

# 陕西东沟金矿床地质地球化学特征及成因探讨

高旭民, 陈远荣\*, 孟鑫, 曹凌飞, 马旭

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2024年1月25日; 录用日期: 2024年3月12日; 发布日期: 2024年3月19日

## 摘要

东沟金矿位于唐藏-商南断裂以南、凤镇-山阳断裂以北的中秦岭构造带, 成矿条件好, 找矿潜力大。通过总结矿区成矿地质特征和对不同期次侵入岩、蚀变岩、含金矿石等地质体的微量和稀土元素进行了测试分析, 结果发现: 1) 矿区位于由中性和酸性侵入岩构成的东江口岩体, 主要有黑云母二长花岗岩和闪长岩出露, 岩浆主要来自地壳; 2) 东江口岩体的年龄约为223 Ma, 推断矿区围岩形成于印支期, 成矿时代为燕山早期; 3) 矿区围岩轻稀土的分馏程度较高, 重稀土分馏程度较低, 重稀土元素分馏度值接近1, 属于地壳重熔型花岗岩; 4) 围岩的 $\delta\text{Eu} = 0.67\sim 0.90$ , 表现为负铕异常, 在配分曲线上为弱的铕谷, 说明岩浆的分异程度相对较高, 对成矿有利。综合分析认为, 岩浆来源主要来自于地壳, 也有少部分来自上地幔, 经历过地壳的重熔作用, 推断其成因类型为构造控制的与燕山期中酸性侵入岩有关的岩浆热液型金矿床。

## 关键词

矿床特征, 微量元素, 稀土配分模式, 东沟金矿, 陕西

# Discussion on the Geological and Geochemical Characteristics and Genesis of Donggou Gold Deposit in Shaanxi Province

Xumin Gao, Yuanrong Chen\*, Xin Meng, Lingfei Cao, Xu Ma

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

\*通讯作者。

文章引用: 高旭民, 陈远荣, 孟鑫, 曹凌飞, 马旭. 陕西东沟金矿床地质地球化学特征及成因探讨[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(3): 249-260. DOI: 10.12677/ag.2024.143023

## Abstract

Donggou Gold Mine is located in the Zhongqinling tectonic zone, which is distributed in southern of the Tangzang-Shangnan fault and northern of the Fengzhen-Shanyang fault, with good mineralization conditions and great prospecting potential. By summarizing the geological characteristics of mineralization in the mining area, the trace elements and rare earth elements of geological bodies such as intrusive rocks, alteration rocks and gold-bearing ores in different periods were tested and analyzed. The results show that: 1) The mining area is composed of neutral and acid intrusive rocks, mainly biotite diorite granite and diorite outcrops, and the magma mainly comes from the earth's crust. 2) The age of the Dongjiangkou rock mass is about 223 Ma, indicating that the surrounding rock of the mining area was formed during the Indosinian period and the mineralization period was in the early Yanshan period. 3) The degree of fractionation of light rare earths in the surrounding rock of the mining area is high; the degree of fractionation of heavy rare earths is low, and the value of fractionation degree of heavy rare earth elements is close to 1, which belongs to crustal remelted granite. 4) The  $\delta Eu = 0.67 \sim 0.90$  of the surrounding rock showed negative europium anomaly, and the weak europium valley on the distribution curve indicated that the degree of differentiation of magma was relatively high, which is beneficial for mineralization. Comprehensive analysis suggests that the source of magma mainly comes from the earth's crust, and a small part comes from the upper mantle, which has experienced the remelting of the earth's crust, and it is inferred that its genesis type is tectonically controlled magmatic hydrothermal gold deposits related to acid intrusive rocks in the Yanshan period.

## Keywords

Deposit Characteristics, Trace Element, Rare Earth Distribution Patterns, Donggou Gold Mine, Shaanxi

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

东沟金矿位于陕西省宁陕县丰富镇。随着矿床开采的程度不断加深,人们对地质现象和矿床有了更深入的认识。过去认为矿区矿石类型是单一的黄铁石英脉型,但后来发现有黄铁矿蚀变岩型与多金属石英脉型与之并存的模式。矿物组合特征也随之由简单变复杂。经过多年的开采,矿区资源枯竭危机亟待解决,因此,客观地分析该矿床类型、成矿条件与成矿规律进而指导矿山探边摸底找矿,不仅对于寻找矿山中的隐藏资源具有重要意义,而且对具有相似地质背景的其他矿床的勘探工作也具有重要的指导意义。

