

甘肃岷县寨上金矿成矿年代及矿床成因探讨^{*}

王宇昊^{1,2} 杜志伟¹ 焦学尧¹ 马锦龙^{1**}

WANG YuHao^{1,2}, DU ZhiWei¹, JIAO XueYao¹ and MA JinLong^{1**}

1. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 兰州 730000

2. 甘肃省地质调查院, 兰州 730000

1. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, China

2021-09-06 收稿, 2021-11-20 改回.

Wang YH, Du ZW, Jiao XY and Ma JL. 2022. Metallogenic age and genesis of the Zhaishang gold deposit in Minxian, Gansu Province. *Acta Petrologica Sinica*, 38(4):1237–1252, doi:10. 18654/1000-0569/2022. 04. 16

Abstract Zhaishang gold deposit is located in the concentrated area of large-scale carlin-like gold deposits in West Qinling Mountains, and it is the second super-large gold deposit discovered in the past 20 years. Rb, Sr, Re, Os isotopes of the pyrite, the gold-bearing mineral of Zhaishang gold deposit, in six ore samples were tested in this paper to determine their metallogenic ages and ore-forming materials. The measured Rb-Sr and Re-Os isochron ages of the pyrite are $273 \pm 10\text{Ma}$ and $273\text{Ma} \pm 22\text{Ma}$, which are older than the ages of two metallogenic stages of the Zhaishang deposit obtained by the predecessors, i. e., a earlier metallogenic stage (the first stage of 273Ma) might be exist in this area. This new chronological data may broaden the time axis for searching gold deposits in this area since no same metallogenic ages have ever been reported in the explored gold deposits in West Qinling. Furthermore, analyses results of Sr, Os, S isotopes, REE and trace elements compositions indicate that the ore-forming material of the Zhaishang gold deposit is the mixture of deep source and crust source materials. Tectonically, the Wujiashan Rise which is located in the Minli fore-arc basin experienced a strong geothermal uplift and extension in the Late Hercynian Period, which resulted in the hydrothermal fluids rising along the fault channels to the folded belts of the basin with a high Au background, and the activated Au enriched in the formation and unloaded in suitable structural spaces to form the first stage Zhaishang gold deposit. The later two stages of W and Au mineralization superimposed on the early gold deposit. Compared with regional geological evolutionary events, the age of gold mineralization in the first stage of Zhaishang gold deposit is consistent with the time of the closure of the A'nyemaqen ocean basin in the West Qinling, the subduction collision of Gonghe aulacogen, and the intrusion of Jiangligou and Zhongchuan Himalayan-type plutons, which obeys the rule "crustal thickening is conducive to the formation of gold deposits and Himalayan granites are closely related to gold deposits". It is of indicative significance for searching contemporary gold deposits in this area.

Key words Zhaishang gold deposit; Metallogenic age; Metallogenic stages; Genesis of the deposit; Ore-forming materials

摘 要 寨上金矿位于西秦岭大规模卡林-类卡林型金矿床集中地之中,是近二十年来探获的又一超大型金矿。通过对寨上金矿的 6 件矿石样品中的载金矿物黄铁矿进行 Rb、Sr、Re、Os 同位素分析,获得 Rb-Sr、Re-Os 等时线年龄分别为 $273 \pm 10\text{Ma}$ 、 $273\text{Ma} \pm 22\text{Ma}$ 。该数据大于前人所获的二期成矿阶段年龄,在西秦岭已探明的金矿床中尚无报道,反映了寨上金矿更早一期的成矿年龄为 273Ma ,这也为该区域寻找金矿床拓宽了时间轴。Sr、Os、S 同位素及稀土和微量元素研究表明,寨上金矿成矿物质为深源与壳源物质的混合。二叠纪时位于岷礼前陆盆地的吴家山隆起经历了强烈的隆升延展作用,岩浆热液沿断裂通道上升到有较高 Au 背景值盆地中的褶皱带,使地层中的 Au 活化富集,在构造有利部位卸载成矿,形成早期寨上金矿床,后期钨矿化及金矿化叠加在早期金矿床之上。寨上金矿第一期金成矿的年龄在时空上与阿尼玛卿洋盆闭合、共和坳拉谷俯冲碰撞、江里沟及中川喜馬拉雅型岩体的侵入时间基本吻合,符合“地壳加厚有利于形成金矿床及喜马拉雅型花岗岩与金

* 本文受国家自然科学基金项目(41173014)资助。

第一作者简介:王宇昊,男,1988 年生,硕士,构造地质学专业,从事地质勘查与找矿工作,E-mail: yhwang20@lzu.edu.cn

** 通讯作者:马锦龙,男,1971 年生,副教授,从事同位素地球化学、流体地球化学方面的科研与教学工作,E-mail: mjinlong@lzu.edu.cn

矿关系密切”的结论,对在该区域寻找同时代金矿床具有一定的指示意义。

关键词 寨上金矿;成矿年代;成矿期次;矿床成因;成矿物质来源

中图法分类号 P597.2;P618.51

秦岭造山带为一复合型大陆造山带,是中国卡林-类卡林型金矿的重要成矿省之一(张国伟等,1996;陈衍景等,2004)。寨上金矿是“十·五”期间由武警黄金第五支队在该地带发现的又一特大型金矿床。通过化探异常查证并结合钻探工程验证了金异常在深部存在有价值的工业矿体,现已探明储量 127t、推断金资源量 198t,随着勘探工作的进一步开展,金矿资源量有望继续扩大(路彦明等,2006b;Liu *et al.*,2015)。

研究金属矿床的成矿时代及成矿物质来源,对正确认识矿床成因、控矿因素、总结成矿规律并指导找矿勘探都具有重要的意义(陈毓川等,1994;郑伟等,2013;Zheng *et al.*,2016)。前人对寨上金矿开展了成矿年代学(李文良等,2006;路彦明等,2006a;余超,2015;喻万强,2015;孟五一,2017)、成矿物质来源(于岚,2004;路彦明等,2006b;胡建民等,2008;刘光智等,2009;刘家军等,2010c;喻万强等,2014;吕喜旺等,2017)、成矿期次(刘家军等,2008;余超,2015;杨瀚文等,2021)及成矿流体来源、成矿机制等相关研究,并取得了许多成果。然而,现阶段的研究在成矿年代、成矿物质来源等多个方面仍存在较大分歧。前人(李文良等,2006;路彦明等,2006a;余超,2015;喻万强,2015;孟五一,2017)通过 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法、Sm-Nd 法及 U-Pb 法测得寨上金矿成矿时代小于 300Ma、Au 矿化年龄主要分布于 140~120Ma 之间、W 矿化时代为 220Ma 左右,但这些测年方法和对象存在的问题,如 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法中石英 K 含量极低,普遍含有液相、气相或固相包体,而包体中常含有 KCl 组分,可造成过剩 Ar 和 Cl 对年龄测定的干扰(王松山,1992;鲁观清和卢焕章,1993;桑海清等,1993);云母等含钾矿物的 Ar-Ar 法测定的年龄可能代表岩浆结晶结束的年龄或后期多期次热事件的年龄,测年受温度和流体的影响较大(Zhu *et al.*,2006;张健等,2019);通过对寨上金矿含金石英脉中捕获的围岩锆石(李文良等,2006)与矿区辉绿玢岩锆石(孟五一,2017)进行 U-Pb 年龄测试,对含金方解石脉进行 Sm-Nd 同位素测年(余超,2015),以上方法所测数据是成矿年龄的间接反映,仅可大体反应其年龄范围。因此,寨上金矿床的精确成矿年龄仍需要进一步的研究。

Re 和 Os 都是高度亲铁和亲铜元素,硫化物 Re-Os 同位素体系已成为研究金属硫化物矿床成矿时代和成矿物质来源示踪最直接和最有效的方法(靳新娣等,2010),且测试对象已从传统的辉钼矿扩展到了磁黄铁矿、黄铁矿等低 Re、Os 含量及同位素组成的矿物(付山岭等,2016)。近年的研究表明 Re-Os 同位素体系已能够对矿床中低 Re、Os 含量的硫化物矿物进行准确的年龄测定(Stein *et al.*,2000;Selby and Creaser,2005;Wang *et al.*,2008;Liu *et al.*,2012,2020;Vernon

et al.,2014;Ying *et al.*,2014;Chen *et al.*,2015;Huang *et al.*,2015;付山岭等,2016;Sun *et al.*,2021;Zang *et al.*,2021),Re-Os 同位素体系在金属矿床直接精确定年方面发挥着越来越重要的作用(蒋少涌等,2000)。黄铁矿是寨上金矿最常见的载金矿物之一。研究表明,黄铁矿的化学组成与其形成环境密切相关,通过黄铁矿微量元素组成能够有效的判断成矿物质来源(Large *et al.*,2009)。黄铁矿中富含各种微量元素(Basori *et al.*,2018),这些元素主要以类质同象或者亚显微包裹体的形式存在于黄铁矿中(Cook and Chryssoulis,1990;Fleet *et al.*,1993;Barker *et al.*,2009;Large *et al.*,2009;Sung *et al.*,2009;Koglin *et al.*,2010;Ulrich *et al.*,2011;Duran *et al.*,2019;Chen *et al.*,2020)。随着测试技术的提高,目前已经能够高效、准确的分析硫化物中的微量元素。近年来已经有大量学者对不同类型黄铁矿进行微量元素分析和成因研究,如造山带卡林型金矿床(Large *et al.*,2009;Sung *et al.*,2009;Zhang and Li,2014)。

本文通过对寨上金矿中主要载金矿物黄铁矿进行 Rb-Sr、Re-Os、S 同位素及微量元素测试,以期进一步精确厘定矿床成矿年龄及成矿物质来源,并探讨成矿作用及对找矿的指示意义。

1 区域地质背景

秦岭造山带位于华北克拉通与扬子克拉通之间,自北向南依次为华北克拉通南缘、商丹缝合带、秦岭微地块、勉略缝合带、扬子克拉通北缘(张国伟等,1996,1997)。秦岭造山带中宝成线以西的秦岭地区为西秦岭造山带,以临潭-岷县-宕昌-凤县断裂为界,将其划分为北亚带和南亚带(喻万强,2015)。寨上金矿位于西秦岭造山带北亚带的岷-礼金成矿带中(图 1)。

西秦岭造山带内的临潭-岷县-宕昌-凤县断裂和漳县-武山断裂对该带金矿床的分布具有明显的控制作用(Mao *et al.*,2002;Chen and Santosh,2014;喻万强,2015)。上述两条断裂可能是区域中最重要的控矿断裂构造,寨上金矿位于两条断裂之间。区域内,早期晚华力西-早印支期的热隆伸展作用受到晚印支期的陆内挤压造山运动的叠加改造和抬升(杨军禄和冯益民 1999;于岚,2004;喻万强,2015),晚印支期的构造运动与寨上金矿的成矿事件相关,而位于岷礼盆地的吴家山隆起的隆升延展作用对流体及成矿物质的运移和富集提供了很好的动力条件(杨军禄和冯益民,1999)。

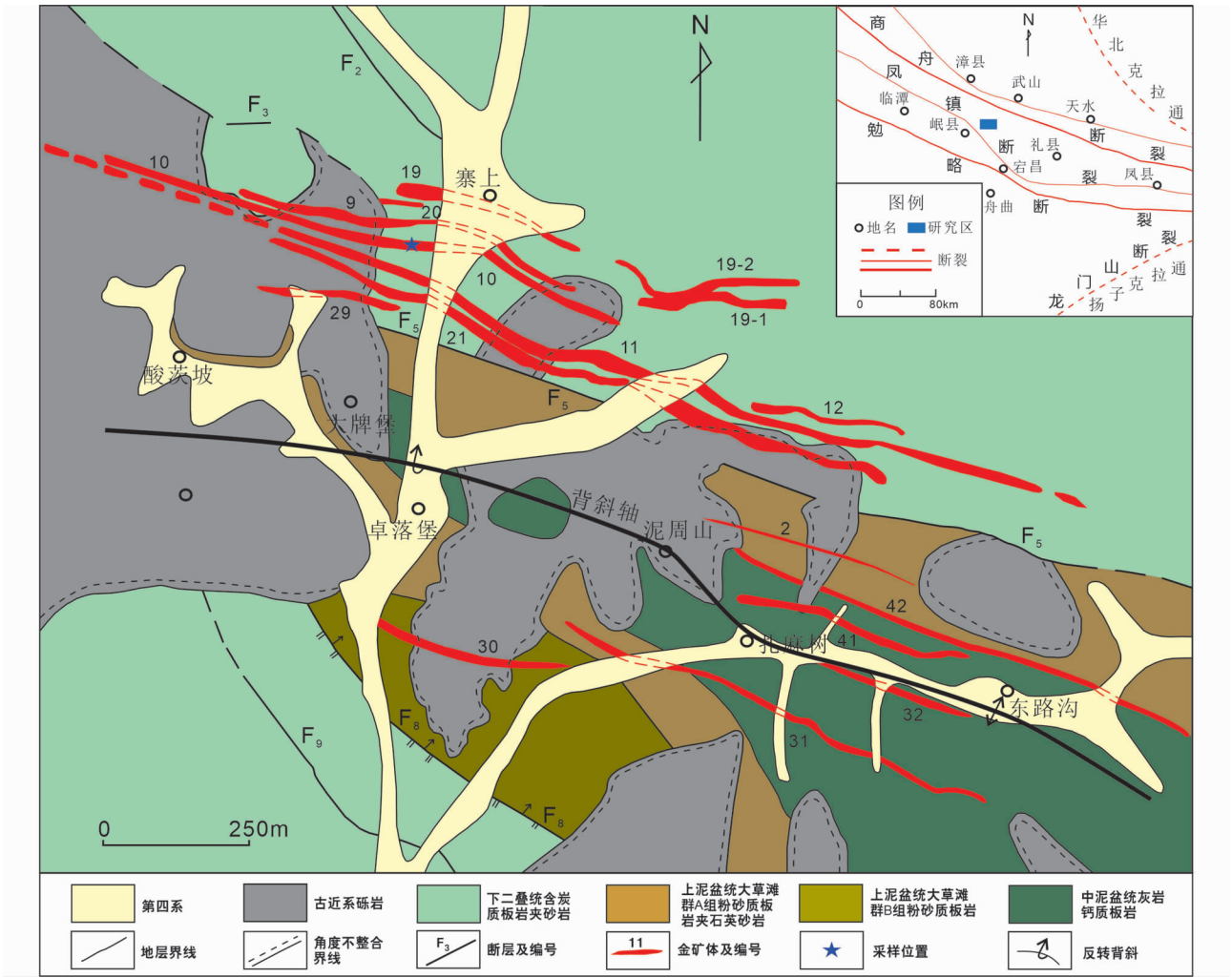


图1 寨上矿区地质简图(据张国伟等,2001;Liu *et al.* ,2015 修改)
Fig.1 Regional geological map of Zhaishang gold deposit (modified after Zhang *et al.* , 2001; Liu *et al.* , 2015)

