

北秦岭红石什字金矿床成矿物质来源和成矿时代

张登峰^{1,2,3}, 郭艳琴¹, 葛战林^{2,3}, 薛仲凯^{2,3}, 李航^{2,3*}, 段留安^{4*}

1. 西安石油大学, 陕西 西安 710100;
2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100;
3. 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心, 陕西 西安 710100;
4. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264004



摘要:北秦岭丰北河—杨斜成矿带是秦岭造山带内重要的金及多金属矿集区,区内典型金矿床成矿时代长期存在印支期与燕山期之争。为探讨区内典型金矿床成矿时代、物质来源及成因机制,选取该带中部的红石什字金矿床作为研究对象,开展系统的矿床地质、同位素地球化学和锆石U-Pb年代学研究工作。结果表明,红石什字金矿床的成矿过程可划分为4个热液阶段,其中主成矿阶段为灰白色石英—黄铁矿阶段(阶段Ⅲ)。主成矿阶段矿石样品中黄铁矿S同位素组成($\delta^{34}\text{S}$ 值为 -2.88‰ ~ -0.08‰)与Pb同位素特征($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.173\sim38.338$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.628\sim15.634$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.829\sim17.978$)共同指示成矿物质具有壳幔混合来源,符合造山型金矿床属性;对含金石英脉中锆石进行U-Pb定年获得2组年龄,分别为 $(418\pm1)\text{Ma}$ 和 $(225\pm1)\text{Ma}$,其中 $(225\pm1)\text{Ma}$ 的年龄限定了石英脉的形成时代,进而将主成矿时代约束为印支期。研究表明,北秦岭晚三叠世金成矿系统受统一深部过程控制,其空间展布受商丹断裂及其次级构造控制。红石什字、上官和银洞沟等矿床共同构成一条贯穿北秦岭的印支期造山型金成矿带,证实该期成矿作用在秦岭成矿带东段具有连续性与广泛性,并非局部孤立事件。

关键词:锆石U-Pb年代学;同位素地球化学;物质来源;成矿时代;红石什字金矿床;北秦岭成矿带

中图分类号:P618.51 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2026)03-0531-13 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.03.321
引用格式:张登峰,郭艳琴,葛战林,等.北秦岭红石什字金矿床成矿物质来源和成矿时代[J].黄金科学技术,2026,34(3):531-543. ZHANG Dengfeng, GUO Yanqin, GE Zhanlin, et al. Sources of Ore-forming Materials and Metallogenic Age of the Hongshishizi Gold Deposit in the Northern Qinling Mountains[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(3): 531-543.

北秦岭丰北河—杨斜成矿带位于北秦岭逆冲构造带内,大地构造单元划分归属于曹坪—杨斜金—钨—铜—铀—萤石成矿亚带(IV-66-3),是北秦岭成矿带的重要组成部分(葛战林等,2022;李维成等,2022)。区域构造演化呈现出多阶段特征,经历了从早古生代的洋盆俯冲、晚古生代的板块碰撞闭

合和晚三叠世的造山作用到晚侏罗—早白垩世向伸展构造的重要转换(Dong et al, 2016)。区内岩浆活动具有多期次、多类型特征,主要包括加里东期 $[(402.6\pm17.4)\sim(422\pm7)\text{Ma}]$ 镁铁质杂岩体(李曙光等,1993;刘军锋等,2009;Chang et al, 2021)、印支期(230~210 Ma)花岗岩复式岩基(胡健民等,2004;弓

收稿日期:2025-11-05;修订日期:2026-01-30

基金项目:自然资源综合调查指挥中心科技创新基金项目“北秦岭公家坪碲化物型金矿床Au-Ag-Te-W-(Bi)矿物共生关系及碲的富集机理研究”(编号:KC20240006)、陕西省自然科学青年项目“西秦岭金山金矿床脉岩成因与金成矿关系:年代学、地球化学及Sr-Nd-S同位素的约束”(编号:2025JC-YBQN-402)和中国地质调查局项目“昆仑阿尔金群让—约马克其及北山公婆泉地区1:5万矿产地质调查”(编号:DD202602110001)联合资助

作者简介:张登峰(1982—),男,河南上蔡人,高级工程师,从事矿产勘查及相关研究工作。E-mail:54521837@qq.com

***通信作者:**李航(1993—),男,陕西咸阳人,高级工程师,从事矿床学与矿床地球化学研究工作。E-mail:495750614@qq.com

段留安(1976—),男,河南长葛人,正高级工程师,从事矿产勘查和矿床地球化学研究工作。E-mail:liuanduan@163.com

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

虎军等,2009;Jiang et al,2010;刘春花等,2014;Hu et al,2016)和燕山期脉岩(葛战林等,2022)。丰富的构造—岩浆活动为成矿作用提供了有利条件,形成了金—银—钨—萤石成矿系统。区内矿床(点)沿丰北河—杨斜断裂南侧带状分布,受断裂与岩浆活动联合控制(葛战林等,2020)。

目前,关于该成矿带金多金属矿床的成矿时代存在印支期(如公家坪金矿)(葛战林等,2026)和燕山期成矿(如杨斜金矿)(葛战林等,2022;Li et al,2023)2种观点,且空间上呈对应关系。区域上金成矿作用的核心科学问题聚焦于,成矿物质来源、流体演化和成矿时代主要受控于印支期的碰撞造山过程,还是受控于燕山期的陆内伸展机制。西段公家坪矿床被视为印支期碰撞成矿的代表,东段杨斜矿床则具有燕山期伸展成矿的典型特征。因此,厘清这2类地球动力学背景在成矿系统中的相对贡献与内在联系,对构建统一的区域成矿模式至关重要。红石什字金矿床作为成矿带中部的典型代表,目前研究程度较低,其地质特征、矿物组合、地球化学性质、成矿时代及矿床成因等方面缺乏系统研究,制约了对区域成矿规律的整体认识。

成矿物质来源与成矿年代学证据是剖析矿床成因的核心依据,对揭示成因机理、总结分布规律、构建区域成矿模式及指导找矿预测具有重要意义(Zheng et al,2019;Groves et al,2020)。基于此,本研究以红石什字金矿床作为对象,通过矿床地质、矿物学、同位素地球化学及锆石U-Pb年代学的系统研究,查明其地质特征与成矿过程,进而总结区域金多金属成矿规律。

