胶东西北部金热液成矿系统内部结构解析

邓 军，王庆飞，杨立强，高帮飞

岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室，北京 100083

摘要：成矿系统研究可划分为系统外部环境与内部结构2个方面，外部环境分析立足于代表性成矿带——矿集区宏观地质背景的深入解剖，着重揭示地球圈层的内部结构和构造体制转换－岩浆活动－流体汇集多种事件的耦合作用对成矿单元内部成矿流体活动与大规模成矿事件启动机制. 内部结构研究主要通过矿田－矿床－矿体等多个尺度构造－流体－成矿作用的解析，解剖矿体－矿化网络的时空结构，查明成矿流体物理输运机理及元素的富集－输运－沉淀过程. 以胶西北矿集区为例，从分析系统内部结构的视角出发，力图查明系统外部地质背景对矿集区内部成矿作用的影响，并建立成矿系统内部各成矿要素（成矿产物、成矿过程等）的内在联系；作为成矿学研究思路的一种新的尝试，深化区域成矿作用认识有一定推动作用. 研究发现，区域构造体制转换所引发的胶西北矿集区应力－应变场性质转变不但启动了区域成矿活动，成矿活动在由压剪向张剪过渡的时空界面发生；而且还造就了复杂多变的控矿构造形迹，由于空间构造形迹及力学性质的差异，导致了区域成矿的多样性. 应力－应变场性质的变化引起流体各项物理化学参数发生了突变，并引发成矿物质的富集沉淀，成矿过程中流体一则由氧化状态向还原状态稳定过渡；而不同构造形迹控制下的流体运移方式差异则是导致成矿多样性的内因；成矿过程具复杂性，其主要表现为矿体金品位和厚度的空间分布多重分形特征、蚀变分带的自相似性、成矿作用的突发性及成矿产物的多样性.

关键词：胶西北矿集区；成矿流体；成矿系统；时空结构.

中图分类号：P618.5 **文章编号**：1000－2383(2005)01－0102－07 **收稿日期**：2004－06－12

An Analysis of the Interior Structure of the Gold Hydrothermal Metallogenic System of the Northwestern Jiaodong Peninsula, Shandong Province

DENG Jun, WANG Qing-fei, YANG Li-qiang, GAO Bang-fei

Key Laboratory of Lithospheric Tectonics and Exploration, China University of Geosciences, Beijing 100083, *China*

Abstract: The study of metallogenic systems includes two branches: the geological background and the system's interior structure. The geological background analysis is based on the dissection of the macroscopic environments of representative metallogenic belts or typical ore deposit concentration areas. It emphasizes the contributions of both the layered structure of the earth and the coupling processes of the transformation of tectonic regimes, magmatic activity and fluid influx to the activation of regional ore-forming fluid and the initiation of large-scale mineralization. The study of interior structure aims to clarify the temporal-spatial structure of the mineralized web, the physical mechanism of ore-forming fluid transportation and the chemical process of the enrichment-migration-precipitation of metallogenic elements. It considers the relationship between these elements by analyzing the tectonics-fluids-mineralization process in multi-scales, including orefield, ore deposit and ore body scale. Taking the Northwestern Jiaodong ore deposit concentration area as an example, and using a method of interior system analysis, the authors try to reveal the influence of the exterior geological environment of the ore-forming system on the metallogenesis of the interior ore deposit concentration area, and to establish the intrinsic relations of ore-forming factors (ore-forming products, ore-forming processes etc.). Results show that the transition of stress-strain field proper-

基金项目：教育部科学技术研究重点项目(Nos. 01037, 03678)；国家自然科学基金重点项目(No. 40172036)；教育部跨世纪人才基金项目；国家重点基础研究发展规划项目(No. 1999043206).

作者简介：邓军(1958—)，男，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. E-mail: djun@cugb.edu.cn

ties, created by the transformation of regional tectonic regimes, leads to regional ore-forming activity, which occurs in the temporal-spatial interfaces where the shearing stress alters from compression to tensile. The transformation also forms the complex and multivariate ore-controlled structural features. The differences of spatial structural features and mechanical properties result in the variety of regional metallogeny. Variations of stress-strain field properties in the ore deposit concentration area range cause the mutation of physicochemical parameters of ore-forming fluid, initiating the deposition of the metallogenic materials in the fluid. Over geological time, the fluid's Eh declined, and changed from an oxidation state to a deoxidation state. The fluid transport mode, which was under the control of different structural features, is the internal cause of metallogenic variety. The complexity of the ore-forming process mainly shows in the multi-fractal features of the spatial distribution of the gold ore bodies' grade and thickness, the self-similarity of alteration zoning, the inflation of ore-forming activity, and the variety of ore-forming products. This research is a new method of study in metallogeny and also an important approach to deepen the understanding of metallogenesis.