2 矿区地质特征

2.1 地层特征

寨上矿区出露地层为:中泥盆统,主要出露于矿区的中部,呈北西-南东向展布。中泥盆统下段出露于矿区的中东部卓落堡-国营牛场背斜的核部,岩性以板岩及石英砂岩为主;中泥盆统中段出露于矿区中部卓落堡-东路沟一带,处于背斜的核部,岩性以钙质板岩与灰岩为主;上泥盆统大草滩群B组岩石出露于矿区的南部,以粉砂质板岩、粉砂岩等组成;上泥盆统大草滩群A组出露于矿区的中部,由石英砂岩、粉砂岩、板岩等组成;下二叠统分布于矿区的北东部及西南部,岩性由含炭板岩、砂岩、泥质板岩等组成;古近系砾岩,主要出露于矿区的中部及南部,零散分布,多由厚层砾岩、中粗粒砂岩等组成。寨上矿区个别钻孔和平峒中发现碳酸盐化闪长玢岩脉,含有砂岩捕掳体,脉岩厚2~4m,多顺层侵入于

地层中,围岩为碳质硅板岩。闪长玢岩中可见少量黄铁矿与黄铜矿等金属矿物,局部穿插有方解石脉与石英脉(余超,2015;喻万强,2015;吕喜旺等,2017),与成矿关系较为密切,岩脉平行于矿脉(喻万强,2015;孟五一,2017)。

2.2 构造特征

卓落堡-国营牛场反S型背斜为寨上矿区的基本构造格架,该背斜对寨上金矿有明显的控制作用,沿背斜核部及断层两翼有多条矿脉分布(图1)。矿区断裂构造发育,矿带两侧断裂存在金、钨矿化,但含金性较差(刘纲等,2010;廖延福,2013)。主干断裂F₃、F₅位于矿区背斜北翼,有多条金矿脉分布其中,受控于该组断裂(余超,2015)。

2.3 矿体特征

按照矿脉的空间分布与赋矿地层特征,寨上金矿分为南矿带和北矿带。北矿带位于卓落-国营牛场背斜北翼的F₅

断裂以北,长约7200m,宽800~1000m,围岩为碳质板岩、砂岩等。带内有已探明矿脉15条,矿脉间距在30~300m,近平行展布。在单个钻孔中有多层矿化,矿体长度为300~1100m,厚度为1.07~19.74m,金品位1.04~16.4g/t。该矿段的主要矿化脉为9号脉,其中9-2号脉矿体长约600m,透镜状,沿走向与倾向有多条平行矿体,有膨缩现象,深部未圈闭。矿体倾向0°~20°,倾角30°~45°,最大斜深为275m,平均厚度为5.73m,平均品位为6.15g/t。南矿带位于背斜南翼的30号脉和2号脉之间,有6条矿脉,延伸稳定,矿带宽约1200m,长约4200m,矿脉间距为100~200m,宽度为0.5~5m。单条矿体长度414~1030m,厚度为0.43~8.23m,金品位1.03~31.70g/t。赋矿围岩岩性主要为钙质板岩、灰岩等。该矿段的主要矿化脉体为31号脉,其中31-2号矿体长约1030m,似板状,倾向20°,倾角55°~85°,最大斜深为165m,平均厚度为3.49m,平均品位为7.39g/t(王伟峰等,2008;廖延福,2013;喻万强,2015)。

矿区同时圈出15条钨矿体,平均厚度为2.37m,WO₃的平均品位为0.524%。钨矿体主要位于北矿带,大多分布在19与21号矿脉群中。其余分布在南矿带,分布在31与41号矿脉群内。钨矿体多呈透镜状或似板状产出,充填于破碎带中,钨矿物以白钨矿为主,另有极少量的黑钨矿。所圈出的钨矿体部分与金矿体重合,部分在金矿体范围之外(刘家军等,2008;郑卫军等,2010)。

2.4 矿石特征

寨上金矿原生矿石以蚀变碎裂岩化炭质板岩型、蚀变碎裂岩化粉砂质及泥质板岩型为主,次之为断层泥型、蚀变灰岩型、强硅化蚀变角砾岩型及钙质板岩型等。氧化矿石主要产于地表,多呈黄褐色、棕褐色及红褐色。矿石中主要矿物为金属硫化物,其次为氧化物、硅酸盐、硫酸盐、碳酸盐等(刘家军等,2010b;喻万强,2015)。金属硫化物包括黄铁矿、黄铜矿、毒砂、辉锑矿等。金主要以次显微金形式赋存于载金矿物中,最主要的载金矿物为黄铁矿、石英及白钨矿等,其中黄铁矿的金含量与砷的含量存在相关性(刘新会等,2009;刘家军等,2010a)。显微可见金以裂隙金、粒间金、表面吸附金、包体金等形式产出,载金矿物有石英及粘土矿物等(刘家军等,2010a;刘新会等,2010)。矿石中矿物种类多、组成复杂及存在显微自然金是寨上金矿床的特色(刘家军等,2010c)。

寨上金矿的形成分为3个主成矿期(刘家军等,2008;马星华等,2008):沉积-成岩期、中低温热液成矿期及表生氧化期。沉积-成岩期是成矿物质的富集阶段,热液成矿期是主要成矿事件发生时期,表生氧化期使得原生矿山出露于地表被风化、剥蚀及氧化(余超,2015)。Liu *et al.* (2015)、余超(2015)依据矿脉穿切关系、矿物共生组合、共生序列及矿石构造的关系,将中低温热液成矿期划分为5个成矿阶段:I期为低硫化物-石英阶段,金矿化较弱,金品位为0.01~0.1g/t;

II期为砷黄铁矿-毒砂-石英阶段,该阶段金矿化较强,金品位1~5g/t,部分在10g/t以上;III期为多金属硫化物-白钨矿-石英-碳酸盐阶段,自然金与白钨矿较多存在于该阶段中,也是金矿化最强的阶段,金的品位平均为5g/t,个别强矿化部位金为50g/t;IV期为低硫化物-碲化物-石英-碳酸盐阶段,矿石中Au品位一般高于3g/t;V期为碳酸盐岩晚阶段,为热液成矿的最后阶段,金矿化弱,往往低于工业品位。

3 样品采集与分析测试

黄铁矿是寨上金矿矿石中最主要的载金矿物之一。所采样品为寨上金矿10号矿脉中的金矿石,岩性为灰白-灰黑色变质长石石英砂岩,岩石中主要金属矿物为黄铁矿,沿裂隙呈平行脉状分布。同位素和微量元素的测试对象为黄铁矿,同时对黄铁矿赋矿全岩中的微量元素也进行了测试。

样品预处理 将原样磨碎至40~200目,用蒸馏水清洗其中的吸附物质。然后将样品放置在烘干箱中烘干,温度为45~60℃,时间为10~12h。最后从中挑选出40~60目黄铁矿样品,纯度在98%以上,待测试。

样品分析测试 黄铁矿样品的Re-Os同位素测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成,以Carius管溶样法作为样品的分解方法,采用CCl₄萃取法和HBr反萃取法分离Re和Os,Re和Os的富集和纯化分别利用AG1X8阴离子树脂法和微蒸馏法来完成。实验室具有超低的Re和Os全流程空白,Re和Os的全流程空白水平分别为4~9pg和0.1~0.5pg,完全可以满足超低Re-Os含量地质样品的实验要求。

黄铁矿样品的Rb-Sr、S同位素测试在核工业北京地质研究院完成。Rb-Sr同位素测试方法为EJ/T692—1992《岩石矿物铷锶等时年龄测定》,测试仪器为PHOENIX型热电质谱仪,误差以2σ计。S同位素测试采用DZ/T0184.14—1997《硫化物中硫同位素组成的测定》,标准物质常规分析精度优于±0.2‰。

微量元素的测试在甘肃省西部矿产资源重点实验室完成。测试样品除黄铁矿外,还包括赋存所测试黄铁矿的全岩样品。黄铁矿的预处理方法见张红雨(2012)对硫化物矿物痕量及贵金属元素丰度ICP-MS测定方法研究,测试仪器为Agilent 7500a型电感耦合等离子质谱仪。

4 测试结果

4.1 黄铁矿 Rb-Sr 同位素

寨上金矿6件黄铁矿样品的Rb、Sr同位素测试结果见表1。由表可知,Rb的含量为 3.5×10^{-6} ~ 8.58×10^{-6} ,均值为 6.97×10^{-6} ;Sr为 10.2×10^{-6} ~ 66.5×10^{-6} ,均值为 37×10^{-6} ; $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值介于0.3289~1.0727,均值为0.6964; $^{87}\text{Sr}/$

表 1 寨上金矿黄铁矿 Rb-Sr 同位素测试结果

Table 1 Rb-Sr isotope analytical results of pyrite from Zhaishang gold deposit

样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}$	$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$	误差 (2σ)
ZS-Y-02	6.09	16.4	1.0727	0.712597	0.00001
ZS-Y-05	3.50	10.2	0.9952	0.714602	0.000014
ZS-Y-06	7.56	66.5	0.3289	0.71204	0.000013
ZS-Y-09	8.04	29.6	0.7858	0.713372	0.000011
ZS-Y-13	8.58	58.9	0.4216	0.712339	0.000014
ZS-Y-16	8.06	40.6	0.5741	0.712674	0.000014

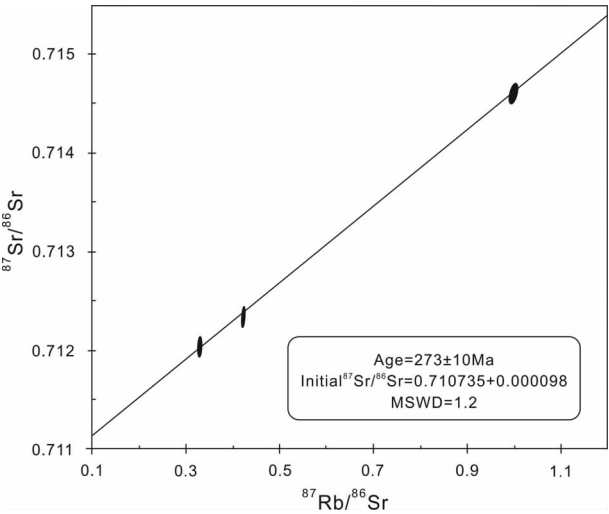


图 2 寨上金矿黄铁矿 Rb-Sr 等时线图
Fig. 2 Rb-Sr isochron map of pyrite in Zhaishang gold deposit

^{86}Sr 值介于 0.71204 ~ 0.714602, 均值为 0.712933。
Rb、Sr 的化学性质较为活泼, 其同位素体系容易受热液活动的影响, 较大的 MSWD 值可能是黄铁矿成矿后受到了后期热液活动影响, 使 Rb、Sr 同位素体系受到扰动。利用 ISOPLOT 软件 (Ludwig, 2003) 对拟合度最好的 3 个数据做等时线拟合, 得到的等时线年龄为 $273 \pm 10\text{Ma}$ (MSWD =

