

陕西省凤太矿集区二里河铅锌矿床的成矿时代： 来自闪锌矿 Rb-Sr 同位素年龄的证据^{*}

胡乔青^{1,2} 王义天^{2**} 王瑞廷³ 李建华⁴ 代军治³ 王双彦⁴
HU QiaoQing^{1, 2}, WANG YiTian^{2**}, WANG RuiTing³, LI JianHua⁴, DAI JunZhi³ and WANG ShuangYan⁴

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室,中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083
2. 中国地质科学院矿产资源研究所,国土资源部成矿作用和资源评价重点实验室,北京 100037
3. 西北有色地质勘查局,西安 710054
4. 西北有色地质勘查局 717 总队二里河铅锌矿,宝鸡 721004
1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*
2. *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*
3. *Northwest Geological Exploration and Mining Bureau for Nonferrous Metals, Xi'an 710054, China*
4. *The Erlihe Lead-Zinc Mine of No. 717 Geological Party, Northwest Geological Exploration and Mining Bureau for Nonferrous Metals, Baoji 721004, China*

2011-10-25 收稿, 2011-11-30 改回.

Hu QQ, Wang YT, Wang RT, Li JH, Dai JZ and Wang SY. 2012. Ore-forming time of the Erlihe Pb-Zn deposit in the Fengxian-Taibai ore concentration area, Shaanxi Province: Evidence from the Rb-Sr isotopic dating of sphalerites. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1):258–266

Abstract The Bafangshan-Erlihe Pb-Zn deposit is located on the northwest of the Fengxian-Taibai (abbreviated Fengtai) ore concentration area, and the orebodies mainly occur at the contact zone between the Gudaoling Formation of Middle Devonian and the Xinghongpu Formation of Upper Devonian, controlled by NWW-trending Bafangshan-Erlihe anticline. In this paper, the Rb-Sr isotopic dating is carried out on the sphalerite from the main mineralization stage of the Erlihe Pb-Zn deposit, yielding an isochron age of $220.7 \pm 7.3\text{Ma}$, showing that the deposit formed in Late Triassic, and the age data is also a constraint on the Pb-Zn ore-forming time of the whole Fengtai ore concentration area. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ value of the sphalerite is 0.714145 ± 0.000031 , indicating that the ore-forming materials are mainly derived from the continental crust. In the context of regional geology, we suggest that the Erlihe Pb-Zn deposit is the product of the regional intensive tectono-magmatic-mineralization processes developed in the Fengxian-Taibai ore concentration area in Triassic.

Key words Rb-Sr isotopic dating; Ore-forming time; Pb-Zn deposit; Bafangshan-Erlihe; Fengxian-Taibai ore concentration area

摘 要 八方山-二里河铅锌矿床位于陕西凤县-太白(简称凤太)矿集区西北部,矿体主要产于中泥盆统古道岭组与上泥盆统星红铺组接触带中,受 NWW 向八方山-二里河背斜控制。本次工作对二里河铅锌矿床主成矿阶段的闪锌矿进行了 Rb-Sr 同位素测年研究,获得了等时线年龄为 $220.7 \pm 7.3\text{Ma}$,表明矿床形成于晚三叠世,该年龄对于整个凤太矿集区的铅锌成矿时代具有同样约束意义。闪锌矿的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 值为 0.714145 ± 0.000031 ,指示成矿物质可能主要来源于大陆壳。结合前人的研究成果分析认为,二里河铅锌矿床是凤太矿集区在印支期区域性强烈的构造-岩浆-成矿作用过程中的产物。

关键词 Rb-Sr 同位素测年;成矿时代;铅锌矿床;八方山-二里河;凤太矿集区

中图法分类号 P618.42; P618.43; P597.3

^{*} 本文受中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(K0801)和国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAB01A11)联合资助。
第一作者简介: 胡乔青,男,1986年生,硕士生,矿床学专业,E-mail: 535316362@qq.com
^{**} **通讯作者:** 王义天,男,1969年生,博士,研究员,从事构造与成矿研究,E-mail: wyt69@263.net

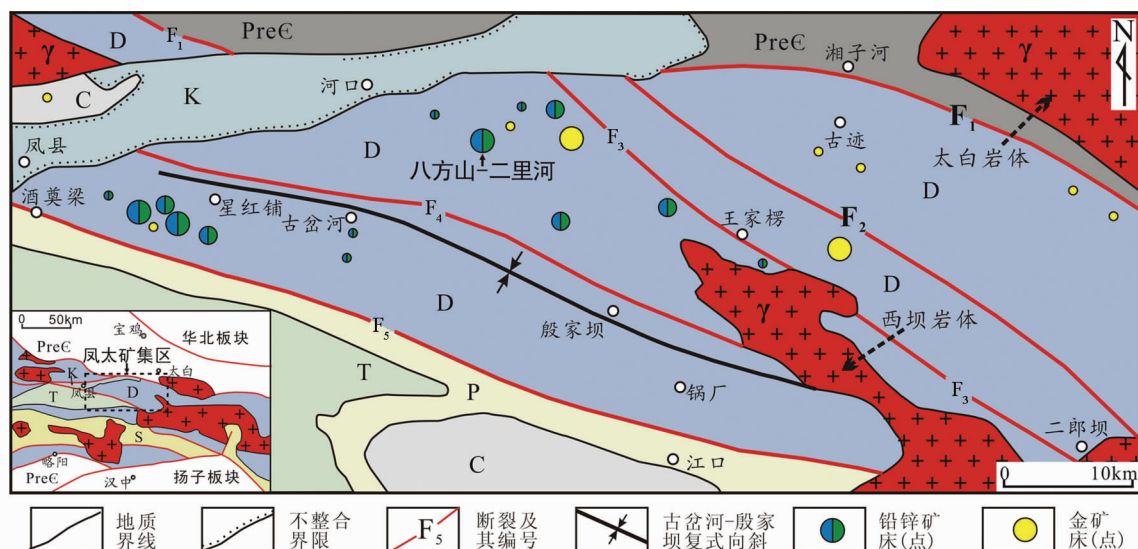


图1 西秦岭凤太矿集区地质矿产简图(据王相等,1996 修编)

K-白垩系碎屑岩;T-三叠系细碎屑岩夹碳酸盐岩;P、C-二叠系、石炭系浅变质千枚岩、灰岩及含碳硅质岩;D-泥盆系浅变质细碎屑岩及碳酸盐岩;Pre C-前寒武系火山岩及副变质岩;γ-印支-燕山期岩浆岩;F₁-湘子河-黄柏塬断裂(商丹缝合带);F₂-修石岩-观音峡断裂;F₃-王家楞-二郎坝断裂;F₄-倒回沟-柘梨园断裂;F₅-酒奠梁-江口断裂

Fig. 1 Sketch map of geology and minerals of the Fengxian-Taibai ore concentration area in western Qinling(modified after Wang *et al.*, 1996)

K-Cretaceous, clastic rock; T-Triassic microclastic rock interlaid with carbonatite; P, C-Permian, Carboniferous, epimetamorphic phyllite, limestone and carbonaceous silicite; D-Devonian, epimetamorphic microclastic rock and carbonatite; Pre C-Pre-Cambrian, volcanic rock and pararock; γ-Indosinian- Yanshanian magmatic rock; F₁-Xiangzihe-Huangbaiyuan Fault (Shang-Dan suture zone); F₂-Xiushiyan-Guanyinxia Fault; F₃-Wangjialeng-Erlangba Fault; F₄-Daohuigou-Zheliyuan Fault; F₅-Jiudianliang-Jiangkou Fault

