

文章编号: 1006-6616 (2003) 02-0183-08

构造应力对元素分配的控制作用 ——以焦家金矿床为例

郭涛^{1,2}, 吕古贤², 邓军¹, 李学军¹, 孙之夫³, 郭初笋²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 地质力学研究所, 北京 100081;

3. 山东省黄金公司焦家金矿, 莱州 261400)

摘要: 在成矿过程中, 构造应力与元素的迁移富集有着密切的关系。本文以焦家金矿床为例, 在分析矿区构造应力特征的基础上, 通过代表性剖面研究, 探讨构造差应力与成矿元素在空间及成因上的关系, 认为构造作用和成矿元素的分配是同步发生的, 构造作用不仅使断裂带内的岩石强烈破碎及糜棱化, 而且促使岩石的物质组成重新分配与调整, 使得分散的成矿元素发生活化、迁移。由于构造动力的控制作用, 成矿元素在不同构造岩相带表现出了相似而略带差异的地球化学行为。

关键词: 元素分配; 应力; 地球化学; 焦家金矿

中图分类号: P594

文献标识码: A

0 前言

焦家金矿是“焦家式破碎带热液蚀变岩型”金矿床的命名地^[1], 矿床产出受焦家断裂带所控制。断裂北部发育在郭家岭岩体与玲珑岩体、以及玲珑岩体与胶东群的接触带中, 南段则发育在胶东群中。主断面波状起伏, 平均走向 NE30°, 倾向 NW, 倾角 35°左右, 其中段(朱桥以北—新城)被新华夏系 NNE 向断裂构造复合, 使破碎带变宽, 其走向方位偏转为 NEE, 在平面上呈“S”状, 矿床产在被强烈改造的地段(图 1)。

焦家断裂是一个多期活动的大型破碎带, 经历了早期韧性剪切、晚期脆性变形两个阶段。因此现在所见的构造岩是在长期变形过程中不同变形阶段的综合产物。以主断面为中心, 在赋矿下盘依次可分为糜棱岩带、碎粒岩带、碎裂岩带、正常花岗岩带。断裂带内部结构分带极为明显, 由主断面向两侧依次不对称发育了断层泥带、挤压片理带、构造透镜体带、密集节理带和稀疏节理带。

矿体呈规则宽厚脉状赋存于焦家断裂下盘的蚀变构造岩带中(图 2), 断裂走向 NE40°左右, 倾向北西, 倾角约 30°。金品位较低, 但变化系数较小。矿体沿走向、倾向有膨胀夹缩和分支复合现象, 具有明显的 SW 向侧伏规律^[2,3]。由于构造应力造成容矿空间不同, 以及

收稿日期: 2003-03-26

基金项目: 国家计委科技找矿项目(JG947110)。

作者简介: 郭涛(1972-), 男, 助理研究员, 1997年毕业于中国地质大学(北京), 从事构造地球化学研究。

成矿热动力环境的差异，使得断裂构造裂隙系统对矿化有着明显的控制作用。I号矿体以似层状、不规则宽厚脉状产出，空间上呈舒缓波状延伸，矿体厚度、品位均较连续稳定；相反，发育于密集剪切节理裂隙系统的III号矿脉群，则常以短而粗的张性、张剪性石英硫化物脉出现，矿体厚度、品位稳定性极差，往往在不同的地段发生突变（图2）。

1 矿区的差应力分布特征

对所采集的样品进行了详细观察与分析，在薄片上采用交截法亦即 $D = 1.5L/n$ 统计动态重结晶颗粒粒径的大小^[4]，其中 D 为动态重结晶颗粒的平均粒径， L 为随机直线总长度， n 为被随机直线所截的颗粒总数。根据测定的动态重结晶颗粒粒径，利用构造应力与动态重结晶颗粒粒径间的相关公式^[5,6]， $\Delta\sigma = AD^{-M}$ ，计算成矿期差应力值。其中 $A = 6.1$ ， $M = 0.68$ ，应力单位为兆帕斯卡（MPa），颗粒直径单位为毫米（mm）^[6]。测量统计结果如表1所示。

