

# 陕西陈耳金矿床不同构造-岩相带微量元素地球化学特征及构造控矿机理

李建波<sup>1</sup> 蒋振频<sup>1</sup> 鲁勇花<sup>1</sup> 郭 磊<sup>2</sup> 史兴俊<sup>2</sup> 曾 涛<sup>2</sup>

(1. 东华理工大学, 江西 抚州 344000; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

**摘要:**通过对陈耳金矿床两类不同构造-岩相带微量元素分布特征分析,发现元素特别是成矿元素 Au 的含量从片理化带→破碎蚀变带→石英脉逐渐增强。构造-岩相带内变形岩石的石英  $Rf/\phi$  法有限应变测量表明,片理化带应变强度最大,破碎蚀变带应变强度小,应变集中在韧性剪切带边部的片理化带内。R 型聚类分析表明 Au 与 Ag、Cu、Pb 及 Zn 的相关系数远大于 Au 与 Ni、Co 元素的相关系数,甚至接近于 1。研究认为:破碎蚀变带内由于应变软化导致脆性裂隙大量发育,易于成矿流体的迁入与淀积而强富集;片理化带由于应变集中,造成成矿流体的迁出而弱富集。韧性剪切带脆-韧性变形转换不仅控制了矿体就位空间,同时也决定着元素迁移的方向。

**关键词:**陈耳金矿床;构造-岩相带;有限应变;微量元素;脆韧性变形转换

**中图分类号:**P613 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2011)06-1551-11

陈耳金矿床于 1966 年由陕西省地质六队发现,现探明储量 17 223 kg,矿床的平均品位为 5.87 g/t~8.69 g/t。矿区位于东经 110°25'57"~110°28'25",北纬 34°23'08"~34°24'45",总面积 11 km<sup>2</sup><sup>①</sup>。本区的地质工作主要集中在勘探和生产方面,对矿床成矿规律和控矿因素研究的较少,先后有陕西省地质十三队、武警十四支队和陈耳金矿开展过勘查阶段的工作,积累了许多基础地质资料,对进一步进行详细的地质工作奠定了较好的基础。在构造控矿过程中,构造动力变形不仅仅是一种物理机械作用,而且也起着某种地球化学作用,它们之间存在着明显的构造与地球化学的耦合关系。断裂构造导致的矿体定位并不只是被动地提供成矿空间,在断裂活动中的应力作用也是促使成矿物质迁移的主要因素<sup>[1]</sup>。即:构造不仅提供了热液运移的良好通道和矿液赋存场所,也是使成矿热液迁移、沉淀、富集的动力。通过对陈耳金矿控矿构造详细的地质研究,确定其空间展布规

律及类型划分,对含矿的破碎蚀变带及其两侧的片理化带采集地球化学样品,将它们与矿区背景岩石、土壤进行微量元素地球化学对比分析研究,以期探讨构造活动在促使元素(特别是 Au 元素)迁移、富集过程中的作用。

## 1 区域地质与矿床地质特征

矿区所在的小秦岭地区位于华北克拉通南缘,中生代以前具有典型的克拉通边缘特征。进入中生代以后,该区卷入秦岭造山带演化而成为其北缘的组成部分<sup>[2]</sup>。小秦岭地区南北两侧近东西向分布的巡马道—小河断裂带和太要—故县断裂带奠定了本区的基本构造格架,且与轴向近东西的复式褶皱一起控制了该区近千条含金石英脉的产出<sup>[3]</sup>。区内出露地层主要为太古宇太华群深变质—中酸性火山岩系,其中太华群是主要的赋矿地层<sup>[4]</sup>。基底内断裂构造发育,以 EW 向为主,其次为 NW、NE 和 SN。产

收稿日期:2011-07-08;改回日期:2011-07-20

基金项目:国家自然科学基金(41002073)资助。

作者简介:李建波,男,1976 年生,博士,主要从事构造与成矿方面的教学与科研工作;E-mail: jianboli2000@163.com。

①西北有色地勘局 712 队.陈耳金矿床勘探报告,1997.

