

壳幔成矿学初探^{*}

杜杨松

(中国地质大学, 北京)

提 要: 壳幔成矿学是联结深部地质学与区域成矿学的重要桥梁。将成矿作用与深部过程联系起来, 进行壳幔成矿学研究, 已成为当今区域成矿学的一种重要发展趋势。壳幔成矿学研究的核心内容是大陆壳幔多层圈相互作用与成矿关系, 而壳幔成矿学研究的主要技术支撑是“岩石探针”分析。壳幔成矿学研究应选择若干典型区域, 采用演化历史分析与作用过程鉴别结合的思路, 对岩石包体及其寄主岩和有关矿床进行深入研究, 以查明区域壳幔相互作用事件幕与成矿作用事件幕及其时空耦合关系, 揭示多层位岩浆-热流体系统的演化历史及其对成矿元素富集成矿的制约, 提出区域壳幔相互作用与成矿过程模型, 为建立新一代成矿学知识体系提供新的思路和科学依据。

关键词: 壳幔成矿学 区域成矿学 壳幔相互作用 “岩石探针”分析

壳幔成矿学是区域成矿学的一个新分支, 主要研究壳幔系统多层圈之间的相互作用, 特别是能量和物质交换及其对矿床形成过程的制约。其主要任务是通过壳幔相互作用与成矿关系的研究, 阐明矿床的形成和分布规律。

1 壳幔成矿学是联结深部地质学与区域成矿学的重要桥梁

大陆壳幔多层圈相互作用不仅是大陆动力学研究的核心, 而且是矿产资源、能源、地质灾害及环境科学问题研究的重要基础。大陆壳幔系统的多层圈之间是怎样相互作用的? 上地幔与下地壳、下地壳与上地壳等不同圈层之间是怎样实现能量与物质交换的? 幔源岩浆的底侵作用与壳底岩浆池的演化以及壳内(多级)岩浆房的形成过程及其驱动的热流体系统的演化是如何制约层圈之间的相互作用的? 这些都属于大陆壳幔多层圈相互作用研究的范畴。

典型成矿区带的地球动力学分析是发展新的成矿理论和找矿方法, 以指导大型、超大型矿床和隐伏矿床预测、勘查工作的关键。从层圈相互作用及各层圈演化规律的角度, 把成矿带的矿床作为成矿系统演化过程中的一种特殊产物来考察其时空演化规律, 深入探讨大陆壳幔多层圈相互作用与成矿的关系, 是典型成矿区带地球动力学分析的重点。事实上, 大陆壳幔多层圈相互作用是成矿系统演化的根本原因。从总体上讲, 大陆壳幔多层圈相互作用是诱发成矿系统中各种地质作用的原因, 是决定成矿系统时空结构及各类矿床有序组合的主要因素。换言之, 成矿系统中发生的各种地质作用是大陆壳幔多层圈相互作用在浅部的响应, 成

^{*} 国家自然科学基金项目(编号: 49872025)和国土资源部重要基础项目(编号: 9501112)联合资助
作者简介: 杜杨松, 男, 1957 年生, 教授, 主要从事包裹体岩石学及壳幔相互作用与成矿研究。邮政编码: 100083
1999-05-20 收稿, 1999-08-26 修改回

