

陕西凤县庙沟金矿床地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义

杜建华^{1,2}, 朱德鹏^{1,2}, 何虎军^{3,4*}, 杨兴科³, 张少华¹, 豆浪浪¹, 晁会霞³

1. 陕西地矿第三地质队有限公司, 陕西 宝鸡 721000;
2. 宝鸡市矿产资源勘查及检测研究重点实验室, 陕西 宝鸡 721000;
3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;
4. 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054



摘要: 陕西凤县庙沟金矿位于秦岭造山带中段之商丹断裂带西段南缘, 是陕西省新一轮找矿突破战略行动的重要进展与典型案例之一。区内地层发育齐全, 岩浆活动和构造作用强烈, 构成一较典型的金矿化密集区带。尤其是闪长玢岩脉分布范围广, 局部见有明显的矿化蚀变现象, 与矿体空间关系密切。为厘清庙沟金矿的成矿物质来源、流体性质及成矿时代, 阐明其成矿作用机制, 在系统梳理庙沟金矿区成矿地质特征的基础上, 开展了岩(矿)石稀土、微量元素及 H-O-S 同位素分析, 并对矿区闪长玢岩脉进行了锆石 U-Pb 定年。岩(矿)石稀土和微量元素分析结果显示: 庙沟金矿区闪长玢岩脉稀土总量为 $99.45 \times 10^{-6} \sim 121.44 \times 10^{-6}$, 轻稀土含量为 $90.60 \times 10^{-6} \sim 112.26 \times 10^{-6}$, 重稀土含量为 $8.85 \times 10^{-6} \sim 10.12 \times 10^{-6}$, δEu 值为 $0.91 \times 10^{-6} \sim 0.99 \times 10^{-6}$, δCe 值为 $0.93 \times 10^{-6} \sim 0.94 \times 10^{-6}$ 。金矿石样品稀土总量为 $46.88 \times 10^{-6} \sim 121.44 \times 10^{-6}$, 轻稀土含量为 $41.60 \times 10^{-6} \sim 184.34 \times 10^{-6}$, 重稀土含量为 $5.28 \times 10^{-6} \sim 21.17 \times 10^{-6}$; δEu 值为 $0.57 \times 10^{-6} \sim 1.49 \times 10^{-6}$, δCe 值为 $0.85 \times 10^{-6} \sim 0.98 \times 10^{-6}$ 。H-O-S 同位素分析结果显示: $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-96\text{‰} \sim -59\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$ 值为 $7.3\text{‰} \sim 10.3\text{‰}$, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $4.15\text{‰} \sim 11.88\text{‰}$ 。岩(矿)石稀土、微量元素及 H-O-S 同位素特征表明: 庙沟金矿成矿物质大部分来自岩浆, 少部分来自围岩地层, 成矿流体为多来源, 可能主体为岩浆水。闪长玢岩的锆石 U-Pb 谐和年龄为 $(220.7 \pm 1.0)\text{Ma}$, 加权平均年龄为 $(219.8 \pm 2.1)\text{Ma}$, 庙沟金矿可能形成于晚三叠世, 该时期强烈的脆—韧性剪切变形运动和岩浆活动与金矿化蚀变关系密切, 可能提供了成矿热源和矿质来源, 使早古生代罗汉寺岩群中的硅质和矿质强烈活化、迁移, 并富集于 NW-SE 向脆—韧性剪切变形的多组裂隙中。晚三叠世构造变形—岩浆活动—成矿富集作用事件的意义重大。

关键词: 稀土元素; 微量元素; H-O 同位素; S 同位素; 锆石 U-Pb 年龄; 金矿床

中图分类号: P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2026)01-0020-20 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2026.01.216

引用格式: 杜建华, 朱德鹏, 何虎军, 等. 陕西凤县庙沟金矿床地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 黄金科学技术, 2026, 34(1): 20-39. DU Jianhua, ZHU Depeng, HE Hujun, et al. Geochemical Characteristics, Zircon U-Pb Ages and Geological Significance of the Miaogou Gold Deposit in the Fengxian, Shaanxi Province[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(1): 20-39.

收稿日期: 2025-07-14; 修订日期: 2025-12-16

基金项目: 陕西地矿集团有限公司科研青年专项资金项目(编号: KYQ202302)、陕西地矿集团有限公司科研专项资金项目(编号: KY202212)、陕西省地勘基金(编号: 61201203100)和陕西省自然科学基金(编号: 2023-JC-YB-261)联合资助

作者简介: 杜建华(1972—), 男, 陕西宝鸡人, 高级工程师, 从事矿产普查与勘探工作。E-mail: 374755917@qq.com

*通信作者: 何虎军(1979—), 男, 陕西合阳人, 副教授, 博士, 从事矿产资源评价与成矿预测及计算机地学应用的科研和教学工作。E-mail: hsj2010@chd.edu.cn

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

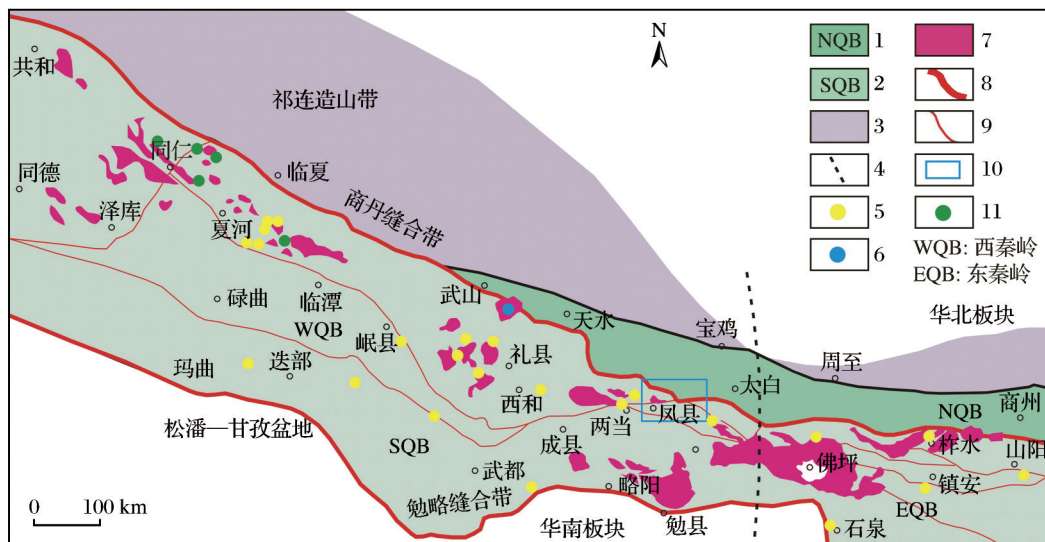
西秦岭凤县庙沟金矿床位于陕西省凤县凤州镇,处于秦岭造山带凤县—太白矿集区之北的唐藏—商(南)丹(凤)构造带内。区内地层从古元古界至第四系皆有分布,自元古宙以来,经历了多次裂陷和收缩拼合的地质构造作用,出露地层均遭受了不同程度的变形改造,形成近EW向复杂褶皱和断裂。三叠纪岩浆活动强烈,频繁的岩浆活动往往伴随多期成矿作用,是重要的金及有色多金属构造成矿区带。自20世纪80年代以来,区内相继发现八卦庙、双王、庞家河、马蹄沟、庙沟、丝毛岭和佐家庄等多处大、中、小型金矿床。庙沟金矿床发现于2005年,经陕西地矿第三地质队多年持续勘查,近年来取得重大找矿突破。目前,该矿床已达到大型规模,属于断裂破碎带蚀变岩型金矿床。

庙沟金矿床虽经过多年勘查取得了显著找矿成果,但整体研究工作仍相对滞后。以往研究多集中于该矿床东段的马蹄沟金矿床,主要聚焦于地质特征(叶奎,2017)、控矿构造(陈安东等,2016;杨兴科等,2016,2017;陈安东,2018;李斌,2018;胡国朝等,2019;陈柏林等,2020)、三维地质建模(安乐等,2018;安乐,2019)、矿床成因(陈安东,2018;马健,2018;马寅龙等,2023)和成矿模式(杨兴科等,2016,2017;胡国朝,2019)等方面。作为凤太矿集区近年来的重

大找矿突破地段,对马蹄沟—庙沟金矿床的西段—庙沟金矿床在地质特征、地球化学特征及成矿时代等方面的研究尚属空白。因此,系统开展对马蹄沟—庙沟金矿床西段—庙沟金矿床上述关键问题的深入研究,将有助于该区域新一轮金矿找矿勘查工作。因此,为了深入探讨庙沟金矿成矿物质来源、成矿流体来源、成矿时代及成矿机制,本文基于近年对该矿床开展的较详细的野外地质调查和矿产勘查,开展了庙沟金矿床地质—地球化学特征、H-O-S同位素特征和U-Pb年代学等研究,探讨其成岩成矿物质和成矿流体来源、成矿机制以及矿床成因类型,为该区域进一步找矿预测提供科学依据。

1 区域地质与矿床地质特征

秦岭造山带作为我国中部重要的EW向复合大陆型造山带,其南北部分别为扬子板块和华北板块,东西部分别与大别山和祁连—昆仑造山带连接。以唐藏—商丹缝合带为界,将秦岭造山带划分为南、北秦岭构造带。晚加里东期的剪切变形在区内有着深刻影响,印支期褶皱造山和较强烈的脆—韧性剪切构造变形奠定了该区的基本构造格架(图1)(张国伟等,1995a,1995b,2001,2003;李三忠等,



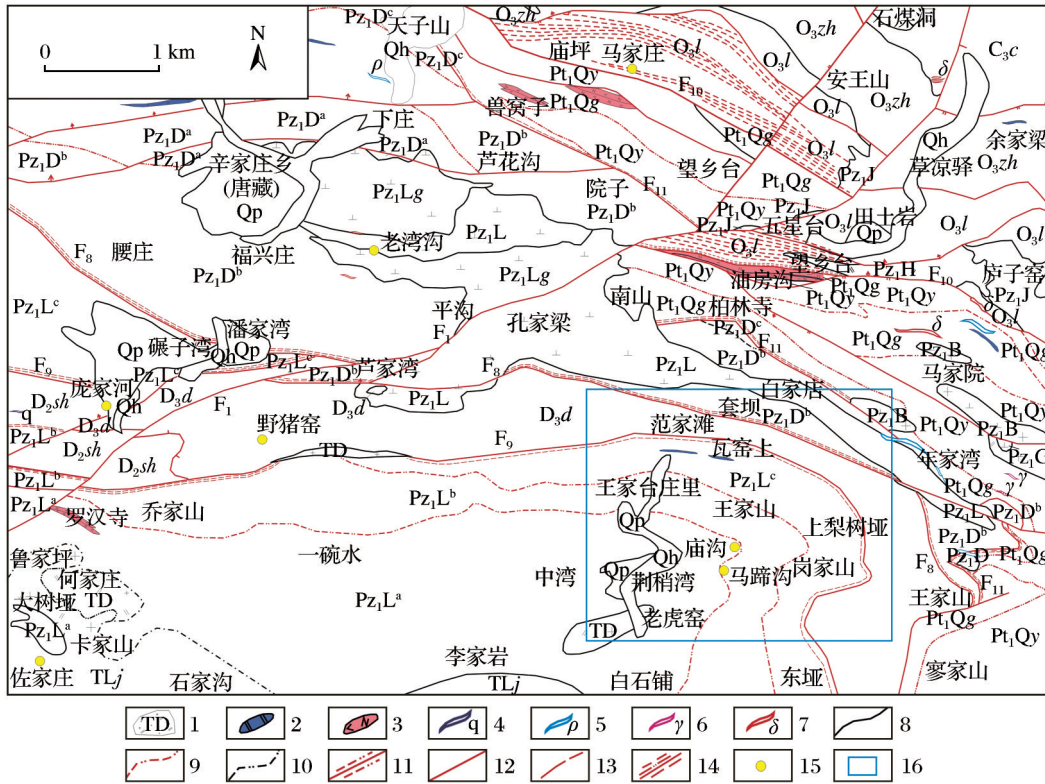
1.北秦岭;2.南秦岭;3.祁连造山带;4.东西秦岭分界线;5.金矿床;6.铜矿床;7.花岗岩;8.缝合带;9.断裂;10.研究区位置;11.铜矿床

图1 西秦岭造山带构造单元及主要矿产分布简图(修改自张国伟,2001;毛景文等,2012;陈柏林等,2020)

Fig. 1 Simplified map of tectonic units and main mineral distribution in the West Qinling orogenic belt (modified after Zhang, 2001; Mao et al, 2012; Chen et al, 2020)

2002; Li et al, 2007; Dong et al, 2015, 2022; 姜寒冰等, 2024; 张逸鹏等, 2024)。区域地层发育齐全, 以元古宇和古生界分布最广。从老到新分布有古元古界秦岭岩群、下古生界丹凤岩群及罗汉寺岩群、奥陶系草滩沟群、泥盆系大草滩组和舒家坝组、石炭系草凉驿组、下白垩统东河群周家湾组及第四系等。研究区受华北板块和扬子板块的挤压碰撞, 发育有一系列近EW向构造。自元古宙以来, 经历了多次裂陷和收缩拼合的地质构造作用, 通过不同期次、不同层次和不同性质构造形迹的叠加与改造是区内变形构造的显著特点。出露地层从秦岭岩群至草凉驿组均遭受了不同程度的变形改造, 形成近EW向复杂褶皱和断裂带。区域侵入岩北部隶属宝

