

构造—流体—成矿系统及其动力学的 理论格架与方法体系

邓军¹ 杨立强² 翟裕生¹ 孙忠实³ 陈学明¹

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101; 3. 长春科技大学地球科学学院, 长春 130061)

摘要: 综述了构造流体与成矿系统及其动力学的研究进展、趋势, 初步提出构造—流体—成矿系统及其动力学的理论格架与方法体系, 突出构造和流体在成矿中的关键作用, 强调多种组成与多重作用过程耦合和套合的整体性及其综合效应, 并以这一理论为指导, 提出将构造—流体—成矿系统及其动力学作为一个整体, 从流体与岩石—构造环境相互作用及构造—流体演化的角度探讨成矿系统的形成过程和动力学特征, 遵循实践→认识→再实践→再认识的循序渐进原则, 在多学科综合研究的基础上, 以宏观整体性认识为指导, 深入解析代表性典型中观成矿系统时—空轨迹的规律性特色本质, 具体指导微观成矿作用过程及机理的研究, 实现研究的系统性、完整性和定量化, 从更广、更深层次上认识构造—流体—成矿系统时—空结构及本质属性。

关键词: 构造—流体—成矿系统; 动力学; 理论格架; 方法体系; 层次—整体性; 时—空结构。

中图分类号: P541; P61 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2000)01-0071-08

作者简介: 邓军, 男, 教授, 博士生导师, 1958年生, 矿床学和构造地质学专业, 主要从事区域构造、成矿流体及成矿动力学的教学和科研工作。

1 构造流体、成矿系统及其动力学研究进展和趋向

1.1 构造流体与成矿系统研究热点及趋势

成矿系统是地球物质系统的一个组成部分, 热液矿床是流体活动的直接产物, 成矿系统及其动力学是当今地球科学的前沿研究领域之一, 反映了成矿学研究系统化和定量化的趋势^[1~11]。然而, 由于成矿系统的开放性、系统状态的非平衡性、成矿过程的不可逆性和成矿作用的非线性耦合, 导致构造—流体—成矿系统的复杂性和多样性^[12~16]。目前对其研究仍缺乏系统性、完整性和定量化, 这种分散性和不定量制约着对实际问题的深入探讨和本质认识。

现代科学技术揭示的地质流体具有岩石圈动力

学、大陆动力学和成矿动力学的意义是地球科学跨世纪的重大进展之一, 而流体系统成矿作用是其核心内容。当前, 构造流体研究的若干热点: (1) 构造流体的类型、非均质性和热动力学性质; (2) 构造流体在沉积盆地和造山带的演化与迁移的多学科研究; (3) 构造流体在不同尺度断裂构造的迁移和汇集问题; (4) 大型、超大型矿床的流体流动模式和金属—碳氢化合物—水—岩石交互作用。其中构造流体动力学研究的基本内容为: (1) 构造活动与流体运动相互作用关系; (2) 应力场、温度场、渗流场耦合关系; (3) 构造作用下流体的化学动力学。而成矿作用流体动力学着重研究热传导、热扩散、热对流、物质扩散对流和结晶作用等过程的多重耦合和相互作用^[17~21]。

构造—流体时—空演化轨迹实质上就是矿质活化、迁移、聚集定位, 即矿床形成的过程。成矿系统时—空结构的统一性是进行成矿规律研究与成矿预测的前提和指导思想, 也是今后一个时期内矿床地质及找矿勘探工作的关键与核心, 因此将构造—流体

收稿日期: 1999-07-06

基金项目: 国土资源部“百名跨世纪科技人才培养计划”基金 (No. 9808); 国家科技攀登计划项目 (No. 95-预-39 和 No. 95-预-25); 国家重点基础研究发展规划项目 (No. 1999043206); 国土资源部重点科技项目 (No. 9501107)。

—成矿系统及其动力学作为一个整体,从流体与岩石—构造环境的相互作用及构造—流体演化的角度探讨成矿系统的形成过程和动力学特征,体现了与成矿有关的物质、运动、时间、空间、形成、演化的统一性、整体性和历史观,是一种崭新的科学探索。这种综观全局又突出重点的研究思路有利于从更广、更深层次上认识热液成矿系统时空结构及成因机理、充实、发展成矿学理论,并为科学找矿提供决策依据和新的思路,具有重要的理论与实践意义。

1.2 成矿系统动力学研究进展和方向

动力学研究的关键是引入了时间参数,系统动力学是了解某些复杂系统的一种构模方法,主要用于处理关于系统行为随时间变化的问题。成矿系统动力学是确定系统演化和最终结果的关键,地球各圈层相互作用是其研究的核心内容。对成矿系统动力学的研究可揭示成矿系统的本质,即成矿系统时空结构,从而使矿床成因和成矿规律研究从静态上升到动态,从定性上升到定量,对传统成矿理论将有新的突破。同时,成矿理论的深化又对成矿预测和矿产普查勘探具有重要的指导意义。

