

doi: 10.12029/gc20190401

吕庆田, 孟贵祥, 严加永, 张昆, 赵金花, 龚雪婧. 2019. 成矿系统的多尺度探测: 概念与进展——以长江中下游成矿带为例[J]. 中国地质, 46(4): 673–689.

Lü Qingtian, Meng Guixiang, Yan Jiayong, Zhang Kun, Zhao Jinhua, Gong Xuejing. 2019. Multi-scale exploration of mineral system: Concept and progress—A case study in the middle and lower reaches of the Yangtze River Metallogenic Belt[J]. *Geology in China*, 46(4): 673–689(in Chinese with English abstract).

成矿系统的多尺度探测: 概念与进展 ——以长江中下游成矿带为例

吕庆田^{1,2}, 孟贵祥^{1,2}, 严加永^{1,2}, 张昆^{1,2}, 赵金花^{1,2}, 龚雪婧^{1,2}

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质调查局-中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037)

摘要:在全球矿产勘查逐渐转向“绿地”、深部和覆盖区的大背景下,急需成矿理论的指导。20世纪末提出的成矿系统概念由于其强大的区域成矿预测功能,引起了矿业界广泛的关注和研究。本文首先回顾了成矿系统的概念、组成和分类,然后讨论了成矿系统主要组成部分的探测和识别方法,最后结合笔者近年在长江中下游成矿带开展的多尺度探测,讨论了陆内典型成矿系统的深部过程、地壳结构和地球物理响应,并对成矿系统概念在成矿预测领域的应用前景进行了展望。本文主要结论:(1)成矿系统是由控制矿床形成和保存所有要素构成的自然系统,基本组成单元包括“源区”、“通道”和“场所”,每个组成单元都包括复杂的物理、化学和动力学过程;(2)矿床是成矿系统多尺度深部过程耦合在某一“点上”的“结果”。成矿系统在演化过程中,各种物理、化学作用对地壳和岩石圈地幔进行了强烈“改造”,留下各种物理、化学和矿物学“痕迹”,这些“痕迹”改变了岩石的地球物理性质,具有很好的可探测性;(3)基于长江中下游多尺度探测结果,提出了陆内典型成矿系统“源区”形成过程、控制岩浆/流体迁移的“通道”和物质沉淀场所的新认识;(4)在地学大数据、机器学习、人工智能不断发展的今天,成矿系统和基于成矿系统的多尺度成矿预测将是未来的重要研究方向。

关键词:成矿系统;岩石圈结构;深部过程;多尺度探测;成矿预测;深部资源工程
中图分类号:P611 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2019)04-0673-17

Multi-scale exploration of mineral system: Concept and progress —A case study in the middle and lower reaches of the Yangtze River Metallogenic Belt

LÜ Qingtian^{1,2}, MENG Guixiang^{1,2}, YAN Jiayong^{1,2}, ZHANG Kun^{1,2},
ZHAO Jinhua^{1,2}, GONG Xuejing^{1,2}

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. SinoProbe Center, Chinese Academy of Geological Sciences and China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: The guidance of metallogenic theory is urgently needed under the background that global mineral exploration is gradually turning to the target at "greenfields", deep earth and coverage areas. The concept of metallogenic system proposed at the end of the

收稿日期:2019-03-18; 改回日期:2019-07-08

基金项目:“十三五”国家重点研发计划“华南陆内成矿系统的深部过程与物质响应”(2016YFC0600200)与中国地质调查局“深部地质调查工程”(DD20160082)及国家自然科学基金(41630320)联合资助。

作者简介:吕庆田,男,1964年生,研究员,博士生导师,主要从事矿产勘查技术及应用研究;E-mail: lqt@cags.ac.cn。

last century has attracted extensive attention and study of the mining industry due to its powerful function of regional mineralization forecasting. In this study, first and foremost, the authors review the concept, components and classification of mineral systems. Then the methods of detecting and identifying the main components of the metallogenic system are discussed. Last but not least, the deep process, crustal structure and geophysical response of typical intracontinental metallogenic systems are discussed based on the authors' multi-scale exploration in the middle and lower reaches of the Yangtze River Metallogenic Belt in recent years, and the application of the concept of mineral system in the field of metallogenic prediction is also prospected. The main conclusions of this paper are as follows: (1) The mineral system is a natural system that comprises all the essential factors controlling the formation and preservation of deposits, with basic components of "source", "path" and "site". Each component includes complex physical, chemical and kinetic processes. (2) A deposit is the 'result' of multi-scale deep processes coupling at a certain 'point' in the mineral system. During the evolution of the mineral system, various physical and chemical processes have strongly "modified" the crust and lithospheric mantle, leaving behind various physical, chemical, and mineralogical "footprints" with significant detectability due to the altered geophysical properties. (3) A new model was proposed based on the multi-scale exploration in the middle and lower reaches of the Yangtze River Metallogenic Belt, for the understanding of "source", "path" and "site" of a typical intracontinental metallogenic system. (4) Mineral system based multi-scale target predication will be a prospective research direction in the future, with the continuous developing of geoscience big data, machine learning and artificial intelligence.

Key words: metallogenic system; lithospheric structure; deep process; multi-scale exploration; metallogenic forecasting; deep resources engineering

About the first author: LÜ Qingtian, male, born in 1964, professor, engages in research on mineral exploration technique and its application; E-mail: lqt@cags.ac.cn.

Fund support: Supported jointly by National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0600200), China Geological Survey Project (No. DD20160082) and National Natural Science Foundation (No. 41630320).

1 引 言

统计数据表明,近20多年国际矿产勘查单位投入产出收益不断下降,找矿难度逐渐加大、勘探成本逐年上升。分析认为,出现这种情况的背景是由于矿产勘查方向逐渐走向“绿地(Greenfield)”、深部和“覆盖层”之下(Norman, 2003; Witherly, 2012)。在这种大背景下,如何实现矿业的可持续发展是矿业界面临的巨大挑战。出路只有两条:一是创新成矿理论,提高对成矿全过程的认识,从战略层面选择靶区位置;二是研发勘查技术,提高技术的探测精度和分辨率,从战术层面确定成矿有利靶区。

矿床学是一门古老学科,已经有100多年的研究历史。20世纪前50年(1905—1955)为矿床学研究的奠基阶段,提出成矿省、成矿期的概念(Turneaure, 1955),在构造控矿、热液蚀变、铀地球化学以及矿床痕量元素分析等方面取得重大进展。随后的25年(1955—1980)是成矿理论的快速发展阶段,流体成矿(流体包裹体)、成矿地球化学、放射性元素定年、基于板块构造的区域成矿理论,以及斑岩型、VMS型等矿床模式的建立,奠定了现代成矿学的基础。20世纪80年代至今,是成矿学深

化研究阶段,在几个热点领域取得了重要发现和进展。构建了全球构造(超大陆循环过程)与矿床形成和时空分布的成因联系;发现幔源岩浆过程对Ni-Cu(PGE)矿床形成和金属分配的制约,建立了与基性和超基性岩有关的成矿模式;发现成矿流体循环可以作用于整个大陆地壳;发现海底热液系统及与之相关的矿化作用,深化了对海底热液矿床形成过程的理解;发现并建立了很多矿床类型模式,如造山型金矿、浅成低温热液矿床、碰撞型斑岩型铜矿、IOCG型矿床等,并对各种类型矿床的成矿机制从构造背景、深部岩浆过程,流体过程提出新的认识(Skinner, 2005)。

回顾矿床学的研究历史不难发现,成矿理论的研究多集中在两个“端元”,即矿床模式(局部)和区域构造背景研究(矿床时空分布的一级控制要素)。相比之下,对成矿“源区”过程,以及连接、沟通“源区”和矿床之间“桥梁”的地壳结构、岩浆-流体过程,以及由此过程留下的区域地球物理、地球化学、矿物学“痕迹”研究较少,而后者对区域成矿预测和战略靶区的选择极为重要。成矿理论(模式)研究的目的主要有两方面:一是深化对成矿过程的认识;二是利用建立的理论模式,开展成矿预

测。在全球勘探不断走向“绿地”、深部和“覆盖层”勘探的大背景下,传统的矿床模型的“预测”功能在两方面大打折扣:一是中等尺度的靶区选择,即通常所说的“带”中选“区”;二是预测“覆盖层”之下的新矿床。因此,必须提出新的成矿理论或概念来弥补在“选区”方面的不足,尤其是在覆盖严重地区的靶区选择。

为适应“绿地”、深部和覆盖层勘探的需求,加强理论指导,20世纪70—90年代国内外专家提出的“成矿系统”概念(Wyborn et al., 1994; 翟裕生等, 1998, 1999)重新引起业界的重视和兴趣,国际矿业大国先后启动了一批重要研究计划,旨在强化对成矿系统的探测研究,比如澳大利亚的 AuScope、Uncover、AusLAMP 等计划^①。成矿系统的概念是从影响矿床形成所有地质要素和过程的角度来认识成矿的全过程,该概念的提出不仅弥补了区域成矿理论(背景)与矿床模式研究之间的“空档”,还确定了新的探测与勘查目标,即成矿系统的“源区”、“通道”和“场所”,为“绿地”、深部和覆盖层勘探提供了理论基础和靶区选择目标。

本文首先回顾成矿系统的概念、组成和分类,成矿系统结构的探测方法,然后介绍国外成矿系统的探测的典型实例,最后结合笔者近20年在长江中下游成矿带开展成矿系统多尺度探测的结果,总结对长江中下游陆内成矿系统结构、深部过程的初步认识。笔者认为成矿系统的探测和研究将是深化认识中国大陆成矿作用、成矿规律的重要方法之一,对我国下一步资源勘查具有重要的指导作用。本文旨在“抛砖引玉”,希望更多的学者关注和开展中国大陆成矿系统的探测研究。

2 成矿系统的概念、组成与分类

2.1 成矿系统的概念与组成

“成矿系统(Mineral system)”概念最早于20世纪70年代出现在前苏联的地质文献中,翟裕生先生(1999)在其“论成矿系统”一文中有着清楚的描述。前苏联学者对成矿系统的定义强调两个方面,一是矿源运移和矿石堆积的作用过程;二是强调构造、物质、能量、流体等控矿因素及其相互联系(翟裕生, 1999)。西方学者最早提出成矿系统概念的是 Wyborn et al. (1994), 通过类比“含油气系统

(Petroleum System)”或“石油系统(Oil System)”的概念和组成, Wyborn et al. (1994)将成矿系统定义为:“控制矿床形成和保存的所有地质要素,包括把成矿物质从“源区”迁移、汇聚到成矿场所富集成矿和后期保存的地质过程”。他将热液成矿系统的组成归纳为7个地质要素:(1)矿化流体的来源和迁移金属的配体(Ligands, 与金属化合的离子);(2)金属物质和矿石等其他组成部分的来源;(3)迁移通道(区域),即包括大量流体流入、流出的区域(有别于含油气系统的迁移路径);(4)热梯度(驱动流体从高温向低温区运移);(5)能使足量流体活动、迁移金属的能量;(6)在成矿场所汇聚流体的动力和结构;(7)在成矿场所导致矿质沉淀的化学和(或)物理因素。可见,相对于“含油气系统”而言,成矿系统更加复杂和多样。