陕西省凤县-太白矿集区(简称凤太矿集区)位于西秦岭的东部,是秦岭铅锌金成矿带的重要组成部分。区内已探明铅锌储量超过 500 万吨,金储量达 200 吨以上(王瑞廷等, 2007;李建华,2008)。二里河铅锌矿床位于凤太矿集区的西北部,属于八方山-二里河铅锌矿床的东部矿段,是凤太矿集区中具有代表性的大型铅锌矿床之一。该矿床自 20 世纪 80 年代以来一直备受研究者的关注,在成矿地质环境及控矿特征(吕仁生,1986;吴智,1991;田民等,2004;李红中等, 2011),地球化学特征(吕仁生和隗合明,1992;王集磊等, 1996;方维萱,1997;方维萱等,2003;王瑞廷等,2011),矿床成因(戴问天,1989;吕仁生和隗合明,1990;祁思敬和李英, 1993;李强等,2007)等方面许多学者做了大量研究工作。但是目前该矿床的成因仍存在争议,一种观点认为是热水喷流沉积型(SEDEX)或沉积-改造(再造)型(张复新和王俊发, 1988;祁思敬和李英,1993;王相等,1996;王东生等,2009;王瑞廷等,2011),即同生矿床;另一种观点则认为该矿床为后生矿床,提出凤太矿集区内铅锌矿床是后生的构造-热液作用产物(王义天等,2009;Wang *et al.*, 2011)。显然,为回答矿床是同生还是后生的问题,开展精确的成矿年代学研究是最直接的途径。但是,铅锌矿床成矿年龄的精确测定目前仍是一个世界性的难题(李文博等,2002)。直接测定矿石矿物同位素年龄是确定热液矿床成矿时代的最好方法,但在金属

矿物沉淀过程中常常受到化学环境影响而使同位素的含量不能达到平衡和均一化,并且常受后期构造活动-热事件的影响造成同位素体系变化(张瑞斌等,2008)。较为稳定的耐热-构造活动的放射性同位素种类很少,仅 Rb-Sr、Re-Os、Sm-Nd 等少数几种,它们在金属矿物中含量低,常小于 $10 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-6}$,多数存在形式不清,所以对化学分离流程和质谱仪同位素比值测定的要求非常高(刘建明等,1998)。随着测试技术的不断发展,逐渐成熟的矿石矿物直接定年方法主要有:辉钼矿 Re-Os 法(杜安道等,1994;Mao *et al.*, 1999, 2003, 2006, 2008)、黄铁矿 Re-Os 法(Zhang *et al.*, 2005)、黄铁矿⁴⁰Ar-³⁹Ar 法(York *et al.*, 1982)、黄铁矿 Rb-Sr 法(杨进辉和周新华,2000)、闪锌矿 Rb-Sr 法(Nakai *et al.*, 1993; 张长青等,2008)、闪锌矿流体包裹体 Rb-Sr 法(Nakai *et al.*, 1990;Pettker and Diamond,1996)、锡石 U-Pb 法(Yuan *et al.*, 2008, 2011)等。

对于二里河铅锌矿床,Zhang *et al.* (2011)对其中发育的黄铁矿开展了 Re-Os 同位素年代学研究,获得了 226 ± 17 Ma 的成矿年龄,误差较大。本文在详细研究二里河铅锌矿床成矿特征的基础上,选取主成矿阶段的矿石矿物闪锌矿开展 Rb-Sr 同位素定年研究,获得了精确的年龄数据,为厘定成矿时代、认识矿床成因提供了新的可靠证据。

为中细粒花岗闪长岩、二长花岗岩,局部见石英闪长岩、英云闪长岩,不同类型岩性间呈渐变过渡关系。此外,花岗斑岩脉、闪长玢岩脉、煌斑岩脉等岩脉在整个矿集区中普遍发育。

1 凤太矿集区地质概况

凤太矿集区地处西秦岭铅锌金成矿带中部,南北部均以深大断裂为界(图1),北为湘子河-黄柏塬断裂(F_1),南为酒奠梁-江口断裂(F_5),区内较大断裂有修石岩-观音峡断裂(F_2)、王家楞-二郎坝断裂(F_3)及倒回沟-柘梨园断裂(F_4),矿集区基本构造格架为古盆河-殷家坝复式向斜,构造线总体呈NWW向,次级褶皱和断裂发育。王义天等(2009)综合分析了凤太矿集区内发育的褶皱、断裂、节理、线理等构造要素性质和组合特征,认为整个凤太矿集区为一个大型的走滑双重构造。

凤太矿集区内发育中-上泥盆纪地层(图1),由老到新为中泥盆统王家楞组细碎屑岩和古道岭组碳酸盐岩,上泥盆统星红铺组浅变质碎屑沉积岩夹碳酸盐岩和九里坪组细碎屑岩。在矿集区外围,元古界地层出露于北侧,石炭纪和白垩纪地层分布于西北部,石炭纪、二叠纪和三叠纪地层分布于西南侧(图1)。

区内岩浆岩比较发育,主要有矿集区中东部沿区域NWW构造线方向展布的西坝中酸性岩体(图1),岩性主要

2 矿区地质与矿体产出特征

八方山-二里河铅锌矿床位于凤太矿集区的西北部(图1),矿区出露地层为中泥盆统古道岭组以生物碎屑灰岩为主的碳酸盐岩建造,和上泥盆统星红铺组以千枚岩为主浅变质细碎屑岩建造(图2)。矿区发育八方山-二里河背斜,轴向NWW,与凤太矿集区主构造线方向一致。同时发育一组NE向横断层,近等间距分布(图2)。矿区岩浆岩较发育,主要出露充填于NE向断层中的闪长玢岩、花岗斑岩和煌斑岩等岩脉,其中多条闪长玢岩脉切穿主矿体(图2)。

八方山-二里河铅锌矿体主要赋存于下部古道岭组与上部星红铺组接触带之间的硅化蚀变岩中,少量赋存于灰岩内部及千枚岩层间中的裂隙系统。按矿体产出位置从下到上可分为三类:一是赋存于接触带下部灰岩中以闪锌矿为主的脉状矿体,二是赋存于灰岩与千枚岩接触带中的铅锌主矿体,三是赋存于接触带上部千枚岩中以黄铜矿、方铅矿为主