当前,对成矿系统动力学的研究主要集中于两个方面:(1)阐明形成矿集区的地球动力学背景,以造山带和盆地为两个突破口,以岩石圈变形研究为基础,深入研究这些地区构造—岩浆作用发生及活动机制,加强构造演化过程中流体迁移与分布的研究,尤其是对大型、超大型矿床形成背景和矿集区成矿演化规律的探索,将成矿学研究推向全球宏观研究的新阶段^[22-31]。(2)成矿作用本身的动力学研究,即流体输运—化学反应动力学研究。一方面继续发展地质材料和地质过程的热力学模型研究,主要集中于高温高压条件下物质相变和固—液平衡的理论与实验计算模拟,成矿系统中物质形成与分布规律的反演与预测。另一方面将非线性理论与传统地质学相结合,指导实际观测,发展计算机模拟技术,研究开放—流动体系的地球化学反应和物质迁移、沉淀动力学^[12-16,32-48]。

总的说来,成矿动力学的机制和模式尚处于探讨、摸索与完善之中。Norton等^[40]提出了多组分输运—反应过程模型;Cline等^[44]提出了浅成热液金矿床中沸腾作用引起的流体流动—硅质输运—矿质沉淀的数学模型;Cox等^[45]研究了变形变质作用过程中中温热液脉金矿质输运—沉淀模型;Benning等^[46]研究了金的硫络合物在不同热力学条件下的

输运—沉淀模型;Bowers^[47]提出了压力引起金及其他金属元素的输运—沉淀模式;Matthai等^[48]提出了流体混合沉淀模式。以剪切构造—流体—成矿系统为例,对成矿动力学机制和模式的研究,以Bonnemaizon等^[49,50]提出的“含金剪切带”3阶段成矿模式以及Sibson等^[51-53]和Robert等^[54]提出的“断裂阀—地震泵吸—周期性破裂—愈合”成矿模式最具代表性。Cameron^[55,56]提出了深部韧性剪切带氧化变质作用中金的活化迁移模式;Spencer等^[57]提出了滑脱断层成矿模式;何绍勋等^[30,31]提出了滑脱构造成矿模式;Fyfe等^[58]、Kerrick等^[59-61]和Hodgson^[62]也分别提出了各自的成矿机制和模式。

总之,现有研究多侧重于动力系统分析,即研究系统随时间的演化特征,对系统动力学变量的空间变化特征研究不够,而数值分析可弥补其不足,二者合一利于系统动力学研究趋于完整。构造—流体—成矿系统动力学计算机模拟正是二者有机结合的产物,是定性综合与定量分析的统一,它突破了地质作用过程时空背景及环境条件复杂性的束缚,具有极强的适应性,可定量模拟和展示系统的结构与发展,是动力学研究的发展方向。

2 构造—流体—成矿系统及其动力学理论格架

2.1 构造—流体—成矿系统及其动力学基本概念

构造—流体—成矿系统是指在一定时空域内,以构造—流体为主导,控制和改造矿床形成、保存的所有地质因素和作用过程及其产物的整体,是多种组成和多重作用过程耦合和套合的复杂动力学系统。其动力学是指成矿系统背景环境、成矿系统本身和成矿物质的动力学体制/机制,成矿构造、成矿流体和成矿物质的运动学、几何学特征,以及由此产生的成矿过程、聚矿能力和成矿产物之差异。这一概念和思路突出了构造和流体在成矿中的关键作用,同时也强调了多种组成和多重作用过程耦合和套合的整体性及其综合效应。

构造—流体—成矿系统中各组成要素和作用过程之间或为耦合关系,或相互套合,它们紧密联系、相互作用,从而构筑了系统整体。多组成包含多组分和多个体的双重涵义,其中多个体是指一个地质结构复杂、构造运动频繁的区域(大的成矿系统)内存

