

剪切带构造成矿动力机制与模式<sup>\*</sup>邓 军<sup>1)</sup> 杨立强<sup>1)</sup> 孙忠实<sup>2)</sup> 方 云<sup>3)</sup> 陈玉玲<sup>1)</sup>

(1) 地球科学与资源学院 北京 100083; 2) 长春科技大学 长春 130061; 3) 工程学院 武汉 430074)

**摘 要** 动力学是确定系统演化和最终结果的关键, 系统动力学是了解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。剪切带构造成矿系统动力学主要指剪切带构造动力对成矿系统过程的启动、运行机制, 以及成矿物质的运动学、几何学特征的控制以及由此产生的成矿过程、聚矿能力和成矿产物之差异。文章着重从剪切带构造成矿动力机制和模式等方面进行阐释, 强调构造和流体对成矿的重要性, 阐述了“断裂-地震泵吸-周期性破裂愈合”的构造-流体耦合成矿动力机制, 提出了动力系统分析模式并综合了数值分析模式, 明确指出成矿系统动力学计算机模拟是动力系统分析和数值分析有机结合的产物, 是定性综合与定量分析的统一, 是成矿系统动力学研究的发展方向。

**关键词** 构造成矿动力机制 动力系统分析 数值分析 系统动力学

**分类号** P61

**第一作者简介** 邓军, 教授, 矿床学和构造地质学专业, 现主要从事区域地质构造、矿田构造及成矿动力学的教学与科研工作。

动力学研究的关键是引入了时间参数, 系统动力学是了解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。在成矿系统中, 动力学是确定系统演化和最终结果的关键。对成矿系统动力学的研究最终概括为理论模型, 即成矿系统动力学模型, 它包括动力系统分析模式和数值分析模式。动力系统分析侧重于研究系统随时间的演化特征, 而数值分析长于研究动力学变量空间的变化特征<sup>[1~7]</sup>。

剪切带构造成矿系统动力学是指剪切带构造动力对成矿系统过程的启动、运行机制, 成矿物质(包括成矿元素和成矿流体)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, 包括系统动力学演化、机制、模式和模拟等几个方面。总的说来, 剪切带成矿动力学的机制和模式尚处于探讨、摸索与完善之中, 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。Bonnemaison 等<sup>[8,9]</sup>提出的“含金剪切带”3阶段成矿模式以及 Sibson 等<sup>[10~12]</sup>和 Robert 等<sup>[13]</sup>提

出的“断裂-地震泵吸-周期性破裂愈合”成矿模式最具代表性。Cameron<sup>[14,15]</sup>提出了深部韧性剪切带氧化变质作用中金活化迁移模式; Spencer Weley 提出了滑脱断层成矿模式; 何绍勋等<sup>[16,17]</sup>提出了滑脱构造成矿模式; Kerrich 和 Fyfe<sup>[18~21]</sup>、Hodgson<sup>[22]</sup>也分别提出各自的成矿机制和模式。

## 1 剪切带构造成矿系统特征及模式

成矿作用是多种转变过程(如化学反应、形变、相变等)与输运过程(如流体流动和扩散引起的质量迁移、能量输运、动量传递等)的耦合, 是不同速率并举、各种机制交织的复杂的非线性动力学过程。动力系统分析侧重于研究系统随时间的演化特征。剪切带构造成矿系统是具有嵌套的层次结构和紧凑的功能结构的高度复杂的系统, 其作用过程的耦合具有非线性和自反馈的特征。矿源系统、输矿系统、储矿系统、动力系统等系统内部要素及各种作用过程紧密联系(结构、功能、起源), 相互作用(反馈、协同、自催化、自组织、自复制), 构成了剪切带构造成矿系统动力学网络。剪切带构造是系统几何特性与运动特性的最集中反映, 它影响和制约着系统其他组成要素的形成、分布与演

收稿日期: 1998-07-27

<sup>\*</sup>受国家科技攀登计划项目(项目号: 95-预-39和95-预-25)、原地质矿产部百名跨世纪人才培养计划基金、原地质矿产部重点科技项目(项目号: 9501107)和原地质矿产部科技攻关项目(项目号: 95-02-013)资助。