矿系统诸要素在特定时空结构内的相互匹配和有机组合是大陆壳幔多层圈相互作用的结果在浅部的具体表现。

从中国东部来看,东部大陆的岩浆-成矿带表现出明显的分段性。燕山期华南主要是壳幔为主的岩浆活动,而北方则发育完整的幔源-壳幔混合源-壳源岩浆成分谱系;华南 W、Sn、Sb、Nb、Ta、REE、U 等亲壳源元素的大量富集形成大型、超大型矿床的群集,而北方则为 Au、Ag、Mo、Fe、Pb、Zn 成矿作用;华南到早白垩世才出现造山后 A 型花岗岩,而北方则在印支末期与燕山末期均产出 A 型花岗岩;华南新生代玄武岩以 K 质为主,华北则以 Na 质为主。此外,近年来的矿床地球化学(尤其是矿床同位素和微量元素地球化学)以及成矿流体地球化学研究表明,中国东部(东北、华北、长江中下游和东南沿海)大部分中新世形成的矿床或其成矿流体属于壳幔混合源,它们的成因与壳幔相互作用密切相关。看来,岩浆-成矿带的分段性是中国东部的客观事实,它与中国东部的壳幔结构及大陆壳幔多层圈相互作用之间存在着密切联系。因此,中国东部是研究大陆壳幔多层圈相互作用与成矿关系的良好“野外实验室”。

值得指出的是,从壳幔相互作用的角度探讨成矿规律,是一种新的科学探索。将大陆壳幔多层圈相互作用与成矿联系起来进行系统研究,可望在区域成矿学与岩石学,大地构造学、地球化学和地球物理学,特别是深部地质学之间架起一道桥梁,成为新的壳幔成矿学理论的生长点,为建立新一代成矿学(壳幔成矿学)知识体系,发展新一代普查找矿方法,提供重要的理论基础。

2 成矿作用与深部过程研究相联系已成为当今区域成矿学的一种重要发展趋势

近年来,美国、英国、日本和印度等国家先后提出了“固体地球科学与社会”综合性研究计划和“大陆动力学研究国家计划”、“NERC 地球科学发展战略”、“固体地球科学计划”以及“地球科学的挑战领域”等研究计划。对有关资料的详细分析表明,当前国外在建立新一代地球科学知识体系方面,正瞄准地球系统各层圈之间相互作用这一核心前沿,围绕或针对岩石圈、全球变化和地球深部内层三大主题重新部署科技力量,为创造和建立以解决资源、环境和灾害等问题为目的的新一代地质科学知识体系进行开拓与创新研究。与此相适应,国家科委在制定我国科学技术研究“九五”计划和 2010 年规划时,都将地球深部过程与多层圈相互作用列为地球科学领域中的重大主题。国家自然科学基金委员会也将地球内部各圈层的相互作用明确列入其“九五”优先资助领域。

1996 年在我国北京举行的 30 届国际地质大会将“下地壳性质和壳幔交换”作为讨论会的一个重要主题。会议期间,该主题成了讨论会的主要热点之一。各国地球科学家对下地壳和壳幔过渡带的性质及地质作用过程,特别是拆沉作用和底侵作用进行了广泛而深入的讨论。同时,在运用各种地球化学方法研究壳幔多层圈相互作用方面,国内外也已经取得许多重要进展^[7,9,10]。

作为区域成矿学研究的核心前沿领域之一,区域成矿作用与深部过程的联系正日益受到

重视：肖庆辉等^[4]在广泛调研和深入分析国内外有关资料的基础上，将大陆深部层圈的结构和相互作用及其与成矿的关系列为地质科学重大前沿研究领域和近期优先研究方向；刘凤山等从闪长质岩石包体研究的角度探讨了太行山—燕山造山带的壳幔成矿作用^[2]；Romanovsky et. al 讨论了环太平洋成矿带的含矿岩浆作用及其深部性质^[11]；储雪蕾等通过地幔矿物中硫化物熔体包裹体的研究^①，提供了有关矿床成矿物质直接来源于上地幔的证据；涂光炽（1997）在“壳幔相互作用与岩石圈演化”学术讨论会上作了题为“壳幔相互作用与成矿”的报告，对这方面的成果和资料进行了系统总结。

然而，值得指出的是，在过去的十几年中，虽然国内外在壳幔多层圈相互作用和成矿作用方面都做了大量富有成效的工作，但较少把它们联系起来进行系统研究。因此，开展壳幔相互作用与成矿关系的综合研究是填补两者空隙的必要环节，同时也是开拓成矿理论新思路的有效途径。