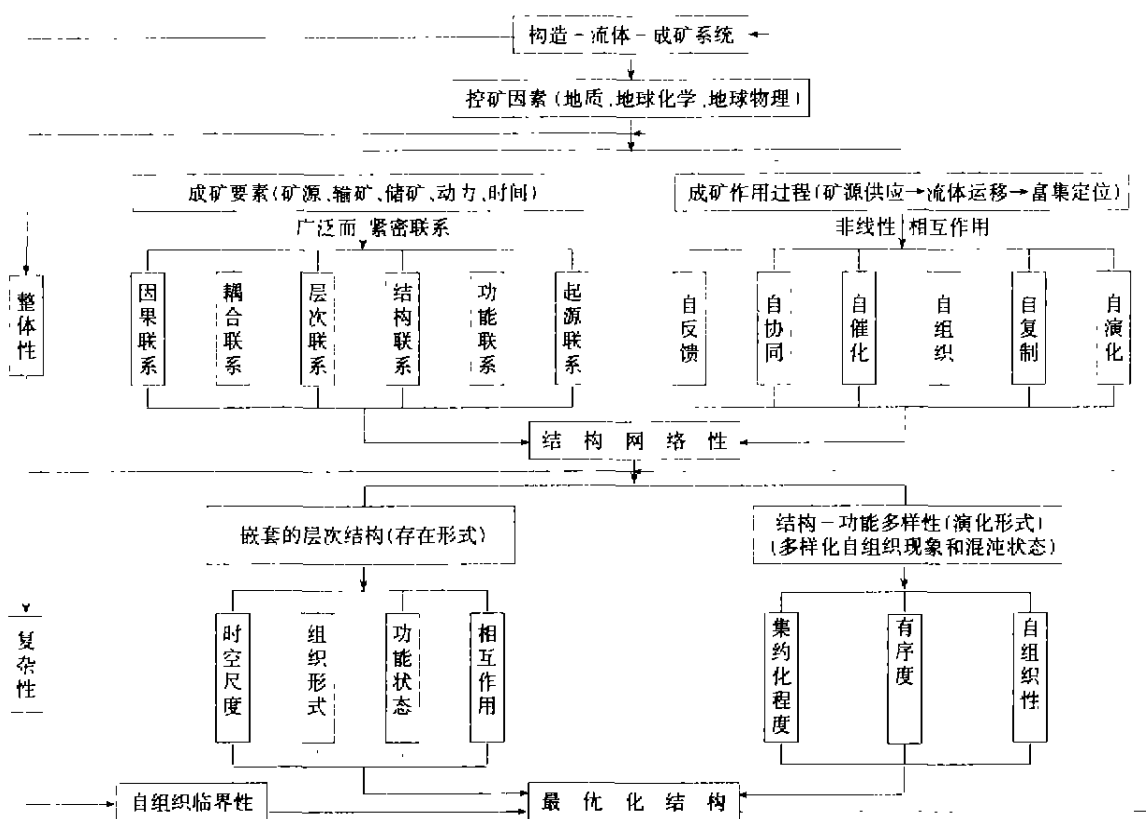


图1 构造-流体-成矿系统理论格架

Fig.1 Theoretic frame of tectonics-fluids-mineralization system

在着多个成矿系统,它们之间存在着复杂的、非线性的联系与作用。而多组分是指一个成矿系统由矿源子系统、输矿子系统、储矿子系统、动力子系统以及时间跨度等多个基本要素组成,组分种数的增加对成矿系统时-空结构的有序度具有决定性影响。多重作用过程是指控制系统形成和演化的地质作用、地球化学作用和地球物理作用及其相关过程。其中构造作用和流体作用是系统中最活跃的控矿因素,是系统动力之源,是系统形成、演化的主导因素。构造作用不仅表现为构造活动对系统进程的控制,更突出表现为对矿源子系统和成矿产物的构造改造(变形、变质、变品位、变规模、变位置)作用。流体具有媒介和作用剂的双重属性,它既是物质和能量转移、传递的载体,又是多种能源和矿液的实体。流体控制了成矿环境与成矿系统内部物质、能量的分布及运输,是联结成矿地质背景环境与成矿系统各组成要素和作用过程的纽带。流体作用是贯穿于整个成矿作用过程的主要控制因素之一,它既是各种作用过程耦合的关键环节,又是成矿物质活化、运移和聚集的媒介和作用剂。成矿作用是成矿物质活化、运

移和聚集,并最终富集成矿的全过程,是各种过程综合作用的核心,是建构系统的基本要素。成矿作用过程中,构造与流体是相互作用的一对基本控矿因素,构造动力体制控制了成矿流体的演化,构造应力场转换是驱动大规模流体远距离运移的主要原因,构造-流体的时-空演化轨迹实质上就是矿质活化、迁移、聚集定位,即矿床形成的过程。耦合是指各作用过程间互为因果、紧密相连;套合是指各作用过程间在时间、空间或数量上互相叠加、复合,各种作用过程间的耦合和套合是全方位和全尺度的。

2.2 构造-流体-成矿系统及其动力学基本特性

构造-流体-成矿系统是地球漫长历史演化中的特定作用过程及其产物构成的整体,是开放、远离平衡、时-空延展的复杂动力学系统,除具有层次-整体性、复杂性和自组织临界性的基本属性外,还具有网络性、方向性及最优化结构等特性(图1)。

系统的整体性是指系统存在及其行为的完整性和相对独立性。构造-流体-成矿系统是多种组成和多重作用过程紧密联系和相互作用的有机整体,它包括3个层次:(1)宏观地球动力学背景环境;(2)

