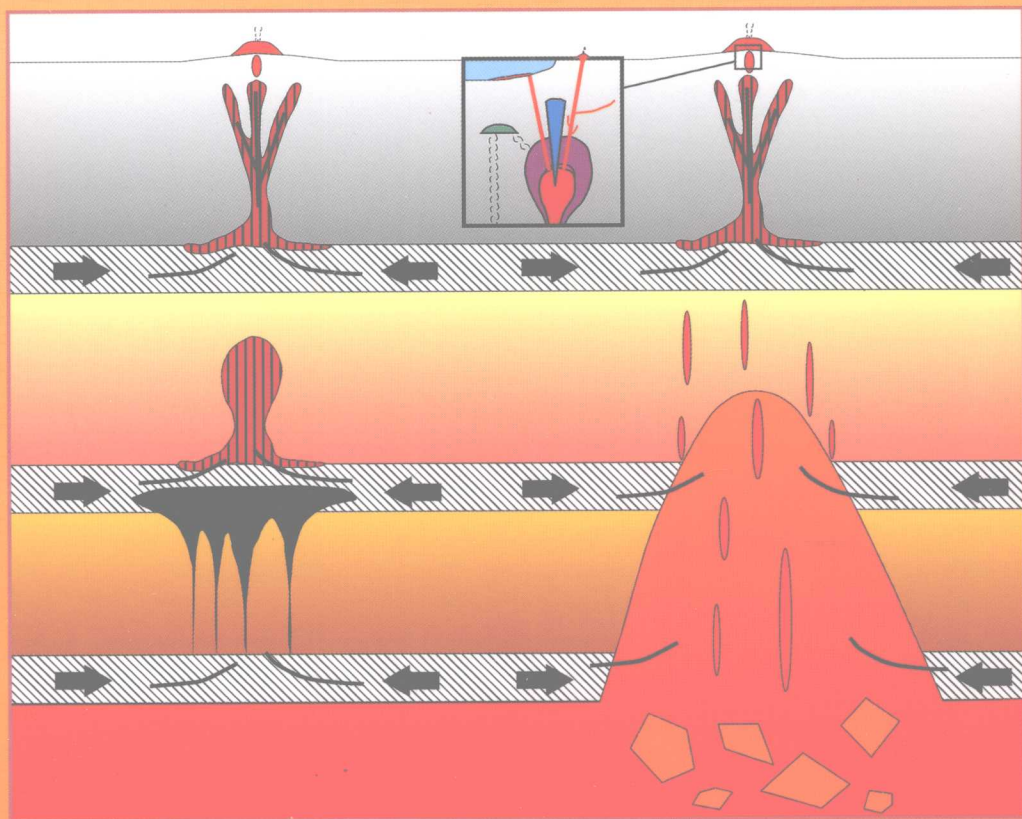


中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室资助

透岩浆流体成矿作用导论

罗照华 卢欣祥 陈必河 等著



地质出版社

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室资助

透岩浆流体成矿作用导论

罗照华 卢欣祥 陈必河 李明立 著
梁涛 黄凡 杨宗锋

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书试图建立一个整合的内生金属成矿理论。在论述地球科学研究基本思路的基础上,选择以演绎法为手段推导与成矿作用有关的基本地质过程,将成矿岩浆体系理解为由熔浆和流体组成的混合地质体系,两者的耦合与解耦是内生金属成矿作用的基本过程。本书特别关注了成矿作用的物理过程及其宏观地质标志,内容涉及成矿物质的来源、运移和堆积的场所,并以造山后脉岩组合与成矿的关系为例系统阐述了“小岩体成大矿”的原因。全书内容丰富,论述严谨,图文并茂,以新的视角阐述了内生金属矿床形成的基本过程。

本书可作为从事矿产资源相关工作专业人员的参考书,也可以作为研究生教学的阅读材料。

图书在版编目(CIP)数据

透岩浆流体成矿作用导论 / 罗照华等著. —北京:地质出版社, 2009. 6

ISBN 978-7-116-06173-6

I. 透… II. 罗… III. 岩浆—流体—成矿作用—研究
IV. P611

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 107886 号

Touyanjiang Liuti Chengkuang Zuoyong Daolun

责任编辑:李上男 李 莉

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324519 (办公室); (010) 82324567 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787 mm × 1092 mm $1/16$

印 张:12

字 数:260 千字

印 数:1—1200 册

版 次:2009 年 6 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:50.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-06173-6