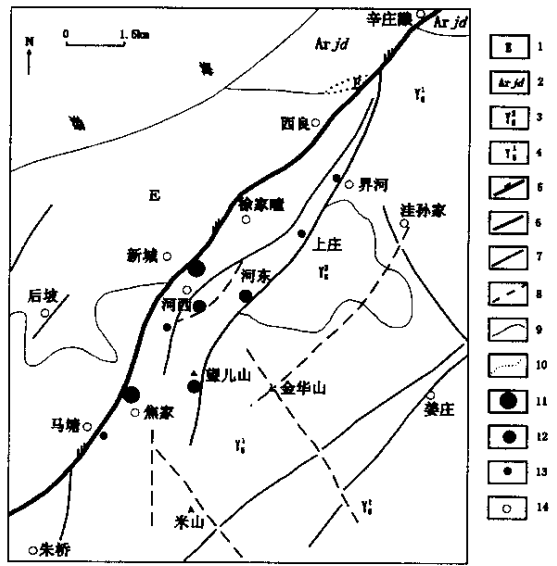


图1 焦家金矿床地质图

Fig.1 Geological Map of JiaoJia Gold Deposit

- 1. 古近系；2. 太古宇；3. 郭家岭花岗闪长岩；4. 玲珑花岗岩；
- 5. 矿田一级断裂；6. 矿田二级断裂；7. 矿田三级断裂；8. 推测断裂；9. 地质界线；10. 推测地质界线；11. 超大型矿床；12. 大型矿床；13. 中、小型矿床；14. 村镇

表1 根据石英动态重结晶颗粒估算的差应力值

Table 1 Differential stress values calculated from dynamic recrystallization of quartz

编号	样品号	取样位置	岩性	粒度/mm	差应力/10 ⁶ Pa
1	J589—75G	124 勘探线	黄铁绢英岩	0.0313	64.32
2	J589—85G	120 勘探线	黄铁绢英岩	0.0385	55.87
3	J589—83G	116 勘探线	黄铁绢英岩	0.0395	54.91
4	J589—4G	112 勘探线	黄铁绢英岩	0.0536	44.62
5	J589—30G	112 勘探线	红化花岗岩	0.0625	40.19
6	J589—60G	112 勘探线	红化花岗岩	0.0577	42.44
7	J589—69G	112 勘探线	红化花岗岩	0.0500	46.78
8	W104S13	104 勘探线	红化花岗岩	0.0625	40.19
9	W104b11	104 勘探线	红化花岗岩	0.060	41.32
10	CM88S3	88 勘探线	黄铁绢英岩	0.0625	40.19
11	J589—83G	86 勘探线	黄铁绢英岩	0.0441	50.95