1 区域成矿背景

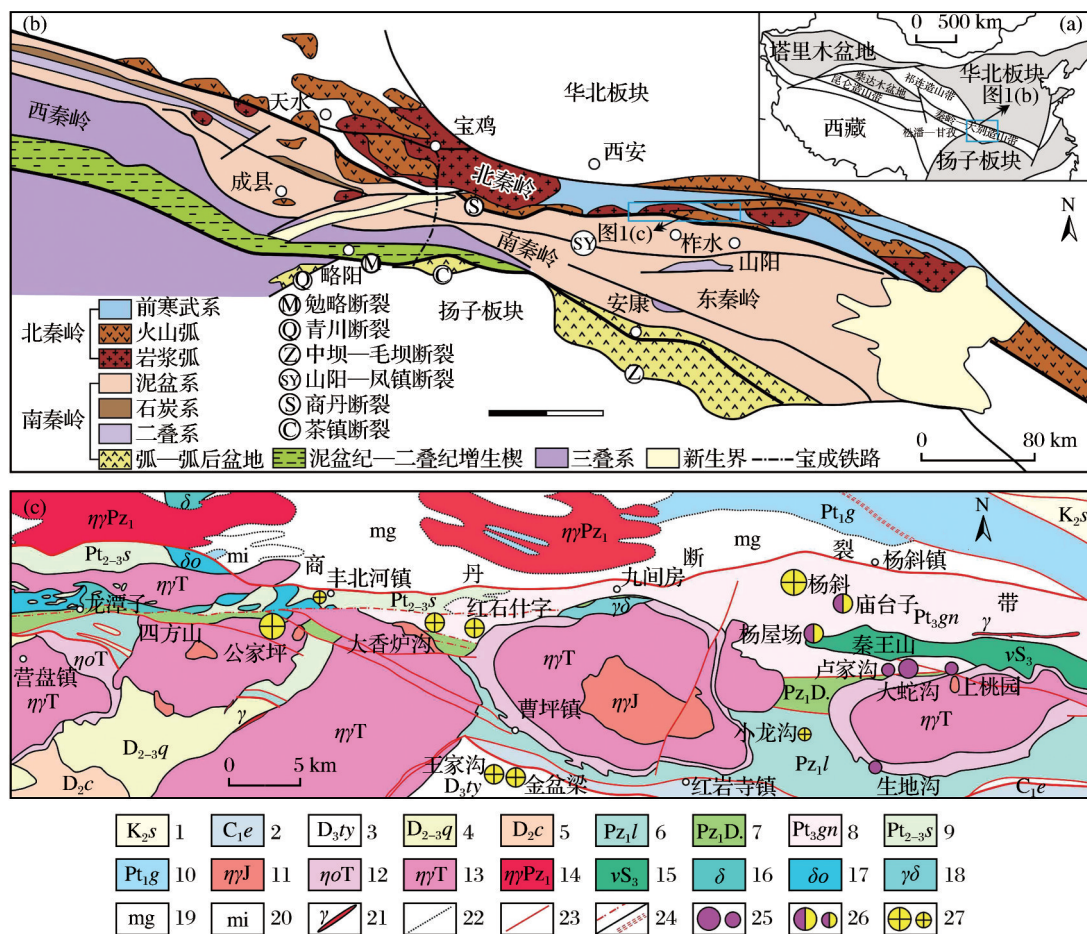
秦岭造山带是构成中国中部造山体系的关键组成部分[图1(a)]。其区域构造特征主要受洛南—栾川、商丹和勉略断裂带等3条大型断裂系统的支配。基于这些断裂的空间配置,该造山带自北向南展现出规律性的构造分异,依次划分为华北克拉通南缘构造带、北秦岭构造带、南秦岭构造带和扬子克拉通北缘构造带[图1(b)](Zhang et al,1995;Meng et al,2000;张逸鹏等,2024;杜建华等,2026)。以商丹主干断裂为界,北秦岭杨斜—丰北河地区北

侧隶属于北秦岭逆冲构造带,南侧广泛出露的商丹带地质体经历了绿片岩相到低角闪岩相的变质作用[图1(c)]。

研究区地层在空间上呈现出由北向南、从元古界至上古生界的依次展布格局:造山带北部零星分布有前寒武纪变质基底,主要由2套岩石单元构成:一套以片麻岩、变粒岩和浅粒岩为主体,经历强烈混合岩化作用的变质沉积组合;另一套为包含变基性火山岩与碎屑岩夹层的变质火山—沉积序列。进入早古生代,区域地层转为稳定的近EW向带状展布。其中,丹凤岩群是商丹蛇绿混杂岩带的主要组成单元,其原岩形成于古火山岛弧环境,后经历绿片岩相至低角闪岩相的变质改造,构成一套典型的变火山—沉积建造(刘凯等,2019)。罗汉寺组(Pz₁l)属于弧前盆地沉积环境的变质火山—碎屑岩系。区域南部局部可见泥盆—石炭系地层露头,该套地层为滨浅海相沉积成因,岩性组合为碎屑岩—碳酸盐岩。

研究区岩浆活动具有明确的空间格架和时代分期。南部印支期花岗岩带是区域上极具辨识度的构造—岩浆单元,沿EW向呈串珠状分布,主要有东江口、柞水、曹坪和沙河湾等岩体。北秦岭地区晚三叠世岩浆活动强烈,已发现的多处岩体同位素测年结果显示其形成时代集中于230~210 Ma。岩石地球化学分析表明,这些岩体主要为准铝质至过铝质的高钾钙碱性系列花岗岩,属于典型的I型(壳幔混合源)成因类型(弓虎军等,2009;Hu et al,2017)。针对岩体中闪长岩样品开展的锆石U-Pb同位素测年结果为(422±7)Ma(刘军锋等,2009),表明该闪长岩形成于晚志留世,结合区域地质背景分析,其成因与岛弧构造环境密切相关。

区内主要控矿构造为一近EW向展布的断裂系统,即丰北河—杨斜断裂(与区域商丹断裂为同一构造体系),延伸长度约为70 km。该断裂破碎带宽度变化较大,介于数十米至百余米之间,断面整体向北倾斜,倾角为50°~78°,具有多期次构造—岩浆—成矿活动特征。在该断裂带南侧已发现一系列石英脉型矿床(点),包括公家坪、杨斜、杨屋场和红石什字等,共计10余处,主要矿化类型为金、钨(葛战林等,2022),这些矿点呈串珠状分布于主干断裂及次级断裂系统中,构成了一条重要的成矿带



(a) 中央造山带核心区地质格架图; (b) 北秦岭地质简图 (据 Yan et al, 2006); (c) 杨斜—丰北河一带地质图 (据葛战林等, 2022); 1. 上白垩统山阳组; 2. 下石炭统二峪河组; 3. 上泥盆统桐峪组; 4. 中上泥盆统青石峡组; 5. 中泥盆统池沟组; 6. 下古生界罗汉寺组; 7. 下古生界丹凤岩群; 8. 新元古代杨斜片麻岩套; 9. 中新元古界松树沟组; 10. 古元古界郭庄岩组; 11. 侏罗纪二长花岗岩; 12. 三叠纪石英二长岩; 13. 三叠纪二长花岗岩; 14. 早古生代二长花岗岩; 15. 晚志留世辉长岩; 16. 闪长岩; 17. 石英闪长岩; 18. 花岗闪长岩; 19. 混合片麻岩; 20. 混合岩; 21. 花岗岩脉; 22. 岩相界线; 23. 断层; 24. 韧性断层/韧性剪切带; 25. 钨矿床及矿点; 26. 钨(金)矿床及矿点; 27. 金矿床及矿点

图 1 研究区地质图

Fig. 1 Geological map of the study area

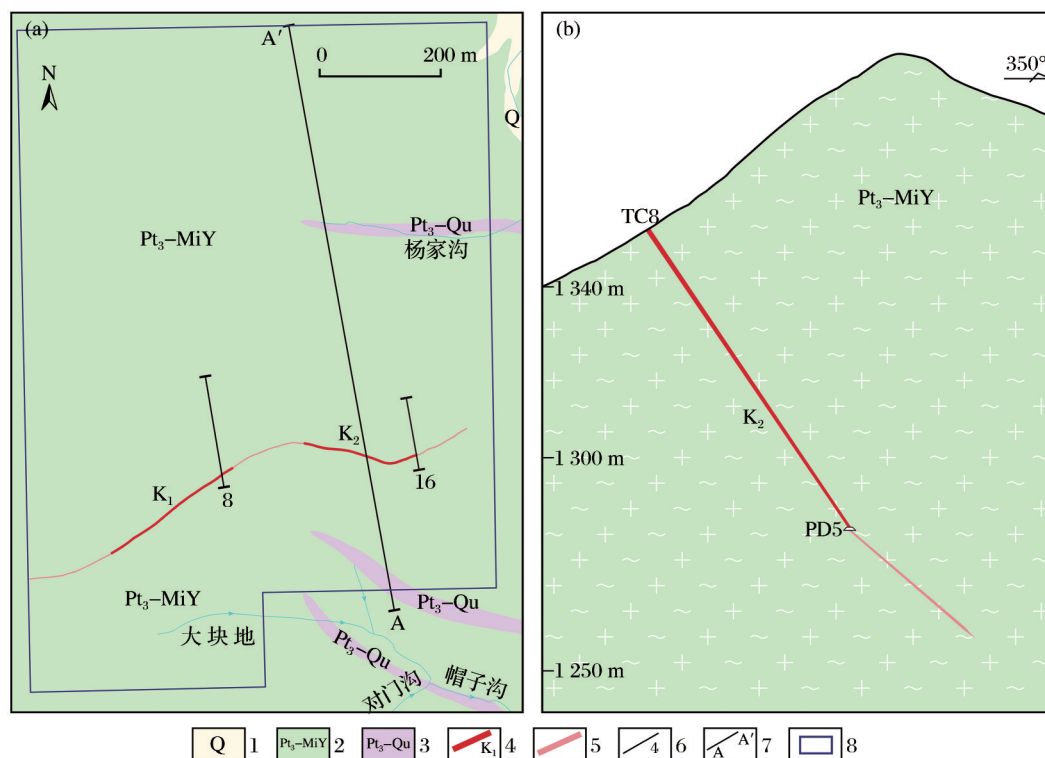
[图 1(c)]。

2 矿床地质特征

红石什字金矿床位于北秦岭丰北河—杨斜金钨萤石成矿带中部, 矿区地层简单, 主要出露新元古界杨斜片麻岩套的混合花岗岩和石英岩(图 2)。构造以向北缓倾的近 EW 向断裂为主。