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序 一

本书是一本有独立见解、自成体系的内生矿床成矿理论新著作。本书从“透岩浆流体”假设出发，以“小岩体，成大矿”的命题为切入点，以河南秦岭-大别山地区为主要依托，围绕矿床成因三大基本问题“源、流、汇”，整合了国内外有关这些问题的最新进展，运用地质学、地球物理学、地球化学、岩石学、矿物学以及热力学等多学科知识的交叉融合，作较深入的具体分析与探讨，并将理论和国内外的矿床实际相联系，结合作者多年来在岩、矿领域研究所积累的丰富经验，提出了一种与国内外矿床学界内生矿床成因理论主流见解不同的新理念和新见解。

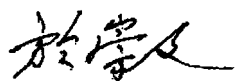
内生金属矿床的生成与岩浆有着密不可分的关系，在较深入的层次上又和花岗岩的成因有着千丝万缕的联系。透岩浆流体的概念是前苏联科尔任斯基在研究岩浆交代作用时于1952年首次提出的。它曾被应用于岩浆交代作用、碱性岩类成因、花岗岩化和混合岩化以及岩浆矿床的成矿作用等诸多方面的研究。作者从透岩浆流体假设出发，以岩石圈与软流圈壳幔相互作用的深部过程为基础，在“矿源”问题上，提出了熔浆与含矿流体是两个相互独立、既耦合又解耦的地质体系，“矿源”是赋存在岩石圈-软流圈系统的深部流体储库；在“矿流”问题上，认为成矿流体的释放与运移起因于岩石圈拆沉作用等“岩石圈的灾变”过程；当熔浆与成矿流体从混合体系中解耦时，则在不同的边界条件下可以发生不同类型的金属成矿作用，并形成各种相应的成矿体系。在此基础上，作者又对造山后脉岩组合的地质意义及其与成矿作用的关系作了较深入的探讨。此外，还要特别指出的是，作者在对透岩浆流体的成矿作用进行深入探讨的基础上，提出了相应的透岩浆流体成矿预测体制与预测方法。这些方法大多利用成矿作用宏观表现的种种地质学、岩石学和矿物学等易于识别的标志，便于地质工作者的使用。

本书在内生金属矿床成因方面提出了启发思考的新理念和新思

路，这是作者对于矿产资源研究作出的贡献。同时，从全书内容的总体来看，有关岩石学方面的论述比较深入，而有关矿床学方面的探讨似嫌不足。在基础理论研究方面，对于非平衡热力学应有所加强，而在动力学、尤其是成矿作用动力学方面（这是矿床成因研究最新的重要进展之一）则尚未涉及。建议作者今后加强这些方面的研究，使本书内容更加充实。

总之，本书的内容虽然以“小岩体，成大矿”为切入点，但是经过作者上述的全面展开，其内涵的广度与深度已远远超过了上述命题的范畴，成为一种内生矿床成因的新理论。全书内容丰富，论述严谨，概念清晰，文字简练，读来引人入胜。相信本书对有志于矿产资源研究的广大读者开卷有益、有所收获。

中国科学院院士

The image shows a handwritten signature in black ink, which appears to be '于学' (Yu Xue), written in a cursive style.

2009年2月14日

序 二

国务院 2006 年作出了关于加强地质工作的决定，明确提出地质工作的主要任务之一是加强非能源重要矿产勘查。指出“……非能源矿产是经济社会发展的重要物质基础。以国内急缺的重要矿产资源为主攻矿种，兼顾部分优势矿产资源，按照东部攻深找盲、中部发挥特色、西部重点突破、境外优先周边的方针，实施矿产资源保障工程。重点加强铁、铜、铝、铅、锌、锰、镍、钨、锡、钾盐、金等矿产勘查……”在这种新形势下，为矿产资源勘查提供必要的理论基础成为地质学家尤其是矿床学家面临的一项艰巨而又光荣的任务。

近年来，本书著者们承担并执行了河南省地质矿产重大科技攻关计划项目（26417），国家重点基础研究发展计划“973”项目（G1998040807，2002CB412603），国家自然科学基金项目（40434010，40472038），天津华北地质勘查总院科研项目（KY2008-2），有色金属矿产地质调查中心危机矿山勘查理论项目（200699105-4），国家科技支撑计划重点项目（2006BAB07B08），中俄合作基金项目（RFBR-GFEN08-05-92224，40673046），国土资源部创新项目（1212010711814）等。正是在这些项目研究与丰富的野外观察相结合的基础上，他们得以完成本书的编写任务。