分析差应力值的空间变化发现：

(1) 结合区域构造应力分析结果^[7-9]表明，焦家金矿区差应力值较矿田其它矿床都高，

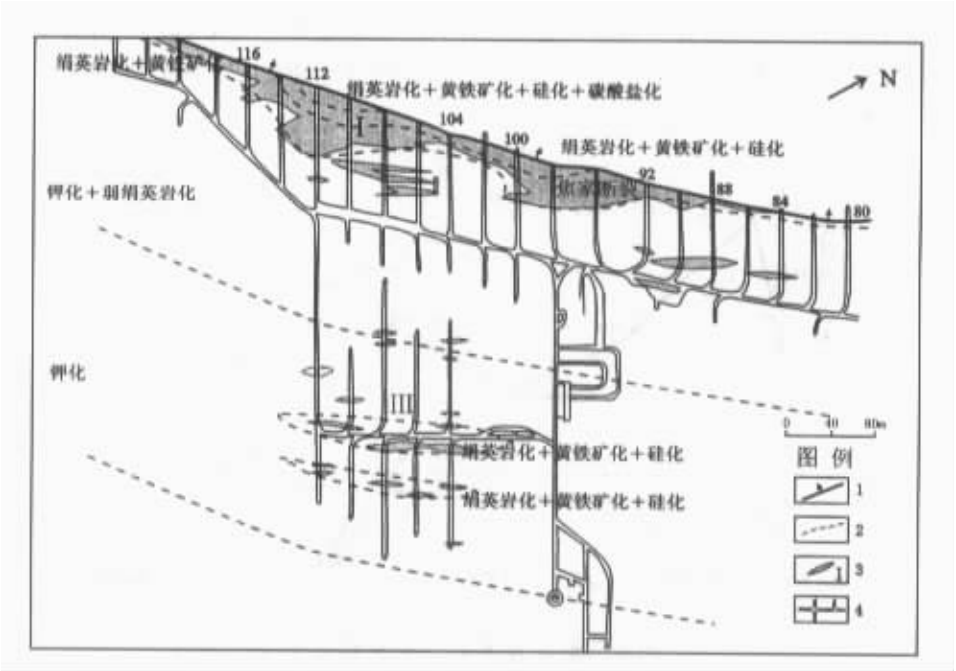


图 2 焦家金矿 - 190m 中段地质图 (据山东省焦家金矿资料修编)

Fig.2 Sketch map of Jiaojia gold deposit, - 190m level

1. 焦家断裂; 2. 蚀变岩界线; 3. 矿体及编号; 4. 巷道

且随着远离焦家断裂, 差应力值有减小的趋势, 这显然与矿床所处的构造引张位置有关。

(2) 沿主断裂带由 SW 至 NE 方向, 差应力值有逐渐变低的趋势 (图 3), 并且在 96 勘探线附近明显存在着应力的张弛区, 其可能与焦家主干断裂的转折有关。

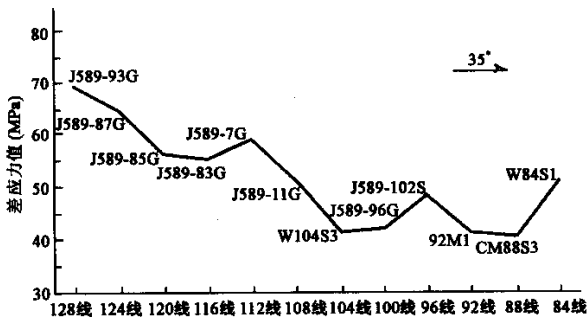


图 3 差应力值沿走向变化曲线

Fig.3 Variation of differential stress values along strike

(3) 在主断裂下盘, 随着远离主断面, 差应力值总体呈下降趋势 (图 4), 但其峰值并不出现在断面附近, 而距其有一定距离, 这可能与岩石应变软化有关, 反映出应变最强的部位却不是应力的 高值区, 这与岩石力学实验的结果相符合^[10]。从差应力与矿化关系来看, 成矿早期的差应力值大多集中在 100 ~ 150MPa 之间, 成矿期的差应力值大约 60MPa, 构造应

力不仅使岩石发生变形及破碎，为成矿提供了空间，而且促使了成矿物质的分异与富集，差应力值过大过小都不利于成矿。I号矿体 SW 段与主断面之间的无矿间隔就证明了这一点。