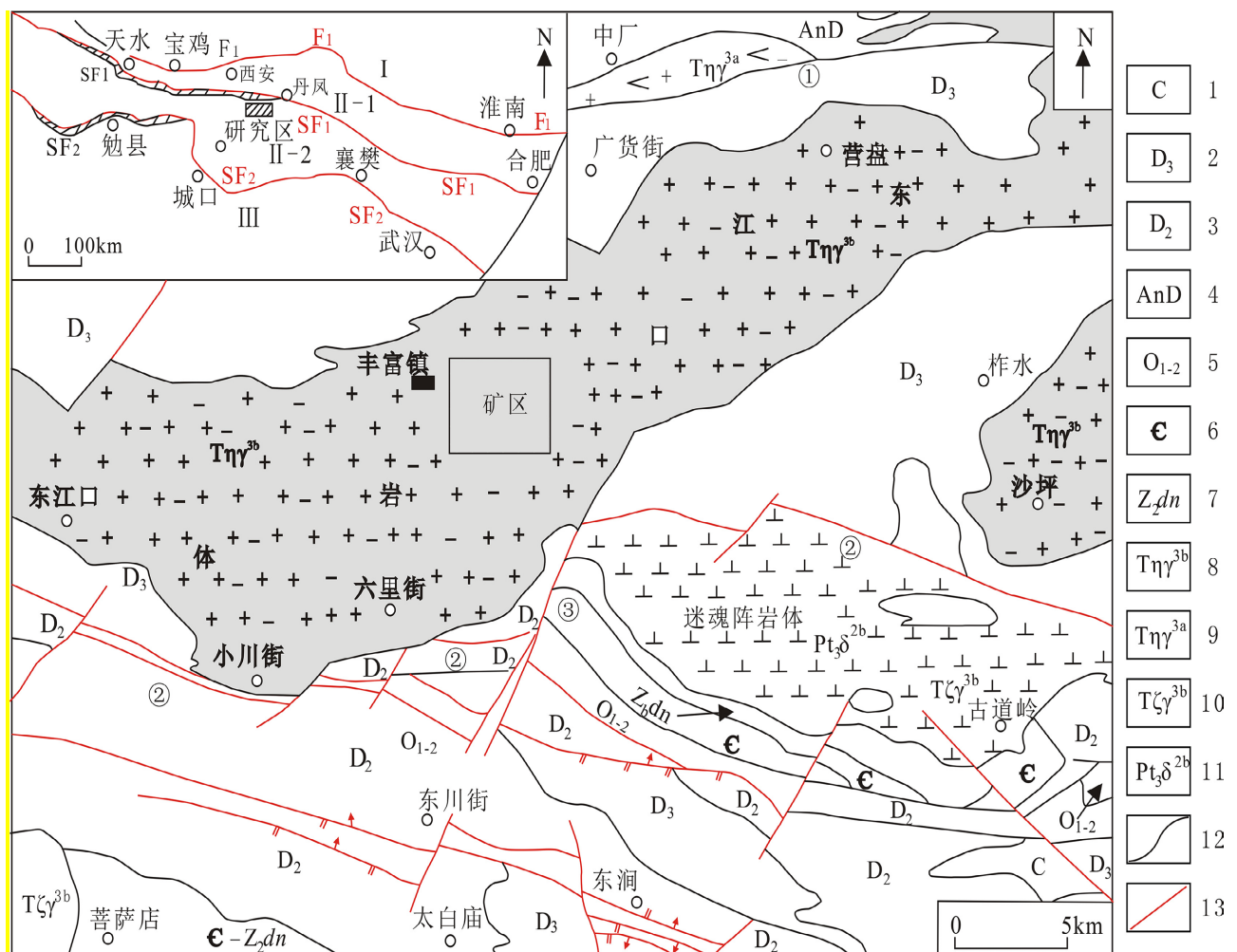
## 2. 区域地质背景

从丰富东沟金矿区域地质简图(图 1)可以发现,矿区大地构造位于唐藏 - 商南断裂以南、凤镇 - 山阳

断裂以北的中秦岭构造带[1]。商丹构造带位于唐藏 - 商南断裂的北部, 前泥盆系角闪斜长片麻岩为主要出露岩性, 岩石糜棱岩化强烈; 矿区在唐藏 - 商南断裂以南、凤镇 - 山阳断裂之间, 出露地层主要为中晚泥盆系陆源碎屑岩建造; 凤镇 - 山阳断裂以南主要地层为中晚海相泥盆世和早石炭世碎屑岩、碳酸盐岩[2] [3]。

矿区属于陕西秦岭腹地花岗岩区, 地势呈南北低, 中间高的特征。区内有中酸性岩浆岩出露, 主要有黑云母二长花岗岩和闪长岩, 其中金的富集与浅灰色二长花岗岩有一定的联系。矿区所在的东江口岩体是一个中酸性岩基群, 岩体含基性包体及围岩捕虏体, 副矿物组合为磁铁矿 - 榍石 - 磷灰石 - 锆石[4]。

据前人研究表明, 矿区所在的宁陕 - 镇安区域钨钼金矿或多金属矿田主要是受到印支晚期 - 燕山期发生的陆内造山期, 且该地区构造热液型和蚀变岩型金矿的主要成矿期是燕山期[5] [6]。



I——华北板块; II-1——北秦岭构造带; II-2——南秦岭构造带; III——扬子板块; F1——秦岭北界断裂; SF1——商丹构造带; SF2——勉略构造带; ① 唐藏 - 商南断裂; ② 山阳 - 凤镇断裂; ③ 黄花岭断裂; 1——石炭系; 2——上泥盆统; 3——中泥盆统; 4——前泥盆系; 5——中下奥陶统; 6——寒武系; 7——上震旦统灯影组; 8——三叠纪中细粒黑云角闪二长花岗岩; 9——三叠纪中粗粒似斑状、斑状黑云角闪二长花岗岩; 10——三叠纪似斑状钾长花岗岩、二长花岗岩; 11——新元古代细粒闪长岩; 12——地质界线; 13——断裂

Figure 1. Geological sketch map of the Donggou gold deposit in Fengfu region (modified from Chen Baoyun *et al.*, in 2017)

图 1. 丰富东沟金矿区域地质简图(据陈宝赞等, 2017 修改)