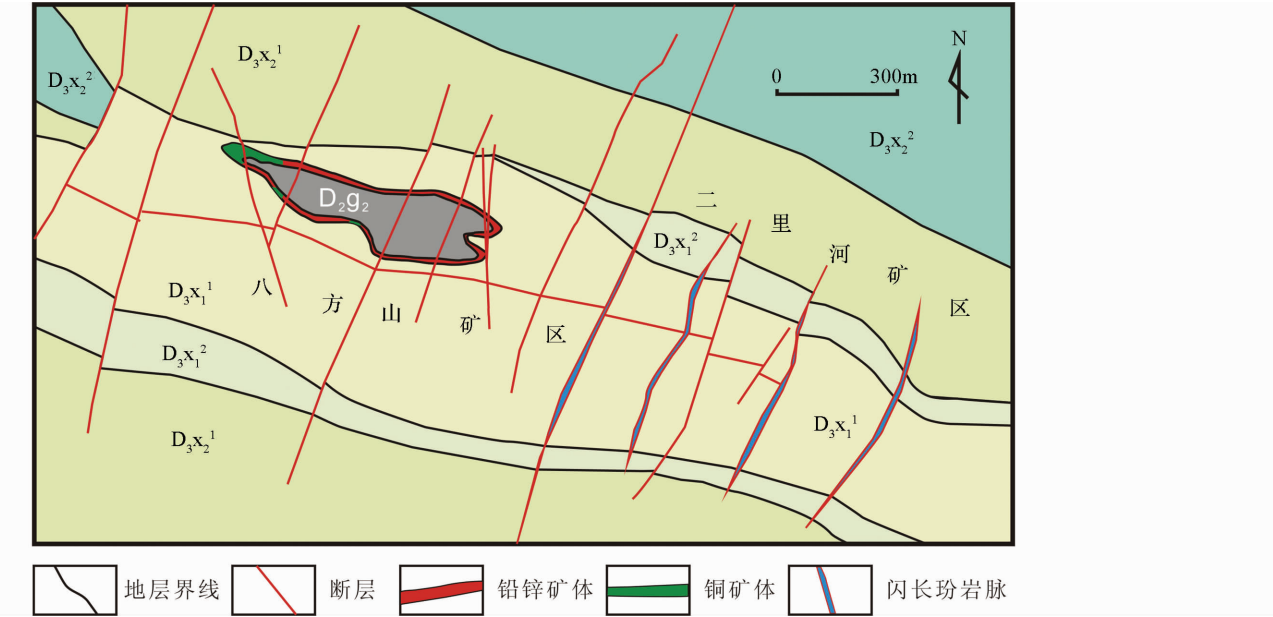


图2 八方山-二里河铅锌矿床地质图(据田民等,2004 修编)

D_2g_2 -中泥盆统古道岭组,中厚层结晶灰岩、生物灰岩; $D_3x_1^1$ -上泥盆统星红铺组下段下层,铁白云质-炭质绢云母千枚岩; $D_3x_1^2$ -上泥盆统星红铺组下段上层,方解石-绢云母千枚岩夹薄层灰岩; $D_3x_2^1$ -上泥盆统星红铺组上段下层,绿泥绢云母千枚岩; $D_3x_2^2$ -上泥盆统星红铺组上段上层碳质千枚岩、绢云母千枚岩夹薄层灰岩

Fig. 2 Geological map of the Bafangshan-Erlihe Pb-Zn deposit(modified after Tian *et al.* , 1996)

D_2g_2 -Middle Devonian medium bedded crystalline limestone and bioclastic limestone of Gudaoling Formation; $D_3x_1^1$ -Upper Devonian dolomitic-carbon-bearing phyllite in lower layer, lower section of Xinghongpu Formation; $D_3x_1^2$ -Upper Devonian calcite-sericite phyllite with thin limestone in upper layer, lower section of Xinghongpu Formation; $D_3x_2^1$ -Upper Devonian chlorite-sericite phyllite in lower layer, upper section of Xinghongpu Formation; $D_3x_2^2$ -Upper Devonian carbon-bearing phyllite, sericite phyllite with thin limestone in upper layer, upper section of Xinghongpu Formation

表 1 二里河铅锌矿床 Rb-Sr 同位素年龄测试样品信息

Table 1 The samples from the Erlihe Pb-Zn deposit for Rb-Sr age dating

样品号	采样位置	样品描述
E5	1320 中段, 155 穿脉, 背斜北翼厚大闪锌矿脉	棕褐色闪锌矿, 团块状, 中-细粒, 包裹少量团块状中-细粒半自形石英
E77	1320 中段, 155 穿脉, 背斜南翼厚大块状矿体	浅棕黄色闪锌矿, 团块状, 中-细粒, 包裹少量团块状中-细粒半自形石英和碳酸盐矿物
E79	1320 中段, 155 穿脉, 背斜转折端似层状矿体	浅棕黄色闪锌矿, 团块状, 中-细粒, 包裹少量团块状中-细粒半自形石英
E80	1320 中段, 155 穿脉, 背斜转折端似层状矿体	浅棕黄色闪锌矿, 团块状, 中-细粒, 胶结了棱角状蚀变岩角砾
E92	1320 中段, 155 穿脉, 背斜转折端似层状矿体	浅棕黄色闪锌矿, 团块状, 中-细粒, 胶结了碳质蚀变岩角砾

的脉状矿体。主矿体的产出受八方山-二里河背斜的控制, 只分布在背斜转折端, 走向与褶皱轴向一致, 在剖面上矿体呈鞍状。沿走向方向, 矿体向东倾伏, 从八方山矿区到二里河矿区(即自西向东)矿体规模逐渐变小, 局部尖灭再现; 沿倾向方向, 矿体向南北两翼迅速减薄至尖灭。

3 成矿作用过程

本次工作对二里河矿区 1320 中段 153 和 155 穿脉进行了系统观察、测量和采样工作, 总结分析了铅锌矿化特征, 依据矿石的矿物组合、结构构造, 以及矿脉的相互穿插关系等特征, 将其成矿作用过程划分为三个阶段: I. 早期富闪锌矿硫化物阶段, II. 中期石英-多金属硫化物阶段, III. 晚期石英-碳酸盐阶段。

I. 早期成矿阶段: 为主成矿阶段, 富闪锌矿, 形成的厚大块状闪锌矿是开采的主要工业矿体。闪锌矿呈中-细粒, 颜色较浅, 大部分呈连续的脉状胶结碳质灰岩角砾。方铅矿相对较少, 多呈细脉状、星散状分布在闪锌矿中。少量黄铁矿一般呈星散状、团块状, 与闪锌矿和方铅矿共生。矿石结构以半自形-他形晶结构、交代残余结构为主。矿石构造主要为块状、角砾状、浸染状、条带状、透镜状、网脉状、斑杂状, 其中块状、角砾状和透镜状矿石主要发育在背斜转折端, 条带状和网脉状矿石主要发育在背斜两翼。围岩蚀变以硅化、白云石化、铁白云石化、绢云母化、石墨化为主, 蚀变总体表现为越接近矿脉蚀变越强, 远离矿脉则迅速减弱; 背斜转折端部位蚀变较强, 向两翼延伸则减弱。

II. 中期成矿阶段: 以发育黄铜矿、方铅矿、磁黄铁矿等多金属硫化物为特征, 伴随乳白色石英脉发育。闪锌矿相对早阶段有所减少, 矿化规模较小, 往往呈网脉状叠加到早阶段矿体之上。矿石矿物以黄铜矿、方铅矿、闪锌矿为主, 见少量黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂。脉石矿物以石英、含铁白云石、铁白云石为主, 其次为方解石、石墨。黄铜矿大多产于背斜南翼石英-硫化物脉中, 呈半自形-他形中-细粒集合体, 与黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿共生。闪锌矿结晶较好, 中粗粒, 颜色较深, 多为深棕色或黑色。方铅矿结晶也较好, 中粗粒。矿石结构主要有交代残余结构和固溶体分离结构; 矿石构造以网脉状、浸染状为主, 其次为团块状、网脉状、细脉状、角砾状。围岩蚀变以硅化、铁白云石化、黄铁矿化为主, 蚀变分布