表 2 寨上金矿黄铁矿 Re-Os 同位素测试结果

Table 2 Re-Os isotope analytical results of pyrite from Zhaishang gold deposit

样品号	Re	误差 (2σ)	Os	误差 (2σ)	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	误差 (2σ)	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	误差 (2σ)	样重
	($\times 10^{-12}$)		($\times 10^{-12}$)						(g)
ZS-Y-02	4066	54.67	98.06	0.45	1.92	0.01	246	3.50	0.55
ZS-Y-06	3338	18.87	41.00	0.09	3.39	0.02	559	3.39	0.56
ZS-Y-09	2569	35.04	32.57	0.14	3.16	0.03	528	7.53	0.57
ZS-Y-13	2669	48.02	32.14	0.14	3.36	0.02	568	10.51	0.55
ZS-Y-16	4639	37.58	48.69	0.12	3.92	0.02	685	5.79	0.55

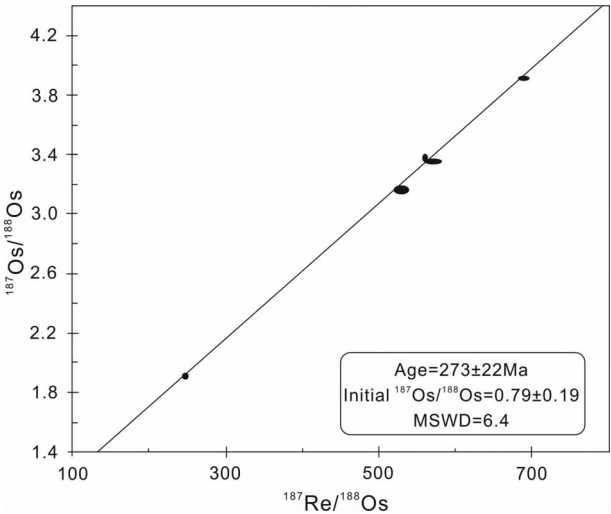


图 3 寨上金矿黄铁矿 Re-Os 等时线图
Fig. 3 Re-Os isochron map of pyrite in Zhaishang gold deposit

1.2), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值为 0.710735 ± 0.000098 (图 2)。

4.2 黄铁矿 Re-Os 同位素

由于 Rb-Sr 等时线年龄有效数据点较少, 为了进一步厘定寨上金矿的成矿年龄, 对相同的 5 件样品做了黄铁矿 Re-Os 同位素测试。Re-Os 同位素体系可以精确确定矿床的形成时间 (郑伟等, 2017)。黄铁矿 Re-Os 同位素测试结果见表 2, 5 件样品 Re、Os 含量分别为 $2569 \times 10^{-12} \sim 4639 \times 10^{-12}$ 和 $32.14 \times 10^{-12} \sim 98.06 \times 10^{-12}$, 变化范围较大, 有利于 Re-Os 等时线的拟合。

对 5 个测试数据做回归分析, 得到的 Re-Os 等时线年龄为 $273 \pm 22\text{Ma}$ (MSWD = 6.4, 图 3)。 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值为 0.79 ± 0.19 , 该年龄与 3 个黄铁矿样品拟合出的 Rb-Sr 等时线年龄基本一致, 该数据能够较好地反映寨上金矿的成矿年龄。

4.3 微量元素

寨上金矿黄铁矿及变质长石石英砂岩微量元素测试结

表 3 寨上金矿微量元素与稀土元素测试结果($\times 10^{-6}$)

Table 3 Trace and rare earth elements analytical results of Zhaishang gold deposit ($\times 10^{-6}$)

样品号	ZS-Y-02	ZS-Y-16	ZS-Y-13	ZS-Y-05	ZS-YY-05	ZS-YY-02	ZS-YY-13	ZS-YY-09	ZS-YY-16	ZS-YY-06
样品	黄铁矿				变质长石石英砂岩					
Au	0	14675	3138	39717	117	0	543	61	13480	641
Ti	684. 5	534. 9	677. 3	2158	980. 1	325. 8	2740	1439	3162	1952
V	421. 7	5. 58	5. 32	33. 37	97. 23	8. 50	43. 11	23. 95	52. 75	32. 26
Cr	14. 76	10. 60	9. 04	152. 0	14. 64	110. 6	243. 3	18. 45	393. 2	24. 97
Mn	112. 4	26. 68	24. 04	31. 91	360. 9	874. 6	138. 6	132. 4	254. 9	187. 5
Co	137. 6	117. 6	83. 29	36. 47	1. 42	7. 79	12. 94	4. 75	21. 02	7. 69
Ni	317. 4	331. 9	257. 9	165. 1	2. 99	12. 68	26. 15	9. 96	48. 12	12. 80
Cu	47. 33	106. 2	91. 75	40. 58	1. 51	9. 42	10. 93	3. 72	24. 80	5. 21
Zn	21. 96	146. 3	99. 32	536. 6	53. 43	19. 30	30. 72	161. 0	2001	24. 39
As	572. 9	6343. 6	8069	987. 1	43. 08	11. 90	144. 7	386. 7	470. 0	367. 2
Se	30. 38	4. 20	3. 92	33. 05	1. 68	2. 05	3. 94	2. 66	5. 94	2. 99
Rb	4. 63	10. 69	8. 22	6. 51	30. 50	18. 70	98. 02	76. 64	117. 2	78. 64
Sr	12. 38	26. 37	23. 51	13. 35	52. 18	61. 10	139. 0	73. 56	157. 5	123. 0
Zr	29. 68	38. 68	76. 90	281. 9	115. 8	30. 86	230. 1	164. 1	429. 7	207. 1
Cd	0. 26	0. 91	0. 61	0. 84	0. 08	0. 06	0. 07	0. 06	3. 62	0. 06
Cs	0. 66	0. 59	0. 70	0. 24	1. 40	1. 43	8. 72	4. 10	10. 63	5. 83
Ba	10. 71	17. 58	15. 50	6. 30	30. 06	30. 36	161. 5	98. 86	180. 8	108. 9
Ta	0. 20	0. 21	0. 20	0. 51	0. 22	0. 09	0. 84	0. 42	0. 95	0. 56
W	2. 78	2. 93	2. 26	18. 29	6. 68	0. 99	9. 26	4. 73	11. 73	6. 33
Tl	11. 08	12. 66	10. 78	0. 47	0. 19	0. 34	0. 89	0. 41	1. 27	0. 52
Pb	171. 1	357. 7	254. 4	342. 6	26. 30	16. 80	33. 25	13. 81	252. 7	18. 23
Th	1. 89	1. 90	2. 17	3. 04	2. 31	1. 49	9. 01	5. 07	11. 19	6. 00
La	5. 95	8. 08	8. 19	4. 64	7. 39	6. 17	33. 20	18. 55	39. 84	23. 42
Ho	0. 16	0. 14	0. 13	0. 26	0. 16	0. 23	0. 53	0. 36	0. 75	0. 46
La	5. 95	8. 08	8. 19	4. 64	7. 39	6. 17	33. 20	18. 55	39. 84	23. 42
Ce	11. 03	16. 37	16. 85	8. 94	15. 11	12. 76	66. 91	36. 43	82. 43	47. 53
Pr	1. 15	1. 64	1. 76	0. 90	1. 64	1. 41	6. 93	3. 98	8. 34	5. 01
Nd	4. 24	6. 06	6. 39	3. 33	6. 29	5. 59	25. 53	14. 52	30. 30	18. 54
Sm	0. 80	1. 00	1. 11	0. 72	1. 25	1. 34	4. 68	2. 78	5. 54	3. 48
Eu	0. 12	0. 17	0. 15	0. 15	0. 22	0. 31	0. 67	0. 44	0. 81	0. 51
Gd	0. 82	0. 90	0. 79	1. 00	1. 06	1. 75	3. 30	2. 08	4. 30	2. 68
Tb	0. 12	0. 12	0. 11	0. 18	0. 15	0. 26	0. 43	0. 29	0. 59	0. 36
Dy	0. 81	0. 72	0. 64	1. 23	0. 87	1. 36	2. 67	1. 76	3. 66	2. 26
Ho	0. 16	0. 14	0. 13	0. 26	0. 16	0. 23	0. 53	0. 36	0. 75	0. 46
Er	0. 50	0. 43	0. 41	0. 81	0. 48	0. 63	1. 62	1. 12	2. 32	1. 35
Tm	0. 06	0. 06	0. 06	0. 13	0. 07	0. 08	0. 24	0. 16	0. 34	0. 20
Yb	0. 40	0. 40	0. 43	0. 98	0. 46	0. 56	1. 68	1. 09	2. 34	1. 33
Lu	0. 05	0. 05	0. 05	0. 14	0. 06	0. 08	0. 23	0. 15	0. 33	0. 18
Y	5. 19	3. 90	3. 63	7. 46	4. 62	7. 12	14. 94	10. 02	20. 94	12. 56
ΣREE	31. 41	40. 04	40. 70	30. 88	39. 83	39. 66	163. 6	93. 73	202. 8	119. 8
L/H REE	2. 87	4. 96	5. 52	1. 53	4. 02	2. 28	5. 38	4. 50	4. 70	4. 61
(La/Yb) _N	10. 69	14. 53	13. 79	3. 40	11. 42	7. 86	14. 17	12. 25	12. 20	12. 65
(La/Sm) _N	5. 34	5. 81	5. 29	4. 63	4. 24	3. 30	5. 09	4. 79	5. 16	4. 82
(Gd/Yb) _N	1. 70	1. 87	1. 53	0. 84	1. 89	2. 56	1. 62	1. 58	1. 51	1. 67
δEu	0. 46	0. 54	0. 46	0. 54	0. 56	0. 62	0. 50	0. 53	0. 49	0. 49
δCe	0. 97	1. 04	1. 04	1. 01	1. 02	1. 02	1. 03	0. 99	1. 05	1. 02

表 4 寨上金矿硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值

Table 4 Sulfur isotope $\delta^{34}\text{S}$ of Zhaishang gold deposit

矿物	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	均值(‰)	样品数量	数据来源
黄铁矿	-3.4	-3.4	1	于岚,2003
黄铁矿	3.1~9.2	5.6	5	
辉锑矿	3	3	1	路彦明,2006b
方铅矿	3.2	3.2	1	
黄铁矿	7.54~32.37	16.05	6	
辉锑矿	4.92~7.41	6.17	2	毛光剑,2009
黝铜矿	1.35~2.23	1.79	2	
方铅矿	0.2~10.24	5.22	2	
石膏	0.55	0.55	1	
方铅矿	3.21	3.21	1	
闪锌矿	2.32	2.32	1	刘家军等,2010c
重晶石	13.23	13.23	1	
黄铁矿	0.2~11.6	6.15	12	喻万强,2015
黄铁矿	-3~1.2	-0.47	6	本文

果见表 3。由表 3 可知黄铁矿 ZS-Y-02 样品中不含 Au,其它样品 Au 含量为 $3138 \times 10^{-6} \sim 39717 \times 10^{-6}$, Au 含量普遍较高,说明黄铁矿与 Au 有密切的关系。全岩样品中 ZS-YY-02 号样品中不含 Au,其它样品 Au 含量为 $61 \times 10^{-6} \sim 13480 \times 10^{-6}$,变化范围较大,成矿过程中可能发生了流体的沸腾作用,引起溶液中 H_2O 、 CO_2 及 H_2S 等气体的逃逸,增加了流体中成矿物质的浓度及流体的盐度,最终导致矿物质过饱和从而发生沉淀(刘家军等,2010b,2020)。

4.4 稀土元素

黄铁矿及变质长石石英砂岩(全岩)样品稀土元素测试结果见表 3。黄铁矿与全岩样品中, ΣREE 含量分别为 $30.88 \times 10^{-6} \sim 40.70 \times 10^{-6}$ 和 $39.66 \times 10^{-6} \sim 202.8 \times 10^{-6}$ 。相对于全岩,黄铁矿中 ΣREE 较低,矿化过程中形成的黄铁矿的稀土元素含量较低(张晓东等,2011)。黄铁矿样品的 LREE/HREE 值为 1.53~5.52,全岩样品为 2.28~5.38,两者轻重稀土分馏都不明显。全岩及黄铁矿样品中稀土元素的 δEu 值分别为 0.49~0.62、0.46~0.54,表现为 Eu 的负异常。 δCe 值分别为 0.99~1.05、0.97~1.04,近似于 1,表现为 Ce 无异常,表明是还原环境,与黄铁矿的生成环境相一致。作为寨上金矿的主要载金矿物,黄铁矿的大量生成成为金的沉淀与富集提供了有利的条件。

4.5 S 同位素 $\delta^{34}\text{S}$

刘光智等(2009)认为析出于热液中的硫化物的硫同位素与总硫的硫同位素组成相近,且当矿物组合较简单时,

$\delta^{34}\text{S} \Sigma \text{S}$ 值可以用黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值替代(Ohmoto and Rey,1979),即 $\delta^{34}\text{S} \Sigma \text{S} \approx \delta^{34}\text{S}$ 。因而成矿物质中的 S 源可用矿石中硫化物(黄铁矿)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值进行示踪(Dejonghe *et al.*, 1989;Seal II,2006)。寨上金矿黄铁矿样品 S 同位素测试结果见表 4。由表可知,本次测试的 6 件黄铁矿样品中 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $-3\text{‰} \sim 1.2\text{‰}$ 之间,均值为 -0.47‰ 。 $\delta^{34}\text{S}$ 值的变化范围小,接近于 0‰,表明 S 可能来自深源。

