

# 剪切蚀变与物质迁移及金的富集——以胶东矿集区为例

邓军<sup>1</sup> 方云<sup>2</sup> 杨立强<sup>3</sup> 丁式江<sup>1</sup> 肖荣阁<sup>1</sup> 彭润民<sup>1</sup> 王建平<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学工程学院, 武汉 430074; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101)

**摘要:** 运用定量计算和计算机模拟与传统地质学相结合的方法, 研究胶东矿集区中剪切构造变形和围岩蚀变与物质迁移及金矿富集的相互关系. 结果表明, 在剪切—蚀变作用过程中, 各种物质组分发生了不同程度的迁移, 存在较大的流体/岩石比值, 体积应变为增加型. 成矿作用发生的最主要原因是剪切挤压—拉张构造作用引起的成矿元素活化→运移→富集. 成矿早期, 形成以包体金为主的贫矿石; 成矿晚期, 形成含裂隙金和多金属细脉的富矿石.

**关键词:** 剪切—蚀变; 物质迁移; 成矿作用.

**中图分类号:** P542; P618.51 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2383(2000)04-0428-05

**作者简介:** 邓军, 男, 1958年生, 教授, 博士生导师, 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.

自 Ramsay 等<sup>[1]</sup> 系统介绍韧性剪切带研究成果, 尤其是 Bonnemaison<sup>[2]</sup> 提出“含金剪切带”型成矿模式以来, 对剪切带的研究迅速发展并深化, 并取得了大量成果. 剪切带流体成矿系统<sup>[3~5]</sup> 概念主要包括扩散作用、脱水作用、流体—岩石反应、构造变形和晶格重组 5 种可能的作用过程, 并强调了构造变形与流体—岩石反应的不均一性对成矿界面上物质迁移和能量交换及金矿富集的重要意义. 本文以胶东矿集区为例, 运用 Gresens<sup>[6]</sup> 方程、Grant<sup>[7]</sup> 等比线分析法、O'hara<sup>[8]</sup> 微量元素法与传统地质学相结合的方法, 获取剪切构造变形与围岩蚀变相互关系的信息. 在此基础上, 探讨金的富集成矿机制.

## 1 剪切构造变形与含矿围岩蚀变

在剪切带流体成矿系统中, 成矿流体与变形岩石间物质迁移和能量交换的反馈耦合, 改变了原岩的化学成分, 导致系统结构的不均一性. 岩石变形结构构造的形成与物质成分的调整同步进行<sup>[9]</sup>, 成矿流体携带成矿组分沿孔隙或裂隙介质运移→聚集→

沉淀→成矿的过程中与围岩进行着复杂的相互作用(耦合). 热液蚀变组合反映了开放体系下剪切带与含矿围岩中达到流体、化学、物理(机械)、同位素、热力学和动力学平衡的产物.

胶东矿集区岩浆活动、流体演化和成矿作用受深断裂及剪切带构造系统控制明显. 大型剪切带是岩石圈内连续递进应变的构造形变带, 它间歇性地发生左、右行扭动并形成次级羽状裂隙, 同时发生蚀变、矿化作用. 而与金矿化关系密切的同构造蚀变主要为成矿作用早期的红化花岗岩蚀变和中晚期的绢英岩化蚀变. 一般来说, 在早期剪压体制下, 流体组分、成岩组分和成矿组分大量交换运移; 在晚期剪张体制下, 热液析出、交代作用和成矿作用发生<sup>[10~14]</sup>, 产生绢英岩化蚀变, 而在这一转换过程中, 形成红化花岗岩.

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窿. 与此同时, 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; 流体组分、成岩组分和成矿组分的质量转移形成所谓“薄膜机制”, 产生具含矿碱性流体蚀变面貌的同构造期交代岩, 红化花岗岩蚀变作用开始. 这些交代岩的基础是一个具有高度组织结构性的输导转移流体系统, 也是糜棱岩或剪切岩

收稿日期: 2000-03-26

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); 国家重点基础研究发展规划项目(No. G1999043206); 国家攀登计划项目(No. 95-预-25 和 No. 95-预-39).

