

华南陆块陆内成矿作用

胡瑞忠 毛景文 华仁民 范蔚茗 等 著



科学出版社

华南陆块陆内成矿作用

胡瑞忠 毛景文 华仁民 范蔚茗 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要是国家 973 项目“华南陆块陆内成矿作用：背景与过程”(2007~2011)的研究成果。重点论述了由华夏地块和扬子地块组成的华南陆块内三个成矿系统——古生代峨眉地幔柱成矿系统、中生代大花岗岩省成矿系统和中生代大面积低温成矿系统的成矿年代格架及其与主要地质事件的关系；大面积低温成矿系统与大花岗岩省成矿系统在成矿动力学背景上的可能联系；这些成矿系统中一些主要矿种 U、Au-Sb、Pb-Zn、V-Ti-Te、Cu-Ni、W、Sn 等典型矿床的成矿过程和主要控制因素，以及覆盖区战略靶区预测和矿床深部找矿预测理论和方法。

本书可供从事矿床学、矿床地球化学、找矿勘查研究和应用的科研人员和学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

华南陆块陆内成矿作用/胡瑞忠等著. —北京：科学出版社，2015.3

ISBN 978-7-03-042984-1

I. ①华… II. ①胡… III. ①成矿区-成矿作用-研究-中国 IV. ①P617.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 310259 号

责任编辑：王 运 韩 鹏 李 静 / 责任校对：赵桂芬 张小霞 韩 杨

责任印制：肖 兴 / 封面设计：黄华斌 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 3 月第 一 版 开本：889×1194 1/16

2015 年 3 月第一次印刷 印张：57

字数：1 756 000

定价：548.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

针对我国矿产资源严重短缺的严峻形势,国务院 2006 年颁发了《关于加强地质工作的决定》,强调要“突出重点矿种和重点成矿区带的地质问题研究,大力推进成矿理论、找矿方法和勘查开发关键技术的自主创新”。因此,通过成矿理论和找矿技术方法的创新,为发现新的矿产资源基地提供科学依据,是我国地质工作者一项迫在眉睫的重大任务。

陆内成矿作用指发生在大陆板块内部而非大陆板块边缘、由大陆板块内部动力学过程(地幔柱活动、陆内造山、陆内岩石圈伸展等)而诱导的成矿作用,是当今成矿研究的热点问题。华南陆块由扬子地块和华夏地块组成,是全球罕见的世界级多金属成矿省,找矿潜力巨大。截至目前,在华南陆块探明的钨、锡、铋、铊储量居世界第一,铜、钼、钛、汞以及铌、钽等稀有金属储量居全国第一,铀、铅、锌、金、银、铂族元素等矿种的储量也名列全国前茅。与大陆板块边缘发生的成矿作用不同,华南陆块经历了很有特色的陆内大陆动力学过程,先后发生了多期次陆内大规模成矿作用,包括晚古生代地幔柱成矿系统、中生代大花岗岩省成矿系统、中生代大面积低温成矿系统等,在全球极具特色,是开展陆内成矿作用研究的理想场所。建立该区陆内演化阶段的成矿理论,发展适合该区景观和地质条件的找矿技术方法,不仅对丰富和发展大陆动力学与成矿关系的理论体系具有重要意义,同时也是该区实现找矿新突破的重要基础。

基于这种背景,在国家科技部的支持下,我们于 2007~2011 年实施了题为“华南陆块陆内成矿作用:背景与过程”的国家 973 项目(2007CB411400),项目依托部门为中国科学院和国土资源部,主持单位为中国科学院地球化学研究所,胡瑞忠担任项目首席科学家,主要承担单位包括中国科学院地球化学研究所、中国地质科学院矿产资源研究所、中国科学院广州地球化学研究所、南京大学、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所、中国科学院地质与地球物理研究所、中国地质科学院地质研究所、江西有色地质勘查局和中山大学。项目以上述三个成矿系统为研究对象,以华南陆块具有巨大资源潜力的 W、Sn、Sb、Cu、Ni、贵金属、U、Pb、Zn、V、Ti、Fe 等为主要研究矿种,项目设置 8 个课题,希望解决陆内成矿作用对壳幔相互作用的响应机制、各成矿系统巨量金属聚集过程和主要控制因素、成矿模式支持的找矿模型及深部矿化信息识别等关键问题。

项目执行期间先后有 100 多位科技人员参与研究工作,其中 54 位科研骨干承担科研任务。这部专著是该项目的综合研究成果,全书包括绪论、正文以及问题与展望三个部分,正文共 4 篇 22 章。其中,绪论由胡瑞忠执笔,第一章由王岳军、范蔚茗执笔,第二章由李献华、范蔚茗、王岳军、李武显执笔,第三章由谢桂青、周涛发、段超、毛景文执笔,第四章由周涛发、范裕、谢桂青、袁峰、段超、毛景文执笔,第五章由华仁民、韦星林、毕献武、李光来、王定生、张文兰、翟伟、郭家松执笔,第六章由毕献武、尚林波、双燕、胡晓燕、李鸿莉、胡瑞忠执笔,第七章由胡瑞忠、陈培荣、陈卫峰、陈佑纬执笔,第八章由胡瑞忠、黄智龙、苏文超、温汉捷、符亚洲、刘燊、梁华英、陈广浩执笔,第九章由黄智龙、周家喜、金中国、陈进、王锋、韩润生、苏文超、温汉捷、罗大锋、李晓彪、冯志宏、张伦尉、曾道国、陈大执笔,第十章由苏文超、胡瑞忠、沈能平、张兴春、张弘毅、夏勇、刘玉平、刘建中、刘燊、黄智龙执笔,第十一章由黄智龙、肖宪国、丁伟、苏文超、金中国、彭建堂、温汉捷、符亚洲、王加昇、沈能平、周家喜执笔,第十二章由何斌、徐义刚执笔,第十三章由钟宏、周美夫、宋谢炎、漆亮执笔,第十四章由宋谢炎、陶琰、官建祥执笔,第十五章由钟宏、周美夫、宋谢炎、柏中杰、彭君能执笔,第十六章由钟宏、朱维光、柏中杰执笔,第十七章由朱笑青、张正伟执笔,第十八章由陈懋宏、章伟、刘珺、

叶会寿执笔，第十九章由姚佛军、杨建民、耿新霞执笔，第二十章由王学求、张必敏、姚文生执笔，第二十一章由王学求、徐善法执笔，第二十二章由邵拥军、彭省临、谢桂青、赵海杰执笔，问题与展望由胡瑞忠执笔。全部内容最后由胡瑞忠、毕献武和华仁民统编定稿。在本项目立项、实施过程中，曾得到涂光炽、陈毓川、翟裕生、裴荣富、李廷栋、孙鸿烈、欧阳自远、刘丛强、莫宣学、李曙光、翟明国、郑永飞、王德滋、常印佛、汤中立等院士和马福臣、赵振华、许东禹、顾连兴、郭进义等先生的指导、支持和帮助；项目的野外考察工作得到相关地勘单位领导和许多地质同行的支持和配合；科技部基础司、科技部基础研究管理中心、中国科学院资环局和基础局、国土资源部国际合作与科技司、中国科学院地球化学研究所等部门和单位的领导对项目的立项和实施给予了鼎力支持和帮助；项目组成员密切合作为本项任务的完成做出了重要贡献。在此，一并向他们表示衷心的感谢！

值得指出的是，虽然华南陆块的上述三个成矿系统总体具有陆内成矿特征，但对大花岗岩省和大面积低温成矿系统而言，则很难完全排除其未受大陆边缘过程的影响，它们最可能是陆内为主共同作用的结果。此外，由于华南陆块成矿作用的复杂性，很多问题很难在短时期内得到解决。加之作者水平有限，文中不妥之处在所难免，一些提法和观点可能还需要进一步推敲和完善。敬请读者批评指正。