鸡花岗岩体, 呈岩基状分布于北部红花铺一大王庙一带, 其次呈岩株状出露于秦岭岩群和草滩沟群中, 出露面积较大。岩性包括超基性岩、中性岩和酸性岩, 时代分属晋宁期(贯沟岩体等)、晚加里东期(岩湾大盆岩体和堡子沟岩体、唐藏黑湾岩体、老湾沟岩体、雷家院岩体和九子沟岩体等)、华力西期—印支期(何家庄大台沟岩体和鲁家坪岩体等)和燕山期(钱家坪岩体等)。其中, 早中生代二长花岗岩(何家庄岩体)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(248±2)Ma(图2)(杨朋涛等, 2013), 被认为很可能与本区金成矿作用有关(陈安东, 2018)。区域岩浆岩活动频繁, 一方面为成矿元素的活化迁移提供了充足动力, 另一方面在岩浆岩活动过程中将岩体内部的



Qh-全新统; Qp-更新统; C_{3c}-中石炭统草凉驿组; D_{3d}-上泥盆统大草滩组; D_{3sh}-中泥盆统舒家坝组; O_{3l}-上奥陶统龙王沟组; O_{3zh}-上奥陶统张家庄组; P_{z1d^b}-下古生界丹凤岩群b岩段; P_{z1d^a}-下古生界丹凤岩群a岩段; P_{z1l^c}-下古生界罗汉寺岩群c岩段; P_{z1l^b}-下古生界罗汉寺岩群b岩段; P_{z1l^a}-下古生界罗汉寺岩群a岩段; P_{t1qy}-下元古界秦岭岩群雁岭沟组; P_{t1qg}-下元古界秦岭岩群郭庄组; 1. 岩体(TD-何家庄大台沟岩体; TLj-何家庄鲁家坪岩体; P_{z1d}-岩湾大盆岩体; P_{z1b}-岩湾堡子沟岩体; P_{z1h}-唐藏黑湾岩体; P_{z1lg}-唐藏老湾沟岩体; P_{z1l}-唐藏雷家院岩体; P_{z1j}-九子沟岩体; P_{z1g}-贯沟岩体); 2. 大理岩透镜体; 3. 斜角闪岩构造糜; 4. 石英脉; 5. 伟晶岩脉; 6. 酸性岩脉; 7. 闪长岩脉; 8. 实测地质界线; 9. 变质地层早期构造界线; 10. 涌动侵入界线、脉动侵入界线; 11. 韧性断层; 12. 区域性大断层; 13. 性质不明及推测断层; 14. 脆韧性复合断层; 15. 金矿床; 16. 研究区

图2 陕西凤县庙沟金矿及其外围地区地质构造图

Fig. 2 Geological structure map of the Miaogou gold deposit and its surrounding area in the Fengxian, Shaanxi Province

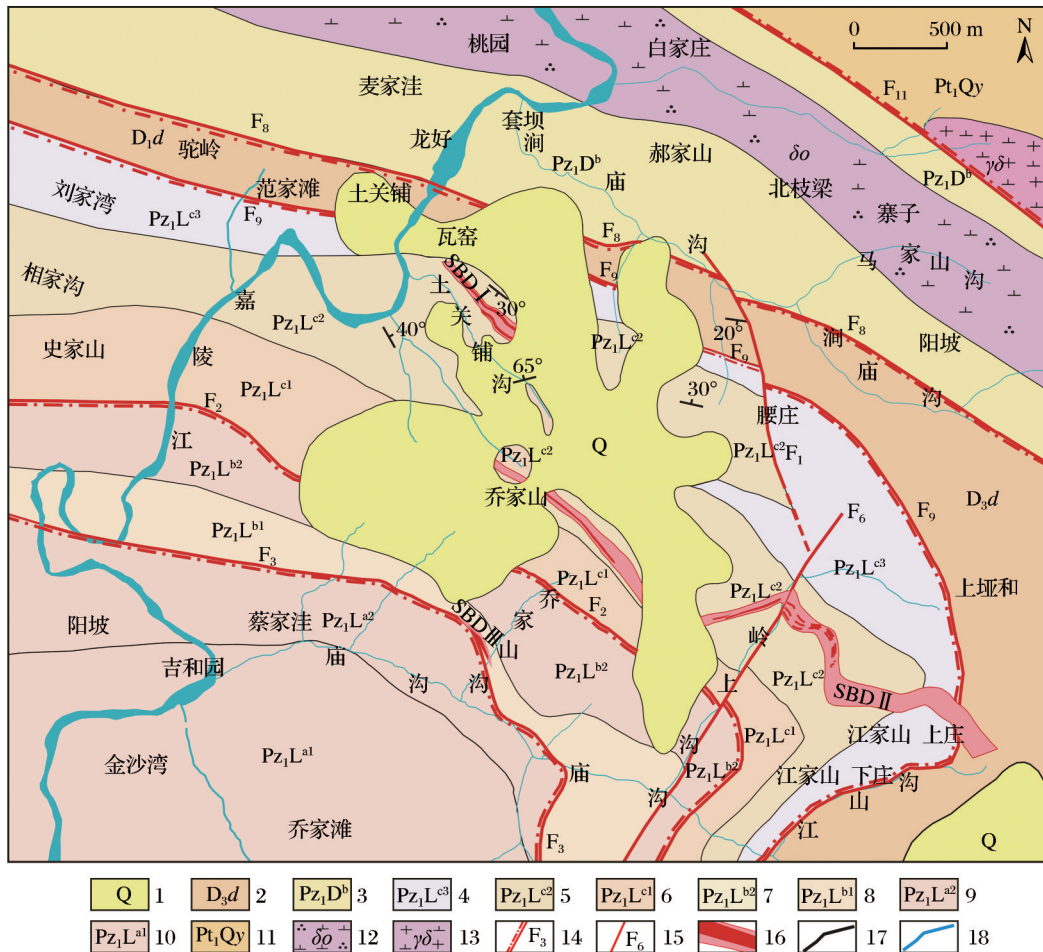
矿物带入地层中为成矿提供了充足的物源条件。

庙沟金矿床位于秦岭造山带中段的唐藏—商丹断裂带西段南缘,出露地层主要有下古生界丹凤岩群、下古生界罗汉寺岩群、泥盆系大草滩组和第四系,除第四系外各地层间均为断层接触,地层单元内部受后期变质变形影响较大,表现出整体无序的特点。

唐藏—商丹断裂带为矿区 I 级断裂,其次为控制区域地层分布的 II 级断裂,如马家窑—白家店韧—脆性复合断裂(F_{11})、碾子湾—套坝韧—脆性复合断裂(F_8)和罗汉寺—瓦窑上韧—脆性逆冲推覆复

合断裂(F_9)。其中, F_9 呈EW向展布,为区内控矿主要断裂带(图3)。II级断裂之间广泛发育次一级EW-NWW和NE-NNE向断裂,包括 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_6 (图3);区内断裂在北部以韧—脆性复合断裂为主,向南渐变为脆性断层为主[图4(a)、4(b)],显示出岩石变质变形由北向南减弱,韧—脆性构造变形作用力由北向南减弱。矿区内罗汉寺岩群碎屑岩段上部构造变形较为强烈,可划分出强—弱变形带,与金矿化关系密切[图4(c)~4(e)]。

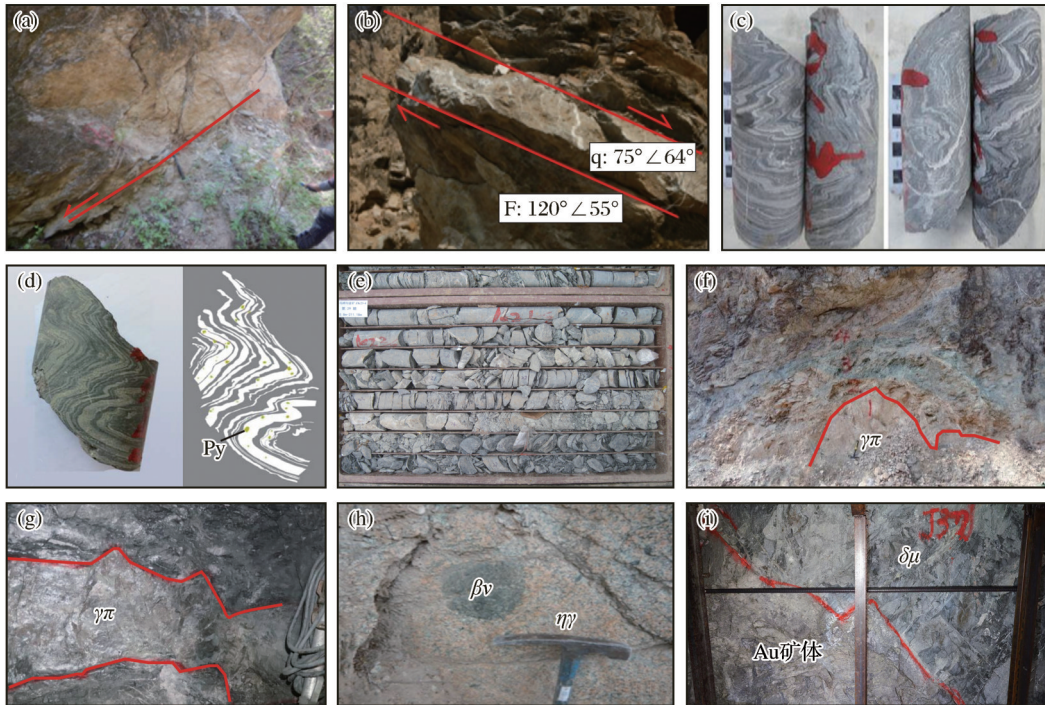
研究区岩浆岩脉较发育,主要表现为沿断裂带、褶皱及岩性接触界线等构造虚脱部位侵入就位



1.第四系;2.上泥盆统大草滩组;3.下古生界丹凤岩群b岩段;4~10.下古生界罗汉寺岩群(4.c岩段第三岩性层;5.c岩段第二岩性层;6.c岩段第一岩性层;7.b岩段第二岩性层;8.b岩段第一岩性层;9.a岩段第二岩性层;10.a岩段第一岩性层);11.下元古界秦岭岩群雁岭沟组;12.石英闪长岩;13.含石榴子石花岗闪长岩;14.韧—脆性复合断层带;15.断层;16.金矿化蚀变带(SBD I、II、III)及矿体(红色区)位置;17.地层界线;18.河流

图3 陕西凤县庙沟金矿区地质图(修改自陕西地矿第三地质队有限公司,2016)

Fig. 3 Geological map of the Miaogou gold deposit in the Fengxian, Shaanxi Province(modified after Shaanxi Geology and Mining Three Geological Team Co., Ltd., 2016)



(a)剥离断层;(b)正断层;(c)ZK27-1钻孔强变形带内的揉皱;(d)ZK31-4钻孔含黄铁矿石英脉揉皱变形;(e)ZK23-4钻孔强变形带中片理化带;(f)27线花岗斑岩露头;(g)坑道中花岗斑岩;(h)二长花岗岩中辉绿岩包体;(i)坑道中矿体旁闪长玢岩;Py-黄铁矿; $\beta\gamma$ -辉绿岩; $\gamma\pi$ -花岗斑岩; $\delta\mu$ -闪长玢岩;q-石英

图4 庙沟金矿区典型地质特征野外照片

Fig. 4 Field photos of typical geological characteristics in the Miaogou gold deposit

的中酸性脉岩。根据其主要矿物成分,分布有花岗斑岩[图4(f)、4(g)]、二长花岗岩[图4(h)]、闪长玢岩[图4(i)]和英安斑岩等。其中,闪长玢岩地表未见露头,均由钻孔及平硐工程揭露控制,分布范围广,多以透镜状脉体产出,且大多出露于矿体上下盘,局部见有明显矿化蚀变现象,与金矿体空间关系密切(图5)。

研究区内圈出的SBD I 和SBD II 构造蚀变带及主要金矿体均位于罗汉寺岩群碎屑岩段第二岩性层(Pz_1L^2),该层为区内主要赋矿地层;SBD III 构造蚀变带位于罗汉寺岩群石英岩段,为区内次要赋矿地层(图3)。

SBD I 构造蚀变带位于研究区北部张家沟—土关铺沟一带,地表剥蚀呈不规则带状展布,出露长度为1 040 m,宽度为3~5 m。该蚀变带整体倾向NE、局部倾向SW,产状 $20^\circ\sim 40^\circ\angle 5^\circ\sim 15^\circ$,局部产状 $170^\circ\angle 37^\circ$ 。SBD I 构造蚀变带赋存于罗汉寺岩群碎屑岩段第二岩性层浅灰—灰绿色绢云千枚岩夹