表 1 胶东焦家金矿蚀变岩石平均化学成分

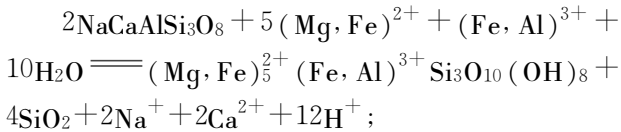
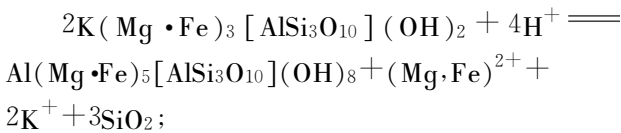
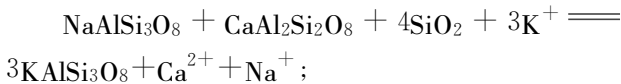
Table 1 Mean chemical components of altered rocks in Jiaojia gold deposit of Jiaodong area

岩 性	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
片麻状花岗岩(2)	72.85	14.05	0.75	0.54	0.30	1.28	3.73	4.29	0.51	0.109	0.02	0.01
红化花岗岩(3)	71.80	14.92	0.34	0.54	0.20	1.42	4.12	4.63	0.96	0.133	0.04	0.03
绢英岩(3)	75.00	12.89	1.56	0.71	0.28	1.09	0.11	4.95	1.18	0.114	0.03	0.08
岩 性	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Bi	Ni	Hg	Mo	Ba
片麻状花岗岩(2)	5.70	145.00	13.70	1 837.00	62.80	3.60	0.42	0.18	1.30	3.90	0.52	2 147.00
红化花岗岩(3)	9.78	118.20	4.22	30.10	31.96	0.79	0.11	0.12	3.32	23.00	0.41	2 134.00
绢英岩(3)	417.14	4 286.60	87.98	953.81	1 376.00	5.36	1.51	2.87	5.08	21.40	0.47	760.20

据原地质矿产部地球物理地球化学勘察研究所(1997)测试结果计算:( )内为样品数;单位,氧化物为 10<sup>-2</sup>, Au, Ag, Hg 为 10<sup>-9</sup>, 其余为 10<sup>-6</sup>.

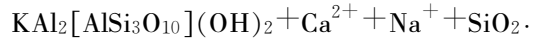
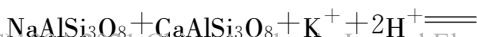
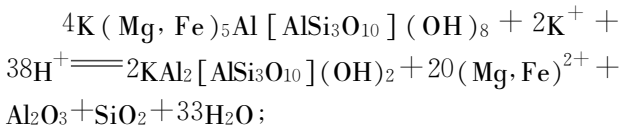
带交代变质系统,它在应力消失后仍继续存在并长期起作用.

交代蚀变同期,深断裂切割加深,构造应力场从韧性挤压变形体制向韧性剪切变形体制转换.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、碳酸盐岩、钾镁煌斑岩和金伯利岩取代,并形成相应交代岩,红化花岗岩发育成熟.在红化蚀变过程中,主要是碱金属元素的迁出,以钾化、金红石化及绿泥石化为主.此时 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为迁出组分,其主要化学反应如下:



即斜长石钾化、斜长石及黑云母绿泥石化,消耗掉 Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 离子,而增多 K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup> 等离子.

交代蚀变后期,构造应力场从韧性变形体制向脆性剪张变形体制转换,即转变为应力松弛阶段.岩石破裂,产生构造扩容空间,形成含金石英脉,发育广泛的绢英岩化与矿化.此时,大量 SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及金属成矿元素迁入,其主要化学反应为:

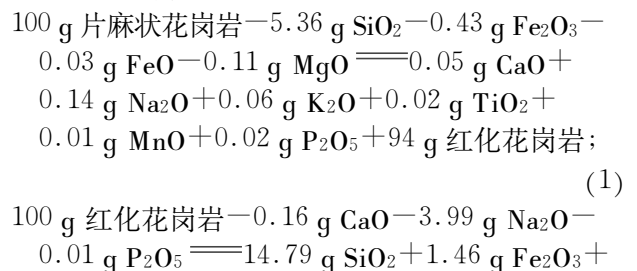


晚期结束阶段,上地幔岩浆源(岩石圈和较深层软流圈的流体系统补给)在剪张构造体制下形成更晚一期的从辉绿岩到煌斑岩和沸绿岩的岩墙杂岩.这时在较还原条件下,同构造交代岩中 Si, Na, K, Al 带出,在上部较高层位形成富含金属硫化物的交代岩(黄铁绢英岩),产生金—金属硫化物的局部富集带,工业矿化大量形成.