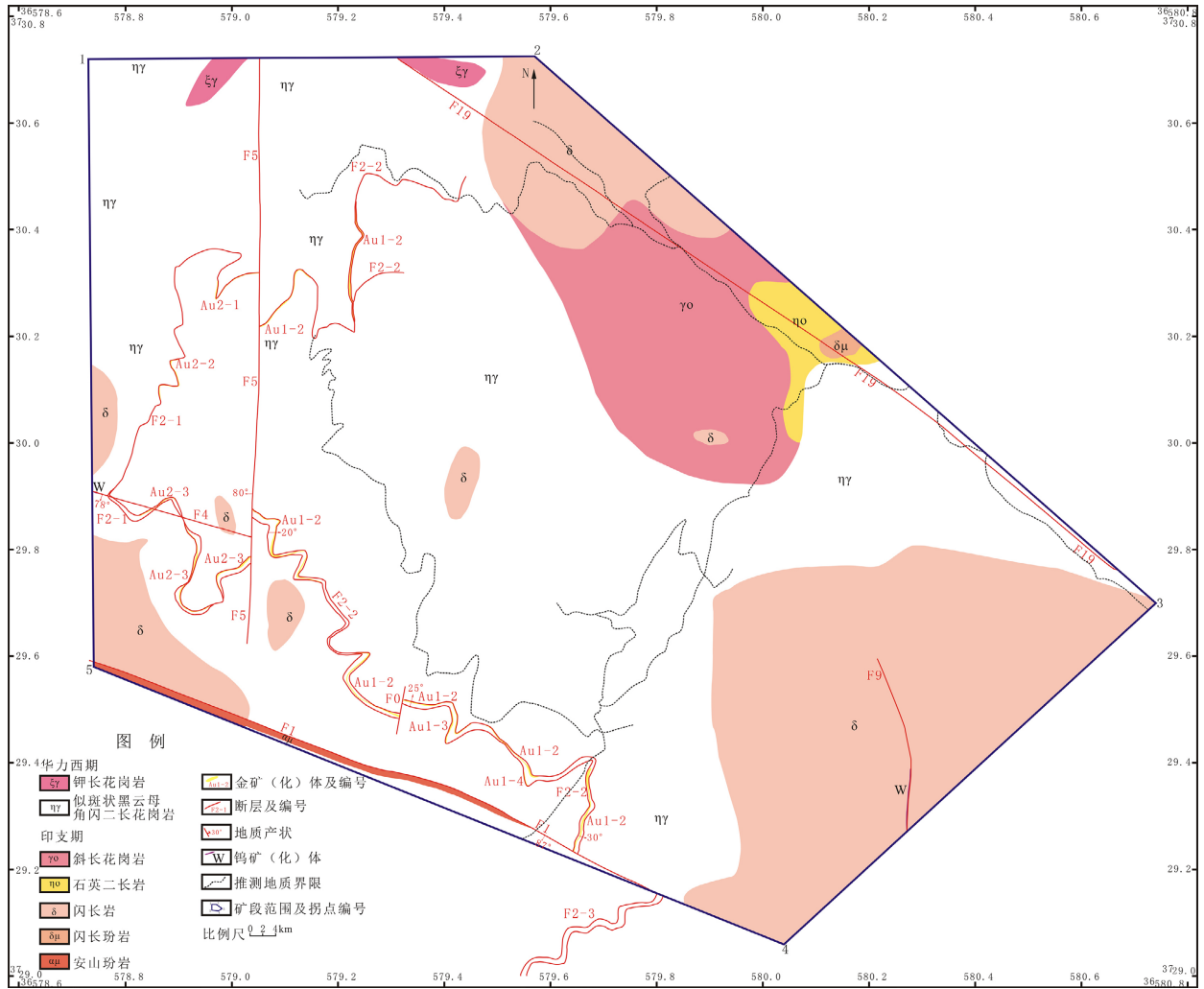


Figure 2. Enrich the geological map of the Donggou ore section  
图 2. 丰富东沟矿段地质简图

### 3. 矿区地质概况

#### 3.1. 地层

矿区出露地层主要为晚古生代刘岭岩群(D<sub>3</sub>l)，其分布广泛，总体呈北西西向展布。研究区刘岭群主要出露池沟组、青石垭组和牛耳川组。

1) 牛耳川组(Dn): 区内只有第三岩段，岩性以浅灰色中厚层石英细砂岩为主，及部分变粉砂岩，偶夹大理岩条带。

2) 池沟组(Dc): 区内分为四岩段，主要岩性为灰色 - 灰绿色长石石英砂岩，偶夹二云石英片岩、娟云石英片岩和绿色娟云千枚岩。

3) 青石垭组(Dq): 区内分为四岩段，主要岩性为灰绿色 - 灰色变粉砂岩、灰 - 灰绿色变石英砂岩，偶夹大理岩透镜体。

#### 3.2. 构造

矿区的构造环境相当复杂，包含脆性断裂构造、节理构造以及浅成岩浆侵入构造。该矿区经历了多

期次、不同方向的应力作用，形成了错综复杂的构造形迹。按其展布方向，这些断裂可分为近东西向、北西向、北东向以及近南北向。矿区北部的彭家沟走向为北西向的断裂 F19，与矿区南部的东沟走向一致的 F1 断裂，以及一些隐伏断裂，这些是本区主要的导矿构造[1]。这些断裂的总体发育程度较高，呈现出较大的规模和陡峭的产状。另一方面，矿区的压扭性缓产状断裂 F2 及走向为北东向的缓产状断裂等构成了本区的容矿构造。这类断裂通常较为宽大，产状较为平缓，从而提供了足够的空间来容纳热液系统中的矿物沉淀(图 2)。

总体而言，该矿区的构造特征及其演化历史具有高度的复杂性，导矿构造和容矿构造的交互作用和演化对金矿床的形成和分布产生了深远的影响。

### 3.3. 岩浆岩

岩浆岩对东沟矿田已发现的金矿控制作用明显，其主要为金矿床的形成提供了热源、成矿热液或物质来源，并控制金矿床(体)的空间分布位置[7] [8]。侵入岩是东沟矿区岩浆活动的主要存在形式，区内华力西期黑云角闪二长花岗岩分布面积较广，晋宁期的闪长岩次之。总体表明岩浆活动强烈。黑云母二长花岗岩是本区发育最广的岩石在整个勘查区都有出露，是东江口超单元主体岩性，以规模较大的岩基和岩株产出。岩石呈浅灰色~灰色，中粗粒花岗结构，似斑状结构、二长结构，块状构造。闪长岩是迷魂阵岩体的主要岩性。岩石呈似斑状结构，他形粒状结构，块状构造。闪长岩在矿区内有两种形态，一种为包体状态赋存于二长花岗岩，一种闪长(玢)岩以岩株、岩脉形式侵位于二长花岗岩中。其中金的富集与浅灰色二长花岗岩有一定的联系[2] [9] [10]。

## 4. 矿床地质特征

### 4.1. 矿体特征

东沟矿床内矿体规模总体较大，主要有 Au1-2、Au2-3 两个矿体[10]。其中 Au1-2 矿体长度 1400 m，呈不规则脉状展布。矿化蚀变带和金矿体总体上呈现出沿断裂分布的特征。通过在地表追索含蚀变的断裂，用槽探的方法来揭露矿化信息，最后结合钻孔来控制范围，在东沟矿区圈出了一条含硅化、黄铁矿化等多种蚀变的构造矿化蚀变带。矿化蚀变带受近南北向压扭性缓倾斜断层控制，展布形状像“S”。矿体总体呈脉状，沿走向倾向形态变化较大，具有膨胀收缩、分枝复合、尖灭再现的特点[2] [10]。Au1-2 位于 Au2-3 矿体的东侧，且 Au1-2 和 Au2-3 矿体起初为一条矿体，由于一条走向近南北的逆断层将其纵向错断约 50 m，故划分为两个矿体。详见表 1。