变质粉砂岩层内,受断裂控制,总体倾向NE、局部倾向SW,蚀变主要为硅化、褐铁矿化和黄铁矿化。沿该蚀变带已圈出1号金矿体。

SBD II 构造蚀变带位于研究区中部王家山—九道湾沟西侧一带,地表第四系较厚,呈带状分布,地表由20个探槽不完全控制,出露长度为3 250 m,出露宽度受地形影响较大,一般为100~150 m,个别地段宽度大于200 m。赋存于罗汉寺岩群碎屑岩段第二岩性层蚀变千枚岩夹变质砂岩内,总体产状 $20^\circ\sim 40^\circ\angle 5^\circ\sim 15^\circ$ 。该蚀变带内层间揉皱带、片理化带及脆—韧性断裂等较为发育。金矿化蚀变较强烈,以硅化、绢云母化、黄铁矿化、褐铁矿化、片理化或褪色化为主。沿该构造蚀变带已圈出15条金矿体,目前是本矿区的主要工业矿体。

SBD III 构造蚀变带位于研究区中部乔家山沟—菜子沟一带,已圈定的蚀变带长度为800 m,宽度为50~70 m。该蚀变带赋存于下古生界罗汉寺岩群石英岩段内,带内发育一组走向 $290^\circ\sim 320^\circ$,总体倾

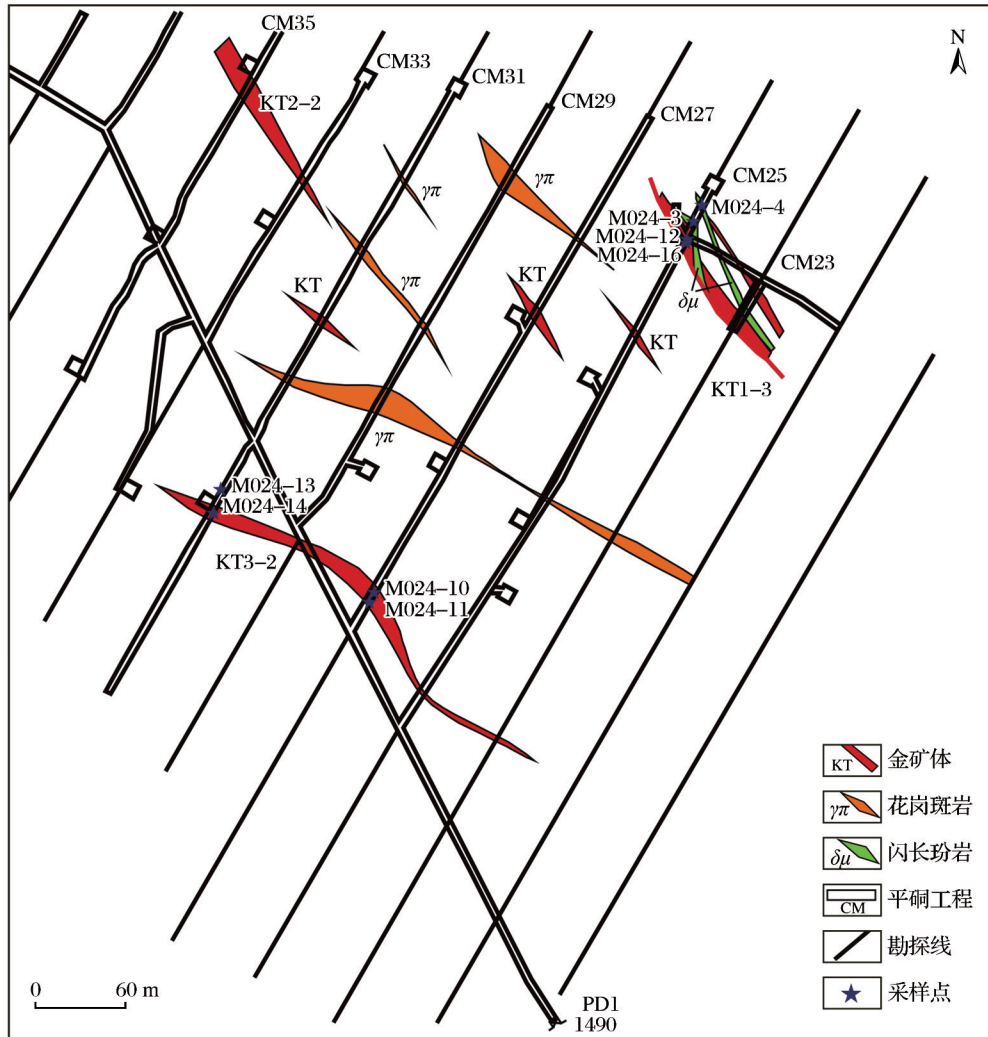


图5 1490中段平面图

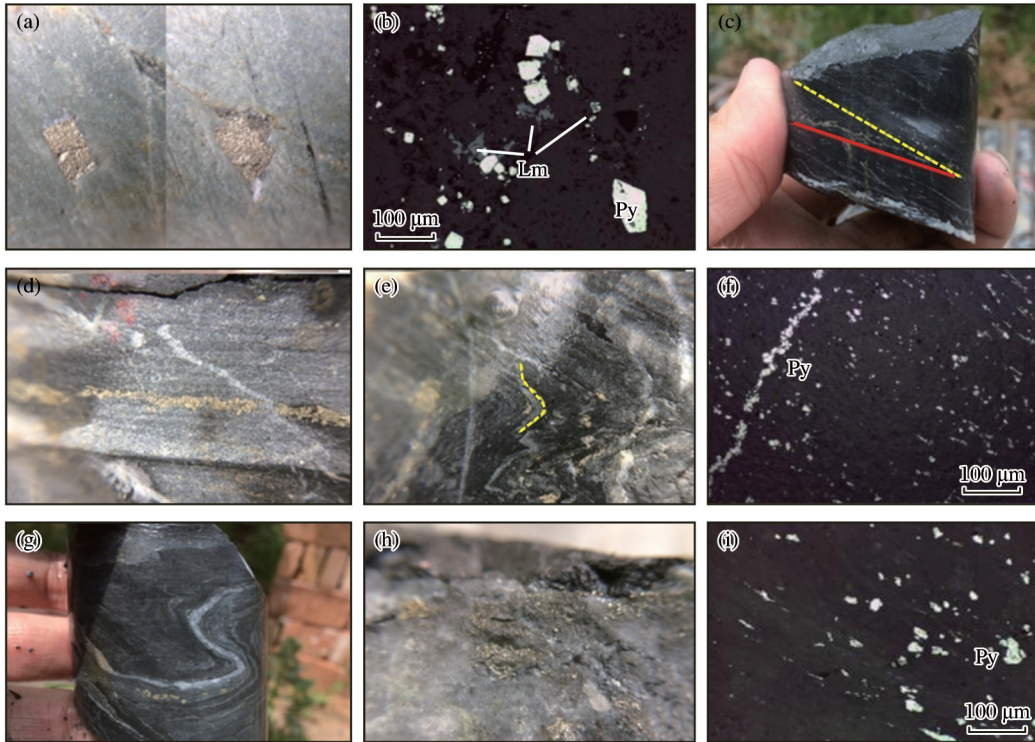
Fig. 5 Plan view of 1490 level

向N,局部南倾的脆—脆性断裂破碎带,倾角变化较大($10^{\circ}\sim 85^{\circ}$)。蚀变主要为褐铁矿化和硅化。该蚀变带内已圈出2条金矿体。

矿石构造主要有浸染状和脉状构造,矿石结构主要有充填(镶嵌)、半自形—自形晶、交代、变晶和环带结构。主要金属矿物是黄铁矿及少量黄铁矿氧化而成的褐铁矿、赤铁矿和黄钾铁钒;次要金属矿物为毒砂和磁铁矿。黄铁矿作为主要载金矿物,其产出形态有4种,分别是单粒黄铁矿[图6(a)、6(b)],沿着千枚理、片理和小裂隙产出的细脉状和拔丝状黄铁矿[图6(c)~6(f)],呈单颗粒状连续分布在揉皱石英脉中的黄铁矿[图6(g)],呈团块状集合体胶结石英碎块黄铁矿[图6(h)、6(i)]。

2 样品和测试方法

样品主要采自庙沟金矿区1460中段和1490中段穿脉和沿脉巷道中的脉岩和矿石,具体采样信息见表1和图5。测试工作由西安阿伯特资环分析测试技术有限公司实验室完成。岩(矿)石微量稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)法完成测定,其相对误差为10%,使用仪器和具体分析流程见He et al(2018)。H-O同位素分析样品主要采自含石英脉和千枚岩中,粉碎至40~80目,在双目镜下挑选纯净的石英单矿物,纯度达99%以上,使用仪器和具体分析流程见王晓虎等(2022)。原位S同位素分析样品主要采自含石英脉和千



(a)单粒黄铁矿;(b)褐铁矿交代黄铁矿;(c)~(f)沿着千枚理、片理和小裂隙产生的细脉状和拔丝状黄铁矿;(g)呈单颗粒状连续分布在揉皱石英脉中的黄铁矿;(h)呈团块状集合体胶结石英碎块黄铁矿;(i)浸染状碎裂黄铁矿;Lm-褐铁矿;Py-黄铁矿

图6 庙沟金矿区不同类型黄铁矿产出特征照片

Fig. 6 Output characteristics photos of different types of pyrite in the Miaogou gold deposit

表1 庙沟金矿区测试样品信息

Table 1 Information of test samples in the Miaogou gold deposit

样品编号	采样位置	样品岩性	测试内容
M024-1	1460中段CM23	闪长玢岩	稀土元素、微量元素、锆石U-Pb测年
M024-2	1460中段CM23		
M024-3	1490中段CM25		
M024-4	1490中段CM25		
M024-10	1490中段CM27	硅化千枚岩金矿石	稀土元素、微量元素、H-O-S同位素
M024-11	1490中段CM27	多金属硫化物石英脉	
M024-12	1490中段CM25	蚀变千枚岩金矿石	
M024-13	1490中段CM31	含粗粒黄铁矿石英脉	稀土元素、微量元素、H-O同位素
M024-14	1490中段CM31	含石英-黄铁矿脉碳质千枚岩	
M024-15	1460中段YM27-31	硅化千枚岩金矿石	
M024-16	1490中段CM25	黄铁矿化石英脉	稀土元素、微量元素、H-O-S同位素

枚岩中,采用多接收激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)对矿石中的黄铁矿进行原位测定,使用仪器和具体分析流程见何虎军等(2023)。闪长玢岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb测年采用NWR193HE+Agilent7900激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪进行测定,具体试验过程及数据处

理分析方法见韩珂等(2020)。

3 测试结果

3.1 稀土和微量元素

庙沟金矿稀土和微量元素测试结果见表2。根

表 2 庙沟金矿稀土和微量元素测试分析结果及特征参数
Table 2 Test analysis results of rare earth and trace elements in the Miaogou gold deposit ($\times 10^{-6}$)

