

东秦岭寨凹钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及熊耳期成矿事件*

邓小华¹ 姚军明^{2**} 李晶² 孙亚莉²

DENG XiaoHua¹, YAO JunMing^{2**}, LI Jing² and SUN YaLi²

1. 北京大学造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871

2. 中国科学院广州地球化学研究所 成矿动力学重点实验室, 广州 510640

1. Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Peking University, Beijing 100871, China

2. KLMD, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2009-07-15 收稿, 2009-08-12 改回.

Deng XH, Yao JM, Li J and Sun YL. 2009. Molybdenite Re-Os isotope age of the Zhaiwa Mo deposit and implications for Xiongerian mineralization in eastern Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11):2739–2746

Abstract The Zhaiwa Mo deposit occurs in the southern margin of the North China craton. This deposit was interpreted as an intrusion-related vein/lode type in previous study. Nine molybdenite samples from the deposit yield Re-Os isotopic model ages ranging from $1603.1 \pm 10.8 \sim 2031.9 \pm 10.2$ Ma with an average age of 1753 ± 26 Ma (1σ , MSWD = 3.2) and give an isochron age of 1762 ± 31 Ma (1σ , MSWD = 3.6). These ages imply the first discovery of ~ 1.76 Ga Mo mineralization in the eastern Qinling Orogen and China. On the basis of geological evolution in the southern margin of the North China craton, it can be proposed that the Zhaiwa Mo deposit was resulted from continental arc magmatism represented by widely distributed volcanic rocks of the Xiong'er Group along the southern margin of the North China craton. Results obtained from this deposit show that the Xiongerian mineralization can be preserved in the northernmost part of the eastern Qinling orogen even though multistage post-ore accretion and collision events took place there.

Key words Xiongerian mineralization; Molybdenite Re-Os isotope age; Zhaiwa Mo deposit; Eastern Qinling Orogen

摘要 河南寨凹钼矿床位于东秦岭钼矿带,是近年来新发现的脉状钼矿床。9件辉钼矿样品 Re-Os 模式年龄介于 $1603.1 \pm 10.8 \sim 2031.9 \pm 10.2$ Ma,其中7件样品给出了精确的等时线年龄为 1762 ± 31 Ma (1σ 误差, MSWD = 3.6),模式年龄的加权平均值为 1753 ± 26 Ma (1σ 误差, MSWD = 3.2),表明寨凹钼矿形成于古元古代或熊耳期,代表着 ~ 1.76 Ga 左右的钼成矿事件。根据区域地质演化,认为寨凹钼矿形成于与熊耳群弧火山岩建造相当的活动大陆边缘岩浆弧背景。寨凹矿床的发现表明,熊耳期成矿事件虽遭受后期多次增生和碰撞造山作用的改造和破坏,但仍可在秦岭造山带最北部保留。

关键词 熊耳期成矿事件; 辉钼矿 Re-Os 同位素年龄; 寨凹钼矿; 东秦岭造山带

中图法分类号 P597.3; P618.65

1 引言

东秦岭钼矿带南、北边界分别为商丹和三宝断裂,蕴含了5个超大型钼矿床和众多中小型钼矿床,是世界第一大钼矿带(李诺等,2007)。其矿化类型包括斑岩型、斑岩-夕卡岩

型以及碳酸岩脉型,主要形成于两个时代:燕山期(160~110Ma)和印支期(~ 220 Ma)(黄典豪等,1994; Mao *et al.*, 2008; 李诺等,2008)。该地区最新发现了一批脉状钼矿床,如洛宁寨凹、嵩县纸房、方城土门以及灵宝大湖(陈衍景,2006; 刘国印等,2007; 李诺等,2008; 邓小华等,2008a, b; 倪智勇等,2008),其成矿时代尚不清楚,需要进一步研究。

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2006CB403508)、国家自然科学基金项目(Nos.40872067,40425006,40730421)资助。