**Table 1.** Statistics of ore body characteristics in Donggou gold deposit ([3] [10])

**表 1.** 东沟金矿区矿体特征统计([3] [10])

矿体编号	矿体产状	长度/m	矿体平均厚度/m	平均金品位/ $10^{-6}$	稳定程度	金矿化类型
Au1-2	$78^{\circ} \angle 20^{\circ}$	1400	1.86	3.71	稳定型	黄铁矿石英脉型
Au2-3	$85^{\circ} \angle 20^{\circ}$	230	1.51	3.09	变化较大	黄铁矿石英脉型

### 4.2. 矿石类型及特征

石英脉型和蚀变岩型是两种常见的成矿形式，但是二者在形态、产状、品味等方面会有一定的差异。通过野外大量的观察和鉴定，石英脉型金矿石在矿区分布较为广泛，蚀变岩型金矿石相对较少。石英脉型可以进一步细分成黄铁矿石英脉型和多金属石英脉型。矿石类型如下：

- 1) 黄铁矿石英脉型：黄铁矿石英脉型矿石中硫化物含量较少，矿石石英含量较多呈白色、灰白色。



在黄铁矿或黄铁矿裂隙中可见微小的片状金矿物。

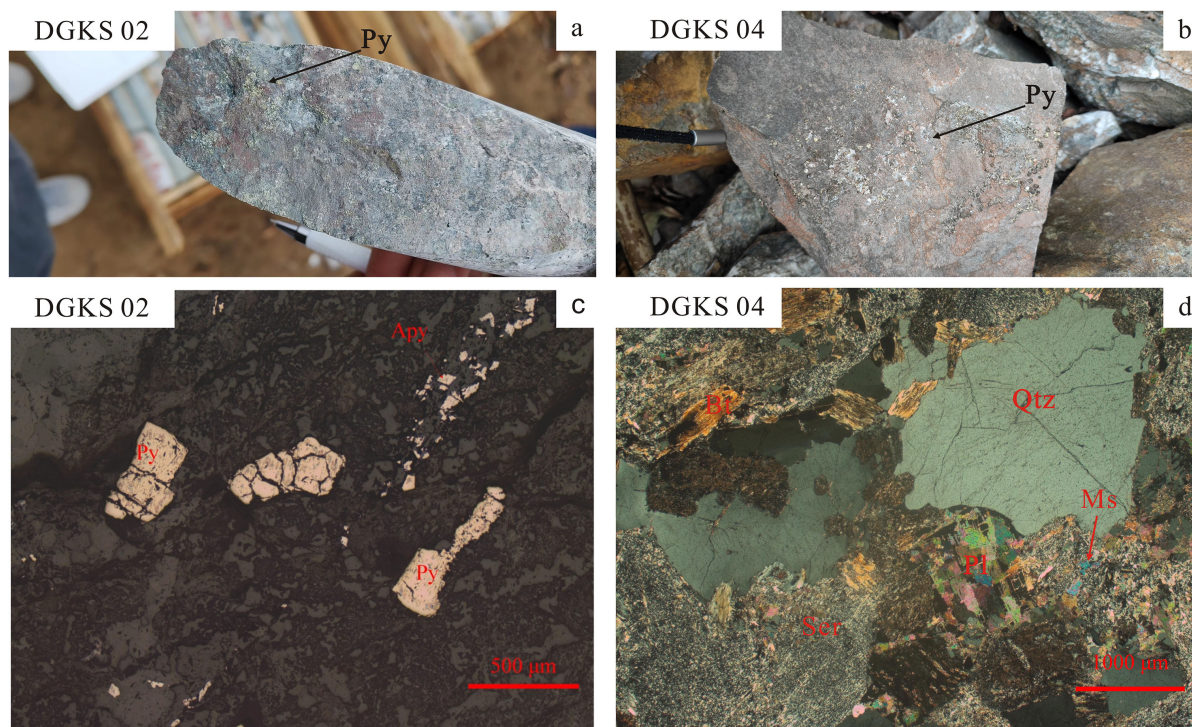
2) 多金属石英脉型：该类型矿石颜色与黄铁矿石英脉型颜色差异不大，呈乳白色或灰白色。因矿石中含有有色金属矿物，所以会夹有蓝色或绿色。黄铁矿、黄铜矿、铅锌矿、褐铁矿等金属矿物在多金属石英脉型矿石中较为普遍，其中可能影响金品位的是黄铁矿和黄铜矿含量的多少。

3) 蚀变岩型：矿区的蚀变岩型矿石多呈灰色，部分蚀变岩因绿泥石化呈灰绿色。矿区可见多种金属矿物，如褐铁矿、褐铁矿、铜矿、少量白钨矿。脉石矿物主要为钾长石、石英、钠长石、绢云母，次为绿泥石、白云石、方解石等。金品味的高低与矿石中黄铁矿、褐铁矿的含量有很大的关系。蚀变岩型矿石通常与石英脉型矿石共存于同一构造蚀变带中[2]。

矿区矿石矿物组成主要分为金属矿物和脉石矿物。矿石手表本及镜下照片见图3。

主要金属矿物有银金矿、褐铁矿、黄铁矿、黄铜矿等。矿石中部分褐铁矿有的全部保留了黄铁矿的假象，有的残留了少许黄铁矿。黄铁矿是最主要的银金矿的赋存矿物，其中不仅可以见到包体银金矿的存在，也可以见到充填裂隙的银金矿。黄铁矿大多数以它形和半自形为主，其中细粒结构的黄铁矿与金关系密切。黄铜矿为细网脉状构造，局部为不规则它形细粒状形成星点状或稀疏浸染状构造。