矿床的形成是千变万化的,不可能用一个定义理解所有的成矿过程。21世纪初迎来了成矿系统研究的“热潮”,很多学者通过对不同类型矿床的研究,从不同的视角对成矿系统的内涵进行了定义、描述、归纳和提升。Hagemann and Cassidy (2000)从流体成矿过程出发,认为任何成矿系统其主要地质要素包括:(1)驱动系统的能量(如区域应力、热和热梯度);(2)矿化流体源、迁移配体和金属,和其他矿石组成部分;(3)迁移矿化流体到“圈闭”的“通道”,包括“通道”的结构框架和流体活动时间等;(4)流体汇聚到“圈闭”或成矿场所的各种机制(矿田和矿床尺度,包括构造“圈闭”、有利的岩性、低渗透“盖层”等);(5)成矿场所导致矿质沉淀的化学和/或物理过程。

Skirrow et al. (2009)应用成矿系统方法研究了澳大利亚南部弗罗姆湖(Lake Frome)地区砂岩型铀矿,在 Wyborn et al. (1994)成矿系统概念和 Walshe et al. (2005)提出的成矿系统五问(5Q)的框架下,提出成矿系统由4个部分组成:(1)合适的金属源、流体、配体(对热液矿床)和硫(对硫化物矿床);(2)使金属迁移、流体汇聚的高渗透通道或结构;(3)驱动成矿系统的能量源;(4)驱使金属沉淀的化学和/或物理条件变化。

Huston et al. (2016)从金属元素多尺度富集的角度来理解和定义成矿系统,强调构造演化、地球动力学过程对金属富集的作用,提出了构造-成矿系统概念。他认为矿床是多尺度地球动力学过程

的“产物”,金属富集的过程是多尺度逐级进行的,从全球尺度(宏观)到微观尺度。富集过程包括:地球早期的地壳分异过程,岩浆过程,如熔融、分异、结晶、混合、不混溶过程和岩浆-热液流体演化过程,热液过程包括矿质析出和沉淀过程,如沸腾、流体混合、冷却和水-岩反应;物理过程包括重力分离、生物过程,以及沉淀后的再富集过程等。Huston et al.(2016)的构造-成矿系统概念建立了成矿系统类型与地球动力学背景(汇聚、离散和板内)之间的内在联系,强调成矿事件是一个短暂事件(≤ 1 Ma),是多尺度、多过程耦合的结果。

McCuaig and Hronsky(2014)从多要素耦合角度,认为所有成矿系统由4个关键要素构成:即有利的岩石圈结构、有利的(短暂的)地球动力学事件、成矿丰度或能力(Fertility),以及矿床的保存条件。特别强调前3个要素在空间和时间上的耦合和交织是成矿系统形成的关键。超大型矿床一般与大型、长期发育的块体边界断裂有关,这种构造具有天然的垂向“连通”性质;有利的地球动力学过程一般有3种:强挤压、伸展初期和远程应力场的转换。每一种动力学过程都可产生巨量的能量、流体(岩浆)压力梯度,从而诱发自组织的临界过程并成矿。成矿丰度是指特定地区和时间内具有的成矿能力,与地球圈层相互作用、岩石圈富集程度、地球动力学背景等有关。

Dulfer et al.(2016)利用成矿系统方法研究澳大利亚Ni-Cu-PGE成矿潜力时,提出了成矿系统包括4个组成要素:(1)驱动成矿系统的能量源(驱动力);(2)地壳和岩石圈地幔格架;(3)成矿金属来源(如Ni, Cu, PGE)和(4)矿物沉淀的物理-化学梯度。他们将成矿系统转化为勘查系统,把4个要素转化为可以填图的理论准则和填图准则,并对每一个准则赋予一定的权重,然后利用大数据和基于数据驱动的预测方法,或基于知识驱动的预测方法,在GIS系统中进行区域成矿预测。

国内矿床学家几乎在同一时期提出了成矿系统的概念并开始了研究。翟裕生等(1998,1999)提出成矿系统是在“一定时空域中由控制矿床形成、变化和保存的全部地质要素和成矿动力学过程,以及所形成的矿床系列、异常系列构成的整体,是具有成矿功能的一个自然系统”,其中包括控矿要素、

成矿作用过程、形成矿床和成矿后变化和保存4个方面基本内容。成矿系统的组成包括5个基本要素:(1)成矿物质;(2)成矿流体;(3)成矿能量;(4)成矿流体的输运通道;(5)矿石堆积场地。於崇文等(1994,2001a,2001b)从自然系统的复杂性、自组织临界性角度,提出“成矿系统是一个多组成耦合和多过程耦合的动力学系统”,是“开放、远离平衡、时空延展的动力学系统”,体现了成矿作用(核心为成矿作用动力学),空间结构(矿床地质学场)和时间结构(成矿系统的演化)“三位一体”的整体耦合与交织。他从成矿作用动力学的深度来分析成矿系统的形成过程和机理,对从本质上探讨和认识成矿规律有指导意义。

综上所述,国内外学者分别从成矿流体过程、物质汇聚能量、元素富集过程、多要素耦合和成矿动力过程等不同角度提出并诠释了成矿系统概念(模型),虽然各模型有所差异,但具有5个方面的共同要素和特征,笔者称之为5个关键要素:

(1)地球动力学或构造事件。在特定空间-时间“窗口”内诱发成矿事件,产生成矿系统“源区”,并在“源区”富集金属、形成能迁移金属的流体/岩浆;诱发成矿系统的构造事件持续时间较短,通常发生在地球动力学演化过程的突变期,比如挤压到伸展转换期、洋脊俯冲等。

(2)有利的岩石圈结构。可以是伴随构造事件新形成的构造(盆地结构),也可以是构造事件之前已经形成并重新活化的构造,这些构造提供了热液流体/岩浆在不同尺度(岩石圈、地壳、区域和局部)迁移的“通道”。

(3)驱动岩浆/流体的驱动力(过程),以及促使流体或岩浆流向矿质沉淀“场所”的汇聚机制。

(4)在流体“圈闭”或矿质沉淀“场所”促使矿质沉淀的地球化学和物理过程。地球化学过程包括:流体/岩浆混合、分异结晶、水-岩反应和相不混溶性等;物理过程包括:减压、冷却、重力分离等。围岩的化学梯度突变带通常是很好的金属“圈闭”。

(5)矿床形成后剥蚀、保存和再富集过程。

上述5个关键要素还可以归并为:“源区”(要素1和部分2)、“通道”(要素2,3)和“场所”(要素4,5)三大要素,即成矿系统的“源-运-储”。成矿系统概念的理论优势在于它是从物理学、化学和动力学角

度,理解和揭示成矿作用的全过程;它的应用优势在于成矿系统的3大要素“源-运-储”都具有可探测性(见下章分析)。因为成矿系统在演化过程中,各种物理、化学作用对地壳和岩石圈地幔进行了“强烈”改造,在一定空间范围内留下各种物理、化学和矿物学的“痕迹”,这些“痕迹”改变了原岩的地球物理性质,如速度、电性、密度、磁性等,通过现代各种地球物理手段可以探测到这些物性的变化,从而理解成矿系统的空间结构和成矿作用的过程。更有实际意义的是成矿系统可以转化为勘查系统,把成矿系统各组成要素转化为可从实际地质、地球物理、地球化学数据库中提取的信息,加以适当的权重,利用GIS、机器学习和人工智能技术等,开展多尺度的成矿预测。这方面的内容不是本文的重点,有兴趣的读者可以参考Dulfer et al. (2016)和McCuaig et al. (2010, 2014)。

2.2 成矿系统的分类

关于成矿系统的分类,学术界还没有统一的方案。一些学者根据矿床类型对成矿系统进行分类,如Lewis and Downes (2008)基于成矿物质来源,把矿床系统类型划分7大类:岩浆型、岩浆-热液型、热液型(有岩浆注入)、变质热液型、盆地流体热液型、沉积型和表生过程成矿系统,这种划分方案没有涉及构造背景或地球动力学环境。Huston et al. (2016)基于成矿与构造背景的关系提出构造-成矿系统的概念,并根据典型的地球动力学过程,如浮力相关的过程、地壳/岩石圈伸展减薄和挤压增厚过程,把构造-成矿系统简单划分为3大类,即离散系统、汇聚系统和板内系统。为了和大多数矿床成因模型和描述模型一致,Hagemann et al. (2016)则把成矿系统划分为3大类:正岩浆成矿系统(酸性岩和基性-超基性岩)、热液成矿系统(包括岩浆热液)和沉积成矿系统。

翟裕生(1999)提出了分别按照“构造动力体制”和“成矿机制”划分的方案。根据常见的构造体制类型,如伸展、挤压、走滑、隆升、沉降、剪切和撞击,分别划分出7类成矿系统。按照成矿机理,可以划分为5类:即岩浆成矿系统,热液成矿系统,沉积成矿系统,生物成矿系统,改造成矿系统。每一类又包括若干成矿系统,比如,岩浆成矿系统类包括镁铁质-超镁铁质、幔源花岗岩、壳源花岗岩、碱性

岩-碳酸岩、火山-次火山成矿系统等。翟裕生(1999)对成矿系统的划分在“纵向”上具有一定的层级(层次),即分为成矿系统大类、成矿系统类和成矿系统3个层级。

值得注意的是,沉积类成矿系统与岩浆和热液类成矿系统有一定的差别。沉积类成矿系统受低温的近地表地质过程、沉积界面或盆地流体演化控制。典型的沉积成矿系统包括砂金矿床(Au, PGE, Sn, 石英砂等)、磷矿(P±U)、沉积型铁和锰矿、卤水型锂矿和红土矿等。沉积成矿系统自成体系,可以自己成矿,也可以通过改造、再富集岩浆或热液系统形成“矿胚”层,在后期的热液作用下形成叠加矿床。

3 成矿系统组成要素的探测

矿床是成矿系统多尺度、多过程耦合在近地表某一“点上”的“结果”,成矿系统在演化过程中留下的空间“痕迹”远大于矿床本身,为探测(或勘探)提供了更大尺度的目标。合理地部署不同尺度的探测、逐级缩小探测目标,可以实现从区域到局部的成矿预测,提高发现矿床的概率。前一章已经提到成矿系统组成的5个关键要素,可以进一步归并为成矿系统的“源区”、“通道”和“场所”3个组成要素,每个要素的形成都包含一系列过程,这些过程都将对该要素区域的物性进行改变,具有很强的可探测性。