本书的特色之一是著者引进了科尔任斯基的透岩浆流体假说，该假说认为透岩浆流体就是穿过液态岩浆的超临界慢源气体流（佐托夫，1989），佐托夫还运用这一假说解释了诺利尔斯克铜镍硫化物矿床的成因。但是，由于其最初主攻对象是花岗岩化问题，包括后来在成矿方面的一些应用，并未得到地质矿床界应有的承认和推广。

本书著者们选择“小岩体成大矿”（汤中立，2002）这一客观事实来阐述透岩浆流体成矿作用，因为大多数内生金属矿床都与小岩体有关。但是，小岩体的体积与成矿作用的规模之间存在矛盾，这种矛盾导致了引入透岩浆流体假说的必要性。本书以东沟钼矿为

例，如果流体中 MoO_3 溶解度取最大值 29 ppm (Rempel et al., 2006) 或含钼 18.5 ppm，含钼流体的密度取 1.3 g/cm^3 ，则形成 65 万吨的超大型钼矿需要流体体积约为 27 km^3 ，是东沟斑岩体估算体积 8.1 km^3 的 3.34 倍。如此巨量的流体显然不是被溶解或包含在熔浆中的，要求岩浆仅仅是一个通道而不是流体的来源，这就为引进透岩浆流体假说提供了有力的依据。

本书著者们进一步明确指出，透岩浆流体是非岩浆体系析出的流体，它与岩浆体系本来就是两个相互独立的地质体系，它们只是相互需要而走在一起 (罗照华等, 2007a)。原来溶解在岩浆中后来由于压力降低而释放出来的流体不属于透岩浆流体；高于原生岩浆饱和度的流体都是外来的，因而都是透岩浆流体。这就在更坚实的基础上发展了透岩浆流体说。此外，本书还对成矿物质在何处沉淀和流体从何而来等问题进行了广泛的分析和系统的论述。

总之，本书内容丰富，论述朴素，娓娓道来，并不枯燥；本书将透岩浆流体成矿与小岩体成大矿、混沌边缘成矿、成矿系统或成矿系列、深部流体成矿作用以及岩石圈灾变与成矿作用大爆发等结合起来研究，从而使得矿床基础理论研究提高到一个新层次，这在国内外应属首次。正因为这种高层次的结合，必然为“透岩浆流体成矿”带来诸如“岩浆成矿专属性”等一些更深层次的问题，进一步研究解决这些问题，必将推动这一学说更好更快地发展。本书的出版将给矿产勘查、矿床理论研究的同行和相关专业师生以启迪，也是对矿床学研究的新贡献。衷心祝贺本书的问世并期望它发挥重要的作用。

中国工程院院士



2009 年 2 月 14 日

前言

肖序常院士 1998 年在西昆仑山说的话“想为找矿做点具体工作”至今犹言在耳，激励着我尽可能做好所承担的工作。2001 年，因参加肖庆辉先生主持的项目“中国花岗岩重大地质问题”而结识了河南省国土资源研究院的卢欣祥先生，使我有“想为找矿做点具体工作”的机会。卢先生长期从事花岗岩与成矿作用方面的研究，其广博的理论知识和丰富的实践经验令我感到敬佩。特别令人难忘的是我们的昆仑之行，从那时才了解到卢先生对许多岩石学问题也具有独到的见解，并善于将不同学科的知识结合起来用于解决矿床学问题。

2006 年，河南省国土资源研究院准备立项资助对河南花岗岩及其与成矿作用的关系进行系统研究，卢先生希望我能够参与。这一建议是令人感兴趣的，因为资源问题是地球科学研究永恒的主题。从此，我们及各自的研究集体开始了岩浆活动与成矿作用关系的研究。在此过程中，接触到一些国内外的最新研究成果，也考察了河南秦岭-大别山地区的一些代表性矿床，因而有了将主要的成矿理论研究进展整合在一起的冲动。这种冲动使我想起了科尔任斯基（Д. С. Коржинский）的透岩浆流体（трансмагматический флюид, transmagmatic fluid）假说及其在诺利尔斯克（Норильск）铜镍硫化物矿床研究中的应用。我最初接触该学说的时间是 1992~1993 年在莫斯科大学进修期间。但是，那时候我的主要兴趣还是区域岩石学问题，对马拉库舍夫（А. А. Маракушев）院士的教诲并不太在意。此后，在自然科学基金委的资助下，我们有过几轮合作研究，使我有进一步接触透岩浆流体假说的机会。佐托夫（И. А. Зотов, 1989）对诺利尔斯克铜镍硫化物矿床的研究令人印象非常深刻，从中可以体会到透岩浆流体假说的魅力。