主要脉石矿物有石英、白云母、绢云母等。石英大多数以脆性变形和重结晶的结构特征出现，局部石英脆性破碎形成碎粒结构，碎粒被金属矿物和绢云母交代，形成矿化和热液蚀变的矿物组成。绢云母在矿石中主要以交代碎粒斜长石形成团块状构造，白云母自身以微晶鳞片状为主。黑云母的存在，表明了矿石在形成过程中，存在一期热变质。



(a) 东沟金矿含矿岩心手表本特征图；(b) 东沟金矿井下坑道金矿石特征图；(c) 菱形毒砂和黄铁矿并存；(d) 石英和斜长石被绢云母所交代、黑云母与白云母并存；Py：黄铁矿；Apy：毒砂；Qtz：石英；Ms：白云母；Bt：黑云母；Ser：绢云母；Pl：斜长石

**Figure 3.** Typical representative photos of the macroscopic and microscopic structures of ore minerals in the Donggou gold deposit

**图 3.** 东沟金矿床矿石矿物宏观构造及微观结构典型代表性照片

### 4.3. 围岩蚀变

区内围岩蚀变总体不强烈, 主要矿体围岩为中粒似斑状黑云角闪二长花岗岩, 近矿围岩绿泥石化, 钾化明显。矿体主要由石英、黄铁绢英岩, 黄铁矿化、硅化、绿泥石化蚀变二长花岗岩构成[2]。硅化与成矿有很重要的关系, 通常沿岩石裂隙中充填交代, 形态不一。为硅化细脉时常呈现为不规则状, 而分布在构造矿化带部位时为脉状和网脉状石英, 可能伴有黄铁矿等金属硫化物[11]。

## 5. 样品测试结果

### 5.1. 微量元素实验结果

**Table 2.** Trace element content of Donggou gold deposit

**表 2.** 东沟金矿微量元素含量

样品号	Au	Cu	Pb	Zn	Sn	Co	Ni	Cr
DG01	0.79	19.7	36.2	109	3.22	32.3	102	228
DG02	0.97	16.2	43.1	0.86	1.96	23.4	64.0	124
DG03	0.69	13.9	35.4	70.7	1.67	24.2	53.3	85.3
DG04	1.14	32.2	35.8	1.13	2.03	24.3	54.7	92.2
DG05	1.90	139	12.6	42.9	3.90	36.3	39.3	61.7
DG06	0.91	12.3	30.6	2.30	1.67	28.8	55.4	93.6
DG07	0.28	86.3	20.7	16.1	4.34	30.9	33.1	55.3
DG08	1.05	5.48	27.4	72.7	2.26	32.9	79.1	125
DG09	0.77	101	19.2	88.2	2.24	46.3	131	208
DG10	1.28	20.5	19.9	82.2	2.53	34.3	100	170
DG11	2.79	393	22.5	38.9	5.52	47.2	150	191
DG12	0.66	99.1	21.0	46.3	2.64	38.0	144	285
DG13	0.22	15.4	56.2	69.6	2.05	48.0	66.9	112
DG14	0.16	13.9	44.3	55.3	1.78	43.1	52.7	86.4
DG15	1.28	19.1	91.4	72.4	1.36	31.5	54.0	81.3
DG16	9.70	47.6	1052	68.1	4.70	132	67.9	84.6
DG17	7.21	22.8	168	51.0	2.44	133	55.9	66.1

注: 微量元素的质量分数为  $w_B/10^{-6}$ 。

在东沟金矿进行野外踏勘和调查的基础上, 将钻孔 ZK22-1 作为主要研究对象, 样品均采自钻孔岩芯, 共采集样品 17 件。根据钻孔分层信息和矿化连续情况来确定采样间距, 未矿化岩心取样间隔 5 m, 矿化区域间隔 1 m。取样方法为 1/2 劈心法, 连续取样组合为一个样品, 样品质量均大于 500 g。将所采岩矿石样品进行了微量元素地球化学特征研究, 微量元素分析在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成, 分析所使用的仪器为电感耦合等离子体质谱仪(Agilent7500cx), 在实验室内严格按照相关规范要求, 主要流程包括: ① 清洗容器; ② 强酸浸泡; ③ 本底抽查; ④ 称取样品; ⑤ 溶解样品; ⑥ 稀释定容等。在完成以上步骤后将所得到的样品上清液送至 ICP-MS 实验室进行测试分析。在样品测试

的准确度上, 标样测定值与认定值的相对误差, 主量成分小于 0.5%, 微量元素小于 10%; 在精密度上, 对于同一样品 4 次平行测量的相对标准偏差, 主量成分优于 0.3%, 微量元素优于 1%。

为了解微量元素在东沟金矿床周围的变化规律, 对研究区内不同地质体的岩矿石样品进行微量元素的富集和贫化特征进行了分析。矿石微量元素分析结果及统计数据见表 2 和表 3。

**Table 3.** Average content of trace elements in different geological bodies of Donggou gold deposit  
**表 3.** 东沟金矿不同地质体中微量元素含量平均值

元素	矿体(3)	蚀变围岩(2)	围岩(12)	克拉克值(泰勒, 1964)
Au	6.06	0.19	1.10	0.004
Cu	29.86	14.73	78.43	55
Pb	437.49	50.29	27.08	12.5
Zn	63.87	62.48	47.67	70
Sn	2.85	1.91	2.83	2
Co	99.28	45.60	33.28	25
Ni	59.32	59.83	83.88	75
Cr	77.39	99.35	143.64	100

注: 括号内数字为样品数; 微量元素的质量分数为  $w_B/10^{-6}$ 。

## 5.2. 稀土元素实验结果

为了进一步了解东沟金矿床成因和成矿物质来源, 对东沟金矿不同地质体取样进行分析, 共选取 9 件具有代表性的岩矿石样品进行了稀土元素地球化学特征研究。其中, 矿体采样 3 件(XT-07、XT-08 和 XT-09), 普通围岩(黑云二长花岗岩)采样 4 件(XT-01、XT-02、XT-03 和 XT-04), 蚀变围岩采样 2 件(XT-05、XT-06), 分析结果及统计数据见表 4 和表 5。