3.1 “源区”探测

对大多数内生金属矿床来说,成矿系统的“源区”可能来自岩石圈地幔(Sub-continental Lithospheric Mantle, SCML),大型岩浆房,或基性岩浆底侵带(壳幔边界)。Griffin et al. (2013)通过对南非、澳大利亚、美国西部一些克拉通的结构、年龄及组成与金刚石、PGE、Ni-Cu(PGE)和Au-Cu等矿床分布的成因联系研究,认为岩石圈地幔(SCLM)结构对这些矿床(或成矿系统)的形成具有重要的控制作用。建议矿床模型和矿产勘查研究应考虑整个岩石圈地幔(SCLM),包括软流圈、岩石圈和地壳内运行的各种过程,特别应注意岩石圈结构、组成、丰度(fertility)和SCLM的演化。Jones et al. (2009)建议使用岩石圈速度、电阻率及电阻率各向异性图像,在克拉通边缘的速度和电导率梯度带位置寻找金刚石(金伯利岩)矿床。

地球物理深部探测是直接获得岩石圈地幔结

构、组成,甚至动力学过程的主要手段。远震P(S)波、面波和噪声层析成像,可以揭示SCLM的 V_p 和 V_s 速度结构,长周期大地电磁方法可以获得岩石圈电性结构。大量研究已经表明,古老的克拉通岩石圈地幔具有高速、高阻特征,而其周缘的构造活动带、俯冲带下的SCLM则表现为低速和低阻特征(Fouch et al., 2004)。这种特征从地球物理角度的解释是,大陆(克拉通)原始岩石圈地幔形成后,可能受到各种动力学过程(边缘板块的俯冲、地幔柱上升、地幔对流等)的改造,比如富含 CO_2 的流体交代富集、深部岩浆与SCLM的物质交换(平衡)等,这些改造不仅使金属元素再富集,同时改变了SCLM的速度和电性参数,使之具有可探测性。

大规模底侵(Underplating)作用及相应的MASH过程(熔融、吸收、存储和均化)是与中酸性岩浆有关成矿系统的“源区”(Richards, 2003)。这类“源区”在深地震反射剖面上或有清晰的反映,表现为下地壳呈现密集的近水平反射(Deemer and Hurich, 1994),或下地壳密集反射且Moho面消失(Lü et al., 2018)。通常认为基性岩浆的底侵造成下地壳熔融,岩浆溶体挤出后留下的偏基性“残晶”体,后期受到伸展作用,形成密集的水平反射。但是“密集反射”并不是底侵作用的唯一证据,当底侵发生时地壳整体温度较高,下地壳就不一定出现近水平的“密集反射”,可能表现为“透明”反射(McBride et al., 2004; Heinson et al., 2018)。

3.2 “通道”探测

矿床学家很早就注意到深大断裂对矿床空间分布的控制作用,比如南美的斑岩铜矿带、西澳大利亚kalgoorlie金矿带(Drummond and Goleby, 1993)、长江中下游铁(硫)-铜成矿带(常印佛等, 1991)等,明显受线状的巨型构造控制。然而,我们对成矿系统“源区”富含金属的岩浆/流体,如何从“源区”迁移到成矿“场所”的过程、方式,即对“通道”的空间结构、各种过程和物理化学作用并不清楚。

最近,穿过澳大利亚奥林匹克坝超大型IOCG型Cu-Au-U矿的2D/3D大地电磁(MT)测量和反射地震剖面处理结果给出了世界级巨型成矿系统从“源区”、“通道”到“场所”的完整图像(Heinson et al., 2018)。图像显示,构成成矿系统“源区”的下地壳和上地幔出现一个倾向北东的“哑铃形”低阻

体^②,下地壳的低阻体($<10 \Omega \cdot m$)宽约50 km,垂向延伸在15~40 km;上地幔的低阻体几乎同样宽度,垂向延伸在40~80 km;在反射地震图像上,下地壳低阻体表现为“透明”反射。在下地壳低阻体上方,即从沉积盆地底部到脆性-韧性转换带之上的15 km之间,清楚地出现3个“指状”直立低阻体(约 $100 \Omega \cdot m$)并与下地壳的低阻“源区”相连,“指尖”部分别对应威尔达维尔矿床(WW),奥林匹克坝矿床(OD)和武尔坎(VC)矿床。而“指状”低阻体的位置在反射地震图像上表现为直立的“弱反射”区,它们切割了相对连续的基底水平反射层。

Heinson et al. (2018)认为下地壳“源区”低阻的原因可能由于放射性引起的高温(≥ 700)和含水矿物共同作用的结果,含水矿物来自上地幔或下地壳底部迁移上来的流体和岩浆。空间上与IOCG型矿床连接的“指状”低阻体“通道”,可能是成矿期在硫化物颗粒之间形成了导电石墨引起的,同时由于大气降水与深部氧化流体混合,发生矿物沉淀降低了“通道”内的波组抗差异,导致“通道”内反射减弱(Heinson et al., 2006)。

总之,除了MT和反射地震可以很好地对成矿系统的“路径”进行成像,区域重磁场中的线性构造不仅是区域断裂构造的反映,也是成矿系统“路径”的很好指示。

3.3 “场所”探测

成矿系统“末端”的成矿物质堆积“场所”是成矿流体周期排放、矿质沉淀的地方,深度一般在上地壳0~10 km,不同类型的矿床深度有所差异,空间范围往往大于矿床本身。成矿系统的“场所”包括空间上相互关联的两部分:即不断提供成矿流体的“古流体库”和矿质沉淀的空间(有时二者难于区分)。“古流体库”通常有3种类型:(1)岩浆侵入体及周边的流体系统;(2)岩石破碎形成的、具有一定体积的裂隙区域;(3)渗透性沉积含水层,周围被低渗透层封闭。“场所”的结构和过程可以类比现代海底热液硫化物的成矿过程(或现代火山系统,或热泉系统),深部的岩浆侵入体驱动含矿卤水沿断裂喷出海底,由于温度和物理化学条件的改变,矿质发生沉淀成矿。

“古流体库”通常在上地壳留下规模较大的“痕迹”(或称之为蚀变晕),与地表矿集区或矿田规模

相当,空间尺寸在数十到数百平方千米,但通常限制在上地壳尺度。这些比矿床规模更大的“蚀变晕”在地球物理位场上一定有所反映。Witherly (2014)研究了北美、澳大利亚等地区典型的斑岩型Cu-Au矿、卡林型Au矿、盆地沉积间断面型U矿、铁氧化物(IOCG)Cu-Au矿和VHMS型矿床的地球物理响应,发现区域航磁、重力异常对识别成矿系统“末端”的“痕迹”非常有用,而大地电磁(MT)、激发极化(IP)和反射地震成像技术,虽然相对较贵,但对揭示成矿系统“场所”的深部“痕迹”非常有价值。

4 长江中下游陆内成矿系统:结构与过程

4.1 矿床的时空分布与成矿系统

长江中下游是中国东部重要的陆内成矿带,产出有200多个矿床(点),其中大中型矿床80余个。空间上集中分布在7个主要矿集区,从西(南西)向东(北东)依次为:鄂东南、九瑞、安庆—贵池、铜陵、庐枞、宁芜和宁镇矿集区。传统界定长江中下游成矿带的范围:北西以襄樊—广济深断裂、郟庐断裂为界,南东以江南断裂为界,总体上呈北西狭窄、北东宽阔的“V”字型形态(图1,常印佛等,1991)。有学者进一步将成矿带划分为南、北、中三个亚带,分别受成矿带的南北边界断裂及“中轴线”的主干断裂所控制(周涛发等,2017)。成矿带成岩成矿时间已积累了大量数据(如,Mao et al., 2006, 2011; Xie et al., 2007, 2012; 范裕等, 2008, 2010, 2011; Zhou et al., 2011),周涛发等(2017)分析了各矿集区的成矿时间,发现以铜、金为主的成矿作用多发生在“断隆区”,成岩成矿时代在146~135 Ma,峰值在140 Ma,持续时间约为10 Ma;以铁为主的成矿作用多发生在“断凹区”(火山岩分布区),成岩时代为135~126 Ma,成矿作用时间则集中在130 Ma左右;而与铀、金矿化有关的A型花岗岩集中形成于126~123 Ma(范裕等,2008;周涛发等,2008, 2017)。与其他6个矿集区不同,宁镇矿集区的成矿时代为105~110 Ma,成为长江中下游成矿带的个例。按照成矿系统的定义,以及主要矿床类型及与岩浆岩的关系,笔者认为长江中下游成矿带成矿系统可以细分为:

(1)与高钾钙碱性岩浆岩有关的矽卡岩-斑岩成矿子系统。该子系统是长江中下游成矿带内最重要

的成矿系统,主要产于带内“断隆区”及“断凹区”的边缘,形成矽卡岩型或矽卡岩-斑岩型多金属矿床。成矿母岩通常为辉长岩、闪长岩、石英闪长岩和花岗质闪长岩或者为磁铁矿型花岗岩,这类岩体通常具有埃达克岩的属性(王强等, 2001, 2004; 许继峰等, 2001)。成矿时间集中于146~135 Ma(周涛发等, 2017),主要金属包括铜、金、硫铁矿、钼、钨、钴、铅、银等。代表性矿床包括:铜绿山、铁山、姚家岭、铜官山、冬瓜山、新桥、武山、城门山矿床等。

(2)与橄榄安粗岩有关的陆相火山岩铁(硫)成矿子系统。该子系统主要发育于成矿带内“断凹区”,典型矿床产于宁芜和庐枞中生代陆相火山岩盆地中。成矿作用与偏碱性玄武安山质岩浆的火山-次火山侵入活动有密切关系,含矿岩体主要包括辉长闪长玢岩、闪长玢岩和安山质火山岩,不同地质条件和控矿条件下形成矿化特征有一定差异,但属于同一成矿系统的“末端”成矿作用。成矿年龄集中于135~123 Ma,代表性矿床有:陶村矿床、凹山矿床、梅山矿床、姑山矿床等。

(3)与碱性岩有关的铜-金(铀)成矿子系统。该子系统空间上既可产出在所谓“断隆区”也可产出在“断凹区”(范裕等,2008;周涛发等,2008),成矿时间在127~123 Ma。成矿作用与A型花岗岩侵入有关,“断凹区”受碱性火山岩活动控制,表明此成矿系统形成时引张伸展已占主导地位。

笔者认为上述成矿子系统具有统一的构造背景、深部动力学特征和岩石圈结构,之所以出现不同的构造岩浆成矿系统,反映出成矿系统“源区”随时间演化的过程,代表了不同阶段、不同“源区”深度及交代富集程度、不同“源区”物质熔融及混合程度的产物。

4.2 构造背景与岩石圈结构

长江中下游成矿带中生代的构造背景是一个长期争论的问题,已有的模式可归纳为3种:一种模式认为早中生代成矿带处于碰撞造山带(印支运动)的前陆,晚中生代陆内造山是印支造山的延续,强调碰撞造山演化过程,如增厚、拆沉和地幔隆起对区域成岩成矿作用的制约(董树文, 邱瑞龙, 1993; Zhang et al., 2010);另一种模式认为中生代中国东部(包括长江中下游)处于活动大陆边缘构造背景,强调古太平洋板块的(斜向)俯冲、后撤和拆