河南项目启动之后，卢先生和我开始考虑是否可以用透岩浆流体假说将一些成矿理论研究进展整合起来的问题。为此，必须首先了解当前矿床学研究的主要进展，也必须了解透岩浆流体假说为什么被大多数学者所抛弃。在此过程中，发现许多成矿理论问题实际上已经得到清晰的阐述，包括成矿物质堆积的场所、成矿系统、成矿系列、成矿物质来源、成矿作用的触发机制，等等。显然，尚缺乏一种有效的方法将这些研究进展整合在一起。主要原因在于成矿作用是一种极为复杂的地质过程，很难把握它的全部。为此，卢先生和我试图以演绎法为主在前人研究成果的基础上阐述岩浆活动与成矿作用的关系，因而研究工作的出发点是了解成矿作用的基本解及其外延。由前人的研究结果可以看

出，所有的内生金属矿床都伴随着大规模围岩蚀变以及围岩蚀变的基本特征是含水（挥发分）矿物取代无水（挥发分）矿物，表明内生金属成矿作用的基本解是造矿矿物从流体中析出。因此，紧接着的问题就是成矿流体的来源和造矿矿物析出的场所。於崇文院士关于“大规模成矿作用发生在混沌边缘”以及“矿床在混沌边缘分形生长”的论述阐明了造矿矿物析出的位置，根据物理化学的基本原理，这些位置应当是地壳中物理化学条件急剧变化的部位（物理化学边界层）。按照这种理解，高位侵入体可以看做是混沌边缘的一种，因为岩浆体与围岩的温度反差必然导致平衡与非平衡过程的共存。有关成矿流体的来源目前存在各种各样的假设，必须对它们进行详细的分析。结果表明，大多数假设都存在理论缺陷，透岩浆流体假说是一种最佳选择。但是，科尔任斯基关于透岩浆流体的解释也有缺陷，过于强调了流体的壳下来源。结合最新的地球物理探测结果和地质过程时间尺度的研究进展，透岩浆流体应当来源于岩石圈-软流圈系统中的流体库（如层圈剥离带），而流体中成矿元素溶解度的实验结果则暗示深部流体必须快速上升才有利于地壳浅部的成矿作用。因此，本书采用的透岩浆流体概念已不同于科尔任斯基的最初定义，系指额外加入到岩浆体系中的那部分流体，而不仅仅是幔源流体。

透岩浆流体概念的引入可以解释许多传统岩浆热液成矿理论不能解释的问题。例如，成矿物质的质量平衡问题、矿田构造问题、流体库问题，等等。顺着这样的思路，我们展开了一些理论研究，收到了意外的好效果，似乎证实了我们的技术路线是正确的。向於崇文、汤中立、翟裕生等院士和邓晋福教授汇报后，得到了支持和鼓励。于是，我们决心将自己的设想和初步研究成果系统写出来，以便更广泛地征求意见。

我们的研究主要以秦岭—大别山为基地，也得到了一些企业的支持，特别是天津华北地质勘查总院，不仅给予了经费资助，而且布置了多个钻孔验证工程。如果说秦岭—大别山和冈底斯的野外观察使我们初步建立起了透岩浆流体成矿理论的框架模型，阿拉套山成矿预测的成功带来了初步的喜悦，太行山的钻孔验证则给了我们进一步研究的信心。同时，企业的支持激励着我们进行更务实的研究，企望透岩浆流体成矿理论可以直接服务于生产实践。因此，本书以叙述成矿作用的宏观标志及其形成机理为主，所列举的成矿作用证据都是“看得见、摸得着”的。这种想法在安妥岭地区和大庙地区得到了部分验证，暗示是有可能的。但是，要求矿山工程师具备较好的理论基础，特别是正确理解成岩成矿作用的物理过程。

近年来，物理地质学的研究在国外如火如荼，取得了很大的进展。相对而言，国内同行大多偏向于化学过程的研究。正确认识物理过程的重要性可以从更宏观的角度来看待成岩成矿作用及其产出特征，从而服务于生产实践。理解

物理过程的尝试也使我们清楚地了解到非平衡热力学的意义以及“小岩体成大矿”的科学内涵。因此，本书叙述的内容及其相关的科学研究主要是以小岩体为例展开的。大庙式铁矿的研究是个例外，有色金属矿产地质调查中心给予了认识透岩浆流体在深部成矿行为的机会。这项研究是对与高位侵入体相关矿床研究的补充，对于完善透岩浆流体成矿理论是不可或缺的。