胡瑞忠

2014年11月16日

目 录

前言	
绪论	1
第一节 为什么要开展华南陆块陆内成矿作用研究	1
第二节 立项时成矿作用的国内外研究现状	2
第三节 主要研究进展	13
参考文献	21

第一篇 花岗岩成矿系统

第一章 华南印支期变形样式及其时序	31
第一节 华南内部主要断裂及沉积记录	32
第二节 北缘江南隆起及两侧的结构构造	33
第三节 中部雪峰构造带的推覆构造	39
第四节 南缘云开-海南变形样式及热年代学结构	46
第二章 中生代岩浆作用时空格局与岩石成因	66
第一节 印支期花岗岩时空格局与岩石成因	66
第二节 燕山期花岗岩浆成因与成矿年代学	76
第三节 基性岩浆源区的时空演化	100
第四节 中生代动力学模式的思考	112
第三章 长江中下游隆起区斑岩-夕卡岩铜多金属成矿系统	117
第一节 区域地质背景	118
第二节 成岩成矿时代	119
第三节 铜陵矿集区的区域成矿模型	121
第四节 鄂东南矿集区的区域成矿模型	135
第四章 长江中下游凹陷区与火山-侵入岩有关的铁多金属成矿系统	171
第一节 火山岩盆地岩浆岩年代学	171
第二节 次火山岩年代学	185
第三节 成矿年代学	190
第四节 区域成矿模型	197
第五节 长江中下游成矿动力学模型	223
第五章 与改造型花岗岩有关的钨多金属成矿系统	230
第一节 华南改造型含钨花岗岩特征	230
第二节 赣南钨矿若干新矿化类型研究	251
第三节 南岭与花岗岩有关的钨、锡、稀土成矿作用差异	268
第六章 华南与 A 型花岗岩有关的锡多金属成矿系统	281
第一节 与锡成矿有关的 A 型花岗岩——以骑田岭花岗岩为例	281

第二节 芙蓉锡矿成矿作用·····	292
第三节 岩浆演化过程中锡和挥发组分的地球化学行为·····	307
第七章 华南热液铀成矿系统·····	317
第一节 华南印支期产铀花岗岩·····	317
第二节 印支期产铀与非产铀花岗岩的黑云母矿物化学差异·····	327
第三节 华南白垩纪—古近纪铀成矿作用·····	334
参考文献·····	356

第二篇 华南大面积低温成矿系统

第八章 研究背景及主要进展·····	387
第一节 研究背景·····	387
第二节 主要进展·····	388
第九章 川滇黔相邻铅锌矿集区典型矿床成矿作用·····	400
第一节 区域地质·····	400
第二节 矿床地质·····	407
第三节 矿床地球化学·····	428
第四节 成矿背景及过程·····	455
第十章 黔西南卡林型金矿热液化学及其成矿作用·····	474
第一节 区域地质背景·····	474
第二节 典型矿床地质特征·····	484
第三节 含金硫化物矿物学与地球化学·····	494
第四节 热液化学及其演化规律·····	506
第五节 成矿过程和预测标志·····	520
第十一章 华南锑矿带半坡锑矿床成矿作用·····	529
第一节 成矿地质背景·····	529
第二节 矿床地质·····	539
第三节 矿床地球化学·····	551
第四节 成矿过程及成矿模式·····	579
参考文献·····	592

第三篇 峨眉地幔柱成矿系统

第十二章 峨眉大火成岩省概况·····	607
第一节 峨眉大火成岩省空间位置及构成·····	607
第二节 峨眉地幔柱活动的证据及构造环境效应·····	607
第十三章 地幔柱时限, 岩浆起源、演化及成矿系列·····	615
第一节 峨眉地幔柱岩浆活动的时限·····	615
第二节 峨眉山玄武岩岩浆系列、起源及其地幔源区特点·····	615
第三节 成矿序列及其与岩浆系列的关系·····	622
第十四章 岩浆硫化物矿床类型及成因·····	625
第一节 峨眉大火成岩省岩浆硫化物矿床类型及典型矿床·····	625

第二节 不同类型岩浆硫化物矿床特征的地球化学特征	629
第三节 矿床成因模式及成矿的关键因素	632
第四节 找矿标志	636
第十五章 钽铌磁铁矿矿床及相关矿床成因	646
第一节 峨眉大火成岩省钽铌磁铁矿矿床的分布及研究现状	646
第二节 典型矿床成因：攀枝花、红格、新街	648
第三节 钽铌磁铁矿矿床的岩浆来源和岩浆通道模型	681
第十六章 花岗岩及 Nb-Ta-Zr- (REE) 矿床	685
第一节 花岗岩的成因	685
第二节 镁铁质和长英质岩体的成因联系	689
第三节 热传递及大陆地壳增生或重建的指示	693
第四节 Nb-Ta-Zr- (REE) 矿床 (点) 的基本特征及其成因	694
第十七章 找矿潜力评价	696
第一节 自然铜矿化及找矿潜力	696
第二节 宣威组 REE、Y 和 Ga 富集	707
参考文献	716

第四篇 找矿预测技术和战略靶区预测

第十八章 矿床构造与找矿预测	733
第一节 石英脉型钨矿——以江西省浒坑钨矿为例	733
第二节 卡林型金矿——以广西林旺金矿为例	750
第十九章 植被覆盖区含矿信息遥感识别技术研究	762
第一节 植被覆盖区采用的植被抑制方法	762
第二节 蚀变遥感异常提取方法	770
第三节 植被覆盖区矿产资源遥感预测	781
第二十章 深穿透地球化学机理与技术	787
第一节 深穿透地球化学机理研究	787
第二节 深穿透地球化学方法技术研究	794
第二十一章 覆盖区找矿战略靶区预测	811
第一节 大型矿床地球化学标志	811
第二节 大型矿预测	823
第二十二章 地球物理探测	838
第一节 深部矿体地球物理方法对比——以铜山为例	838
第二节 夕卡岩铜铁矿深部地球物理方法——以湖北铜绿山为例	870
第三节 石英型钨矿地球物理方法——以江西省浒坑钨矿为例	888
参考文献	896
问题与展望	902

绪 论

我国经济的高速发展对矿产资源的需求与日俱增,但是我国矿产资源的供给形势十分严峻,Fe、Cu、Al 等主要矿产非常紧缺,对外依存度高达 50% 以上。矿产资源短缺不仅已成为制约我国经济发展的大瓶颈,而且严重影响到国家安全和社会稳定。面对严峻的矿产资源形势,国务院于 2006 年颁布了《关于加强地质工作的决定》,强调要“积极开展重大地质问题科技攻关,突出重点矿种和重点成矿区带的地质问题研究,大力推进成矿理论、找矿方法和勘查开发关键技术的自主创新”。因此,通过成矿理论和找矿技术的创新,为发现一批新的矿产资源基地提供坚实依据,是我国地学工作者一项迫在眉睫的重大任务。基于这种形势,我们于 2007~2011 年实施了名为“华南陆块陆内成矿作用:背景与过程”的国家 973 项目。

陆内成矿作用指的是发生在大陆板块内部而非大陆板块边缘,主要由陆内大陆动力学过程诱导的成矿作用,包括地幔柱活动、陆内造山、陆内岩石圈大规模伸展、陆内岩石圈拆层和幔源岩浆底侵等地质事件导致的成矿作用。相对于大陆板块边缘的成矿作用,对陆内成矿作用发生机制的认识还较模糊。本书主要是对这一阶段研究成果的总结和提升。在论述我们取得的主要进展前,先回顾一下当时我们为什么要做这样一件事情以及当时该方向的研究现状。