5 讨论

5.1 成矿年龄及成矿期次

成矿时代是矿床成因研究的核心内容之一,为此,前人已对寨上矿区做过一些成矿年代学研究。路彦明等(2006a)对寨上金矿床的含金石英及蚀变绢云母进行了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年,得到石英的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄及等时线年龄分别为 $130.62 \pm 1.38\text{Ma}$ 和 $129.24 \pm 1.23\text{Ma}$,蚀变绢云母为 $125.28 \pm 1.26\text{Ma}$ 和 $125.56 \pm 1.20\text{Ma}$ 。李文良等(2006)对寨上金矿含金石英脉中锆石(皆为围岩锆石)进行了 SHRMP 法 U-Pb 测年,认为该金矿的成矿作用晚于 300Ma。余超(2015)通过 Sm-Nd 同位素等时线结果显示白钨矿的成矿年龄为 $222.6 \pm 9.8\text{Ma}$,为三叠纪,晚于秦岭造山带主造山期 $242 \pm 21\text{Ma}$;而方解石的 Sm-Nd 年龄是 $144.1 \pm 3.5\text{Ma}$,为侏罗纪。喻万强(2015)对钻孔中的脉岩进行全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年,结果分别为 221.5Ma 和 221.6Ma,认为寨上矿床可能存在 212~221Ma 和 125~130Ma 两期成矿事件。孟五一(2017)对矿区辉绿玢岩中的锆石进行 U-Pb 年龄测试,得出 200~230Ma 可能为区内辉绿玢岩脉形成的年龄。吕喜旺等(2017)与杨瀚文等(2021)总结前人成果并对前人测年数据进行二次开发利用,认为寨上矿区至少存在早期钨矿化(220Ma)和晚期金矿化(140~120Ma)两期成矿作用。后期的金矿化叠加在早期钨矿化之上,并导致钨、金矿体的重合或分离。并认为钨矿在时空和成因上与同时代富钨的闪长玢岩脉(220~210Ma)关系密切,而金矿化与闪长玢岩脉没有时空关联,成矿时代属于早白垩世(140~120Ma),与西秦岭地区的燕山期构造岩浆活动具有一致性。陈衍景等(2004)研究得出秦岭卡林-类卡林型金矿主要分布在碰撞造山构造变形强烈的缝合带、前陆冲断带及秦岭微板块内部,成矿同位素年龄位于 220~100Ma 之间,以 170Ma 为高峰,在成矿时间和空间上与碰撞造山作用非常吻合。而寨上金矿后期钨及金成矿作用位于秦岭卡林-类卡林型金矿的主要成矿时间内。

用金属矿物进行同位素测年可以直接获得成矿年龄,随着分析测试技术的快速发展正逐渐成为成矿年代学研究的发展趋势(Yuan *et al.*, 2008;郑伟等,2013,2017)。本文在对黄铁矿及全岩样品的微量元素测试中,金的最高含量分别可达 39.72×10^{-9} 和 13.48×10^{-9} ,因此所采样品与成矿过程密切相关。作为寨上金矿的主要载金矿物,直接对黄铁矿进行同位素测年,是确定该矿床成矿年龄的有效手段。本文所测黄

铁矿样品 Rb-Sr 等时线年龄为 $273 \pm 10\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.2$), Re-Os 等时线年龄为 $273 \pm 22\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 6.4$)。Re 和 Os 都是高度亲铁及亲硫元素,地球形成的早期分异过程中,趋向于集中分配在地核以及硫化物中,对比其它定年方法,Re-Os 同位素技术是金属硫化物最好的测年手段(李晶等, 2010; 靳新娣等, 2010)。由于 Re-Os 同位素体系封闭性较好,受后期构造热事件的改造较弱,可以直接准确测定成矿年龄(Stein *et al.*, 1998)。近年来该应用越来越广泛,通过测定载金黄铁矿 Re-Os 同位素组成从而确定金成矿时代方面取得了较大成功。寨上金矿床金主要以次显微金形式赋存于载金矿物中,最主要的载金金属矿物为黄铁矿,黄铁矿中 Au 含量为 $3138 \times 10^{-6} \sim 39717 \times 10^{-6}$,黄铁矿与金含量呈明显的正相关。与常用的 U-Pb 法或者 Ar-Ar 法不同,Re-Os 法的测定对象是金属硫化物,而黄铁矿更是寨上金矿 Au 的主要赋存矿物之一,故从载金矿物角度分析,含金黄铁矿是寨上金矿床最佳测年对象。因此,黄铁矿 Re-Os 法定年对于直接确定该金矿成矿年龄具有十分重要的意义。结合 Rb-Sr 及 Re-Os 等时线年龄,273Ma 可以代表黄铁矿的结晶年龄,也就是 Au 富集的时间,即寨上金矿 10 号矿脉的成矿年龄。

结合前人研究成果,推测寨上金矿可能存在至少三期成矿事件,第一期金矿成矿年龄为 273Ma 左右,属于二叠纪,该成矿年龄在西秦岭已探明的金矿床中尚无报道,这也为该区域寻找金矿床拓宽了时间轴;第二期钨矿形成于 220 ~ 210Ma,为晚三叠世;第三期金矿形成于 140 ~ 120Ma,为早白垩世。

5.2 成矿物质来源

5.2.1 S 同位素制约

S 是绝大多数金属矿床中最重要的成矿元素之一,因而判断 S 的来源可以为解决成矿物质来源及矿床成因等问题提供重要的依据。一般认为 S 有 3 种储库(Rollison, 1993): 幔源或深源硫($\delta^{34}\text{S} = 0 \pm 3\text{‰}$)、海水硫($\delta^{34}\text{S} = +20\text{‰}$)及地壳硫。地壳硫来源较为复杂, S 同位素值变化大,以较大的负值为主要特征。本次黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值的变化范围接近于 0‰,表明 S 可能来自深源。前人得出寨上金矿 S 的来源有经过生物还原作用的地层硫(于岚, 2004)、幔源硫与壳源硫的混合(路彦明等, 2006b)、地层硫和岩浆硫的混合(胡建民等, 2008),毛光剑(2009)、喻万强(2015)所测得的黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值均为正值,且变化范围较大。寨上金矿硫同位素组成(表 4、图 4)显示, $\delta^{34}\text{S}$ 的值在 $-3.4\text{‰} \sim 32.37\text{‰}$ 之间,极差为 35.77‰,平均值 6.47‰,塔状分布不明显。除两个沉积-成岩黄铁矿样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(27.75‰, 32.37‰)较高外,其它硫化物样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 $-3.4\text{‰} \sim 11.6\text{‰}$ 之间,变化范围相对较小。各矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为: 黄铁矿 $-3.4\text{‰} \sim 11.6\text{‰}$, 辉锑矿 $3.0\text{‰} \sim 7.41\text{‰}$, 方铅矿 $0.2\text{‰} \sim 10.24\text{‰}$, 黝铜矿 $1.35\text{‰} \sim 2.23\text{‰}$, 闪锌矿 2.32‰ , 重晶石 13.23‰ , 石膏 0.55‰ 。寨上金矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 的组成特点可能反映了硫为岩浆

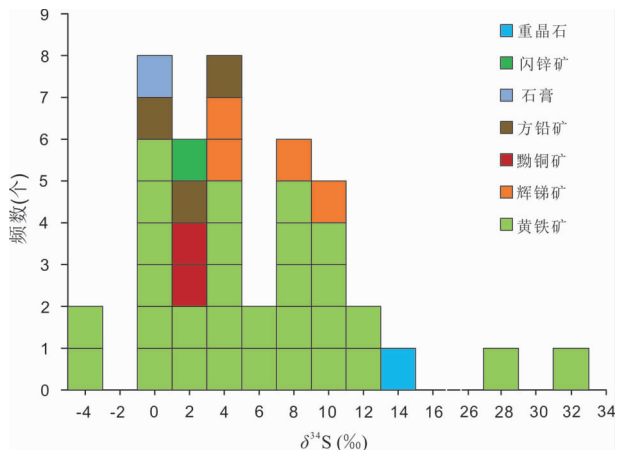


图 4 寨上金矿床 S 同位素组成分布图

Fig. 4 Sulfur isotope distribution in Zhaishang gold deposit

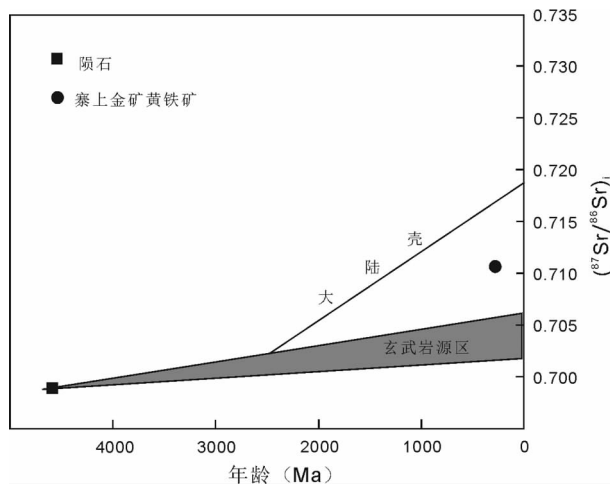


图 5 寨上金矿黄铁矿 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 投点图(据韩吟文等, 2003)

Fig. 5 The initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of pyrite in Zhaishang gold deposit(after Han *et al.*, 2003)

硫和地层硫的混合,也可能与寨上金矿的多期次成矿有关。

5.2.2 Sr、Os 同位素制约

在矿床研究中, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值是判断成岩成矿物质来源的重要指标,常利用 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 示踪成矿物质来源及深源流体的壳幔混染作用(侯明兰等, 2006; 张哲铭等, 2019)。本次测试样品中黄铁矿 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.7107, Sr 同位素 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 在地幔、地壳 Sr 同位素演化(图 5)中的投点位于大陆壳增长线和玄武岩源区之间,表明寨上金矿成矿物质来源为深源与壳源的混合。

Re-Os 同位素体系既可以示踪成矿物质来源并指示成矿过程中不同来源物质混入的程度,还可能区分出“源区富集”与“地壳混染”这两种地质过程的贡献(周金城等, 2006; 郑伟等, 2017)。 $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i$ 值可用于判断成矿物质的来

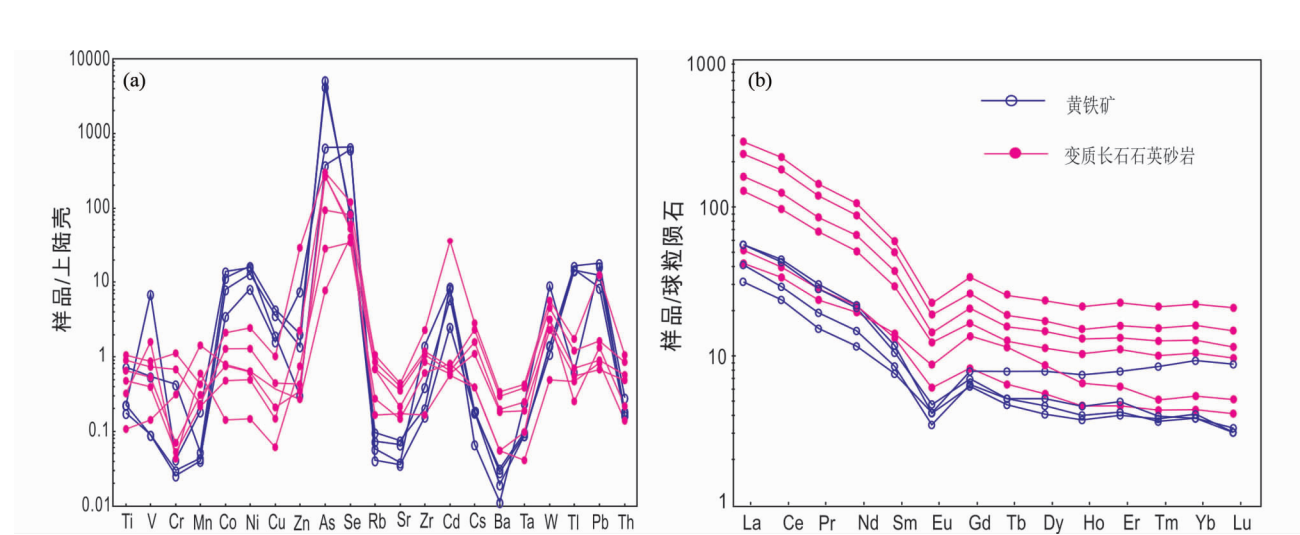


图6 寨上金矿黄铁矿与全岩上陆壳标准化微量元素蛛网图(a, 标准化值据 Taylor and McLennan, 1985)和球粒陨石标准化稀土元素配分图(b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Upper crust-normalized trace element spider diagrams (a, normalization values after Taylor and McLennan, 1985) and chondrite-normalized REE patterns (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) of pyrite and whole rock in Zhaishang gold deposit