样品 编号	岩性	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Cd	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm
Q116-1	二长花岗岩	39.6	3.04	4.50	32.60	52.30	6.28	20.7	2.10	68.60	21.70	135	297	5.03	146	6.36	0.15	0.05	2.63	892	22.5	40.7	4.32	14.8	2.49
Q201-2	花岗岩长岩	15.00	2.56	3.77	24.80	39.50	4.55	14.10	2.34	27.30	17.70	110	366	4.98	163	6.9	0.16	0.05	3.76	1760	11.5	20.7	2.29	8.21	1.33
M024-1	闪长玢岩	37.95	1.43	11.45	103.75	152.26	18.32	57.31	25.22	53.25	18.86	44.53	419.95	14.03	155.35	9.32	0.79	0.19	1.78	726.52	22.13	41.88	4.76	17.79	3.39
M024-2	闪长玢岩	30.84	1.48	9.88	70.25	193.93	14.98	81.69	29.80	38.35	16.41	65.66	663.38	15.18	138.32	8.16	1.34	0.19	1.54	1489.91	28.34	52.64	5.8	20.71	3.63
M024-3	闪长玢岩	34.35	1.42	14.83	107.67	158.15	20.94	66.76	16.44	59.15	18.09	81.98	788.81	17.6	142.38	8.47	0.06	0.27	2.79	1394.18	23.61	43.84	5	18.72	3.63
M024-4	闪长玢岩	40.55	1.55	14.65	111.52	248.10	21.63	101.42	20.66	114.05	19.91	78.74	640.06	14.75	154.68	8.6	0.18	1.52	3.57	727.92	22.49	41.71	4.67	17.47	3.31
M024-10	硅化千枚岩 金矿石	14.91	1.85	10.73	81.38	68.24	11.20	31.47	32.95	438.27	16.32	172.78	125.87	21.3	133.18	12.19	2.74	6.37	6.6	434.95	26.81	46.89	6.07	22.25	4.11
M024-12	蚀变千枚岩 金矿石	13.18	3.00	18.70	121.51	107.14	22.12	53.45	53.30	1104.11	27.49	279.67	39.56	37.39	211.01	17.13	0.43	17.02	10.44	719.27	42.98	84.82	10.39	37.42	7.38
M024-13	含粗粒黄铁矿 闪长英脉	23.15	2.62	21.68	151.25	120.27	24.92	46.17	33.03	126.58	31.98	269.1	93.48	32.54	182.86	17.67	12.62	0.29	14.96	843.7	44.07	86.12	10.28	35.84	6.6
M024-14	含石英-黄 铁矿脉 千枚岩	9.89	2.42	15.03	145.87	133.70	20.35	51.52	33.45	689.67	24.96	236.28	91.07	32.64	176.95	16.54	1.35	14.71	10.23	675.97	40.68	77.76	9.42	32.54	6.07
M024-15	硅化千枚岩 金矿石	10.78	3.27	16.08	111.50	115.46	20.99	55.00	35.01	70.16	25.53	198.98	80.78	33.94	204.2	18.06	0.65	0.86	10.41	813.73	41.69	81.35	9.85	36.02	6.7
M024-16	黄铁矿化石 英脉	5.53	0.51	3.77	19.13	149.94	5.44	49.10	25.92	142.78	4.62	46.8	35.95	8.11	44.13	2.94	0.59	2.43	1.79	128.68	8.88	18.6	2.22	8.79	2.13
样品 编号	岩性	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ba	Hf	Ta	Ti	Pb	Th	Σ REE	LREE	HREE	LREE/ HREE	δ Eu	δ Ce	(La/ Yb) _N	(Gd/ Yb) _N	
Q116-1	二长花岗岩	0.78	1.66	0.22	0.97	0.17	0.48	0.07	0.48	0.07	892	4.2	0.33	0.73	28.6	9.88	89.71	85.59	4.12	20.77	1.11	0.93	31.6	5.68	2.79
Q201-2	花岗岩长岩	0.95	1.07	0.15	0.77	0.17	0.46	0.08	0.57	0.09	1760	5.18	0.56	0.6	38.8	15.1	48.34	44.98	3.36	13.39	2.36	0.92	13.6	5.44	1.51
M024-1	闪长玢岩	0.98	3.07	0.42	2.32	0.45	1.20	0.17	1.09	0.16	726.52	3.38	0.57	0.36	28.24	5.52	99.79	90.9	8.89	10.23	0.91	0.94	13.64	4.11	2.26
M024-2	闪长玢岩	1.14	3.33	0.45	2.42	0.46	1.19	0.16	1.04	0.15	1489.91	3.04	0.5	0.45	11.56	5.76	121.44	112.26	9.18	12.23	0.99	0.94	18.42	4.91	2.59
M024-3	闪长玢岩	1.17	3.58	0.50	2.76	0.50	1.30	0.18	1.19	0.17	1394.18	3.01	0.5	0.49	6.05	5.22	106.08	95.97	10.12	9.49	0.98	0.93	14.24	4.09	2.58
M024-4	闪长玢岩	0.96	3.01	0.42	2.32	0.45	1.21	0.17	1.11	0.17	727.92	3.22	0.53	0.49	37.86	5.84	99.45	90.6	8.85	10.24	0.91	0.93	13.67	4.27	2.19
M024-10	硅化千枚岩 金矿石	0.77	3.73	0.56	3.20	0.64	1.79	0.26	1.71	0.25	434.95	3.06	0.74	0.97	58.31	7.23	119.05	106.91	12.13	8.81	0.59	0.85	10.58	4.1	1.76
M024-12	蚀变千枚岩 金矿石	1.34	6.70	0.97	5.69	1.13	3.19	0.47	2.99	0.45	719.27	4.73	1.04	1.45	26.48	12.32	205.94	184.34	21.6	8.53	0.57	0.94	9.69	3.66	1.81
M024-13	含粗粒黄铁矿 闪长英脉	1.29	5.85	0.85	4.92	0.99	2.84	0.42	2.77	0.41	843.7	4.16	1.05	1.16	16.33	12.39	203.24	184.19	19.05	9.67	0.62	0.94	10.72	4.2	1.7
M024-14	含石英-黄 铁矿脉 千枚岩	1.23	5.50	0.82	4.73	0.96	2.76	0.42	2.76	0.41	675.97	4.05	1.00	1.38	141.28	11.7	186.04	167.69	18.35	9.14	0.64	0.92	9.95	4.22	1.61
M024-15	硅化千枚岩 金矿石	1.36	6.35	0.95	5.61	1.14	3.20	0.47	3.01	0.45	813.73	5.13	1.15	1.41	9.06	11.52	198.14	176.97	21.17	8.36	0.63	0.94	9.34	3.91	1.7
M024-16	黄铁矿化石 英脉	0.99	1.87	0.27	1.38	0.25	0.67	0.10	0.65	0.10	128.68	0.96	0.19	0.27	7.82	2.01	46.88	41.60	5.28	7.89	1.49	0.98	9.22	2.62	2.32

注: Q116-1 和 Q201-2 样品数据来源于陈安东(2018); 其余样品数据为本次研究测试数据

据 Boynton (1984) 球粒陨石值对稀土元素数据进行标准化, 根据 Sun et al (1989) 原始地幔值对微量元素数据进行标准化, 并计算相应的特征参数值 (表 2)。由表 2 可知, 陈安东 (2018) 在何家庄花岗岩体东侧采集的二长花岗岩 (Q116-1) 和花岗闪长岩 (Q201-2) 稀土 ΣREE 分别为 89.71×10^{-6} 和 48.34×10^{-6} , 重稀土含量 (HREE) 与轻稀土含量 (LREE) 比值分别为 20.77 和 13.99, 相对较高, 模式斜率 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 分别为 31.60 和 13.60, 可知轻稀土和重稀土元素分异程度大, 其中 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 分别为 5.68 和 5.44, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 分别为 2.79 和 1.51, 表明轻稀土的分馏程度高于重稀土的分馏程度, δEu 分别为 1.11 和 2.36, 均大于 1, Eu 正异常明显。脉岩闪长玢岩样品稀土 ΣREE 为 $99.45 \times 10^{-6} \sim 121.44 \times 10^{-6}$, 平均值为 106.69×10^{-6} ; 轻稀土含量 (LREE) 为 $90.60 \times 10^{-6} \sim 112.26 \times 10^{-6}$, 平均值为 97.43×10^{-6} ; 重稀土含量 (HREE) 为 $8.85 \times 10^{-6} \sim 10.12 \times 10^{-6}$, 平均值为 9.26×10^{-6} ; 轻稀土与重稀土元素比值 $(\text{LREE}/\text{HREE})=9.49 \sim 12.23$ 较何家庄岩体低, 其模式斜率 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 13.64~18.42, 轻稀土和重稀土元素分异程度大, 其中 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 4.09~4.91, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 为 2.19~2.59, 表明轻稀土的分馏程度高于重稀土的分馏程度, 样品的 δEu 值为 0.91~0.99, 无明显的 Eu 异常。矿石样品稀土 ΣREE 为 $46.88 \times 10^{-6} \sim 121.44 \times 10^{-6}$, 总量变化较大, 平均值为 159.88×10^{-6} ; 轻稀土含量 (LREE) 为 $41.60 \times 10^{-6} \sim 184.34 \times 10^{-6}$, 平均值为 143.62×10^{-6} ; 重稀土含量

(HREE) 为 $5.28 \times 10^{-6} \sim 21.17 \times 10^{-6}$, 平均值为 16.26×10^{-6} ; 轻稀土与重稀土元素比值 $(\text{LREE}/\text{HREE})=7.89 \sim 9.67$ 相对较低, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 9.22~10.72, 模式斜率变化较小, 可知轻稀土和重稀土元素分异程度低, 其中 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 2.62~4.22, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 为 1.61~2.32, 表明轻稀土和重稀土的分馏程度均较小, 样品的 δEu 值为 0.57~1.49, 平均值为 0.76, 除一个样品外, 其余样品均小于 1, Eu 负异常明显且变化不大。

3.2 H-O 同位素

庙沟金矿区矿石中石英 H-O 同位素组成如表 3 所示, 石英 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-96\text{‰} \sim -59\text{‰}$, 平均值为 -84‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $16.7\text{‰} \sim 19.7\text{‰}$, 平均值为 18.0‰ 。由于本次未开展流体包裹体研究, 所以本研究中换算用到的均一温度为李鹏贝 (2020) 在邻区庞家河金矿所测含矿石英脉结果, 成矿流体的均一温度变化范围为 $220 \sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$, 平均值为 $240 \text{ }^\circ\text{C}$ (虽然 2 个矿区成矿条件类似, 但还是存在差别, 所以本次研究结果采用此值可能与实际情况存在一定误差)。据石英—水平衡分馏方程 $(1000 \ln \alpha_{\text{Qtz-H}_2\text{O}} = 3.38 \times 10^6/T^2 - 3.40)$, Clayton et al, 1972; $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}} = 3.38 \times 10^6/T^2 - 3.40$ 最终获得庙沟金矿 $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$ 值如表 3 所示, $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$ 值为 $7.3\text{‰} \sim 10.3\text{‰}$, 平均值为 8.6‰ 。陈安东 (2018) 测试的马蹄沟金矿 $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$ 值为 $2.1\text{‰} \sim 6.4\text{‰}$, 牛家窖金矿化点 $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$ 值为 $2.2\text{‰} \sim 2.8\text{‰}$ 。

表 3 庙沟金矿区石英 H-O 同位素测试结果

Table 3 Test results of quartz H-O isotope in the Miaogou gold deposit

矿区名称	样品编号	样品岩性	测试对象	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}/\text{‰}$	数据来源
庙沟 金矿区	M024-10	硅化千枚岩金矿石	石英	-90	16.8	7.4	本文
	M024-11	多金属硫化物石英脉	石英	-96	16.7	7.3	
	M024-12	蚀变千枚岩金矿石	石英	-89	19.4	10.0	
	M024-13	含粗粒黄铁矿石英脉	石英	-69	17.8	8.4	
	M024-14	含石英—黄铁矿脉碳质千枚岩	石英	-94	18.5	9.1	
	M024-15	硅化千枚岩金矿石	石英	-59	17.4	8.0	
	M024-16	黄铁矿化石英脉	石英	-90	19.7	10.3	
马蹄沟 金矿	Q121-1	含方铅矿块状石英	石英	-82	13.4	4.0	陈安东, 2018
	Q121-2	含石英—黄铁矿脉碳质千枚岩	石英	-82	11.5	2.1	
	Q157-2	含黄铁矿石英脉	石英	-78	14.5	5.1	
	Q252-1	白色石英脉	石英	-78	15.8	6.4	
牛家窖 金矿化点	Q251-1	破碎石英	石英	-84	11.6	2.2	陈安东, 2018
	Q251-2	褐铁矿化破碎石英	石英	-86	12.2	2.8	

3.3 S同位素

庙沟金矿区矿石中黄铁矿S同位素测试结果见表4, $\delta^{34}\text{S}$ 值为4.15‰~11.88‰, 平均值为9.57‰, 本次测试除一个样品值相对较小外, 可能不属于同一阶段的硫化物, 其余3个样品值接近, 变化范围比较小, 硫来源比较单一。陈安东(2018)研究表明, 马蹄沟金矿成矿期 $\delta^{34}\text{S}$ 值为3.90‰~4.20‰, 平均值为4.10‰, 变化范围比较小, 硫来源比较单一, 细粒黄铁矿集合体与自形黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值存在差异, 可能也不属于同一阶段的硫化物, 但整体 $\delta^{34}\text{S}$ 值与庙沟金矿有一定的差异; 佐家庄金矿成矿期 $\delta^{34}\text{S}$ 值为12.60‰~14.70‰, 平均值为13.27‰, 但 $\delta^{34}\text{S}$ 值与

庙沟金矿较为相似。

3.4 锆石U-Pb年龄

本次进行锆石U-Pb测年的闪长玢岩样品采自庙沟金矿区1460中段和1490中段穿脉23和25中, 闪长玢岩在空间上与金矿体紧密相伴[图4(i), 图5], 具有斑晶结构, 斑晶多为斜长石和绿泥石化角闪石, 基质主要为斜长石和绿泥石化暗色矿物。阴极发光(CL)图像(图7)显示, 大部分锆石发育明显的震荡环带, 具有典型岩浆锆石特征, 仅少部分锆石内保存有继承锆石内核, 且少部分锆石图像整体发暗, 长度为50~150 μm , 长宽比介于1:1~1:3。由表5可见, 锆石U含量为 $1.203.42 \times 10^{-6} \sim 2.499.88 \times$

表4 庙沟金矿区S同位素测试结果
Table 4 Test results of S isotope in the Miaogou gold deposit

矿区名称	样品编号	采样位置	样品岩性	测试对象	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	数据来源
庙沟金矿	M024-10	1490中段CM27	硅化千枚岩金矿石	黄铁矿	4.15	本文
	M024-11	1490中段CM27	多金属硫化物石英脉	黄铁矿	11.62	
	M024-12	1490中段CM25	蚀变千枚岩金矿石	黄铁矿	10.64	
	M024-16	1490中段CM25	黄铁矿化石英脉	黄铁矿	11.88	
佐家庄金矿	Q347-1	佐家庄金矿	含方铅矿黄铁矿石英脉	黄铁矿	13.30	陈安东, 2018
	Q347-2	佐家庄金矿	含黄铁矿石英脉	黄铁矿	13.00	
	Q347-3	佐家庄金矿	含黄铁矿石英脉	黄铁矿	13.10	
	Q348-1	佐家庄金矿	含立方体黄铁矿石英	黄铁矿	14.70	
	Q348-2	佐家庄金矿	含黄铁矿石英脉矿石	黄铁矿	12.90	
	Q348-3	佐家庄金矿	黄铁矿石英脉	黄铁矿	12.60	
马蹄沟金矿	Q54-1	马蹄沟金矿 ZK47-2	细粒黄铁矿集合体	黄铁矿	8.50	陈安东, 2018
	Q54-2	马蹄沟金矿 ZK47-2	自形黄铁矿	黄铁矿	4.10	
	Q63-2	马蹄沟金矿 TC44	矿化带中含黄铁矿石英脉	黄铁矿	3.90	
	Q252-2	马蹄沟金矿 ZK55-5	含石英黄铁矿脉	黄铁矿	4.20	