矿区范围内共确定 2 条近 EW 向展布的金矿化带。矿体呈层状至似层状产出, 空间展布与区域地层产状基本一致, 总体倾向为 342°~358°, 倾角为 32°~45°。矿化赋存高程为 1 081~1 372 m, 走向延

伸长度为 184~335 m, 矿体厚度为 0.7~1.2 m, 控制最大斜深为 490 m, 金品位为 1.93×10^{-6} ~ 15.24×10^{-6} 。矿床的矿石类型以石英脉型为主。矿石矿物共生组合复杂, 金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、磁黄铁矿和方铅矿; 非金属矿物主要有石英、绢云母、绿泥石和方解石。矿石构造包括浸染状、细脉—网脉状、斑杂状和放射状等。在微观尺度上, 矿石主要呈现自形一半自形晶粒、交代残余、包含及受应力作用形成的碎裂结构。围岩蚀变主要包括钾长石化、硅化、黄铁矿化、绢云母化和绿泥石化。蚀变作用表现出一定的分带性, 但各蚀变带空间展布范



1.第四系;2.新元古代混合花岗岩;3.新元古代石英岩;4.金矿体及编号;5.蚀变带;6.勘探线及编号;7.A-A'剖面;8.详查区范围

(a)第16号勘探线地质剖面图;(b)矿床地质要素平面分布简图

图2 红石什字矿区地质构造与剖面解析图

Fig. 2 Geological structure and profile analysis map of the Hongshishizi mining area

围相对局限,具体分布特征如图3所示。

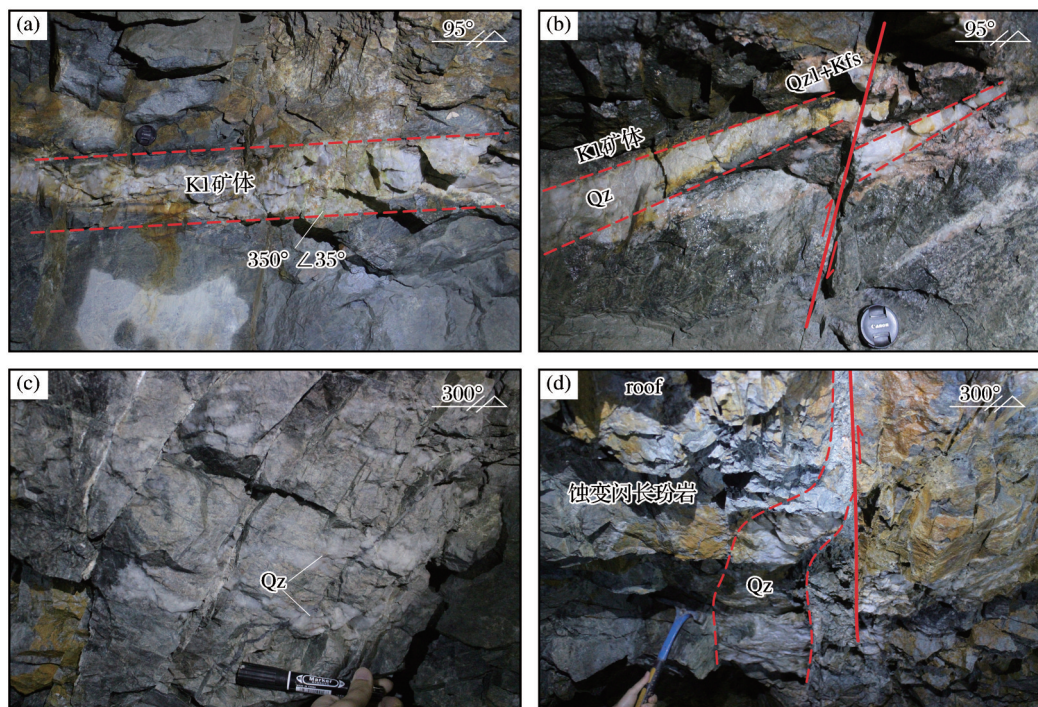
主矿体以石英脉型为主,向北缓倾产出于新元古界杨斜片麻岩套中,与围岩界限清晰。脉体产状相对稳定,脉宽为20~50 cm不等,局部具分支复合特征,见晚期逆断层、右行剪切断层破坏矿体。矿体两侧的围岩蚀变带虽然宽度有限,但蚀变强。蚀变分带呈现出以含金石英脉为中心的环带状分布特征,自内向外依次发育钾长石化、硅化、黄铁矿化、绢云母化以及绿泥石化与碳酸盐化组合带。在上述各类蚀变作用中,钾长石化、硅化和黄铁矿化与金矿化的成因关联最为紧密。此外,野外观察发现,含金石英脉常充填于蚀变闪长玢岩脉的裂隙之中,这一穿插关系表明,金成矿作用应晚于闪长玢岩的侵位时代。

根据矿物脉体的相互穿切关系及矿物共生组合特征(图4),将红石什字金矿床的热液成矿过程划分为4个阶段(图5)。I阶段(钾长石—石英阶段):该阶段形成了主要由浅肉红色钾长石与乳白

色石英组成的早期脉体,这些脉体多数分布于矿脉两侧或局部被后期含金石英脉穿切[图4(a)]。II阶段(灰白色石英—黄铁矿阶段):此阶段属于金的次要矿化期,以灰白色石英为主,其中偶见细粒黄铁矿(粒径为0.1~1.0 mm),该阶段产物常被晚期的石英—方解石脉切割[图4(b)]。III阶段(灰白—烟灰色石英—多金属硫化物阶段):此阶段为金的主要成矿期,石英呈灰白—烟灰色,粒度较粗,金属硫化物包括黄铁矿、黄铜矿、方铅矿及少量碲铋矿物,多呈细脉状或团斑状分布[图4(c)~4(e)],金主要赋存于黄铁矿中。IV阶段(石英—方解石阶段):作为最晚期的热液活动产物,该阶段以白色细脉状石英—方解石组合为特征,常沿裂隙充填或切穿早期形成的各类石英脉体[图4(f)~4(i)]。

3 样品采集及分析测试

在矿区平硐工程中采集测试样品共计4件,包括3件不同矿化阶段的矿石样品[采样位置见图2(a)、



(a) K1主矿体呈近EW向缓倾状产于杨斜片麻岩套中;(b)含金石英脉两侧钾长石化显著,且被后期断裂错断;(c)乳白色含金石英脉呈网状状产于围岩裂隙中;(d)含金石英脉切穿蚀变闪长玢岩脉,且受晚期右行剪切断裂破坏;Qz-石英;Kfs-钾长石