Key words: Northwestern Jiaodong ore deposit concentration area; ore-forming fluid; metallogenic system; temporal-spatial structure.

成矿系统研究可划分为系统外部环境与内部结构 2 个方面，成矿系统外部环境主要包括区域重大地质事件、壳幔结构、深断裂及浅层断裂系的连通率、区域流体活动、地层建造及岩浆侵入事件等成矿系统内部结构包括成矿作用发生的时空界面、成矿产物的多样性、成矿物理－化学过程（成矿流体物理输运机理与元素富集－输运－沉淀的化学过程等），后者是成矿作用发生与成矿产物多样性的内因（翟裕生等，1999）.

胶东西北部矿集区（以下简称胶西北矿集区），是中国重要的金产地（图 1），研究历史悠久. 近年来，由于高精度同位素定年与流体示踪等关键技术的应用和基础地质工作的大量积累，前人对成矿系统外部环境做了大量探讨，认为地质演化历史中构造体制转换事件是大规模成矿作用发生的必需条件，其引起的区域壳幔物质交换、岩浆活动等系列事件耦合作用，为区域成矿作用提供了充足的成矿物质、良好的导流网络、丰富的成矿流体、持续的成矿能量等必备条件（邓军等，2000，2003），在此基础上，进一步阐明成矿系统的内部结构特征，并讨论外部环境对内部结构的制约作用，成矿物理化学过程与成矿作用发生与多样性间内在联系便成为一种对区域成矿作用研究的及时推进与必要补充.

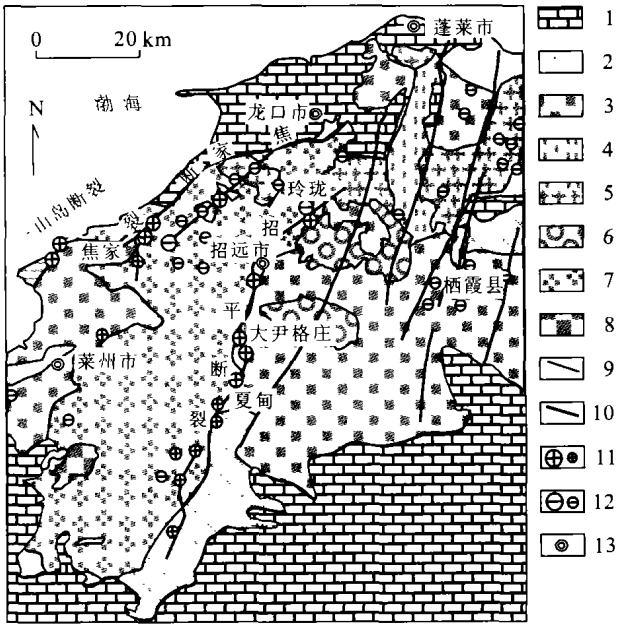


图 1　胶西北金矿集区地质矿产图（据 Wang *et al*.，1998 和路东尚等，2002 资料修编）

Fig. 1　Sketch map of geology and mineral products in deposit concentrating area, northwestern Jiaodong

1. 中新生界；2. 中下元古界；3. 上太古界；4. 艾山花岗岩；5. 郭家岭花岗岩；6. 滦家河花岗岩；7. 玲珑花岗岩；8 未定名花岗岩；9. 地质界线；10. 断裂；11. 焦家式金矿；12. 玲珑式金矿；13. 城市

1　区域控矿构造特征

区域控矿构造的演化受宏观构造背景的制约，板块多期碰撞与郯庐断裂长期活动，形成研究区复杂的控矿构造. 以胶东西北部北北东－北东向断裂带为例，其复杂性体现在（邓军等，1996，1998）：（1）断裂面三维产状复杂多变，其在平面上与剖面上均呈现舒缓波状；（2）构造产物多样，同一断裂带在同一平面可以发育节理带、糜棱岩带、碎裂带等多种产物（图 2）；（3）构造力学性质经过多期变化，其先经历韧性变形，再经历脆性变形，使糜棱岩带上叠加了碎裂带；脆性变形阶段的力学性质前后也有所差别，成矿前为压剪性，成矿期为张剪性，成矿后再转变为压剪性；（4）成矿期区域变形性质及应力状态分布不