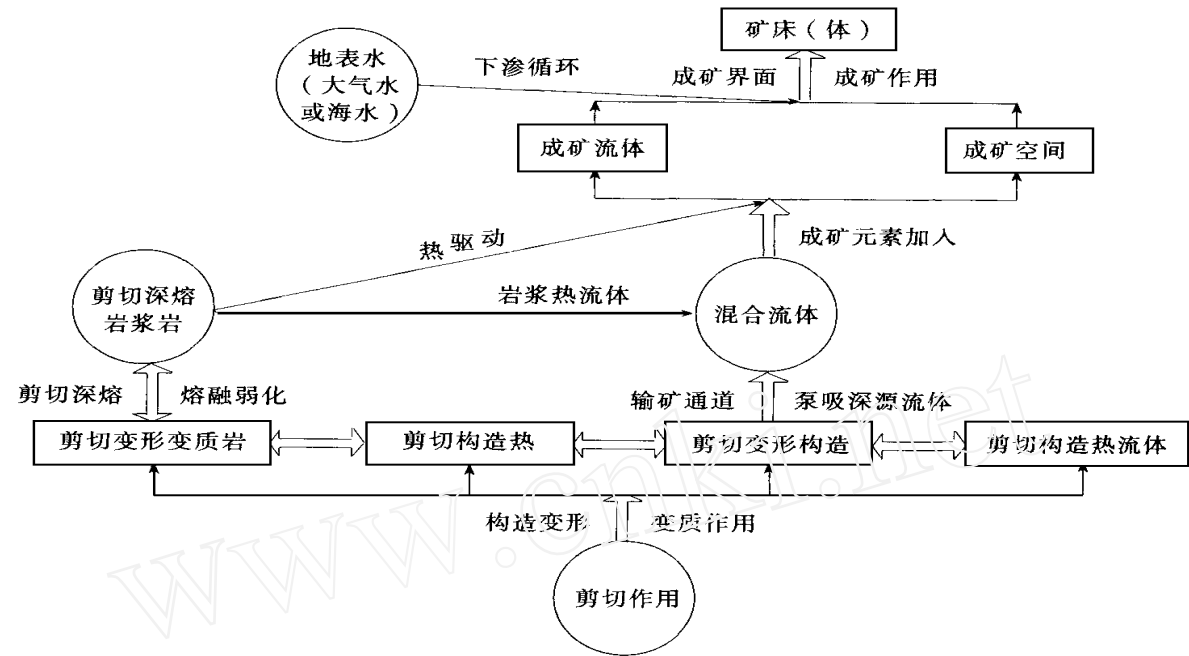


图 1 剪切带构造成矿系统动力学分析模式

Fig. 1 Kinetic model of ore-forming systems of shear zone tectonics

化，是系统结构的基础和前提，它是控制系统中各作用过程间耦合关系的主导因素，是驱动流体运动的主要动力。剪切构造热流体是系统中最活跃的组成要素，是成矿作用得以实现的中介和动力条件，流体相分离是剪切带对成矿过程最基本的控制作用（图 1）。

2 剪切带构造成矿动力机制

成矿作用过程中，构造和流体是相互作用的一对基本控矿因素，水-岩反应和流体输运是系统聚矿功能得以实现的两个关键。在构造应力作用下，岩石矿物将发生各种物理及化学变化，产生压实或扩容、压溶、剪切、交代、重结晶等作用，致使岩石矿物释放出形成时封存的流体或释放出岩石矿物的结晶水、晶间水和裂隙水，形成构造运动热流体。同时构造应力作用于岩石矿物，引起其内部形变和相变，产生构造应力场能和应变能。不同原子、离子吸收应变能和热能的能力不同，当其量值超过原子和分子的结合能和晶格能时，它们将摆脱原有晶体场束缚，活化成为原子或离子。活泼元素在剪切构造作用下易活化迁移，大多进入剪切构造热流体并向剪切带中聚集。成矿流体组分沿固体介质或流体介质从矿源岩向剪切带中扩散，当矿物晶格受到剪切作用时，扩散速度可大大提高<sup>[23]</sup>。