**Table 4.** Analysis results of rare earth elements in Donggou gold deposit  
**表 4.** 东沟金矿区稀土元素分析结果

样品号	岩性	稀土元素的质量分数( $w_B/10^{-6}$ )													
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
XT-01	花岗岩	39.19	78.94	10.31	39.73	7.01	1.42	5.70	0.94	4.68	0.92	2.57	0.47	2.78	0.39
XT-02	二长花岗岩	31.39	55.42	6.74	25.25	4.40	1.17	3.69	0.56	2.75	0.52	1.43	0.25	1.45	0.20
XT-03	花岗岩	35.46	66.05	8.12	30.79	5.39	1.35	4.44	0.69	3.39	0.66	1.77	0.32	1.92	0.26
XT-04	花岗闪长岩	42.62	107.05	17.13	62.23	11.10	2.64	9.05	1.49	7.59	1.50	4.10	0.76	4.60	0.61
XT-05	蚀变岩	35.61	60.92	7.69	27.82	4.78	1.24	3.36	0.51	2.60	0.49	1.30	0.24	1.53	0.21
XT-06	蚀变岩	43.85	72.04	8.48	29.72	4.95	1.54	3.63	0.55	2.74	0.52	1.40	0.26	1.58	0.24
XT-07	矿体	37.02	65.72	7.54	27.37	4.86	1.42	3.33	0.46	2.02	0.38	0.90	0.16	1.07	0.16
XT-08	矿体	20.16	43.29	5.11	19.21	3.45	1.12	2.30	0.34	1.49	0.26	0.70	0.13	0.87	0.14
XT-09	矿体	17.02	36.76	4.31	15.60	2.66	0.83	1.74	0.24	1.03	0.17	0.48	0.09	0.61	0.10

注: 稀土元素的质量分数为  $w_B/10^{-6}$ 。



**Table 5.** Statistical data of rare earth elements in Donggou gold deposit  
**表 5.** 东沟金矿区稀土元素统计数据

样品号	岩性	$\Sigma$ REE	LREE	HREE	LREE/HREE	$\delta$ Eu	(La/Yb) <sub>N</sub>	(La/Sm) <sub>N</sub>	(Gd/Yb) <sub>N</sub>
XT-01	花岗岩	195.05	176.60	18.45	9.57	0.67	10.11	3.61	1.70
XT-02	二长花岗岩	135.22	124.37	10.85	11.46	0.86	15.53	4.61	2.11
XT-03	花岗岩	160.61	147.16	13.45	10.94	0.82	13.25	4.25	1.91
XT-04	花岗闪长岩	272.48	242.78	29.71	8.17	0.78	6.64	2.48	1.63
XT-05	蚀变岩	148.30	138.06	10.24	13.49	0.90	16.73	4.81	1.82
XT-06	蚀变岩	171.48	160.58	10.91	14.72	1.06	19.90	5.72	1.90
XT-07	矿体	152.41	143.92	8.49	16.96	1.02	24.90	4.92	2.59
XT-08	矿体	98.57	92.34	6.23	14.81	1.15	16.54	3.77	2.18
XT-09	矿体	81.64	77.19	4.46	17.32	1.11	20.03	4.13	2.36

注：稀土元素的质量分数为  $w_B/10^{-6}$ 。

## 6. 矿床成因探讨

### 6.1. 微量元素特征

1) 微量元素 Au、Cu 在东沟金矿区内的变化规律：在矿体部分含量最高，而从矿体部分开始到围岩，元素呈先降低后升高的趋势。Au 在不同地质体的含量平均值比克拉克值高出上千倍到上百倍，Cu 则在围岩中的含量也比克拉克值高。Au 的含量高表明金的富集程度较高，是成矿的有利特征之一。

2) 微量元素 Ni 和 Cr 在东沟矿区的变化规律：从矿体到蚀变围岩到围岩，元素呈先降低后升高的趋势。随着金矿床的形成和演化，矿体可能会发生风化、氧化等作用，导致部分金元素重新分布。在这个过程中，部分金元素可能会从矿体中释放出来，重新回到周围的蚀变围岩和围岩中。同时，Ni 和 Cr 等微量元素也可能随着金元素的迁移而重新分布。因此，在蚀变围岩和围岩中，Ni 和 Cr 的含量可能会比矿体更高。

3) 微量元素 Co、Pb、Zn 在东沟矿区的变化规律：从矿体部分开始到围岩，元素呈含量逐渐减少的趋势。Co 和 Pb 元素的含量比克拉克值高，而 Zn 元素的含量低于克拉克值。在岩浆热液型金矿床的形成过程中，Co、Pb、Zn 元素可能随着岩浆的冷却和分离，以不同的形式析出和富集。这些元素可能更容易与热液中的其他组分发生反应，形成新的矿物相，如黄铁矿、方铅矿和闪锌矿等。这些矿物相可能在成矿过程中被搬运到不同的位置，导致元素含量的变化。

综合以上信息可以得出，东沟金矿区内的微量元素在不同地质体中的含量变化规律不尽相同，但总体上呈现出一定的趋势。元素含量的变化涉及到地球化学过程、蚀变作用、构造活动和风化剥蚀等多个因素的综合作用。这些因素可能在不同程度上影响元素的分布和迁移，从而形成金矿床的特定特征。为了深入理解这一过程，需要进一步的地球化学分析和地质调查。

### 6.2. 同位素及包裹体特征

近年来针对东江口岩体，多位学者研究人员做了较多的同位素研究数据。南秦岭宁陕-镇安地区蚀变细粒石英闪长岩及斑状花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分别为  $(223.2 \pm 2.9)$  Ma 和  $(218.1 \pm 4.7)$  Ma，表明岩体形成于晚三叠世，成矿与印支晚期岩浆活动密切相关[12]。东江口岩体及暗色包体做 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明：东江口寄主花岗岩类的形成年龄集中在  $(222 \pm 2)$  Ma~ $(214 \pm 2)$  Ma 之间，而岩