均伴随石英网脉产出, 石英网脉发育部位蚀变较强, 相比早阶段蚀变岩颜色较浅。

III. 晚期成矿阶段: 形成厚大平直的石英-碳酸盐脉, 穿插了早、中阶段矿体和围岩, 围岩蚀变不发育。硫化物含量较少, 主要有闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿, 脉石矿物主要为石英、方解石、含铁白云石、绢云母等。闪锌矿和方铅矿多为星散状、团块状。石英为乳白色, 石英脉中常发育晶洞、晶簇, 在晶洞中偶见银白色针状辉锑矿。矿石结构主要为结晶结构和压力结构; 矿石构造包括脉状、团块状、星散状构造, 以及晶簇构造。

4 样品、测试方法和结果

本次工作用于 Rb-Sr 同位素测年的 5 件闪锌矿矿石样品采于二里河矿区 1320 中段的不同位置, 样品均为坑道内新鲜开采面中未穿插后期石英脉的主成矿阶段的块状铅锌矿石(图 3a, b、表 1)。矿石矿物以闪锌矿为主, 含少量碳质灰岩角砾(图 3a, b)和半自形团块状石英(图 3c, d), 镜下观察矿石主要由致密的棕黄色中-细粒闪锌矿构成, 含量大于 90%, 伴生少量方铅矿、黄铁矿、石英、含铁白云石、碳质物和绢云母(图 3e-g), 闪锌矿中多见交代方解石形成的假象结构(图 3g)。闪锌矿中包裹体含量很少, 以原生包裹体为主, 多为纯液相包裹体, 大小 3 ~ 15 μ m(图 3h)。

样品首先在二次蒸馏水中多次清洗后晾干, 然后粉碎至 40 ~ 60 目, 在双目镜下挑选闪锌矿单矿物, 纯度大于 98%, 以供分析。

5 件闪锌矿单矿物样品的测试工作在核工业北京地质研究院同位素地质年代分析室完成。Rb-Sr 同位素测试方法步骤如下: (1) 在超净实验室将闪锌矿单矿物试样用超纯水漂洗晾干后粉碎成 200 目以下粉末, 经超声波洗涤、超纯水漂洗烘干后, 用电子天平称取 0.2 ~ 0.3g 左右的样品于聚四氟乙烯容量罐中, 称取 0.05g 左右的铷锶混合稀释剂于聚四氟乙烯容量罐中, 加入 1mL 的 6mol/L 的盐酸溶液, 低温反应 1h 后蒸干, 加入 1mL 浓 HNO₃ 盖上盖拧紧, 在控温电热板上于 180℃ 下加热至样品完全溶解, 蒸干样品。滴加 0.1mL 盐酸冲洗容量罐内壁并蒸干, 使试样转换成氯化物。将 1.5mL 0.5mol/L 盐酸加入容量罐中微热, 溶解样品并转移到塑料离心管中, 在离心机上离心 8min, 上层离心清液备作铷、锶分

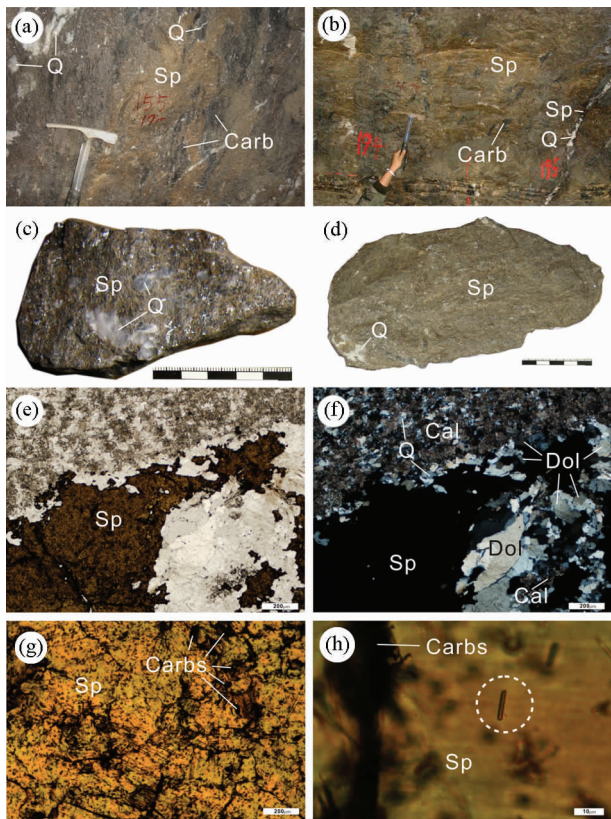


图3 二里河铅锌矿床主成矿阶段矿石样品特征

(a, b)-主成矿阶段矿体,位于背斜转折端;(c)-棕褐色闪锌矿矿石(样品 E5),含团块状半自形石英;(d)-棕黄色闪锌矿矿石(样品 E92),含团块状半自形石英;(e, f)-主成矿阶段矿石显微图像,单偏光(e)、正交偏光(f);(g)-样品 E5 显微图像,单偏光;(h)-样品 E5 闪锌矿中包裹体图像。Sp-闪锌矿;Q-石英;Cal-方解石;Dol-(含)铁白云石;Carb-碳质灰岩;Carbs-碳质物

Fig.3 Characters of the ore samples of the main metallogenic stage in the Erlihe Pb-Zn deposit

(a, b)-orebody of the main metallogenic stage, occurs in the hinge of the anticline; (c)-dark brown sphalerite, containing lumpy subhedral quartz (sample E5); (d)-yellowish brown sphalerite, containing lumpy subhedral quartz (sample E92) (e, f)-micro pictures of the main metallogenic stage ore, single polar (e), crossed polar (f); (g)-micro picture of sample E5, single polar; (h)-micro picture of inclusion in the sphalerite of the sample E5. Sp-sphalerite; Q-quartz; Cal-calcite; Dol-ankerite (ferruginous dolomite); Carb-amphibolite; Carbs-carbonaceous substance

离,下部残渣弃去。上层清液加入到处理好的分离柱中,等柱中溶液流完后,用少量高纯水对称冲洗分离柱的四角。先用 10mL 1.75mol/L 的盐酸淋洗钾、钠、铁等杂质,7mL 1.75mol/L 的盐酸解吸铷于石英烧杯中蒸干,加入几滴 1mol/L 的硝酸蒸干备质谱分析(转为硝酸形态);用 10mL 1.75mol/L 的盐酸溶液淋洗钙、镁、铁等离子弃去,再改用 14mL 2.5mol/L 的盐酸溶液淋洗铯于石英烧杯中蒸干,备质