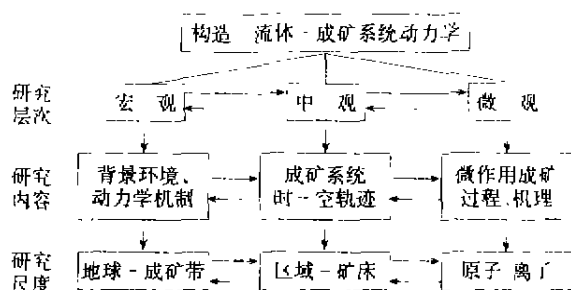


图 2 构造-流体-成矿系统及其动力学层次-整体性
Fig. 2 Gradation-integrity of the tectonics-fluids-mineralization system and its dynamics

区域-矿床成矿系统时-空轨迹;(3)微观成矿作用过程及其机理。这 3 个层次构成了成矿系统及其动力学密不可分的整体,逐级制约了成矿作用过程,称之为层次-整体性,它是系统最重要的特性(图 2)。成矿系统的方向性即其时间结构,表现为成矿作用过程及成矿系统空间结构的规律性有序变化。在控矿因素作用下,系统内部要素和成矿作用过程广泛而紧密地联系,并发生非线性相互作用(图 1),构成了构造-流体-成矿系统嵌套的层次结构和紧凑的功能结构,并表现出系统整体的成矿作用和聚矿功能。同时,正是这种紧密联系和相互作用构筑了构造-流体-成矿系统结构的网络性,使系统内部要素和作用过程处于纵横交错的复杂网络之中,每一子系统的变化都受其他子系统的影响和制约,并引起其他子系统的变化。构造-流体-成矿系统的整体网络性又衍生了其复杂性。复杂性是指系统结构-功能的层次性(存在形式)和多样性(演化形式)。层次性表现为成矿系统时-空尺度、组织形式、聚矿功能和相互作用具有嵌套的层次结构;多样性主要指成矿系统非线性作用而导生的多样化的自组织现象和混沌状态。而在有序与混沌的转变点上(混沌边缘),复杂系统呈自组织临界态,它具有最大的复杂性、演化性和创造性,其子系统之间的非线性相互作用导致涌现出大系统的总体变化,由此构成了其最优化结构。

3 构造-流体-成矿系统及其动力学方法体系

构造-流体-成矿系统及其动力学的方法体系包括认识方法和研究步骤(图 3)。

3.1 构造-流体-成矿系统及其动力学认识方法

构造-流体-成矿系统及其动力学研究的关键性主攻问题为构造-流体动力作用下,成矿系统时-空结构、聚矿功能和动力学及其耦合关系,因此应以系统论和历史观为指导,运用构造-流体-成矿系统及其动力学的思维方法,将构造-流体-成岩-成矿作为多组分与多重过程耦合和套合的动力学系统,以成矿系统时-空结构为主线,将构造和流体作为系统中最活跃的因素,采用构造地质学、显微构造地质学、构造地球化学、流体地质学、流体地球化学、流体动力学、矿床学、地球化学动力学及非线性科学等多学科综合的方法与手段,在多学科综合研究的基础上,遵循获取信息→建立模型→检验模型→预测验证→推广应用的实践→认识→再实践→再认识的循序渐进原则,将野外现场实测、解译及工程验证与室内先进测试、计算、模拟、图形方法技术的有机结合,将宏观、中观与微观,野外与室内,传统地质学与非线性科学,定性与定量作为密不可分的统一整体,进行系统综合与分析。

3.2 构造-流体-成矿系统及其动力学研究步骤

由于构造-流体-成矿系统及其动力学的层次-整体性,导致研究的层次-整体性,对其研究应在宏观整体性认识的基础上,按宏观→中观→微观逐步分层解析的过程。因此,必须在宏观整体性认识的指导下,对代表性典型中观成矿系统时-空轨迹及微观成矿作用过程、机理进行具体分析,以求深入认识中观成矿系统时-空轨迹的规律性特色本质,具体指导微观成矿作用过程及机理的研究。然而,由于构造-流体-成矿系统动力学自反馈作用,实施微观→中观→宏观的逆序过程也就成为必然。

成矿系统是区域尺度地质作用的产物,从某种意义上说,地球是一个大的成矿系统,宏观地球动力学主要涉及成矿系统背景环境的动力学体制以及其对成矿作用过程的控制和影响,即成矿作用和成矿过程的地球动力学背景,它应用大陆动力学,特别是化学地球动力学的理论和方法,立足于代表性成矿典型地段的深入解剖,以构造演化、流体活动及区域地球化学和地球物理不均一性为基础,着重研究岩石圈和深断裂成熟度以及构造动力体制转换两个方面的内容,探讨岩石圈及与相邻圈层物质和能量迁移、交换过程中,造矿组分的分散、富集机制及时-空演化规律,为成矿作用过程、机理及找矿预测提供决策依据。其研究尺度为地球-岩石圈。