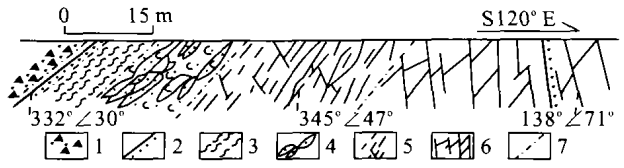


图2 焦家金矿断裂构造分带剖面(−100 m,104线)(邓军等,1996)

Fig. 2 Fracture zoning section of Jiaojia gold deposit, Shandong

1. 破碎带;2. 断裂面及断层泥;3. 积压片理带;4. 构造透镜体带;5. 密集节理带;6. 稀疏节理带;7. 构造分带界线

均一,一是在张剪的环境中,某些断裂仍以剪性为主,而在压性的环境中,断裂局部地段也会出现张性变形,二是有些地段以韧脆性变形为主,有些地段则以韧性变形为主;(5)成矿阶段主压力方位发生转变,成矿前为NW向,成矿期则转为NE向;(6)次级断裂发育,且多于主干断裂相交,构成"入"字型构造组合.

2 成矿作用发生的时空界面

成矿作用发生与流体就位的整体规律与控矿断裂力学性质时空转换密切相关. 成矿前,导流系统处于压剪状态,虽发生大规模蚀变,但成矿作用不强烈;成矿期,由于区域应力场性质的变化,包括控矿断裂压剪−张剪的转变和主压应力方位的变化,高强度成矿作用发生,金元素巨量富集;成矿后,断裂又由张剪转变为压剪,成矿结束(邓军等,2001a)(表1). 成矿期,在控矿断裂以张剪性为主的地段,流体富集,形成矿体. 由于区域构造应力场分布的不均一性,在某些局部地段,控矿断裂仍以剪性为主,而流体在整体剪性中的局部张性部位就位. 剪性向张性转换的部位主要包括:(1)主次断裂交汇部位;(2)断裂面产状变化处(图3);(3)剪切带中的张性节理处;(4)不同岩性岩石的交界处.

3 成矿多样性

区域金矿类型主要分为两类,即焦家式(蚀变岩型)与玲珑式(石英脉型)(表2). 玲珑型金矿矿体规模小,数量多,与围岩分界清楚,形态复杂呈脉状、透镜状,矿体走向与断裂走向斜交,品位变化大,蚀变分带以充填石英脉为中心,线型蚀变为主;焦家式金矿产在主断裂面附近,主矿体数量少,单个金矿体为宽大"饼状"或透镜状,矿体连续性好,矿化稳定,与围岩分界模糊,走向与断裂面平行. 在焦家式金矿中,除主断裂面附近的主矿体外,还发育有远离断裂面的密集节理带的矿脉,其矿体呈脉型、网脉型,金品位较主矿体低(表3).

控矿断裂的空间差异性也导致了上述成矿多样性. 区域脆−韧变形性质的差异导致了玲珑−焦家式矿床类型的差异. 焦家式金矿形成于相对封闭的从韧−脆性变形的地段,而玲珑型金矿形成于相对

表1 胶西北金矿集区成矿演化模式

Table 1 Evolution model of metallogeny in deposit concentrating area of northwestern Jiaodong

成矿阶段		构造性质		围岩蚀变		矿物生成期次		各成矿阶段流体特征		岩脉
		主应力方位	性质		强度	演化期次	矿物结晶顺序	流体类型	流体物理化学参数	
成矿前	I	NW	压剪		强					闪斜煌斑岩脉
成矿期	II_1	NE	张剪	硅化 钾化 绢英岩化 碳酸盐化	弱	石英-黄铁矿阶段	石英 方解石 黄铁矿	$NaCl-H_2O$	CO_2/H_2O ρ_s pH Na/K p t/°C pH F/Cl	蛇纹石化、碳酸盐化橄榄拉辉煌斑岩、辉石云煌岩、辉绿岩脉
	II_2				强	含金黄铁矿-石英阶段		$NaCl-H_2O-CO_2$		
	II_3				中	金多金属硫化物阶段	金	$NaCl-H_2O-CO_2(CH_4)$		
	II_4				弱	碳酸盐阶段		$NaCl-H_2O$		
成矿后	III	NW	正断							云斜煌斑岩、闪长玢岩、花岗斑岩