第一节 为什么要开展华南陆块陆内成矿作用研究

华南陆块地处欧亚大陆东南部,濒临西太平洋,由扬子地块和华夏地块在新元古代时期碰撞拼贴而形成,其北面和西面分别与秦岭-大别造山带和青藏高原接壤。华南陆块是全球罕见的世界级多金属成矿省,其中探明的钨、锡、锑、铋储量居世界第一,铜、铀、钒、钛、汞以及铌、钽等稀有金属储量居全国第一,铅、锌、金、银、铂族元素等矿种的储量也名列全国前茅。全球的找矿实践一再证明,矿产资源在地球上的分布极不均一,在矿产集中的成矿省找矿往往事半功倍。虽然在华南陆块以往已发现上述大量矿床,但是由于华南陆块红土和植被覆盖区广泛分布,还存在较多找矿盲区;此外,华南陆块已有矿床的勘探深度(通常在 500m 以内)远小于国外矿业大国,在深部“第二找矿空间”应大有作为。因此,华南陆块仍有巨大找矿潜力。加上华南陆块总体地处我国经济发达区,资源利用价值远高于相对落后的西部地区。因此,华南陆块的找矿勘查工作一直受到国家的高度重视。基于华南陆块矿产资源找矿勘查工作实际,该区进一步找矿主要应表现为两个层次:其一是未知区新的找矿战略靶区的圈定,其二是在已知大型矿集区尤其是资源危机矿山的深部和外围发现新的矿床。为降低找矿成本,提高找矿效率,这两种层次的找矿勘查工作都急需新的成矿理论和找矿技术方法的指导。

与大陆板块边缘碰撞造山带发生的成矿作用有所不同,华南陆块的形成和演化,受到了很有特色的陆内大陆动力学过程的影响,大陆板块内部发生了强烈的壳幔相互作用,陆内大规模成矿作用较为明显,表现为:①华南陆块西部发育由玄武岩及镁铁-超镁铁质侵入岩组成的峨眉山大火成岩省,是晚古生代大陆地幔柱活动的产物,面积约 50 万 km^2 ,其成矿作用的多样性在全球的大火成岩省中独一无二;②华南陆块的东部发育东西宽约 1000km、面积约 100 万 km^2 的大花岗岩省,它们主要是中生代陆内强烈壳幔相互作用的产物并伴随多金属的爆发式成矿,如此大面积的花岗岩省和相应的多金属爆发式成矿全球罕见;③华南陆块西南部发育有中生代大面积低温成矿域,其面积之大、包含的矿种之多、矿床组成和组合之复杂,在全球十分鲜见。这些陆内大规模成矿作用,形成了华南陆块内的绝大多数矿床,分别构成了在全球背景中很具特色的晚古生代地幔柱成矿系统、中生代大花岗岩省成矿系统和中生代大面积低温成矿

系统等三大陆内成矿系统,从而奠定了华南陆块作为全球从事陆内成矿作用研究理想基地的重要地位。

第二节 立项时成矿作用的国内外研究现状

1. 大陆动力学与成矿关系的研究成为新的研究热点

20 世纪 70 年代以来,主要基于对洋壳的研究而建立的板块构造理论,引发了地球科学的一场革命,导致洋壳以及洋-陆相互作用的动力学研究取得了长足进展。但由于板块构造学说强调水平运动忽视了垂直运动,强调地幔对流忽视了地球不同层圈之间的相互作用,强调板块边缘忽视了板块内部,所以当它面临除了古洋陆转化以外的其他与大陆形成演化有关的问题时,也与以前其他地学假说一样显得无能为力。所以,探索大陆内部非威尔逊板块构造旋回的地质作用特征和成因机制,使地球科学更好地为人类社会的发展服务,也就成为地质学家们当今面临的巨大挑战和机遇(肖庆辉,1996;李锦轶和肖序常,1998;丁国瑜,1999;刘宝珺和李廷栋,2001;张国伟等,2002;滕吉文,2002)。为此,美国制订了自 1990 年起历时 30 年的“大陆动力学计划”,试图解决板块构造在大陆的局限性,以进一步补充、完善和发展板块构造学说,建立大陆动力学理论体系。

板块构造理论的诞生导致了成矿理论研究的一次重大飞跃,促进了对板块边缘成矿体系和成矿机制认识的深刻变革。基于威尔逊板块构造演化旋回,20 世纪 80 年代初 Mitchell 和 Garson (1981) 和 Sawkins (1984) 分别出版了《矿床与全球构造环境》和《金属矿床与板块构造》两部专著,较全面地论述了板块构造与成矿的关系,奠定了现代地球动力学演化与成矿关系的基础。然而,与用板块构造理论解释大陆形成与演化的一些复杂性和特殊性问题时所面临的局限性一样,板块构造理论在解释大陆成矿现象方面也遇到了一系列重大难题和挑战,该理论提供了解释大陆古板块边缘演化过程中成矿问题的理论框架,但对解释板块碰撞后陆内演化阶段的成矿作用,尤其是成矿作用的动力来源、不同类型矿床在成因机制上的关联性问题则尚无现成答案。在这种背景下,大陆动力学与成矿关系的研究也就成了当今地学和成矿学研究的前沿,引起了国际上的极大关注。为此,澳大利亚于 1993 年成立了地球动力学研究中心,实施了地球动力学与成矿作用研究计划;欧盟科学基金会 1998~2003 年设立了由 14 个国家参与的地球动力学与矿床演化重大项目;国际矿床学界开展了岩石圈过程与巨量金属堆积的对比研究;美国地质调查局则把地壳结构与成矿的关系列为重大研究计划予以重点支持。这些研究计划或项目的设立,大都旨在理解大陆演化的动力学及其与成矿元素巨量富集形成矿床的关系,从而为新一轮矿产资源勘查和评价提供理论基础。纵观大陆动力学与成矿关系的相关研究,可以发现以下主要发展趋势:

1) 在成矿机制上,将成矿作用研究与壳幔相互作用研究密切结合

地球各圈层相互作用尤其是壳幔相互作用,是大陆动力学研究的核心之一。研究表明,地壳与地幔之间存在强烈而多样的物质和能量交换形式,而且这种交换是双向的,即不仅有地幔部分熔融物质通过底侵作用和地幔柱活动等方式加入地壳,而且地壳物质可以在汇聚板块边缘通过俯冲作用,以及在岩石圈增厚区域通过拆沉作用返回地幔,结果引起大陆增生和地幔的不均一性。上述各种形式的壳幔相互作用,导致不同圈层的物质和能量发生跨圈层的迁移和再分配,从而从宏观上控制了一个大区域优势矿种和矿床类型的形成与分布。

国内外学者对壳幔相互作用与成矿的关系进行了有益的探讨,发现壳幔相互作用在许多大型-超大型矿床和矿集区的形成中具有重要意义,认为壳幔相互作用是诱发成矿系统中各种地质作用的主要原因之一,是决定成矿系统物质组成、时空结构和各类矿床有序组合的重要因素。

A. 洋壳俯冲过程的壳幔相互作用与成矿

大陆边缘板块俯冲带或碰撞造山带是壳幔相互作用最复杂的地区之一。俯冲带复杂的、丰富多彩的壳幔相互作用产生了多种岩浆岩和不同的岩浆岩组合,也带来了丰富的成矿物质并形成了众多大型-超大型矿床。Sillitoe (1972) 首先提出斑岩铜矿形成于板块俯冲带的大陆边缘, Mitchell (1973) 提出大洋板块