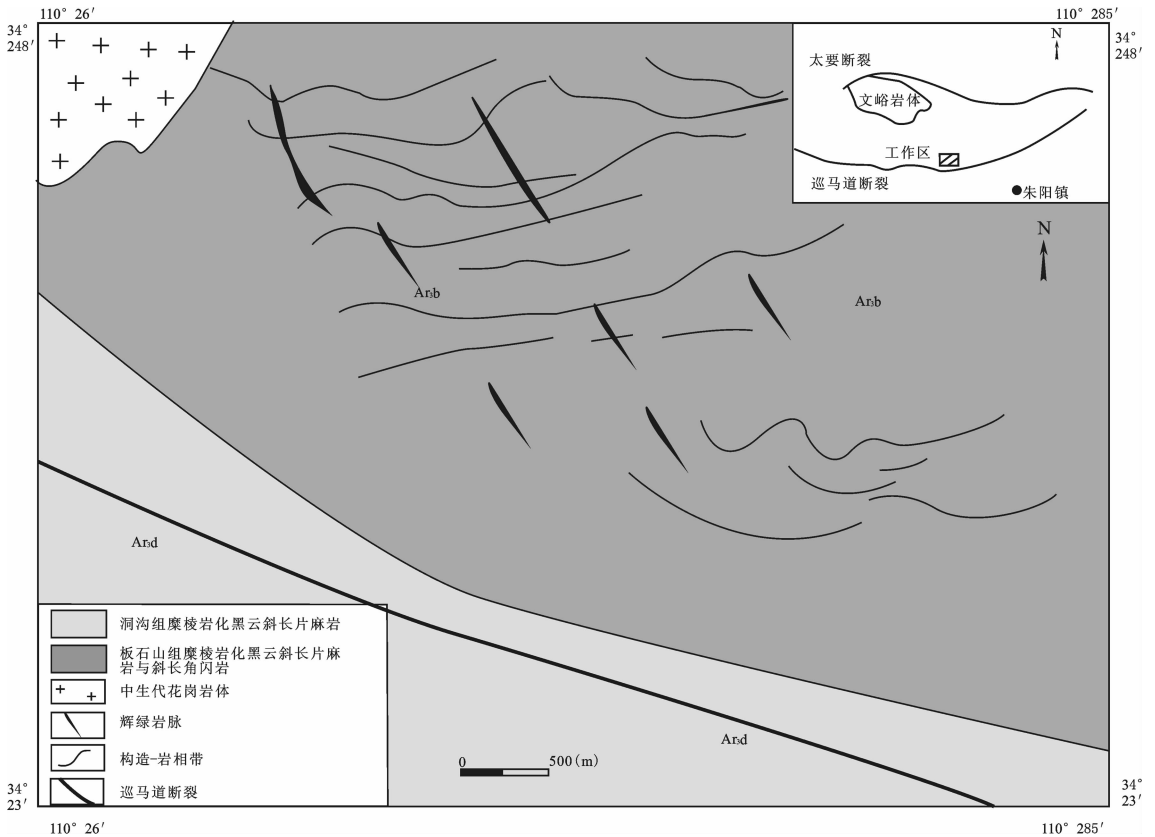


图 1 陈耳金矿床地质略图(引自资料①,1997)

Fig.1 Geological map of the Chen'er gold deposit(after literature ①,1997)

于小秦岭地区的金矿床(体)严格受韧性剪切带控制,表现为早期剪切带受后期脆性构造叠加而形成张性扩容空间,有利于矿体定位<sup>[4,5]</sup>。

陈耳金矿床在大地构造位置上位于华北地台南缘之豫西断隆南侧,在成矿区划上属于小秦岭矿田的一部分。矿区位于大月坪—金罗斑复式背斜的南翼、巡马道断裂(亦称朱家沟断裂或朱阳镇断裂)的北部。矿区主要出露地层为太古宇太华群大月坪组(Ar<sub>3d</sub>)、板石山组(Ar<sub>3b</sub>)及洞沟组(Ar<sub>3dg</sub>)的下部(图1),岩性以各类糜棱岩化片麻岩、糜棱岩、混合岩为主,夹斜长角闪岩、长石石英岩等。岩浆岩在矿区广泛出露,从太古宙到中生代均有发育。岩浆活动尤以元古宙晋宁期和中生代燕山期最为强烈,代表性岩体的有华山岩体、文峪岩体和娘娘山岩体;基性岩脉主要有辉绿岩、辉长辉绿岩等(蒋少涌,2009)。其中燕山期岩浆活动与矿床形成关系最为密切。

陈耳金矿床为石英脉型金矿床,围岩蚀变以黄铁矿绢英岩化、硅化为主,此外还有少量钾长石化、黑

云母化、绿泥石化和碳酸盐化。根据矿物共生组合及相互关系,矿床矿化过程可以划分为3个阶段:黄铁矿-石英脉阶段、黄铁矿-多金属硫化物-石英脉阶段和碳酸盐-石英脉阶段等3个阶段。黄铁矿-多金属硫化物-石英脉阶段是主成矿阶段。

## 2 矿区构造-岩相带

构造岩相是能够反映地壳岩石在构造作用下形成、变形的结构及其伴随产生的岩石单元,特别是构造作用影响的那部分沉积岩相、岩浆岩相和变质岩相建造的地质形迹<sup>[6,7]</sup>。构造-岩相界面相当于地壳岩石所表现的化学和物理学界面,在构造-岩相界面附近,不仅地球化学元素的种类和数量发生急变和转化,而且成岩成矿的环境如温度、压力、酸碱度、氧化还原条件等参量也发生急变和转化<sup>[6]</sup>。

### 2.1 矿区构造-岩相带划分

陈耳金矿床的矿体产出部位严格受剪切带控制,均为韧-脆性剪切带内脆性变形明显发育的部

① 西北有色地勘局 712 队. 陈耳金矿床勘探报告, 1997.

位。根据野外实际观察、矿体赋存部位以及上述有关构造-岩相带的定义,笔者把矿区韧-脆性剪切带由边缘向中心划分为:片理化带、破碎蚀变带等两类构造-岩相带(图 2)。片理化带韧性变形强烈,石英发生强烈的定向排列,显微镜下可见明显的波状消光,脆性构造不甚发育;破碎蚀变带位于韧性剪切带内侧,脆性变形发育,岩石破碎明显,常有蚀变,且有宽大的石英脉充填其间。石英脉是矿区主要的含矿地质体,位于破碎蚀变带中心部位,石英脉体内微裂隙大量发育,是矿床中有益元素金的强富集部位。

## 2.2 矿区构造-岩相带空间展布

依据对构造-岩相带的划分,笔者分别实测了片理化带与破碎蚀变带的产状(表 1)。

用表 1 数据做矿区不同构造带走向玫瑰花图(图 3)显示,矿区构造带按走向可划分为 NW-NWW 向、NNW 向及 NE 向 3 组,以 NW-NWW 向构造带为主。总体来看,破碎蚀变带与片理化带的产状大体一致,而前者倾角略大(表 1)。

## 3 矿区构造-岩相带有限应变测量

分别采集矿区片理化带(样品号 02-01、02-03、02-07)和破碎蚀变带(样品号 02-04)内的糜棱岩作为定向样品,以石英为应变标志体,用  $Rf/\varphi$  法<sup>[9]</sup>为测量手段,对每一块样品平行于拉伸线理、垂直于面理为 XZ 面、垂直于拉伸线理与面理为 YZ 面,平行于拉伸线理与面理为 XY 面切制定向薄片(图 4)。有限应变结果如表 2 所示。

用表 2 数据做矿区应变剖面(图 5)结果显示,

在矿区构造带边部片理化带应变强度最大,靠近核部应变强度逐渐减小。这表明应变集中于韧性剪切带边部的片理化带内。

## 4 构造带微量元素地球化学特征

### 4.1 矿区土壤与岩石微量元素背景值

矿床产出地层太古宇太华群的金元素(Au)丰度分别为:大月坪组( $Ar_3d$ ) $1.00 \times 10^{-9}$ 、板石山组( $Ar_3b$ ) $1.54 \times 10^{-9}$ 、洞沟组( $Ar_3dg$ ) $0.6 \times 10^{-9} \sim 1.5 \times 10^{-9}$ 。为了进一步确定矿区微量元素的背景值,笔者分别采集了矿区片麻岩、混合岩、斜长角闪岩、长石石英岩和土壤等样品各 20 件,分析了 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb 和 Hg 等 8 种微量元素的含量,并求其平均值(表 3)。