体中暗色包体和基性岩脉的年龄也集中在 $(218 \pm 2)$  Ma~ $(217 \pm 2)$  Ma 之间。东江口岩体内药王堂单元中粗粒斑状黑云角闪二长花岗岩及内部发育的暗色包体样, 区域构造-岩浆活动演化分析 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分别获得加权平均年龄为 $(218.4 \pm 1.1)$  Ma (表示寄主花岗岩的冷疑结晶年龄)、 $(224.3 \pm 1.2)$  Ma (为暗色包体所代表的基性岩浆锆石冷疑结晶的年龄) [13]。由此可见: 东江口岩体年龄约为 223 Ma。定年结果可能会因为采样位置和样品性质的不同而具有差异性, 但是总体上东江口超单元的年龄明显晚于扬子板块和华北板块全面碰撞的年龄[13] [14]。

综合上述, 由于矿区位于秦岭一带东江口岩体, 所以根据前人对东江口岩体的大量研究, 推测矿区围岩形成于印支期、区内矿床发育有印支期的岩浆侵入活动和热液活动, 成矿时代稍晚一些, 处于印支晚期-燕山期。

### 6.3. 稀土元素特征

稀土元素不仅有助于了解岩浆作用机理, 还提供了重要的找矿信息, 通常被认为是一种良好的物源示踪剂。稀土元素在岩矿石中的含量变化和分布形式往往反映了岩石的性质和形成环境等地质特征[15] [16] [17] [18]。稀土元素是一组特殊的微量元素, 具有相似的原子结构和离子半径, 整体上在地质和地球化学过程中活跃, 其分馏特征可以敏锐地反映地质与地球化学作用的性质, 具有良好的示踪作用。除了受到岩浆熔融的影响, 稀土元素的整体组成特征基本上保持不变。因此, 稀土元素的丰度和分布形式与地质体的物源组成相关, 反映了一定的地质和物理化学条件, 其地球化学组成能够很好地反映成矿作用的条件和过程, 为矿床成因的示踪提供了有用信息[17] [18]。将泰勒(Taylor)球粒陨石的 REE 丰度值作为标准化依据。得出东沟金矿区稀土元素配分模式和东沟金矿不同地质体稀土元素配分模式, 进一步对东沟金矿床成因和成矿物质来源进行探讨。详见图 4 和图 5。

不同地质体稀土元素特征如下:

1) 矿区花岗岩稀土元素配分曲线中总体呈右倾的特点, 而且轻稀土斜率远大于重稀土斜率, 表明轻稀土分馏程度是远大于重稀土的, 说明热液蚀变作用强烈[19]。分配模式为右倾、轻稀土元素富集型主要与提供成矿热液的岩体有关, 同时也与围岩有关[20]。矿区花岗岩的轻稀土元素分馏度 $[w(\text{La})/w(\text{Sm})]$   $N = 3.61 \sim 5.72$ , 表明轻稀土的分馏程度较高; 重稀土分馏度 $[w(\text{Gd})/w(\text{Yb})]$   $N = 1.70 \sim 2.11$ , 表明重稀土分馏程度较低。据有关资料可知, 一般壳型花岗岩重稀土元素分馏度的值约等于 1 [15] [21], 而矿区的花岗岩的重稀土元素分馏度与此接近, 推测均属地壳重熔型花岗岩, 与前人研究结果相同。

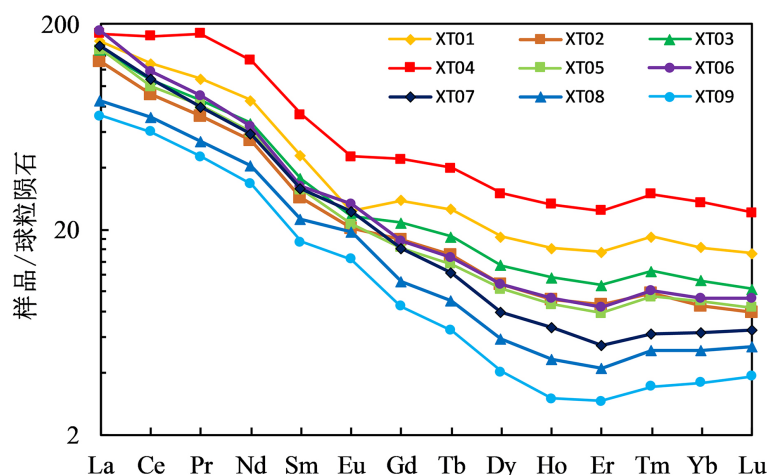


Figure 4. Allocation mode of rare earth elements in Donggou gold deposit  
图 4. 东沟金矿区稀土元素配分模式

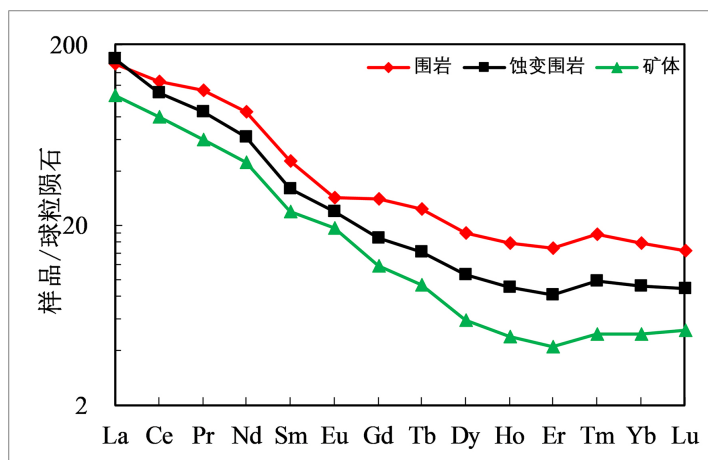


Figure 5. Allocation patterns of rare earth elements in different geological bodies of Donggou gold deposit

图 5. 东沟金矿不同地质体稀土元素配分模式

2) 区内围岩的  $\delta\text{Eu} = 0.67\sim 0.86$ ，均小于 1，总体上表现为负铕异常，在配分曲线上为弱的铕谷，说明岩浆的分异程度相对较高，对成矿有利。从围岩到蚀变围岩再到矿体稀土元素地球化学特征相似并且稀土含量逐渐降低。推测区内经过热液蚀变使得岩石稀土含量降低，并且负 Eu 异常也随着矿化作用的增强而增强趋势。蚀变围岩(XT-07)与矿化体的 Eu 呈弱正异常，则可能受岩浆热液与围岩物质加入的双重影响有关，但以岩浆热液影响为主。同时也可以说明成矿体系处在一种相对氧化的环境[20]。