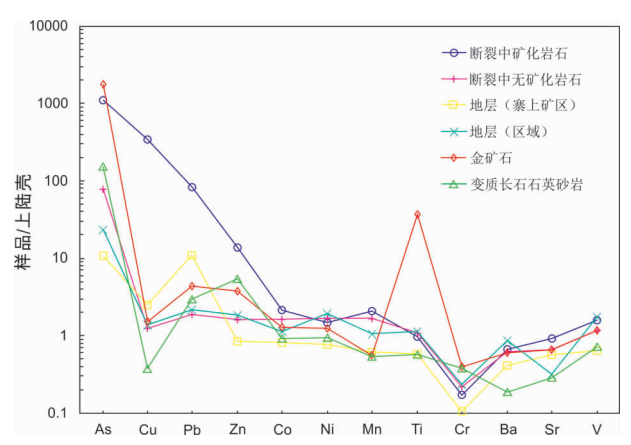


图7 寨上矿区及所在区域岩石上陆壳标准化微量元素蛛网图

数据来源: 断裂中(矿化、无矿化)岩石及地层(寨上矿区、区域)来源于陈勇敢等(2004); 金矿石数据来自路彦明等(2006b); 变质长石石英砂岩数据来自本文

Fig. 7 Upper crust-normalized trace element spider diagrams (normalization values after Taylor and McLennan, 1985) of rocks in Zhaishang gold deposit and near area

Data sources: fault (mineralized, non-mineralized) rocks and stratum (Zhaishang gold deposit and near area) from Chen *et al.* (2004); gold ore from Lu *et al.* (2006b); metamorphic feldspathic quartz sandstone from this article

源,原始上地幔的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值为 0.129, 平均大陆地壳的值为 3.63 (Palmer and Turekian, 1986; Meisel *et al.* , 1996; 蒋少涌等, 2000)。本文($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)_i 为 0.79 ± 0.19 , 介于原始上地幔与平均大陆地壳值之间, 表明成矿物质为深源与壳源物质的混合。

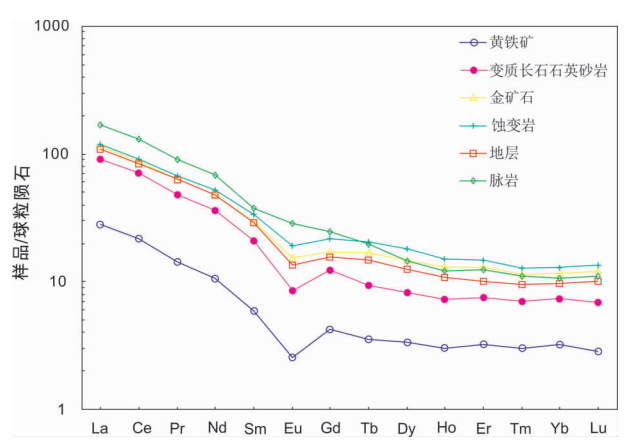


图8 寨上金矿黄铁矿、金矿石及岩石球粒陨石标准化稀土元素配分图

数据来源: 金矿石、蚀变岩及地层 REE 数据源自路彦明等(2006b); 脉岩 REE 数据源自廖延福(2013)和喻万强(2015); 黄铁矿及变质长石石英砂岩 REE 数据源自本文。图中用于标准化的各类样品的 REE 数据均为平均值

Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns of pyrite, gold ore and rocks in Zhaishang gold deposit (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

Data sources: gold ore, altered rock and stratum from Lu *et al.* (2006b); vein rock from Liao *et al.* (2013), Yu *et al.* (2015); pyrite and metamorphic feldspathic quartz sandstone from this article. The REE samples used for standardization are the average data

由于地壳相对富集 Re, 混入越多地壳物质产生的放射性 ^{187}Os 含量越高, 相应的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值也发生变化。 γ_{Os} 是指示地壳物质加入成矿体系的一个重要参数 (Walker *et al.* , 1989, 1994), $\gamma_{\text{Os}(t)}$ 用来表示样品 Os 同位素组成在某一

特定时间 t 相对于当时球粒陨石平均值的 Os 同位素组成差异。地壳的 Re/Os 比值高,因而地壳组分加入岩浆体系或成矿体系越多, $\gamma_{Os(t)}$ 值越表现为较大的正值,而 Re 的亏损导致 $\gamma_{Os(t)}$ 为负值。 $\gamma_{Os(t)}$ 值用于判断成矿物质的来源,原始上地幔的 $\gamma_{Os(t)}$ 值为 1.6,平均大陆地壳的值为 +2758 (Palmer and Turekian, 1986; Meisel *et al.*, 1996; 蒋少涌等, 2000)。本文 Re-Os 同位素 $\gamma_{Os(t)}$ 值为 531 ± 151.7 , 介于原始上地幔与平均大陆地壳值之间,表明成矿物质为深源与壳源物质的混合。

5.2.3 微量及稀土元素制约

作为岩浆岩源区物质成分部分熔融和分离结晶的重要参数,微量元素是示踪成矿物质来源的重要依据之一。由上陆壳标准化微量元素蛛网图(图 6a)可以看出,黄铁矿中的微量元素在整体上表现为较明显的富集或亏损,黄铁矿与赋矿全岩样品的曲线配分模式具有较好的一致性,表明黄铁矿的成矿物质对全岩有较好的继承性。

将前人对该区微量元素的研究成果标准化得到上陆壳标准化蛛网图(图 7)。寨上矿区地层中 As 的含量低于区域地层,且 As 在金矿石、断裂带中矿化岩石及含金性好的变质长石石英砂岩中强富集。表明寨上矿区地层中的 As 受到成矿流体的淋滤,并在断裂带、金矿石以及含金较好的变质长石石英砂岩中卸载富集,即矿区地层中的 As 参与了 Au 的成矿作用。同时矿区地层中 Au 的含量高于区域地层,矿区地层可看作 Au 成矿的部分物质来源。断裂带中矿化岩石与矿区地层在 Cu、Pb、Zn 上存在明显差异,而在其它元素的配分上又表现出较好的一致性。金矿石、变长石石英砂岩相对于矿区地层也表现出一致性与差异性并存的特征,表明寨上金矿的成矿物质来源于矿区地层及深源。

稀土元素分馏能灵敏地反映地质作用的过程,具有很好的示踪作用,能揭示金矿床的成矿物质来源。从寨上金矿黄铁矿与全岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(图 6b)可知,除 ZS-Y-05 黄铁矿样品外,其余黄铁矿及全岩样品均为右倾型,重稀土曲线平缓。为轻稀土富集型,重稀土相对亏损。黄铁矿与全岩样品的稀土元素配分模式表现出较强的一致性,表明黄铁矿对其赋矿全岩具有很好的继承性,有壳源物质参与。ZS-Y-05 号黄铁矿样品的轻重稀土元素分馏较小(LREE/HREE 值为 1.53),重稀土分馏不明显,与其它黄铁矿样品的稀土元素配分模式有一定差异,具有一定程度上的深源特征,该样品的金含量在所有测试样品中为最高值,表明寨上金矿中成矿物质可能有深源物质的参与。

寨上金矿的黄铁矿、金矿石、蚀变岩、全岩以及地层在 REE 的各项特征值上具有较强的一致性(图 8)。总体上表现为轻稀土元素的富集,以及轻重稀土元素内部的明显分馏, δEu 的负异常以及 δCe 无异常。脉岩具有更高的 LREE/HREE 值,轻重稀土元素分异程度更加明显。 δEu 值的负异常不明显,与上述其它研究对象在成矿及演化过程中存在明显的环境差异,说明矿区的脉岩与金成矿没有直接的关系。

综上所述,通过 Sr、Os 同位素、微量元素、稀土元素及 S

同位素讨论分析并结合前人研究成果,得出寨上金矿成矿物质来源为深源物质与壳源物质的混合。

5.3 矿床成因

综上,研究得出寨上金矿的第一期成矿年龄为 273Ma,为早二叠世向中二叠世的过渡期,此时勉略洋壳沿微秦岭地块南缘向北俯冲引起了地幔的热对流,同时微秦岭地块北缘沿商丹断裂向华北克拉通南缘碰撞俯冲而产生反弹,两者的共同作用使得秦岭微地块处于板内延伸。秦岭微地块向华北克拉通俯冲的过程中,商丹断裂以北的冲断造山带也向南迎冲,造成晚古生代微秦岭北缘地壳负负载挠曲,在吴家山东西一线形成前隆构造(范效仁, 2001; 张东旭和程彧, 2002; 冯益民等, 2003)。寨上金矿位于吴家山前隆向西延伸的北侧,产于隆起前陆盆地中的卓洛堡-扎麻树-国营牛场-申都牧场背斜北西段,其所在构造区域属于岷礼前陆盆地。该前陆盆地在海西期受到自南向北的逆冲推覆和区域内断裂左行走滑剪切的共同作用,形成了一系列的断裂和褶皱(于岚, 2004; 喻万强, 2015),为矿床的形成提供了有利的导矿通道及容矿构造。二叠纪沿吴家山隆起的隆升延展作用为流体及成矿物质的运移和富集提供了必要的动力条件(杨军禄和冯益民, 1999)。前人研究得出西秦岭江里沟岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年为 264.0 ± 1.4 Ma, 中川花岗闪长岩年龄为 264.0 ± 1.3 Ma(高婷, 2011; 孙小攀等, 2013),在误差范围内与本文得出的寨上金矿第一期成矿($273\text{Ma} \pm 10\text{Ma}$, $273 \pm 22\text{Ma}$)具有时空上的一致性,说明至少在中二叠世晚期存在构造岩浆活动。矿床所在的岷-礼盆地其沉积地层有较高的金背景值(毛光剑, 2009),岩浆活动使该带地壳深部物质重熔,携带有利元素沿构造裂隙侵位并使地层中的 Au 元素活化,当 Au 超过溶解度极限时析出,在成矿有利部位富集成矿,形成第一期金矿床。

寨上金矿钨成矿时代是晚三叠世(220Ma 左右),晚于秦岭造山带主造山期($242 \pm 21\text{Ma}$),为三叠纪华北板块与华南板块的碰撞造山期,区内由挤压向伸展转变,地壳减薄,岩浆热液携带 W 等元素侵入,并在构造有利部位富集成矿。该期成矿在时空和成因上与同时代富钨的闪长玢岩脉(220 ~ 210Ma)关系密切,也与西秦岭地区主要的构造-岩浆事件相对应,属于晚三叠世钨、钼、铜成矿系列(余超, 2015; 吕喜旺等, 2017; 杨瀚文等, 2021)。

秦岭造山带从印支-燕山早期广泛的后造山伸展垮塌转为中-晚燕山期强烈的北缘隆升陆内造山及形成巨大的盆地的过程,也即构造体制大转折和秦岭岩石圈地幔流变减薄所引发的壳幔强烈作用(郑德文等, 2004)。在南北挤压和拉张应力作用下,产生了褶皱隆起、逆冲推覆、韧脆性剪切及伸展拉张等构造活动。构造变形为成矿提供了动力及良好的空间。构造热效应与地热梯度驱动流体活化迁移,侵入金背景值高的泥盆系和二叠系,流体与围岩发生物质交换,围岩中的碳酸铁溶解并释放铁,溶解后的铁被硫化,随后运移到裂

隙发育部位,随着含金流体与围岩的混合及压力突然下降,引起流体沸腾,导致寨上金矿床中自然金的沉淀,在构造有利部位富集成矿,形成寨上金矿第三期成矿(140~120Ma)。晚期成矿叠加在前两期矿床之上并进行改造。该地区构造演化的多期多阶段性造成不同成矿事件共享一套有利的赋矿构造体系,寨上金矿是多期成矿事件与西秦岭造山带及岩浆事件同步演化的结果(马星华等,2008;刘家军等,2010c;穆新华和刘光智,2010;Liu *et al.*, 2015;吕喜旺等,2017;杨瀚文等,2021)。

5.4 找矿指示意义

西秦岭地区从早泥盆世晚期或中泥盆世开始板内伸展裂陷形成裂陷盆地,到中二叠世末,位于西秦岭、东昆仑造山带和扬子地块之间的阿尼玛卿小洋盆的关闭使得西秦岭北部发生挤压隆起,为该带地壳深部物质重熔提供了动力学条件与岩浆活动的空间。因而在中、晚二叠世有花岗质岩浆侵入,到了晚二叠世西秦岭再次发生伸展裂陷(高婷,2011)。孙廷贵(2004)通过苦海-赛什塘蛇绿构造混杂岩带内的构造片岩(269Ma,全岩 Rb-Sr)、纤闪石单矿物 ^{40}Ar - ^{39}Ar 变质年龄(278Ma)及不同部位片理化变砂岩(274Ma、269Ma)的同位素年代学研究,得出该年龄值是西秦岭与东昆仑发生衔接转换的一个非常重要的时期,即共和坳拉谷俯冲碰撞的时间。前人(高婷,2011;李婷等,2012;孙小攀等,2013;徐学义等,2014)利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年法得出西秦岭江里沟二长花岗岩、中川二长花岗岩及花岗闪长岩的谐和年龄分别为 $264.0 \pm 1.4\text{Ma}$ (MSWD = 0.69)、 $264.8 \pm 2.0\text{Ma}$ (MSWD = 0.38) 及 $264.4 \pm 1.3\text{Ma}$ (MSWD = 0.43),即它们形成于晚二叠世,而岩石地球化学成分显示江里沟与中川岩体为喜马拉雅型花岗岩,即该岩体与加厚的活动陆缘环境有关。到了中二叠世末,随着南部阿尼玛卿洋盆闭合及共和坳拉谷俯冲碰撞的远程效应的影响,导致地壳增厚温度升高,为该区域深部物质重熔侵位提供了动力与岩浆活动空间,也为矿物质的运移与沉淀提供了空间(孙小攀等,2013)。