### 4.2 微量元素在各构造-岩相带的分布特征

基于上述对构造带类型划分及其空间展布特征研究,分别对各类型构造带采集样品进行微量元素地球化学分析,把各构造类型微量元素含量的算术平均值作为该类型构造带微量元素的代表值。为了保证采样具有代表性,选择的采样方法为:对于石英脉体,在各脉体的不同产状部位分别进行等间距采集组合样;对于其他各构造类型,则依其产状分别进行等间距采集组合样。共采集片理化带样品 107 件、破碎蚀变带样品 83 件、破碎蚀变带内石英脉样品 85 件。依据与 Au 元素的共生及亲缘关系,分析了 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi、Hg、Mo、Ni、Co、Cr 等 13 种微量元素。结果见表 4。

将各类型构造带的微量元素含量与背景值(表

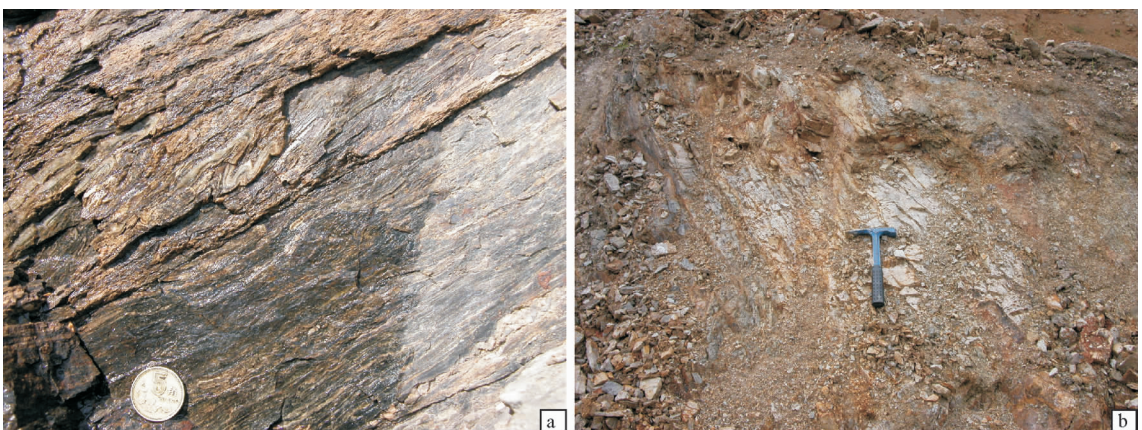


图 2 陈耳金矿床两类不同的构造-岩相带(a-片理化带,b-破碎蚀变带)

Fig.2 Two different structure-lithofacies zones (a-Schistosity zone; b-Cataclastic alteration zone)

表 1 陈耳金矿床不同构造-岩相带实测产状

Table 1 Measured attitudes of different structure-lithofaces zones in the Chen'er gold deposit

倾向(°)	倾角(°)	倾向(°)	倾角(°)	倾向(°)	倾角(°)	倾向(°)	倾角(°)	倾向(°)	倾角(°)
片理化带									
走向近 EW					走向近 SN				
195	45	208	52	165	38	205	55	70	48
205	43	220	68	190	30	200	52	84	78
340	60	190	38	180	42	215	75	80	84
200	40	200	74	185	58	185	70	75	75
212	40	210	58	206	76	205	74	70	69
200	50	208	52	205	75	203	64	75	75
175	38	190	80	190	70	210	62	92	82
197	60	185	66						
走向近 NE									
320	76	300	55	330	63	345	62	275	85
290	50	330	65	270	70	345	63	305	85
337	70								
走向近 EW									
15	75	5	85	20	80	30	65	15	84
8	58	0	58	355	57	30	70	350	55
15	82	0	66	30	60	27	70	25	75
30	70	30	64						
破碎蚀变带									
走向近 EW									
190	55	320	76	175	45	185	38	185	38
200	55	345	65	195	35	200	56	204	44
185	45	290	50	180	50	205	50	202	45
190	38	180	44	180	30	175	35	200	55
210	65	180	42	180	35	215	45	210	40
185	51	210	20	205	48	175	48	190	40
走向近 EW									
26	78	345	55	30	60	25	81	10	87
25	60	15	73	20	66	25	79	15	79
20	70	20	55	15	75	25	70	15	60
30	66	25	80	25	83	12	75		
走向近 NE									
340	60	280	85	330	45	345	65		
走向近 NE									
90	75	95	78	85	85	90	85		

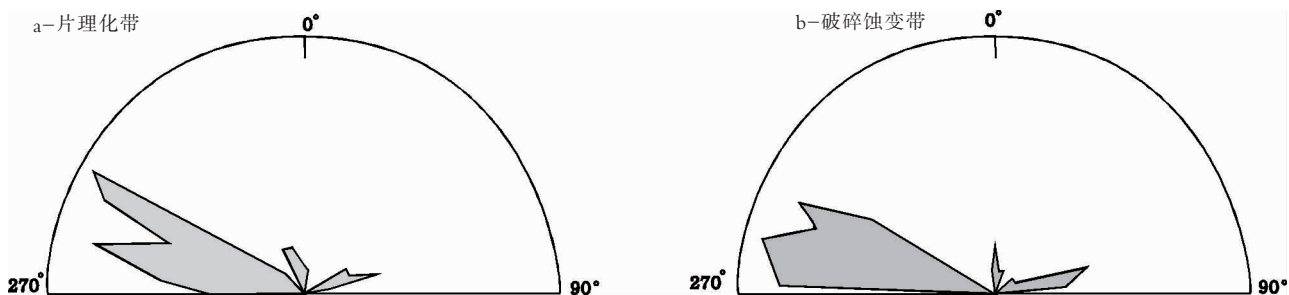


图 3 矿区构造-岩相带走向玫瑰花图

Fig.3 Rose diagram of different structure-lithofacies zones (a-Schistosity zone; b-Cataclastic alteration zone)