物理过程的研究涉及众多基础理论问题，包括大陆生长、岩石圈动力学、火成岩多样性、深部地质过程、构造热体制，等等。以邓晋福教授为首的科研集体长期致力于这些科学问题的研究，为我们的工作建立了良好的基础。中国地质大学“地质过程与矿产资源”国家重点实验室为我们的研究创造了一个很好的平台，包括经费资助、同行交流和文献资料。在此过程中，认识到与高位岩浆活动有关的成矿体系是一个远离平衡态的地质体系，每一种过程都以小的时间尺度为标志，因而大多数热力学过程不能正常完成。这是成矿体系复杂性的最主要原因。

对本书的出版及相关研究提供经费资助的项目包括：河南省地质矿产重大科技攻关计划项目（26417），天津华北地质勘查总院科研项目（KY2008-2），有色金属矿产地质调查中心危机矿山勘查理论项目（200699105-4），国家自然科学基金项目（40434010，40472038），国家科技支撑计划重点项目（2006BAB07B08），中俄合作基金项目（RFBR - GFEN08 - 05 - 92224，40673046），国土资源部创新项目（1212010711814），国家重点基础研究发展计划“973”项目（G1998040807，2002CB412603）。

研究工作还得到了许多其他同行的支持，张长厚承担了黑山铁矿矿田构造的研究；程素华承担了安妥岭矿区接触变质作用的研究；杨晓勇和杜小伟参加了秦岭-大别山地区的野外工作；肖庆辉、吕勇军、苏尚国、杨志明、白云来和郭少丰积极参与科学问题的讨论并提供有益的参考文献；朱永峰给予了多方面的有力支持。初稿完成以后，於崇文院士和汤中立院士详细审阅了全书，并为本书作序。英文摘要由吕勇军翻译，并由他的澳大利亚朋友进行语法修改。需要感谢的人还有很多，在此向所有支持过我们的朋友表示诚挚的谢意！

罗照华

2009年2月20日于北京

目 次

序 一	
序 二	
前 言	
第一章 绪 言	(1)
第一节 矿床学研究的重要进展	(1)
一、小岩体与大规模成矿	(1)
二、成矿作用发生在混沌边缘	(2)
三、成矿系统或成矿系列	(2)
四、深部流体成矿作用	(3)
五、岩石圈灾变与成矿作用大爆发	(4)
第二节 地球科学研究的基本方法	(5)
一、归纳法	(5)
二、演绎法	(6)
三、实证法	(7)
第三节 地质事件的五种联系	(8)
一、时间联系	(9)
二、空间联系	(10)
三、热力学联系	(10)
四、运动学联系	(11)
五、动力学联系	(11)
第四节 小 结	(12)
第二章 岩浆热液成矿理论问题	(13)
第一节 岩浆中的挥发分含量	(13)
一、挥发分含量的估算方法	(13)
二、根据熔融包裹体和火山玻璃估算的挥发分含量	(14)
三、高温高压实验估算的挥发分含量	(16)
第二节 岩浆分异作用与含矿流体的聚集	(20)
一、岩浆分异作用的基本控制因素	(20)
二、分离结晶作用与流体聚集	(22)
三、不混溶与流体聚集	(22)
第三节 含矿流体的围岩萃取	(24)
一、岩浆-围岩相互作用	(24)
二、岩浆-围岩体系流体交换的方式	(26)

三、岩浆上升过程中获取流体的可能性	(27)
第四节 深部流体与深部岩浆房	(27)
一、深部流体	(28)
二、深部岩浆房流体	(30)
三、东沟斑岩型钼矿与太山庙岩基的关系	(31)
第五节 脱水熔融的问题	(33)
第六节 小 结	(34)
第三章 透岩浆流体的基本概念	(35)
第一节 从岩汁到透岩浆流体	(35)
第二节 同岩浆交代作用	(36)
一、同岩浆交代岩的研究历史	(37)
二、交代岩的地质产状及其分布	(37)
三、交代岩与原生岩浆岩的关系	(39)
四、某些同岩浆交代岩类的矿物学-岩石学特征、成分和结构	(42)
第三节 诺利尔斯克地区的透岩浆流体成矿作用	(45)
一、侵入体地质学-岩石学特征	(46)
二、成矿侵入体的流体体制	(49)
三、岩浆起源与透岩浆流体的来源	(51)
第四节 本书的透岩浆流体概念	(54)
第五节 小 结	(55)
第四章 成矿流体和成矿物质的来源	(57)
第一节 广义脱水反应与流体	(57)
一、俯冲板片的脱水反应	(57)
二、名义无水矿物	(60)
三、深部流体的意义	(62)
四、金属在流体中的溶解度	(63)
第二节 深部流体储源问题	(65)
一、深部流体储源的形成机制	(65)
二、深部流体的释放机制	(67)
三、对流地幔上涌的类型	(68)
第三节 山西文水-山东日照电性结构断面的地质解释	(69)
一、软流圈中的高阻体	(71)
二、高导层厚度与岩石圈稳定时间的关系	(72)
三、导电性各向异性与软流圈运动	(74)
第四节 小 结	(74)
第五章 透岩浆流体成矿作用	(75)
第一节 岩浆活动的物理过程	(75)
一、MASH 和 MSAE 过程	(76)
二、岩浆活动的时间尺度	(82)