综上所述，以地球系统科学和大陆动力学等新地学理论为指导，将成矿作用与深部过程联系起来，从大陆壳幔多层圈相互作用过程中物质和能量迁移交换的角度去探讨成矿作用机制，用壳幔系统演化过程所控制的成矿地质环境的时空演化规律来阐明成矿时空规律，在此基础上建立壳幔成矿学理论和新一代找矿模型，以指导对大型、超大型矿床和隐伏矿床的寻找，已成为当今区域成矿学的一种重要发展趋势。

3 大陆壳幔多层圈相互作用与成矿的时空和成因联系是壳幔成矿学研究的核心内容

前已述及，中国东部是研究大陆壳幔多层圈相互作用与成矿关系的良好“野外实验室”。因此，结合中国东部地质实际，揭示大陆壳幔多层圈相互作用与成矿的时空和成因联系，初步建立壳幔成矿学的框架模型，是我们这方面研究的重要目标。

为了实现上述目标，首先必须对中国东部地球物理资料和燕山期以来构造-岩浆-成矿作用与深部过程方面的有关资料进行系统整理和深入分析，建立中国东部燕山期以来岩石圈结构演化和大型、超大型矿床矿集区时空分布的粗略框架。同时，考虑到中国东部不同区段在岩石圈结构演化以及壳幔交换与成矿作用过程方面具有明显不同的特点，应选择若干典型区段进行岩石圈精细结构、演化及其对比方面的研究。在上述工作的基础上，对典型区段中的大型矿集区进行重点解剖和对比分析，重点研究：

（1）区域壳幔相互作用事件幕（岩浆活动事件幕）与成矿作用事件幕（包括两类事件的性质，如基性还是酸性岩浆活动，铜矿化还是金矿化等，以及强度变化）的时空耦合关系及其产物的时空分布规律。

（2）幔源岩浆的底侵作用与深部地壳的部分熔融和多层位岩浆-热流体系统的形成、演化及其对造矿组分富集成矿过程的制约。

（3）幔源岩浆的分异演化与壳幔同熔和（多层位）岩浆-热流体系统的形成、演化及其

① 储雪蕾等，1997，地幔矿物中硫化物熔体包裹体及其成因，内部资料

对造矿组分富集成矿过程的制约。

(4) 区域壳幔相互作用与成矿过程模型。

4 “岩石探针”分析是进行壳幔成矿学研究的主要技术支撑

已有的研究资料表明,岩浆是实现壳幔之间物质和能量交换的有效介质,而岩浆岩及其岩石包体是研究壳幔相互作用的理想对象(许文良等^[6])。因此,进行壳幔成矿学研究,应以岩石包体及其寄主岩和有关矿床及矿物包裹体为主要研究对象,以“岩石探针”新技术为主要支撑,采用地球物质科学(包括岩石学、矿床学、地球化学和矿物学)与地球物理学结合,演化历史分析与作用过程鉴别结合的方法与思路,开展研究工作。

4.1 物质组成研究与地球物理场分析结合

对区域地学大断面及多种地球物理成果进行二次开发,结合上地幔和中、下地壳岩石包体(矿物包晶)及其寄主岩(包括基性和中基性火山岩)的物质组成研究,建立区域壳幔结构框架,查明其基本特征。同时,通过地球物理资料的二次开发以及野外不同期次断裂、岩脉性质和火山-侵入岩分布及侵位特征的观察,查明研究区一定地质时期内壳幔结构的改变,结合岩石包体及其寄主岩的地球化学研究,确定研究区一定地质时期内多期地幔作用(如上拱、交代等)事件。