寨上金矿第一期金成矿年龄为 273Ma 左右,在时空上与区域内阿尼玛卿洋盆闭合、共和坳拉谷俯冲碰撞、江里沟及中川喜马拉雅型岩体的发生时间有较高的一致性,虽然目前还未有直接证据表明该期金矿与同时代的岩体有着直接的成因关系,但该结论也从侧面验证了前人(殷勇和殷先明,2009;张旗等,2009;高婷,2011;徐学义等,2012,2014)提出的“地壳加厚有利于形成金矿床及喜马拉雅型花岗岩与金矿关系密切”等结论。研究发现,美国许多卡林-类卡林型金矿区既有脉岩,也有侵入岩和火山岩发育,且部分是喜马拉雅型的,有些矿区虽无侵入岩露头出现,但推测在深部有隐伏岩体(Ressel and Henry,2006)。西秦岭卡林型金矿大部分与埃达克岩或喜马拉雅型花岗岩在时空上具有相关性(张旗等,2008),因而今后在西秦岭开展找矿工作,要突破传统的时空限制。通过本次研究发现西秦岭地区至少在二叠纪晚

期就有金成矿事件,早于原先得出的印支晚期-燕山期成矿(张复新等,2001;陈衍景等,2004)。喜马拉雅型花岗岩与金关系密切,是找金矿的一个重要标志,应在围绕岩体找矿的基础上向外扩大找矿范围,二叠纪岩体出露较少,可能由于该区域推覆构造发育,部分岩体被掩盖。综上所述,该区域从构造、岩浆岩条件或者理论层面都有着形成金矿床的巨大潜力。

6 结论

通过对寨上金矿主要载金矿物黄铁矿中 Rb-Sr、Re-Os 同位素体系、S 同位素及微量元素特征研究,获得以下认识:

(1)结合前人研究结果表明,寨上金矿至少存在三期成矿事件,其中第一期金成矿的 Rb-Sr、Re-Os 等时线年龄为 273Ma 左右,该年龄在西秦岭已探明的金矿床中尚无报道,为该区域寻找金矿床拓宽了时间轴;

(2)同位素和微量元素研究表明,寨上金矿成矿物质来源为深源物质与壳源物质的混合;

(3)寨上金矿可能的成矿模式为:在构造作用下,二叠纪岩浆热液沿断裂通道上升到有较高金背景值盆地中的褶皱带,使地层中的金活化,于构造有利部位卸载成矿,形成早期金矿床,后期钨矿化及金矿化叠加在早期金矿床之上;

(4)寨上金矿第一期金成矿事件年代在时空上与区域内阿尼玛卿洋盆闭合、共和坳拉谷俯冲碰撞、江里沟及中川喜马拉雅型岩体的发生时间基本吻合,符合“地壳加厚有利于形成金矿床及喜马拉雅型花岗岩与金矿关系密切”的结论,对在该区域寻找同时代金矿具有一定的指示意义。

致谢 感谢编辑部老师及两位审稿专家的细致审稿并提出了宝贵的修改意见,使得本文能够进一步完善,同时也提高了作者的写作和学术水平。

References

- Barker SLL, Hickey KA, Cline JS, Dipple GM, Kilburn MR, Vaughan JR and Longo AA. 2009. Uncloaking invisible gold: Use of NanoSIMS to evaluate gold, trace elements, and sulfur isotopes in pyrite from Carlin-type gold deposits. *Economic Geology*, 104(7): 897–904
- Basori MBI, Gilbert S, Large RR and Zaw K. 2018. Textures and trace element composition of pyrite from the Bukit Botol volcanic-hosted massive sulphide deposit, Peninsular Malaysia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 158: 173–185
- Chen FC, Deng J, Wang QF, Huizenga JM, Li GJ and Gu YW. 2020. LA-ICP-MS trace element analysis of magnetite and pyrite from the Hetaoping Fe-Zn-Pb skarn deposit in Baoshan block, SW China: Implications for ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 117: 103309
- Chen MH, Mao JW, Li C, Zhang ZQ and Dang Y. 2015. Re-Os isochron ages for arsenopyrite from Carlin-like gold deposits in the Yunnan-Guizhou-Guangxi “Golden Triangle”, southwestern China. *Ore Geology Reviews*, 64: 316–327

- Chen YC, Wang PA, Qin KL, Zhao DH and Mao JW. 1994. Metallogenic series of main ore deposits and regional metallogeny in the Qinling area. *Mineral Deposits*, 13(4): 289–298 (in Chinese with English abstract)
- Chen YG, Zhao YS, Zhang GL, Ma DX, Lu YM and Chang CJ. 2004. Tectonic geochemistry of the Zhaishang gold deposit, Gansu. *Gold Geology*, 10(4): 61–65 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Zhang J, Zhang FX, Pirajno F and Li C. 2004. Carlin and carlin-like gold deposits in western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model. *Geological Review*, 50(2): 134–152 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ and Santosh M. 2014. Triassic tectonics and mineral systems in the Qinling Orogen, central China. *Geological Journal*, 49(4–5): 338–358
- Cook NJ and Chrysosoulis SL. 1990. Concentrations of invisible gold in the common sulfides. *The Canadian Mineralogy*, 28(1): 1–16
- Dejonghe L, Bouléque J, Demaiffe D and Létolle R. 1989. Isotope geochemistry (S, C, O, Sr, Pb) of the Chaudfontaine mineralization (Belgium). *Mineralium Deposita*, 24(2): 132–140
- Duran CJ, Dubé-Loubert H, Pagé P, Barnes SJ, Roy M, Savard D, Cave BJ, Arguin JP and Mansur ET. 2019. Applications of trace element chemistry of pyrite and chalcopyrite in glacial sediments to mineral exploration targeting: Example from the Churchill Province, northern Quebec, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, 196: 105–130
- Fan XR. 2001. The study of tectonic evolution and sedimentary-exhalative metallization of the western Qinling orogenic belt. Ph. D. Dissertation. Changsha: Central South University, 14–32 (in Chinese with English abstract)
- Feng YM, Cao XD, Zhang EP, Hu YX, Pan XP, Yang JL, Jia QZ and Li WM. 2003. Tectonic evolution framework and nature of the West Qinling orogenic belt. *Northwestern Geology*, 36(1): 1–10 (in Chinese with English abstract)
- Fleet ME, Chrysosoulis SL, MacLean PJ, Davidson R and Weisener CG. 1993. Arsenian pyrite from gold deposits: Au and As distribution investigated by SIMS and EMP, and color staining and surface oxidation by XPS and LIMS. *The Canadian Mineralogist*, 31(1): 1–17
- Fu SL, Hu RZ, Chen YW and Luo JC. 2016. Chronology of the Longshan Au-Sb deposit in central Hunan Province: Constraints from pyrite Re-Os and zircon U-Th/He isotopic dating. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11): 3507–3517 (in Chinese with English abstract)
- Gao T. 2011. The LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating, geology and geochemistry, tectonic setting of several important intrusions from the north part of the western stage of West Qinling and their relationship with mineralization. Master Degree Thesis. Xi'an: Chang'an University, 21–74 (in Chinese with English abstract)
- Han YW, Ma ZD, Zhang HF, Zhang BR, Li FL, Gao S and Bao ZY. 2003. *Geochemistry*. Beijing: Geological Publishing House, 218–245 (in Chinese)
- Hou ML, Jiang SY, Jiang YH and Ling HF. 2006. S-Pb isotope geochemistry and Rb-Sr geochronology of the Penglai gold field in the eastern Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2525–2533 (in Chinese with English abstract)
- Hu JM, Liu GZ, Liu XH and Xu SP. 2008. Geological-geochemical characteristics and genetic discussion of Zhaishang gold deposit in the West Qinling area. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 23(4): 298–304 (in Chinese with English abstract)
- Huang XW, Gao JF, Qi L and Zhou MF. 2015. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite and Re-Os dating of pyrite: The Tianhu hydrothermally remobilized sedimentary Fe deposit, NW China. *Ore Geology Reviews*, 65: 900–916
- Jiang SY, Yang JH, Zhao KD and Yu JM. 2000. Re-Os isotope tracer and dating methods in ore deposits research. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 36(6): 669–677 (in Chinese with English abstract)
- Jin XD, Li WJ, Wu HY, Zhang LC and Du AD. 2010. Development of Re-Os isotopic dating analytical technique and determination know-how on ICP-MS precise dating for molybdenite. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1617–1624 (in Chinese with English abstract)
- Koglin N, Frimmel HE, Minter WEL and Brätz H. 2010. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoarchean to Palaeoproterozoic placer deposits. *Mineralium Deposita*, 45(3): 259–280
- Large RR, Danyushevsky L, Hollit C, Maslennikov V, Meffre S, Gilbert S, Bull S, Scott R, Emsbo P, Thomas H, Singh B and Foster J. 2009. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: Implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits. *Economic Geology*, 104(5): 635–668
- Li J, Sun YL, He K, Xian WS, Qiu JJ and Zhang X. 2010. The improved molybdenite Re-Os dating method and its application. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 642–648 (in Chinese with English abstract)
- Li T, Xu XY, Chen JL, Wang HL, Li ZP and Zhang X. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and tectonic setting of Zhongchuan intrusion, Lixian area, western Qinling orogen. *Geological Bulletin of China*, 31(6): 875–883 (in Chinese with English abstract)
- Li WL, Chen YG, Zhao YS, Zhang GL, Zhang YJ and Lu YM. 2006. U-Pb isotopic determination by SHRIMP method for Zirconium in gold-bearing quartz veins of Zhaishang gold deposit in Gansu Province and its geological meaning. *Gold*, 27(7): 4–7 (in Chinese with English abstract)
- Liao YF. 2013. Study on the metallogenic rules and the model of the Zhaishang gold deposit, Minxian, Gansu Province. Master Degree Thesis. Xi'an: Chang'an University, 29–40 (in Chinese with English abstract)
- Liu G, Yu WQ and Wang XJ. 2010. Anti-S-type anticline structure and its control on mineralization in Zhaishang gold deposit, Gansu Province. *Mineral Deposits*, 29(Suppl.1): 53–54 (in Chinese)
- Liu GZ, Liu JJ and Liu XH. 2009. Geochemical characteristics and genetic model of the Zhaishang gold deposits in West Qinling. *Geology and Exploration*, 45(2): 27–37 (in Chinese with English abstract)
- Liu J, Wu G, Li Y, Zhu MT and Zhong W. 2012. Re-Os sulfide (chalcopyrite, pyrite and molybdenite) systematics and fluid inclusion study of the Duobaoshan porphyry Cu (Mo) deposit, Heilongjiang Province, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 300–312
- Liu JC, Wang YT, Hu QQ, Wei R, Huang SK, Sun ZH and Hao JL. 2020. Ore genesis of the Fancha gold deposit, Xiaqingling goldfield, southern margin of the North China Craton: Constraints from pyrite Re-Os geochronology and He-Ar, in-situ S-Pb isotopes. *Ore Geology Reviews*, 119: 103373
- Liu JJ, Liu GZ, Liao YF, Zheng WJ, Yue LX, Hua SG, Mao GJ and Wu SH. 2008. Discovery and significance of scheelite orebodies in the Zhaishang gold deposit, southern Gansu. *Geology in China*, 35(6): 1113–1120 (in Chinese with English abstract)
- Liu JJ, Mao GJ, Wu SH, Liu GZ, Liao YF, Zheng WJ, Hua SG and Yue LX. 2010a. Discovery and significance of native gold in the Zhaishang gold deposit, southern Gansu, China. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 115–123 (in Chinese with English abstract)
- Liu JJ, Mao GJ, Wu SH, Liu GZ, Liao YF, Zheng WJ, Hua SG and Yue LX. 2010b. Characteristics of mineral association and mechanism of Au precipitation in the Zhaishang gold deposit, southern Gansu. *Geology in China*, 37(2): 453–462 (in Chinese with English abstract)
- Liu JJ, Mao GJ, Wu SH, Wang JP, Ma XH, Li LX, Liu GZ, Liao YF and Zheng WJ. 2010c. Metallogenic characteristics and formation mechanism of Zhaishang gold deposit, southern Gansu Province. *Mineral Deposits*, 29(1): 85–100 (in Chinese with English abstract)
- Liu JJ, Dai HZ, Zhai DG, Wang JP, Wang YH, Yang LB, Mao GJ, Liu XH, Liao YF, Yu C and Li QZ. 2015. Geological and geochemical characteristics and formation mechanisms of the Zhaishang Carlin-like type gold deposit, western Qinling Mountains, China. *Ore Geology*