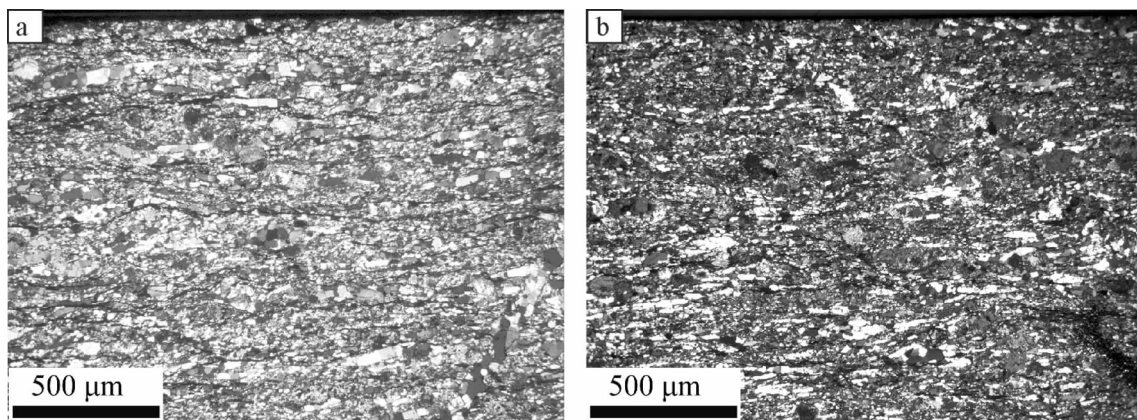


图 4 糜棱岩样品 02-01 显微照片(a-样品 XZ 面,b-样品 YZ 面, $R_{xz}=2.8, R_{yz}=2.6, E_s=0.82$ )

Fig.4 Micrograph of sample 02-01 ( a- XZ face of sample 02-01; b- YZ face of sample 02-01,  $R_{xz}=2.8, R_{yz}=2.6, E_s=0.82$ )

表 2 陈耳金矿床不同构造-岩相带有限应变测量

Table 2 Strain measurement in different structure-lithofacies zones of the Chen'er gold deposit

样品编号	岩性	测量切面	$R_{xz}$	$R_{yz}$	X	Y	Z	$E_s$
02-01	糜棱岩	薄片	2.8	2.6	1.44	1.34	0.51	0.82
02-03	糜棱岩	薄片	2.4	2.0	1.42	1.19	0.59	0.65
02-04	糜棱岩	薄片	2.2	1.9	1.37	1.18	0.62	0.59
02-07	糜棱岩	薄片	2.6	2.4	1.41	1.30	0.54	0.75

注: $R_{xz}, R_{yz}$  为 XZ、YZ 面上有限应变轴比, X、Y、Z 为应变椭圆应变主轴数值,  $E_s$  为应变强度。

3~4)比较,发现如下特征:

(1)在辉绿岩脉中,所分析的 13 种微量元素均未有明显富集现象。

(2)As、Sb、Bi、Hg、Mo 和 Cr 元素在各构造带中含量都比较接近,未有在某一类型构造-岩相带中较为富集的现象。

(3)Au 元素明显地富集在走向为北西西、北西及北北西的片理化带、破碎蚀变带中的石英脉中。特

别是在构造带走向为北西西、南倾的产状部位最为富集(Au 的最大峰值可达  $724.6 \times 10^{-9}$ )。

(4)Ag、Cu、Pb 和 Zn 等元素也较为明显地富集在走向为北西西、北西及北北西的片理化带、破碎蚀变带中的石英脉中。

(5)Ni 和 Co 元素在破碎蚀变带和石英脉中有所富集,而在片理化带未见明显的富集。

(6)Au、Ag、Cu 和 Pb 元素的富集强度,按片理

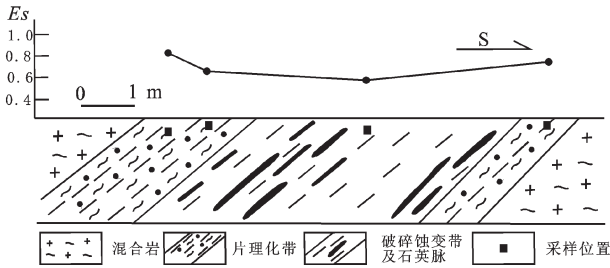


图 5 陈耳金矿床构造带示意图 ( $E_s$  为应变强度)

Fig.5 Schematic diagram of structure-lithofacies zones of the Chen'er gold deposit ( $E_s$  - strain intensity)

化带、破碎蚀变带和石英脉带的顺序逐渐增高。

由此可见，在该矿床中各元素的富集情况不仅因构造带类型、元素种类而差异，而且也与构造带的产状有关。为了更加直观地体现各元素富集强度与构造带产状的关系，选择 Au、Ag、Cu 和 Pb 元素富集强度较高的破碎蚀变带和石英脉(表 4)做微量元素蛛网图(图 6~7)。

首先，Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Ni 和 Co 元素含量因构造带产状的不同而出现显著的波动，而 As、Sb、Bi、Hg、Mo 和 Cr 元素含量没有因构造带产状的不同而出现较大的波动。其次，Au、Ag、Cu 和 Pb 元素的最高峰值多出现在走向为北西西、倾向南的产状部位，而 Ni 和 Co 元素的最高峰值正好多出现在 Au、Ag、Cu 和 Pb 元素的低谷位置上。另外，石英脉带中 Au、Ag、Cu 和 Pb 元素的含量明显高于其他类型的构造带。

### 4.3 微量元素的相关性特征

运用 R 型聚类分析中的相关系数法<sup>[10]</sup>，选取 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Ni 和 Co 7 种元素，分别计算 Au 元素与 Ag、Cu、Pb、Zn、Ni 及 Co 元素的相关系数，依次为 0.823、0.980、0.89、0.37、0.078 和 0.178。即 Au 元素与 Ag、Cu、Pb 及 Zn 元素的相关系数远大于 Au 元素与 Ni、Co 元素的相关系数，甚至接近于 1。