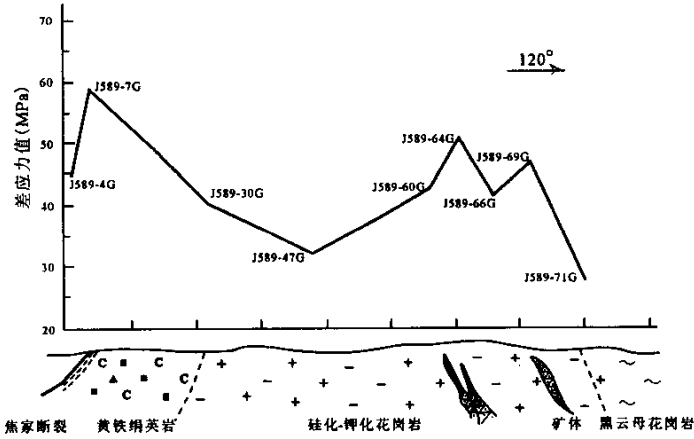


图 4 差应力值沿倾向变化曲线

Fig.4 Variation of differential stress values along dip

2 常量元素分配特征

本矿床金矿化带中围岩蚀变非常发育。蚀变主要是在富钠花岗岩基础上进行的，主要类型有钾长石化、绢云母、硅化、碳酸盐化和黄铁矿化，并伴有其它硫化物和金银矿化。由于构造动力作用，可以将焦家金矿床划分为不同的构造变形岩相带，从主断裂向下盘构造变形及蚀变强度规模逐渐降低，空间上具有明显的水平分带特征。同一构造带不同构造部位的岩石蚀变特征和物质组成具有明显的差别，从图 5 中可以看出：

① 蚀变带易发生活化的元素主要为 K^+ 、 Na^+ 、 Si^{4+} ，其次为 Fe 。

② 在靠近主断面的挤压破碎带、片理化带中，岩石组成比外侧更富含 SiO_2 、 H_2O ，随着远离主断面， K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 Al_2O_3 的含量有所增加。

③ 受构造作用影响，不同成矿元素在构造带的不同部位表现出差异（图 5）：

Si^{4+} ：在主构造带黄铁绢英岩中明显降低，其主要是玲珑花岗岩中的硅酸盐矿物在构造热动力作用下发生分解、活化、迁移的结果。研究表明^[11,12]，在含水条件下，当岩石受到构造挤压破碎发生糜棱岩化时，石英中的 Si^{4+} 很容易发生活化迁移。在成矿作用早期，由于温度和压力都相对较高且稳定，因而 Si^{4+} 也相对迁移的较远，面积也较为广泛；随着成矿作用的进行，由于温压的降低，使得成矿流体失去了驱动力，因而一部分的 Si^{4+} 与围岩发生反应，形成了硅化，另一部分 Si^{4+} 在蚀变矿化过程中以充填方式形成黄铁绢英岩脉。

K^+ ：由于钾化学性质比较活泼，活动性极强^[11]，加之其离子半径较小，相对密度不大，因而很容易在构造应力作用下发生动力重新分配，成为离子而进入溶液。但是钾离子又具有很大压缩性，在应力作用下也可以通过缩小体积来适应环境而趋于稳定，加之在整个蚀变矿化过程中，钾始终为带入组分，因此在靠近主断裂附近的黄铁绢英岩质花岗岩中，钾离子的

含量依然很高。

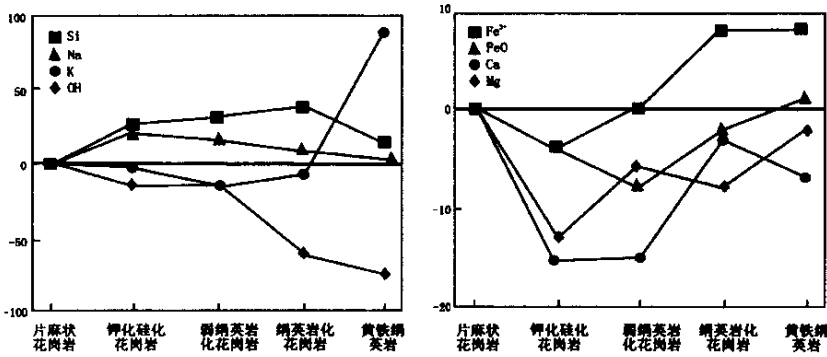


图 5 焦家金矿床各构造蚀变带单位晶胞阳离子数变化图

Fig.5 Variation of cation per unit cell with each tectono- alteration belt, No.112 exploring line, Jiaojia gold deposit

Fe₂O₃、FeO：两者在成矿作用过程中表现出不同的化学特征，FeO 始终表现为带出组分，而 Fe₂O₃ 则变化较大，尤其是在黄铁绢英岩带常有较高的含量，造成这种现象的原因除了后期氧化环境影响之外，更重要的是 Fe³⁺ 与 Fe²⁺ 相比有较小的离子半径，较大的电荷，因而在同样的物理化学条件下 Fe³⁺ 更适应于在高压环境下存在。