俯冲的角度对斑岩铜矿的形成及其物质组成具有明显的制约。更多的研究进一步表明,大洋板块以正常速度和中等角度俯冲时,由板片脱水诱导上覆地幔楔部分熔融而形成的钙碱性岩浆系统,只能产生小规模斑岩铜矿化和浅成低温热液金矿化(Sillitoe, 1988);大洋板块以低角度斜向快速俯冲时,将导致俯冲洋壳板片部分熔融形成埃达克质熔体,这些熔体在相对封闭的系统中演化可发育成规模巨大的斑岩铜矿成矿系统(Oyarzun et al., 2001);而大洋板块在俯冲过程中一旦被撕裂或断离,软流圈物质将直接进入上覆楔形区,导致地幔(含洋壳)和下地壳物质同熔成花岗质岩浆,然后上侵到地壳浅层形成岩岩及其有关的斑岩铜矿和浅成低温热液铜金矿床,甚至在剪切带中形成中温石英脉型金矿床(Corbett and Leach, 1998; Kerrich et al., 2000; Sillitoe et al., 2003)。

B. 岩石圈拆沉和幔源岩浆底侵过程的壳幔相互作用与成矿

幔源岩浆底侵作用是指高温(1200~1300℃)幔源玄武质岩浆侵入位于地壳底部,并使局部上覆地壳物质发生部分熔融而产生花岗质岩浆的地质作用(章邦桐等, 2005)。有人认为,幔源岩浆底侵作用是除板块作用引起的大陆岛弧侧向增生以外的另外一种重要的陆壳生长方式——陆壳从下部生长,使陆壳加厚,引起陆壳的垂向增生(Rudinck, 1990)。拆沉作用与底侵作用相反,指的是大陆下地壳或岩石圈上地幔的物质在一定条件下“下沉”从而通常使岩石圈减薄的过程。底侵作用引起陆壳不断加厚会导致拆沉作用的发生,而拆沉作用引起岩石圈减薄会导致软流圈上涌(路凤香等, 2006),软流圈上涌造成减压熔融又会导致底侵作用的发生。因此,底侵和拆沉作用具有一定的相互联系,它们一起构成了壳幔的物质循环,导致了壳幔的物质能量交换和结构特征的变化。

已有一些研究表明,底侵和拆沉作用作为壳幔相互作用的重要方式和大陆动力学演化的主要动力之一,对诱发成矿作用可能起到了重要作用。Sazonov等(2001)对俄罗斯乌拉尔山脉大量脉型金矿床时空分布特征及其与岩石圈演化的关系进行了系统研究,发现这些金矿床主要形成于二叠纪—三叠纪早期的伸展背景,晚于造山期,它们的形成可能与造山带下部大范围的岩石圈拆沉、软流圈上涌、玄武质岩浆底侵而派生的花岗质岩浆活动有关。我国华北克拉通周缘的胶东金矿区(Chen et al., 1999)、东坪金矿区(Miao et al., 2002)以及长江中下游的铜陵矿集区(Du et al., 2004)和沙溪矿集区(王强等, 2001)的成矿时代约为120~140Ma,被分别认为是幔源岩浆底侵产生的花岗岩浆活动控制了这些矿床的形成。而中国东部晚中生代的岩石圈拆沉、减薄则可能控制了底侵作用以及相应的花岗质岩浆活动和成矿作用的发生(吴福元等, 2003; Gao et al., 2004; 毛景文等, 2005a)。

C. 地幔柱活动过程的壳幔相互作用与成矿

地幔柱沟通了地核、地幔、地壳各个圈层之间的物质与能量交换,是板内构造岩浆活动及成矿作用的一种重要动力学机制。地幔柱活动作为板内演化的一种重要的地球动力学机制,得到了地质、地球化学、地球物理等众多证据的支持。

地幔柱以大规模幔源岩浆活动为突出表现,成矿作用也以幔源岩浆矿床为主,成矿元素主要包括Cu、Ni、PGE、Fe、Ti、V、Cr等,可形成具有重大经济价值的岩浆Cu-Ni-PGE硫化物矿床和V-Ti磁铁矿矿床等。这些矿床的形成与壳幔相互作用具有极大的关系。已有研究表明,来源于地壳的硫大量进入地幔柱岩浆系统是形成Cu-Ni-PGE矿床的重要条件(Naldrett, 2004);地幔熔融程度和幔源岩浆对地壳物质的同化混染程度,可能在一定程度上控制了产Cu-Ni-PGE矿床之岩浆系统中Cu、Ni、PGE的分配,以及V-Ti磁铁矿矿床的形成(Cawthorn, 1996)。此外,地幔柱活动还可通过地幔热流的上升诱发地壳重熔以及各种地壳浅部的地质响应,形成热液矿床。一些研究人员认为,像Kidd Creek块状硫化物矿床、甚至Olympic Dam矿床等世界级超大型矿床的形成,可能与地幔柱活动的这种热效应有关(Ernst and Buchan, 2003)。

2) 在成矿时代上,成矿作用与重大地质事件的内在关联受到高度重视

成矿作用需要驱动力。大量研究证明许多大规模的成矿作用往往与全球或区域性重大地质事件密切相关。例如,晚震旦—早寒武纪的生物大爆发与世界范围大量磷块岩的形成存在耦合关系,暗色岩的成矿与地幔柱事件关系密切(Lightfoot et al., 1993, 1994; Naldrett, 2004; Song et al., 2006a, b),斑岩型铜

矿的形成与板块俯冲派生的岩浆活动有关 (Cooke et al., 2005; Blundell et al., 2005; Singer et al., 2005), 加拿大 Sudbury 铜镍大规模富集成矿可能与陨石撞击有联系 (Therriault et al., 2002; Keays and Lightfoot, 2004; Giroux et al., 2005; Lightfoot and Zotov, 2005; Zieg and Marsh, 2005; Elsilä et al., 2005)。重大地质事件, 包括板块的俯冲碰撞或裂解、地幔柱活动、岩石圈拆沉和幔源岩浆底侵、岩石圈伸展、大型陨石撞击等。不同的重大地质事件导致不同性质的沉积作用、变质作用、岩浆活动和热液循环, 引起元素在地壳, 甚至壳幔圈层间发生大规模的运移、分异和重新分配, 从而导致一些有用元素局部富集并形成矿床。与板块俯冲和洋中脊扩张有关矿床的研究, 不但成为长达近半个世纪的研究热点, 也成为成矿新理论的“孵化器”和找矿突破的原始推动力; 我国青藏高原新生代包括斑岩铜矿在内的有关矿床的发现和成矿作用的研究, 以及秦岭造山带和中亚造山带相关成矿作用的研究, 正推动着造山带成矿理论研究的进步 (Chen et al., 2000, 2004; Chung et al., 2003; Hou et al., 2004, 2006a, b; Gao et al., 2007; 张国伟等, 2001; 陈衍景, 2006; 王京彬等, 2006); 通过对地幔柱大规模玄武岩浆起源—演化—硫化物熔离的研究, 初步揭示了俄罗斯 Nioril'sk 铜、镍、铂族元素超常富集之谜, 认为是在岩浆通道内岩浆不断地留下硫化物熔体使硫化物富集而形成超大型矿床, 为这类矿床的寻找指明了方向 (Lightfoot et al., 1993; Naldrett, 1999); 中国东部中生代岩石圈拆沉减薄和幔源岩浆底侵作用及其与大规模花岗岩浆活动和成矿作用相互关系的研究, 掀开了中国东部地质矿产研究的新篇章 (毛景文等, 2003, 2005; 胡瑞忠等, 2004a, 2007)。随着高精度定年技术的不断进步, 一些准确的成矿年龄数据表明, 特定成矿域或成矿系统大规模的成矿作用往往发生在相对短的时间而具有“爆发性”, 并与区域重大地质事件具有密切的时空耦合关系 (毛景文等, 2000, 2003; 胡瑞忠等, 2004a, 2007)。深入剖析这种内在联系, 精细刻画重大地质事件如何促使成矿物质大规模活化—迁移—聚集—成矿, 正确认识区域成矿规律, 从而为找矿预测提供理论依据, 已成为矿床学研究的重要发展方向。