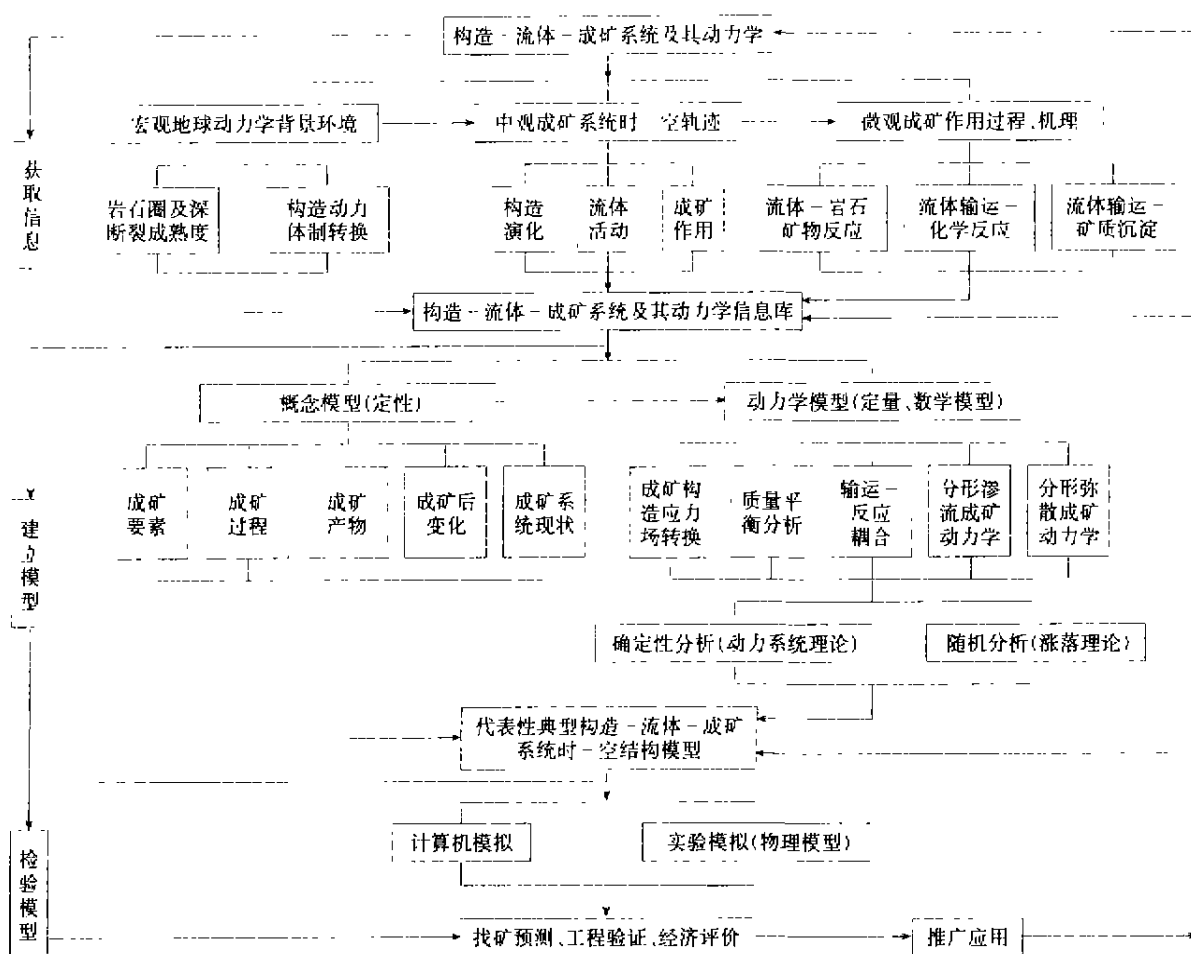


图3 构造-流体-成矿系统及其动力学方法体系

Fig. 3 Methodological system for tectonics-fluids-mineralization system and its dynamics

区域-矿床成矿系统动力学是指构造动力对成矿系统过程的启动、运行机制,成矿物质的运动学、几何学特征以及由此产生的成矿过程、聚矿能力和成矿产物之差异,它着重从流体与岩石-构造环境的相互作用及构造-流体演化的角度,进行构造演化、流体活动和成矿作用耦合效应及机制的研究,探讨成矿系统的形成过程和动力学特征,分析其成岩-成矿效应、评估成矿元素运移平衡,解析成矿系统结构、聚矿功能和动力学特征,确定构造、流体和成矿元素的示踪标志及成矿系统特征参数的定量化指标,对其研究,可以描绘出成矿系统时-空轨迹。