第一作者简介:邓小华,男,1984年生,博士研究生,矿床学专业, E-mail: dxh198411@126.com

** 通讯作者:姚军明,博士,矿床学, E-mail: junming_yao@yahoo.com.cn

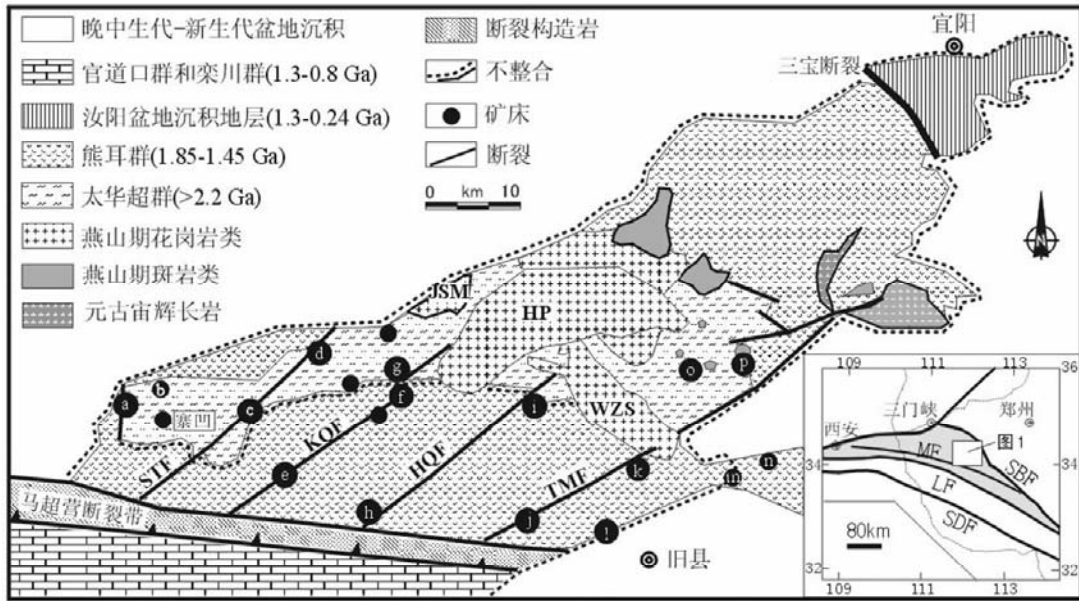


图1 熊耳地体地质和矿床分布图(据陈衍景,2006,略有修改)

岩体名称: WZS-五丈山花岗岩体, HP-高坪花岗岩体, JSM-金山庙花岗岩体。断裂名称: STF-三门-铁炉坪断裂, KQF-康山-七里坪断裂, HQF-红庄-青岗坪断裂, TMF-陶村-马园断裂; SBF-三宝断裂; SDF-商丹断裂; MF-马超营断裂; LF-栾川断裂; 矿床名称: a-沙沟银铅锌矿床, b-高坪沟银铅矿, c-铁炉坪银铅矿, d-小池沟金矿, e-康山金银铅矿, f-上宫金矿, g-虎沟金矿, h-红庄金矿, i-青岗坪金矿, j-潭头金矿, k-瑶沟金矿, l-前河金矿, m-纸房钼矿, n-香椿沟钼矿, o-雷门沟钼矿, p-祁雨沟金矿

Fig. 1 The map showing the geology and ore deposits distribution of the Xiong'er terrane (slightly modified after Chen, 2006)

Name of granite: WZS, Wuzhangshan granite; HP, Haoping granite; JSM, Jinshanmiao granite; Name of fault: STF, Sanmen-Tieluping fault; KQF, Kangshan-Qiliping fault; HQF, Hongzhuang-Qinggangping fault; TMF, Taocun-Mayuan fault; SBF, San-bao fault; SDF, Shang-Dan fault; MF, Machaoying fault; LF, Luanchuan fault; Name of deposit: a. Shagou Ag-Pb-Zn; b. Haopinggou Ag-Pb; c. Tieluping Ag-Pb; d. Xiaochigou Au; e. Kangshan Au-Ag-Pb; f. Shanggong Au; g. Hugou Au; h. Hongzhuang Au; i. Qinggangping Au; j. Tantou Au; k. Yaogou Au; l. Qianhe Au; m. Zhifang Mo; n. Xiangchungou Mo; o. Leimengou Mo-Au; p. Qiyugou Au

洛宁寨凹钼矿产于熊耳地体西南部的早前寒武纪变质杂岩内(图1),其流体包裹体以高密度、高盐度为特征,被解释为侵入岩有关的矿床(邓小华等,2008a)。地球物理资料显示,寨凹地区具有低重力、弱磁性的特征,存在隐伏的燕山期花岗岩岩体(杨群周等,2003);此外,熊耳地体广泛分布熊耳群火山岩及次火山岩-侵入岩(赵太平等,2004)。显然,燕山期和熊耳期(1.85~1.45Ga)岩浆活动均可导致寨凹钼矿的形成。