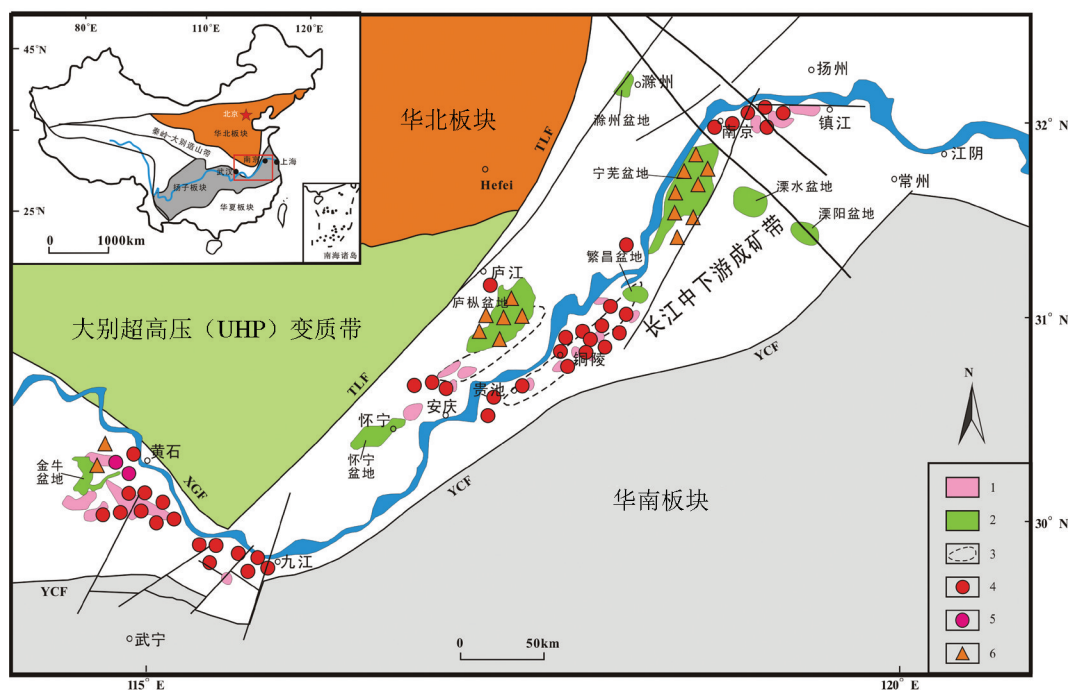


图1 长江中下游成矿带及邻区构造格架及主要矿集区位置示意图(据Pan and Dong, 1999; Mao et al., 2011 修改)
1—晚侏罗—早白垩世花岗岩 (156 ~ 137 Ma); 2—白垩纪火山岩和次火山岩 (<135 Ma); 3—A型花岗岩带; 4—斑岩—矽卡岩—层控复合型Cu—Au—Mo矿床 (>135 Ma); 5—矽卡岩型Fe—Cu矿床 (>135 Ma); 6—玢岩型Fe矿床 (<135 Ma); XGF—襄樊—广济断裂; TLF—郟庐断裂; YCF—阳新一常州断裂; 左上角插图显示长江中下游成矿带位置

Fig.1 Geological subdivision of middle and lower Yangtze River metallogenic belt and neighboring areas showing the location of the major ore concentration areas (modified from Pan and Dong, 1999; Mao et al., 2011)
1— Late Jurassic – Early Cretaceous granite (156– 137 Ma); 2— Cretaceous volcanic and subvolcanic (<135 Ma); 3— A- type granites; 4— Porphyry– skarn– stratoband complex Cu– Au– Mo deposits (>135 Ma); 5— Skarn Fe– Cu deposit (>135 Ma); 6— Porphyry– type Fe deposits (<135 Ma); XGF– Xiangfan– Guangji fault; TLF– Tancheng– Lujiang fault; YCF– Yangxin– Changzhou fault.
Insert map shows the location of the middle and lower Yangtze River metallogenic belt

沉,导致成矿带及中国东部普遍的晚中生代岩浆作用(Zhou et al., 2000, 2006);有学者用洋脊俯冲、洋壳熔融、“板片窗”等认识来解释成矿带岩浆岩带的分布和adakite质岩石的成因(Ling et al., 2009);还有专家强调中生代从特提斯构造体制与向古太平洋构造体制的转化,是大规模成岩成矿的主导机制(陶奎元等, 1998; Mao et al., 2006)。第三种模式认为印支运动和燕山运动虽然都影响到长江中下游地区,但它们是两次独立的造山运动,各自具有完整的造山演化过程(邓晋福和吴宗絮, 2001)。长江中下游地区自早侏罗世开始,处于陆内造山环境,在古太平洋板块俯冲的远程应力作用下,发生陆内造山(挤压)和随后的伸展。由于受到华北板块的阻挡,长江中下游地区可能发生“陆内俯冲”、拆沉,导致大规模岩浆活动和成矿作用(Lü et al., 2015)。

本文的重点不在于成矿背景的讨论,而是根据最近十多年来,作者及团队在长江中下游地区开展的多尺度综合地球物理探测的结果,分析成矿带陆内铁铜成矿系统根植的岩石圈地幔、地壳结构,根据现代的岩石圈地幔、地壳结构和物质性质特征(是过去留下的“痕迹”),分析中生代陆内成矿系统演化的深部过程、结构和演化。

在国家“深部探测技术与实验(SinoProbe)”等多个项目的支持下,笔者对长江中下游成矿带及邻区进行了多尺度、综合地球物理探测,工作部署概括为:“一网、两带、四区、多点”(图2),详见吕庆田等(2015)。利用这些探测数据和固定地震台网的数据,笔者及团队成员先后获得了岩石圈速度结构、电性结构和地壳的反射结构,特征总结如下。

4.2.1 岩石圈地幔结构及物质性质

(1)较薄的岩石圈厚度。Shi et al.(2013)利用205个S波接收函数叠加图像,获得了长江中下游成矿带及邻区的岩石圈厚度(LAB),平均70 km,而且呈现出向NW逐渐加深的趋势,对应成矿带下方最浅,约60 km。这与其他作者获得的中国东部岩石圈厚度60~80 km的结果是一致的(Chen et al., 2006; Sodoudi et al., 2006)。S波接收函数结果说明长江中下游成矿带存在软流圈顶界面的隆起。除了较薄的岩石圈厚度外,多种地球物理探测结果,如深地震反射(Lü et al., 2015)、折射(张明辉等,

2015)、重力反演(严加永等,2011)等,都证实长江中下游成矿带Moho面相对两侧最浅,只有28~29 km,呈“鼻状”隆起。

(2)低速的软流圈上地幔。远震层析成像结果(Jiang et al., 2013, 2014; 江国明等,2014)显示:地表到上地幔400 km,P波速度呈现两高一低的“三明治”结构,即0~50 km为高速异常,100 km和200 km为低速异常,而300~400 km又为高速异常。三维异常形态基本上平行于成矿带走向(NE-SW),而且南部较深、北部较浅,总体向南西倾斜。Ouyang et al.(2014)利用138个固定地震台和19个

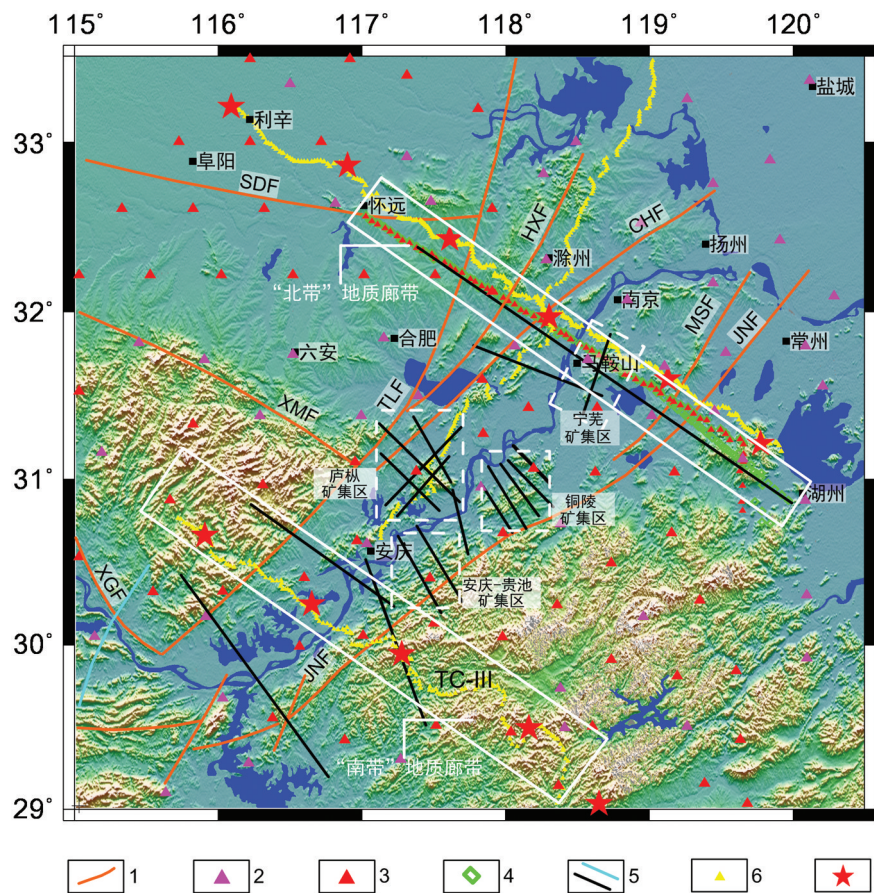


图2 长江中下游成矿带及典型矿集区多尺度综合地球物理探测工作部署图(据吕庆田等,2015)

1—主要断裂;2—固定地震台站;3—流动地震台站;4—MT测深点;5—反射地震剖面,浅蓝色为非SinoProbe剖面;6—广角反射接收点;7—广角反射激发点。TLF—郟庐断裂;XHF—响水—淮阴断裂;CHF—滁河断裂;MSF—茅山断裂;JNF—江南断裂;SDF—寿县—定远断裂;XMF—晓天—磨子潭断裂;XGF—襄樊—广济断裂

Fig.2 Map showing the layout and location of multi-scale integrated geophysical exploration over the middle and lower Yangtze Metellogenic belt and major ore concentration areas(after Lü et al., 2015)