野外实际观察和西北有色地质勘查局 712 队室内鉴定分析，Cu、Pb 和 Zn 元素在矿床中都以黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等金属硫化物矿物的形式存在，金元素主要赋存在黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿的微裂隙中或它们的晶格缺陷中。这与主成矿阶段为黄铁矿-多金属硫化物-石英脉矿化阶段是吻合的。

## 5 构造控矿机理与元素的相关性探讨

### 5.1 构造活动决定成矿元素富集的空间

剪切带由韧性向韧-脆性变形转换即由压剪变为张剪的过程实质是一个构造动力体制转换过程，这种转换引起构造物理化学参量“临界转换”现象可能在多种矿床的形成过程中带有普遍性，在时空上的临界转换处，也往往是各种物理化学环境的急变带，形成地球物理、地球化学障<sup>[10]</sup>。在陈耳金矿床，控制矿床成矿的主导因素是剪切带的韧-脆性变形转换亦即构造动力体制转换。由片理化带、破碎蚀变带变形逐渐由韧性到脆性变化，矿化逐渐增强，破碎加大，且两种构造-岩相带是在同一构造体系下由于构造变形强弱和性质不同在不同变形域产生的不同产物。

剪切带内应力分布是不均一的，在总应力场的作用下可以形成应力相对升高与降低的许多应力集中与应力松弛降低地段<sup>[11]</sup>。前已述及，研究区应变主要集中在片理化带内，在剪切带的韧性变形域即片理化带中(图 2-a)，由于长期处于高应力、高能量构造挤压状态，属于应力集中地段，缺乏应力释放空间，因此常形成脆性变形不甚发育、构造扩容空间相对薄弱的韧性剪切部位。此时，变形岩石结构较为致密，孔隙度较低，往往不易于流体的渗透与运移；并且较高的温压条件也不利于络合物的分解、淀积<sup>[10]</sup>。

在剪切带由韧性向韧-脆性变形转换过程中即从片理化带向破碎蚀变带转化过程中，随着应力向

表 3 矿区土壤和岩石微量元素含量平均值 (Au、Ag 单位为  $10^{-9}$ ，其他元素为  $10^{-6}$ )

Table 3 Average values of trace elements in soil and rock

样品类型	样品数	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Hg
土壤	20	3.3	205.5	45.5	75.9	103.6	6.8	1.01	121.3
岩石	20	19.9	87.0	37.7	44.2	71.0	1.1	0.3	15.0

注：由西北有色金属地质勘查局分析测试中心采用北京瑞利原子吸收分光光度计 WFX-120 原子吸收光谱分析法测试。

表 4 矿区不同构造-岩相带微量元素含量平均值(Au、Ag 单位为  $10^{-9}$ ,其他元素为  $10^{-6}$ )

Table 4 Average values of trace elements in different structure-lithofacies zones

构造带产状		样品数	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Bi	Hg	Mo	Ni	Co	Cr
走向	倾向														
片理化带															
NWW	S	51	3.65	100.0	28.3	24.0	82.0	0.7	0.37	0.15	12.0	0.56	24.7	19.8	68.9
NNW	N	43	3.75	101.0	28.5	46.9	67.0	0.7	0.33	0.14	14.0	0.69	28.7	17.7	70.8
NNE	W	2	0.58	48.0	20.2	12.6	91.0	0.6	0.37	0.10	6.0	0.61	16.0	39.5	50.7
NEE	S	7	1.25	99.0	105.5	13.8	92.0	0.8	0.34	0.23	8.0	0.88	36.1	26.9	173.8
NNE	E	4	0.65	49.0	13.5	24.0	50.0	0.5	0.24	0.10	11.0	0.30	12.1	9.4	45.6
破碎蚀变带															
NWW	S	42	127.20	284.0	140.5	151.5	89.0	0.8	0.35	0.67	12.0	1.05	32.7	17.6	110.9
NW	N	33	181.70	329.0	89.1	110.1	67.0	0.8	0.35	2.16	11.0	1.23	38.4	21.3	108.2
NE	N	3	0.94	53.0	5.5	9.7	113.0	0.6	0.17	0.13	14.0	0.52	44.3	25.3	109.2
NNE	W	5	4.52	109.0	52.1	163.8	53.0	0.5	0.29	0.13	13.0	0.26	30.1	10.6	137.4
石英脉															
NWW	S	53	724.60	522.0	65.6	134.0	53.0	1.0	0.35	5.99	11.0	1.13	8.4	12.1	61.2
NNW	N	18	3.30	47.0	23.9	18.2	33.0	0.4	0.29	0.14	14.0	0.39	23.5	8.4	93.0
NNW	W	5	0.51	51.0	8.1	25.4	36.0	0.4	0.24	0.11	15.0	0.50	10.9	13.0	57.4
NNE	E	5	0.61	162.0	4.3	16.2	24.0	0.6	0.26	0.10	12.0	0.29	6.1	3.7	49.7
NE	S	4	0.42	34.0	9.2	6.1	20.0	0.3	0.34	0.10	11.0	0.22	4.9	3.5	58.5

注:由西北有色金属地质勘查局分析测试中心采用北京瑞利原子吸收分光光度计原子吸收光谱分析法测试。

剪切带中心部位传递,在剪切带的中部应力松弛的地方即破碎蚀变带发育部位,应力释放导致其应变强度变小,进而导致构造扩容空间的生成即脆性变形发育,此时岩石破碎,张性裂隙发育,原来的封闭空间有了很大的开放空间,为成矿热液的预富集提供了运移的通道和就位的场所。与成矿热液预富集同步蚀变发生, $\text{SiO}_2$ 首次沉淀,石英脉形成且内部微裂隙发育,完成了本矿床成矿过程的第一期成矿作用,这为其后大规模的成矿作用的发生准备了物质基础,在这一阶段,破碎蚀变带生成。

伴随韧-脆性剪切带进一步发展,应力进一步向剪切带中心部位传递,脆性扩容空间加大, $\text{SiO}_2$ 再次沉淀使先成的石英脉体变大且内部的微裂隙增多,蚀变强烈发生(如黄铁绢英岩化、硅化等)。实验证明,当体系中黄铁绢英岩化、硅化等蚀变强烈发生时,正是金沉淀集中或成矿的重要时期<sup>[2]</sup>,此为第二期成矿作用,该期成矿作用为本矿床的主成矿作用期,大部分 Au 元素都在该期成矿作用中积淀。