Al³⁺ 相对变化较大，在绢云母富集地带明显升高，而在硅化强烈地带则迅速降低，但总体趋势从钾化带到黄铁绢英岩化带，Al³⁺ 含量逐渐降低。

综上所述，构造带的形变相变、热液变质作用及蚀变矿化是大致同构造期的。构造作用不仅使断裂带内的岩石强烈破碎及糜棱化，而且促使岩石的物质组成重新分配与调整，并使得分散的成矿元素发生活化、迁移，在有利的构造环境条件下富集成矿。

3 微量元素分配特征

3.1 微量元素总体变化特征

从表 2 来看，随着远离主断面，成矿元素含量总体有降低的趋势。在主断面附近，虽然应力作用较强，但是由于温度压力梯度不是很大，因而元素分异不是很明显，矿化多受构造热液作用下元素自身化学行为的影响。Au、Cu、Pb 等因离子半径、比重较大，电离势较高，大多分布于差应力高值区，而 Ag、Hg、Sb 等则分布于低差应力值区。尤其 Zn 的含量在绢英岩中急剧增高，明显反映出断裂构造的控矿控矿性。这一方面说明在成矿作用过程中，成矿元素具有相似的地球化学行为，另一方面也暗示出焦家断裂为主要控矿构造，成矿流体沿构造破碎带上升并向两侧进行扩散交代，具有明显成岩成矿成晕作用。

表 2 焦家金矿床主要岩性微量元素含量几何平均值

Table 2 Geometric mean of trace element of main rocks in Jiaojia gold deposit

岩性	元素含量 (Au 为 10 ⁻⁹ 。其余为 10 ⁻⁶)													样品数
	Au	As	Sb	Bi	Hg	Ag	Cu	Pb	Zn	Mo	Ba	Co	Ni	
黄铁绢英岩质碎裂岩	758.2	5.13	0.37	1.39	0.0032	1.41	40.8	131.9	154.3	0.55	288.3	3.50	2.97	164
黄铁绢英岩化花岗岩	262.2	3.25	0.32	0.83	0.0047	0.82	38.7	119.0	142.3	0.56	271.5	3.20	3.02	142
钾长石化花岗岩	97.7	1.79	0.20	0.43	0.0042	0.61	32.7	47.8	52.4	0.58	281.2	2.91	27.2	198
断层泥	246.9	17.78	2.00	1.28	0.0075	1.98	91.1	245.9	250.6	0.87	324.1	10.44	8.08	8
煌斑岩	308.0	5.68	1.10	0.71	0.0057	0.45	43.1	27.1	76.6	1.59	250.0	39.70	28.2	3
玲珑花岗岩	5.9	0.95	0.2	0.05	-	0.26	17.8	27.4	35.1	0.73	279.3	-	-	1097
郭家岭花岗闪长岩	5.0	2.02	-	-	-	0.09	6.9	5.7	25.0	0.80	-	-	-	-
胶东群	7.7	1.48	0.21	0.10	-	0.27	17.6	12.5	56.3	0.75	270.0	-	-	18
地壳克拉克值	4.0	1.8	0.20	0.17	0.08	0.07	55.0	12.5	70.0	1.50	425	25	75	-