1—Major faults; 2— Permanent seismic stations; 3— Portable broad-band seismic stations; 4—MT sounding points; 5—Reflection seismic profile, yellow represents non-SinoProbe profiles; 6—Wide-angle stations; 7—Wide-angle shot points. TLF—Tan-Lu Fault; XHF—Xiangshui-Huaiyin Fault; CHF—Chehe Fault; MSF—Maoshan fault; JNF—Jiangnan Fault; SDF—Shouxian-Dingyuan Fault; XMF—Xiaotian-Mozitan Fault; XGF—Xiangfan-Guangji Fault

流动台站数据,开展的噪声及双平面波层析成像研究,结果发现在长江中下游成矿带下方100~200 km深度范围内存在一个明显的S波低速体,且从西南的九瑞矿集区到东北的宁芜矿集区,该低速体深度逐渐变浅,速度逐渐变低,与远震P波层析成像的结果类似。笔者认为位于100~200 km之间的低速体,可能代表热的、富含流体的软流圈上地幔,其成因可能与岩石圈(下地壳)拆沉有关(吕庆田等,2014)。

(3)沟通地幔和地壳的低阻异常。最近完成的2条穿过长江中下游成矿带中段的大地电磁反演剖面显示(Zhang et al., 2019),从上地幔150 km到地壳存在一个近垂直的高导体,从地壳到岩石圈地幔高导异常随深度逐渐变宽,壳内高导体呈“弧形”。这种特征不仅仅出现在剖面上,而是整个成矿带岩石圈电性结构的基本特征(Qiu et al., 2018)。Zhang et al. (2019)利用剖面的电性特征讨论了和扬子与华北板块早中生代碰撞拼贴过程。笔者认为,除了剖面反映出的碰撞过程和结构特征外,这个高导体反映了软流圈深部流体沿块体边界(薄弱带)长期交代岩石圈的过程,使成矿带下方的岩石圈地幔由亏损地幔转化为富集地幔,富集地幔的局部熔融对成矿具有重要的控制作用(具体在4.3节分析)。当然,这是目前探测到的结果,代表岩石圈现代的电性状况,可以理解为中生代深部动力学过程或岩浆过程留下的“痕迹”。可以推测中生代研究区一定有规模更大规模的岩浆/流体通道,控制了区域岩浆活动的范围和性质。

4.2.2 地壳结构

(1)壳内巨型逆冲和“鳄鱼”构造。多条穿过成矿带的深反射地震剖面揭示出成矿带地壳结构的共同特征是:沿成矿带主带普遍存在“鳄鱼”构造,即中、上地壳物质向上逆冲,而下地壳物质向下俯冲或叠置,形成“地壳根(Crustal root)”,在相邻块体下地壳形成楔状体(吕庆田等,2015)。笔者认为这种类似碰撞造山带的构造,可能是燕山期陆内造山“活化”的结果,陆内造山“活化”使陆内块体之间发生俯冲或下地壳的叠瓦,产生“壳根”,并使地壳增厚。断裂带一旦形成将永久存在,并且由于其再次活动需要的能量最小,每次构造运动已经存在的断裂将优先活动。因此,燕山期的陆内造山过程优先导致已

有的断裂或造山带“活化”。长江中下游成矿带南东侧正好是新元古代扬子与华夏陆块碰撞形成的造山带,即江南造山带(也称“江南古陆”),而江南造山带的北西“前缘”正好位于长江中下游成矿带深部,中生代由于受古太平洋板块俯冲挤压的远程应力的影响和华北板块的阻挡,江南造山带在长江中下游地区“活化”,发生陆内“俯冲”和拆沉,形成壳内巨型逆冲和全地壳“鳄鱼”构造,并造成大规模岩浆活动,诱发出成矿带Cu-Fe(S)成矿系统。

(2)上地壳褶皱、逆冲和叠瓦构造。从地表地质看,长江中下游成矿带由所谓的“断隆区”和“断凹区”组成(常印佛等,1991),如铜陵、九瑞、宁镇等断隆区,宣城、无为等“断凹区”。实际上,穿过不同构造单元的地震反射剖面表明,晚白垩世以来的“断凹区”下面的基底构造与“隆起区”一样,由复杂的褶皱、冲断和叠瓦构造组成(Lü et al., 2013)。构造样式上有以强烈挤压为特征的紧闭褶皱,也有蜿蜒起伏的“波浪式”褶皱、漆折和叠瓦(imbrication);在构造尺度上,不同规模和尺度的构造叠加在一起,小到几十米层间的滑移面、断裂,大到二三十千米的推覆构造(吕庆田等,2015a, 2015b)。值得强调的是,过去曾称为“断凹区”的庐枞、宁芜等火山岩区实际上并不是真正意义上的“断凹区”,只是被火山岩覆盖的“隆起区”。另外,上地壳不同尺度的变形,总体发育在基底滑脱面之上,在变形强烈的成矿带主带基底也卷入了大尺度变形(Lü et al., 2015)。

上地壳变形还呈现出区域变化的特点。庐江—铜陵以北,以“长江深断裂(CJF)”为界(吕庆田等,2015b),上地壳呈现“对冲”构造样式,西侧构造面向NW倾斜,东侧构造总体向SE倾斜,而且,西侧上地壳变形呈现出紧闭褶皱、冲断和叠瓦的构造式样,而东侧宁芜火山岩盆地及其以东,上地壳表现为大尺度“波浪”式褶皱,在“波谷”和“波峰”之间不乏较陡的冲断和推覆构造(Lü et al., 2015)。庐江—铜陵以南,上地壳变形总体以逆冲、双重构造和褶皱为主。上述地壳变形的特征反映出中生代长江中下游地区陆内造山过程,即176~150 Ma期间的陆内造山挤压、145 Ma左右挤压向伸展的转化,和125~120 Ma之间的伸展垮塌过程(李文达等,1998)。笔者认为,长江中下游上地壳强烈的变形为岩浆流体运移准备了通道,为成矿作用创造了充

足的空间。

4.3 成矿系统“源区”、“通道”和“场所”

4.3.1 岩浆动力学过程与成矿系统“源区”

研究认为长江中下游地区中酸性岩是壳幔物质混合的产物(陶奎原等,1998;邢凤鸣和徐祥,1999),但对幔源岩浆的性质、基底物质和混合的比例仍有不同的认识。有学者认为长江中下游地区岩石圈地幔具有富集地幔特征,而且不同类型的基底岩石对岩浆岩的成分变化有重要的影响(常印佛等,1991;邢凤鸣和徐祥,1999);还有学者认为,长江中下游燕山期的中酸性岩浆具有埃达克岩的性质(王强,2001,2004;许继峰等,2001),强调增厚的下地壳拆沉、熔融是产生埃达克质岩浆的主要原因。分析长江中下游地区岩石圈综合探测结果,对岩浆深部过程有以下几点启示:

(1)成矿带普遍存在的、沟通地壳和岩石圈地幔的低阻带(图3)和软流圈地幔顶部的低速异常说明成矿带岩石圈地幔(下地壳)受到软流圈流体的强烈交代,形成富集地幔。富集地幔的形成可能与晚中生代陆内造山运动有关,“陆内俯冲”、岩石圈拆沉和软流圈抬升和对流,不仅使岩石圈富集不相容元素,还将氢、碳等元素通过块体边界通道带入

岩石圈,使之电阻率大大降低。

(2)反射地震发现成矿带下方存在“Moho窗口”,以及下地壳存在的地震各向异性(Shi et al., 2013)可以解释为大量基性岩浆注入(底侵)到壳幔边界,导致下地壳或上地幔顶部熔融、流动和物质交换,即发生MASH(熔融、吸收、存储、均化)过程,形成富含成矿物质的岩浆。在随后的伸展过程中,混合岩浆迁移到地壳浅部。

综上所述,长江中下游铜-铁(硫)成矿系统“源区”是富集地幔熔融、底侵,并与下地壳物质混合形成的富含铜铁的岩浆。在“源区”形成和演化过程中,由于受空间位置、时间和幔源物质注入比例的影响,形成了成矿带不同的岩浆系列和与之有关的成矿子系统。

4.3.2 成矿系统“通道”

综合地球物理探测结果发现,长江中下游成矿带下方为一巨型“鳄鱼嘴”构造,该构造由两组逆冲断裂组成(图4),分别为“长江深断裂(CJF)”和主逆冲断裂(MTF)(吕庆田等,2015b),一直延伸到中地壳(18 km深),大致与地壳的脆型到韧性的转换带对应(张国民等,2002)。在脆性的上地壳,区域构造变形和断裂控制岩浆的分离、迁移和侵位

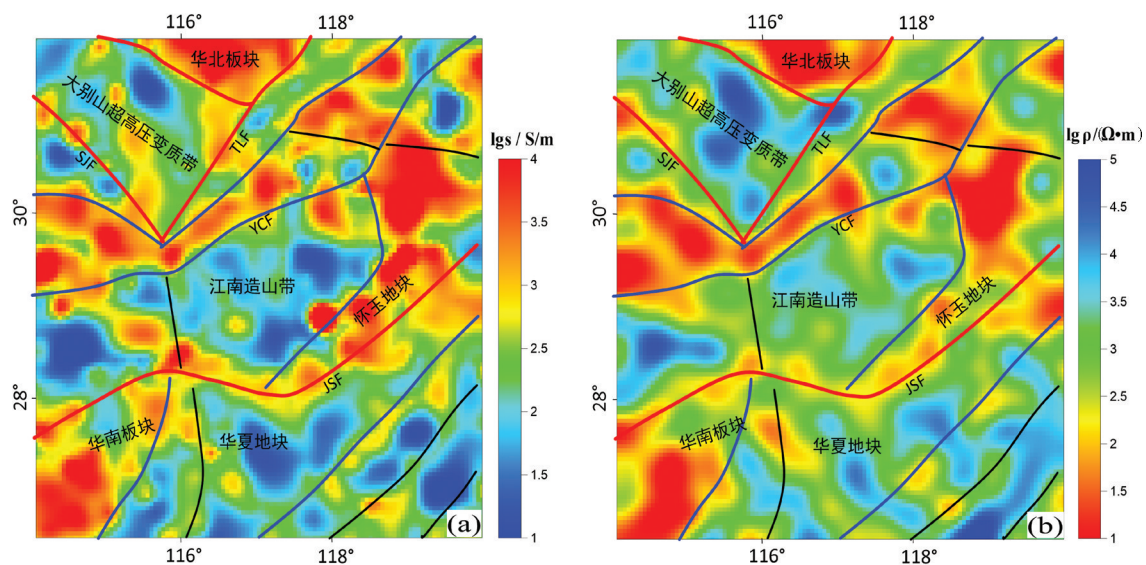


图3 长江中下游及邻区区域大地电磁反演结果(据 Qiu et al., 2018 修改)

a—0~50 km 体积电导率图像;b—20 km 深度电阻率切片图像;TLF—郯城—庐江断裂;XGF—襄樊—广济断裂;YCF—阳新一常州断裂;JSF—江山—绍兴断裂