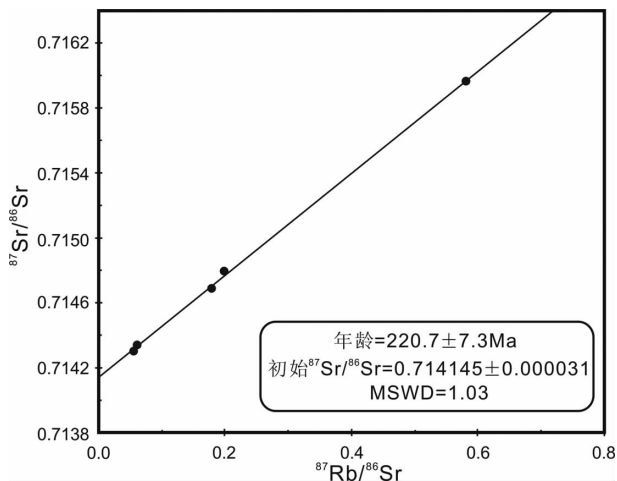


图4 二里河铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄图

Fig.4 The sphalerite Rb-Sr isochron age plot for the Erlihe Pb-Zn deposit

谱分析。(2) 铷同位素采用单铷带测量。将制好的样品加入一滴高纯水溶解,点于铷带上。加电流至 1 安培左右,直至蒸干。全部样品分三至四次点完,一次 2~5 μ L。待全部样品点完蒸干后,加一滴发射剂,保持电流为 1A,直至蒸干。最后缓慢加电流至 2A,维持 3~5s 后降至零。(3) 铯同位素采用三带测量。将制好的样品加入一滴高纯水溶解,点于外侧铯带上。加电流至 1 安培左右,直至蒸干。全部样品分三至四次点完,一次 2~5 μ L。待全部样品点完蒸干后缓慢加电流至 1.5~1.7A,维持 3~5s 后降至零。(4) 同位素比值测试在高精度固体热电离质谱计 IsoProbe-T 上完成,仪器配备 9 个法拉第杯和四个离子计数检测器。铷同位素采用静态多接收方式测量。铷同位素测定过程中的分馏效应应采用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.375219$ 进行正规化校正。同时采用本实验室建立的计算方法测定铷同位素组成和铷浓度。标准测量结果:NBS987 为 0.710250 ± 7 实验室流程本底: $\text{Rb } 2 \times 10^{-10}\text{g}$, $\text{Sr } 2 \times 10^{-10}\text{g}$ 。

测试结果见表 2。Rb-Sr 等时线年龄计算采用 Isoplot/Ex Version3.23 计算程序(Ludwig, 2001), λ 值 $1.42 \times 10^{-11}\text{a}^{-1}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值误差给定 1%, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值误差给定 0.05%,置信度 95%。计算获得闪锌矿等时线年龄为 $220.7 \pm 7.3\text{Ma}$ (图 4),离散度 1.03, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 初始值 0.714145 ± 0.000031 。

5 讨论

5.1 成矿时代

热液矿物 Rb-Sr 等时线定年的基本前提是同源、同时、封闭性、一致的($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$)_i,以及具有不同的($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$)_i;对于中低温铅锌矿床,矿物中次生包裹体与原生包裹体均一温度差别较小,因此给包裹体分离带来了困难(张长青等,

表 2 二里河铅锌矿床闪锌矿样品 Rb-Sr 同位素比值和含量测定结果

Table 2 The Rb-Sr isotopic data of sphalerite from the Erlihe Pb-Zn 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)
E5	0.009	0.418	0.0603	0.714340	0.000011
E77	0.010	0.510	0.0564	0.714305	0.000014
E79	0.023	0.376	0.1791	0.714688	0.000019
E80	0.025	0.368	0.1989	0.714796	0.000016
E92	0.066	0.326	0.5810	0.715965	0.000012

2008)。实验过程中,将闪锌矿粉碎至 200 目以下后,进行超声清洗,基本可排除原生及次生包裹体的干扰(刘建明等,1998)。本次工作选择未见裂隙结晶较好的致密块状矿石为研究对象,且闪锌矿纯度高,采自同一矿体局部较小的范围内,最大程度满足了 Rb-Sr 同位素测年的前提条件。李文博等(2002)提出可利用 $1/\text{Sr}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图和 $1/\text{Rb}-^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 图判别闪锌矿生长期间 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值是否保持不变,来判别所获数据的合理性。本次测试结果在 $1/\text{Sr}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $1/\text{Rb}-^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 关系图解(图 5)中显示,不同闪锌矿单矿物样品的 Rb、Sr 含量不同,而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值则相对稳定,说明闪锌矿生长期间 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值基本保持不变,因此该等时线年龄具有实际地质意义。

二里河铅锌矿床的闪锌矿 Rb-Sr 测年显示,主成矿作用发生于 $220.7 \pm 7.3\text{Ma}$,即晚三叠世。Zhang *et al.* (2011) 获得的二里河矿区黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 $226 \pm 17\text{Ma}$,虽然误差范围较大,但与本次工作测定结果基本上一致。如果二里河铅锌矿床为喷流沉积成因(Sedex),则其成矿时代应与赋矿的泥盆系地层一致。显然,矿石矿物的同位素测年研究结果不支持同生成因的认识,而指示其形成于后生成矿过程。

成矿地质特征也显示了矿床的后生成因,主要表现在以下几个方面:(1) 铅锌主矿体受八方山-二里河背斜控制,呈鞍状产于下部古道岭组灰岩与上部星红铺组千枚岩的接触带中,若是同生沉积成矿,则矿体不可能仅仅产在背斜核部。(2) 古道岭组生物灰岩之上出现多期的、顺层及切层的石英-硫化物脉,石英脉与灰岩的接触部位矿化和硅化均较强,这些广泛发育的石英-硫化物脉是后生热液成矿作用的最直接证据。主成矿阶段的闪锌矿中多见交代方解石形成的假象结构(图 3g),同样指示了后生热液交代作用的发育。(3) 各成矿阶段的闪锌矿、方铅矿等硫化物结晶程度高,粒度多为中粒,个别可达粗粒,而同生沉积铅锌矿床的硫化物矿物多为微细粒或隐晶质,这是由于中高温气液喷出海底与海水接触后迅速冷却,硫化物结晶往往较差,粒度小。(4) 围岩蚀变普遍发育,主要表现为矿体下盘灰岩的硅化、(铁)白云石化、褪色化、石墨化,矿体上盘千枚岩的硅化、(铁)白云石化、绢云母化及叶腊石化,在背斜核部的顶板处发育有斑点状的闪

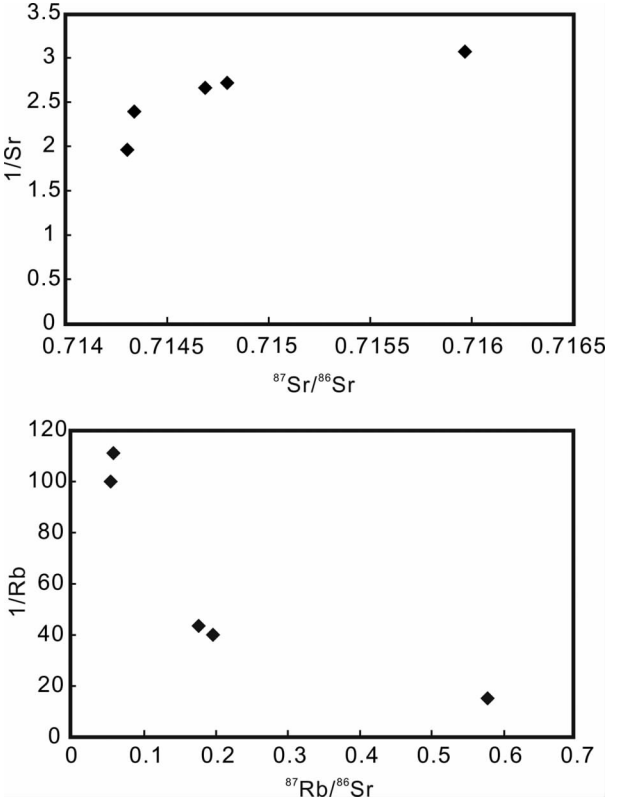


图 5 二里河铅锌矿床闪锌矿 $1/\text{Sr}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $1/\text{Rb}-^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 关系图