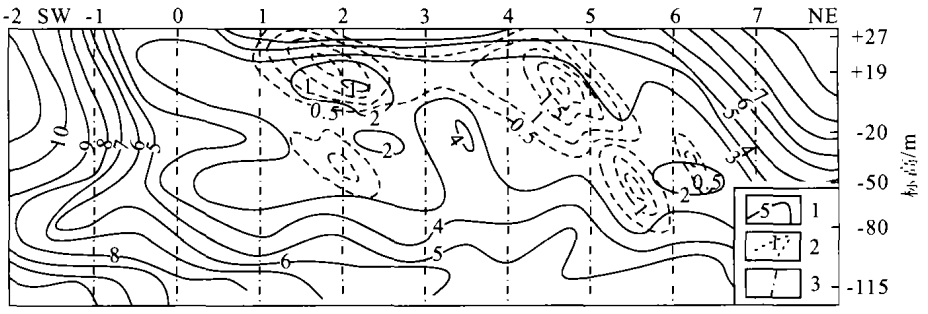


图 3　灵家沟金矿 1 号脉主断层参考面投影(卢作祥等，1988)

Fig. 3　Reference surface projection of major fault in vein 1 of Lingjiagou gold deposit, Shandong

1. 主断面与参考面之间的垂直距离(m)；2. 矿体厚度等值线(m)；3. 勘探线

表 2　玲珑－焦家式金矿特征对比分析

Table 2　Characteristics comparison of Linglong-type and Jiaojia-type gold deposits

金矿类型	玲珑式金矿	焦家式金矿
形态规模	产在玲珑花岗岩断裂带，与围岩分界清楚，矿体规模小、数量多，厚度形态品位变化大，形态复杂呈脉状、透镜状，矿体走向与断裂走向斜交	矿体即赋存于花岗岩边部与老地层接触断裂带，靠近岩体的碎裂黄铁绢英岩内，与围岩分界模糊，矿体数量少，单个金矿体呈宽大的"饼状"、透镜状，矿体连续性好，矿化稳定，总体走向与剪切带平行(多为 NE 走向)
形成背景	形成于浅部脆性断裂带中	形成于较深部从韧性变形到脆性变形的转折期
产出岩体	玲珑岩体	玲珑岩体、郭家岭岩体
矿化类型	石英脉型	蚀变岩型，矿化有浸染状(Ⅰ号矿体)、细脉浸染状(Ⅱ号矿体)及细脉状(Ⅲ号矿体)
矿石矿物成分	主要为银金矿、自然金、黄铁矿，其次为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿，脉石为石英、长石、绢云母、方解石	主要为自然金、银金矿、黄铁矿，其次为黄铜矿、闪锌矿、方铅矿，脉石为石英、绢云母、长石、方解石
矿石有用组分	Au、Ag、Cu、S、Pb、Zn；金品位(10～25)×10^{-6}	Au、Ag、Cu、Pb、S；金品位(5～13)×10^{-6}
矿石类型	块状黄铁矿石英脉型、网脉状黄铁矿石英脉型及石英黄铁矿脉型，工业类型为中硫银金矿	浸染状黄铁绢英岩型、细脉浸染状花岗岩型、网脉状黄铁绢英质碎裂花岗岩型，工业类型为低硫银金矿
围岩蚀变	钾化、绢英岩化、硅化、黄铁矿化和碳酸岩化等，蚀变分带以充填石英脉为中心，线型蚀变为主	绿泥石化、钾化、绢云母化、硅化、黄铁矿化、碳酸盐化等，且蚀变构造岩有良好的分带性，以黄铁绢英岩为中心，面型蚀变为主
垂向出露标高	高差大	高差小
成矿阶段	Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ阶段矿化齐全	Ⅰ阶段矿化缺乏或规模很小，Ⅱ、Ⅳ阶段矿化发育，Ⅲ阶段矿化相对不发育
$\delta^{18}O$	随高度变化不明显	由深部向浅部持续升高
$\delta^{34}S$	(4.34～10.4)×10^{-3}，平均 6.78×10^{-3}(15 样)	(7.6～12.6)×10^{-3}，平均 9.22×10^{-3}(20 样)
成矿介质条件	相对开放体系	相对封闭体系