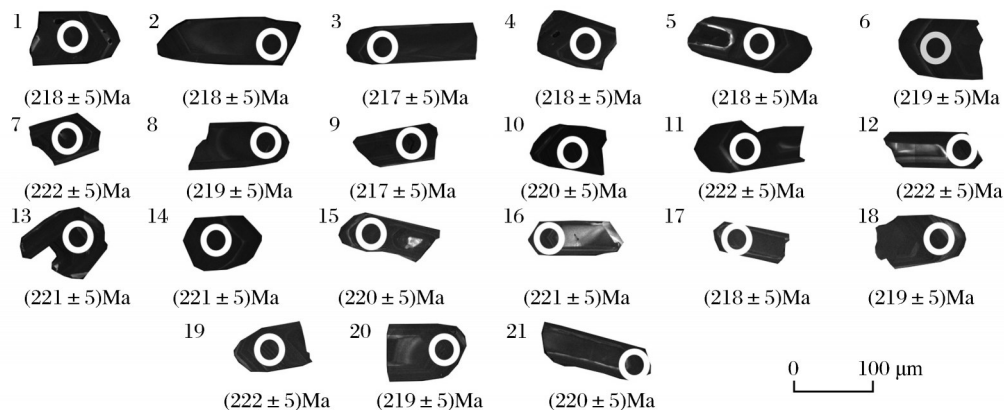


图7 庙沟金矿闪长玢岩测年锆石阴极发光图像

Fig. 7 Cathodoluminescence images of zircon from the diorite porphyrite dating in the Miaogou gold deposit

10⁻⁶, 平均值为 1 874.58×10⁻⁶, Th 含量为 435.07×10⁻⁶~1 151.93×10⁻⁶, 平均值为 872.45×10⁻⁶; Th/U 比值介于 0.32~0.58, 仅 1 个值低于 0.4, 平均值为 0.47。Th/U 比值表明本次测试样品中锆石主要为岩浆成因。

闪长玢岩样品锆石经 LA-ICP-MS 分析, 其中

21 个测点谐和度较好, 数据点在谐和图上整体落在谐和曲线上, 其 U-Pb 同位素体系保持完全封闭, 未受后期变质作用扰动。21 个测点数据的拟合线与谐和曲线的交点年龄为 (220.7±1.0) Ma (MSWD=4.8), 加权平均值为 (219.8±2.1) Ma (MSWD=0.12), 属晚三叠世(图 8)。

表 5 庙沟金矿闪长玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果

Table 5 Zircon LA-ICP-MS U-Pb test results of the diorite porphyrite in the Miaogou gold deposit

点号	含量/(×10 ⁻⁶)			同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U	Th/U	Pb ²⁰⁷ / Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ / U ²³⁵	1σ	Pb ²⁰⁶ / U ²³⁸	1σ	Pb ²⁰⁷ / Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ / U ²³⁵	1σ	Pb ²⁰⁶ / U ²³⁸	1σ
1	804.15	1 858.78	0.43	0.0502	0.0014	0.238	0.007	0.0343	0.0008	206	63	216	6	218	5
2	742.44	1 628.52	0.46	0.0505	0.0014	0.239	0.007	0.0343	0.0008	219	63	218	6	218	5
3	1 143.50	2 499.88	0.46	0.0502	0.0015	0.237	0.007	0.0342	0.0008	205	67	216	6	217	5
4	828.18	1 719.12	0.48	0.0501	0.0018	0.237	0.009	0.0344	0.0008	197	82	216	7	218	5
5	1 018.36	2 080.90	0.49	0.0514	0.0015	0.245	0.008	0.0346	0.0008	260	67	223	6	219	5
6	915.45	2 081.26	0.44	0.0501	0.0014	0.241	0.007	0.0350	0.0008	200	62	220	6	222	5
7	1 030.54	2 080.29	0.50	0.0501	0.0013	0.242	0.007	0.0350	0.0008	200	61	220	6	222	5
8	1 151.93	2 182.32	0.53	0.0507	0.0012	0.242	0.006	0.0346	0.0008	227	56	220	5	219	5
9	1 105.56	2 021.32	0.55	0.0528	0.0014	0.249	0.007	0.0343	0.0008	318	59	226	6	217	5
10	1 139.30	2 432.20	0.47	0.0513	0.0012	0.246	0.006	0.0348	0.0008	256	52	223	5	220	5
11	884.97	1 960.24	0.45	0.0500	0.0014	0.241	0.007	0.0350	0.0008	196	62	220	6	222	5
12	529.82	1 203.42	0.44	0.0505	0.0017	0.243	0.008	0.0350	0.0008	217	74	221	7	222	5
13	665.59	1 581.24	0.42	0.0503	0.0015	0.242	0.007	0.0349	0.0008	207	67	220	6	221	5
14	435.07	1 380.09	0.32	0.0511	0.0014	0.246	0.007	0.0349	0.0008	243	64	223	6	221	5
15	870.70	2 079.22	0.42	0.0531	0.0012	0.254	0.006	0.0347	0.0008	334	52	230	5	220	5
16	875.06	1 556.50	0.56	0.0510	0.0014	0.246	0.007	0.0349	0.0008	241	61	223	6	221	5
17	711.68	1 319.65	0.54	0.0524	0.0015	0.248	0.007	0.0344	0.0008	303	62	225	6	218	5
18	1 000.05	2 510.02	0.40	0.0522	0.0012	0.248	0.006	0.0345	0.0008	295	50	225	5	219	5
19	728.24	1 819.22	0.40	0.0523	0.0012	0.252	0.006	0.0350	0.0008	298	53	228	5	222	5
20	934.77	1 614.59	0.58	0.0514	0.0013	0.245	0.007	0.0346	0.0008	258	58	223	6	219	5
21	806.08	1 757.15	0.46	0.0508	0.0013	0.244	0.007	0.0348	0.0008	233	56	222	5	220	5

4 讨论

4.1 稀土和微量元素地球化学特征

从脉岩闪长玢岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 9)中可以看出, 庙沟金矿区闪长玢岩样品的配分曲线表现为强烈的右倾, 轻稀土元素相对富集, 重稀土元素曲线较平坦, Eu 无明显异常。脉岩闪长玢岩的配分曲线与何家庄岩体东侧二长花岗岩和花岗闪长岩(除 Eu 正异常)基本一致, 表明脉岩闪长玢岩与何家庄岩体类似, 可视为同一岩

浆作用的不同过程的产物。从矿石稀土元素球粒陨石标准化的配分模式图(图 10)中可以看出, 均表现出富集轻稀土、亏损重稀土的特点, δEu 值为 0.57~1.49, 存在 Eu 的明显负异常, 表明该区矿物在形成过程中存在斜长石的分离结晶, 这一现象与典型地壳稀土元素“V”字形分布模式具有相似性, 暗示着本区矿物的物源不仅有来自上地幔的部分, 还有少量来自地壳的部分。

从微量元素原始地幔蛛网图解(图 11 和图 12)中可以看出, 岩体均富集 Rb、Ba、Th、U、Pb 和 LREE

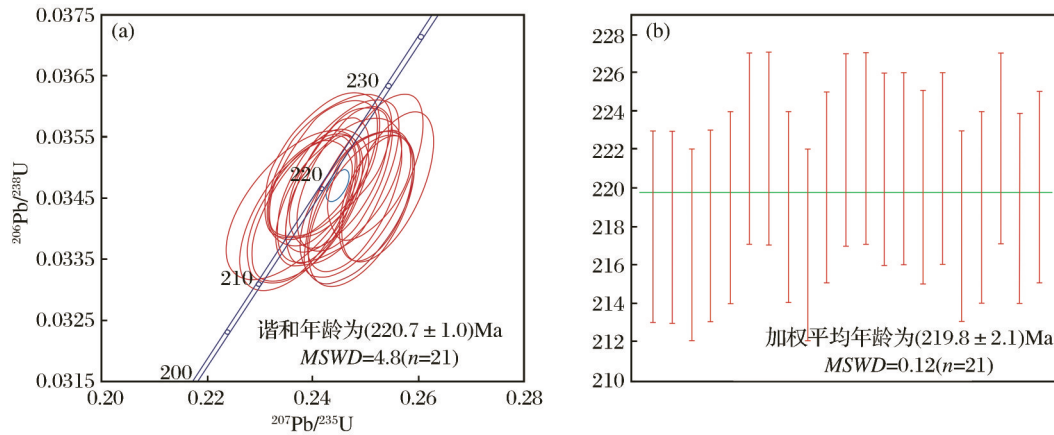
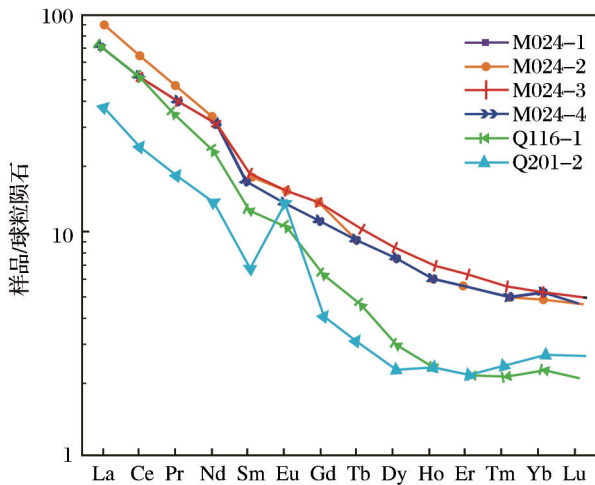


图8 庙沟金矿闪长玢岩样品锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图(a)及加权平均年龄(b)

Fig. 8 Concordia diagram (a) and weighted mean age (b) of zircon U-Pb from the diorite porphyrite in the Miaogou gold deposit by the LA-ICP-MS



注:样品 M024-1 ~ M024-4 为闪长玢岩,为本次研究测试数据; Q116-1 和 Q201-2 分别为二长花岗岩和花岗闪长岩,数据来源于于陈安东(2018)

图9 庙沟金矿脉岩样品稀土元素配分曲线

Fig. 9 Rare earth elements distribution curves of the vein rock samples in the Miaogou gold deposit

等大离子亲石元素, Th、Ta、Nb 和 Hf 等高场强元素则呈现出富集的状态, Nb 和 Ti 元素表现出明显的负异常, 暗示着在成岩过程中具有大陆物质的参与。对热液活动敏感的 Sr 元素强烈亏损, 暗示着矿石经历了明显的热液活动。在庙沟金矿区, 通过对比脉岩闪长玢岩、何家庄花岗岩体和金矿石样品微量元素可知, 三者元素富集和亏损方面表现出相似的变化特征, 说明三者经历了相似的成矿流体作用。

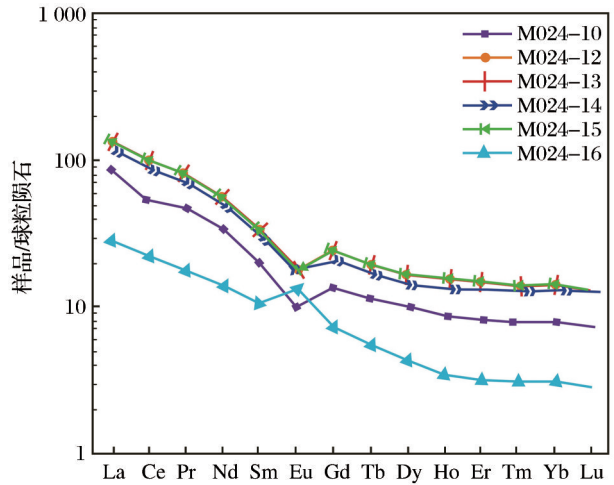
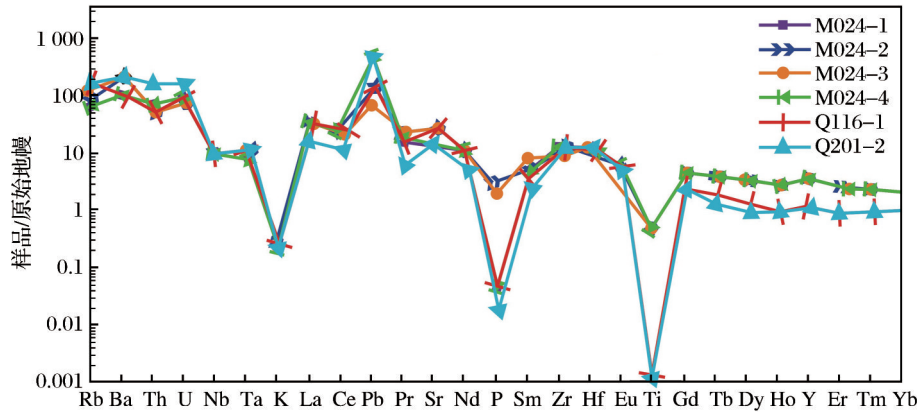