Fig.3 The three-dimensional MT inversion results in the middle and lower reaches of Yangtze River and adjacent areas
a— The volume conductivity image from 0 to 50 km; b—The resistivity slice of 20 km in depth;TLF—Tancheng—Lujiang fault;
XGF— Xiangfan—Guangji fault;YCF—Yangxing—Changzhou fault;JSF—Jiangshan—Shaoxing fault(modified from Qiu et al., 2018)

(Vigneresse, 1995a, 1995b)。笔者认为沿成矿带存在的巨型逆冲构造及其关联的断裂,在燕山期陆内造山过程中控制成矿岩浆/流体的迁移和分布,扮演着成矿系统“通道”的角色。除了巨型逆冲构造外,上地壳存在的其他断裂、褶皱和基底滑脱等都可能参与控制岩浆最终的定位。

穿过庐枞火山岩区相互垂直的反射地震剖面发现中地壳存在巨型岩浆房,Lü et al.(2013)提出多级岩浆房模型。该模型认为岩浆在壳幔边界形成后,在区域应力作用下,通过“烟囱”管道将岩浆迁移到中地壳,由于脆性上地壳的阻挡,在此区域堆积形成次级岩浆房。中下地壳,受温度和物质性质的影响,变形以塑性变形为主,岩浆“底劈”式上侵

或“烟囱”式管道流动,可能是岩浆/流体向上迁移的主要方式。

4.3.3 成矿系统“场所”

成矿岩浆/流体迁移到地壳浅部后,由于温度逐渐降低,在岩浆周围将形成岩浆-热液系统或热液系统,围岩的地球化学性质(化学条件)、构造裂隙和应力及梯度(物理条件)将控制矿质沉淀的“场所”。分析总结已有的研究(常印佛等,1991;翟裕生等,1992;唐永成等,1998),笔者将长江中下游成矿带典型成矿系统矿质沉淀“场所”分为以下4类:

(1)岩体与围岩接触带。岩体侵入过程引起围岩破裂形成裂隙,并使岩体周围已经存在的断裂和裂隙连通,成矿流体流入断裂裂隙中,与围岩发生

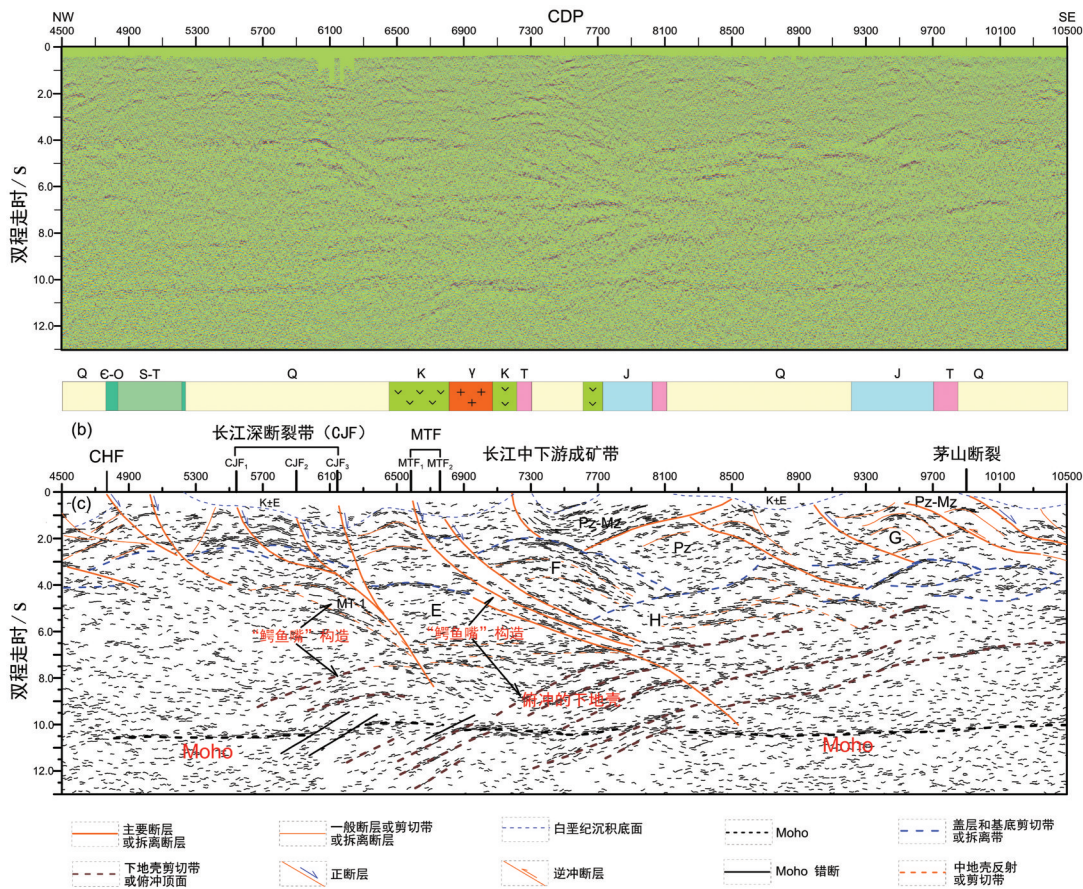


图4 NW-11-01深地震反射偏移剖面片段(a)及地质解释图(b)(据Lü et al., 2015)

注:地质解释背景为地震线条图上。注意沿江凹陷及宁芜火山岩盆地之下的“鳄鱼嘴”构造,以及长江深断裂(CJF)及主逆冲断裂(MTF)的组成和空间形态。TWT—双程走时;Pt-Pz—元古宙—古生代地层;Pz—古生代地层;Mz—中生代地层;

E, F, G, 和H表示相对独立的中地壳块体

Fig.4 Part of raw (a) and interpreted (b) migrated seismic line of NW-11-01(after Lü et al., 2015)

Note:The geological interpretation is made on the skeletonized seismic section. Note the “crocodile” structure beneath Yangtze River bed and Ningwu volcanic basin and the spatial features and composition of the Yangtze River deep fault (CJF) and the major thrust fault (MTF). TWT—Two Way Travel Time; Pt-Pz—Proterozoic-Paleozoic strata; Pz—Paleozoic strata; Mz—Mesozoic strata; E, F, G, and H represent comparatively middle crust blocks

交代,形成矽卡岩矿物组合,形成典型的接触带式(裂隙式)矽卡岩型矿床。

(2)沉积界面与层间滑脱(裂隙)面。盖层中存在诸多沉积界面,比如灰岩与泥岩、灰岩与砂岩、砂岩与泥岩等界面,由于岩性差异,这些界面在构造运动中破裂、滑移,与断裂带构成复杂的“空间”网络,并具有多层特征,为成矿流体和矿物沉淀提供了成矿空间。长江中下游成矿带广泛存在的“层控”矽卡岩型矿床,主体受控于此类“场所”控制。典型矿床如铜陵的狮子山、铜官山等。

(3)褶皱、断裂网络。构造挤压变形形成褶皱、断裂和裂隙,还有断层相关褶皱,褶皱相关裂隙等,在空间上构成断裂网络,这类断裂网络控制了热液型矿床的分布。典型矿床如铜陵的黄狮劳金矿,发育在铜陵青山背斜的转折端。褶皱、断裂网络常常与层间滑脱面组合,控制很多矽卡岩型矿床的分布。

(4)岩体内部冷却裂隙、捕虏体界面及多期岩体侵入界面。岩体侵入到浅地表冷却,形成收缩裂隙;不同期岩体侵入形成岩体内界面和捕虏体块体周界面,这些都可以形成空间,为成矿流体在近地表流动和沉淀成矿提供空间。典型的矿床类型如庐—枞矿集区的罗河、泥河“玢岩”型铁矿,铜陵姚家岭锌金多金属矿床等。

上地壳的岩浆-热液、热液系统将通过广泛的断裂(裂隙)网络,与围岩进行交代蚀变,形成蚀变矿物,改造上地壳的地球物理性质(磁性、电性、密度等)。现代观测的航磁异常、重力异常和地球化学异常等都可能与岩浆/流体活动的结果有关。因此,区域重磁异常、电性异常、地球化学异常等对认识成矿系统在浅地表的作用范围、强度非常重要,已经成为基于成矿系统概念开展成矿预测的重要指标参数。

5 结 论

成矿系统概念提出时间虽然不长,但发展态势迅猛,已经成为区域成矿学和找矿学研究的重要方向之一。我国自20世纪90年代翟裕生院士提出成矿系统概念以来,围绕中国大陆成矿系统的研究不断深化,但这些研究更多是从岩石学、地球化学角度进行的。利用现代地球物理技术直接探测成矿系统的研究,起始于本世纪初国土资源部启动的专

项计划“大型矿集区深部精细结构探测研究”,旨在通过矿集区精细结构的探测,深化认识成矿系统“末端”的成矿规律。2008年财政部专项“深部探测技术与实验(SinoProbe)”中又设立了“深部矿产资源立体探测技术与实验研究(SinoProbe-03)”项目,选择长江中下游和南岭两个成矿带开展成矿系统的深部探测研究。“十三五”国家重点研发计划“深地资源勘探开采”专项和中国地质调查局的“深部地质调查工程”,都从更大范围、更综合的方法加强对大陆成矿系统的探测研究,分别选择了碰撞造山、增生造山、复合造山和陆内造山不同构造背景的典型成矿系统,开展以岩石圈结构探测为重点的综合研究,以期从深部过程、岩石圈结构、物质等方面全面深化理解中国大陆成矿系统的形成和演化过程。

本文较系统地回顾了成矿系统概念的定义、组成和研究现状,结合笔者近20年的探测实践,以长江中下游成矿带为例,讨论了一个典型陆内成矿系统的“源区”过程、“通道”特征和“场所”构成,主要结论如下:

(1)成矿系统概念是借鉴“含油气系统(Petroleum System)”或“石油系统(Oil System)”的概念提出,用于理解金属从“源区”到成矿“场所”的富集过程。它将成矿过程看作是地球多尺度物理、化学过程和动力学过程耦合的结果,是一个特殊的地质过程,是一个可以“触摸的”、“易于理解”的自然系统,虽然金属从“源区”到成矿“场所”的富集过程的很多细节尚不清楚,至少指明了未来研究的方向。

(2)成矿系统概念强调了成矿(矿化)过程一定与特定的地质时期、特定的地质事件和特定的地质位置相关联,是多尺度、各种地质要素耦合在某一“点上”的“结果”。成矿系统的形成和演化,一定在地质历史中留下各种物理、化学和矿物学“痕迹”,这些“痕迹”改变了岩石的地球物理性质,具有很好的可探测性。

(3)长江中下游成矿带是中国东部典型的陆内成矿带,晚中生代发生大规模岩浆成矿作用。成矿系统的“源区”源于富集地幔的熔融与底侵,与中生代陆内造山过程和可能的“陆内俯冲”、岩石圈(下地壳)拆沉,软流圈上隆有关;沿成矿带普遍存在的壳内巨型逆冲断裂系统及陆内造山期的其他大型