作者最新获得了寨凹矿床辉钼矿 ReOs 同位素年龄,确证存在熊耳期成矿事件,并认为熊耳期成矿作用和熊耳群火山岩是弧岩浆作用的结果。

2 地质背景

河南寨凹钼矿床产于东秦岭钼矿带,大地构造上隶属华北克拉通南缘的熊耳地体(图1)。据陈衍景和富士谷(1992),熊耳地体的地质演化经历了3个巨型旋回:(1)1.85Ga以前的早前寒武纪结晶基底形成,(2)中元古代到古生代的大陆边缘增生,(3)华北与扬子板块的陆陆碰撞(早中生代)及碰撞后(晚中生代至今)构造作用。熊耳地体东西两侧分别为伊川-潭头盆地和洛宁-卢氏断陷盆地,北界

沿三宝断裂推覆到高箕地块的中元古界-三叠系盖层之上,南界是马超营断裂带。

熊耳地体的主要岩石地层单元为变质基底太华超群和盖层熊耳群(图1)。太华超群主要岩性为斜长角闪岩、角闪片麻岩、黑云斜长片麻岩、大理岩、石墨片麻岩以及混合片麻岩、条带状混合岩等,形成于3.0~2.2Ga(Chen and Zhao, 1997)。熊耳群火山岩主要由玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩和流纹岩组成,其比例约为4:11:48:27:10(贾承造等,1988),同位素年龄(含锆石 SHRIMP 年龄)为1.85~1.45Ga(陈衍景和富士谷,1992;赵太平等,2004),是华熊地块乃至整个华北克拉通最下部的盖层。熊耳群火山岩是古宽坪洋壳沿栾川断裂向北俯冲到华熊地块之下而诱发的弧岩浆作用的结果(胡受奚等,1988;贾承造等,1988;陈衍景和富士谷,1992;Zhao *et al.*, 2004);也有学者解释为裂谷作用的产物(孙枢等,1985;Zhao *et al.*, 2002)。熊耳地体断裂构造发育,NE向断裂最醒目,近等距排列(图1),总体属于东西向马超营断裂的次级构造。马超营断裂长200km,可追溯到1.4Ga以前(胡受奚,1988),在扬子与华北板块碰撞期间,马超营断裂带被解释为倾向北A型俯冲带(陈衍景和富士谷,1992;范宏瑞等,1993;王海华等,2001)

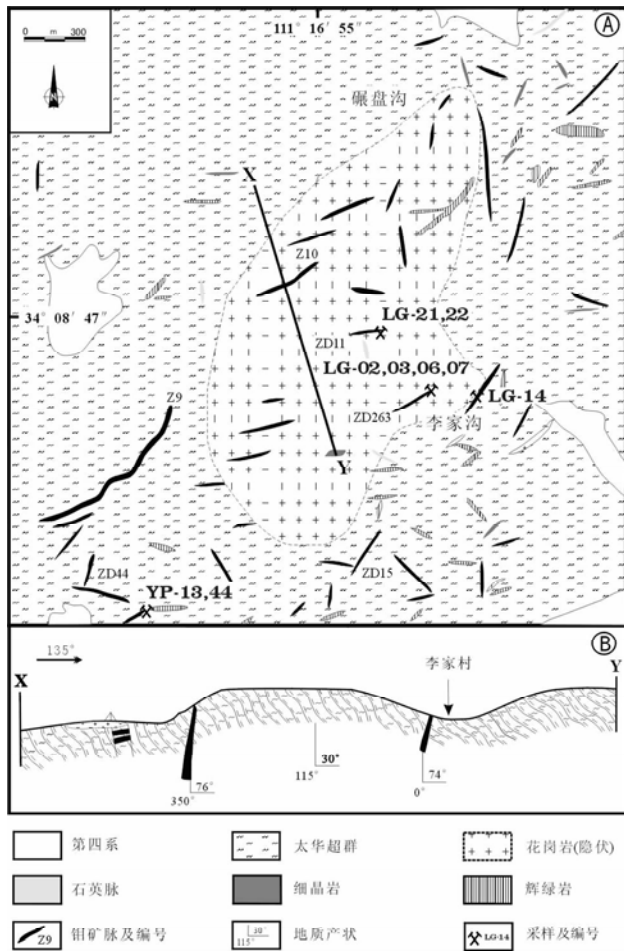


图2 寨凹钼矿床高磁异常解释图
 A-矿床地质略图；B-碾盘沟第02号勘探剖面图
 Fig.2 The map showing high magnetic anomaly explain for Zhaiwa molybdenum deposit
 Figure A showing the geology of the ore camp; figure B showing the geological profile No. 02 of the Nianpangou