3) 在成矿区域上, 除继续重视板块边缘成矿作用的研究外, 大陆内部的成矿作用成了新的研究热点

大量研究证明, 板块边界是成矿作用异常活跃的区域; 板块的扩张-离散边界和汇聚-消减边界具有完全不同的构造环境和动力学特征, 所导致的成岩和成矿作用也各具鲜明的“专属性”。例如, 在板块的扩张-离散边界 (洋中脊) 主要形成块状硫化物矿床等 (Degens and Ross, 1969; Shanks and Bischoff, 1977), 而在板块的汇聚-消减边界 (俯冲大陆边缘和造山带) 则主要形成斑岩铜矿、浅成低温热液型铜金矿、造山型金矿和其他与花岗岩浆活动有关的矿床等 (Sillitoe, 1972; Groves et al., 1998; James and Sacks, 1999; Goldfarb et al., 1998, 2001; Kerrich et al., 2000; Sillitoe et al., 2003; Behn et al., 2001; Hou et al., 2004, 2006a, b)。毫无疑问, 板块构造理论极大地推动了矿床学理论和找矿工作模式的深刻变革。

20 世纪 90 年代以来, 随着板块构造“登陆”, 碰撞造山后的大规模伸展、岩石圈拆沉和幔源岩浆底侵作用、地幔柱活动等大陆板块内部演化阶段的地质过程对成矿的重要意义逐渐被认识。

A. 陆内伸展体制成矿作用

从已有研究来看, 陆内伸展体制 (包括碰撞造山后的大规模伸展) 是形成大型矿集区和大型-超大型矿床的有利环境。北美科第勒拉造山带东侧发育世界级的卡林型金矿、MVT 型铅锌矿和浅成低温热液金-银矿, 其成矿环境过去一直争论不休。后来的同位素精确测年证明这些矿床均形成于 30 ~ 42Ma, 对应的成矿环境为造山后伸展盆地 (Hofstra and Cline, 2000; Howard, 2001; Bettles, 2002)。通过对西澳大利亚地盾中一系列世界级金矿的研究发现, 这些太古宙金矿是后造山伸展环境的产物 (Qiu and Groves, 1999)。对我国西南大面积低温成矿域和华南铀矿的研究也证明, 大陆板块内部大规模伸展对成矿物质的活化、迁移、聚集具有重要意义 (胡瑞忠等, 2004a, b, 2007)。Garza 等 (2001) 的研究发现, 即使在大陆边缘造山带中, 大型矿集区的形成并不主要出现在岩石圈挤压时期而是在其后的伸展阶段。

B. 与幔源岩浆底侵和地幔柱活动有关的成矿作用

幔源岩浆底侵和地幔柱活动是最重要的板内地质事件之一。它们不但是大陆地壳垂向增生的重要机制, 还直接导致了一系列大型-超大型矿床的形成。由于底侵作用, 大量幔源岩浆围积在下地壳底部形成岩浆池, 这种围积作用又诱发大规模变质作用、花岗岩浆活动和相应的成矿作用 (肖庆辉, 1997)。地幔

柱活动可以在短时间内引发大规模的玄武岩浆活动,形成大火成岩省,同时导致岩石圈大规模隆升、伸展(徐义刚,2002;He et al.,2003),是壳幔物质和能量交换的重要方式,具有非常重要的成矿效应。俄罗斯西伯利亚的Noril'sk-Talnakh超大型Ni-Cu-PGE硫化物矿床、美国Keweenaw裂谷带与Duluth杂岩体有关的硫化物矿床、南非Karoo火成岩省的Insizwa硫化物矿床,以及我国峨眉山大火成岩省有关的矿床等,大都认为是与地幔柱活动有关的重要矿床实例(Naldrett and Lightfoot,1993;Lightfoot and Hawkesworth,1997;Song et al.,2003;胡瑞忠等,2005;宋谢炎等,2005)。

总之,人们对成矿作用与板块边界动力学过程的内在联系,已获得越来越深刻的认识。同时,20世纪90年代以来随着对地幔柱和碰撞造山后大陆内部地质演化过程研究的不断深入,有关陆内成矿作用及其与陆内地质演化过程内在联系的动力学研究,已逐渐成为成矿学研究取得重大突破的新增长点。但是,相对于包括碰撞造山带在内的大陆板块边缘的成矿作用,大陆内部的成矿作用还是一个相对薄弱的研究领域。对这一薄弱领域的积极探索必将极大地丰富大陆动力学与成矿关系的理论体系。

2. 成矿作用研究不断深入,新技术和新方法的应用、成矿过程的精细刻画以及区域成矿模式的建立引起了充分重视

1) 学科交叉不断深入,新技术和新方法的引进日益受到重视

随着科学的进步和成矿作用研究的日益深入,要揭示复杂的成矿现象,成矿作用的研究对学科的交叉渗透提出了新的要求。当今的成矿作用研究,除与地球科学其他分支学科(如岩石学、大陆动力学、地球物理等)的渗透之外,已大量用到化学热力学、化学动力学、物理化学、数学和计算机科学等学科的理论基础。同时,新技术和新方法的引进日益受到研究人员的重视。如激光熔样-等离子质谱(LA-ICP-MS)分析方法的建立与完善,已使成矿流体的研究,从通过流体包裹体群体成分的测定来大致了解成矿流体的组成,发展到对单个流体包裹体中元素含量的直接测定而较准确地确定成矿流体的组成,这已成为深入研究成矿元素在不同流体相中的分配、精细刻画成岩成矿作用过程等方面的重要支撑(Audet et al.,1998;Ulrich et al.,1999,2001;Heinrich et al.,1999,2003,2004);高精度Re-Os、Lu-Hf、Cu、Fe、W、Se、B、N等非传统同位素分析测试技术的完善,拓展了同位素定年和同位素示踪研究的新领域(Shirey and Walker,1998;Zhu et al.,2000;Johnson et al.,2004);二次离子质谱(SIMS)对矿物轻同位素比值的微区-原位分析,已成为成矿流体研究的重要手段(Kesler et al.,2005);阴极射线激发荧光(CL、SEM-CL)技术的应用,可以快速、准确地确定矿物的精细结构、成分变化特征以及流体(熔体)包裹体的相对时间-空间关系(Rusk and Reed,2002;Landtwing and Pettke,2005)。因此,学科的交叉渗透和新的分析测试方法与实验技术的进步,不仅为成矿作用的深入研究提供了新的平台,同时也为成矿作用研究领域重大创新成果的产出,提供了新的重要机遇。