三、侵入岩体的三维形态	(91)
第二节 熔浆-流体相互作用	(95)
一、熔浆体系与流体体系的运动学	(96)
二、气体分离与成矿作用	(98)
三、同岩浆交代作用	(102)
第三节 透岩浆流体成矿体系	(104)
一、正岩浆成矿体系	(105)
二、接触带成矿体系	(106)
三、远程热液成矿体系	(107)
四、火山热液成矿体系	(107)
五、无机油气成矿体系	(107)
第四节 高位侵入体相关矿床的矿田构造	(108)
一、构造应力场	(108)
二、构造裂隙网络	(110)
三、构造变形序次	(113)
第五节 小 结	(115)
第六章 透岩浆流体成矿预测体制	(116)
第一节 地质过程的能量驱动机制	(116)
一、能量来源及其作用方式	(116)
二、地球动力学事件链	(118)
三、矿源层新解	(119)
第二节 成矿作用的宏观表现	(121)
一、欧洲阿尔卑斯带的新生代成矿作用	(121)
二、小岩体组合	(123)
三、侵入体形态复杂性系数	(124)
四、岩石结构构造	(126)
五、矿物学特征	(127)
第三节 成矿预测体制	(129)
一、成矿带	(129)
二、成矿段	(129)
三、成矿域	(129)
四、矿集区	(130)
五、成矿中心	(130)
六、矿床或矿体	(130)
第四节 小 结	(130)
第七章 造山后脉岩组合与成矿作用	(131)
第一节 造山后脉岩组合问题	(131)
一、造山后脉岩组合问题的由来	(131)
二、造山后脉岩组合的基本特征	(132)

三、火成岩成因分析 (139)

第二节 成矿作用与脉岩组合的关系 (144)

一、造山后脉岩组合形成的热体制 (145)

二、深部流体的野外证据 (145)

三、包古图斑岩型铜金矿床的成因解释 (146)

第三节 小 结 (148)

第八章 综 述 (149)

参考文献 (153)

Introduction to Metallogeny by Transmagmatic Fluids (167)

第一章 绪 言

中国幅员辽阔,矿产资源总量较丰富。同时,中国也是一个人口大国,加之所探明的储量贫矿多、富矿少,人均占有量仅为世界平均水平的 58%,居世界第 53 位(吴荣庆,2006)。随着我国国民经济的高速发展,对矿产资源的需求量连年增长。据预测,进入 21 世纪,我国将有近一半的矿产资源种类不能满足需求。到 2020 年,铜、金等矿产资源将严重短缺,绝大多数矿产将难以满足需要(程裕淇等,1996)。矿产资源保有储量的问题不解决,有可能严重滞后国民经济的增长速度,甚至威胁国家安全。因此,国务院 2006 年作出了关于加强地质工作的决定,明确提出地质工作的主要任务之一是加强非能源重要矿产勘查。指出“非能源矿产是经济社会发展的重要物质基础。以国内急缺的重要矿产资源为主攻矿种,兼顾部分优势矿产资源,按照东部攻深找盲、中部发挥特色、西部重点突破、境外优先周边的方针,实施矿产资源保障工程。重点加强铁、铜、铝、铅、锌、锰、镍、钨、锡、钾盐、金等矿产勘查。在西南三江、雅鲁藏布江、天山、南岭、大兴安岭等重点金属成矿区带,合理部署矿产普查,引导和鼓励商业性勘查,形成一批重要资源基地。继续实施国土资源大调查,积极开展矿产远景调查和综合研究,加大西部地区矿产资源调查评价力度,科学评估区域矿产资源潜力,为科学部署矿产资源勘查提供依据”。在这种新形势下,为矿产资源勘查提供必要的理论基础成为矿床学家面临的艰巨任务。