图3 红石什字金矿床矿体特征

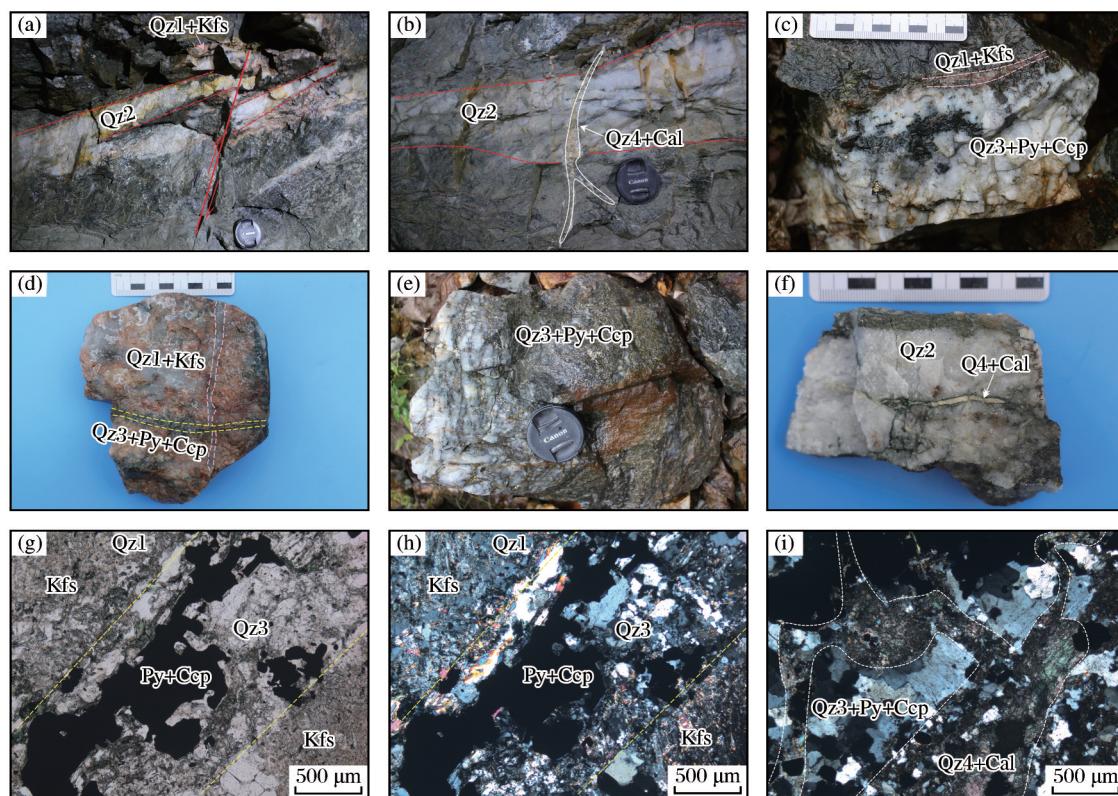
Fig. 3 Characteristics of orebodies in the Hongshishizi gold deposit

2(b)]和1件含金石英脉样品[采样位置见图4(d)]。样品采集避开风化蚀变强烈区域及后期构造破坏部位。在实验室处理阶段,首先对矿石样品进行镜下岩相观察与鉴定,精准圈定出Ⅲ阶段的黄铁矿矿物颗粒,用于后续原位S-Pb同位素测试。同时,从含金石英脉样品中挑选锆石颗粒用于开展LA-ICP-MS U-Pb年代学分析。

黄铁矿的S-Pb同位素测试工作在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。S同位素测定采用253 Plus型同位素质谱仪,测试过程以国际标准V-CDT为基准,分析结果精度优于 $\pm 0.2\%$;Pb同位素分析选用ThermoFisher Neptune Plus型多接收等离子质谱仪,重点测试 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 这3个比值参数,其测试精度控制在 $\pm 0.005\%$ 以内。为保障测试数据的可靠性与准确性,本次试验采用“标准—样品—标准”交叉校正法流程,并选取实验室长期标定的黄铁矿标样(Py-4)和方铅矿标样(CBI-3)进行质量监控。具体流程如下:每完成8个样品测试插入一对标样进行同步测定,实时校

正仪器误差,确保数据的稳定性和准确性。

锆石U-Pb同位素年龄测定试验在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,测试方法为激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)技术。实验系统由Newwave UP 213激光剥蚀装置和Finnigan Neptune型多接收电感耦合等离子体质谱仪联机构成。激光剥蚀参数设置如下:束斑直径为 $30\text{ }\mu\text{m}$,能量密度为 $4\sim 5\text{ J}/\text{cm}^2$,重复频率为 5 Hz ,载气为高纯氦气,以降低气溶胶扩散效应。信号采集采用离子计数器与法拉第杯组合模式,其中 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{204}Pb (含 ^{204}Hg)和 ^{202}Hg 由离子计数器接收, ^{208}Pb 、 ^{232}Th 和 ^{238}U 则由法拉第杯同时测量,从而实现不同质量区间同位素的高效同步采集,并获得稳定的信号平台。针对结晶均匀的锆石颗粒, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 比值的分析精度(2σ)约为 2% ;对国际锆石标准物质(如GJ-1)的年龄测定精度和准确度优于 1% (2σ),满足高分辨率年代学研究需求。分析采用单点剥蚀模式,仪器调试阶段使用GJ-1标样进行条件优化。正式分析过



(a)灰白色石英(Qz2)脉切穿钾长石—石英(Qz1)细脉;(b)石英(Qz4)—方解石细脉切穿灰白色石英(Qz2)脉;(c)灰白—烟灰色石英(Qz3)—多金属硫化物脉与钾长石—石英(Qz1)细脉;(d)石英(Qz3)—多金属硫化物细脉切穿钾长石—石英(Qz1)脉;(e)烟灰色石英(Qz3)—多金属硫化物脉特征;(f)晚期石英(Qz4)—方解石细脉充填于早期灰白色石英(Qz2)脉内;(g)、(h)含多金属硫化物的石英脉穿切早期钾长石—石英脉;(i)石英—方解石脉切割石英—多金属硫化物脉;Py—黄铁矿;Cep—黄铜矿;Kfs—钾长石;Qz—石英;Cal—方解石

图4 红石什字金矿床岩相学特征

Fig. 4 Petrographic characteristics of the Hongshishizi gold deposit

矿物名称	热液成矿期			
	钾长石—石英 (阶段 I)	金—石英—黄铁矿 (阶段 II)	金—石英—多硫化物 (阶段 III)	石英—方解石 (阶段 IV)
钾长石	——			
石英		——	——	——
黄铁矿		——	——	
黄铜矿		——	——	
方铅矿			——	
方解石				——

图5 红石什字金矿床成矿期次与成矿阶段划分图

Fig. 5 Division diagram of metallogenic episodes and stages in the Hongshishizi gold deposit

程中,分别以 GJ-1 和 Plesovice (PLV) 作为 U-Pb 同位素分馏校正标样,以 M12 锆石作为 U、Th 含量标定外标。为保障数据和可靠性,每分析 10 个样品点后重复测定 2 次 GJ-1 并穿插测定一个 PLV 样品点,以监控仪器稳定性和数据重现性。原始数据经

Iolite 软件进行背景扣除与同位素比值计算。最终年龄数据以 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄及谐和图形式呈现,单点年龄误差标注为 1σ ,谐和图的绘制与年龄计算均采用 Isoplot R 4.2 程序完成 (Vermeesch, 2018),测试结果见表 1。

4 测试结果与讨论

4.1 硫化物 S-Pb 同位素测试

对主成矿期矿石样品中 5 件黄铁矿样品进行 $\delta^{34}\text{S}$ 测定,结果为 $-0.08\text{‰} \sim -2.88\text{‰}$ (表 2,图 6)。该同位素组成范围与深源地幔硫及岩浆硫体系特征吻合,表明成矿物质中的硫可能主要来源于深部岩浆系统或地幔源区。

所测试的 5 件黄铁矿样品中, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $17.829 \sim 18.034$ (平均值为 17.896), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为

表1 红石什字金矿床含金石英脉锆石 U-Pb 同位素组成和年龄结果

Table 1 U-Pb isotopic composition and age results of zircons from gold-bearing quartz veins in the Hongshishizi gold deposit