2) 在重视成矿作用始终态研究的基础上,更加重视成矿过程的精细刻画

受科学发展水平的限制,以往成矿学关注的焦点是成矿作用的始、终态,对成矿过程及其驱动力的研究一直较为薄弱。过去一段时间以来,由于非线性科学和实验模拟技术的进步,以及分析测试条件的进一步完善,为这些薄弱领域的深入研究提供了可能。主要进展和趋势包括:①以实验为手段,研究各种地质作用过程中元素活化、迁移和沉淀的物理化学条件,注重模拟实验研究与热力学和计算地球化学研究的结合,力求定量表达各种成矿地球化学过程(Frank,2002;Hack and Mavrogenes,2006);②将非线性科学和化学动力学理论引入成矿过程的研究之中,力求定量表达成矿系统的结构特征和与成矿作用有关的各种化学反应的机制和速率(Faure,1998;Henley et al.,2000);③微区微量分析测试技术的进步,使得对整个成矿过程不同阶段产物的元素和同位素组成的原位测定成为可能,这为我们较精细地了解成矿流体组成和成矿过程不同演化阶段的特征提供了前提,同时也为“精细”刻画成矿过程、更加合理地建立成矿模式提供了条件(Henrich et al.,2004;Kesler et al.,2005)。因此,通过运用各种新理论和新方法,更加精细定量地了解成矿作用的历史进程,也就成了成矿作用研究的重要发展趋势之一。

3) 成矿模式研究呈现出由定性向定量化和由矿床个体模型向区域时空四维模型演化的趋势

成矿模式是成矿环境、成矿过程、成矿物质来源,以及矿床几何形态和分布规律的高度理性概括,是迄今成矿学中研究时间颇长,但仍然最具生命力的科学问题之一。历史上斑岩铜矿成矿模式 (Titley, 1982)、块状硫化物矿床成矿模式 (Franklin et al., 1981)、卡林型金矿成矿模式 (Hausen and Kerr, 1968) 等成矿模式的提出,曾在全球找矿勘查活动中起到了重大推动作用。我国科学家提出的玢岩铁矿成矿模式和“五层楼”钨矿模式久经实践考验,实用性强,有力地推动了矿产资源的勘查。但是,目前对成矿模式的研究已不仅仅局限于对典型矿床的精细刻画,而是在向区域化和多参量化方向发展。基于区域构造演化和矿床成矿系列研究,建立成矿区带尺度和矿集区尺度 (翟裕生等, 1996, 1999; 陈毓川等, 1998, 2006) 的成矿模式已成为新的研究热点;以地质、地球化学、地球物理、遥感地质的多元信息为依据,建立不同尺度的找矿模型也受到广泛关注。进一步深入研究和提出符合客观实际的成矿-找矿模式,必能更好地架起成矿与找矿之间的桥梁,为找矿预测奠定良好的基础。

3. 华南陆块——陆内成矿作用研究的理想基地

我国地处欧亚、印度和太平洋三大板块的拼接部位。因此,中国大陆是一个拼合大陆,其地质构造演化远比非洲、北美洲 (主要是加拿大)、澳大利亚和俄罗斯中东部等区域复杂。以秦岭-大别造山带为界,南北两地前寒武纪基底和显生宙盖层差别很大。中国大陆自显生宙以来地壳运动非常强烈,加里东、海西、印支、燕山和喜马拉雅运动都对我国大陆产生了强烈影响,而且对不同地区的影响强度亦有明显差别,致使前寒武纪基底支离破碎;显生宙盖层分布区的构造-岩浆活动活跃,以致“稳定区”(地台)不稳定,从而造成成矿作用的多样性与复杂性,显示我国大陆的地质构造、演化特征和成矿作用相对全球来说具有与众不同的特色。不难看出,要解决我国矿产资源的紧缺和寻找重要矿产资源新远景,就必须从我国特有的地质构造演化入手,加强大陆动力学演化与成矿关系的深入研究。

如前所述,华南陆块是全球罕见的世界级多金属成矿省,其形成和演化,受到了在全球背景中很有特色的陆内大陆动力学过程的影响,主要在大陆内部先后发生了多期次的大规模成矿作用,是全球研究陆内成矿作用的典型地区之一,是我国从事大陆动力学演化与成矿关系研究的理想基地。建立该区大陆成矿理论体系,研发适合于该区景观条件的找矿新技术和深部隐伏大矿的探测技术,既是瞄准国际前沿的重大科学问题,也是该区找矿预测和实现进一步找矿突破的重要基础。

由于华南陆块独特的大地构造位置、丰富的矿产资源,以及相对方便的交通条件和较高的资源利用价值,因而该区域的地质矿产问题历来为地质学家们所关注,以往在华南陆块的基础地质、成岩成矿作用和构造演化等方面取得了一大批重要成果:一方面,初步揭示了该区岩石圈构造演化的许多特殊过程,勾画出了不同构造单元形成演化的轮廓框架;基本确定了已有矿床的类型,解剖了一批典型矿床,加深了对成矿过程的认识,并且已开始探索某些重要过程或重要地质事件对成矿作用的制约关系。另一方面,随着地质研究和找矿工作的深入,制约着该区进一步找矿评价的重大科学问题也在日益显现。正如在我们主持的上一轮 (1999~2004) 国家 973 项目“大规模成矿作用与大型矿集区预测”的结题报告中所指出:虽然对华南地区 (华南陆块) 地质矿产问题的研究已取得重要进展,但是通过这一轮研究发现华南有很多有关大陆动力学演化与成矿关系的重大科学问题没有解决。例如,华南陆块东部中生代的地球动力学过程仍很模糊,制约着对大花岗岩省中生代大爆发成矿的全面认识;华南陆块西部峨眉山地幔柱的成矿效应研究还较滞后;华南陆块西南部大面积低温成矿的动力学背景、确切时限和不同类型矿床的相互关系没有得到清楚地把握。这些问题的存在严重地制约着华南陆块大陆成矿理论的建立和找矿预测的新突破。

1) 晚古生代峨眉山地幔柱活动与成矿作用的多样性

晚二叠世峨眉山玄武岩及共生的镁铁-超镁铁质侵入岩、花岗岩和碱性岩广泛分布于华南陆块西部三省 (云南、四川和贵州),构成了主要为陆相的峨眉山大火成岩省,面积约 50 万 km²。岩石学、地球物理、地球化学、同位素年代学等各方面的综合研究证实,这一大火成岩省的形成是晚古生代峨眉山地幔柱活动的产物 (Xu et al., 2001; Song et al., 2001; He et al., 2003; 张招崇等, 2004; Zhang et al.,

2006), 与地幔柱活动有关的岩浆活动主要发生于距今 260 Ma 左右 (Zhou et al., 2002, 2005, 2006; Guo et al., 2004; Zhong et al., 2006, 2007; 罗震宇等, 2006; He et al., 2007)。峨眉山玄武岩主要可分为低钛和高钛两类。一般认为, 低钛玄武岩起源于岩石圈地幔, 其地幔部分熔融程度较高且经历了较强的地壳混染; 而高钛玄武岩则可能起源于软流圈, 其地幔部分熔融和地壳混染程度均较低 (Xu et al., 2001; Xiao et al., 2004)。大型镁铁-超镁铁质层状岩体分布于攀西地区的区域性深大断裂附近, 其韵律层理的形成受多次岩浆的注入及岩浆混合、结晶分异作用或液态不混溶作用的控制 (Zhong et al., 2002, 2004; Zhou et al., 2005)。花岗岩体及碱性杂岩的形成, 则由玄武质岩浆的高度分异或底侵玄武质岩浆对下地壳的部分熔融作用所致 (罗震宇等, 2006; Zhong et al., 2007)。