第一节 矿床学研究的重要进展

成矿作用是地球上最复杂的地质过程之一。尽管如此,近年来还是取得了许多重要进展,其中包括成矿作用与火成岩的关系、成矿作用动力学、成矿物质来源、成矿作用的地质背景和触发机制,等等。

一、小岩体与大规模成矿

裴荣富(1995)主编的《中国矿床模式》一书总结了 92 种成矿模式,其中 17 种与火山岩有关,36 种与侵入岩有关,两者之和占有所有矿床模式的 57.6%。实际上,许多变质矿床和沉积矿床也是间接(如绿岩带金矿)或直接(如海底喷流沉积矿床)与岩浆活动有关。由此可见,岩浆活动可能与内生金属成矿作用存在某种必然的联系,问题在于如何揭示这种联系以及如何利用这种联系为找矿实践服务。

近年来,小岩体与大规模成矿作用的关系问题重新得到重视。早在 20 世纪 70 年代,矿床学家就已经发现大型、超大型矿床往往与小岩体紧密共生。例如,河南省秦岭-大别山地区燕山期中酸性小岩体广泛分布,单个岩体出露面积一般小于 2 km^2 ,最小不足 0.01 km^2 ,矿化岩体一般为 $0.5\sim 1\text{ km}^2$ (卢欣祥,1985)。然而,成矿作用为什么与小岩体有关的问题并没有得到阐明。因此,尽管小岩体与大规模成矿作用紧密相关已是众所周知的事实,长期以来人们不再谈起这个问题。汤中立(2002)和汤中立等(2006)重新强调了小岩

体的找矿意义，并按成矿机制的不同划分出两类与成矿作用有关的小岩体和9种成矿类型：镁铁质-超镁铁质小岩体为深部熔离-贯入成矿机制（3种类型：深熔-复式贯入、深熔-脉冲式贯入、深熔-单式贯入）；中酸性岩是头部气、液、矿质聚集成矿机制（6种类型：前锋式小岩体、斑岩小岩体、矽卡岩-斑岩小岩体、复式斑岩小岩体、单式小岩体、复式小岩体）。但是，也必须看到，仍有大量小岩体没有被发现与成矿作用有关。因此，一些学者对含矿岩体与非含矿岩体进行了对比研究，提出了识别含矿岩体的岩石学、矿物学和地球化学标志（杨殿范等，1994；杨荣勇等，1996）。然而，西藏冲江铜矿含矿岩体与非含矿岩体对比分析表明，矿区含矿岩体与非含矿岩体的岩性相同，很难通过肉眼或常规分析方法把它们区分开来（刘波等，2004）。看来，小岩体的成矿属性还取决于其他因素，需要进一步研究。

二、成矿作用发生在混沌边缘

於崇文（1999a, 1999b）将复杂性科学与矿床学相结合，从成矿动力学的角度深刻揭示了成矿物质大规模堆积的原理，提出大型矿床和成矿区带发生在混沌边缘。该理论的阐述涉及大量的数理方程，因而至今尚未得到普及。罗照华等（2004, 2006a, 2007a）将混沌边缘理解为物理化学边界层，可能有助于对该理论的理解。例如，当含矿流体通过膏盐层等含有丰富可交换离子的岩层时，可以极大地改变流体的化学性质和成矿金属溶解度，从而导致造矿矿物的沉淀，这类岩层可称为化学边界层；当含矿流体流经断裂构造膨大部位或注入喀斯特溶洞时，流速的减小也有利于成矿物质的堆积，这些位置可称为物理边界层。按照这种理解，混沌边缘成矿理论实际上是对前人观察结果的高度概括与提高，其中许多成矿事实已经得到前人的强调。但是，混沌边缘成矿理论具有更强的普适性，在实际应用中具有更大的发挥空间。

例如，基于混沌边缘成矿理论，可以容易理解青藏高原新生代成矿作用为什么发生在冈底斯带和滇西地区（罗照华等，2004, 2006a）。地质与地球物理证据表明，藏北高原是一个热异常区（Huang et al., 2000）、幔源气体逸出异常区（Hoke et al., 2000）。异常区的范围不受古构造边界的限制，暗示现今青藏高原下面的深部过程而不是表层构造控制了这种异常区的分布，这与大地电磁测深研究结果（Wei et al., 2001；Unsworth et al., 2005）相吻合。因此，异常区的产生可以认为是深部流体流的浅部响应。假定这种流体流上升到一定高度后放射状展开，必然会与高原周边的地质体相遇。众所周知，雅鲁藏布江缝合带是印度板块向亚洲大陆俯冲的构造边界，川西—滇西一带可以看做是青藏高原向扬子克拉通仰冲的边界，来自藏北高原的深部热流体必然在这些部位受到冷却，并沿着有利的通道上升成矿。由此可见，冈底斯带和川西—滇西一带是含矿流体运动状态强烈改变的地带，应当有利于大规模成矿作用。与此相反，青藏高原与北部地块间为对接关系，流体运动的物理参数将不会出现强烈改变，不利于成矿作用的发生。