图10 庙沟金矿矿石样品稀土元素配分曲线

Fig. 10 Rare earth elements distribution curves of ore samples in the Miaogou gold deposit

在讨论岩浆源区的问题之前, 首先需要确定本区岩体是否经历了陆壳物质的混染。根据前人的研究(Pearce et al, 1973), 得出原始地幔的 Nb/Ta 比值为 17.5 ± 2.0 , Zr/Hf 比值为 36.27, 大陆地壳的 Nb/Ta 比值为 12~13, Zr/Hf 比值为 11; 原始地幔的 La/Nb 比值为 0.94, 大陆地壳的 La/Nb 比值为 2.2。计算得到庙沟金矿的 Nb/Ta 比值为 14.20~17.59, 平均值为 16.46, Zr/Hf 比值为 39.08~47.99, 平均值为 45.06; La/Nb 比值为 2.09~6.01, 平均值为 3.91。说明消减板片在俯冲作用过程中释放的流体对地幔产生的交代作用, 是地幔源区成分发生显著变化的关键因素, 且岩体可能受到地壳混染。



注:样品 M024-1~M024-4 为闪长玢岩,为本次研究测试数据;Q116-1 和 Q201-2 分别为二长花岗岩和花岗闪长岩,数据来源于陈安东(2018)

图 11 庙沟金矿脉岩原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 11 Primitive mantle normalized spider diagram of trace elements of the vein rocks in the Miaogou gold deposit

4.2 成矿物质来源

现有研究表明,地球上S元素的主要来源有3个。(1)岩浆硫/地幔硫, $\delta^{34}\text{S}\approx 0$,变化范围大致在 $0\pm 3\text{‰}$ 。(2)地壳硫, $\delta^{34}\text{S}$ 的变化范围随着岩石酸度的增加而变宽,具体表现为:①花岗岩类 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-13.4\text{‰}\sim 26.7\text{‰}$;②变质岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-20\text{‰}\sim 20\text{‰}$;③沉积岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围较大,常为大的正负值;(3)海水硫,现代海洋硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 非常稳定, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $20.0\text{‰}\pm 0.5\text{‰}$;(4)生物成因硫,石油和煤中的 $\delta^{34}\text{S}$ 多为负值,且变化范围大(张宏飞,2012;张亦驰等,2023;苏力等,2024)。

根据庙沟金矿S同位素分析结果(表4)和S同位素分布图(图13),庙沟金矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值均为小于 11.88‰ 的正值, $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大,属于变质岩和沉积岩的范围内。同时,从表4可以看出,庙沟金矿区矿石中的O同位素均反映地壳高 O^{18} ($\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $16.7\text{‰}\sim 19.7\text{‰}$)的特点,说明各不同类型矿石为围岩地层硅质活化的产物,与其相关的矿化物质可能有一部分来自围岩地层。结合前人研究成果(殷勇,2011;陈安东,2018;胡国朝,2019;李鹏贝,2020),认为庙沟金矿成矿物质大部分来自岩浆,少部分来自围岩地层。综上所述,庙沟金矿床硫的来源并不单一,具有多源性的特征,成矿物质大部分来自岩浆,少部分来自围岩地层。庙沟金矿床的成矿过程与岩浆活动密切相关,与矿体相伴产出的闪长玢岩与金成矿有密切关系,岩浆热液在金成矿中扮演重要角色,岩浆活动不仅为围

岩地层中成矿物质的活化、迁移和富集提供了动力和热液来源,而且提供了大部分矿质。

4.3 成矿流体来源

庙沟金矿石英 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-96\text{‰}\sim -59\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $16.7\text{‰}\sim 19.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$ 值为 $7.3\text{‰}\sim 10.3\text{‰}$ 。在H-O同位素投图(图14)中,大多数样品投点表现出与岩浆水的亲缘性,主要落在岩浆水范围内及其附近,且离大气降水线较远,表明庙沟金矿成矿流体具有多属性,可能主要来源于岩浆水。陈安东(2018)通过对马蹄沟金矿区及其周围金矿化点样品进行H-O同位素分析,认为马蹄沟金矿及其周围金矿化点的成矿流体主要来源于岩浆水,后期有大气降水的混入。马健(2018)通过对邻区庞家河金矿成矿期石英脉开展H-O同位素分析,认为成矿流体早期以变质流体为主,后期有岩浆水和大气降水的加入。通过对比分析庙沟金矿与凤太矿集区其他典型金矿,认为庙沟金矿成矿流体可能主要来源于岩浆水,不排除有变质流体和大气降水的混入。

4.4 成矿时代

一直以来,陆续有研究者对秦岭造山带凤太矿集区中一些典型金矿床开展了高精度同位素年代学研究(表6)。例如:刘协鲁等(2014)对秦岭凤太矿集区八卦庙特大型金矿床附近的柴蚂金矿床进行研究,获得方解石和白云石等碳酸盐矿物的Sm-Nd年龄为 $(203\pm 1.6)\text{Ma}$ 。该结果略晚于文博等(2008)所获得的凤太矿集区柴蚂金矿床铅同位素

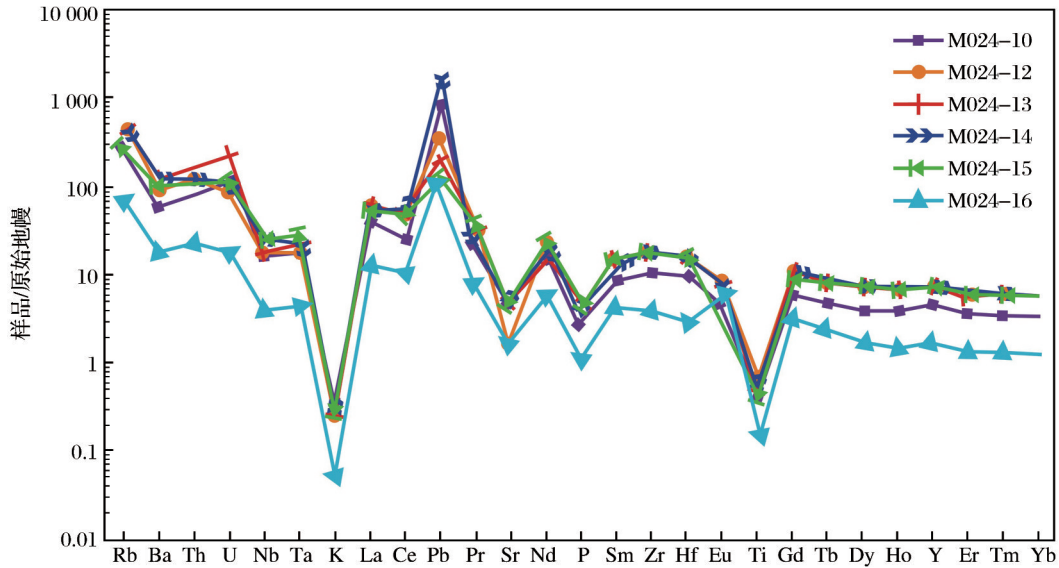


图 12 庙沟金矿矿石原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 12 Primitive mantle normalized spider diagram of trace elements in the Miaogou gold deposit

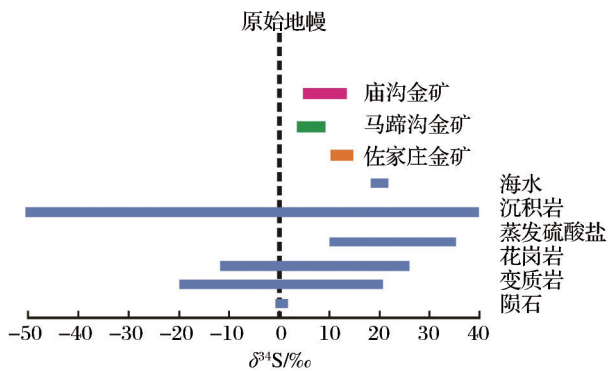


图 13 庙沟金矿 S 同位素分布图(底图据 Hoefs, 2009)

Fig. 13 Sulfur isotope distribution map of the Miaogou gold deposit (base map according to Hoefs, 2009)

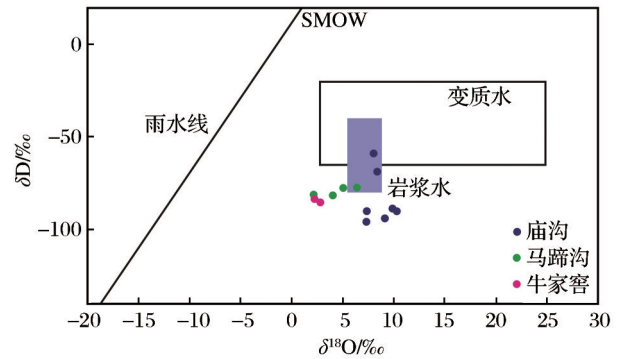


图 14 庙沟金矿 H-O 同位素投图(底图据 Taylor, 1974)

Fig. 14 H-O isotope plot of the Miaogou gold deposit (base map according to Taylor, 1974)

模式年龄(210 Ma),也晚于胡乔青(2015)获得的柴蚂金矿床铅锌矿体的 Rb-Sr 等时线年龄[(210.8±2.4)Ma]。秦岭凤太矿集区八卦庙特大型金矿床北西部附近的丝毛岭金矿床,早阶段热液绢云母 Ar-Ar 坪年龄为(211.9±1.5)Ma(王义天等,2014)。王义天等(2021)对西秦岭凤太矿集区及周边岩浆岩和矿床已取得的同位素年龄进行统计发现,岩浆岩的年龄为 248~195 Ma,集中于 230~200 Ma,多金属矿床的年龄为 231~197 Ma,集中于 220~200 Ma,结合流体包裹体和稳定同位素特征,认为晚三叠世中酸性岩浆活动不仅为成矿提供了热源,也提供了部分成矿流体和成矿元素。

殷勇(2011)通过对收集的 27 个西秦岭地区金矿密集区伴生的各类脉岩的主要特征,脉岩与金矿床、花岗岩的空间关系,脉岩成岩时间与金矿床的成矿时间,以及脉岩与金矿床、花岗岩的成矿物质来源等进行研究,认为在空间上脉岩与金矿紧密相伴,且多数脉岩与花岗岩体有着不可分割的密切关系,在时间上,脉岩的成岩时间与金矿成矿时间相近,金矿成矿物质来源与脉岩、岩浆岩具有同源性和继承性。陈安东等(2017)和陈安东(2018)对何家庄岩体、岩体东段花岗岩和坑道中矿化的花岗斑岩岩脉样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年,获得的加权平均年龄分别为(242.2±2.6)Ma、

(244.8±3.9)Ma 和 (227±4.8)Ma, 通过对马蹄沟金矿与岩体、岩脉空间关系进行研究, 认为马蹄沟金矿床的成矿时代为 227~200 Ma, 成矿时间与岩脉的形成时代相近, 或稍晚于花岗斑岩。陈柏林等(2020)通过对马蹄沟金矿及邻区庞家河金矿和何家庄花

岗岩体空间上成因分析, 认为马蹄沟金矿床的成矿作用与何家庄花岗岩体晚期侵入体同时代, 也或与略稍晚的二长花岗岩有关的岩浆期后热液或补充岩浆热液有关, 成矿时代为 220~215 Ma, 属于晚三叠世早期。

表 6 西秦岭凤太矿集区典型金矿同位素年龄

Table 6 Isotopic age of typical gold deposits in the Fengxian-Taibai mineral concentrated area, West Qinling

矿床名称	测试方法	测试对象	年龄数据	数据来源
八卦庙金矿床	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	NW 向石英脉中的石英	坪年龄为(232.58±1.59)Ma, 等时线年龄为(222.14±3.45)Ma	冯建忠等, 2003
	K-Ar	NE 向石英脉、NW 向石英脉条带岩型矿石中的绢云母	测试对象年龄分别为(197.6±4.2)Ma、(195.4±4.2)Ma 和(199.1±4.2)Ma	韦龙明, 2004
	U-Th-Pb	金矿石中的黄铁矿和磁黄铁矿	铅一致法模式年龄为 210 Ma	刘协鲁等, 2014
	Sm-Nd	主成矿阶段铁白云石、白云石、方解石等碳酸盐矿物	等时线年龄为(209.3±4.2)Ma 和(208.1±3.1)Ma	张娟, 2016
柴蚂金矿床	Sm-Nd	主成矿阶段白云石、方解石	等时线年龄为(203.2±1.6)Ma	王义天等, 2014
丝毛岭金矿床	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	第一成矿阶段绢云母	坪年龄为(211.9±1.5)Ma	卢欣祥等, 1999
庞家河金矿	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	绢云母	坪年龄为(231.7±0.2)Ma	
马蹄沟金矿	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	绢云母	坪年龄为(234±0.2)Ma	马健, 2018
	U-Pb	矿化花岗斑岩岩脉	加权平均年龄为(227±4.8)Ma	陈安东等, 2017; 陈安东, 2018

