O-CO}_2\text{-CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-N}_2$, 其中 CO_2 质量分数变化范围为 $2\% \sim 24\%$ 。黄铁矿流体包裹体 He、Ar 同位素指示成矿流体中 R/Ra 比值较小, 变化范围为 $0.16 \sim 1.03\text{Ra}$; 而 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的变化范围较宽, 为 $298 \sim 3288$, 显示地幔流体参与了扬子地台西缘金矿的成矿作用, 但以地壳端元的流体为主。地壳端元的流体主要由变质流体和大气降水来源的流体组成。而硫同位素证明有部分硫来自地幔、部分硫来自赋矿变质沉积建造。氢、氧同位素则显示了成矿流体来自深部流体和大气降水的混合来源。黑金台子金矿石英流体包裹体稀土元素示踪也同样说明成矿流体一部分来自深部。研究结果认为, 扬子地台西缘金矿成矿作用过程中有 4 种流体参与成矿, 即高密度高盐度的地幔流体、高密度低盐度的变质流体、低密度低盐度的大气降水来源的流体和有机流体。

(2) 地幔流体与碛矿床成矿系统: 碛是一种分散元素, 在地球圈层中的主要集中于地幔和地核。在地质地球化学循环过程中, 碛趋向于分散。然而在扬子地台西缘大水沟却形成了一个罕见

的分散元素碲高度富集成特高品位（碲品位，1%~15%，最高可达30%）的独立矿床。研究表明，大水沟碲矿形成的时代为94Ma，但是在区域上未见90~100Ma时期岩浆活动的记录。13条NNE向的矿脉全部分布于夹在三叠纪大理岩中的玄武岩层，当矿脉延伸到碳酸盐岩即尖灭。在矿脉两侧发育的蚀变带则以富钾硅酸盐为主。成矿流体为CO₂-H₂O组合。对大水沟碲矿床的石英以及蚀变岩中的黑云母和白云母所进行的氢、氧同位素分析显示，成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 为3.17‰~9.11‰； δD 为-54‰~-64‰，绝大部分落到岩浆水范围内。无矿白云石脉及二叠系大理岩中方解石的碳、氧同位素组成十分相似（ $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -5\text{‰} \sim -7\text{‰}$ ； $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 16.89\text{‰} \sim 28.2\text{‰}$ ），说明大水沟矿区中的碳来自地幔。辉碲铋矿成矿阶段的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化从-0.5‰~+1.4‰，平均0.5‰，显示了与地幔硫有关；对主要成矿阶段的3件磁黄铁矿样品（磁黄铁矿-黄铁矿阶段）、3件辉碲铋矿样品和6件白云母样品（辉碲铋矿阶段）进行了He、Ar惰性气体同位素测试，结果为 $^3\text{He}/^4\text{He} = 0.2 \sim 2.8\text{R}/\text{Ra}$ ， $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 385 \sim 1026$ 。其中磁黄铁矿的比值最高， $^3\text{He}/^4\text{He}$ 在1.6~2.8R/Ra，白云母最低，为0.2~1.2R/Ra，也揭示了地幔流体参与了成矿作用。因此，结合区内地球动力学演化，本次研究提出洋陆俯冲过程中下插洋壳的撕裂处的壳幔相互作用导致地幔排气可能是形成这类特殊矿床主要因素。

(3) 与地幔岩浆侵位有关的稀土金属成矿系统：稀土金属矿床主要位于攀西裂谷内，又可以分为东、西两带。东带主要有牦牛坪、三岔河、包子村、麦地、里庄羊房沟以及大陆乡等稀土矿床，而西带仅有木洛（雕楼山、郑家梁子）稀土矿床。稀土矿化主要与碱性杂岩体有关。碱性杂岩体主要由霓辉英碱正长岩、霓辉正长（斑）岩、碱性基性伟晶岩、方解石碳酸岩以及云煌岩、煌斑岩等组成。矿化类型有重晶石伟晶岩型、碳酸岩伟晶岩型和少量为细脉型。研究发现在牦牛坪和大陆槽稀土矿床中，霓辉重晶伟晶岩型矿体的早期萤石和碳酸岩型矿体的早期石英均含有大量的流体-熔融包裹体。镜下观察发现包裹体类型主要有：液相包裹体、CO₂-H₂O包裹体、含子矿物的多相包裹体和流体-熔融包裹体。激光拉曼特征表明包裹体内的子矿物为重晶石，气相成分（显微镜下多数为黑色）为CO₂，液相成分为H₂O。牦牛坪稀土矿床石英包裹体流体REE曲线平直，与地幔岩石雷同，清楚显示其物质地幔来源。矿区萤石、方解石、氟碳铈矿稀土配分模式与区内英碱正长岩相似，表明牦牛坪稀土矿床成矿与英碱正长岩岩浆活动有关，也说明成矿物质具有地幔特征。