在早期挤压体制下，从地幔到地壳发生了强烈

的质量转移，形成花岗岩化带，而在上部层位开始产生花岗片麻岩穹隆。含金剪切带中幔源 CO<sub>2</sub> 流体沿变形构造带上升，使角闪岩进一步变质脱水，形成麻粒岩，并引起大离子亲石元素向上部地壳运移。在此过程中形成的以 CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O 为主的氧化流体有利于金的溶解，使 Au<sup>0</sup> 氧化为 Au<sup>+</sup>，从岩石中溶出的硫化物和 Au<sup>+</sup> 络合。在深部较高的温压条件下，富 CO<sub>2</sub> 流体分离成 2 相：盐水流体相和低盐度 H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub> 相，这可使与 Cl<sup>-</sup> 配合的贱金属与包括 Au、Sb 和 As 在内的其他金属分离。下地壳流体是具有氧化性质的混合流体，以 H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub> 为主，含有少量卤族元素、碱质及被溶硅酸盐成分，有利于 Au、Ag、Sb、As、S 的溶解和运移。流体在深部地壳塑性状态下运移缓慢，但由于剪切带由浅部向下部加宽可达 40 km，所以韧性区可汇聚非常大的流体量，其溶解的金和硫化物量也非常大。

随着岩石圈下部下降到更深的层位，并使更深层的地幔亏损，深断裂切割加深，其发育程度和构造体制向张剪性转换。深部构造层次流体进入中深层次剪切带中，引起广泛的退变质作用，使剪切带呈现为线型退变质带，此时最易熔的酸性岩浆逐渐被基性岩浆取代，而后又被碱性和超基性-碱性岩、碳酸岩、钾镁煌斑岩和金伯利岩取代。这些深源物质伴随张剪性深断层和大量流体活动，侵位于早期

挤压体制下形成的花岗片麻岩穹隆。由于剪切带向上变窄，引起流体聚积及流体压力  $p_f$  增高。当  $p_f > (p_n + T)$  时 ( $p_n$  为载荷压力或正应力， $T$  为抗张强度)，引起岩石破裂，产生构造扩容空间，使之成为构造低压区，并被流体充填，形成含金石英脉。进而  $p_f$  下降，流体继续积聚，重新开始上述过程，如此反复多次的运移、积聚，从而形成广泛的蚀变与矿化。此即“断裂阀-地震泵吸-周期性破裂愈合”模式 (图 2)。脉的动态、分布和内部结构与剪切应力的变化、流体压力以及近地表主应力方向有关。在成脉过程中，温压下降，过饱和的  $\text{SiO}_2$  溶液首先结晶成非晶质  $\text{SiO}_2$ ，同时以胶态形式搬运的金发生沉淀。非晶质  $\text{SiO}_2$  在中温条件下不稳定，很快重结晶成他形粒状石英集合体。在脱水缩裂过程中，金作为杂质被“清除”到石英的三联点晶界中，形成粗粒金。在石英沉淀过程中，成矿流体发生了相分离。气体组分 (包括  $\text{H}_2\text{S}$ ) 进入

富  $\text{CO}_2$  相。如果富  $\text{CO}_2$  相发生分离和位移，流体持续不混溶，将使成矿流体中  $\text{H}_2\text{S}$  耗尽，从而使以  $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$  形式搬运的金发生沉淀。