## 5.2 构造活动决定成矿元素活化、迁移的方向

在构造应力场由压剪变为张剪亦即应力由集中

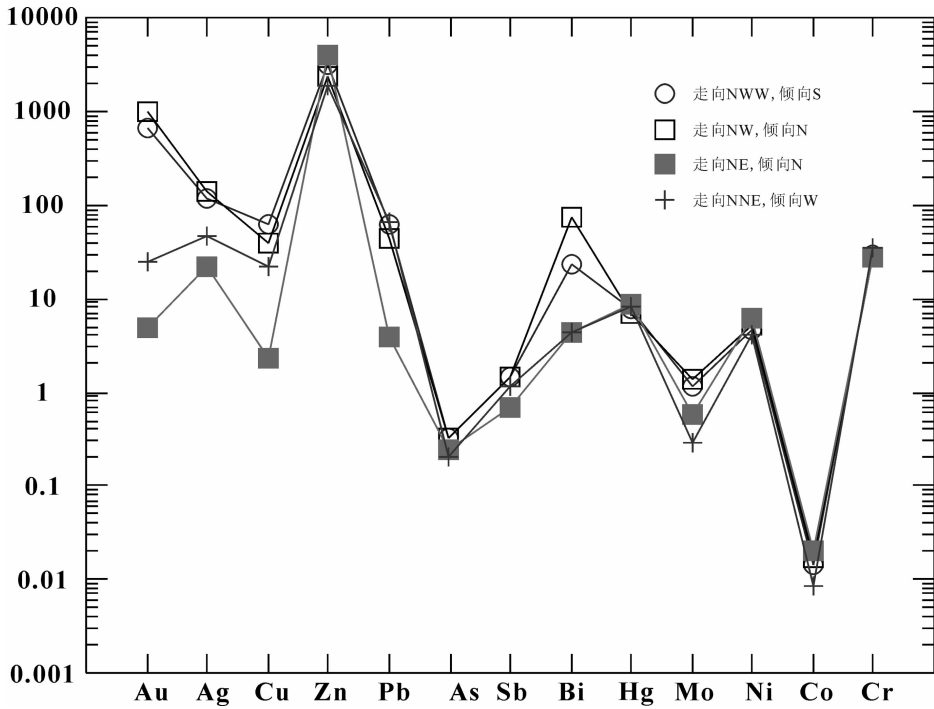


图 6 不同产状破碎蚀变带微量元素配分图

Fig.6 Partition diagram of trace elements in shatter alteration zones of different attitudes

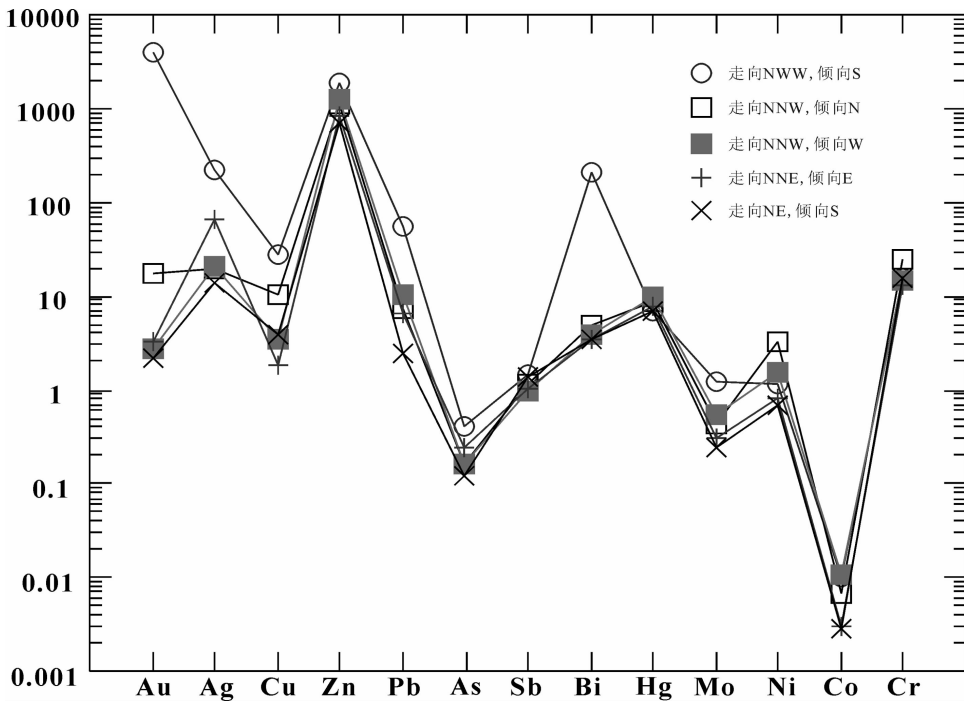


图 7 不同产状石英脉微量元素配分图

Fig.7 Partition diagram of trace elements in quartz veins of different attitudes



变为松弛过程中,刚好是  $\text{Na/K}$ 、 $f_{\text{CO}_2}$ 、 $\text{pH}$ 、 $\text{F/Cl}$ 、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  以及  $\text{Ps}$ 、 $\text{P}$ 、 $t$ 、 $\text{P}$  差的临界变化点,此时产生附加压力、温度及其他物理化学参量变化,该部分构造物理化学参量的变化是水-岩系统发生重要转换进而发生成岩成矿作用的重要原因之一<sup>[11,12]</sup>。成矿参量的临界转换导致成矿元素物理化学平衡状态被打破,使成矿元素与热液一起,以  $\text{W}$ 、 $\text{Au}$ 、 $\text{Ag}$ 、 $\text{Bi}$ 、 $\text{Mo}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Co}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Fe}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ti}$ 、 $\text{Mn}$ 、 $\text{Ga}$ 、 $\text{Ba}$  顺序被活化、迁移<sup>[11]</sup>。在渗流势的作用下沿岩石的孔隙或裂隙从渗流势高值区向低值区运移,并在适宜的、物化条件有利的构造部位(扩容区)淀积形成矿体。