Fig. 5 Diagrams of $1/\text{Rb}$ vs. $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ and $1/\text{Sr}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of sphalerites from the Erlihe Pb-Zn deposit

锌矿化,总体表现为由核部向两翼蚀变由强变弱,指示了围岩蚀变为构造变形过程中成矿流体充填交代的产物,而同生沉积铅锌矿床的上盘往往不发育围岩蚀变。

王瑞廷等(2011)获得二里河矿区切穿矿体的闪长玢岩脉的 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $214 \pm 2\text{Ma}$,矿区内花岗斑岩脉年龄 $217.9 \pm 4.5\text{Ma}$;Zhang *et al.* (2011) 获得切穿矿体的闪长玢岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 $221 \pm 3\text{Ma}$ 。张帆等(2009)获得位于凤太矿集区东部的西坝岩体的二长花岗岩 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $219 \pm 1\text{Ma}$,花岗闪长岩为 $218 \pm 1\text{Ma}$ 。冯建忠等(2003)测得凤太矿集区八卦庙金矿床石英 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄为 $222.14 \pm 3.45\text{Ma}$,毛景文(2001),Mao *et al.* (2002)认为西秦岭地区造山型金矿床的形成与晚三叠世-中侏罗世期间扬子克拉通与华北克拉通及北秦岭的后碰撞过程密切相关。西秦岭地区花岗岩带主要形成于 $220 \sim 205\text{Ma}$ (孙卫东等,2000;陈衍景,2010)。上述成岩成矿年代学数据主要集中在 $230 \sim 200\text{Ma}$,即晚三叠世,暗示了岩浆活动可能为成矿作用提供了流体和热源。在区域构造方面,二里河铅锌矿床所处的凤太矿集区位于南秦岭构造带,秦岭地区的碰撞造山作用主要发生于印支期的中-晚三叠世期间,而后转入陆内构造演化阶段(张国伟等,2001,2004)。

凤太矿集区内各种构造样式与构造组合是以南北两条区域性断裂带的左行走滑运动为主导,在最大主压应力为 NE 向的局部构造应力场中形成的走滑双重构造系统,构造活动与成矿作用在时间和空间上相耦合(王义天等,2009)。上述区域构造演化特征暗示了印支期的构造活动为本区的成矿作用提供了成矿流体运移和就位的空间。总之,区域构造演化、岩浆活动和成矿作用在时间和空间上的一致性表明,凤太矿集区在印支期经历了强烈的构造-岩浆-成矿作用过程,二里河铅锌矿床正是这一区域性地质事件的产物之一。

5.2 成矿物质来源

研究表明,海相碳酸盐岩化学风化的锶初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.708 ± 0.001 , 现代海水平均 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.7093 ± 0.0005 (尹观,1988),古生代海洋的锶 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.70675 (孙省利,2001),二里河铅锌矿床闪锌矿 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.714145 ± 0.000031 (图4),明显高于上述与海相有关的锶初始比值,暗示其来源与海相沉积过程关系不大。大陆地壳锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值为 0.7190 (孙省利,2001),二里河铅锌矿床闪锌矿的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值与其基本一致,具有富放射性成因锶的特征。因此,二里河铅锌矿床的成矿物质可能主要来源于大陆壳。

5.3 地质意义

二里河铅锌矿床是凤太矿集区中一个代表性的大型铅锌矿,其成矿特征与矿集区内其他铅锌矿床具有相似性(如铅硐山、银洞梁、银母寺等)。如赋矿地层和围岩岩性一致,矿体产出特征相似,均产于背斜鞍部及两翼,矿石矿物均以富闪锌矿为特征,矿石结构构造相似,围岩蚀变特征相似,以硅化和铁白云石化为主。因此,本次所获得的二里河铅锌矿床的成矿年龄对于整个凤太矿集区的铅锌成矿时代具有同样的约束意义。此外,厘定了成矿作用发生于印支期,对于今后在凤太矿集区中的找矿方向具有一定理论指导意义,即印支期形成的地质构造、岩浆岩以及热液活动产物是在勘查工作部署时首要考虑的因素。

6 结论

陕西省凤太矿集区二里河铅锌矿床主成矿阶段的闪锌矿 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 $220.7 \pm 7.3\text{Ma}$,指示其成矿时代为晚三叠世,该年龄对于整个凤太矿集区的铅锌成矿时代具有同样约束意义。闪锌矿的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.714145 ± 0.000031 ,指示成矿物质可能主要来源于大陆壳。二里河铅锌矿床是凤太矿集区在印支期区域性强烈的构造-岩浆-成矿作用过程中的产物。

致谢 西北有色地质勘查局 717 总队和二里河铅锌矿的

有关领导和技术人员在野外工作期间给予了大力支持和帮助;两位审稿人对文章提出宝贵的意见和建议;在此一并致谢!

References

- Chen YJ. 2010. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, central China. *Geology in China*, 37(4): 854–865 (in Chinese with English abstract)
- Dai WT. 1989. Geology, relationship and genesis of two types of mineralization in Bafangshan Pb-Zn deposit. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 4(1): 14–21 (in Chinese with English abstract)
- Du AD, He HL, Yin NW, Zou XQ, Sun YL, Sun DZ, Chen SZ and Qu WJ. 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites. *Acta Geologica Sinica*, 68(4): 339–347 (in Chinese with English abstract)
- Fang WX. 1997. Geochemical anomaly pattern and metallogenic model of the Bafangshan polymetallic deposit, Shaanxi. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 6(3): 167–171 (in Chinese with English abstract)
- Fang WX, Liu FJ, Hu RZ and Chen MX. 2003. Characteristics of hydrothermal sedimentary facies in relation with mineralizer in Bafangshan polymetallic deposit. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(1): 75–81 (in Chinese with English abstract)
- Feng JZ, Wang DB, Wang XM, Shao SC, Ma ZG and Zhang XG. 2003. Geology and metallogenesis of the Baguamiao giant gold deposit in Fengxian, Shaanxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 387–398 (in Chinese with English abstract)
- Li HZ, Zhou YZ, Yang ZJ, Zhou GF, He JG, Ma ZW, Lü WC, Li W, Liang J and Lu WJ. 2011. Diagenesis and metallogenesis evolution of chert in West Qinling orogenic belt: A case from Bafangshan-Erlihe Pb-Zn ore deposit. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(3): 715–723 (in Chinese with English abstract)
- Li JH. 2008. Analysis on ore-controlling factors and prospecting potential of the Baguamiao-type gold deposits in Fengtai area, Shaanxi. *Mineral Resources and Geology*, 22(1): 62–64 (in Chinese with English abstract)
- Li Q, Wang BQ, Ma ZG and Wang XH. 2007. Space-time relationship of gold deposit to lead-zinc deposit in Fengtai ore field in South Qinling. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 29(1): 15–21 (in Chinese with English abstract)
- Li WB, Huang ZL, Xu DR, Cheng J, Xu C and Guan T. 2002. Rb-Sr isotopic method on zinc-lead ore deposits: A review. *Geotectonica et Metallogenia*, 26(4): 436–441 (in Chinese with English abstract)
- Liu JM, Zhao SR, Shen J, Jiang N and Huo WG. 1998. Review on direct isotopic dating of hydrothermal ore-forming processes. *Progress in Geophysics*, 13(3): 46–55 (in Chinese with English abstract)
- Lü RS. 1986. The geological characteristics and prospecting significance of Bafangshan stratabound polymetallic deposit in Shaanxi Province. *Northwestern Geology*, 3: 40–46 (in Chinese)
- Lü RS and Wei HM. 1990. The geological characteristics and genetic investigation of Bafangshan stratabound polymetallic ores in Shaanxi Province. *Journal of Xi'an College of Geology*, 12(4): 10–17 (in Chinese with English abstract)
- Lü RS and Wei HM. 1992. Characteristics and genesis of the silicalites in hot-water sedimentary lead-zinc deposits in the Qinling Mountains. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 11(1): 14–21 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2001. User's Manual for Isoplot/Ex: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, USA, 1–53
- Mao JW, Zhang ZC, Zhang ZH and Du AD. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian Mountains and its geological significance. *Geochimica et*