矿物流体包裹体中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为0.02~0.11Ra， $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为(313±1~437±2)，明显不同于典型地壳成因流体的稀有气体同位素组成特征，而是介于典型地幔和地壳流体稀有气体之间。碳酸岩型和重晶石型矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值为3.3‰~5.9‰，平均为4.7‰，组成相当均一，显示单一岩浆来源的特点。碳酸岩型矿石中的2件方解石样品，其 $\delta^{13}\text{C}$ 值均为-6.9‰，与地幔来源碳同位素值（-7.0‰）相当接近；而且其 $\delta^{18}\text{O}$ 值为7.3‰~7.4‰，极差为0.1‰，落在“初始火成碳酸岩”的 $\delta^{18}\text{O}$ （6‰~10‰）之内。7件石英样品的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为4.6‰~6.5‰，与典型地幔来源流体的氧同位素组成（±5.7‰）相同。上述流体包裹体特征以及稳定同位素和稀有气体同位素数据都表明牦牛坪稀土矿床的成矿流体主要来自地幔。碱性岩浆侵位之后，由岩浆分异演化出的地幔流体在运移、交代和汇聚过程中，形成牦牛坪等稀土矿床。

这项研究即将结束，我们不能不指出这是我们从来没有经历过的一次艰苦的工作经历，深深地体会到在没有前辙向前行走是多么困难，常常迷茫不知路在何方。经过艰难的探索，终于找到了成矿环境与成矿流体结合研究，探索地幔流体成矿系统的线路。课题成员同心协力，取得了以上可喜的进展。但在欣喜之余，仍感到这项研究工作即将结束，很多科学问题有待进一步深化和解决。正是这项探索性很强的研究，在工作过程中我们不得不多次对研究方案进行修改和调整，尽可能把研究的目标集中在地幔流体活动比较明显的地区。本项目执行历时5年。在项目执行过

程中,科技部、国土资源部和中国科学院的有关负责人和承担该项目的3个单位的各级组织和领导均给予诸多的指导、支持和帮助;在野外工作期间,得到有关省(市)地质矿产勘查开发局、有色地质局、核工业局等兄弟单位以及有关矿山的领导和同行的支持和帮助。在研究过程中,不断地向有关院士、专家、教授及同行们进行请教,共同探讨和切磋一些科学问题,受益匪浅,在此一并表示衷心感谢。

本书是国家重点基础研究发展规划项目“大规模成矿作用与大型矿集区预测”课题“深部流体成矿系统”的最终总结,是课题组全体科研人员集体劳动的结晶。全书共分12章,其中第一章由毛景文和李晓峰执笔;第二章由赫英执笔;第三章由张荣华和胡书敏执笔;第四章由毛景文、李晓峰、王义天、张作衡、谢桂青执笔;第五章由毛景文、李厚民、王义天、张长青执笔;第六章由王义天和李永峰执笔;第七章由毛景文和李红艳执笔;第八章由凌洪飞和姜耀辉执笔;第九章由毛景文、李晓峰、李荫清和Richard Goldfarb执笔;第十章由胡华斌、牛树银和毛景文执笔;第十一章由张作衡执笔;第十二章由李晓峰、田世洪和丁悌平执笔。最后由毛景文和李晓峰统编定稿,王义天、张作衡和王立华等协助完成了大量工作。林文蔚研究员审阅并提出了许多宝贵意见。

需要指出的是,本书在对一些大地构造名词的使用上各章节有所不同,如华北地台、华北板块以及华北克拉通等。著者曾尝试使用统一的名词,但这在一定程度上引起了描述对象的内涵发生变化,因此,不得不混合使用这些大地构造名词,为此我们深感遗憾。