在剪切带由韧性向韧-脆性变形转换过程中,韧性域主要是成矿元素的迁出区,脆性域是成矿元素迁入区<sup>[14,15]</sup>。同时,依据前文分析,变形性质决定了片理化带部位为高应变能、高渗流势集中区与成矿元素的迁出区;破碎蚀变带、石英脉是低应变能、低渗流势集中区与成矿元素的迁入区。成矿元素  $\text{Ag}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Zn}$  等在挤压片理化带这一高应变能和渗流势集中区和剪切带的深部被活化,在渗流势与心脏脉动式抽吸挤出机制共同作用下被带入破碎蚀变带或石英脉这一低能量、低渗流势集中区,最后赋存在破碎蚀变带和石英脉的张裂隙里。 $\text{Au}$  以  $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 、 $[\text{AuCl}]^-$  络离子的形式晚于  $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Zn}$  等元素被活化,顺着流体在构造应力作用下赋存在黄铁矿、方铅矿与闪锌矿的微裂隙中。流体赋存空间的扩大导致矿液减压沸腾,金元素沉淀,矿体形成。这时金成矿温度一般在  $200\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[16]</sup>。从表 5 可以看出,成矿温度为  $178\sim 326\text{ }^\circ\text{C}$ ,成矿压力为  $20\sim 30\text{ Mpa}$ ,这符合韧脆性剪切带的温压范围。

综上所述,剪切带内韧-脆性构造变形转换即构造动力体制转换决定了成矿热液和元素迁移的方向,片理化带、破碎蚀变带和石英脉构造裂隙的发育程度也决定了  $\text{Au}$ 、 $\text{Ag}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Ni}$  和  $\text{Co}$  元素的富集强度必然依片理化带、破碎蚀变带和石英脉逐渐增高。

### 5.3 构造活动与成矿元素富集同期

$\text{Au}$ 、 $\text{Ag}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$  和  $\text{Zn}$  元素的富集,明显地与走向为北西西、北西、北北西的破碎蚀变带和石英脉等构造带关系较为密切。特别是走向为北西西、倾向南的构造带,关系最为密切。矿区南部边缘的巡马道断裂长期左行活动、矿区燕山期岩浆大规模侵位引起陆内隆升二者共同作用,导致产生的主构造线方向正好也是为北西西走向。主构造线方向与成矿元素富集的构造部位的产状方向正好相吻合。

可见,成矿元素的富集与矿区燕山期的构造活动密切相关。成矿元素的富集期,可能就是该构造活动的时期-燕山期或稍后。

### 5.4 成矿元素 Au 与其他元素的相关性分析

由微量元素相关性计算结果可知,在所有测试分析的元素中, $\text{Au}$  元素只有与  $\text{Ag}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$  和  $\text{Zn}$  元素有很好的相关性,而与  $\text{Ni}$ 、 $\text{Co}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Sb}$ 、 $\text{Bi}$ 、 $\text{Hg}$ 、 $\text{Mo}$  和  $\text{Cr}$  等元素相关性很差或不具有相关性。这可能与它们之间物理化学性质的差异和成矿后期某些元素被破坏流失所导致的结果有关。 $\text{Au}$  和  $\text{Ag}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Zn}$  元素的离子半径较大,化学活动性小,从成矿溶液中沉淀后不易被破坏而得以保存,从而显示出强富集,即它们具有很好的相关性;而  $\text{Ni}$  和  $\text{Co}$  元素从成矿溶液中沉淀后则容易被破坏而只显示弱富

表 5 石英包体爆裂法测温 Eh、pH 结果

Table 5 Eh, pH thermometric results of quartz inclusions by decrepitation method

采样位置	Q9201		Q8802			
	W-3	RY6092	W-4	W-5	RY4030	RY6027
成矿压力(Mpa)	26.3	23.4	21.9	23.0	28.3	30.9
Eh	0.624	0.560	0.522	0.554	0.714	0.623
pH	5.854	5.612	5.859	5.783	5.673	5.850

注:数据引自①。

①西北有色地勘局 712 队.陈耳金矿床勘探报告,1997.

集,导致 Au 与 Ni、Co 元素的相关性比较小;As、Sb、Bi、Hg、Mo 和 Cr 则更容易被破坏而不显示富集,导致 Au 与这些元素不具有相关性。

## 6 结 论

(1)陈耳金矿区的控矿构造可以划分为片理化带、破碎蚀变带两种类型的构造-岩相带。在其中 Au 元素都有不同程度的富集,而破碎蚀变带内的石英脉为 Au 元素得强富集体。矿床中 Au 元素与 Ag、Cu、Pb 和 Zn 等元素有很好的相关性,而与 Ni、Co、As、Sb、Bi、Hg、Mo 和 Cr 等元素相关性比较小或不具有相关性。

(2)有限应变测量显示,应变集中于剪切带边部的片理化带内,靠近剪切带核部,应变强度越小;由于应力逐渐由集中到松弛、片理化带、破碎蚀变带的变形性质逐渐由韧性到脆性转化,破碎也逐渐增大。与此同步,Au 逐步富集于破碎蚀变带及其内部的石英脉内。

(3)在成矿作用中,剪切带韧-脆性变形转换即构造动力体制转换过程是矿床生成的重要控制因素。其发育过程不仅控制了成矿元素富集的空间分布,也决定了成矿元素活化、迁移的方向。在构造动力体制转换过程中,陈耳金矿床中的赋矿体石英脉经历了二期成矿作用,第二期生成的石英脉体不仅厚度增大而且成为 Au 元素的强富集体。

**致谢:**感谢长安大学魏宽义教授的有益学术指导及匿名审稿人提出的宝贵修改意见。

## 参考文献(References):

- [1] 吴学益. 构造地球化学导论[M]. 贵阳:贵州科技出版社, 1998:61-355.  
Wu Xueyi. An Introduction to Tectono-chemistry [M]. Guiyang: Guizhou Science & technology Press, 1998:61-355(in Chinese).
- [2] 张国伟, 孟庆任, 于在平. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D), 1996, 26(3):193-200.  
Zhang Guowei, Meng Qingren, Yu Zaipin. Orogenic process and dynamic features of the Qinling orogene [J]. Science in China(series D), 1996, 26(3):193-200(in Chinese).
- [3] 毕诗健, 李建威, 李占轲. 华北克拉通南缘小秦岭金矿区基性脉岩时代及地质意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2011, 36(1): 17-32  
Bi Shijian, Li Jianwei, Li Zhanke. Geological significance and geochronology of Paleoproterozoic mafic dyke of Xiaoqinling gold district, Southern margin of the North China Craton [J]. Earth Science—Journal of China University of Geoscience, 2011, 36(1):