样品编号	Th/(× 10 ⁻⁶)	U(× 10 ⁻⁶)	Th /U	²⁰⁷ Pb / ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb / ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb / ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb / ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U	1σ
143HSZ47	387.98	639.92	0.61	0.05557	0.0016	0.27208	0.00747	0.03553	0.00035	434.7	62.64	244.4	5.97	225	2.20
084HSZ05	474.69	757.46	0.63	0.05078	0.00166	0.24864	0.00779	0.03553	0.00037	230.7	73.68	225.5	6.34	225.1	2.29
097HSZ14	449.11	677.41	0.66	0.05144	0.00229	0.25230	0.01091	0.03559	0.00043	260.8	99.2	228.4	8.84	225.4	2.70
085HSZ06	432.91	612.33	0.71	0.05228	0.00151	0.25657	0.0071	0.03561	0.00035	297.6	64.66	231.9	5.74	225.6	2.18
116HSZ27	559.54	789.62	0.71	0.05124	0.00187	0.25157	0.00883	0.03562	0.00039	251.7	81.62	227.8	7.16	225.6	2.41
092HSZ10	814.59	1 142.68	0.71	0.05454	0.00256	0.26804	0.01219	0.03566	0.00046	393.3	101.47	241.1	9.76	225.9	2.85
144HSZ48	693.02	934.25	0.74	0.05781	0.00174	0.53150	0.01526	0.06671	0.00069	522.3	64.77	432.8	10.11	416.3	4.15
140HSZ44	717.40	660.95	1.09	0.05543	0.00149	0.51085	0.01306	0.06686	0.00065	429.5	58.48	419.0	8.78	417.2	3.94
083HSZ04	534.59	130.55	5.34	0.05633	0.00155	0.51906	0.01355	0.06687	0.00066	464.5	60.18	424.5	9.06	417.3	3.98
145HSZ49	597.96	821.68	0.73	0.05604	0.00115	0.51655	0.00985	0.06688	0.0006	453.5	44.67	422.8	6.6	417.3	3.61
127HSZ35	1 046.59	1 162.9	0.90	0.05633	0.00124	0.51933	0.01069	0.0669	0.00061	464.5	48.39	424.7	7.14	417.4	3.69
123HSZ31	938.04	834.23	1.12	0.05574	0.00129	0.51407	0.01118	0.06692	0.00062	441.6	50.34	421.2	7.50	417.6	3.74
131HSZ38	579.39	688.46	0.84	0.05682	0.00172	0.52424	0.01517	0.06695	0.00069	483.8	66.14	428.0	10.11	417.7	4.16
109HSZ21	382.19	834.23	1.12	0.05732	0.00142	0.53072	0.01243	0.06719	0.00064	503.4	54.09	432.3	8.24	419.2	3.86
133HSZ40	518.53	675.77	0.77	0.05578	0.00138	0.52270	0.01221	0.06799	0.00064	443.1	53.79	427.0	8.14	424.1	3.88

表2 红石什字金矿床黄铁矿 S-Pb 同位素组成

Table 2 S-Pb isotopic composition of pyrite in the Hongshishizi gold deposit

序号	样品编号	δ ³⁴ S/‰	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Δα	Δβ	Δγ
1	HSSZ-S-Pb1	-2.9	38.196	15.628	17.854	75.690	22.240	45.710
2	HSSZ-S-Pb2	-2.4	38.173	15.628	17.829	75.610	22.30	45.860
3	HSSZ-S-Pb3	-2.2	38.338	15.634	17.978	76.310	22.100	45.940
4	HSSZ-S-Pb4	-0.7	38.246	15.634	17.904	76.200	22.430	45.770
5	HSSZ-S-Pb5	-0.1	38.266	15.631	17.914	75.940	22.140	45.840

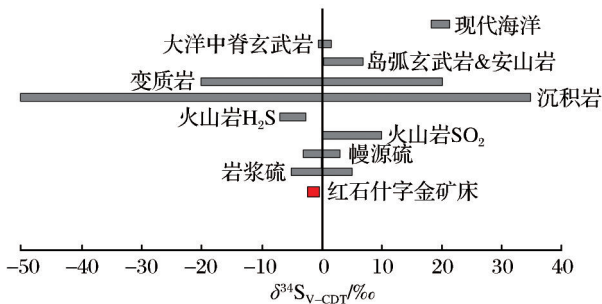


图6 红石什字金矿床 δ³⁴S_{V-CDT} 图解(底图据 Hoefs, 1980)
Fig. 6 δ³⁴S_{V-CDT} diagram of the Hongshishizi gold deposit
(base map according to Hoefs, 1980)

15.628~15.751(平均值为 15.631), ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 比值为 38.173~38.338(平均值为 38.244)(表1)。在 Pb 同位素判别图解[图 7(a)]中,所有样品主要落在上地壳附近或上地壳与造山带之间,反映红石什字金矿

床成矿主要与造山期成矿物质的活化改造有关;在 Pb 同位素 Δγ-Δβ 成因判别图解[图 7(b)]上主要落入上地壳及上地壳与上地幔混合的俯冲带铅附近。综上所述,红石什字金矿床 S-Pb 同位素显示成矿流体具有造山带壳源特征,并有少量幔源混入。

4.2 锆石 U-Pb 定年

含金石英脉中锆石阴极发光图像显示,锆石晶体形态以自形一半自形为主,主要表现为短柱状与长柱状 2 种晶型(图 8)。其中,短柱状锆石内部结构均匀,发育清晰的振荡生长环带(图 8),指示其岩浆成因特征(Koschek, 1993;李长民, 2009);长柱状锆石颗粒相比短柱状锆石环带宽度较宽、连续性较差,并存在一定的暗色增生边或补丁状结构(图 8)。此外,其 U 和 Th 含量明显低于短柱状锆石,Th/U 比

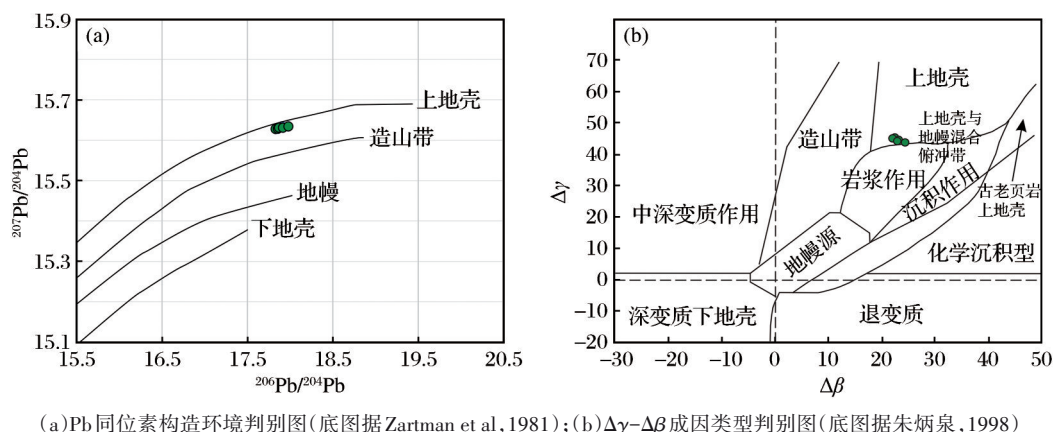


图7 红石什字金矿床硫化物 Pb 同位素组成及物源判别图解

Fig. 7 Lead isotope composition of sulfides and source discrimination diagrams of the Hongshishizi gold deposit

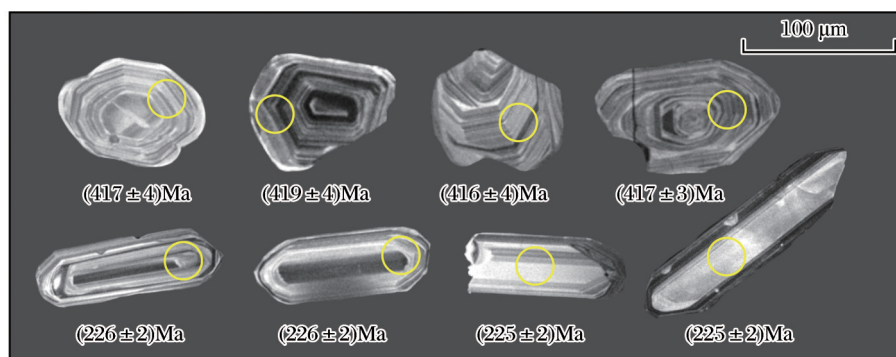


图8 含金石英脉中典型锆石阴极发光显微结构图

Fig. 8 Cathodoluminescence (CL) microstructure map of typical zircons in gold-bearing quartz veins