3.2 微量元素纵向变化规律

从图 6 可以看出，各勘探线不同元素具有其各自差异的变化规律：

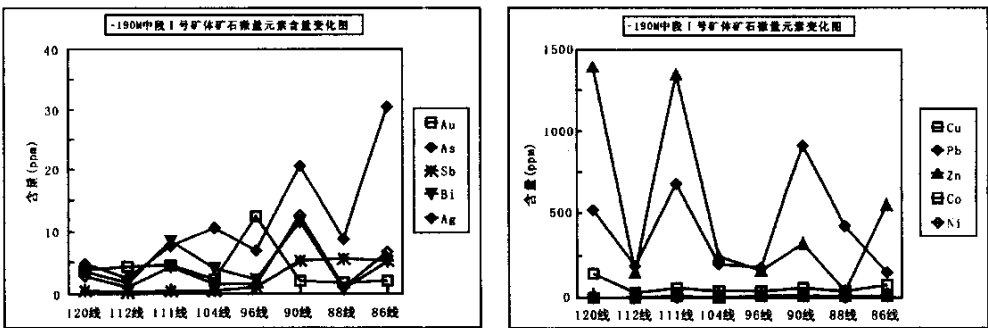


图 6 沿矿体走向微量元素变化图

Fig.6 Content variation of trace element with ore body's strike

Au：沿断裂走向自 124 勘探线到 80 勘探线，随着应力应变减弱，Au 元素总体含量逐渐降低，矿化强度西边稍强于东面，但在断裂 NW 端，由于过强的应变作用，成矿反而较差，在断裂和矿体之间出现的无矿高应变带便证明了这一点。

As 元素变化曲线和 Au 恰好相反，从 120 勘探线至 86 勘探线，As 的含量逐渐升高，其中在 90、86 勘探线之间出现高值区，造成这种现象的原因主要与元素的迁移能力有关。由于 As 是热液蚀变的头昏元素，迁移能力较大，因此易于在矿体的边部发生分异而富集，加之矿体又是向 SW 侧伏，所以不难理解 As 为什么会在 90-86 勘探线间发生富集。

Hg 是构造破碎的指示元素，由于断裂带多次的构造复合叠加作用，因此带内 Hg 含量变化不是很大，仅在局部地段出现高值区，这显然与构造破碎的强化有关。

其它元素由于与 Au 的相关性不是很好，规律性较差。

3.3 微量元素横向变化规律

从图 7 可以看出，各微量元素含量从主断裂向外侧，总体上有降低的趋势，显示了主干

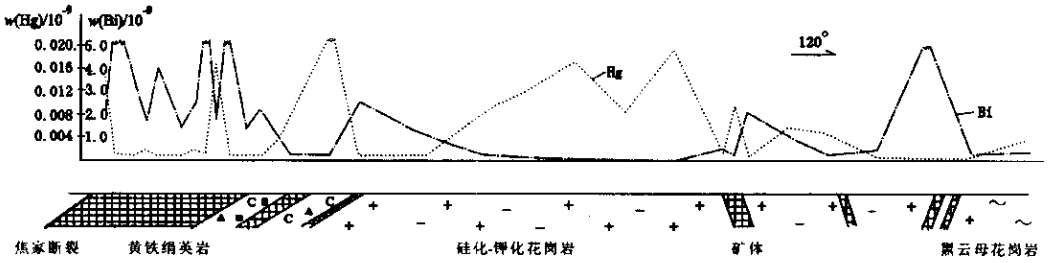


图 7 焦家金矿 -190m 中段 112 勘探线综合剖面图 (据山东省焦家金矿资料修编)

Fig.7 Profile of No.112 exploring line, -190m level, Jiaojia gold deposit

断裂对成矿元素的控制作用,然而在矿体及次级矿化裂隙发育的地段,则有明显回升。野外研究中经常可以发现这种现象,在大片相对均一的蚀变花岗岩中由于次级构造裂隙的成岩成矿作用,出现了小型的构造蚀变破碎带,破碎带两侧为渐变过渡的红化花岗岩和绢英岩化花岗岩,带内为黄铁绢英岩及部分石英—黄铁矿脉,它的这种构造特点与焦家主干断裂的控岩控矿特征具有明显的自相似性,它们是同一构造应力场作用下不同规模、不同级序控矿构造裂隙系统在各种构造尺度上的反映。虽然其成矿元素含量显然已不如主构造带高,但依然表现出构造应力对元素活化迁移的控制特点,是构造应力场在中、小型尺度上控制成矿的最好证明。