断裂是岩浆/流体从深部迁移的主要“通道”;陆内造山期形成的褶皱、冲断层、层间滑脱,以及由它们形成的断裂(裂隙)网络,以及岩体接触带等成为成矿系统“末端”矿质沉淀的“场所”。

(4)成矿系统可以转化为勘查系统,在GIS平台下,集成探测和其他地学大数据,通过建立区域成矿模型和预测准则,可以有效开展中尺度、战略靶区优选,将是未来的重要研究方向。

致谢:感谢《中国地质》编辑部邀请出版此“深部地质调查工程专辑”。编辑部郝梓国、王学明两位老师对专辑的出版给予了精心指导和大力帮助,在此表示衷心感谢。

注释

- ① Mike Dentith, 2018, Australia Research Initiatives Related to Mineral Exploration, 内部讲课资料。
- ② Mike Dentith, 2018, Geophysical Exploration for Minerals Using a Mineral System-Based Exploration Strategy, 内部讲课资料。

References

- Chang Yinbo, Liu Xiangpei, Wu Changyan. 1991. Iron-copper Metallogenic Belt in the Middle and Lower Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-379(in Chinese).
- Chen L, Zheng T Y, Xu W W. 2006. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration[J]. *Journal of Geophysical Research*, 111: B09312.
- Deemer S J, Hurich C A. 1994. The reflectivity of magmatic underplating using the layered mafic intrusion analog[J]. *Tectonophysics*, 232: 239-255.
- Deng Jinfu, Wu Zongxu. 2001. Lithospheric thinning event in the lower Yangtze craton and Cu-Fe metallogenic belt in the middle and lower Yangtze River reaches[J]. *Geology of Anhui*, 11(2): 86-91(in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Qiu Ruilong. 1993. Tectonic and Magmatic Activities in the Anqing-Yueshan Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-158(in Chinese).
- Drummond B J, Goleby B R. 1993. Seismic reflection images of major ore-controlling structure in the Eastern Goldfields[J]. *Western Australia: Expl. Geophys.*, 24, 473-478.
- Dulfer H, Skirrow R G, Champion D C, Highet L M, Czarnotat K, Coglán R, Milligan R R. 2016. Potential for intrusion-hosted Ni-Cu-PGE sulfide deposits in Australia: A continental-scale analysis of mineral system prospectivity[J]. *Geoscience Australia Record*, 129.
- Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, Qian Cunchao, Lu Sanming, Cooke D. 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the A-type granites in the Lu-Zong(Lujiang-Zongyang) area and their geological significances[J]. *Acta Geologica Sinica*, 24(8): 1715-1724(in Chinese with English abstract).
- Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, Zhang Lejun, Qian Bing, Ma Liang, Cooke D. 2010. Geochronology of the diorite porphyrites in Ning-Wu basin and their metallogenic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2715-2728(in Chinese with English abstract).
- Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, Zhang Lejun, Qian Bing, Ma Liang, Xie Jie, Yang Xifei. 2011. Geochronology of the porphyry-like type iron deposits in Ning-Wu Basin: Evidence from ^{40}Ar - ^{39}Ar phlogopite dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 810-820(in Chinese with English abstract).
- Fouch M J, James D E, VanDecar J C, Lee S, Kaapvaal Seismic Group. 2004. Mantle seismic structure beneath the Kaapvaal and Zimbabwe Cratons[J]. *S. Afr. J. Geol.*, 107: 33-44.
- Griffin W L, Begg G C, Suzanne Y O' Reilly. 2013. Continental-root control on the genesis of magmatic ore deposits[J]. *Nature Geosci.*, 6: 905-910.
- Hagemann S G, Cassidy K. 2000. Archean orogenic lode gold deposits[C]/Hagemann S G, Brown P E (eds.). *Gold in 2000*, SEG Reviews in Economic Geology, 13: 9-68.
- Hagemann S G, Angerer T, Duuring P, Rosière C A, Figueiredo E, Silva R C, Lobato L, Hebsler A S, Walde D H G. 2016. BIF-hosted iron mineral system: A review[J]. *Ore Geol. Rev.*, 76: 317-359.
- Heinson G, Diren N G, Gill R M. 2006. Magnetotelluric evidence for a deep-crustal mineralizing system beneath the Olympic Dam iron oxide copper-gold deposit, southern Australia[J]. *Geology*, 34(7): 573-576.
- Heinson G, Didana Y, Soeffky P, Thiel S, Wise T. 2018. The crustal geophysical signature of a world-class magmatic mineral system[J]. *Scientific Report*, 8:10608. DOI:10.1038/s41598-018-29016-2.
- Huston D L, Mernagh T P, Hagemann S G, Doublier M P, Fiorentini M, Champion D C, Jaques A L, Czarnota K, Cayley R, Skirrow R, Bastrakov E. 2016. Tectonometallogenic systems- the place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples[J]. *Ore Geol. Rev.*, 76: 168-210.
- Jiang G M, Zhang G B, Lü Q T, et al. 2013. 3-D velocity model beneath the Middle-Lower Yangtze River and its implication to the deep geodynamics[J]. *Tectonophysics*, 606: 36-48.
- Jiang Guoming, Zhang Guibin, Lü Qingtian, Shi Danian, Xu Yao. 2014. Deep geodynamics of mineralization beneath the Middle-Lower Reaches of Yangtze River: Evidence from teleseismic tomography[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 907-917(in Chinese with English abstract).
- Jones A G, Evans R L, Muller M R, Hamilton M P. 2009. Area selection for diamonds using magnetotellurics: Examples from

- southern Africa[J]. *Lithos* 112S, 83–92.
- Lewis P, Downes P J. 2008. Mineral systems and processes in New South Wales: A project to enhance understanding and assist exploration[J]. *N. S. W. Geol. Surv. Quarterly Notes*, 128, 1–15.
- Li Wenda, Mao Jianren, Zhu Yunhe, Xie Huaguang. 1998. *Mesozoic Volcanic Rocks and Deposits in Southeastern China*[M]. Beijing: Seismological Press, 1–156(in Chinese).
- Ling M X, Wang F Y, Ding X, Hu Y H, Zhou J B, Zartman R E, Yang X Y, Sun W D. 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River belt, Eastern China[J]. *Economic Geology*, 104:303–321.
- Lü Q T, Yan J Y, Shi D N, Dong S W, Tang J T, Wu M A, Chang Y F. 2013. Reflection seismic imaging of the Lujiang– Zongyang volcanic area: An insight into the crustal structure and geodynamics of an ore district[J]. *Tectonophysics*, 606:60–78.
- Lü Qingtian, Dong Shuwen, Shi Danian, Tang Jingtian, Jiang Guoming, Zhang Yongqian, Xu Tao and SinoProbe–03–CJ Group. 2014. Lithosphere architecture and geodynamic model of Middle and Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt: A review from SinoProbe[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4) : 889–906(in Chinese with English abstract).
- Lü Q T, Shi D N, Liu Z D, Zhang Y Q, Dong S W, Zhao J H. 2015. Crustal structure and geodynamic of the Middle and Lower reaches of Yangtze metallogenic belt and neighboring areas: insights from deep seismic reflection profiling[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 114:704–716.
- Lü Qingtian, Dong Shuwen, Tang Jingtian, Shi Danian, Chang Yinfo and SinoProbe–03–CJ Group. 2015a. Multi–scale and integrated geophysical data revealing mineral systems and exploring for mineral deposits at depyh: A synthesis from SinoProbe– 03[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(12): 4319– 4343(in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Liu Zhendong, Dong Shuwen, Yan Jiayong, Zhang Yongqian. 2015b. The nature of Yangtze River deep fault zone: Evidence from deep seismic data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(12): 4344–4359(in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Shi Danian, Yan Jiayong, Liu Zhendong. 2018. The Mesozoic mineral systems of South China: Lithospheric structure and deep processes constrained from integrated geophysical data— preliminary results[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(z1):15.
- Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, Yu J J, Du A D, Mei Y X, Li Y F, Zang W S, Stein H J, Zhou T F. 2006. Molybdenite Re– Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu– Au– Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 29(3/4) : 307–324.
- Mao J, Xie G, Duan C, Pirajno F, Ishiyama D, Chen Y. 2011. A tectono–genetic model for porphyry–skarn–stratabound Cu–Au–Mo–Fe and magnetite–apatite deposits along the Middle–Lower Yangtze River Valley, Eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 43: 294–314.
- McBride J H, White R S, Smallwood J R, England R W. 2004. Must magmatic intrusion in the lower crust produce reflectivity? [J] *Tectonophysics*, 388: 271– 297.
- McCuaig T C, Beresford S, Hronsky, J M A. 2010. Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system[J]. *Ore Geology Reviews*, 38:128–138.
- McCuaig T C, Hronsky J M A. 2014. The mineral system concept: the key to exploration targeting[J]. *Soc. Econ. Geol. Spec. Publ.*, 18: 153–176.
- Norman R P. 2003. Geophysical developments and mine discoveries in the 20th century[J]. *The Leading Edge*, 6: 558–561.
- Ouyang L B, Li H Y, Lü Q T, Yang Y J, Li X F, Jiang G M, Zhang G B, Shi D N, Zheng D, Sun S J, Tan J, Zhou M. 2014. Crustal and uppermost mantle velocity structure and its relationship to the formation of ore districts in the Middle– Lower Yangtze River region[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 408: 378–389.
- Pan Y M, Dong P. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: Intrusion– and wall rock–hosted Cu–Fe–Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 15: 177–242.
- Qiu G G, Fang H, Lü Q Y, Pen Y, He D S, He M X. 2018. Lithospheric Electrical Characteristics of Eastern Jiangnan Orogen, South China[C]//Proceedings of the International Workshop on Environment and Geoscience–Volume 1: 415–420. DOI: 10.5220/0007431204150420.
- Richards J P. 2003. Tectono–magmatic precursors for porphyry Cu–(Mo– Au) deposit formation[J]. *Economic Geology*, 98: 1515–1533.
- Shi D N, Lü Q T, Xu W Y, et al. 2013. Crustal structure beneath the middle–lower Yangtze metallogenic belt in East China: Constraints from passive source seismic experiment on the Mesozoic intra–continental mineralization[J]. *Tectonophysics*, 606: 48–60.
- Skinner B J. 2005. Introduction: A Century of Excellence[J]. *Economic Geology*, 100th Anniv. Vol.: 1–4.
- Skirrow R G (ed.). 2009. Uranium ore–forming systems of the Lake Frome region, South Australia: Regional spatial controls and exploration criteria[J]. *Geoscience Australia Record*, 40:148.
- Soudou F, Yuan X, Liu Q, Kind R, Chen J. 2006. Lithospheric thickness beneath the Dabie Shan, central eastern China from S receiver functions[J]. *Geophysical Journal International*, 166: 1363–1367.
- Tang Yongcheng, Wu Yanchang, Chu Guozheng. 1998. *Geology of Copper–gold Polymetallic Deposits along the Yangtze River in Anhui Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–351 (in Chinese).
- Tao Kuiyuan, Mao Jianren, Yang Zhuliang, Zhao Yu, Xing Guangfu, Xue Huaimin. 1998. Mesozoic petro– tectonic associations and records of the geodynamic processes in southeast China[J]. *Earth*