开放的脆性变形环境中．焦家式金矿则是由于控矿形迹的不同而导致矿体类型的差异．成矿产物虽存在诸多差异，但区域矿化蚀变类型、成矿阶段及金的赋存状态却具有一致性．成矿过程主要分为 4 个阶段：(1)乳白色石英黄铁矿阶段；(2)含金石英黄铁矿阶段；(3)含金多金属硫化物石英阶段；(4)碳酸盐阶段，成矿作用主要集中在第二、三阶段(表 1)．矿化蚀变主要包括黄铁矿化、钾化、硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化等．矿石中金矿物主要为银金矿，赋存状态有包体金、晶隙金、裂隙金．

4　成矿物理－化学机理

4.1　成矿流体水－岩反应

区域水－岩作用产物具有相似的蚀变类型，因此也发生了相同的蚀变反应．

红化花岗岩发育广泛．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_2O_3 为迁出组分，其主要化学反应如下：

$(NaAlSi_3O_8+CaAl_2Si_2O_8)+4SiO_2+3K^-=3KAlSi_3O_8+Ca^{2-}+Na^+$；

$2K(Mg\cdot Fe)_3[AlSi_3O_{10}](OH)_2+4H^-=Al(Mg\cdot Fe)_5\cdot[AlSi_3O_{10}](OH)_8+(Mg,Fe)^{2-}+2K^-+3SiO_2$；

$2NaCaAlSi_3O_8+5(Mg,Fe)^{2+}+(Fe,Al)^{3-}+10H_2O=(Mg,Fe)_5^{2-}\cdot$

表3 焦家式金矿床分带特征

Table 3 Characteristics of Jiaojia-type gold deposit

矿床地质特征	构造—矿化分布				
距主断裂面远近	近	断层下盘			远
构造强度	最强	强	中强	渐弱	弱
矿化强度	最强		强	强弱交替	弱
蚀变强度	最强		强	中弱	弱
构造岩带	糜棱岩及碎裂岩带		碎裂(状)岩及节理密集带		弱
矿化阶段	Ⅲ Ⅳ	Ⅲ Ⅱ Ⅳ	Ⅱ Ⅲ	Ⅱ(Ⅰ)	—
蚀变类型	绢英岩化、弱黄铁绢英岩化	黄铁绢英岩化	黄铁绢英岩化、钾化、硅化	钾化、硅化	未蚀变玲珑混合花岗岩
矿化类型	浸染型	稠密浸染型	浸染型、脉型(混合型)	脉型、网脉型	—

$(Fe,Al)^{5-}Si_4O_{10}(OH)_8+4SiO_2+2Na^{-}+2Ca^{2+}+12H^{-}$.

上述三反应即斜长石钾化、斜长石及黑云母绿泥石化. 此过程消耗掉 Fe^{3+}、Fe^{2+}、Mg^{2+} 离子，而增多 K^{+}、Na^{-}、$Ca^{\cdot}$ 等离子.

成矿阶段发育广泛的绢英岩化. 此时，大量 SiO_2、Fe_2O_3 及金属成矿元素迁入，其主要化学反应为：

$4K(Mg,Fe)_3Al[AlSi_3O_{10}](OH)_8+2K^{\cdot}+38H^{-}=2KA_{12}\cdot[AlSi_3O_{10}](OH)_2+20(Mg,Fe)^{2-}+Al_2O_3+SiO_2+33H_2O$;

$(NaAlSi_3O_8-CaAlSi_3O_8)+K^{-}+2H^{-}=KAl_2[AlSi_4O_{10}](OH)_2+Ca^{2+}+Na^{-}+SiO_2$.

金沉淀过程主要包括：(1)红化阶段，成矿流体中金沉淀析出主要通过以下反应进行：

$[Au(HS)_2]^{-}+Fe^{2-}=Au+FeS_2+2H^{-}$.

此时(成矿作用第一阶段)，体系中 Fe^{2+} 充分，有利于向右进行，体系中 SiO_2 和 FeS_2 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. (2)绢英岩化阶段，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：

$[Au(HS)_2]^{-}+1\ 2H_2O=Au+1\ 4O_2+2HS^{-}+H^{-}$.