或指向南的厚皮推覆构造带(张国伟等,2001)。熊耳地体发育大量燕山期花岗岩类,五丈山、蒿坪、金山庙等大型花岗岩基主要分布在中部,合称花山杂岩;花山杂岩以北发育较多燕山期小型斑岩体和爆破角砾岩筒,并蕴涵金、钼等矿床,如雷门沟斑岩钼矿和祁雨沟爆破角砾岩筒型金矿(范宏瑞等,2000;郭东升等,2007);花山杂岩以南则发育大量断裂构造控制的金/银矿床(Chen *et al.*, 2004, 2008)。这些花岗岩类和矿床均被解释为扬子与华北陆块之间碰撞造山及其后续造山带伸展垮塌过程的产物(Chen *et al.*, 2007, 2009)。

3 矿床地质

寨凹钼矿产于熊耳地体西南部的太华超群变质基底中(图1),矿区被三门-铁炉坪(STF)断裂穿过,发育NNE和NW向次级断裂构造;除辉绿岩脉外,寨凹地区低重力、弱磁

性的特征被解释为隐伏燕山期花岗岩岩体(杨群周等,2003)。钼矿体为受区域脆韧性剪切带控制的脉状矿体,矿脉走向主要为北东东,倾向为北西,倾角较陡,为 $58^{\circ} \sim 80^{\circ}$ (图2B);沿剪切带发育含钼石英脉,钼矿体宽约 $10 \sim 15\text{m}$,延伸长,钼平均品位 0.064% ,品位最高可达 1.87% ,矿床规模尚不确定。

原生矿石可划分为石英脉型及构造蚀变岩型两类。钼矿物主要为辉钼矿,其赋存方式主要有两种,一是呈自形-半自形粒状、叶片状、团块状赋存于石英脉中(图3C),二是呈浸染状、薄膜状赋存于围岩表面或石英脉与围岩接触面上(图3B、D)。其他金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿等。脉石矿物主要有石英、萤石、斜长石、白云母、方解石、绿泥石等。其中,石英含量大约 $90\text{vol.}\%$,硫化物含量较低,一般 $<5\text{vol.}\%$ 。矿石构造包括块状、脉状、网脉状、条带状、角砾状、浸染状等构造。矿石结构包括粒状结构、叶片状、针状、长柱状结构、交代结构、充填结构、共结边结构、固溶体分离结构等。

围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化等(邓小华等,2008a)。根据矿脉穿插关系、矿石组构、矿物组合等,将成矿过程划分为3个阶段(图3):石英-辉钼矿阶段(I)、石英-多金属硫化物阶段(II)、石英-碳酸盐阶段(III)。I阶段矿物组合为石英-辉钼矿,呈脉状充填在围岩中,石英颗粒粗大,表面粗糙,遭受构造应力而破碎、变形,具明显波状消光现象,此阶段为主要的钼成矿阶段;II阶段可细分为两个亚阶段,石英-粗粒黄铁矿-闪锌矿阶段(IIa)和石英-黄铜矿-黄铁矿阶段(IIb),矿物组合分别为石英-粗粒黄铁矿-闪锌矿-辉钼矿和石英-黄铜矿-黄铁矿-辉钼矿,此阶段矿化组合复杂,但钼矿化较弱,不属于钼主成矿阶段;III阶段发育石英-碳酸盐细脉,几乎没有矿化。

4 样品及测试方法

本次研究对寨凹钼矿9件矿石样品进行了Re-Os同位素年龄测定,其中李家沟矿脉7件,碾盘沟矿脉2件,具体采样位置和样品特征见图2、图3和表1。矿石样品经粉碎、分离、粗选和精选,获得了纯度 $>99\%$ 的辉钼矿单矿物。