值普遍小于0.8(长柱状平均值为0.68,短柱状平均值为1.49)(表3),且具有总稀土及轻稀土含量高、稀土配分模式平坦的特征[图9(a)],总体具有水-岩反应强烈、相对低温环境下快速生长的特征,与石英脉形成密切相关(吴元保等,2004;Zhao et al, 2016)。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,红石什字金矿床含金石英脉中15个锆石有效测试点中,根据锆石的形态不同具有明显的2组年龄特征[图9(b)]。其中,短柱状锆石9个测试点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 获得 $(419 \pm 1)\text{Ma}$ ($MSWD=0.63$) 的谐和年龄以及 $(418 \pm 1)\text{Ma}$ ($MSWD=0.36$) 的加权平均年龄[图9(c)],二者均在误差范围之内,与矿区闪长玢岩脉形成时代基本一致(未发表数据);长柱状锆石6个测试点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄主要集中在225 Ma[图9(d)],在谐和图中获得 $(225 \pm 1)\text{Ma}$ ($MSWD=0.05$) 的交点年龄以及 $(225.4 \pm 1)\text{Ma}$ ($MSWD=0.017$) 的加权平均年龄,二者均在误差范围之内。因此,本文认为含金石英脉

中年龄为419 Ma的岩浆锆石可能为与闪长玢岩相关或同期岩浆活动形成的锆石,225 Ma的锆石年代则代表金成矿时代。

4.3 成矿规律

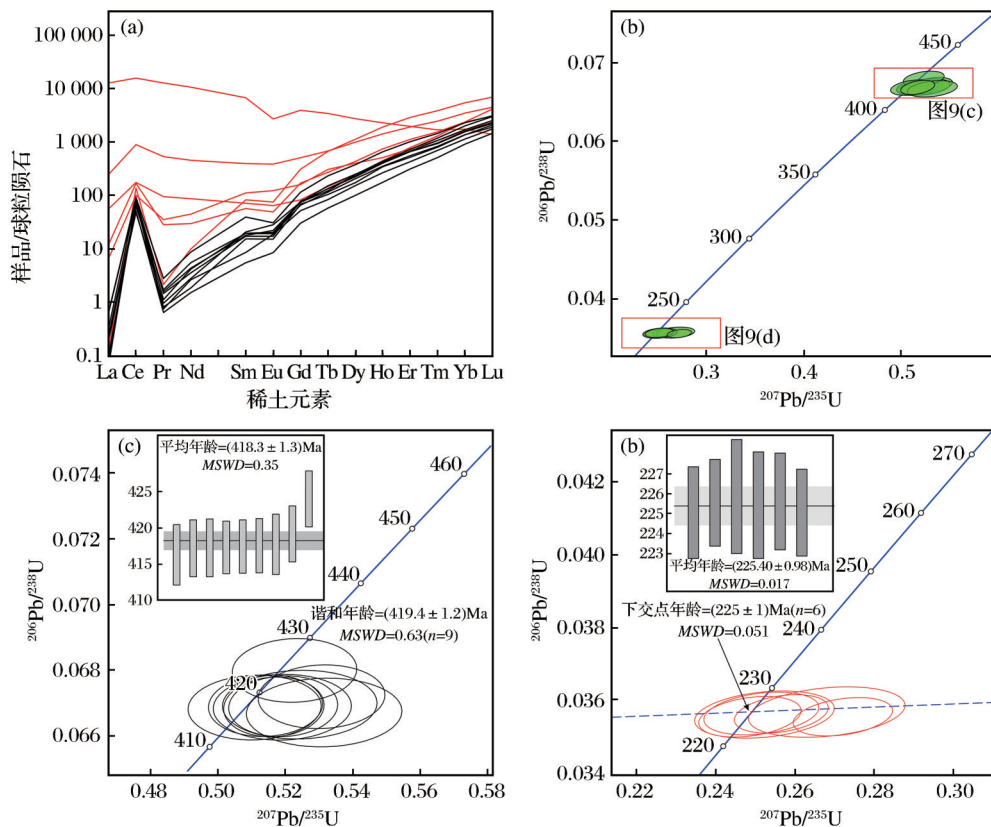
华北板块与扬子板块在晚三叠世发生的陆陆碰撞及后续的构造转换是控制北秦岭金成矿的关键地质事件(张国伟等,2019)。本次研究的红石什字金矿床(约225 Ma)在空间上填补了丰北河—杨斜成矿带中部空白,与邻区上宫金矿(236.5~227.7 Ma)(唐克非,2014)和银洞沟金矿(231±2)Ma(朱峰等,2017)等共同构成了一个贯穿北秦岭的晚三叠世造山型金矿成矿系统(表4)。这一系统在成因上均与板块俯冲—碰撞过程中的壳—幔相互作用及碰撞后地壳伸展背景下的流体活动密切相关(Groves et al, 2020)。

综合矿床地质特征与区域构造背景,本文认为红石什字金矿床属于形成于晚三叠世的后碰撞造

表3 红石什字金矿床含金石英脉锆石微量元素组成

Table 3 Trace elements composition of zircon from gold-bearing quartz veins in the Hongshisizi gold deposit ($\times 10^{-6}$)

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
143HSZ47	0.03	80.45	0.20	4.57	12.17	4.20	60.43	23.48	267.79	100.52	442.93	91.20	850.14	161.13	3 355.97
084HSZ05	1.54	59.16	3.25	20.14	16.37	6.81	31.43	10.87	96.09	27.28	115.86	25.69	262.96	55.58	861.08
097HSZ14	2.81	97.98	2.62	13.48	8.40	2.75	33.34	9.65	104.06	39.81	173.93	36.88	373.50	71.20	1 260.74
085HSZ06	12.81	101.94	8.66	39.04	10.53	3.61	16.35	5.28	58.51	23.99	122.37	30.94	376.07	97.38	913.13
116HSZ27	55.66	513.08	47.84	200.67	57.03	21.17	98.58	23.87	236.92	75.02	293.86	58.22	547.12	104.88	2 372.44
092HSZ10	2 754.76	8 776.81	1 102.70	4 547.20	947.93	145.70	743.95	118.6	644.53	120.21	302.02	40.06	275.45	32.89	3 430.08
144HSZ48	0.02	42.74	0.07	1.23	1.29	1.06	10.28	3.00	37.09	14.35	67.12	16.76	181.15	41.67	524.12
140HSZ44	0.16	53.93	0.26	4.02	5.83	1.73	22.60	8.26	90.51	35.03	157.75	34.63	363.70	73.05	1 158.83
083HSZ04	0.05	30.50	0.06	0.71	0.83	0.49	6.04	2.09	24.43	9.52	49.03	12.38	145.92	34.55	361.94
145HSZ49	0.02	45.43	0.11	1.93	2.92	1.15	14.58	4.79	55.88	22.81	105.50	25.57	270.21	59.64	790.11
127HSZ35	0.02	50.00	0.08	0.87	2.30	0.86	13.51	3.73	42.16	18.57	81.28	19.19	217.58	49.20	614.50
123HSZ31	0.06	28.28	0.09	1.30	3.09	1.60	14.80	4.35	59.74	23.41	113.09	28.37	317.17	70.48	813.54
131HSZ38	0.08	49.59	0.15	2.02	2.66	1.25	15.01	5.40	60.27	22.49	103.62	23.03	254.81	54.62	732.23
109HSZ21	0.06	36.30	0.16	2.55	2.89	1.09	12.99	4.14	49.79	18.92	86.71	19.90	217.71	44.98	622.81
133HSZ40	0.15	50.84	0.14	1.65	2.58	0.97	15.50	4.74	54.09	21.56	102.79	22.53	247.00	52.63	691.86



(a) 稀土元素配分模式图; (b~d) U-Pb 谐和图及加权平均年龄

图9 含金石英脉锆石年代学与地球化学分析图解

Fig. 9 Zircon geochronology and geochemical analysis diagrams of the gold-bearing quartz veins

山型金矿。其成因模型如下:在印支期主碰撞造山
 向后碰撞伸展转换的构造背景下,深部过程引发的

流体循环萃取了下地壳及地幔来源的成矿物质;这
 些富含 Au 的壳幔混合流体沿区域性断裂向上运

表4 丰北河—杨斜成矿带及邻区典型金矿床对比

Table 4 Comparison of typical gold deposits in the Fengbeihe—Yangxie metallogenic belt and adjacent areas