## 7. 结论

1) 东沟金矿床矿体呈“S”状，矿石类型以石英脉型金矿石为主，结构有自形-半自形、脆性变形和重结晶的结构；构造以块状为主，次为浸染状、角砾状。围岩蚀变总体不强烈。

2) 东沟金矿床形成机制主要受构造的控制。各种断裂及裂隙形成了成矿热液良好的运移通道，并为主成矿元素的富集沉淀形成了赋存场所。

3) 矿区位于东江口岩体，区内侵入岩主要来源于地壳，也有部分来自幔源。这些岩石在燕山早期经过重新熔融和侵入活动，形成了现今所见到的岩体。矿床的发育与印支期的岩浆侵入活动和热液活动密切相关，将前人在该地区的同位素归纳分析，推测成矿时代可能为燕山早期。这一时期的地壳活动最为活跃，为成矿物质的运移和富集提供了良好的条件。

4) 东沟矿区的花岗岩稀土元素配分曲线呈现出右倾的现象，表明轻稀土的分馏程度远高于重稀土。本区花岗岩属于地壳重熔型花岗岩，其重稀土元素分馏度值较低。矿石与围岩的稀土元素地球化学特征相似，区内岩浆的分异程度相对较高，有利于成矿。部分蚀变围岩与矿化体的 Eu 呈弱的正异常，这可能与岩浆热液与围岩物质加入的双重影响有关。然而，这也说明成矿体系处在一种相对氧化的环境。

5) 东沟金矿区的独特成矿条件包括构造环境、岩石组成和地质历史等因素的综合作用，以及较高的岩浆分异程度和相对氧化的环境。这些因素共同为该区金矿的形成和分布提供了有利的条件，并使其成为一种独特的成矿类型。推断其成因类型为由构造控制的与燕山期中酸性侵入岩有关的岩浆热液型金矿床。

## 基金项目

科技部重点研发计划“科研发展基金(陈远荣)”(RZ18102528)资助。

## 参考文献

- [1] 丁志江, 杨志全. 陕西丰富东沟金矿地质特征与找矿标志研究[J]. 世界有色金属, 2016(12): 210-211.
- [2] 张孝东, 白文军, 任伟刚. 陕西省宁陕县东沟金矿标型矿物中黄铁矿特征[J]. 科技创新与应用, 2020(12): 52-54.
- [3] 陈宝赞, 余金杰, 侯满堂, 等. 南秦岭东江口岩体中丰富金矿矿床特征与成因浅析[J]. 地质与勘探, 2017, 53(1): 43-53.
- [4] 邵世才, 张本仁, 李泽九. 秦岭造山带东江口花岗岩体群的地球化学研究及其构造环境[J]. 矿产与地质, 1991(6): 424-429.
- [5] 杨兴科, 何虎军, 晁会霞, 等. 南秦岭宁陕-镇安-带钨钼金矿田燕山期立交桥式构造-岩浆-流体叠加成矿的发现与意义[J]. 陕西地质, 2021, 39(2): 33-41.
- [6] 李维成, 董王仓, 朱雪丽, 等. 陕西主要成矿单元矿产特征及成矿时空域[J]. 矿床地质, 2022, 41(5): 1009-1024.
- [7] 王长春, 袁攀, 吴新斌, 等. 陕西略阳东沟坝多金属矿床地质特征及成矿规律研究[J]. 西北地质, 2022, 55(4): 300-315.
- [8] 王洁明, 董苏庆, 雷群英. 陕西金矿成矿规律与找矿靶区圈定[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 308-321.
- [9] 郭彬. 宁陕东沟金矿床地质特征及找矿方向[J]. 中国矿山工程, 2014, 43(6): 39-42.
- [10] 王云峰, 李鹏, 侯岚, 等. 陕西南宁丰富金矿床地质特征及其找矿远景[J]. 陕西地质, 2014, 32(2): 55-63.
- [11] 申壮, 吴元伟, 路航. 陕西省宁陕县香子坪金矿矿床地质特征及找矿标志[J]. 陕西地质, 2019, 37(1): 23-28.
- [12] 刘文建, 张凯, 王居里, 等. 南秦岭宁陕-镇安地区发现斑岩型铜(金)矿[J]. 矿产与地质, 2020, 34(3): 644-646.
- [13] 于恒彬. 东秦岭宁陕-镇安-带晚印支-早燕山期构造-岩浆演化与金钼成矿特征分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [14] 李阳. 秦岭造山带晚三叠世东江口岩体的侵位机制及其构造意义[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北大学, 2017.
- [15] 白志民. 稀土元素七组分图解类型划分及地质意义[J]. 现代地质, 1993(2): 178-185.
- [16] 张强, 汪雄武, 苟正彬, 等. 陕西青山金矿矿床稀土元素地球化学[J]. 矿物学报, 2009, 29(z1): 357-358.
- [17] 胡朋, 刘国平, 江思宏, 等. 全球稀土矿床的主要类型和成因研究进展[J]. 矿产勘查, 2023, 14(5): 691-700.
- [18] 蓝妮拉, 陈有斌, 刘巍, 等. 陕西葫芦沟金矿床地质与稀土元素特征分析[J]. 黄金科学技术, 2013(5): 14-20.
- [19] 宋威方, 刘建中, 吴攀, 等. 黔西南雄武金矿床元素地球化学特征及其地质意义[J]. 矿产勘查, 2023, 14(9): 1621-1629.
- [20] 马晓辉, 马金虎. 陕西柞水公家坪金矿稀土元素特征[J]. 陕西地质, 2014, 32(2): 64-69.
- [21] 江胜国, 李洪奎, 李宏臣, 等. 胶东西北部罗家花岗岩地球化学特征及成因分析[J]. 地质找矿论丛, 2013, 28(2): 275-280.