- Cosmochimica Acta, 63: 1815 – 1818
- Mao JW. 2001. Geology, distribution and classification of gold deposits in the Western Qinling Belt, Central China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(1): 11 – 13 (in Chinese)
- Mao JW, Qiu YM, Goldfarb RJ, Zhang ZC and Ren FS. 2002. Geology, distribution, and classification of gold deposits in the Western Qinling belt, Central China. *Mineralium Deposita*, 37: 352 – 377
- Mao JW, Du AD, Seltmann R and Yu JJ. 2003. Re-Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipovy Log rare metal pegmatite, central Urals, Russia. *Mineralium Deposita*, 38: 251 – 257
- Mao JW, Wang YT, Lehmann, Yu JJ, Du AD, Mei YX, Li YF, Zang WS, Stein HJ and Zhou TF. 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River Valley and metallogenic implications. *Ore Geology Reviews*, 29: 307 – 324
- Mao JW, Xie GQ, Bierlein F, Ye HS, Qu WJ, Du AD, Pirajno F, Li HM, Guo BJ, Li YF and Yang ZQ. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 72: 4607 – 4626
- Nakai S, Halliday AN, Kesler SE and Jones HD. 1990. Rb-Sr dating of sphalerites from Tennessee and the genesis of Mississippi Valley type ore deposits. *Nature*, 346: 354 – 357
- Nakai S, Halliday AN, Kesler SE, Jones HD, Kyle JR and Lane TE. 1993. Rb-Sr dating of sphalerites from Mississippi Valley (MVT) ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 417 – 427
- Pettke T and Diamond LW. 1996. Rb-Sr dating of sphalerite based fluid inclusion-host mineral isochrones: A certification of why it works. *Economic Geology*, 91: 951 – 956
- Qi SJ and Li Y. 1993. The Types and Ore-controlling Factors of Lead-Zinc Deposits in the Devonian Metallogenic Belt of Qinling Mountain. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 178 (in Chinese with English abstract)
- Sun SL. 2001. The study on metallogenic series of hydrocarbon alkali-fluids in Devonian in Xicheng concentrated mineralization area, West Qinling, Gansu Province. Ph. D. Dissertation. Chengdu: Chengdu University of Technology, 43 – 44 (in Chinese with English summary)
- Sun WD, Li SG, Chen YD and Li YJ. 2000. Zircon U-Pb dating of granitoids from South Qinling, Central China and their geological significance. *Geochimica*, 29(3): 209 – 216 (in Chinese with English abstract)
- Tian MM, Yuan XD, Zhang YR and Wang LK. 2004. Discussion of geological prospecting in Erlihe Pb-Zn deposit, Fengxian. *Mineral Resources and Geology*, 18(2): 134 – 138 (in Chinese with English abstract)
- Wang DS, Wang RT, Dai JZ, Wang CA, Li JH and Chen LX. 2009. "Dual ore-controlling factors" characteristics of metallic deposits in the Qinling Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1719 – 1729 (in Chinese with English abstract)
- Wang JL, He BC, Li JZ and He DR. 1996. Qinling-type Lead-Zinc Ore Deposits in China. Beijing: Geological Publishing House, 116 – 145 (in Chinese with English abstract)
- Wang RT, Wang T, Gao ZJ, Chen EH and Liu LX. 2007. The main metal deposits metallogenic series and exploration direction in Feng-Tai ore cluster region, Shaanxi Province. *Northwestern Geology*, 40(2): 77 – 84 (in Chinese with English abstract)
- Wang RT, Li FL, Chen EH, Dai JZ, Wang CA and Xu XF. 2011. Geochemical characteristics and prediction of the Bafangshan-Erlihe large lead-zinc ore deposit, Feng County, Shaanxi Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 779 – 793 (in Chinese with English abstract)
- Wang X, Tang RY, Li S, Li YX, Yang MJ, Wang DS, Guo J, Liu P, Liu RD and Li WQ. 1996. Qinling Orogeny and Metallogenesis. Beijing: Metallurgical Industry Press, 187 – 230 (in Chinese with English abstract)
- Wang YT, Wang RT, Dai JZ, Li JH, Wang CA, Tian MM and Wen B. 2009. The strike-slip duplex and its significance for mineralization in the Fengxian-Taibai ore area, western Qinling, Central China. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(Suppl.): 188 – 189 (in Chinese)
- Wang YT, Hu QQ, Zhang CQ, Wang RT, Dai JZ, Li JH, Wang CA and Li X. 2011. Geological evidence for epigenetic mineralization of the Bafangshan-Erlihe Pb-Zn-Cu deposit in the Fengxian-Taibai metallogenic zone, western Qinling belt, Central China. *Let's Talk Ore Deposits, Proceedings of 11th SGA Biennial Meeting*, 2011 Antofagasta, Chile, 743 – 744
- Wu Z. 1991. An approach on ore-controlling tectonic deformation mechanism of Bafangshan polymetallic ore deposit. *Mineral Resources and Geology*, 2(5): 115 – 121 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH and Zhou XH. 2000. Rb-Sr isochron ages of the ore and gold bearing minerals in Linglong gold deposit and its ore-forming ages, eastern of Jiaozhou Peninsula. *Chinese Science Bulletin*, 45(14): 1547 – 1553 (in Chinese)
- Yin G. 1988. Isotope Hydrogeochemical. Chengdu: Press of University of Science and Technology in Chengdu, 1 – 290 (in Chinese with English abstract)
- York D, Masliwec A, Kuybida P, Hanes JA, Hall CM, Kenyon WJ, Spooner ETC and Scott SD. 1982. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of pyrite. *Nature*, 300: 52 – 53
- 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: 375 – 382
- Yuan SD, Peng JT, Hao S, Li HM, Geng JZ and Zhang DL. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization. *Ore Geology Reviews*, 43: 235 – 242
- Zhang CQ, Li XH, Yu JJ, Mao JW, Chen FK and Li HM. 2008. Rb-Sr dating of single sphalerites from the Daliangzi Pb-Zn deposit, Sichuan, and its geological significances. *Geological Review*, 54(4): 532 – 538 (in Chinese with English abstract)
- Zhang F, Liu SW, Li QG, Wang ZQ, Han YG, Yang K and Wu FH. 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and geological significance of Xiba granitoids from Qinling, Central China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 45(5): 833 – 840 (in Chinese with English abstract)
- Zhang F, Liu SW, Li QG, Sun YL, Wang ZQ, Yan QR and Yan Zhen. 2011. Re-Os and U-Pb Geochronology of the Erlihe Pb-Zn deposit, Qinling orogenic belt, Central China, and constraints on its deposit genesis. *Acta Geologica Sinica*, 85(3): 673 – 682
- Zhang FX and Wang JF. 1988. The submarine volcanic-exhalative-sedimentary origin of lead-zinc deposits in the Fengtai ore field, Shaanxi. *Geological Review*, 34(2): 157 – 168 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. Qinling Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 1 – 855 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Cheng SY, Guo AL, Dong YP, Lai SC and Yao AP. 2004. Mianlue paleo-suture on the southern margin of the Central Orogenic System in Qinling-Dabie: With a discussion of the assembly of the main part of the continent of China. *Geological Bulletin of China*, 23(9 – 10): 846 – 853 (in Chinese with English Abstract)
- Zhang LC, Xiao WJ, Qin KZ, Qu WJ and Du AD. 2005. Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tianshan, NW China, and its geological significance. *Mineralium Deposita*, 39(8): 960 – 969
- Zhang RB, Li JM, Ye J and Chen FK. 2008. Chalcopyrite Rb-Sr isochron age dating and its ore-forming significance in Shouwangfen copper deposit, Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1353 – 1358 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈衍景. 2010. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用. 中国地