矿床特征	公家坪金矿(西段代表)	杨斜金矿(东段代表)	上宫金矿(华北陆块南缘)	银洞沟金矿(南秦岭武当地块)	红石什字金矿(中段研究区)
大地构造位置	曹坪—杨斜 Au-W-Cu-U-萤石成矿亚带	曹坪—杨斜 Au-W-Cu-U-萤石成矿亚带	熊耳山 Au-Mo 多金属矿集区	武当隆起 Ag-Au-Pb-Zn 成矿带	曹坪—杨斜 Au-W-Cu-U-萤石成矿亚带
区域构造背景	印支期板块碰撞—造山作用	燕山期陆内伸展机制	印支期华北与扬子板块碰撞造山作用	印支期扬子与华北板块碰撞造山作用	印支期扬子与华北板块碰撞造山作用
主要控矿构造	受丰北河—杨斜断裂及其次级断裂系统控制	受丰北河—杨斜断裂及其次级断裂系统控制,与岩脉关系密切	区域性 NE、NW 向断裂及其交会部位	NWW 向层间剪切破碎带及断裂构造	推测受区域主干断裂及次级构造联合控制
相关岩浆活动	邻近印支期花岗岩基(胡健民等,2004;弓虎军等,2009)	矿区发育燕山期石英闪长玢岩脉[(149.5±2.7)Ma](葛战林等,2022)	与晚太古代太华群基底和中元古代熊耳群火山岩关系密切;矿区及外围可能有印支期岩浆活动	与武当群变火山—沉积岩系关系密切;可能有同碰撞期岩浆热液活动	地表无岩体出露,推测与邻近印支期花岗岩基相关
主要矿化类型	石英脉型、构造蚀变岩型金矿化	石英脉型金矿化,与中酸性脉岩时空关系密切	构造蚀变岩型(主)和石英脉型金矿化	似层状、脉状金银矿化,具层控—构造复合特征	石英脉型金矿化
关键金属组合	以 Au 为主	以 Au 为主	以 Au 为主,伴生 Ag、Pb、Zn	以 Ag、Au 为主,伴生 Pb、Zn、Cu	以 Au 为主
成矿时代	印支期(210~230 Ma)(葛战林等,2026)	燕山期(150 Ma)(葛战林等,2022;Li et al,2023)	印支期(236.5~227.7 Ma)(唐克非,2014)	印支期[(231±2)Ma](朱峰等,2017)	印支期[(225±1)Ma](本次研究)
主导成矿动力学	碰撞造山成矿模型:与印支期板块碰撞导致的深部流体活动、剪切变形有关	陆内伸展成矿模型:与燕山期岩石圈伸展背景下岩浆—热液活动有关	碰撞造山期,远距离构造—热液驱动成矿	碰撞造山期,区域变质/岩浆热液在有利层位和构造中成矿	板块俯冲—碰撞过程中的壳—幔相互作用及碰撞后地壳伸展背景下的流体活动

移,最终在物理化学条件改变的浅部构造扩容带中沉淀成矿。同时,红石什字金矿成矿时代的厘定,也为印支晚期成矿事件在北秦岭成矿带自东向西的连续性存在提供了证据。

5 结论

(1)红石什字金矿床的成矿作用主要集中于灰白色石英—黄铁矿阶段和灰白—烟灰色石英—多金属硫化物阶段。

(2)综合 S 同位素、Pb 同位素和锆石 U-Pb 年代学分析结果,认为红石什字金矿床的成矿物质以下地壳和地幔为主,并混入少量上地壳物质。矿床形成于晚三叠世(约 220 Ma)华北板块与扬子板块碰撞后伸展构造背景。

(3)北秦岭晚三叠世金成矿系统具有统一的深部过程和一致的构造控矿规律。红石什字、上宫和

银洞沟等矿床在成因上均与碰撞后壳—幔相互作用及深部流体活动密切相关,其空间分布严格受商丹断裂带及其次级构造系统控制,共同构成了一条贯穿北秦岭的印支期造山型金矿成矿带。

参考文献(References):

- Chang H, Wu Y B, Zhou G Y, et al, 2021. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Lajimiao mafic complex in the Shangdan Suture Zone, Qinling orogen: petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*, 390: 106113.
- 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.
- Groves D I, Santosh M, Deng J, et al, 2020. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration[J]. *Mineralium Deposita*, 55(2): 275-292.
- Hoefs M C, 1980. *Stable Isotope Geochemistry*. 2nd edition. 208

- pp., 52 figs, 23 tables. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag. ISBN 3 540 09917 4[J]. Geological Magazine, 118(2): 214-215.
- Hu F Y, Liu S W, Ducea M N, et al, 2017. The geochemical evolution of the granitoid rocks in the South Qinling Belt: insights from the Dongjiangkou and Zhashui intrusions, Central China[J]. Lithos, 278: 195-214.
- Hu F Y, Liu S W, Zhang W Y, et al, 2016. A westward propagating slab tear model for Late Triassic Qinling Orogenic Belt geodynamic evolution: insights from the petrogenesis of the Caoping and Shahewan intrusions, Central China[J]. Lithos, 262: 486-506.
- Jiang Y H, Jin G D, Liao S Y, et al, 2010. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Late Triassic granitoids from the Qinling orogen, Central China: implications for a continental arc to continent-continent collision[J]. Lithos, 117(1/2/3/4): 183-197.
- Koschek G, 1993. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon[J]. Journal of Microscopy, 171(3): 223-232.
- Li J Z, Liu J J, de Fourestier J, et al, 2023. Wolframite geochronology and scheelite geochemistry of the Yangwuchang W-Au deposit and Dashegou W deposit in the Yangxie ore district, the North Qinling, China: implications for W-Au mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 155: 105359.
- Meng Q R, Zhang G W, 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, Central China[J]. Tectonophysics, 323(3/4): 183-196.
- Vermesch P, 2018. IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology[J]. Geoscience Frontiers, 9(5): 1479-1493.
- Yan Z, Wang Z Q, Yan Q R, et al, 2006. Devonian sedimentary environments and provenance of the Qinling Orogen: constraints on Late Paleozoic southward accretionary tectonics of the North China Craton[J]. International Geology Review, 48(7): 585-618.
- Zartman R E, Doe B R, 1981. Plumbotectonics: the model[J]. Tectonophysics, 75(1/2): 135-162.
- Zhang G W, Meng Q W, Lai S C, 1995. Structural structure of Qinling orogenic belt[J]. Science in China Series B-Chemistry, Life Sciences & Earth Sciences, 38(11): 1379-1394.
- Zhao S R, Yu X H, Li J W, et al, 2023. Early Mesozoic orogenic gold mineralization in the North Qinling Terrane: insights from rutile U-Pb, mica and K-feldspar $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, and H-O-S-Pb isotopes of the Yangxie gold deposit[J]. Ore Geology Reviews, 159: 105539.
- Zhao Y J, Wu Y B, Liu X C, et al, 2016. Distinct zircon U-Pb and O-Hf-Nd-Sr isotopic behaviour during fluid flow in UHP metamorphic rocks: evidence from metamorphic veins and their host eclogite in the Sulu Orogen, China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 34(4): 343-362.
- Zheng Y F, Mao J, Chen Y, et al, 2019. Hydrothermal ore deposits in collisional orogens[J]. Science Bulletin, 64(3): 205-212.
- 杜建华, 朱德鹏, 何虎军, 等, 2026. 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, 34(1): 20-39.
- Du Jianhua, Zhu Depeng, He Hujun, et al, 2026. Geochemical characteristics, zircon U-Pb ages and geological significance of the Miaogou gold deposit in the Fengxian, Shaanxi Province[J]. Gold Science and Technology, 34(1): 20-39.
- 葛战林, 高永宝, 章永梅, 等, 2026. 北秦岭公家坪金矿床 Au-Ag-Te-(Bi) 矿物的发现及其地质意义[J]. 地学前缘, 33(2): 105-126.
- Ge Zhanlin, Gao Yongbao, Zhang Yongmei, et al, 2026. Discovery and geological significance of Au-Ag-Te-(Bi) minerals in the Gongjiaping gold deposit in the North Qinling terrane[J]. Earth Science Frontiers, 33(2): 105-126.
- 葛战林, 高永宝, 郑艳荣, 等, 2022. 东秦岭杨斜金矿区石英闪长玢岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 42(4): 598-612.
- Ge Zhanlin, Gao Yongbao, Zheng Yanrong, et al, 2022. Zircon U-Pb isotopic geochronology, geochemistry and geological significance of the quartz diorite porphyrite in Yangxie gold ore district, East Qinling[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(4): 598-612.
- 葛战林, 郑艳荣, 郝迪, 等, 2020. 东秦岭杨斜-丰北河成矿带杨屋场钨(金)矿床地质特征及成因探讨[J]. 西北地质, 53(3): 140-152.
- Ge Zhanlin, Zheng Yanrong, Hao Di, et al, 2020. On the geological characteristics and genesis of Yangwuchang tungsten (gold) deposit in the Yangxie-Fengbeihe metallogenetic belt, east Qinling[J]. Northwestern Geology, 53(3): 140-152.
- 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 等, 2009. 南秦岭地体东江口花岗岩及其基性包体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 25(11): 3029-3042.
- Gong Hujun, Zhu Lai-min, Sun Boya, et al, 2009. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the Dongjiangkou granitic pluton and its mafic enclaves in the South Qinling terrain[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(11): 3029-3042.
- 胡健民, 崔建堂, 孟庆任, 等, 2004. 秦岭柞水岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 50(3): 323-329.
- Hu Ji-