当富含  $\text{CO}_2$  等挥发分的流体到达浅部层次，大气水的混入是形成脉型及角砾岩型金矿的重要机制<sup>[24~31]</sup>。

3 剪切带构造形成矿数值分析模式

将成矿系统视为具有体积  $V$  和边界  $Q$  的开放系统，应用 Helgson 质量迁移理论和裂隙介质中流体运移的时空连续方程，可建立剪切带构造形成矿系统动力学数学模型——非线性偏微分方程组<sup>[32~39]</sup>，即质量作用方程：

$$a_i^{n,i,j} = K_j$$

质量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} + \cdot (v) = 0$$

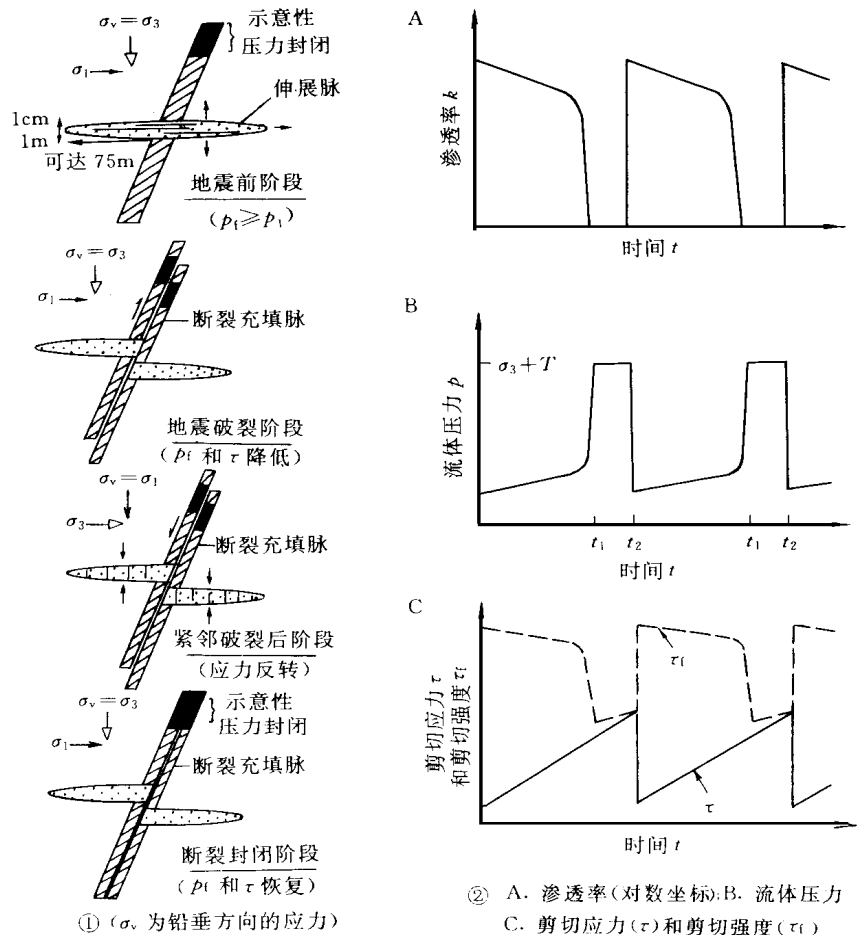


图 2 剪切带构造-流体-成矿动力机制——“断裂阀-地震泵吸-周期性破裂愈合”模式 ( 据 Robert 等, 1995; 据 Cox, 1995)

Fig. 2 Kinetic machanism of ore-forming shear tectonics in 'fault valve model '

能量守恒方程:

$$C_f \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = - \nabla \cdot (k \nabla T) + \sum_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$$

运动方程 (Navier-Stokes 方程):

$$\left( \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right) = - \nabla p + \nabla \cdot \sigma + F$$

溶质扩散方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \cdot \nabla C = - \nabla \cdot (D \cdot \nabla C)$$

状态方程:

$$= a [1 - \alpha (T - T_0) + \beta (C - C_0)]$$

上面公式中  $j$  为系统任意平衡反应,  $a$  为活度系数,  $K$  为反应速率,  $i$  为反应组分,  $\rho$  为流体密度,  $v$  为流速,  $\nabla$  为微分算子,  $t$  为反应时间,  $C_f$  为流体的定压热容,  $T$  为温度,  $k$  为流体的热传导系数,  $p$  为流体内压力,  $F$  为所受外力 (重力),  $C$  为溶质浓度,  $D$  为扩散系数,  $C_0$ 、 $T_0$  为参照浓度,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $\beta$  为溶质膨胀系数,  $\sigma$  为粘性应力张量。式中

$$ij = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) + \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k}$$