- 17-32(in Chinese with English abstract).
- [4] 胡正国, 钱壮志. 小秦岭地质构造新认识 [J]. 地质论评, 1994, 40 (4):289-295.  
Hu Zhengguo, Qian Zhuangzhi. A new view on the tectonics of Xiaoqingling area [J]. Geological Review, 1994, 40(4):289-295(in Chinese with English abstract).
- [5] 胡正国. 小秦岭金矿带金矿成矿作用探讨 [J]. 秦岭地区金矿地质科研讨论会论文选编, 1991:51-55.  
Hu Zhengguo. A discussion of metallization of gold deposits belt of Xiaoqinling [J]. Science & Research Conference of Gold Deposits Geology of Qingling Area, 1991:51-55(in Chinese).
- [6] 吕古贤. 关于矿田地质学的初步探讨 [J]. 地质通报, 2011, 30(4): 478-486.  
Lu Guxian. Preliminary discussion about ore field geology [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(4):478-486(in Chinese with English abstract).
- [7] 韩润生, 王雷, 方维萱, 等. 初论云南易门地区凤山铜矿床刺穿构造-岩相分带模式[J]. 地质通报, 2011, 30(4):495-504  
Han Runsheng, Wang Lei, Fang Weixuan, et al. The preliminary discussion on diaper structure-lithofacies zonation model for the Fengshan copper deposit, Yimen area, Yunnan China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30 (4):495-504 (in Chinese with English abstract).
- [8] De Paor. Rf/φ Strain analysis using an orientation net [J]. J. Struct. Geol., 1988, 10:323-333.
- [9] 赵鹏大. 矿床统计预测[M]. 北京:地质出版社,1985.  
Zhao Pengda. Statistic and Prediction of Deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985(in Chinese).
- [10] 吕古贤, 郭涛. 阜山金矿区构造变形岩相特征与成矿流体构造物理化学特征研究[J]. 地质地球化学, 2001, 29(3):90-93.  
Lu Guxian, Guo Tao. Tectono-deformation-facies characteristic and tectono-physicochemistry of metallogenic liquid for Fushan gold deposit [J]. Geology-geochemistry, 2001, 29 (3):90-93 (in Chinese with English abstract).
- [11] 吕古贤, 邓军, 倪师军, 等. 构造物理化学成矿理论问题探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(3):251-260.  
Lu Guxian, Deng Jun, Ni Shijun, et al. Research on metallogenetic theory of tectono-physicochemistry [J]. Geotectonicaet Metallogenia, 2003, 27(3):251-260(in Chinese with English abstract).
- [12] 王玉荣, 胡受奚. 钾交代蚀变过程中金活化转移实验研究——以华北地台金矿为例[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(5):500-507.  
Wang Yurong, Hu Shouxi. Experimental study of gold activation-transportation in the process of potash metasomatism - alteration——North China platform gold deposit taken as an example[J]. Science in China(series D), 2000, 30(5):500-507(in Chinese with English abstract).
- [13] 舒斌, 郭涛, 吕古贤, 等. 构造应力对焦家金矿床的成矿控制[J]. 现代地质, 1999, 13 (4):426-431.  
Shu Bin, Guo Tao, Lu Guxian, et al. Ore control of tectonic stress to Jiaojia gold deposit [J]. Geoscience, 1999, 13 (4):426-431 (in

Chinese with English abstract).

[14] 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, 1996:62-65.

He Shaoxun, Duan Jiarui, Liu Jishun, et al. Ductile Shear-zone to Metallogeny[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1996: 62-65(in Chinese).

[15] 陈柏林. 构造形变类型与金矿化类型的关系 [J]. 世界地质,2000, 19(3):217-223.

Chen Bolin. Relation between types of structural deformation and gold mineralization [J]. World Geology, 2000, 19 (3):218-222 (in Chinese with English abstract).

[16] 翟裕生, 吕古贤. 构造动力体制转换与成矿作用[J]. 地球学报, 2002, 23(2):97-101.

Zhai Yusheng, Lu Guxian. Transition of tectonic and dynamic regime and mineralization [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2002, 23 (2):97-101 (in Chinese with English abstract).

## Trace elements geochemistry of different structural-lithofacies zones of the Chen'er gold deposit in Shaanxi Province and structural ore-control mechanism

LI Jian-bo<sup>1</sup>, JIANG Zhen-pin<sup>1</sup>, LU Yong-hua<sup>1</sup>, GUO Lei<sup>2</sup>, SHI Xing-jun<sup>2</sup>, ZENG Tao<sup>2</sup>

(1. East China Institute of Technology, Fuzhou 344000 Jiangxi, China;

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The content of trace elements, especially the content of Au, becomes higher from the schistosity zone through the cataclastic alteration zone to quartz vein zone, as evidenced by an analysis of features of trace elements in different structure-lithofacies zones of the Chen'er gold deposit. Strain measurement of quartz in different structural-lithofacies zones shows that the strain intensity in the schistosity zone is higher than that in the cataclastic alteration zone, and the strain intensities are concentrated in the schistosity zone. The R Cluster Analysis indicates that Au is closely related to Ag, Cu, Pb and Zn and slightly related to Ni and Co. The authors have found that the cataclastic alteration zone had a lot of structures and made ore fluid concentration easy, and the schistosity zone had weak capability for concentrating the ore fluid. The transition of ductile and brittle deformation not only controlled the space of the ore deposit but also determined the direction of elements transportation.

**Key words:** Chen'er gold deposit; structural-lithofacies zone; strain measurement; trace element transition of tectonic and dynamic regime

**About the first author:** LI Jian-bo, male, born in 1976, doctor, engages in the study of structure and mineralization; E-mail: jianboli2000@163.com.