微观成矿系统过程动力学着重研究流体-岩石(矿物)反应、流体输运-化学反应和流体输运-成矿物质沉淀等地质-成矿过程中,化学反应(体系)类型、方向、速度,成矿流体和成矿物质输运、沉淀等问题,其机理深入到原子、离子层次。

在宏观、中观和微观综合研究的基础上,进一步

建立构造-流体-成矿系统及其动力学信息库,提出包括成矿要素、成矿过程、成矿产物、成矿后变化及成矿系统现状等5个方面的定性概念模型,进而以这一概念模型为指导,建立包括成矿构造应力场转换、质量平衡分析、输运-反应耦合、分形渗流成矿动力学和分形弥散成矿动力学等5个方面的定量动力学模型。在此基础上,将定性模型与定量模型相结合,提出代表性典型构造-流体-成矿系统时-空结构模型,并对其进行检验,包括计算机模拟和实验模拟,进而运用经过检验的模型指导找矿预测,进行工程验证及经济评价,并进一步推广应用。

运用构造-流体-成矿系统及其动力学的方法体系,对夏甸金矿及其外围道北庄子-青草沟地段受多种因素控制和影响的金矿化(体)作综合评判,探索实现有效的定位预测,取得了显著经济效益,验证了所采用的成矿预测理论与方法的合理性和有效性^[63]。

参考文献:

- [1] 翟裕生. 矿床地质学的发展前景和思维方法[J]. 地学前缘, 1994, 1(3): 1~8.
- [2] 翟裕生. 关于构造-流体-成矿作用研究的几个问题[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 230~236.
- [3] 翟裕生. 地史中成矿演化的趋势和阶段性[J]. 地学前缘, 1997, 4(3~4): 197~203.
- [4] 翟裕生. 古大陆边缘构造演化和成矿系统[A]. 见: 北京大学地质系编. 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集[C]. 北京: 地震出版社, 1998. 769~778.
- [5] 翟裕生. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 13~28.
- [6] 翟裕生, 邓军, 李晓波. 区域成矿学[M]. 北京: 地质出版社, 1999. 1~287.
- [7] 翟裕生. 成矿系统的结构框架和基本类型[A]. 见: 中国科学院地球化学研究所编. 资源环境与可持续发展[C]. 北京: 科学出版社, 1998. 1~429.
- [8] 翟裕生. 矿床的环境质量——一个新的地学研究领域[J]. 现代地质, 1998, 12(4): 462~466.
- [9] 李人澍. 成矿系统分析的理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 1996. 1~180.
- [10] 邓军, 翟裕生, 杨立强, 等. 论剪切带构造成矿系统[J]. 现代地质, 1998, 12(4): 493~500.
- [11] 邓军, 翟裕生, 杨立强, 等. 剪切带构造-流体-成矿系统动力学模拟[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 115~127.
- [12] 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等. 热液成矿作用动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993. 1~218.
- [13] 於崇文. 成矿作用动力学——理论体系和方法论[J]. 地学前缘, 1994, 1(3): 54~82.
- [14] 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等. 成矿作用动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1998. 1~230.
- [15] 於崇文. 固体地球系统的复杂性与自组织临界性[J]. 地学前缘, 1998, 5(3~4): 159~182, 347~368.
- [16] 於崇文. 大型矿床和成矿区带在混沌边缘[J]. 地学前缘, 1999, 6(1~2): 85~102, 195~230.
- [17] 杨巍然, 张文淮. 构造流体——一个新的研究领域[J]. 地学前缘, 1996, 3(3): 124~130.
- [18] 孙雄, 马宗晋, 洪汉净. 初论“构造流体动力学”[J]. 地学前缘, 1996, 3(3): 138~144.
- [19] 毕思文. 地球内部流体系统科学统一理论[J]. 地学前缘, 1996, 3(3): 1~8.
- [20] 张文淮, 张志坚, 伍刚. 成矿流体及成矿机制[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 245~252.
- [21] 贾跃明. 流体成矿系统与成矿作用研究[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 253~258.
- [22] Kutina J. The role of Mantle-rooted structural discontinuities in concentration of metals [J]. Global Tectonics and Metallogeny, 1996, (5): 79~102.
- [23] O'Driscoll E S T, Campbell I B. Ore deposits related to Australian continent rifts and ring structure [J]. Global Tectonics and Metallogeny, 1996, (2):
- [24] Hutchison C S. Economic deposits and their tectonic setting [M]. New York: Macmillan, 1994. 391.
- [25] Zhai Y S, Deng J. An outline of mineral resources of China and their tectonic setting [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1996, 43: 673~685.
- [26] Zhai Y S. Giant ore deposits related to deep structure in and around the North China Block [J]. Global Tectonics and Metallogeny, 1998, 6(3~4): 173~175.
- [27] 涂光炽. 关于超大型矿床的寻找和理论研究[J]. 矿物岩石地球化学, 1989, (2): 88~91.
- [28] 涂光炽. 超大型矿床的探寻与研究的若干问题[J]. 地学前缘, 1994, 1(3): 45~52.
- [29] 翟裕生, 张潮, 宋鸿林, 等. 大型构造与超大型矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1997. 1~180.
- [30] 何绍勋, 段嘉瑞, 刘继顺, 等. 韧性剪切带与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1996. 1~186.
- [31] 何绍勋. 有关剪切带及其成因的述评[A]. 见: 中国地质学科发展的回顾——孙云铸教授百年诞辰纪念论文集[C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995. 104~109.
- [32] Cox S F, Etheridge M A, Cas R A F, et al. Deformational style of the Castlemaine area, Bendigo-Ballarat zone: implications for evolution of crustal structure in Central Victoria, Australia [J]. Journal of Earth Sciences, 1991, 38(2): 151~170.
- [33] Cox S F. Faulting processes at high fluid pressures: an example of fault valve behavior from the Watde Gully Fault, Victoria, Australia [J]. Journal of Geophysical Research B, 1995, 100(7): 13007~13020.
- [34] Nield D A. Onset of thermohaline convection in a porous medium [J]. Wat Resources Res, 1986, (4): 553~560.
- [35] Rubin H. Effect of nonlinear stabilizing salinity profiles on thermal convection in a porous medium layer [J]. Wat Resources Res, 1973, (9): 211~221.
- [36] Griffith R W. Layered double-diffusive convection in porous media [J]. Jour Fluid Mech, 1981, 102: 221~248.
- [37] Murray B T, Chen C F. Double-diffusive convection in porous medium [J]. Jour Fluid Mech, 1989, 201: 147~166.
- [38] Kieran D. Fluid-rock interaction in crustal shear zone: a directed percolation approach [J]. Geology, 1994, 22: 843~846.