- anmin, Cui Jiantang, Meng Qingren, et al, 2004. The U-Pb age of zircons separated from the Zhashui granite in Qinling Orogen and its significance [J]. Geological Review, 50 (3): 323-329.
- 李曙光, 陈移之, 张宗清, 等, 1993. 北秦岭拉圾庙苏长辉长岩的痕量元素和 Sr, Nd 同位素地球化学 [J]. 地质学报, 67(4): 310-322. Li Shuguang, Chen Yizhi, Zhang Zongqing, et al, 1993. Trace elements and Sr, Nd isotopic geochemistry of the Lajimiao noritegabbro from the north Qinling belt [J]. Acta Geological Sinica, 67(4): 310-322.
- 李维成, 董王仓, 朱雪丽, 等, 2022. 陕西主要成矿单元矿产特征及成矿时空域 [J]. 矿床地质, 41(5): 1009-1024. Li Weicheng, Dong Wangcang, Zhu Xueli, et al, 2022. Mineral characteristics and ore-forming spatiotemporal domain of main metallogenic units in Shaanxi Province [J]. Mineral Deposits, 41(5): 1009-1024.
- 李长民, 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述 [J]. 地质调查与研究, 32(3): 161-174. Li Changmin, 2009. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of zircons [J]. Geological Survey and Research, 32(3): 161-174.
- 刘春花, 吴才来, 郜源红, 等, 2014. 南秦岭东江口、柞水和梨园堂花岗岩类锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学与锆石 Lu-Hf 同位素组成 [J]. 岩石学报, 30(8): 2402-2420. Liu Chunhua, Wu Cailai, Gao Yuanhong, et al, 2014. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Lu-Hf isotopic system of Dongjiangkou, Zhashui, and Liyuantang granitoid intrusions, South Qinling belt, Central China [J]. Acta Petrologica Sinica, 30(8): 2402-2420.
- 刘军锋, 孙勇, 孙卫东, 2009. 秦岭拉鸡庙镁铁质岩体锆石 LA-ICP-MS 年代学研究 [J]. 岩石学报, 25(2): 320-330. Liu Junfeng, Sun Yong, Sun Weidong, 2009. LA-ICP-MS zircon dating from the Lajimiao mafic complex in the Qinling orogenic belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 25(2): 320-330.
- 刘凯, 王瑞廷, 樊忠平, 等, 2019. 秦岭造山带柞水—山阳矿集区夏家店金矿床成矿时代及其地质意义 [J]. 矿床地质, 38(6): 1278-1296. Liu Kai, Wang Ruiting, Fan Zhongping, et al, 2019. Metallogenic age of Xiajiadian gold deposit in the Zhashui-Shanyang ore concentration, Qinling orogenic belt and its geological significance [J]. Mineral Deposits, 38(6): 1278-1296.
- 唐克非, 2014. 华北克拉通南缘熊耳山地区金矿床时空演化、矿床成因及成矿构造背景 [D]. 武汉: 中国地质大学. Tang Kefei, 2014. Characteristics, genesis, and geodynamic setting of representative gold deposits in the Xiong'er shan district, southern margin of the North China Craton [D]. Wuhan: China University of Geosciences.
- 吴元保, 郑永飞, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. 科学通报, 49(16): 1589-1604. Wu Yuanbao, Zheng Yongfei, 2004. Genetic mineralogy of zircon and its constraints on U-Pb age interpretation [J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1589-1604.
- 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.
- 朱炳泉, 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化 [M]. 北京: 科学出版社. Zhu Bingquan, 1998. Theory and application of isotope system in earth science: also on the evolution of crust and mantle in Chinese mainland [M]. Beijing: Science Press.
- 朱峰, 李文博, 胡传胜, 2017. 南秦岭银洞沟银金矿床矿相学与成矿时代 [J]. 矿物学报, 37(4): 386-394. Zhu Feng, Li Wenbo, Hu Chuansheng, 2017. Mineragraphy and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Yindonggou Ag-Au deposit, south Qinling Mountains, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 37(4): 386-394.

Sources of Ore-forming Materials and Metallogenic Age of the Hongshishizi Gold Deposit in the Northern Qinling Mountains

ZHANG Dengfeng^{1,2,3}, GUO Yanqin¹, GE Zhanlin^{2,3}, XUE Zhongkai^{2,3}, LI Hang^{2,3}, DUAN Liu'an⁴

1. Xi'an Shiyou University, Xi'an 710100, Shaanxi, China;

2. Xi'an Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China;

3. Technology Innovation Center for Gold Mine Exploration, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China;

4. Yantai Geological Survey Center of Coastal Zone, China Geological Survey, Yantai 264004, Shandong, China

Abstract: The Fengbeihe-Yangxie metallogenic belt, situated in the Northern Qinling region, represents a prominent area of gold and polymetallic ore concentration within the Qinling Orogenic Belt. The precise metallogenic epoch of the typical gold deposits in this area has been a subject of considerable debate, with prevailing theories supporting either the Indosinian or Yanshanian periods. This study specifically examines the Hongshishizi gold deposit, located centrally within the belt. By employing comprehensive methodologies, including deposit geology, isotopic geochemistry, and zircon U-Pb geochronology, this research aims to elucidate the metallogenic epoch, material sources, and genetic mechanisms of the deposit. The findings reveal that the mineralization process of the Hongshishizi gold deposit can be categorized into four distinct hydrothermal stages, with the primary metallogenic phase identified as the grayish-white quartz-pyrite stage (Stage III). The sulfur isotope composition ($\delta^{34}\text{S}$ values ranging from -2.88‰ to -0.08‰) and lead isotope signatures ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.173\sim38.338$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.628\sim15.634$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.829\sim17.978$) of pyrite from the main ore stage collectively suggest that the ore-forming materials originated from a mixed crustal and mantle source, consistent with the characteristics of orogenic gold deposits. Zircon U-Pb dating of gold-bearing quartz veins reveals two age categories: (418 ± 1) Ma and (225 ± 1) Ma. The younger age of (225 ± 1) Ma indicates the formation period of the quartz veins, situating the primary metallogenic phase in the Indosinian period. The research indicates that the Late Triassic gold metallogenic system in Northern Qinling was influenced by a unified deep-seated process, with its spatial distribution determined by the Shangdan fault and its associated structures. Hongshishizi, Shanggong, and Yindonggou deposits together create an Indosinian orogenic gold metallogenic belt across Northern Qinling. This demonstrates that mineralization during this time was continuous and widespread in the eastern part of the Qinling metallogenic belt, rather than being a localized, isolated occurrence.

Key words: zircon U-Pb dating; isotope geochemistry; material sources; metallogenic epoch; Hongshishizi gold deposit; North Qinling metallogenic belt