4.2 成矿物理化学参数演化

上述矿化—蚀变反应可以看出，第一成矿阶段的成矿流体为贫金流体. 包裹体研究(卢焕章等，1999)证实成矿作用第二、三阶段的成矿流体类型与第一阶段明显不同，主要变化为富 CO_2 与 CH_4. 第一成矿阶段虽有物质的带入与迁出，但尚不能解释包裹体中高含量 CO_2 与 CH_4 来源. 笔者将这种流体的突变现象解释为区域应力—应变场性质的突变. 主成矿期成矿流体富集 CO_2 与 CH_4，有利于吸附基底变质岩系与侵入岩中的金元素，使成矿流体由贫金流体变为富金流体，同时引起流体的各项物理化学参数发生变化，使金易于沉淀. 在成矿过程中，成矿物理化学参数则趋于递减或递增，流体由氧化状态向还原状态逐步过渡.

4.3 成矿流体物理输运过程

成矿产物多样性的直接因素是不同构造环境中流体输运方式不同. 玲珑石英脉型金矿是流体以充填的方式就位于剪切张裂隙中，焦家式裂隙矿体是流体在裂隙网中缓慢渗流形成的，焦家式金矿主矿体的形成则为水压破裂的方式. 具体体现在：(1)岩石以脆性应变为主时，易发育大量的剪切破裂裂隙. 这些局部张性裂隙在整体剪性的断裂中成为很好的容矿空间，为开放的成矿环境. 流体仅仅是以缓慢流动的方式充填到已存裂隙中成为脉体，并由于温度、压力的迅速降低而失去动力，因此它们与外界很少有物质交换，导致矿体与围岩界线清楚，其对应于玲珑石英脉型金矿. (2)在以张剪性为主的地段，流体运移至主断裂远处时，由于温度、压力以及构造应力急骤降低，成矿流体活动性大为减弱，大多在微弱压力差作用下，以缓慢流动方式进入开启的剪切裂隙中. 裂隙充填范围超出了蚀变岩带范围，由此可见虽然热动力条件的减弱已不足以引起大规模蚀变与矿化，但是在无蚀变部位依然有可能由于流体缓慢渗流而形成矿体. (3)韧—脆性应变则比脆性应变的构造层次深，往往表现为相对封闭的环境. 由于温度和压力相对较高，因而大大降低了岩石的应变强度，极易发生岩石变形，特别是在流体相存在时，由于液压影响，在很小差异应力下就会发生变形. 当岩石受力作用时，存在于裂隙中的成矿溶液由于具有体积不可压缩性，因此往往在平行于主应力方向被压扁，而在垂直于应力方向被拉长，当其内压大于外压时，裂隙就开始向外发生扩展；同

表 4　望儿山金矿品位特征

Table 4　Characteristics of gold grade of Wangershan gold deposit

中段	尺度 10^{-6}	分维 D	拟合度
60 m	0.5～80	1.029 9	0.991 6
30 m	0.3～20	0.983 9	0.981 8
0 m	0.5～90	10 362	0.977 0
−30 m	0.1～1.0	0.236 5	0.957 2
−30 m	1.0～120	1.125 2	0.987 1
−60 m	0.1～1.0	0.286 5	0.978 1
−60 m	1.0～7.0	1.172 4	0.991 0
−90 m	0.1～1.0	0.227 4	0.957 7
−90 m	1.0～39	1.332 5	0.981 8
−120 m	0.1～0.7	0.458 3	0.994 1
−120 m	0.7～50	1.068 9	0.989 7

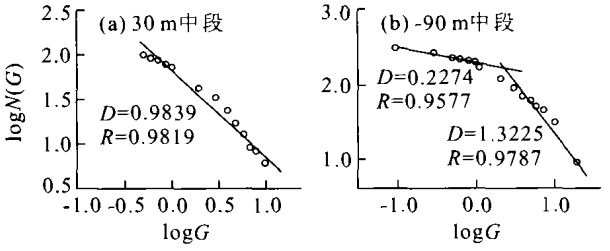


图 4　望儿山金矿典型中段金品位双对数坐标图

Fig. 4　Gold grade log-log plot of the typical intermediate section of Wangershan gold deposit

时在压扁的过程中,使得成矿热液往往与围岩发生反应,蚀变与矿化又会改变岩石的物理性质,从而加速裂隙的进一步扩张. 由于成矿作用早期构造物理化学环境较为封闭,热动力条件相对较为稳定,这也为流体驱动裂纹扩展提供了良好的条件. 经过重复的流体驱动裂隙扩展过程,最终形成了现在所见到的规模巨大、品位稳定的蚀变岩型矿化. 其对应于焦家式蚀变岩型主矿体的形成.