鉴于本书研究涉及面较广,加之著者的水平有限,深感此书各章节还存在有不少问题,敬请专家和读者给予批评指正。

著者

2004年12月

目 录

序 一	
序 二	
前 言	
第一章 地幔流体及其与成矿成藏关系研究现状	1
第一节 地幔流体（或深部流体）的组成	1
第二节 地幔流体与成矿成藏作用	7
第二章 地幔岩、地幔流体和成藏成矿作用	15
第一节 地幔物质不均一性和地壳成矿响应	16
第二节 地幔富二氧化碳含金流体及其成藏成矿效应	22
第三节 地幔流体与二氧化碳气藏	30
第四节 地幔流体与金的成矿作用	37
第三章 地球深部流体化学动力学	45
第一节 地球深部的流体	45
第二节 含矿流体 NaCl-H ₂ O 体系	51
第三节 流体从地球深部进入地壳过程中的水-岩反应	54
第四节 气相迁移金属	58
第四章 中国东部中生代大规模成矿作用的地球动力学背景	65
第一节 中国北方中生代成矿作用的特点	65
第二节 华南金属矿床的空间分布特征	77
第三节 成矿地球动力学背景的探讨	83
第五章 岩石圈减薄过程中的深部流体与胶东金矿成矿作用	95
第一节 区域地质背景和金矿床的基本特征	95
第二节 样品描述和测试分析	98
第三节 成矿流体来源和矿床成因探讨	105
第四节 成矿地球动力学及成矿模式	114
第六章 小秦岭—熊耳山地区中生代金的大规模流体成矿系统	121
第一节 区域地质概况	121
第二节 中生代的构造-岩浆活动	125
第三节 金的流体成矿系统	138
第七章 江南古陆南缘某些金矿床形成过程与地幔流体	175
第一节 江南古陆南缘金矿床分布及稳定同位素特征	175
第二节 万古金矿地质地球化学	182
第八章 华南中生代热液铀矿与地幔流体关系	199
第一节 地幔流体铀成矿作用的可能性	200
第二节 相山火山岩型铀矿田深部流体成矿作用	201
第三节 下庄花岗岩型铀矿田深部流体成矿作用	206
第四节 结论	213

第九章 冀西北地区金矿成矿作用与地幔流体 ·····	219
第一节 东坪金(碲)矿床地质·····	220
第二节 流体包裹体地球化学·····	221
第三节 惰性气体同位素地球化学·····	230
第四节 成矿流体和矿床成因·····	232
第十章 鲁西浅成低温热液金矿床成矿流体及成矿作用 ·····	239
第一节 区域成矿地质背景·····	239
第二节 铜石岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄·····	242
第三节 典型矿床地质特征·····	248
第四节 流体包裹体地球化学·····	252
第五节 稳定同位素地球化学·····	257
第六节 成矿作用讨论·····	262
第十一章 西秦岭金成矿带流体成矿作用 ·····	269
第一节 区域地质和金矿床基本特征·····	269
第二节 金矿床主要控矿要素·····	271
第三节 成矿作用流体地球化学·····	282
第四节 成岩成矿时代·····	312
第五节 成矿环境与成矿模式·····	313
第十二章 扬子地台西缘铜金碲稀土矿床深部流体成矿系统 ·····	321
第一节 地质构造背景和深部流体成矿系统·····	321
第二节 构造-岩浆岩带的划分·····	324
第三节 与新生代陆内走滑拉分有关的金矿成矿系统·····	326
第四节 与中生代洋陆俯冲有关的碲-金矿床成矿系统·····	341
第五节 与新生代陆内幔源岩浆有关的稀土金属成矿系统·····	347
第六节 扬子地台西缘深部流体成矿系统模型·····	356
[附录] 与本项目研究有关的论文 ·····	361

第一章 地幔流体及其与成矿成藏关系研究现状

第一节 地幔流体（或深部流体）的组成

在立项时，课题名称定为深部流体成矿系统。对于深部流体，目前尚没有一个确切的定义，例如，毕思文（1996）认为深部流体主要指地幔来源的流体，包括非生物成因的天然气；胡文暄等（2001）认为深部流体指来源于地幔的流体，是一种以 CO_2 等气体组分为主的富气流体。而杨雷等（2001）认为盆地基底以下的流体统称为深部流体，主要包括地幔流体和深部地壳流体；深部流体是与深部壳-幔环境（物相、温度、压力和氧逸度等）处于平衡的气体 and 挥发分。在本项目执行早期笔者曾经定义“深部流体主要包括地幔流体以及板块俯冲过程中岩石脱水所产生的流体、深变质过程中由脱水作用（dehydration）形成的流体以及由于地幔物质上涌而产生的与有关的岩浆水。由于深部流体来自地球深部，在其向上运移过程中往往与浅部流体（包括大气降水、地层水等）发生混合作用”。因此，如何定义深部流体有待进一步研究。鉴于一般文献中缺乏对深部流体物质来源的具体地球圈层的界定，笔者将深部流体与地幔流体视为同义词，均指地幔来源的流体。