- 质, 37(4): 854–865
- 戴问天. 1989. 层控铅锌矿中两类矿化的成因及相互关系——以陕南八方山为例. 地质找矿论丛, 4(1): 14–21
- 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚利, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究. 地质学报, 68(4): 339–347
- 方维萱. 1997. 陕西凤县八方山多金属矿床成矿成晕模式. 有色金属矿产与勘查, 6(3): 167–171
- 方维萱, 刘方杰, 胡瑞忠, 陈梦熊. 2003. 八方山大型多金属矿床热水沉积岩相特征与矿化剂组分关系. 矿物学报, 23(1): 75–81
- 冯建忠, 汪东波, 王学明, 邵世才, 马治国, 张选固. 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. 地质学报, 77(3): 387–398
- 李红中, 周永章, 杨志军, 周国富, 何俊国, 马占武, 吕文超, 李文, 梁锦, 卢文姬. 2011. 西秦岭造山带硅质岩的成岩成矿演化特征——以八方山-二里河矿区赋矿硅质岩为例. 吉林大学学报(地球科学版), 41(3): 715–723
- 李建华. 2008. 陕西凤太地区“八卦庙式”金矿控矿因素及其找矿潜力分析. 矿产与地质, 22(1): 62–64
- 李强, 王兵岐, 马治国, 王晓虎. 2007. 南秦岭凤太盆地金矿与铅锌矿的成矿模式. 地球科学与环境学报, 29(1): 15–21
- 李文博, 黄智龙, 许德如, 陈进, 许成, 管涛. 2002. 铅锌矿床 Rb-Sr 定年研究综述. 大地构造与成矿学, 26(4): 436–441
- 刘建明, 赵善仁, 沈洁, 姜能, 霍卫国. 1998. 成矿流体活动的同位素定年方法评述. 地球物理学进展, 13(3): 46–55
- 吕仁生. 1986. 八方山层控多金属矿床地质特征及其找矿意义. 西北地质, 3: 40–46
- 吕仁生, 隗合明. 1990. 八方山层控多金属矿床地质特征及成因探讨. 西安地质学院学报, 12(4): 10–17
- 吕仁生, 隗合明. 1992. 秦岭热水沉积铅锌矿床中硅质岩特征及成因. 岩石矿物学杂志, 11(1): 14–21
- 毛景文. 2001. 西秦岭地区造山型与卡林型金矿床. 矿物岩石地球化学通报, 20(1): 11–13
- 祁思敬, 李英. 1993. 秦岭泥盆系铅锌成矿带. 北京:地质出版社, 1–178
- 孙省利. 2001. 西秦岭泥盆系西成矿化集中区烃碱流体成矿系列研究. 博士学位论文. 成都:成都理工学院, 43–44
- 孙卫东, 李曙光, Chen YD, 李育敬. 2000. 南秦岭花岗岩铅石 U-Pb 定年及其地质意义. 地球化学, 29(3): 209–216
- 田民民, 袁旭东, 张永让, 王伦科. 2004. 凤县二里河铅锌矿床后续地质找矿探讨. 矿产与地质, 18(2): 134–138
- 王东生, 王瑞廷, 代军治, 王长安, 李建华, 陈荔湘. 2009. 秦岭造山带金属矿床的“二元控矿”特征. 地质学报, 83(11): 1719–1729
- 王集磊, 何伯墀, 李健中, 何典仁. 1996. 中国秦岭型铅锌矿床. 北京:地质出版社, 116–145
- 王瑞廷, 王涛, 高章鉴, 陈二虎, 刘莉霞. 2007. 凤太多金属矿集区主要金属矿床成矿系列与找矿方向. 西北地质, 40(2): 77–84
- 王瑞廷, 李芳林, 陈二虎, 代军治, 王长安, 许小峰. 2011. 陕西凤县八方山-二里河大型铅锌矿床地球化学特征及找矿预测. 岩石学报, 27(3): 779–793
- 王相, 唐荣杨, 李实, 李永祥, 杨铭君, 王东生, 郭健, 刘平, 刘人定, 李文全. 1996. 秦岭造山与金属成矿. 北京:冶金工业出版社, 187–230
- 王义天, 王瑞廷, 代军治, 李建华, 王长安, 田民民, 汶博. 2009. 西秦岭凤太矿集区走滑双重构造及其控矿意义. 矿物学报, 29(增刊): 188–189
- 吴智. 1991. 八方山多金属矿床控矿构造变形机制研究. 矿产与地质, 2(5): 115–121
- 杨进辉, 周新华. 2000. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代. 科学通报, 45(14): 1547–1553
- 尹观. 1988. 同位素水文地球化学. 成都:成都科技大学出版社, 1–290
- 张长青, 李向辉, 余金杰, 毛景文, 陈福坤, 李厚民. 2008. 四川大梁子铅锌矿床单颗粒闪锌矿铷-锶测年及地质意义. 地质论评, 54(4): 532–538
- 张帆, 刘树文, 李秋根, 王宗起, 韩以贵, 杨恺, 吴峰辉. 2009. 秦岭西坝花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 北京大学学报(自然科学版), 45(5): 833–840
- 张复新, 王俊发. 1988. 陕西凤太铅-锌矿田海底火山喷流沉积成因探讨. 地质论评, 34(2): 157–168
- 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, 1–855
- 张国伟, 程顺有, 郭安林, 董云鹏, 赖绍聪, 姚安平. 2004. 秦岭-大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合. 地质通报, 23(9–10): 846–853
- 张瑞斌, 李建明, 叶杰, 陈福坤. 2008. 河北寿王坟铜矿黄铜矿铷同位素年龄测定及其成矿意义. 岩石学报, 24(6): 1353–1358