## 2 物质迁移与质量平衡

剪切变形和热液蚀变不仅包括剪切带的变形条件、特征及机制,还涉及其中的流体形式、流体成分、流体流动或循环方式及流体通量等.它们相互作用,造成元素的再分配,致使化学物质带入带出. Gressens<sup>[6]</sup>最早提出成分—体积关系方程,定量描述剪切蚀变岩石中组分迁移、体积变化和流体流量. Grant<sup>[7]</sup>简化了这一方法,提出等比线分析法, O'hara<sup>[8]</sup>又通过改进 Grant 等比线分析法,提出了微量元素法.笔者即运用上述定量计算方法与传统地质学相结合,获取剪切构造变形与围岩蚀变作用过程中物质迁移与质量平衡的信息.

通常认为剪切—蚀变过程中 Al 为不活动元素(表 1),因此,在成分变异图上选择了恒定的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 线进行计算(图 1),获得胶东焦家金矿剪切—蚀变过程质量平衡方程:



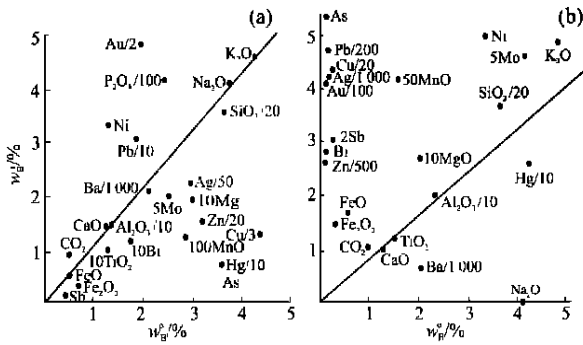
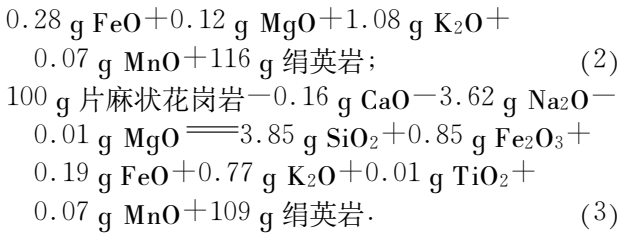


图 1 胶东焦家金矿根据  $Al_2O_3$  质量分数确定的等比线  
Fig. 1 Grant's isocoon diagram based on the mass fraction of  $Al_2O_3$  in Jiaojia gold deposit of Jiaodong area

a. 片麻岩→红化花岗岩; b. 红化花岗岩→绢英岩.  $w_B^1, w_B^0$  分别代表剪切蚀变前后岩石组分的质量分数



(1) 式反映了早期红化蚀变过程中,  $CaO, Na_2O, K_2O, TiO_2, MnO, P_2O_5$  为迁入组分, 而  $SiO_2, Fe_2O_3, FeO, MgO$  则为迁出组分, 微量元素除  $Au, Pb, Ni$  有不同程度的迁入外, 其他元素多为迁出组分. (2) 式说明由红化花岗岩进一步蚀变绢英岩时,

$SiO_2, Fe_2O_3, FeO, MgO, K_2O, MnO$  及绝大部分金属成矿元素迁入, 而  $CaO, Na_2O$  则迁出. (3) 式反映出由片麻状花岗岩最终变成绢英岩的成分变化.