4.4　成矿过程的复杂性

成矿过程是物理—化学作用耦合的复杂过程,主要表现为:(1)矿体金品位空间分布具有分形特征. 以望儿山金矿为例,其以 0 m 标高为界,以上为石英脉型矿化为主,以下则以蚀变岩型矿化为主. 各中段金品位分布研究表明,金品位呈分形/多标度分形分布,0 m 标高以上,在 10^{-5}～10^{-7} 尺度内,金品位呈单一的分形分布,分维值小于 1.04,0 m 标高以下,在 10^{-7}～10^{-6} 及 10^{-6}～10^{-5} 尺度内存在 2 个标度空间的分形分布,且反映主成矿阶段的分维值较 0 m 标高以上的大,一般大于 1.1. 这隐含着成矿过程的复杂性和成矿的多样性,即焦家型与玲珑型金矿的金因素分布有很大差异(表 4,图 4). (2)局部地段的蚀变分带现象呈现自相似的特点. 以焦家金矿田为例,热液蚀变分带一般自矿体向两侧依次为(黄铁)绢英岩带→绢英岩化花岗岩带→红化(K 化)花岗岩带. 这种蚀变分带在大规模发育的红化花岗岩带内、裂隙旁侧和显微尺度上如出一辙. (3)由于成矿流体性质(成矿物理化学参数)的突变,引发了大规模的成矿作用,而在金元素大量富集沉淀过程中,成矿流体各项物理化学参数趋于稳定递减或递增(Deng *et al.*, 2001b). (4)区域成矿过程蕴含着同一机理,即蚀变阶段、成矿过程、成矿机理一致,而由于控矿构造的力学性质差异而导致最终的成矿产物(矿石结构与类型)呈现多样性.

5　结论与讨论

地质演化历史中构造体制转换事件引起的区域壳幔物质交换、岩浆活动等系列事件耦合作用,即为区域成矿作用提供了充足的成矿物质、良好的导流网络、丰富的成矿流体、持续的成矿能量等必备基础;更重要的是,其所引发的矿集区应力—应变场性质转变也进一步启动了区域成矿活动,成矿活动在由压剪向张剪过渡的时空界面发生,宏观构造体制转换同时也造就了复杂多变的控矿构造形迹,由于空间构造形迹及力学性质的差异,导致了区域成矿

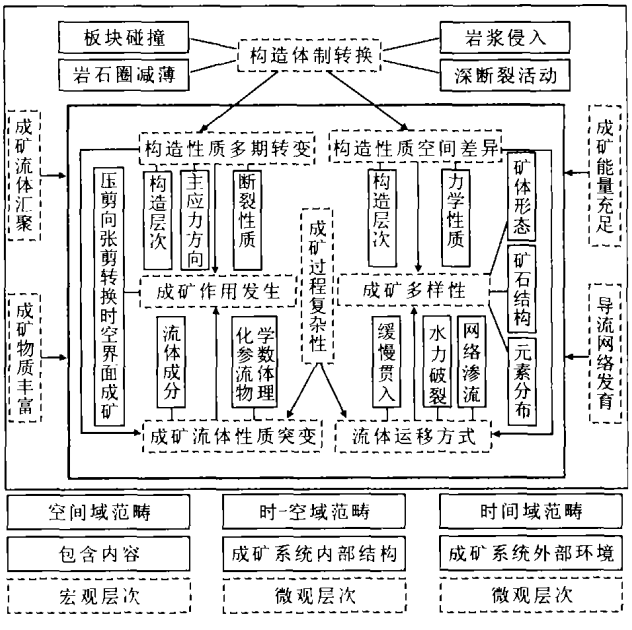


图 5　胶东西北热液成矿系统研究的尺度级联

Fig. 5　Correlation researches in deposit concentrating area of northwestern Jiaodong

的多样性. 成矿过程物理－化学机制研究则发现，由于区域应力－应变场性质的变化引起流体的各项物理化学参数发生突变，并引发了成矿物质的富集沉淀，在成矿过程中流体则由氧化状态向还原状态稳定过渡；而不同构造形迹控制下的流体运移方式的差异则是导致成矿多样性的内因；成矿过程复杂性主要表现为矿体金品位和厚度的空间分布多重分形特征、蚀变分带的自相似性、成矿作用的突发性及成矿产物的多样性(图5).