4.2 地质及岩(矿)相学观察与同位素年代学测定结合

对各种来源的岩石包体及其寄主岩(包括基性和中基性火山岩)、各类脉岩/矿脉和蚀变岩的相互关系进行详细的野外地质及岩(矿)相学观察。在此基础上,选取各类典型样品(包括与矿化密切相关的同期蚀变矿物)进行 Rb-Sr、Sm-Nd、Pb-Pb 和 Ar-Ar 年龄测定,以确定区域壳幔相互作用事件幕(岩浆活动事件幕)和成矿作用事件幕及其时空耦合关系,揭示岩浆岩和矿床的成因联系。

4.3 演化历史分析与作用过程鉴别结合

对各种成因的岩石包体(源岩包体、耐熔体(包括残余斑晶或变斑晶)、堆积体(析离体)、熔融体、冷凝体、混合包体和残浆包体)及其寄主岩(包括基性和中基性火山岩)和有关矿石及各类单矿物进行系统的岩相学、矿物学研究及主元素、微量元素(包括成矿元素)、稀土元素和 Sr、Nd、Pb、Os 和 He 同位素地球化学分析,结合寄主岩,特别是包体或包晶矿物的熔融包裹体(包括地幔矿物中硫化物熔融包裹体)和气液包裹体的温压和成分(包括成矿元素含量)测定,特别是单矿物(如锆石、角闪石、黑云母和长石)热年代学测定,以查明包体及其寄主岩形成的时序及相互间的成因联系和演化关系,揭示区域壳幔相互作用过程(包括底侵作用的论证,部分熔融作用、岩浆积聚上侵、结晶分异、同化混染和混合作用的鉴别以及多层位岩浆-热流体系统的识别)以及多层位岩浆-热流体系统的演化历史及其对成矿元素富集成矿的制约。

4.4 典型解剖与综合对比结合

在对各典型地区火山-侵入杂岩及相关矿床进行深入解剖的基础上,通过不同时间和不同空间壳幔相互作用与成矿产物特征及其形成过程的综合对比,查明确壳幔成矿作用在时空上的变化规律,建立区域壳幔相互作用与成矿过程模型。

5 安徽沿江地区是开展壳幔成矿学研究的理想基地之一

安徽沿江地区地处扬子岩浆-成矿带中段,其岩浆活动强烈,壳幔交换频繁,成矿过程复杂,是开展壳幔成矿学研究的理想基地之一。区内岩浆岩(富含各种岩石包体)和有关矿床呈所谓夹心饼干式的带状分布(王德滋,1994)。中间以铜陵、庐枞和宁芜地区为主,构成主带,岩浆岩多偏中基性,属高钾钙碱性岩系和橄榄安粗岩系,伴有强烈的铜、铁、硫、金矿化。中带位于主带的南北边缘,由两条A型花岗岩带构成。外带位于主带的南北两侧,主要由属钙碱系列的花岗闪长岩和花岗岩组成,伴有铜、钼和铅锌矿化,并以与幔源岩浆有关的沙溪斑岩铜矿最有远景。从时间上看,本区的岩浆活动主要有两期:早期约在 137×10^6 a,以主带的铜陵侵入岩、安庆月山岩体及外带的花岗闪长岩体为代表;晚期约在 123×10^6 a,包括主带的火山岩及有关的侵入岩、中带侵入岩及主带和外带的花岗岩。

安徽沿江地区的岩浆-成矿过程与壳幔相互作用有关,这一点已基本达成共识。但两者之间是通过什么样的机制相互关联的?怎样实现时空过程的耦合?却是有待于进一步解决的问题。

对安徽沿江地区区域岩浆岩及其包体和有关矿床研究资料的综合分析表明^[1,3,5,8],从时间上来看,本区早晚两期岩浆-成矿活动的差异可能与区域地幔逐步上拱,引发不同的壳幔相互作用过程有关。其中早期区域地幔初步上拱,此时的岩浆-成矿活动可能主要与幔源岩浆的底侵作用导致富含成矿元素的深部地壳部分熔融有关;晚期区域地幔进一步上拱,这时的岩浆-成矿活动可能主要与幔源岩浆分异演化和上侵,导致壳幔物质同熔有关。两种作用过程都可能形成不断演化的多层位岩浆-热流体系统,并使有关成矿元素不断富集成矿。从空间上来看,每期岩浆-成矿活动产物的特征从主带往两侧发生有规律的变化可能与各带壳幔结构差异(如主带是本区地幔上拱的中央地带)及壳幔之间物质与能量迁移交换的强弱有关。因此,我们可以用上述模型来探索区域壳幔多层圈相互作用与成矿过程的关系,以期在壳幔成矿作用研究方面获得一些新的进展,并为研究壳幔成矿作用过程提供范例。