其中  $\mu$  为流体的粘度系数;  $\delta_{ij}$  为流体的第二粘度系数,  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 张量。

在剪切带构造系统动力学研究过程中, 除建立系统动力学方程外, 还要确定其边界条件和初始条件。原则上, 一旦确定了系统上述三方面的参量, 其动力学行为就可以通过计算机模拟来反演。

总之, 动力系统分析侧重于研究系统随时间的演化特征, 而数值分析长于研究动力学变量空间变化特征, 二者合一利于系统动力学研究趋于完整。剪切带构造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。

## 参 考 文 献

- 1 翟裕生. 地史中成矿演化的趋势和阶段性. 地学前缘, 1997, 4 (3~4): 197~203
- 2 李人澍. 成矿系统分析的理论与实践. 北京: 地质出版社, 1996. 180p
- 3 邓军, 翟裕生, 杨立强, 等. 论剪切带构造成矿系统. 现代地质, 1998, 12 (4): 493~500
- 4 於崇文. 成矿作用动力学——理论体系和方法论. 地学前缘, 1994, 1 (3): 54~82
- 5 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等. 热液成矿作用动力学. 武汉:

中国地质大学出版社, 1993. 218p

- 6 翟裕生, 张湖, 宋鸿林, 等. 大型构造与超大型矿床. 北京: 地质出版社, 1996. 97~174
- 7 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等. 成矿作用动力学. 北京: 地质出版社, 1998. 230p
- 8 Bonnemaison M. "Filons de aurifere" an cas particulier de shear aurifere. Chron Rech Min, 1986, 482: 55~66
- 9 Bonnemaison M, Marcoux E. Les zones de cisaillement auriferes du socle hereynien francais. Chron Rech Min, 1987, 488: 29~42
- 10 Sibson R H. Structure and mechanics of fault zone in relation to fault-hosted mineralization. Genside: The Australian Mineral Foundation, 1989. 1~66
- 11 Sibson R H, Francois R K. High-angle reverse faults fluid+pressure cycling, and mesothermal gold+quartz deposits. Geology, 1988, 16: 551~555
- 12 Sibson R H. Rustal stress, faulting and fluid flow. In: Parnell J, (ed). Geological Society Special Publications. Bath, UK: The Geological Society Publication House. 1994, 78: 69~84
- 13 Robert F, Boullier A M, Firdaus K. Gold+quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting. Journal of Geophysical Research B, 1995, 100 (7): 12861~12879
- 14 Cameron E M. Derivation of gold by oxidative metamorphism of a deep ductile shear zone: Part 1. Conceptual model. Journal of Geochemical Exploration, 1989, 31: 135~147
- 15 Cameron E M, Hattori K; 杨剑光译. 太古代金矿化和氧化热液流体. 地质地球化学, 1988, 9: 42~54
- 16 何绍勋, 段嘉瑞, 刘继顺, 等. 韧性剪切带与成矿. 北京: 地质出版社, 1996. 186p
- 17 何绍勋. 有关剪切带及其成因的述评. 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. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995. 104~109
- 18 Fyfe W S, Kerrich R. Fluids and thrusting. Chem Geol, 1989, 49: 353~362
- 19 Kerrich R, Wyman D. Geodynamic setting of mesothermal gold deposits: an association with accretionary tectonic regimes. Geology, 1990, 18: 882~885
- 20 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. Earth Sci Rev, 1992, 32: 33~60
- 21 Kerrich R, Cassidy K F. Temporal relationships of lode gold mineralization to accretion, magmatism, metamorphism and deformation—Archean to present: a review. Ore Geol Rev, 1994, 9: 263~310
- 22 Hodgson C J. The structure of shear-related vein-type gold deposit, a review. Ore Geol Rev, 1989 (4): 233~273
- 23 Boyle R W; 马万均译. 金的地球化学及金矿床. 北京: 科学出版社, 1984. 430p
- 24 Ramsay J G. Shear zone geometry: a review. J Struct Geol, 1980, (2): 83~99