地幔柱上升是地球各圈层进行物质和能量交换的一种重要方式, 巨量玄武质岩浆活动可导致大规模成矿作用的发生。已有研究表明, 世界上很多超大型矿床都形成于地幔柱背景下, 典型范例如俄罗斯西伯利亚的 Noril'sk-Talnakh 超大型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床 (Lightfoot and Hawkesworth, 1997)、南非与 Bushveld 杂岩体有关的 PGE-Cu-Ni 硫化物矿床 (Ernst and Buchan, 2003)、美国 Duluth 杂岩体中的超大型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床 (Ripley, 1990)、加拿大 Coppermine River 大火成岩省中的大型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床 (Irvine, 1975)、北大西洋火成岩省 Skaergaard 岩体中的 Pd-Au 矿床 (Nielsen and Brooks, 1995) 以及我国峨眉山大火成岩省中的相关矿床 (Cu-Ni-PGE、V-Ti 磁铁矿、Nb-Ta-Zr) 等。其中, Noril'sk-Talnakh 超大型 Ni-Cu-PGE 矿床的 Ni 储量位居世界第一、PGE 储量位居世界第二 (Ni 2000 万 t, Cu 3000 万 t, PGE 5000t) (Naldrett, 1999)。值得关注的是, 近来有研究者提出塔里木板块晚古生代大量火山岩喷发也可能与地幔柱活动有关 (罗志立等, 2004; 夏林圻等, 2004)。天山-阿尔泰东部地区众多赋存铜镍硫化物矿床 (喀拉通克、黄山、黄山东、香山、白石泉等) 和钒钛磁铁矿矿床 (尾亚、香山西) 的早二叠世 (298~270Ma) 镁铁-超镁铁质岩体被认为是该地幔柱活动的产物 (Zhou et al., 2004; 夏林圻等, 2004; 毛景文等, 2006)。

从矿床类型上看, 全球其他大火成岩省中产出的矿床类型相对较为单一, 大多为 Cu-Ni-(PGE) 硫化物矿床及少数自然 Cu 矿床。而且, 巴西 Paraná、美国 Columbia River、印度 Deccan 等大火成岩省中目前尚未见有经济意义的矿床报道。极具意义的是, 与世界其他大火成岩省相比, 虽然我国峨眉山大火成岩省的面积 (50 万 km²) 较小, 但其成矿作用类型的多样性及成矿系统的完整性, 在世界其他大火成岩省中则极为罕见 (胡瑞忠等, 2005; 宋谢炎等, 2005)。与峨眉山地幔柱活动相关的典型矿床主要有: 与镁铁-超镁铁质层状岩体有关的超大型 V-Ti 磁铁矿矿床 (攀枝花、红格、白马、太和); 与镁铁-超镁铁质岩体有关的 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床 (力马河、金宝山、杨柳坪、白马寨); 与溢流玄武岩有关的 Cu、Fe 矿床 (鲁甸、黑山坡), 以及与碱性花岗岩有关的 Nb-Ta-Zr 矿床 (茨达、红格)。在全球背景中, 由于峨眉山大火成岩省成矿作用类型的多样性及成矿系统的完整性, 为我国学者开展地幔柱与成矿关系这一前沿领域的创新研究提供了极好的基地。21 世纪初以来, 与上述矿床有关的研究工作已在一些方面取得较大进展。研究表明, 地壳混染和结晶分离对硫化物熔离及 Cu-Ni-PGE 矿床的形成起到了至关重要的作用 (Song et al., 2003, 2006a, b; Wang and Zhou, 2006; Tao et al., 2007), 而岩浆的多期次注入、岩浆混合作用 (Zhong et al., 2002, 2004) 或铁钛氧化物与硅酸盐熔浆的不混溶作用 (Zhou et al., 2005) 对于超大型 V-Ti 磁铁矿矿床的形成有重要影响。不过, 虽然对某些矿床的研究取得了上述重要进展, 但总体来看对峨眉山地幔柱及其与成矿关系的整体性认识目前还较为模糊。主要表现为: ①未能将地幔柱活动导致的构造-岩浆活动有机地统一起来, 从而未能清楚认识峨眉山大火成岩省中低钛和高钛玄武岩与各类含矿镁铁-超镁铁质岩体和碱性花岗岩体的分异演化关系; ②对成矿元素在不同岩体或岩相中差异性富集的主要控制因素是什么、不同矿床类型在统一的地幔柱成矿系统中有何本质联系、全球背景中峨眉山大火成岩省成矿作用类型多样性的原因这样一些重要问题更是缺乏系统研究; ③更重要的是根据地幔柱活动及其岩浆分异演化规律, 来客观判断各类可能的隐伏矿床空间分布的研究则几乎还是空白 (世界上一些大火成岩省中常有超大型 Cu-Ni-PGE 矿床产出。峨眉山大火成岩省中这类矿床星罗棋布, 但主要为中小型矿床, 该区超大型 Cu-Ni-PGE 矿床是否存在)。这些问题的存在, 制约着对地幔柱成矿理论的深

入认识和相应的找矿预测工作。因此,在已有基础上,只有将峨眉山大火成岩省各类岩石的岩浆源区、演化过程等方面的研究与地幔柱动力学过程密切结合,并通过对各类矿床的成矿过程及其共性、特殊性、相关性和时空分布规律的系统研究,才有可能建立起科学的地幔柱成矿理论和相应的找矿模型,从而对其成矿潜力作出正确评估。

2) 中生代大面积低温成矿的时空分布和动力学

低温成矿域是与低温热液矿床(200~250℃以下形成的热液矿床)相对应的一个概念,指低温热液矿床密集成群产出的区域。虽然低温热液矿床在世界各地都有分布,但低温成矿域尤其是大面积低温成矿域在世界上的分布则很局限。

华南陆块西南部地区矿产资源非常丰富,在面积约50万km²的广大范围内,金、汞、铋、砷、铀、银、铅、锌以及萤石、冰洲石和水晶等低温热液矿床广泛发育,且其中的不少矿床是大型-超大型矿床;在美国中西部,MVT型铅锌矿床、卡林型金矿和砂岩型铀矿等低温热液矿床也非常发育,不仅分布广,而且产出较多超大型矿床,是美国的主要矿产资源基地之一。这种大面积产出不同矿种的低温热液矿床的现象,在国内外目前仅见于上述两个区域。因此,即使就全球而言,在什么条件下才能形成大面积低温成矿域,也是一个很具特色的重要科学问题。

20世纪80年代以来,随着滇黔桂地区卡林型金矿的逐渐发现,华南陆块西南部一个以金、铅、锌、砷、铋、汞为主的大面积低温成矿域的形成背景和过程,已成为一个突出的科学问题而引起学界的高度重视。基于以往的研究基础,在国家自然科学基金重点项目“低温地球化学”(涂光炽院士负责,1992~1995年)和国家973项目“大规模成矿作用与大型矿集区预测”中的低温成矿作用课题(胡瑞忠研究员负责,1999~2004年)支持下,该方面的研究取得了明显进展(涂光炽等,1998;Hu et al., 2002;胡瑞忠等, 2004b)。研究表明:①大面积低温成矿作用的成矿流体为大规模运移的盆地流体;②低温矿床中的成矿物质主要来自于基底和周围地层;③大面积低温成矿作用大约发生在150~80Ma,与区内燕山中晚期形成的幔源基性脉岩的时代相当;④区内各低温矿种之间在形成机制上具有相似性;⑤该区富成矿元素的新元古代地层和早古生代黑色岩系的广泛发育,以及长时间大面积缺少明显的花岗质岩浆活动,是该区大面积低温成矿的重要前提条件。通过对该低温成矿域的研究,初步提出了大面积盆地流体对流循环从围岩中萃取成矿组分,然后在合适的构造部位卸载成矿的成矿模式(Hu et al., 2002; Wang et al., 2003; 胡瑞忠等, 2004b)。