- Science Frontiers, 5(4): 183–192(in Chinese with English abstract).
- Turneure F S. 1955. Metallogenic provinces and epochs[J]. Economic Geology, 50th Anniv. Vol.: 38–98.
- Vignerresse J L. 1995a. Control of granite emplacement by regional deformation[J]. Tectonophysics, 249:173–186.
- Vignerresse J L. 1995b. Crustal regime of deformation and ascent of granitic magma[J]. Tectonophysics, 249:187–202.
- Walshe J L, Cooke D R, Neumayr P. 2005. Five questions for fun and profit: a mineral system perspective on metallogenic epochs, provinces and magmatic hydrothermal Cu and Au deposits[C]// Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Springer, Berlin, Heidelberg, 477–480.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Xu Jifeng. 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite– porphyrites, Anhui Province, China[J]. Geochimica, 30(4): 353– 362(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, Bai Zhenghua, Wang Jianxin, Liu Chengxin. 2004. The geochemical comparison between the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks in southeastern Hubei: (delaminated) lower crustal melting and the genesis of porphyry copper deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 351– 360(in Chinese with English abstract).
- Witherly K. 2012. The evolution of minerals exploration over 60 years and the imperative to explore undercover[J]. The Leading Edge, 3: 292–295.
- Witherly K. 2014. Geophysical Expressions of Ore Systems—Our Current Understanding[J]. Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication 18,177–208.
- Wyborn L A I, Heinrich C A, Jaques A L. 1994. Australian Proterozoic mineral systems: Essential ingredients and mappable criteria[J]. AusIMM Publ. Ser. 5 (94): 109–115.
- Xie G Q, Mao J W, Li R L, Qü W J, Pirajno F, Du AD. 2007. Re–Os molybdenite and Ar–Ar phlogopite dating of Cu–Fe–Au–Mo (W) deposits in southeastern Hubei, China[J]. Mineralogy and Petrology, 90 (3/4): 249–270.
- Xie G Q, Mao J W, Zhao H J, Duan C, Yao L. 2012. Zircon U–Pb and phlogopite ⁴⁰Ar–³⁹Ar age of the Chengchao and Jinshandian skarn Fe deposits, Southeast Hubei Province, Middle– Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, China[J]. Mineralium Deposita, 47 (6) : 633–652.
- Xing Fengming, Xu Xiang. 1999. Anhui Yangtze Magmatite Belt and Mineralization[M]. Hefei: Anhui People's Publishing House, 1–170 (in Chinese).
- Xu Jifeng, Wang Qiang, Xu Yigang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin. 2001. Geochemistry of Anjishan intermediate– acid intrusive rocks in Ningzhen area: Constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion[J]. Acta Petrologica Sinica, 17(4): 576– 584(in Chinese with English abstract).
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J, Wang Q, Rapp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? [J]. Geology, 30: 1111–1114.
- Yan Jiayong, Lü Qingtian, Meng Guixiang, Zhao Jinhua, Deng Zhen, Liu Yan. 2011. Tectonic framework research of the lower and middle Yangtze metallogenic belt based on gravity and magnetic multi–scale edge detection[J]. Acta Geologica Sinica, 85(5): 909– 914(in Chinese with English abstract).
- Yu Chongwen. 1994. Metallogenic dynamics—theoretical systems and methodologies[J]. Earth Science Frontiers, 1(3):54– 82(in Chinese with English abstract).
- Yu Chongwen. 2001a. Fractal growth of ore– forming dynamical systems at the edge of chaos—A new metallogeny and methodology (First half) [J]. Earth Science Frontiers, 8(3):9– 28(in Chinese with English abstract).
- Yu Chongwen. 2001b. Fractal growth of ore– forming dynamical systems at the edge of chaos—A new metallogeny and methodology (Second half) [J]. Earth Science Frontiers, 8(4):471– 489(in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng, Yao Shuzhen, Lin Xinduo. 1992. Iron–copper (gold) Metallogenic Regularity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1– 120 (in Chinese).
- Zhai Yusheng. 1998. The tectonic evolution and metallogenic system of the paleocontinental margin[C]// Department of Geology, Peking University. Proceedings of the International Geosciences Symposium, Peking University. Beijing: Seismological Press, 769– 778(in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng. 1999. On the metallogenic system[J]. Earth Science Frontiers, 6(1):14–27(in Chinese with English abstract).
- Zhang C, Ma C Q, Holtz F. 2010. Origin of high– Mg adakitic magmatic enclaves from the Meichuan pluton, southern Dabie orogen (central China): Implications for delamination of the lower continental crust and melt–mantle interaction[J]. Lithos, 119: 467–484.
- Zhang Guomin, Wang Suyun, Li Li, Zhang Xiaodong, Ma Hongsheng. 2002. Seismic source depth and its tectonic significance in China. [J] Science Bulletin, 47(9): 663–668(in Chinese).
- Zhang K, Lü Q T, Yan J Y, Shao L S, Guo D, Zhang Y W. 2019. The subduction and continental collision of the North China and Yangtze Blocks: Magnetotelluric evidence from the Susong–Anqing section of Western Anhui, China[J]. Geophys. J. Int., 216: 2114–2128.
- Zhang Minghui, Xu Tao, Lü Qingtian, Bai Zhiming, Wu Chenglong, Wu Zhenbo, Teng Jiwen. 2015. 3D Moho depth beneath the middle–lower Yangtze metallogenic belt and its surrounding areas: Insight from the wide angle seismic data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(12): 4360–4372(in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Wu M G, Fan Y, Duan C, Yuan F, Zhang L J, Liu J, Qian

- B, Pirajno F and Cooke D. R. 2011. Geological, geochemical characteristics and isotope systematics of the Longqiao iron deposit in the Lu-Zong volcano-sedimentary basin, Middle-Lower Yangtze (Changjiang) River Valley, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 43 (1): 154-169.
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1665-1678(in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Fan Yu, Wang Shiwei, White N C. 2017. Metallogenic regularity and metallogenic model of the middle-lower Yangtze River Valley metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11): 3353-3372(in Chinese with English abstract).
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 326: 269-287.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S, Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 29(1):26-33.
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 71-76.
- 邓晋福, 吴宗絮. 2001. 下扬子克拉通岩石圈减薄事件与长江中下游Cu-Fe成矿带[J]. *安徽地质*, 11(2): 86-91.
- 董树文, 邱瑞龙. 1993. 安庆-岳山地区构造作用及岩浆活动[M]. 北京: 地质出版社, 1-158.
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 钱超超, 陆三明, David R.C. 2008. 安徽庐江-枞阳地区A型花岗岩的LA-ICP-MS定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 24(8): 1715-1724.
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 张乐骏, 钱兵, 马良, David R C. 2010. 宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及对成矿的指示意义[J]. *岩石学报*, 26(9): 2715-2728.
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 张乐骏, 钱兵, 马良, 谢杰, 杨西飞. 2011. 宁芜盆地玢岩型铁矿床的成矿时代: 金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar同位素年代学研究[J]. *地质学报*, 85(5): 810-820.
- 江国明, 张贵宾, 吕庆田, 史大年, 徐晓. 2014. 长江中下游地区成矿深部动力学机制: 远震层析成像证据[J]. *岩石学报*, 30(4): 907-917.
- 李文达, 毛建仁, 朱云鹤, 谢华光. 1998. 中国东南部中生代火山岩与矿床[M]. 北京: 地震出版社, 1-156.
- 吕庆田, 董树文, 史大年. 2014. 长江中下游成矿带岩石圈结构与成矿动力学模型——深部探测(SinoProbe)综述[J]. *岩石学报*, 30(4): 889-906.
- 吕庆田, 董树文, 汤井田, 史大年, 常印佛, SinoProbe-CJ项目组. 2015a. 多尺度综合地球物理探测: 揭示成矿系统、助力深部找矿——长江中下游深部探测(SinoProbe-03)进展[J]. *地球物理学报*, 58(12): 4319-4343.
- 吕庆田, 刘振东, 董树文, 严加永, 张永谦. 2015b. 长江深断裂带的构造性质: 深地震反射证据[J]. *地球物理学报*, 58(12): 4344-4359.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1-351.
- 陶奎元, 毛建仁, 杨祝良, 赵宇, 邢光福, 薛怀民. 1998. 中国东南部中生代岩石构造组合和复合动力学过程的记录[J]. *地质学前沿*, 5(4): 183-192.
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪adakite质富钠石英闪长玢岩的证据[J]. *地球化学*, 30(4): 353-362.
- 王强, 赵振华, 许继峰, 白正华, 王建新, 刘成新. 2004. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比:(拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因[J]. *岩石学报*, 20(2): 351-360.
- 邢凤鸣, 徐祥. 1999. 安徽扬子岩浆岩带与成矿[M]. 合肥: 安徽人民出版社, 1-170.
- 许继峰, 王强, 徐义刚, 赵振华, 熊小林. 2001. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制[J]. *岩石学报*, 17(4): 576-584.
- 严加永, 吕庆田, 孟贵祥, 赵金花, 邓震, 刘彦. 2011. 基于重磁多尺度边缘检测的长江中下游成矿带构造格架研究[J]. *地质学报*, 85(5): 900-914.
- 於崇文. 1994. 成矿作用动力学——理论体系和方法论[J]. *地质学前沿*, 1(3): 54-82.
- 於崇文. 2001a. 成矿动力学系统在混沌边缘分形生长——一种新的成矿理论与方法论(上)[J]. *地质学前沿*, 8(3): 9-28.
- 於崇文. 2001b. 成矿动力学系统在混沌边缘分形生长——一种新的成矿理论与方法论(下)[J]. *地质学前沿*, 8(4): 471-489.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 1-120.
- 翟裕生. 1998. 古大陆边缘构造演化和成矿系统[C]//北京大学地质系主编. 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集. 北京: 地震出版社, 769-778.
- 翟裕生. 1999. 论成矿系统[J]. *地质学前沿*, 6(1): 14-27.
- 张国民, 汪素云, 李丽, 张晓东, 马宏生. 2002. 中国大陆地震震源深度及其构造意义[J]. *科学通报*, 47(9): 663-668.
- 张明辉, 徐涛, 吕庆田, 白志明, 武澄沅, 武振波, 滕吉文. 2015. 长江中下游成矿带及邻区三维Moho面结构: 来自人工源宽角地震资料的约束[J]. *地球物理学报*, 58(12): 4360-4372.
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. *岩石学报*, 4(8): 1665-1678.
- 周涛发, 范裕, 王世伟, Noel C W. 2017. 长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式[J]. *岩石学报*, 33(11): 3353-3372.