根据剪切-蚀变作用过程中成分带入、迁出量占原岩中该成分的质量分数大小(图 2), 可以确定岩石成分由强到弱的变化序列: (1) 片麻状花岗岩变成红化花岗岩时,  $MnO \rightarrow P_2O_5 \rightarrow Fe_2O_3 \rightarrow MgO \rightarrow TiO_2 \rightarrow SiO_2 \rightarrow FeO \rightarrow CaO \rightarrow Na_2O \rightarrow K_2O$ . (2) 红化花岗岩变成绢英岩时,  $Fe_2O_3 \rightarrow MnO \rightarrow Na_2O \rightarrow MgO \rightarrow FeO \rightarrow P_2O_5 \rightarrow K_2O \rightarrow SiO_2 \rightarrow CaO \rightarrow TiO_2$ . 这种成分变化序列与元素自身地球化学性质、造岩矿物晶体结构以及  $p-T$  环境条件关系密切, 反映了剪切-蚀变作用过程中元素的相对活动性顺序.

剪切-蚀变作用中流体成分的参与, 导致岩石化学成分发生迁出和带入, 以及蚀变岩石体积变化. 对胶东夏甸金矿不同类型剪切-蚀变岩组分迁移、体积变化和流体流量进行定量模拟计算结果表明: 剪切-蚀变作用过程中, (1) 各种物质组分发生了不同程度的迁移,  $Fe_2O_3, FeO, MgO, CaO, CO_2, TiO_2$  为迁入组分, 而  $SiO_2, Al_2O_3, Na_2O, K_2O$  则为迁出组分, 微量元素  $Sb, Cu, Sr$  有不同程度的带出, 而其他元素  $Au, Ag, As, Pb, Zn, Cr$  多为带入组分; (2) 体积应变为增加型, 表明在此作用过程中发生了明显的扩容变化, 矿体定位于剪切带的扩容带中; (3) 存

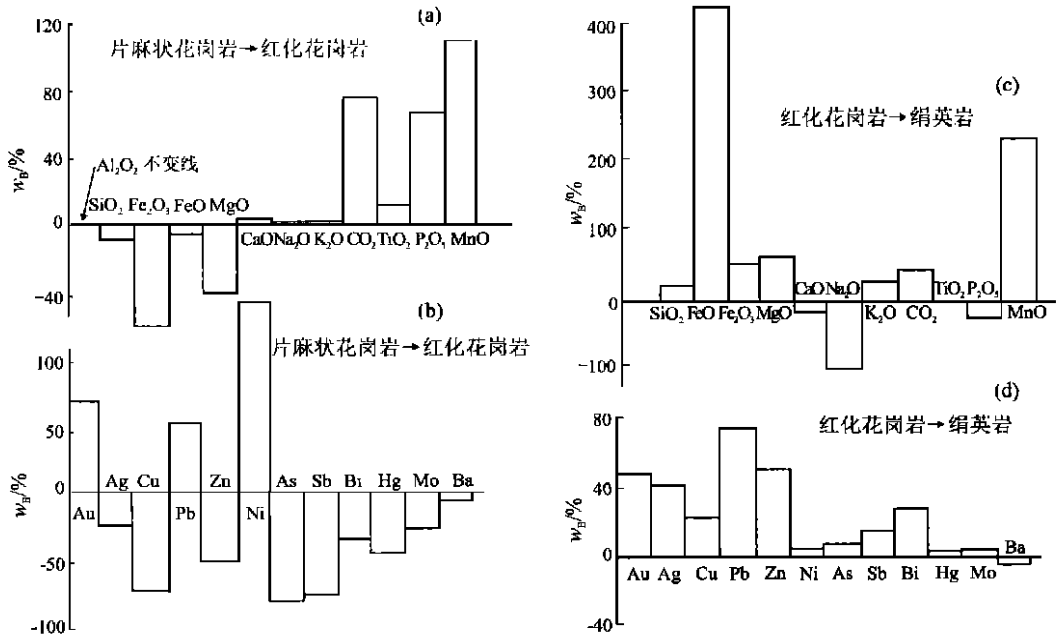


图 2 胶东焦家金矿剪切-蚀变过程中相对于原岩含量的组分迁移柱状图

表 2 胶东夏甸金矿剪切-蚀变作用过程中相对于原岩组分迁移量、体积变异和流体流量

Table 2 Component transfer, volume variation and fluid flux during the process of shear alteration in Jiaodong area of Shandong Province