本次研究获得的庙沟金矿区脉岩闪长玢岩的锆石 U-Pb 谐和年龄为(220.7±1.0)Ma, 加权平均值为(219.8±2.1)Ma, 属晚三叠世, 结合前述庙沟金矿岩(矿)石、稀土、微量元素和 H-O-S 同位素特征, 金矿石与脉岩闪长玢岩、何家庄花岗岩体的空间关系, 认为晚三叠世岩浆活动不仅为成矿提供了热源, 也提供了部分成矿流体和成矿元素。

4.5 成矿机制

根据秦岭造山带的演化历史, 志留纪晚期至泥盆纪早中期, 东特提斯构造域扩展裂解, 勉略洋盆形成。古勉略洋的形成使南秦岭从扬子板块北缘分离, 形成相对独立的微板块, 凤太盆地裂陷成盆并接受沉积, 使 Au 元素初步富集。中二叠世至中三叠世, 勉略洋向北俯冲并逐步沿勉略缝合带发生碰撞造山作用, 导致区域性变质变形作用和岩浆活动广泛发育(张国伟等, 2001, 2003, 2019; Lai et al, 2008; Dong et al, 2011, 2016; 王义天等, 2018; 姜寒冰等, 2024; Yang et al, 2024; 张逸鹏等, 2024)。此阶段的 SN 向挤压应力场, 形成了早期剪切挤压变形构造, 同时伴有初期岩浆活动, 金矿床开始形成。

在晚三叠世, 碰撞末期由挤压向伸展环境转变, 脆-韧性剪切在易于变形的罗汉寺岩群碎屑岩段的千枚岩发生, 同时伴随有中酸性岩浆持续侵位, 为本区矿化提供了充足的热源和驱动力(陈安东等, 2016; 杨兴科等, 2016, 2017; 陈安东, 2018; 李斌, 2018; 胡国朝等, 2019; 陈柏林等, 2020)。岩浆热液沿区域性断裂带向上迁移, 并活化地层中的成矿物质, 萃取进入成矿热液。在近 EW 向伸展环境下形成的 NW 向张扭性隐性构造带, 为热液提供了运输通道和富集空间, 在合适的物理化学条件下, 成矿热液在构造破碎带的微裂隙中不断富集和沉淀成矿, 庙沟金矿床正是在这一背景下形成的。综上所述, 庙沟金矿是晚三叠世受脆-韧性剪切带控制的广泛而强烈的变形变质-岩浆活动-流体耦合作用的产物, 矿床工业类型为构造蚀变岩型金矿床。

5 结论

(1) 庙沟金矿岩(矿)石稀土元素特征暗示着本区矿物的物源具有多源性, 不仅有来自上地幔的部

分,又有少量来自地壳的部分。微量元素特征表明,在元素富集和亏损方面表现出相似的变化特征,说明脉岩闪长玢岩、矿石和何家庄花岗岩体经历了相似的成矿流体作用。成矿物质来源具有多源性的特征,大部分来自岩浆,少部分来自围岩地层。成矿流体可能主要来源于岩浆水。

(2)获得了庙沟金矿区脉岩闪长玢岩的锆石U-Pb谐和年龄为(220.7±1.0)Ma,加权平均年龄为(219.8±2.1)Ma,结合区域构造演化历史及庙沟金矿的成矿地质特征,推断庙沟金矿成矿时代为晚三叠世,晚三叠世岩浆活动不仅为成矿提供了热源,同时提供了部分成矿流体和成矿元素。

(3)早古生代罗汉寺岩群浅变质碎屑岩段作为金矿形成的矿源层,形成了成矿物质的初步富集。晚三叠世,区内碰撞挤压进入伸展环境,易于变形的罗汉寺岩群第三岩性段的千枚岩发生脆-韧性剪切变形,使其中的硅质活化,并萃取矿源层中的Au元素分异出来并富集,为后续矿化提供了条件。区域岩浆活动为地层中矿质的再次活化、运移提供了动能和热力条件,从而形成现有规模的金矿床。

参考文献 (References):

Boynton W V, 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [M]//Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier: 63-114.

Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K, 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water [J]. *Journal of Geophysical Research*, 77(17): 3057-3067.

Dong Y P, Santosh M, 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China [J]. *Gondwana Research*, 29(1): 1-40.

Dong Y P, Shi X H, Sun S S, et al, 2022. Co-evolution of the Cenozoic tectonics, geomorphology, environment and ecosystem in the Qinling Mountains and adjacent areas, Central China [J]. *Geosystems and Geoenvironment*, 1(2): 100032.

Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al, 2011. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 213-237.

Dong Y P, Zhang X N, Liu X M, et al, 2015. Propagation tectonics and multiple accretionary processes of the Qinling Orogen [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 104: 84-98.

He H J, An L, Yang X K, et al, 2018. Geochemical characteris-

tics of Late Carboniferous volcanic rocks in South-eastern Heishanling, Beishan area, Xinjiang, China [J]. *Geological Journal*, 53(Suppl.2): 126-136.

Hoefs J, 2009. *Stable isotope geochemistry* [M]. Heidelberg: Springer.

Lai S C, Qin J F, Chen L, et al, 2008. Geochemistry of ophiolites from the Mian-Lue suture zone: implications for the tectonic evolution of the Qinling Orogen, Central China [J]. *International Geology Review*, 50(7): 650-664.

Li S Z, Kusky T M, Wang L, et al, 2007. Collision leading to multiple-stage large-scale extrusion in the Qinling orogen: Insights from the Mianlue suture [J]. *Gondwana Research*, 12(1/2): 121-143.

Pearce J A, Cann J R, 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290-300.

Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345.

Taylor H P, 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition [J]. *Economic Geology*, 69(6): 843-883.

Yang H C, Yang F, Jepson G, et al, 2024. Magmatic and hydrothermal evolution of the superlarge Dashui goldfield in the West Qinling Orogen, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 169: 106095.

安乐, 2019. 西秦岭凤县马蹄沟金矿床三维地质建模及找矿预测 [D]. 西安: 长安大学.

An Le, 2019. 3D geological modeling and prospecting prediction of the Matigou gold deposit in Feng County, West Qinling [D]. Xi'an: Changan University.

安乐, 何虎军, 杨兴科, 等, 2018. 基于 Surpac 的马蹄沟金矿床三维地质模型构建及找矿预测 [J]. *黄金科学技术*, 26(5): 586-595.

An Le, He Hujun, Yang Xingke, et al, 2018. Construction of 3D geological model and prospecting prediction of Matigou gold deposit based on Surpac [J]. *Gold Science and Technology*, 26(5): 586-595.

陈安东, 2018. 西秦岭马蹄沟金矿床控矿构造及成因研究 [D]. 北京: 中国地质科学院.

Chen Andong, 2018. Research on the ore-controlling structure and genesis of the Matigou gold deposit in West Qinling [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences.

陈安东, 陈柏林, 2016. 陕西凤县马蹄沟金矿床控矿构造特征及其地质意义 [J]. *地质论评*, 62(B11): 291-292.

Chen Andong, Chen Bailin, 2016. Characteristics and geological significance of ore-controlling structure for the Matigou

- gold deposit in Fengxian, Shaanxi[J]. *Geological Review*, 62(B11):291-292.
- 陈安东,陈柏林,王永,2017.陕西凤县马蹄沟金矿地区岩体与花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[C]//2017 中国地球科学联合学术年会论文集.北京:中国地球物理学会:25-26.Chen Andong, Chen Bailin, Wang Yong, 2017. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geological significance of rock mass and granite porphyry in Matigou gold deposit area, Fengxian County, Shaanxi Province [C]// Proceedings of the 2017 China Earth Science Joint Academic Annual Conference. Beijing: Chinese Geophysical Society:25-26.
- 陈柏林,贺永平,李引芳,等,2020.秦岭造山带中段马蹄沟金矿床伸展剪切构造系统及其控矿作用[J].大地构造与成矿学,44(1):1-19.Chen Bailin, He Yongping, Li Yin-lao, et al, 2020. Extensive-shear structure and its controls on mineralization in the matigou gold deposit, middle Qinling Orogenic Belt, NW China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(1):1-19.
- 冯建忠,汪东波,王学明,等,2003.陕西凤县八卦庙超大型金矿床成矿地质特征及成矿作用[J].地质学报,77(3):387-398.Feng Jianzhong, Wang Dongbo, Wang Xueming, et al, 2003. Geology and metallogenesis of the baguamiao giant gold deposit in Fengxian, Shaanxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(3):387-398.
- 韩珂,杨兴科,何虎军,等,2020.南秦岭汉阴北部金矿田脆-韧性剪切带控矿特征及构造变形-成矿年代学研究[J].大地构造与成矿学,44(5):801-818. Han Ke, Yang Xingke, He Hujun, et al, 2020. Characteristics of ore-controlling brittle-ductile shear zone and ages of deformation and mineralization in the northern Hanyin gold field, south Qinling, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(5):801-818.
- 何虎军,田冲,张文高,等,2023.黔西南架底金矿床载金黄铁矿成矿物质来源和成矿机制探讨:来自原位硫同位素的证据[J].大地构造与成矿学,47(4):791-800.He Hujun, Tian Chong, Zhang Wengao, et al, 2023. Source of ore-forming materials and mineralization mechanism of gold-bearing pyrite in the jiadi gold deposit, southwestern Guizhou: evidence from *in situ* sulfur isotope[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 47(4):791-800.
- 胡国朝,2019.秦岭凤县马蹄沟一庙沟金矿成矿模式及找矿方向[D].西安:长安大学. Hu Guochao, 2019. Metallogenic model and prospecting direction of matigou-miaogou gold deposits in Fengxian County, Qinling [D]. Xi'an: Chang'an University.
- 胡国朝,杨兴科,任仓智,等,2019.陕西凤县马蹄沟:庙沟金矿区控矿构造特征[J].黄金科学技术,27(4):469-479. Hu Guochao, Yang Xingke, Ren Cangzhi, et al, 2019. Characteristics of ore-controlling rules of matigou-Miaogou gold deposit in Fengxian County, Shaanxi Province [J]. *Gold Science and Technology*, 27(4):469-479.
- 胡乔青,2015.西秦岭凤太矿集区铅锌多金属矿床成矿作用特征、机制与成矿规律[D].北京:中国地质科学院. Hu Qiaoqing, 2015. The mineralization features, mechanism and metallogenic regularity of the fengtai Pb-Zn Polymetallic Ore. Cluster in West Qinling, China [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences.
- 姜寒冰,杨合群,赵国斌,等,2024.西秦岭成矿带古生界控矿特征及有关成矿作用[J].西北地质,57(4):218-228. Jiang Hanbing, Yang Hequn, Zhao Guobin, et al, 2024. Ore-controlling features and related mineralization functions of the Paleozoic in west Qinling [J]. *Northwestern Geology*, 57(4):218-228.
- 李斌,2018.秦岭凤县北部庞家河—马蹄沟一带金矿控矿构造特征及找矿方向[D].西安:长安大学. Li Bin, 2018. Ore-controlling Structural Characteristics and Prospecting Direction of Gold Deposits in Pangjiahe-Matigou Area in Northern Fengxian County, Qinling Mountains [D]. Xi'an: Changan University.
- 李鹏贝,2020.秦岭凤县庞家河金矿脆—韧性剪切带特征与找矿预测[D].西安:长安大学. Li Pengbei, 2020. Characteristics and Prospecting Prediction of Brittle-ductile Shear Zone of Pangjiahe Gold Deposit in Feng County, Qinling [D]. Xi'an: Changan University.
- 李三忠,张国伟,李亚林,等,2002.秦岭造山带勉略缝合带构造变形与造山过程[J].地质学报,76(4):469-483. Li Sanzhong, Zhang Guowei, Li Yalin, et al, 2002. Deformation and orogeny of the Mian-Lue suture zone in the Qinling Orogenic Belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(4):469-483.
- 刘协鲁,王义天,胡乔青,等,2014.陕西省凤太矿集区柴蚂金矿床碳酸盐矿物的 Sm-Nd 同位素测年及意义[J].岩石学报,30(1):271-280. Liu Xielu, Wang Yitian, Hu Qiaoqing, et al, 2014. Sm-Nd isotopic dating of carbonate minerals from the Chaima gold deposit in the Fengxian-Taibai ore concentration area, Shaanxi Province and its implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1):271-280.
- 卢欣祥,尉向东,董有,等,1999.小秦岭—熊耳山地区金矿时代[J].黄金地质,(1):11-16. Lu Xinxiang, Yu Xiangdong, Dong You, et al, 1999. The metallogenic epoch of gold deposits in Xiaoqinling-Xiong ershan region [J]. *Gold Geology*, (1):11-16.
- 马健,2018.陕西凤县庞家河地区金成矿作用过程及成因研究[D].武汉:中国地质大学. Ma Jian, 2018. Ore-forming