4 结论

(1) 在成矿作用过程中,由于构造作用使得成矿微量元素在构造岩带的不同部位中表现出相似而略带差异的地球化学行为。

(2) 不管在横向,还是在纵向上, Au、Ag 都表现出了相近的构造地球化学行为,具有大致相同的变化规律,为主要成矿元素组合;而 As、Sb、Bi 由于活动能力较强,运移量大,变化规律较差,它们共同构成矿体的成晕元素。

(3) 由于构造作用和成矿元素的重新分配是同步发生的,因而在不同构造岩相带成矿元素之间必然存在着某种成生联系。因此可以通过分析元素的相关、组合特征来探讨不同蚀变构造带的元素分布规律。

(4) 构造动力控制着成矿元素的分配规律,成矿主期的差应力值大约 60MPa,应力过大过小都不宜成矿。随着远离主断面,不同构造岩相带由于应力梯度下降以及成矿热动力条件的减弱,成矿元素分离作用明显变弱,因而成矿的可能性亦随之降低。

参 考 文 献

- [1] 张蕴璞,吕以发,赵惠傅,等. 山东掖县北部覆盖地区焦家式金矿成矿地质条件及找矿方向 [A]. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集 [C]. 5. 胶东地区. 北京:地质出版社,1988. 46~84.
- [2] 吕古贤,孔庆存. 胶东玲珑—焦家式金矿地质 [M]. 北京:科学出版社,1993. 1~266.
- [3] 吕古贤,等. 构造物理化学与金矿成矿预测 [M]. 北京:地质出版社,1999. 1~458.
- [4] 万天丰. 古构造应力场 [M]. 北京:地质出版社,1988. 1~156.

- [5] Takeuchi, I., Argon, A. S. Review. Steady state creep of single phase crystalline matter of high temperatures [J]. Mater. Sci., 1976, 11: 1542 ~ 1566.
- [6] Weathers M. S., Bird J. M., Cooper R. F. etc. Differential stress determined from deformation-induced microstructures of the Moine thrust [J]. J. Geophys. Res., 1979, 84 (B. 13): 7495 ~ 7509.
- [7] 邓军, 方云, 周显强. 胶东半岛西北部金矿带成矿构造应力场及成矿微量元素分布特征研究 [J]. 地球学报, 1995, 1: 10 ~ 21.
- [8] 邓军, 翟裕生, 杨立强, 等. 剪切带构造成矿系统动力学 [J]. 现代地质, 12 (4): 493 ~ 500.
- [9] 刘杜娟, 郭涛, 吕古贤. 山东阜山金矿区构造应力场及其转化 [J]. 地质力学学报, 2001, 17 (3): 245 ~ 254.
- [10] 刘瑞. 显微构造地质学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1988. 1 ~ 235.
- [11] 杨国清. 构造地球化学 [M]. 广西: 广西师范大学出版社, 1990. 1 ~ 119.
- [12] 吴学益, 肖化仁, 吴惠明, 等. 江西金山金矿床黄铁矿与金成矿关系的模拟实验研究 [J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24 (3): 274 ~ 282.

VARIATIONAL CHARACTERISTICS OF ELEMENTS WITH TECTONIC STRESS ——AN EXAMPLE FROM JIAOJIA GOLD DEPOSIT

GUO Tao^{1,2}, LÜ Gu-xian², DENG Jun¹, LI Xue-jun¹, SUN Zhi-fu³, GUO Chu-sun²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083; 2. Institute of Geomechanics, Beijing 100081;
3. Jiaojia gold deposit of Shandong gold corp., Laizhou 261400, China)

Abstract: There are consanguineous relationship between tectonic and migration of elements during metallogenic process. Taking Jiaojia gold deposit as an example, the authors discuss the relationship between tectonic stress and metallogenic elements by studing representative geological sections. The authors suggest that tectonic role is not only to shatter and mylonitize rock, but also control the element's distribution, activation and migration. Because of the controlling role of tectonic stress, metallogenic elements show some comparability and difference in geochemical behavior under different tectonic-lithofacies belts.

Key words: distribution of elements; stress; Geochemistry; Jiaojia gold deposit