- [39] 张荣华. 地球化学从静态、平衡走向流动、非平衡的研究领域——当代地球科学进展[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991. 166~172.
- [40] Norton D, Knight J. Transport phenomena in hydrothermal systems: cooling pluton [J]. *Amer Jour Sci*, 1977, 277: 937~987.
- [41] Norton D, Taylor Jr H P. Quantitative simulation of the hydrothermal systems of crystallizing magmas on the basis of transport theory and oxygen isotope data: an analysis of the Skaergaard intrusion [J]. *Journal of Petrology*, 1979, 20(3): 4211~4286.
- [42] Johnson J W, Norton D. Theoretical prediction of hydrothermal conditions and chemical equilibrium during skarn formation in porphyry copper systems [J]. *Econ Geol*, 1985, 80(7): 1797~1823.
- [43] Cathles L M. Fluid flow and genesis of hydrothermal ore deposits [J]. *Econ Geol*, 1981, 75: 424~457.
- [44] Cline J S, Bondnar R J, Rimstidt J D. Numerical simulation of fluid flow and silica transport and deposition in boiling hydrothermal solutions: application to epithermal gold deposits [J]. *J Geophys Res*, 1992, 97: 9085~9103.
- [45] Cox S F, Wall V J, Etheridge M A, et al. Deformational and metamorphic processes in the formation mesothermal vein-hosted gold deposits — example from the Lachlan fold in Central Victoria [J]. *Ore Geol Rev*, 1991, 6: 391~423.
- [46] Bonning L G, Seward T M. Hydrosulphide complexing of gold (I) in hydrothermal solution from 150 to 500 °C and 500 to 1 500 bars [J]. *Geochim Cosmochim. Acta*, 1996, 60: 1849~1877.
- [47] Bowers T S. The deposition of gold and other metals: pressure induced fluid immiscibility and associated stable isotope signatures [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55: 2447~2434.
- [48] Matthei S K, Henely R W, Heinrich C A. Gold precipitation by fluid mixing in bedding-parallel fractures near Carbonaceous slates at the Cosmopolitan Howley gold deposit, northern Australia [J]. *Econ Geol*, 1995, 90: 2123~2142.
- [49] Bonnemaison M. "Filons de aurifere" an cas particulier de shear aurifere [J]. *Chron Rech Min*, 1986, 482: 55~66.
- [50] Bonnemaison M, Marcoux E. Les zones de cisaillement auriferes du socle hercynien francais [J]. *Chron Rech Min*, 1987, 488: 29~42.
- [51] Sibson R H. Structure and mechanics of fault zone in relation to fault-hosted mineralization [M]. Glenside: The Australian Mineral Foundation, 1989. 1~66.
- [52] Sibson R H, Francois R K. High-angle reverse faults fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits [J]. *Geology*, 1988, 16: 551~555.
- [53] Sibson R H. Rustal stress, faulting and fluid flow [A]. In: Parnell J. ed. Geological society special publications [C]. Bath, UK: The Geological Society Publication House, 1994. 69~84.
- [54] Robert F, Boulhier A M, Firdaus K. Gold-quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting [J]. *Journal of Geophysical Research B*, 1995, 100(7): 12861~12879.
- [55] Cameron E M. Derivation of gold by oxidative metamorphism of a deep ductile shear zone: Part 1. Conceptual model [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1989, 31: 135~147.
- [56] Cameron E M, Hattori K. 太古代金矿化和氧化热液流体[J]. 杨剑光译. 地质地球化学, 1988, 9: 42~54.
- [57] Spencer J E, Weley J W. Possible controls of base and precious-metal mineralization associated with Tertiary detachment faults in the lower Colorado River trough, Arizona and California [J]. *Geology*, 1986, 14(3): 195~198.
- [58] Fyfe W S, Kerrich R. Fluids and thrusting [J]. *Chem Geol*, 1989, 49: 353~362.
- [59] Kerrich R, Wyman D. Geodynamic setting of mesothermal gold deposits: an association with accretionary tectonic regimes [J]. *Geology*, 1990, 18: 882~885.
- [60] Kerrich R, Feng R. Archean geodynamics and the Abitibi Pontiac collision: implications for advection of fluids at transpressive collisional boundaries and the origin of giant quartz vein systems [J]. *Earth Sci Rev*, 1992, 32: 33~60.
- [61] Kerrich R, Cassidy K F. Temporal relationships of lode gold mineralization to accretion, magmatism, metamorphism and deformation — Archean to present: a review [J]. *Ore Geol Rev*, 1994, 9: 263~310.
- [62] Hodgson C J. The structure of shear-related vein-type gold deposit: a review [J]. *Ore Geol Rev*, 1989, (4): 233~273.
- [63] 翟裕生, 邓军, 杨立强, 等. 山东夏甸金矿及其外围隐伏矿体定位预测[J]. 地学前缘, 1999, 6(2): 230.