值得指出的是,对华南陆块西南部地区大面积低温成矿作用的研究虽已取得重要进展,但仍存在下列重要科学问题亟待解决:①大多数矿床缺少精确的成矿年龄资料,妨碍了对成矿作用时空分布规律的全面认识;②以往的研究基本上是按矿种进行的,低温成矿域中的各低温矿种为何分区产出以及它们的成矿之间究竟有何联系,目前知道的不多;③已有少量研究表明,该区晚中生代大面积低温成矿发生在大陆板内的伸展背景,主要表现为研究区一些同时期地堑式断陷盆地和幔源基性脉岩的发育等(Hu et al., 2002; 胡瑞忠等, 2004a, b; 毛景文等, 2005)。过去有研究认为,美国西部以内华达为中心的新生代(30~42Ma)大面积低温成矿,也发生在陆内伸展背景下(Hofstra and Cline, 2000; Howard, 2001; Bettles, 2002)。但是,启动岩石圈伸展的深部动力学过程是什么?岩石圈伸展又是如何控制盆地流体大规模运移而大面积低温成矿的?这些重要的问题在以往的研究中基本未曾涉足;再者,对多矿种的低温热液矿床为什么只大面积地出现在美国中西部和华南陆块的西南部地区,它们的成矿条件有何异同等方面的研究则更差。由于缺乏对这些方面的系统研究,制约了全面客观地认识大面积低温成矿的过程和规律,制约了对大面积低温成矿动力学模型的合理总结,制约了大面积低温成矿域中有利找矿地段的选择,从而也制约了人们对大面积低温成矿作用这一具有全球特色科学问题的深入认识。因此,以我国华南陆块西南部大面积低温成矿域为对象开展上述研究,不仅具有十分重要的意义,同时也反映了国内外低温成矿作用研究的发展趋势。

3) 华南中生代大面积花岗岩浆活动及成矿大爆发

印支期是中国东部大地构造演化的重要转折阶段,此时,华南陆块与其西南缘的印支陆块和北缘的

华北陆块碰撞拼合(张国伟等, 1996; 任纪舜等, 1999), 形成了华南陆块复杂而独具特色的地质构造, 以挤压构造为其主要背景, 表现为以湘赣古裂陷带为中心的巨型花状构造(Chen, 2001; Wang et al., 2005), 其变形时限大致在 245 ~ 190Ma (Wang et al., 2005); 与此相对应的是, 地壳叠置加厚和深熔作用形成了一套面型展布于湘桂粤赣闽诸省的强过铝质-准铝质花岗岩(约 243 ~ 220Ma, Wang et al., 2005, 2007)。但是, 这一时期该陆块的成矿作用相对不明显。

侏罗纪以来, 华南陆块经历了构造格局的重大调整、复杂的壳幔相互作用与巨量花岗质岩石的生成, 并伴随大爆发成矿, 是中国乃至全球极富特色的构造-岩浆活动与成矿作用分布区。

A. 构造格局重大调整

已有资料表明华南陆块协调于中国东部, 在中生代发生了构造体制的重大调整, 即主构造格局由近 EW 向转变为 NE—NNE 向。在华北地块, 任纪舜等(1998)发现冀北和内蒙古南部 EW 向中晚侏罗世髻髻山组火山岩和土城子组红色地层被 NE—NNE 向分布的白垩纪张家口组火山岩和义县组火山岩覆盖, 表明侏罗纪与白垩纪之间为构造体制调整的时间, 但一些学者则通过 SHRIMP 锆石 U—Pb 法和含钾矿物⁴⁰Ar—³⁹Ar 法年代学研究认为这一转折时限应为 166 ~ 135Ma (Zheng et al., 1996; 李锦轶等, 1999; 牛宝贵等, 2003)。在华南, 陈培荣(2003)认为侏罗纪花岗岩和火山盆地呈近东西向分布, 而白垩纪花岗岩带和火山盆地以 NE—NNE 向叠加其上, 提出华南构造体制的调整应在侏罗纪与白垩纪之交; 但周新民等(2006)则认为三叠纪与侏罗纪之间存在约 10Ma 的岩浆活动间歇期, 代表了华南构造体制的调整时期。由此可见, 尽管中国东部构造格局于中生代时期发生重大调整的事实已为学界所认同, 但调整的确切时限和阶段性, 仍有待深入探讨, 该问题在华南地区尤其突出。

B. 复杂的壳幔相互作用与大花岗岩省的形成

中国东部中生代的岩石圈大减薄事件在华北地区表现最为显著, 华北东部古老岩石圈地幔自古生代以来发生了重大地质改造, 造成了 >120km 厚的岩石圈地幔消失。自 20 世纪 90 年代以来, 这一重要事件开始引起国内外学者的广泛关注, 并开展了大量研究(Fan and Menzies, 1992; Fan et al., 2000; Menzies et al., 1992; Zhang et al., 2002; 邓晋福等, 1996; 路凤香等, 2006), 其机制被认为是机械热侵蚀或置换作用所致(Xu, 2001; Zheng et al., 2001)、或与岩石圈拆沉(Gao et al., 1998)或岩石圈去根(邓晋福等, 1996)有关。岩石圈减薄可能始于 145Ma, 而快速减薄发生在 130 ~ 110Ma (毛景文等, 2003; 吴福元等, 1999, 2000, 2003), 与华北地区大范围的岩浆作用和大规模成矿作用集中在 130 ~ 110Ma 的事实相吻合。不过, 亦有研究者认为岩石圈减薄开始发生在 100Ma 左右(邵济安等, 2004; 路凤香等, 2005)。

自 20 世纪 90 年代以来, 不少研究(Gilder et al., 1991, 1996; Chung et al., 1997; Xu et al., 2000; 邹和平, 2001; 孙涛等, 2002; 谢桂青, 2003; 贾大成等, 2003)表明, 中国东部华南大花岗岩省所在区域晚中生代以来也同样存在分区性的岩石圈减薄事件, 但比华北更为复杂(李廷栋, 2006)。与华北不同的是, 中生代时期在华南自西向东由老变新发育了上千千米宽的中酸性岩浆岩带。这些岩石的成因及其与壳幔相互作用的关系自 70 年代以来即有广泛研究, 较早的研究认为它们的形成可能与太平洋板块的西向俯冲密切相关。但相较于其他汇聚板块边缘, 由于华南中生代岩浆作用有着宽得多的活动范围, 后来越来越多的研究者认为, 除武夷山一线以东靠近华南大陆边缘的燕山期岩浆活动(K_1 — K_2)具有陆缘弧岩浆性质, 而可能与太平洋板块的西向俯冲有关(周新民等, 2006)外, 华南内陆地区的燕山期岩浆活动可能受控于其他大陆动力学过程(如 Li et al., 2007)。一些对华南内陆燕山期花岗质岩石、富碱侵入岩带、玄武岩和基性脉岩、双峰式火山岩等的研究表明, 中侏罗世以来华南花岗质岩石及其他岩石主要形成于岩石圈伸展的构造背景, 中侏罗世以来华南已发生大范围的岩石圈伸展作用并形成很具特色的盆岭系统(Gilder et al., 1996; Chen et al., 1998; Hong et al., 1998; Li, 2000; Li et al., 2007; 李献华等, 1997; 范蔚茗等, 2003; 胡瑞忠等, 2004a; 周新民等, 2006); Gilder 等(1996)、Chen 等(1998)和 Hong 等(1998)的研究表明, 华南存在几条低 T_{DM} 和高 ϵ_{Nd} 花岗岩带, 这种低 T_{DM} 和高 ϵ_{Nd} 带被认为是岩石圈伸展和壳幔强烈相互作用的证据。陆内岩石圈伸展—减薄造成的减压熔融和玄武质岩浆底侵引起的复