一、地幔流体的基本组成

地幔曾长期被认为是一种致密的干体系，直到 20 世纪 70 年代岩石学家开始注意到地幔交代作用并通过研究发现地幔流体的存在。Bailey 在东非和德国的碱性玄武岩中发现辉石岩地幔包体中有云母和角闪石，提出辉石岩可能是地幔橄榄岩经过交代的产物（杜乐天，1996a）。Frey 等（1974）发现亏损的橄榄岩却富含 LREE，推测是由流体带入。世界上碱性岩浆都是以富含 LREE 为特征，源于亏损地幔。Menzies 等（1980）认为这是由于交代作用带入 LREE，然后经熔融产生碱性岩浆。Frey 等（1974）首次发现玄武岩中地幔包体橄榄岩是高镁低钙，并明显富集一系列不相容元素 K、P、Ti、LREE、Th 和 U。Dawson 等（1980）称之为隐蔽交代（cryptic）。他认为这是由于交代作用发生的流体为富含 CO_2 流体，如果流体是富含 OH^- ，则出现显交代（patent）。通过详细研究南非等地金伯利岩及其中的包体，Dawson（1980）发现金伯利岩中富含一系列不相容元素和自然元素 Ag、Cu、铂族元素、Ni、Fe、石墨，还有 Si、C 等。石榴石边部或全部晶体已经变为混浊，被微晶金云母、角闪石、斜长石、尖晶石等集合体所交代。还发现了云母岩的地幔包体。Navon 等（1988）在博茨瓦纳和扎伊尔的立方金刚石中及包壳金刚石的包壳中发现了显微流体包裹体，并分析了其流体组分，认为该流体代表了这种金刚石生长环境中流体介质。这一发现表明处于 150~200km 深处的地幔仍然存在着流体，这引起了国内外学者的极大兴趣。郑建平等（1994）在辽宁复县 50 号岩管金伯利岩中发现微小流体包裹体，测定气相和液相成分都是以 CO_2 为主，还有一些 H_2O 、 H_2S 和 CH_4 等。关于地幔流体的成分，Bailey（1978）最早提出主要是 CO_2 、同时带有碱质组分， H_2O 、Al、Fe、Mn、Ca、Ti、Rb、Sr、Ba、Zr、Nb、Y、La 等，及其高浓度 C、卤素和 N_2 ；更多学者（Wyllie, 1987；Schneider et al., 1986；Pasteris, 1987；孙丰月等，1995）倾向于 C-H-O 体系。还有其他一些学者提出了一些大

同小异的建议, 例如, $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-F-Cl-S}$ (Anderson et al., 1987); H-O-C-S-F-Cl (Spera, 1987); C-O-H-S (Eggle, 1987); $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (Holloway, 1971), $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-F-Cl}$ (Lloyd, 1987)。由以上叙述可以看出尽管大家在认识上有一些区别, 但都是大同小异, 总体上可以认为地幔流体是一种以 C-H-O 或 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 为主的流体系统。

胡文暄等 (2001) 总结指出大量观测数据和理论分析表明, 地球内部蕴涵着大量流体, 并未间断地向外释放着。全球陆地火山每年释放出的 CO_2 约有 8 亿吨 (即每天释放出 200 多万吨)。原始地球中 CO_2 的 72% (质量分数)、 N_2 的 12% (质量分数) 仍然留在地幔中 (Gerlach, 1991; Zhang and Zindler, 1993)。从我国东部幔源岩石矿物中包裹体的实测结果来看, 绝大多数气液包裹体的主要成分是 CO 和 CO_2 , 还有一些 N_2 、 H_2 和 CH_4 。Spera (1987) 甚至认为 Fe-Ni 组成的地核是碳的重要储集场所, 而且碳具有易溶于铁中的特点, 正像某些铁陨石中具有高含量碳。Trull 等 (1993) 估计地幔中碳丰度大约为 $(50\sim 250) \times 10^{-6}$ 。