Reviews, 64: 273 – 298

- Liu JJ, Zhai DG, Wang DZ, Gao S, Yin C, Liu ZJ, Wang JP, Wang YH and Zhang FF. 2020. Classification and mineralization of the Au-(Ag)-Te-Se deposits. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 79 – 98 (in Chinese with English abstract)
- Liu XH, Liu GZ, Wang SJ and Liu MW. 2009. Occurrence of submicro gold in a super-large-sized gold deposit in Zhaishang of Minxian County, Gansu Province. *Northwestern Geology*, 42(3): 47 – 55 (in Chinese with English abstract)
- Liu XH, Liu GZ, Liu MW and Gen H. 2010. The first discovery of microscopical gold in super-large gold deposit in Zhaishang, western Qinling and its geological significance. *Mineral Deposits*, 29(Suppl. 2): 1 – 6 (in Chinese)
- Lu GQ and Lu HZ. 1993. A review of isotopic geochronology and radiogenic isotopes of fluid inclusions. *Geology-Geochemistry*, 21(1): 48 – 53 (in Chinese)
- Lü XW, Wang JZ, Zheng WJ and Ma YB. 2017. Genesis and prospecting potential of scheelite in the Zhaishang gold deposit, Minxian County, Gansu Province. *Northwestern Geology*, 50(2): 156 – 166 (in Chinese with English abstract)
- Lu YM, Li HG, Chen YG and Zhang GL. 2006a. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of alteration minerals from Zhaishang gold deposit in Minxian County, Gansu Province, and its geological significance. *Mineral Deposits*, 25(5): 590 – 597 (in Chinese)
- Lu YM, Li HG, Chen YG, Zhang GL, Zhang YJ and Li ZH. 2006b. Geological and geochemical features and origin of Zhaishang gold deposit in the Minxian County, Gansu. *Geology and Prospecting*, 42(4): 25 – 31 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Geochronology Centre, 4: 1 – 74
- Ma XH, Liu JJ, Li LX, Mao GJ and Guo YQ. 2008. Zhaishang gold deposit in Gansu Province: Characteristics, evolution of ore-forming fluids and their metallogenic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2069 – 2078 (in Chinese with English abstract)
- Mao GJ. 2009. Research on metallogenic process of the Zhaishang gold deposit in southern Gansu, China. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 47 – 100 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Qiu YM, Goldfarb RJ, Zhang ZC, Garwin S and Ren FS. 2002. Geology, distribution, and classification of gold deposits in the western Qinling belt, central China. *Mineralium Deposita*, 37(3–4): 352 – 377
- Meisel T, Walker RJ and Morgan JW. 1996. The osmium isotopic composition of the Earth's primitive upper mantle. *Nature*, 383(6600): 517 – 520
- Meng WY. 2017. Geological characteristics and metallogenic regularities of the Zhaishang gold deposit in Gansu Province. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 10 – 68 (in Chinese with English abstract)
- Mu XH and Liu GZ. 2010. Geological and geochemical characteristics of Zhaishang gold deposit in Minxian County, Gansu Province. *Mineral Deposits*, 29(Suppl. 2): 71 – 78 (in Chinese)
- Ohmoto H and Rey RO. 1979. Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes HL (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 509 – 567
- Palmer MR and Turekian KK. 1986. $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ in marine manganese nodules and the constraints on the crustal geochemistries of rhenium and osmium. *Nature*, 319(6050): 216 – 220
- Ressel MW and Henry CD. 2006. Igneous geology of the Carlin trend, Nevada: Development of the Eocene plutonic complex and significance for Carlin-type gold deposits. *Economic Geology*, 101(2): 347 – 383
- Rollison HR. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. In: Yang XM, Yang XY and Chen SX (trans.). Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2000: 1 – 275
- Sang HQ, Wang SS, Hu SL and Qiu J. 1993. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating method and Ar isotopic mass spectrometry analysis of quartz. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 15(2): 17 – 27 (in Chinese with English abstract)
- Seal II RR. 2006. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61(1): 633 – 677
- Selby D and Creaser RA. 2005. Direct radiometric dating of hydrocarbon deposits using rhenium-osmium isotopes. *Science*, 308(5726): 1293 – 1295
- Stein HJ, Sundblad K, Markey RJ, Morgan JW and Motuza G. 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kivisuo, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting. *Mineralium Deposita*, 33(4): 329 – 343
- Stein HJ, Morgan JW and Scherstén A. 2000. Re-Os dating of low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides: The Harnäs gold deposit, Southwest Sweden, records continental-scale tectonic events. *Economic Geology*, 95(8): 1657 – 1671
- Sun QF, Wang KY, Wang YC, Cai WY and Ma XL. 2021. Superimposing mineralization in the Zhengguang Au-Zn deposit, NE China: Evidence from pyrite Re-Os geochronology, fluid inclusion, and H-O-S-Pb isotopes. *Ore Geology Reviews*, 137: 104307
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmaism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313 – 345
- Sun TG. 2004. Gonghe aulacogen and conjugate and transfer between the West Qinling and East Kunlun orogens. Ph. D. Dissertation. Xi'an: Northwest University, 52 – 173 (in Chinese with English abstract)
- Sun XP, Xu XY, Chen JL, Gao T, Li T, Li XB and Li XY. 2013. Geochemical characteristics and chronology of the Jiangligou granitic pluton in West Qinling and their geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 87(3): 330 – 342 (in Chinese with English abstract)
- Sung YH, Brugger J, Ciobanu CL, Pring A, Skinner W and Nugus M. 2009. Invisible gold in arsenian pyrite and arsenopyrite from a multistage Archean gold deposit: Sunrise Dam, Eastern Goldfields Province, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 44(7): 765 – 791
- Taylor SR and SM McLennan. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1 – 312
- Ulrich T, Long DGF, Kamber BS and Whitehouse MJ. 2011. In situ trace element and sulfur isotope analysis of pyrite in a Paleoproterozoic gold placer deposit, Pardo and Clement Townships, Ontario, Canada. *Economic Geology*, 106(4): 667 – 686
- Vernon R, Holdsworth RE, Selby D, Dempsey E, Finlay AJ and Fallick AE. 2014. Structural characteristics and Re-Os dating of quartz-pyrite veins in the Lewisian Gneiss Complex, NW Scotland: Evidence of an Early Paleoproterozoic hydrothermal regime during terrane amalgamation. *Precambrian Research*, 246: 256 – 267
- Walker RJ, Carlson RW, Shirey SB and Boyd FR. 1989. Os, Sr, Nd, and Pb isotope systematics of southern African peridotite xenoliths: Implications for the chemical evolution of subcontinental mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(7): 1583 – 1595
- Walker RJ, Morgan JW, Horan MF, Czamanske GK, Krogstad EJ, Fedorenko VA and Kunilov VE. 1994. Re-Os isotopic evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusions, Siberia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(19): 4179 – 4197
- Wang JZ, Li JW, Zhao XF, Ma CQ, QU WJ and Du AD. 2008. Re-Os dating of pyrrhotite from the Chaoshan gold skarn, eastern Yangtze Craton, eastern China. *International Geology Review*, 50(4): 392 – 406
- Wang SS. 1992. Constraints of chlorine on $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating and calculation of high-precise $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ ages. *Scientia Geologica Sinica*, 37(4): 369 – 378 (in Chinese with English abstract)
- Wang WF, Zhao TX, Gong YJ and Geng H. 2008. Ore-forming regularity and prospecting orientation in the Zhaishang gold deposit of

- Gansu Province. Mineral Deposits, 27 (Suppl. 1): 199 – 208 (in Chinese)
- Xu XY, Li T, Chen JL and Li P. 2012. The granitoids magmatism and mineralization in west section of the western Qinling, NW China. Northwestern Geology, 45 (4): 76 – 82 (in Chinese with English abstract)
- Xu XY, Chen JL, Gao T, Li P and Li T. 2014. Granitoid magmatism and tectonic evolution in northern edge of the Western Qinling Terrane, NW China. Acta Petrologica Sinica, 30 (2): 371 – 389 (in Chinese with English abstract)
- Yang HW, Wang JZ, Wei LY, Zhao J, Ma C, Liu M, Sun B and Wei WH. 2021. Genesis of the super-large tungsten, gold (antimony) polymetallic deposit in Zhaishang, Gansu Province. Northwestern Geology, 54 (1): 125 – 138 (in Chinese with English abstract)
- Yang JL and Feng YM. 1999. Rising course and age of the Wujiashan Dome in the West Qinling. Northwestern Geology, 32 (4): 1 – 4 (in Chinese with English abstract)
- Yin Y and Yin XM. 2009. Porphyry Cu-Mo-Au mineralization related to adakite and Himalayan type granite in the northern margin of West Qinling. Acta Petrologica Sinica, 25 (5): 1239 – 1252 (in Chinese with English abstract)
- Ying LJ, Wang CH, Tang JX, Wang DH, Qu WJ and Li C. 2014. Re-Os systematics of sulfides (chalcopyrite, bornite, pyrite and pyrrhotite) from the Jiama Cu-Mo deposit of Tibet, China. Journal of Asian Earth Sciences, 79: 497 – 506
- Yu C. 2015. Research on metallogenic character and nonlinear metallogenic dynamics at the Zhaishang gold deposit, western Qinling Mountains, China. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 18 – 76 (in Chinese with English abstract)
- Yu L. 2004. Geological and geochemical characteristics and genesis of Zhaishang gold deposit, Minxian County, Gansu Province. Master Degree Thesis. Xi'an: Northwest University, 8 – 52 (in Chinese)
- Yu WQ, Yan FZ, Yang LQ, Ge LS, Huang H, Zhang WH and Yuan SS. 2014. Discussion on the source of ore-forming materials and ore-forming fluids in Zhaishang large gold deposit, Gansu Province. Mineral Deposits, 33 (Suppl. 1): 589 – 590 (in Chinese)
- Yu WQ. 2015. The spatial structure of metallogenic in Zhaishang gold deposit, Western Qinling. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 106 – 109 (in Chinese with English abstract)
- Yuan SD, Peng JT, Hu RZ, Li HM, Shen NP and Zhang DL. 2008. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China). Mineralium Deposita, 43 (4): 375 – 382
- Zang ZJ, Liu W and Dong LL. 2021. Geology, geochemistry and Re-Os age of the Qiaoxiahala deposit in NW China: Evidence of an overprinted Fe(-Cu/Au) deposit. Journal of Earth Science, 32 (1): 208 – 218
- Zhang DX and Cheng Y. 2002. Tectonic evolution of Limin foreland basin in west Qinling and its deformation analysis. Mineral Resources and Geology, 16 (5): 273 – 276 (in Chinese with English abstract)
- Zhang FX, Ji JL, Long LL and Fan CH. 2001. Comparative features of carlin-para-carlin type gold deposits in the South Qinling and gold deposits in other areas. Geological Review, 47 (5): 492 – 499 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Meng QR, Yu ZP, Sun Y, Zhou DW and Guo AL. 1996. Orogenic process and dynamic characteristics in the Qinling orogenic belt. Science in China (Series D), 26 (3): 193 – 200 (in Chinese)
- Zhang GW, Dong YP and Yao AP. 1997. The crustal compositions, structures and tectonic evolution of the Qinling orogenic belt. Geology of Shaanxi, 15 (2): 1 – 14 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 1 – 60 (in Chinese)
- Zhang HY. 2012. Study of ICP-MS detection about trace elements and noble metal elements in sulfides. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 17 – 60 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Xue CJ, Cao JH and Peng J. 2019. Re-Os dating and S-Pb isotopic and rare earth elements analyses of the Gaozhuang gold deposit in southwestern Henan, China. Earth Science Frontiers, 26 (5): 163 – 173 (in Chinese with English abstract)
- Zhang K and Li HY. 2014. Migration of trace elements in pyrite from orogenic gold deposits: Evidence from LA-ICP-MS analyses. Acta Geologica Sinica, 88 (Suppl. 2): 841 – 842
- Zhang Q, Wang Y, Xiong XL and Li CD. 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity. Beijing: China Land Press, 1 – 344 (in Chinese)
- Zhang Q, Yin XM, Yin Y, Jin WJ, Wang YL and Zhao YQ. 2009. Issues on metallogenesis and prospecting of gold and copper deposits related to adakite and Himalayan type granite in West Qinling. Acta Petrologica Sinica, 25 (12): 3103 – 3122 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XD, Yang RD, Wang W and Wei HR. 2011. The geochemical characteristics and significance of trace element and REE in Pingqiu gold deposits, southeastern Guizhou. Journal of Mineralogy and Petrology, 31 (1): 63 – 69 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Zeng QD, Gao S, Chu SX, Li DT, Cheng ZD, Ma LS and Guo YP. 2019. The Rb-Sr isotopic dating of sulfides and geological significance of the Lushi polymetallic ore-concentrated area in southern margin of the North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 35 (7): 2013 – 2025 (in Chinese with English abstract)
- Zheng DW, Zhang PZ, Wan JL, Li DM, Wang F, Yuan DY and Zhang GL. 2004. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, fission track evidence of Mesozoic tectonic in northern margin of West Qinling mountain. Acta Petrologica Sinica, 20 (3): 697 – 706 (in Chinese with English abstract)
- Zheng W, Chen MH, Xu LG, Zhao HJ, Ling SB, Wu Y, Hu YG, Tian Y and Wu XD. 2013. Rb-Sr isochron age of Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Guangdong Province and its geological significance. Mineral Deposits, 32 (2): 259 – 272 (in Chinese with English abstract)
- Zheng W, Mao JW, Zhao CS, Ouyang HG and Wang XY. 2016. Re-Os geochronology of molybdenite from Yinyan porphyry Sn deposit in South China. Resource Geology, 66 (1): 63 – 70
- Zheng W, Ouyang HG, Zhao HJ, Zhao CS, Yu XF, Luo DL, Huang HG and Ouyang ZX. 2017. Re-Os dating for the molybdenite from the Xiping Mo-Cu polymetallic deposit in Guangdong Province and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 33 (3): 843 – 858 (in Chinese with English abstract)
- Zheng WJ, Liu XH, Chen CH and Zhang YX. 2010. Geological characteristics and prospecting marks of tungsten deposit in Zhaishang gold-tungsten deposit, Minxian County, Gansu Province. Northwestern Geology, 43 (3): 85 – 92 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JC, Jiang SY, Wang XL, Yang JH and Zhang MQ. 2006. Re-Os isotopic compositions of Late Mesozoic mafic rocks from southeastern coast of China. Acta Petrologica Sinica, 22 (2): 407 – 413 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Zeng YS and Gu LB. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, Northwest China. Journal of Asian Earth Sciences, 27 (1): 61 – 77