辉钼矿样品分解、Re、Os纯化分离在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成。采用Carius管密封溶样技术,用浓 HNO_3 代替逆王水分解样品,在样品溶解的同时,使Mo转换成 MoO_3 不溶物,从而达到了分析物与基体元素的分离,大大简化了Re的化学分离过程(李晶等,2009)。样品分解及Re、Os分离过程简述如下:依次将 ^{185}Re 稀释剂、正常Os溶液和辉钼矿样品准确称量于长 220mm 、内径 25mm 、壁厚 2mm 的玻璃管中,并将其移入盛有酒精和液氮糊状物的保温杯中,待充分冷却,缓慢加入 10mL 浓 HNO_3 。等溶液完全结冰后,用煤气与氧气的混合火焰加热玻璃管的顶端并使其密封。待管子内容物完全融化

并恢复至室温后,将其转移入不锈钢套中。然后,放置于烘箱中,从低温开始缓慢升温,达 225℃ 后,计时保温 24 小时。待不锈钢套冷却后,取出管子。按照上述冷冻方法,将含有溶解样的密封管冷冻结冰。用玻璃刀在管子的中间位置刻出条痕,并用烧红的玻璃棒对准刻痕,使产生裂纹,并打开管子。打开的管子放置于通风柜中,待冰溶化后,取适量清液于 30mL 石英烧杯中,在 150℃ 电热板上蒸干。再加 0.5mL HNO₃ 蒸干,并重复三次。最后,用 10mL 2% HNO₃ 提取,该溶液用于 Re 的 ICP-MS 测定。剩余溶液,转移至蒸馏瓶中,

110℃ 加热蒸馏 15min,同时,用 10mL 置于冰水浴中的水吸收蒸出的 OsO₄,该吸收液用于 Os 的 ICP-MS 测定。

Re、Os 含量 ICP-MS 分析在长安大学成矿作用及其动力学开放研究实验室完成,分析仪器是美国热电公司生产的 X7 型 ICP-MS。仪器测试过程中,Re、Os 同位素质量分馏分别采用 Ir、Os 的天然丰度进行在线监测和校正。以国标 GBW04435 为标样,监控化学流程和分析数据的可靠性。获得的 9 件辉钼矿及 HLP 标样的 Re-Os 同位素测试结果列于表 2。