References

Deng, J., Fang, Y., Yang, L. Q., et al., 2001b. Numerical modelling of ore-forming dynamics of fractal dispersive fluid systems. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 220－232.

Deng, J., Liu, W., Sun, Z. S., et al., 2003. Evidence of mantle-rooted fluids and multi-level circulation ore-forming dynamics: A case study from the Xiadian gold deposit, Shandong Province, China. *Science in China* (*Series D*), 46(Suppl.): 96－104 (in Chinese).

Deng, J., Lü, G. X., Yan, L. Q., et al., 1998. The transformation of tectonic stress field and interfacial metallogensis. *Acta Geosicentia Sinica*, 19(3): 244－250 (in Chinese with English abstract).

Deng, J., Sun, Z. S., Wang, J. P., et al., 2001a. Dynamic system transformation and gold ore-forming process. *Mineral Deposits*, 20(1): 71－77 (in Chinese with English abstract).

Deng, J., Xu, S. L., Fang, Y., et al., 1996. The tectonic systems and gold metallogenic dynamics in the northwestern Jiaodong, China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Deng, J., Yang, L. Q., Fang, Y., et al., 2000. Crust-mantle interaction and ore-forming effect of gold ore deposits concentrated area in Jiaodong, Shandong, China. *Scientia Geologica Sinica*, 35(1): 60－70 (in Chinese with English abstract).

Deng, J., Zhai, Y. S., Wang, J. P., et al., 2000. Shear alteration, mass transfer and gold mineralization: An example from Jiaodong ore deposit concentrating area, Shandong, China. *Journal of China University of Geosciences*, 11(3): 281－287.

Lu, D. S., Lin, J. Z., Guo, C. Y., et al., 2002. Geology and prospective in gold deposits clustering region of Zhaoyuan, Shandong. Earthquake Press, Beijing, 174－177 (in Chinese).

Lu, H. Z., Guha, J., Fang, G. B., 1999. Characteristics of ore-forming fluid in Linglong goldmine, Shandong, China. *Geochimica*, 28(5): 421－436 (in Chinese with English abstract).

Lu, Z. X., Hu, J. J., Fan, Y. X., et al., 1988. On characters of fault controlled ores and regularities of mineralization enrichment of Jiaojia gold deposits, eastern Shandong, China. In: Regional metallogenic conditions of mainly gold types in China, series 5: Jiaodong area. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Wang, L. G., Qiu, Y. M., McNaughton, N. J., et al., 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids. *Ore Geology Reviews*, 13: 275－291.

Zhai, Y. S., Deng, J., Ding, S. J., et al., 2001. Discussion on critical transition of ore-forming parameters (factors). *Mineral Deposits*, 20(4): 301－306 (in Chinese with English abstract).

Zhai, Y. S., Deng, J., Li, X. B., et al., 1999. Regional metallogeny. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

邓军，刘伟，孙忠实，等，2003. 幔源流体判别标志及多层循环成矿作用动力学——以山东夏甸金矿床为例. 中国科学(D辑)，46(增刊)：96－104.

邓军，吕古贤，杨立强，等，1998. 构造应力场转换与界面成矿. 地球学报，19(3)：244－250.

邓军，孙忠实，王建平，等，2001a. 动力系统转换与金成矿作用. 矿床地质，20(1)：71－77.

邓军，徐守礼，方云，等，1996. 胶东西北部构造体系及金成矿动力学. 北京：地质出版社.

邓军，杨立强，方云，等，2000. 胶东壳－幔相互作用与金成矿效应. 地质科学，35(1)：60－70.

路东尚，林吉照，郭纯毓，等，2002. 招远金矿集中区地质与找矿. 北京：地震出版社，174－177.

卢焕章，Guha, J.，方根保，1999. 山东玲珑金矿的成矿流体特征. 地球化学，28(5)：421－436.

卢作祥，胡家杰，范永香，等，1988. 胶东焦家金矿田断裂控矿特征及矿化富集规律. 见：中国金矿主要类型区域成矿条件文集(5)：胶东地区. 北京：地质出版社.

翟裕生，邓军，丁式江，等，2001. 关于成矿参数临界转换的探讨. 矿床地质，20(4)：301－306.

翟裕生，邓军，李晓波，1999. 区域成矿学. 北京：地质出版社.