- 25 Newton R C; 许碧燕译. 深部地壳中的变质流体. 国外地质科技, 1990, (8): 1~90
- 26 Newton R C; 李维海译. 深部地壳中的流体与剪切带. 世界地质, 1992, 11 (1): 138~149
- 27 Nesbitt B E, Murowchick J R, Muhlenbachs K D. Origins of lode-gold deposits in the Canadian Cardillera. Geology, 1986, (14): 501~509
- 28 . . . . . , 1991, (2): 15~24
- 29 邓军, 吕古贤, 杨立强, 等. 构造应力场转换与界面成矿. 地球学报, 1998, 19 (3): 244~250
- 30 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. Journal of Earth Sciences, 1991, 38 (2): 151~170
- 31 Cox S F. Faulting processes at high fluid pressures: an example of fault valve behavior from the Wattle Gully Fault, Victoria, Australia. Journal of Geophysical Research B, 1995, 100 (7): 13007~13020
- 32 Nield D A. Onset of thermohaline convection in a porous medium. Wat Resources Res, 1986, (4): 553~560
- 33 Rubin H. Effect of nonlinear stabilizing salinity profiles on thermal convection in a porous medium layer. Wat Resources Res, 1973, (9): 211~221
- 34 Griffith R W. Layered double-diffusive convection in porous media. Jour Fluid Mech, 1981, 102: 221~248
- 35 Murray B T, Chen C F. Double-diffusive convection in porous medium. Jour Fluid Mech, 1989, 201, 147~166
- 36 Norton D, Knight J. Transport phenomena in hydrothermal systems: Cooling pluton. Amer Jour Sci, 1977, 277: 937~987
- 37 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. Journal of Petrology, 1979, 20 (3): 4211~4286
- 38 Johnson J W, Norton D. Theoretical prediction of hydrothermal conditions and chemical equilibria during skarn formation in porphyry copper systems. Econ Geol, 1985, 80 (7): 1797~1823
- 39 Cathles L M. Fluid flow and genesis of hydrothermal ore deposits. Econ Geol, 1981, 75: 424~457

## DYNAMIC MACHANISM AND MODEL OF ORE-FORMING SYSTEM OF SHEAR ZONE TECTONICS

Deng Jun<sup>1)</sup> Yang Liqiang<sup>1)</sup> Sun Zhongshi<sup>2)</sup> Fang Yun<sup>3)</sup> Chen Yuling<sup>1)</sup>

(1) China University of Geosciences, Beijing, 100083; 2) Changchun University of Sciences and Technology, Changchun, 130061; 3) China University of Geosciences, Wuhan, 430074)

### Abstract

Dynamics of system is one way to construct model which displays the complexity of system. It mainly deals with these questions relating to behaviors of system which change with time. Ore-forming system is a super-complex entirety and is made up of multi-lever time-scale, manifold ore-controlling parameters and multifarious processes. Ore-forming processes are complex non-linear dynamic processes. Dynamics is the key to define the evolution and final outcome of the system. Dynamics of ore-forming system of shear zone tectonics contains the machanism of how the dynamic of the system of ductile-brittle shearing start and continue the processes of the system, and the characters of kinematics and geometry of ore-forming materials and the differences of ore-forming processes, capacity and outcome caused by them. The authors emphatically expound the dynamics of the system's evolution, machanism, model and simulation, and emphasis the importance of tectonics and fluid. The computer simulation of dynamics of ore-forming systems is the combination of dynamic system analysis with numerical analysis and is the enterity of quantitative analysis and qualititative synthesis. In the paper, the authors expound the concrete methods and the theoratical and practical significance of researches of dynamics of ore-forming systems of shear zone.

**Key words:** tectonic ore-forming system, dynamic system analysis, numeral analysis, dynamic of system