除了在地幔岩流体包裹体中发现 H_2O 以外, 过去 10 年间, 大量实验岩石学和矿物的分子光谱学研究 (例如 Schrauder et al., 1994; 陈丰, 1994) 证明, 石榴石、橄榄石、辉石等无水矿物中含有一定量的氢。从 Mao 和 Hemley (1992) 相图粗略地推断, 低压区氢可能是流体, 而在高压区可能为固体。陈丰 (1996) 认为地球深部是 H 的重要储库, 主要以吸附或溶解 H、氢化物 and 固体 H 形式存在。Badding 等 (1978) 根据 FeH 的状态方程计算出在 12.5g/cm^3 密度时地核中 FeH 的摩尔分数为 40%~95%。

在我国, 杜乐天 (1988, 1989, 1990) 最早注意到地幔流体这一研究前沿, 并观察到碱金属是地幔流体的重要组成部分, 提出将地幔流体概括为 HACONS 化合物系统的观点, 即: H 代表氢 (Hydrogen)、卤素 (Halogens) 和热 (Heat), A 代表碱金属, C 代表碳, O 代表氧, N 代表氮, S 为硫, 简称为幔汁。结合以往对矿床形成过程碱金属交代作用的研究 (杜乐天, 1983, 1986), 进而全面论述了地幔流体-碱质交代-成矿作用的关系 (杜乐天, 1996a, 1996b), 开创了地幔流体与成矿研究的新方向。戎嘉树和杜乐天 (1995) 在我国东部地幔岩包体中鉴定出直径 1~5mm 大小的浆胞, 其中富含大量碱金属和挥发组分, K_2O 高达 12%, Na_2O 达 7.5%。这种浆胞由斜方辉石熔融而成, 其中熔体玻璃中常有新生的橄榄石和铬透辉石。这种熔体形成伴随着 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 的带入和 SiO_2 、 MgO 的带出。林传勇等 (1994) 也在吉林省伊通火山群中的尖晶石相的二辉橄榄岩、异剥橄榄岩和辉石岩幔源包体中发现富 K、Na 玻璃体, 其成分为: SiO_2 (52%~60%)、 Al_2O_3 (20%~24%)、 Na_2O (3.0%~10.0%)、 K_2O (4.1%~10.6%)、 FeO (0.9%~4.4%)、 MgO (0.3%~1.8%) 和 CaO (0.1%~3.9%)。这与以往在国内外已经发现的富钠玻璃 (Frey and Green, 1974; Mysen and Botcher, 1975; Francis, 1976; Maaloe and Prinzlau, 1979; Jones et al., 1983; Scheneider et al., 1986; 郑海飞等, 1987) 不同, 以富钾、钠, 贫钙为特征 (图 1-1), 这可能反映出前者为地幔本身的流体, 后者为壳-幔的强烈相互作用地区的产物。朱永峰 (1995) 曾指出洋壳中广泛分布的含 K_2O 约 1.5% 的碱性玄武岩类岩石的熔融形成深度很大 (达 400km), 表明地幔中存在着相当数量的碱金属和水。从上述可以得出结论: 地幔流体是一种由 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 或 C-H-O 和碱金属元素以及其他挥

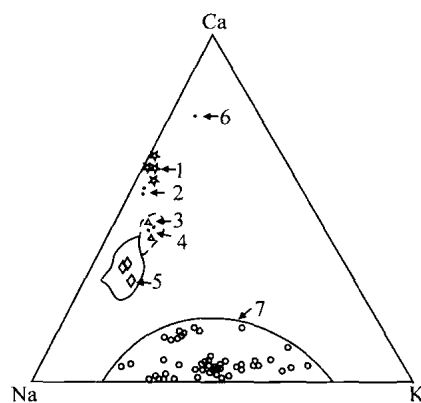


图 1-1 玻璃体的 Ca-Na-K 图解
(据林传勇等, 1994)

1—引自 Mysen 等 (1975); 2—引自 Girod 等 (1981); 3—引自 Maaloe 等 (1979); 4—引自 Francis 等 (1976); 5—引自 Frey 等 (1974); 6—引自郑海飞等 (1987); 7—引自林传勇等 (1994)