附中文参考文献

- 陈衍景, 张静, 张复新, Pirajno F, 李超. 2004. 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式. 地质论评, 50 (2): 134 – 152
- 陈勇敢, 赵玉锁, 张国立, 马德锡, 路彦明, 常春郊. 2004. 甘肃察上金矿床构造地球化学特征. 黄金地质, 10 (4): 61 – 65

- 陈毓川, 王平安, 秦克令, 赵东宏, 毛景文. 1994. 秦岭地区主要金属矿床成矿系列的划分及区域成矿规律探讨. 矿床地质, 13(4): 289–298
- 范效仁. 2001. 西秦岭构造演化与喷流成矿研究. 博士学位论文. 长沙: 中南大学, 14–32
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 胡云绪, 潘晓萍, 杨军录, 贾群子, 李文明. 2003. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质. 西北地质, 36(1): 1–10
- 付山岭, 胡瑞忠, 陈佑纬, 骆金诚. 2016. 湘中龙山大型金锑矿床成矿时代研究——黄铁矿 Re-Os 和锆石 U-Th/He 定年. 岩石学报, 32(11): 3507–3517
- 高婷. 2011. 西秦岭西段北部重要侵入体年代学、地质地球化学、形成构造环境及与成矿作用关系. 硕士学位论文. 西安: 长安大学, 21–74
- 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 张本仁, 李方林, 高山, 鲍征宇. 2003. 地球化学. 北京: 地质出版社, 218–245
- 侯明兰, 蒋少涌, 姜耀辉, 凌洪飞. 2006. 胶东蓬莱金成矿区的 S-Pb 同位素地球化学和 Rb-Sr 同位素年代学研究. 岩石学报, 22(10): 2525–2533
- 胡建民, 刘光智, 刘新会, 徐述平. 2008. 西秦岭寨上金矿地质-地球化学特征及成因探讨. 地质找矿论丛, 23(4): 298–304
- 蒋少涌, 杨竞红, 赵葵东, 于际民. 2000. 金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究. 南京大学学报(自然科学), 36(6): 669–677
- 靳新娣, 李文君, 吴华英, 张连昌, 杜安道. 2010. Re-Os 同位素定年方法进展及 ICP-MS 精确定年测试关键技术. 岩石学报, 26(5): 1617–1624
- 李晶, 孙亚莉, 何克, 洗伟胜, 仇建军, 张旭. 2010. 辉钼矿 Re-Os 同位素定年方法的改进与应用. 岩石学报, 26(2): 642–648
- 李婷, 徐学义, 陈隽璐, 王洪亮, 李智佩, 张欣. 2012. 西秦岭造山带礼县地区中川岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造环境. 地质通报, 31(6): 875–883
- 李文良, 陈勇敢, 赵玉锁, 张国利, 张玉杰, 路彦明. 2006. 甘肃寨上金矿床含金石英脉中锆石 SHRIMP 法 U-Pb 同位素测定及地质意义. 黄金, 27(7): 4–7
- 廖延福. 2013. 甘肃省岷县寨上金矿床成矿规律与成矿模式研究. 硕士学位论文. 西安: 长安大学, 29–40
- 刘纲, 喻万强, 王晓军. 2010. 甘肃寨上金矿区反 S 型背斜构造及其对成矿的控制. 矿床地质, 29(增1): 53–54
- 刘光智, 刘家军, 刘新会. 2009. 西秦岭寨上金矿床地球化学特征及成因机制研究. 地质与勘探, 45(2): 27–37
- 刘家军, 刘光智, 廖延福, 郑卫军, 岳连雄, 华曙光, 毛光剑, 吴胜华. 2008. 甘肃寨上金矿床中白钨矿矿体的发现及其特征. 中国地质, 35(6): 1113–1120
- 刘家军, 毛光剑, 吴胜华, 刘光智, 廖延福, 郑卫军, 华曙光, 岳连雄. 2010a. 甘肃礼县-岷县成矿带西段寨上金矿床中自然金的发现及成因意义. 地质通报, 29(1): 115–123
- 刘家军, 毛光剑, 吴胜华, 刘光智, 廖延福, 郑卫军, 华曙光, 岳连雄. 2010b. 甘肃寨上金矿床矿物组成特征与矿质沉淀机理. 中国地质, 37(2): 453–462
- 刘家军, 毛光剑, 吴胜华, 王建平, 马星华, 李立兴, 刘光智, 廖延福, 郑卫军. 2010c. 甘肃寨上金矿床成矿特征与形成机理. 矿床地质, 29(1): 85–100
- 刘家军, 翟德高, 王大钊, 高燊, 尹超, 柳振江, 王建平, 王银宏, 张方方. 2020. Au-(Ag)-Te-Se 成矿系统与成矿作用. 地学前缘, 27(2): 79–98
- 刘新会, 刘光智, 王淑娟, 刘民武. 2009. 甘肃岷县寨上特大型金矿次显微金的赋存状态研究. 西北地质, 42(3): 47–55
- 刘新会, 刘光智, 刘民武, 耿宏. 2010. 西秦岭寨上特大型金矿首次发现显微可见金及其地质意义. 矿床地质, 29(增2): 1–6
- 鲁观清, 卢焕章. 1993. 流体包裹体同位素年代学与放射成因同位素研究评述. 地质地球化学, 21(1): 48–53
- 路彦明, 李汉光, 陈勇敢, 张国利. 2006a. 西秦岭寨上金矿床中石英和绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年. 矿床地质, 25(5): 590–597
- 路彦明, 李汉光, 陈勇敢, 张国利, 张玉杰, 李振华. 2006b. 甘肃岷县寨上金矿地质地球化学特征及成因. 地质与勘探, 42(4): 25–31
- 罗林森. 1993. 岩石地球化学. 见: 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜译. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000: 1–275
- 吕喜旺, 王建中, 郑卫军, 马永兵. 2017. 甘肃省岷县寨上金矿床白钨矿成因及找矿潜力. 西北地质, 50(2): 156–166
- 马星华, 刘家军, 李立兴, 毛光剑, 郭玉乾. 2008. 甘肃寨上金矿床成矿流体性质与成矿作用探讨. 岩石学报, 24(9): 2069–2078
- 毛光剑. 2009. 甘肃岷县寨上金矿床成矿作用研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 47–100
- 孟五一. 2017. 甘肃寨上金矿床地质特征与成矿规律. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 10–68
- 穆新华, 刘光智. 2010. 甘肃省岷县寨上金矿地质-地球化学特征及成矿机制. 矿床地质, 29(增2): 71–78
- 桑海清, 王松山, 胡世玲, 裘冀. 1993. 石英的⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年方法及 Ar 同位素质谱分析. 质谱学报, 15(2): 17–27
- 孙廷贵. 2004. 西秦岭-东昆仑造山带的衔接转换与共和坳拉谷. 博士学位论文. 西安: 西北大学, 52–173
- 孙小攀, 徐学义, 陈隽璐, 高婷, 李婷, 李现冰, 李晓英. 2013. 西秦岭江里沟花岗岩体地球化学特征、年代学及地质意义. 地质学报, 87(3): 330–342
- 王松山. 1992. 氯对⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年的制约及数据处理. 地质科学, 37(4): 369–378
- 王伟峰, 赵天心, 宫元吉, 耿洪. 2008. 甘肃省岷县寨上金矿床成矿规律与找矿方向研究. 矿床地质, 27(增1): 199–208
- 徐学义, 李婷, 陈隽璐, 李平. 2012. 西秦岭西段花岗岩浆作用与成矿. 西北地质, 45(4): 76–82
- 徐学义, 陈隽璐, 高婷, 李平, 李婷. 2014. 西秦岭北缘花岗质岩浆作用及构造演化. 岩石学报, 30(2): 371–389
- 杨瀚文, 王建中, 魏立勇, 赵军, 马承, 刘明, 孙彪, 魏文昊. 2021. 甘肃寨上超大型钨、金(锑)多金属矿床成因研究. 西北地质, 54(1): 125–138
- 杨军禄, 冯益民. 1999. 西秦岭吴家山隆起的隆升过程及时代. 西北地质, 32(4): 1–4
- 殷勇, 殷先明. 2009. 西秦岭北缘与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的斑岩型铜-钼-金成矿作用. 岩石学报, 25(5): 1239–1252
- 余超. 2015. 西秦岭寨上金矿床成矿特征与非线性成矿动力学研究.

- 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 18–76
- 于岚. 2004. 甘肃岷县寨上金矿床地质地球化学特征与成因探讨. 硕士学位论文. 西安: 西北大学, 8–52
- 喻万强, 阎凤增, 杨立强, 葛良胜, 黄辉, 张文华, 袁士松. 2014. 甘肃寨上大型金矿成矿物质、成矿流体来源探讨. 矿床地质, 33(增1): 589–590
- 喻万强. 2015. 西秦岭寨上金矿床成矿作用空间结构. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 106–109
- 张东旭, 程彧. 2002. 西秦岭礼岷前陆盆地构造演化及变形分析. 矿产与地质, 16(5): 273–276
- 张复新, 季军良, 龙灵利, 范春花. 2001. 南秦岭卡林型-似卡林型金矿床综合地质地球化学特征. 地质评论, 47(5): 492–499
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. 中国科学(D辑), 26(3): 193–200
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 1997. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化. 陕西地质, 15(2): 1–14
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1–60
- 张红雨. 2012. 硫化物矿物痕量及贵金属元素丰度 ICP-MS 测定方法研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 17–60
- 张健, 薛春纪, 曹纪虎, 彭姣. 2019. 豫西南高庄金矿床 Re-Os 定年及 S-Pb 同位素和 REE 示踪. 地学前缘, 26(5): 163–173
- 张旗, 王焰, 熊小林, 李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇. 北京: 中国大地出版社, 1–344
- 张旗, 殷先明, 殷勇, 金惟俊, 王元龙, 赵彦庆. 2009. 西秦岭与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的金铜成矿及找矿问题. 岩石学报, 25(12): 3103–3122
- 张晓东, 杨瑞东, 王伟, 魏怀瑞. 2011. 黔东南平秋金矿微量与稀土元素地球化学特征及意义. 矿物岩石, 31(1): 63–69
- 张哲铭, 曾庆栋, 高帅, 褚少雄, 李德亭, 程占东, 马留锁, 郭云鹏. 2019. 华北克拉通南缘卢氏多金属矿集区硫化物 Rb-Sr 定年及地质意义. 岩石学报, 35(7): 2013–2025
- 郑德文, 张培震, 万景林, 李大明, 王菲, 袁道阳, 张广良. 2004. 西秦岭北缘中生代构造活动的⁴⁰Ar/³⁹Ar、FT 热年代学证据. 岩石学报, 20(3): 697–706
- 郑伟, 陈懋弘, 徐林刚, 赵海杰, 凌世彬, 吴越, 胡耀国, 田云, 吴晓东. 2013. 广东天堂铜铅锌多金属矿床 Rb-Sr 等时线年龄及其地质意义. 矿床地质, 32(2): 259–272
- 郑伟, 欧阳荷根, 赵海杰, 赵财胜, 于晓飞, 罗大略, 黄华谷, 欧阳志侠. 2017. 广东锡坪钨铜多金属矿床辉钨矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义. 岩石学报, 33(3): 843–858
- 郑卫军, 刘新会, 陈彩华, 张益星. 2010. 甘肃岷县寨上金钨矿床中钨矿特征及找矿标志. 西北地质, 43(3): 85–92
- 周金城, 蒋少涌, 王孝磊, 杨竞红, 张孟群. 2006. 东南沿海晚中生代镁铁质岩的 Re-Os 同位素组成. 岩石学报, 22(2): 407–413