岩性	组分迁移量/g										体积变化率/%	流体/岩石比值
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>		
硅化糜棱岩化片麻岩	-2.00	-0.36	0.27	0.11	0.15	0.01	-0.24	-0.11	0.02	0.43	-13	133.6~668.0
硅化糜棱岩化角砾岩	-9.07	-0.42	0.42	0.13	0.24	0.24	-0.38	-0.05	0.02	0.73	+5	60.5~302.4
碳酸盐化黄铁矿化矿石	-4.04	-1.05	1.60	0.62	0.68	1.10	-0.41	-0.25	0.00	1.98	12	266.9~1 334.7
绢英岩化角砾岩	-1.18	-0.09	0.24	0.17	0.19	0.12	-0.39	0.07	-0.01	0.47	-2	78.5~392.7
黄铁绢英岩化变粒岩	-3.10	-0.51	0.23	0.18	0.13	0.10	-0.30	-0.12	0.02	0.40	-29	206.4~1 032.0
碳酸盐化黄铁矿化角砾岩	-1.86	-0.48	0.38	0.64	0.38	0.67	-0.30	-0.15	0.03	1.35	+13	123.7~618.3

—表示质量迁出或体积损失, +表示质量带入或体积增加; 流体/岩石比值取 SiO<sub>2</sub> 饱和度为 50%~90% 计算。

在较大的流体与岩石比值, 表明有大量体系外成矿流体的加入, 矿体定位于流体流量最大部位(表 2)。其结论与焦家金矿计算结果一致。

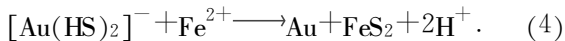
### 3 金的富集成矿机制

成矿系统中, 构造作用与流体作用同步进行、相辅相成, 成矿流体的活动与控矿构造的形成、演化过程紧密相关, 构造—流体时—空演化轨迹实质上就是矿质活化→迁移→聚集→定位的过程, 即构造—流体耦合成矿作用。流体运输和水—岩反应是成矿系统聚矿功能得以实现的两个关键, 而成矿流体的运移则是其复杂动力学过程中最为重要的环节。

剪切带中流体渗透和流动不仅引起流体—岩石相互作用, 使原岩成分、流体成分和物理化学性状变异, 并促成物质沉淀而利于成矿; 而过量流体压力引发水压裂隙, 也有利于成矿。韧性→韧—脆性→脆性三阶段构造形变过程中, 成矿元素逐步富集。早期韧性形变阶段, 成矿元素活化调整; 韧—脆性和脆性阶段, 成矿元素重新调整, 富集程度最大。

红化蚀变过程金仅有约 0.7 倍的富集, 为金的预富集阶段, 而绢英岩化阶段, 金在剪切带内大量富集, 为原来的 50 倍左右, 因而要形成大规模的金矿化, 要有绢英岩化阶段的叠加, 其叠加强度与金成矿强度成正比。

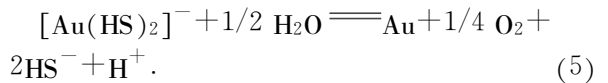
红化阶段, NE 向成矿带处于相对挤压状态, 仅有少量的金属成矿元素富集<sup>[15]</sup>。成矿流体中金沉淀析出主要通过以下反应进行:



此时(成矿作用早期), 体系中 Fe<sup>2+</sup> 充分, 有利于反应(4)向右进行, 体系中 SiO<sub>2</sub> 和 FeS<sub>2</sub> 大量晶出, 金以细粒包裹体形式夹杂于黄铁矿中, 形成以包体金

为主的贫矿石, 而残余溶液中富集了 Au, Ag 等多金属元素。

绢英岩化阶段(成矿年龄主要为 130~100 Ma), 成矿系统体积应变为增加型, 有大量体系外物质加入, 矿体定位于剪切带的扩容带中。先成块状黄铁矿矿石碎裂, 富 Au, Ag 热液贯入, 形成含裂隙金和多金属细脉的富矿石。成矿流体中金沉淀析出主要通过以下反应进行:



可见, 胶东金矿集中区的形成是经韧性剪切→区域变质→岩浆重熔等构造热动力作用逐步富集的多期次、多来源的复杂过程, 导致矿化发生的最主要原因是剪切挤压—拉张构造作用引起的成矿元素活化、运移与富集作用。