在有关研究思路的形成过程中,常印佛院士、翟裕生教授和邓晋福教授提出了重要的指导意见,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 杜杨松,李学军.安徽铜陵典型矿区岩石包体研究及其岩浆-成矿作用过程探讨.高校地质学报,1997,3(2):171~182.
- 2 刘凤山,石淮立.从闪长质岩石包体角度探讨太行山—燕山造山带壳幔成矿作用.矿床地质,1995,14(3):206~215.
- 3 唐永成,吴言昌,储国正.安徽沿江地区铜金多金属矿床地质.北京:地质出版社,1998.
- 4 肖庆辉,贾跃明,刘树臣等.推进我国地质科学前沿研究的谋划.北京:地质出版社,1992.
- 5 邢凤鸣,徐祥.安徽沿江地区中生代岩浆岩的基本特点.岩石学报,1995,11(4):409~422.
- 6 许文良,迟效国,袁朝等.华北地台中部中生代闪长质岩石及深源岩石包体.北京:地质出版社,1993.
- 7 周新华.大陆地幔地球化学和岩石圈研究.见:欧阳自远等主编.地球化学:历史、现状和发展趋势.北京:原子能出版社,1996,217~222.
- 8 周珣若,吴才来,黄许陈等.铜陵中酸性侵入岩同源包体特征及岩浆动力学.岩石矿物学杂志,1993,12(1):

20 ~ 31 .

- 9 Mawer C K, Clements J D, Petford N. Mantle underplating, granite tectonics, and metamorphic $p-t$ paths. *Geology* (in print) .
- 10 Petford N, Atherton M P, Halliday A N. Rapid magma production rates, underplating and remelting in the Andes — isotopic evidence from northern-central Peru, *J. S. Amer. Earth Sci.*, 1996, 9 (1-2) : 69 ~ 78 .
- 11 Romanovsky N, Maslov L, Moiseenko V. Ore-bearing magmatism of the Pacific belt, and its deep nature, *Abstracts of 30th IGC*, 1996, 1 : 392 .

A PRELIMINARY APPROACH TO CRUST- MANTLE METALLOGENY

Du Yangsong

(*China University of Geosciences, Beijing 100083*)

Key words: crust-mantle metallogeny, regional metallogeny, crust-mantle interaction, "petroprobe"

Abstract

Crust-mantle metallogeny is an important bridge linking deep geology with regional metallogeny. The research of crust-mantle metallogeny through connecting the mineralization with the deep process has become an important trend of regional metallogeny. The key research content of crust-mantle metallogeny seems to be the relationship between continental multilevel crust-mantle interaction and mineralization, and the main technological support for the research of crust-mantle metallogeny is the "petroprobe" analysis.

The crust-mantle metallogenic study on the xenoliths as well as their hosts and relevant deposits in several selected typical districts can be carried out through combining the analysis of evolutionary history with the discrimination of action process. This would give a clue to discriminating episodes of crust-mantle interaction and metallogeny as well as their temporal and spatial coupling relation and gain new insights into evolutionary history of multi-level magmatic-hydrothermal systems and their constraint on the enrichment of metallogenic elements for forming ore deposits. On the basis of this study, a model for regional crust-mantle interaction and metallogenic process is advanced, which can provide new thought and scientific evidence for establishing a new generation of metallogenic knowledge system.