- Processes and Genesis of the Gold Deposits in Pangjiahe Region, Fengxian, Shanxi Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences.
- 马寅龙,晁会霞,杨兴科,等,2023.凤太矿田马蹄沟—庙沟金矿床成因模式探讨[C]//第十届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文集,西安:中国矿物岩石地球化学学会矿床地球化学专业委员会:377-378.Ma Yinlong, Chao Huixia, Yang Xingke, et al, 2023. Discussion on the genetic model of Matigou-Miaogou gold deposit in Fengtai ore field[C]//Proceedings of the 10th National Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Methods, Xi'an: Committee of Deposit Geochemistry, Chinese Society of Mineral and Rock Geochemistry: 377-378.
- 毛景文,周振华,丰成友,等,2012.初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景[J].中国地质,39(6):1437-1471.Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, Feng Chengyou, et al, 2012. A preliminary study of the Triassic large-scale mineralization in China and its geodynamic setting[J]. Geology in China, 39(6):1437-1471.
- 陕西地矿第三地质队有限公司,2016.陕西省凤县庞家河东庙沟金矿详查实施方案[R].宝鸡:陕西地矿第三地质队有限公司. Shaanxi Geology and Minerals Third Geological Team Co., Ltd, 2016. Implementation Plan of detailed exploration for the gold mine in East Miaogou, Pangjiahe, Fengxian, Shaanxi Province [R]. Baoji: Shaanxi Geology and Minerals Third Geological Team Co., Ltd.
- 苏力,朱海军,谷守江,等,2024.宁夏海原西华山地区金矿床地质地球化学特征及成因分析[J].黄金科学技术,32(2):191-206. Su Li, Zhu Haijun, Gu Shoujiang, et al, 2024. Geological and geochemistry characteristics and genesis analysis of gold deposits in Xihuashan area, Haiyuan, Ningxia [J]. Gold Science and Technology, 32(2):191-206.
- 王晓虎,郭涛,李效壮,等,2022.南秦岭烂木沟金矿床地球化学特征与矿床成因研究[J].地质力学学报,28(3):464-479. Wang Xiaohu, Guo Tao, Li Xiaozhuang, et al, 2022. A study on the geochemical characteristics and metallogenesis of the Lanmugou gold deposit in the South Qinling Belt, Shaanxi, China [J]. Journal of Geomechanics, 28(3):464-479.
- 王义天,陈绍聪,胡乔青,等,2018.陕西凤太矿集区多金属成矿作用的构造控制[J].岩石学报,34(7):1959-1976. Wang Yitian, Chen Shaocong, Hu Qiaqing, et al, 2018. Tectonic controls on polymetallic mineralization in the Fengxian-Taibai ore cluster zone, Western Qinling, Shanxi Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 34(7):1959-1976.
- 王义天,李霞,王瑞廷,等,2014.陕西凤太矿集区丝毛岭金矿床成矿时代的Ar-Ar年龄证据[J].地球科学与环境学报,36(3):61-72. Wang Yitian, Li Xia, Wang Ruiting, et al, 2014. Evidence of Ar-Ar age for the metallogenic epoch of simaoling gold deposit in Fengxian-Taibai ore cluster of Shaanxi [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 36(3):61-72.
- 王义天,毛景文,胡乔青,等,2021.西秦岭西成和凤太矿集区三叠纪多金属成矿作用特征、规律及找矿方向[J].地球科学与环境学报,43(3):409-435. Wang Yitian, Mao Jingwen, Hu Qiaqing, et al, 2021. Characteristics and metallogeny of triassic polymetallic mineralization in Xicheng and Fengtai Ore Cluster Zones, West Qinling, China and their implications for prospecting targets [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 43(3):409-435.
- 王宗起,闫全人,闫臻,等,2009.秦岭造山带主要大地构造单元的新划分[J].地质学报,83(11):1527-1546. Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, et al, 2009. New division of the main tectonic units of the Qinling Orogenic Belt, Central China [J]. Acta Geologica Sinica, 83(11):1527-1546.
- 韦龙明,2004.秦岭凤太地区八卦庙式金矿成矿地质条件及其成矿预测[D].成都:成都理工大学. Wei Longming, 2004. Metallogenic Environment and Prediction for Baguamiao Gold Deposit Type in Qinling Region, China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.
- 汶博,王胜利,杨旭,等,2008.陕西凤县柴坞金矿床地质特征及控矿条件分析[C]//中国有色金属学会第七届学术年会论文集.北京:冶金工业出版社:73-77. Wen Bo, Wang Shengli, Yang Xu, et al, 2008. Analysis on geological characteristics and ore-controlling conditions of Chaima gold deposit in Fengxian, Shaanxi Province [C]//Proceedings of the 7th Academic Annual Conference of the Nonferrous Metals Society of China. Beijing: Metallurgical Industry Press: 73-77.
- 杨朋涛,刘树文,李秋根,等,2013.何家庄岩体的年龄和成因及其对南秦岭早三叠世构造演化的制约[J].中国科学:地球科学,43(11):1874-1893. Yang Pengtao, Liu Shuwen, Li Qiugen, et al, 2013. Chronology and petrogenesis of the Hejiazhuang granitoid pluton and its constraints on the Early Triassic tectonic evolution of the South Qinling Belt [J]. Scientia Sinica (Terrae), 43(11):1874-1893.
- 杨兴科,何虎军,晁会霞,等,2016.凤县庞家河金铅锌整装勘查区矿产资源勘查成果集成和勘查选区研究[R].西安:长安大学. Yang Xingke, He Hujun, Chao Huixia, et al, 2016. Study on mineral resources exploration results integration and exploration zoning of gold-lead-zinc integrated

- exploration area in the Pangjiahe of Fengxian [R]. Xi'an: Chang'an University.
- 杨兴科,何虎军,晁会霞,等,2017.秦岭成矿带典型矿集区勘查成果集成与技术支持研究[R].西安:长安大学.
- Yang Xingke, He Hujun, Chao Huixia, et al, 2017. Study on integration and technical support of exploration results of typical mineral concentration areas in the metallogenic belt of Qinling [R]. Xi'an: Chang'an University.
- 叶奎,2017.马蹄沟金矿床地质特征及成矿模式探讨[D].抚州:东华理工大学.
- Ye Kui, 2017. Discussion on geological Characteristics and metallogenic model of Matigou Gold Deposit [D]. Fuzhou: East China Institute of Technology.
- 殷勇,2011.西秦岭地区脉岩与金矿化的关系[J].甘肃地质, 20(1): 28-37, 51.
- Yin Yong, 2011. Relation of dike rock and gold mineralization in west Qinling region [J]. Gansu Geology, 20(1): 28-37, 51.
- 张国伟,2001.秦岭造山带与大陆动力学[M].北京:科学出版社.
- Zhang Guowei, 2001. Qinling orogenic belt and continental dynamics [M]. Beijing: Science Press.
- 张国伟,董云鹏,赖绍聪,等,2003.秦岭—大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带[J].中国科学(D辑:地球科学), 33(12): 1121-1135.
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, et al, 2003. Mianlue structural belt and Mianlue suture belt in the southern margin of Qinling-Dabie orogenic belt [J]. Science in China, Ser. D, 33(12): 1121-1135.
- 张国伟,郭安林,董云鹏,等,2019.关于秦岭造山带[J].地质力学学报, 25(5): 746-768.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Dong Yunpeng, et al, 2019. Rethinking of the Qinling Orogen [J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 746-768.
- 张国伟,孟庆任,赖绍聪,1995a.秦岭造山带的结构构造[J].中国科学(b辑 化学 生命科学 地学), 25(9): 994-1003.
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Lai Shaocong, 1995a. Structure of Qinling Orogenic Belt [J]. Science in China, Ser. B, 25(9): 994-1003.
- 张国伟,张宗清,董云鹏,1995b.秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J].岩石学报, 11(2): 101-114.
- Zhang Guowei, Zhang Zongqing, Dong Yunpeng, 1995b. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling Orogen: implications for the tectonic evolution [J]. Acta Petrologica Sinica, 11(2): 101-114.
- 张宏飞,2012.地球化学[M].北京:地质出版社.
- Zhang Hongfei, 2012. Geochemistry [M]. Beijing: Geology Press.
- 张娟,2016.陕西凤太矿集区八卦庙超大型金矿床成矿过程与成矿机制研究[D].北京:中国地质科学院.
- Zhang Juan, 2016. Study of mineralization process and mechanism in baguamiao super large gold deposit, Fengtai Ore Region, Shaanxi, China [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences.
- 张亦弛,余何,郝建慧,2023.硫铅同位素研究进展及其在硫化物矿床中的应用[J].矿产勘查, 14(5): 785-794.
- Zhang Yichi, Yu He, Hao Jianhui, 2023. Research progress of sulfur and lead isotopes and their application in sulfide deposits [J]. Mineral Exploration, 14(5): 785-794.
- 张逸鹏,张培震,王岳军,等,2024.西秦岭造山带晚中生代-新生代陆内构造演化[J].科学通报, 69(18): 2568-2586.
- Zhang Yipeng, Zhang Peizhen, Wang Yuejun, et al, 2024. The late Mesozoic-Cenozoic intracontinental evolution of the west Qinling Belt, Central China [J]. Chinese Science Bulletin, 69(18): 2568-2586.

Geochemical Characteristics, Zircon U–Pb Ages and Geological Significance of the Miaogou Gold Deposit in the Fengxian, Shaanxi Province

DU Jianhua^{1,2}, ZHU Depeng^{1,2}, HE Hujun^{3,4}, YANG Xingke³, ZHANG Shaohua¹, DOU Langlang¹, CHAO Huixia³

1. Shaanxi Geology and Mining Three Geological Team Co., Ltd., Baoji 721000, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of Mineral Resources Exploration and Testing Research, Baoji 721000, Shaanxi, China;

3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

4. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China

Abstract: The Matigou-Miaogou gold deposit, situated in Fengxian, Shaanxi Province, within the West Qinling region of China, is positioned at the southern margin of the western Shangdan fault zone, centrally located in the

Qinling orogenic belt. This deposit represents a quintessential example within Shaanxi Province's recent strategic initiatives aimed at advancing ore prospecting breakthroughs. The geological strata in this region span from the Paleoproterozoic to the Quaternary periods. Owing to multiple episodes of rifting, contraction, and amalgamation since the Proterozoic era, the exposed strata have experienced varying degrees of deformation, resulting in the formation of near east-west trending complex folds and faults. During the Triassic period, the region experienced intense magmatic activity, characterized by frequent magma intrusions that were often accompanied by multi-stage mineralization. Consequently, this area constitutes a significant structural zone for gold and nonferrous polymetallic mineralization. Notably, the diorite-porphyrite distribution within the mine area is extensive, with evident mineralization and alteration phenomena observable in certain sections, which are spatially closely associated with the ore bodies. This study conducts a preliminary investigation into the metallogenic epoch and mechanisms of the Miaogou gold deposit through a comprehensive analysis of the regional metallogenic background, geological characteristics, rare earth and trace element compositions of rocks (ores), H-O-S isotopic data, and zircon U-Pb dating of diorite-porphyrite veins in the Miaogou gold mine area. In this region, the diorite porphyrite exhibits total rare earth element (ΣREE) concentration ratios ranging from 99.45×10^{-6} to 121.44×10^{-6} , with light rare earth element (LREE) concentration ratios between 90.60×10^{-6} and 112.26×10^{-6} , and heavy rare earth element (HREE) concentration ratios from 8.85×10^{-6} to 10.12×10^{-6} . The europium anomaly (δEu) values range from 0.91×10^{-6} to 0.99×10^{-6} , while the cerium anomaly (δCe) values range from 0.93×10^{-6} to 0.94×10^{-6} . For the ore samples, ΣREE content varies between 46.88×10^{-6} and 121.44×10^{-6} , LREE content ranges from 41.60×10^{-6} to 184.34×10^{-6} , and HREE content spans from 5.28×10^{-6} to 21.17×10^{-6} . The δEu values for the ores range from 0.57×10^{-6} to 1.49×10^{-6} , and δCe values range from 0.85×10^{-6} to 0.98×10^{-6} . Additionally, the $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ values range from -96‰ to -59‰ , and the $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$ values range from 7.3‰ to 10.3‰ , and the value of $\delta^{34}\text{S}$ is from 4.15‰ to 11.88‰ . The zircon U-Pb concordant age of the diorite porphyrite is determined to be $(220.7 \pm 1.0)\text{Ma}$, with a weighted average age of $(219.8 \pm 2.1)\text{Ma}$. The findings indicate that the majority of the metallogenic materials at the Miaogou gold mine are derived from magmatic sources, with a minor contribution from the surrounding rock strata. The metallogenic fluids are of multiple origins, predominantly consisting of magmatic water. It is posited that the Miaogou gold mine was formed during the Late Triassic period. During this epoch, significant brittle-ductile shear deformation and magmatic activity were intimately associated with gold mineralization and alteration processes. These geological phenomena likely provided the necessary thermal energy and mineral sources, facilitating the activation, migration, and enrichment of siliceous materials and minerals within the early Paleozoic Luohansi rock group. These materials subsequently concentrated within the multi-fissures oriented in the west-north-east-south direction, associated with brittle-ductile shear deformation. The tectonic deformation, magmatic activity, and ore-forming enrichment events of the Late Indosinian period hold substantial significance. The Miaogou gold deposit is thus interpreted as a product of extensive and intense deformation, metamorphic-magmatic activity, and fluid interactions governed by the brittle-ductile shear zones during the Late Triassic.

Key words: rare earth elements; trace elements; H-O isotope; S isotope; zircon U-Pb age; gold deposit