对于上述小岩体与成矿作用的关系问题，由于小岩体往往侵位较浅，岩浆体的快速冷却也许是另一类混沌边缘条件。从这个角度来说，应用混沌边缘成矿理论有可能揭示“小岩体成大矿”的深层原因（罗照华等，2008a）。

三、成矿系统或成矿系列

早在1979年，程裕淇等就指出：在相当长的一段时间内，地质工作者更多地注意单

个矿床形成条件的具体研究，再根据不同矿床各自的形成条件进行分类命名，提出整个矿床的分类；这种研究方法对成矿作用的物理、化学条件重视有余，而对地质因素考虑不足，因而对不同矿床类型之间的内在联系缺乏认识。程裕淇等（1979）提出：不同地区、不同成矿期但具有相似的地质背景时，可大致重复出现相同的成矿系列。因此，成矿系列强调了不同类型成矿作用的内在联系，系指由有成因联系的矿床所组成的自然体（陈毓川等，1998，2006）。翟裕生（1999）和翟裕生等（1999a）进一步将所有与成矿作用有关的因素结合在一起，系统阐述了成矿系统的概念：成矿系统是指在一定地质时-空域中，控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用过程，以及所形成的矿床系列和异常系列构成的整体，它是具有成矿功能的一个自然系统。总体上看，成矿系列和成矿系统的概念有某些相似之处，强调了同一地球动力学系统在不同边界条件下的成矿表现及其产物的有机联系，并可以在不同的地质时期重现。这种思想可以归结为“矿床在混沌边缘分形生长”（於崇文，2003，2006），因而成矿系统具有嵌套分形结构，岩石孔隙结构的传输性质制约着聚矿功能的实现（邓军等，2000，2005）。

可见，成矿系统和成矿系列更注重不同成矿作用的必然联系，这种思想有利于区域成矿预测。由于地球科学研究对象的时空不可及性，实际观察过程中难免缺失某些地质证据，利用成矿系统和成矿系列的概念，可以有效组织所获取的零散地质证据，指导发现某些“隐性”地质证据，从而指导区域成矿预测。

四、深部流体成矿作用

与岩浆相关的矿床都存在强烈的围岩蚀变，不发育蚀变的岩石缺乏成矿潜力，围岩蚀变总是表现为含水（挥发分，下同）矿物交代无水（挥发分，下同）矿物，成矿金属元素 i 在晶体-熔体或熔体-流体之间的分配系数 $D_i^{\text{crystal/melt}}$ 或 $D_i^{\text{melt/fluid}}$ 很小，这样的证据链表明成矿作用首先与含矿流体有关，或者说成矿作用的基本解是成矿物质从含矿流体中析出（罗照华等，2008a）。正因为如此，成矿流体成为矿床学家长期关注的研究对象（杜乐天，1988；毛景文等，2005；刘斌，2008）。接下来，成矿流体的来源就成了一个关键问题。

据研究，几乎在所有的上地幔环境下形成的矿物中均找到了流体包裹体（朱永峰，1998），暗示地球深部确有大量流体存在。根据流体包裹体的研究结果，深部流体的成分可能主要是 H_2O ， CO_2 ， CH_4 及少量 H_2 ， N_2 等，杜乐天（1988）将其称为幔汁。由于测试技术的进步和不断的新发现，深部流体被赋予了越来越重要的作用。杜乐天长期从事深部流体方面的理论研究，提出“可以用地球排气作用作为一条统纲，把原来分散的地球科学各个分支学科和谐地串联成为一个整体地球科学巨系统”（杜乐天，2000），并指出了地球排气作用在油气资源、自然灾害成因、地球动力学、成岩成矿作用等方面的意义（杜乐天，1993，1996，1998，2000，2005）。

毛景文等（2005）以中国东部中生代成矿作用为例，比较全面地阐述了地幔流体及其成矿系统研究的现状，认为在地幔柱区、大陆裂谷区、大陆减薄区（或伸展带）和深大断裂及其次一级断裂（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；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，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；华北克拉通及邻区在 120 Ma 左右出现的大规模深部流体成金矿事件与岩石圈快速减薄和