研究工作自始至终得到翟裕生院士的指导与帮助, 谨此致谢。

### 参考文献:

[1] Ramsay J G, Graham R H. Strain variation in shear belt [J]. Can J Earth Sci, 1970, 7: 789~801.  
 [2] Bonnemaison M. "Filons de aurifere" an cas particulier de shear aurifere [J]. Chron Rech Min, 1986, 482: 55~66.  
 [3] 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.  
 [4] 邓军, 杨立强, 孙忠实, 等. 剪切带构造成矿动力机制与模式[J]. 现代地质, 1999, 13(1): 1~7.  
 [5] 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): 115~129.  
 [6] Gresens R L. Composition volume relationships of metasomatism [J]. Chemical Geology, 1967, (2): 47~65.  
 [7] James A Grant. The isocon diagram — a simple solution to greses equation for metasomatic alteration [J]. Economic Geology, 1986, 81, 1976~1982.

- [8] O'hara. Fluid flow and volume loss during mylonitization: an origin for phyllonite in an overthrust setting, North Carolina, USA [J]. *Tectonophysics*, 1988, 156: 21~36.
- [9] Dong F X, Li Z J, Chen B L, et al. A study on high-temperature and high-pressure experiment of correlativity between deformational system of Au-bearing rocks element adjustments [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(1): 40~46.
- [10] Детников Ф А. К проблеме вертикальной зональности и рудоносности глубоких разломов докембрия [J]. *Геология рудных месторождений*, 1991, (2): 15~24.
- [11] Cameron E M, Hattori K. Archean gold mineralization and oxidized hydrothermal fluids [J]. *Ecology Geology*, 1987, 82(5): 1177~1191.
- [12] 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.
- [13] Newton R C. Fluids and shear zones in the deep crust [J]. *Tectonophysics*, 1990, 182: 21~27.
- [14] Nesbitt B E, Murowchick J R, Muhlenbachs K. Dual origins of lode-gold deposits in the Canadian Cardillera [J]. *Geology*, 1986, 14: 501~509.
- [15] 邓军, 翟裕生, 杨立强, 等. 构造演化与成矿系统动力学 [J]. *地学前缘*, 1999, 6(2): 315~323.

## SHEAR ALTERATION, MASS TRANSFER AND GOLD MINERALIZATION: AN EXAMPLE FROM JIAODONG GOLD-DEPOSIT CONCENTRATION REGION, SHANDONG, CHINA

Deng Jun<sup>1</sup> Fang Yun<sup>2</sup> Yang Liqiang<sup>3</sup> Ding Shijiang<sup>1</sup> Xiao Rongge<sup>1</sup> Peng Runmin<sup>1</sup> Wang Jianping<sup>1</sup>  
 (1. Faculty of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** In a metallogenic system, tectonism and fluid process occurred at the same time and therefore, they are coupled with each other. The action of ore-forming fluids is bound up with formation and evolution of ore-controlling structures. Structural-fluid temporal-spatial evolution track is, in essence, the mobilization, migration, aggregation and location process of ore-forming materials, i.e. the coupled process of structural-fluid mineralization. In this paper, the geological analysis for the gold-deposit concentration region of Jiaodong, Shandong Province, China, is conducted with the Gresens' equation, Grant's isocon diagram and O'hara microelement calculation method, to reveal the interactions among the shear tectonic deformation, the wall-rock alteration, mass transfer and gold mineralization. The research results show that the shear deformation and hydrothermal alteration not only include the deformational condition, feature and mechanism of the shear zone, but also are related to the formation, component, flow or circulation model and flux of the fluids in the zone, resulting in the reallocation of elements and the migration of the chemical materials. During the shear-alteration process in the Jiaodong gold concentration area, all kinds of components were transferred in different amounts, the fluid-rock ratio was relatively high and the volume strain was of dilation type. The major reason for this mineralization is the mobilization, migration and enrichment of ore-forming elements induced by the shear compressive-extensional tectonism. The low-grade ores dominated by the inclusion gold were formed in the early ore-forming stage, while the high-grade ores containing fissure gold and polymetallic veinlets were formed in the late ore-forming stage.

**Key words:** shear-alteration; mass transfer; ore-forming process.