THEORETICAL FRAMEWORK AND METHODOLOGICAL SYSTEM OF TECTONICS-FLUIDS-MINERALIZATION SYSTEM AND DYNAMICS

Deng Jun¹ Yang Liqiang² Zhai Yusheng¹ Sun Zhongshi³ Chen Xueming¹

(1. Faculty of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geosciences and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Faculty of Earth Sciences, Changchun University of Sciences and Technology, Changchun 130061, China)

Abstract: This paper presents the advances and trends of the research into tectonics-fluids-mineralization system and dynamics. On this basis, this paper tentatively proposes the theoretical framework and methodological system of the tectonics-fluids-mineralization system and dynamics. The tectonics-fluids-mineralization system is defined as an entity comprising of all geological factors and processes controlling and transforming the formation and preservation of ore deposits and their products. With tectonics-fluids playing a leading role, this system is also defined as a complex dynamic system occurring in a certain spatial-temporal zone and consisting of the coupling and telescoping of components and processes. The corresponding dynamics is defined here as the dynamic system/mechanism of mineralization system settings, mineralization system itself and ore-forming materials. This system includes the kinetic and geometric features of ore-forming structures, fluids and materials, and the differences between ore-forming process, potential to accumulate ore-forming materials and ore-forming products. This system highlights the importance of tectonics and fluids in the ore-forming process and stresses the entity and comprehensive effects initiated by the coupling and telescoping of components and processes. In this sense, this paper points out that the tectonics-fluids-mineralization system is characterized by gradation-entity, complexity, self-organizing criticality, network, orientation and optimum structure with the gradation-entity the most important feature. Guided by the theory about this system, the authors of the present paper propose that the tectonics-fluids-mineralization system and its dynamics should be viewed as a whole body and the formation process and dynamic feature of the tectonics-fluids-mineralization system should be under investigation in terms of the interaction between fluids and petrology-tectonic environment and also of the evolution of the tectonics-fluids. Following the principle of practice - recognition - re-practice - re-recognition and guided by the macroscopic theory of entity based on the multi-discipline researches, this paper presents the deep analysis of the principle of the spatial-temporal trace of a typical mineralization system that was viewed between the microscopic and macroscopic extremes. The principle thus concluded can be used to guide the research into the microscopic mineralization process and mechanism, to actualize the system, entity, and quantification of the present research, and to understand within a wider range and a deeper layer the spatial-temporal structure and nature of the tectonics-fluids-mineralization system.

Key words: tectonics-fluids-mineralization system; dynamics; theoretical framework; methodological system; gradation-entity; spatial-temporal structure.