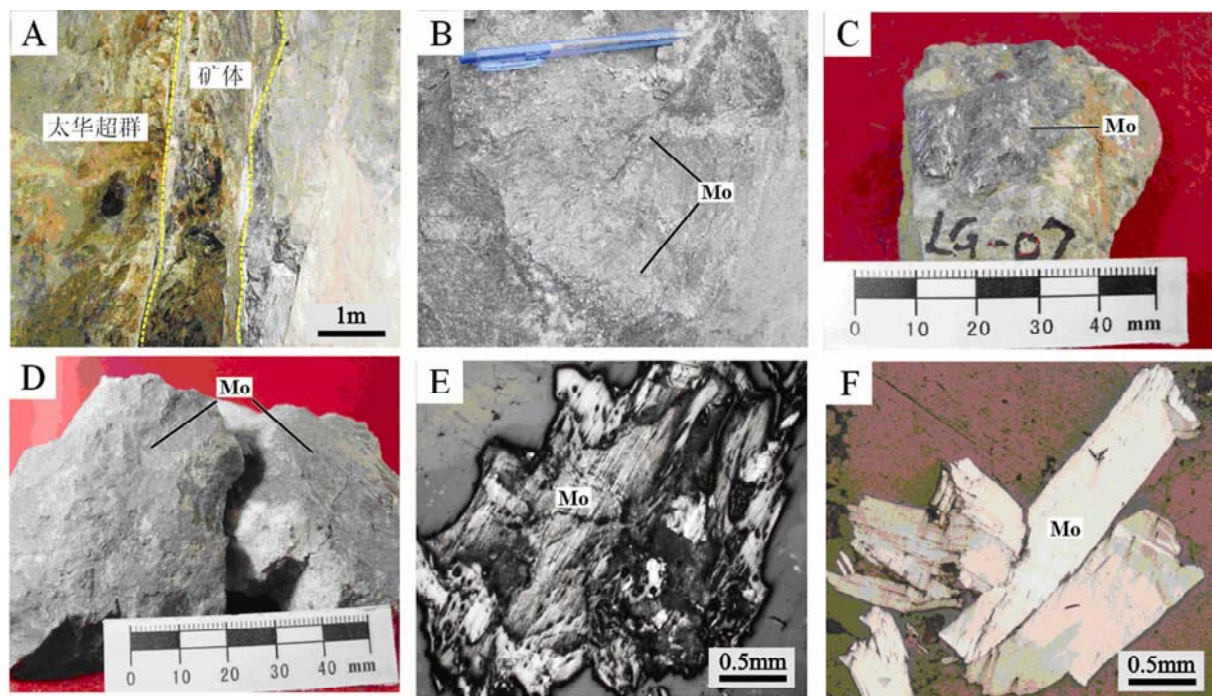


图 3 寨凹钼矿床不同类型钼矿石及辉钼矿产出特征

A. 产于蚀变破碎带的含矿石英脉; B. 赋存于围岩表面的团块状辉钼矿; C. 赋存于石英中的片状辉钼矿; D. 赋存于围岩表面的薄膜状辉钼矿; E. 鳞片状辉钼矿; F. 叶片状辉钼矿

Fig. 3 Different types of ores and molybdenite

A-Mo-bearing quartz vein hosted in altered fracture zone; B-massive molybdenites hosted in surface of wall rock; C-bladed molybdenites hosted in quartz; D-Molybdenites occurring in film hosted in surface of wall rock; E-lepidosome molybdenites; F-molybdenites occurring in foliated

表 1 寨凹钼矿样品特征表

Table 1 The table showing the characteristics of the samples in Zhaiwa Mo deposit

序号	样号	采样位置	矿石类型	样品特征
1	LG-02	李家沟采场	石英脉型钼矿石	辉钼矿呈团块状产于石英中
2	LG-03	李家沟采场	石英脉型钼矿石	辉钼矿呈团块状产于石英中
3	LG-06	李家沟采场	围岩型钼矿石	辉钼矿叶片状产于围岩表面(图 3B)
4	LG-07	李家沟采场	石英脉型钼矿石	辉钼矿呈团块状产于石英中(图 3C)
5	LG-14	李家沟 PD07	接触面型钼矿石	辉钼矿呈薄膜状产于石英与围岩接触面
6	LG-21	李家沟采钼矿脉	接触面型钼矿石	辉钼矿呈薄膜状产于石英与围岩接触面(图 3D)
7	LG-22	李家沟采钼矿脉	围岩型钼矿石	辉钼矿团块状产于围岩表面
8	YP-13	碾盘沟采钼平硐	石英脉型钼矿石	辉钼矿呈团块状产于石英中
9	YP-44	碾盘沟采钼平硐	石英脉型钼矿石	辉钼矿呈团块状产于石英中

表 2 寨凹钼矿辉钼矿 ReOs 同位素测年数据

Table 2 ReOs isotopic data for molybdenites in the Zhaiwa Mo deposit

样品号	样重/g	Re ($\times 10^{-6}$)		^{187}Re (nmol/g)		^{187}Os (nmol/g)		模式年龄(Ma)	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
LG-22	0.01536	31.57	0.26	106.12	0.86	3.12262	0.00434	1740.7	14.2
LG-02	0.01401	42.99	0.36	144.54	1.21	4.34825	0.02045	1779.2	16.1
LG-03	0.0995	6.76	0.06	22.73	0.19	0.68714	0.00230	1787.9	15.1
LG-06	0.1504	3.69	0.04	12.39	0.14	0.36808	0.00091	1757.1	20.4
LG-07	0.2933	1.95	0.01	6.54	0.04	0.19174	0.00043	1734.5	11.1
LG-14	0.2949	1.66	0.01	5.59	0.02	0.19263	0.00059	2031.9	10.2
LG-21	0.1917	3.01	0.02	10.10	0.07	0.27346	0.00150	1603.1	10.8
YP-13	0.284	1.05	0.01	3.52	0.03	0.10542	0.00033	1771.9	16.7
YP-44	0.2863	3.06	0.04	10.29	0.13	0.29485	0.00126	1695.5	22.6
HLP	0.0259	277.09	1.63	931.53	5.46	3.43129	0.01589	220.7	1.6

注: 模式年龄 t 按 $t = 1 / (\ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re}))$ 计算, 其中 $(\lambda^{187}\text{Re}) = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Smoliar *et al.*, 1996)。

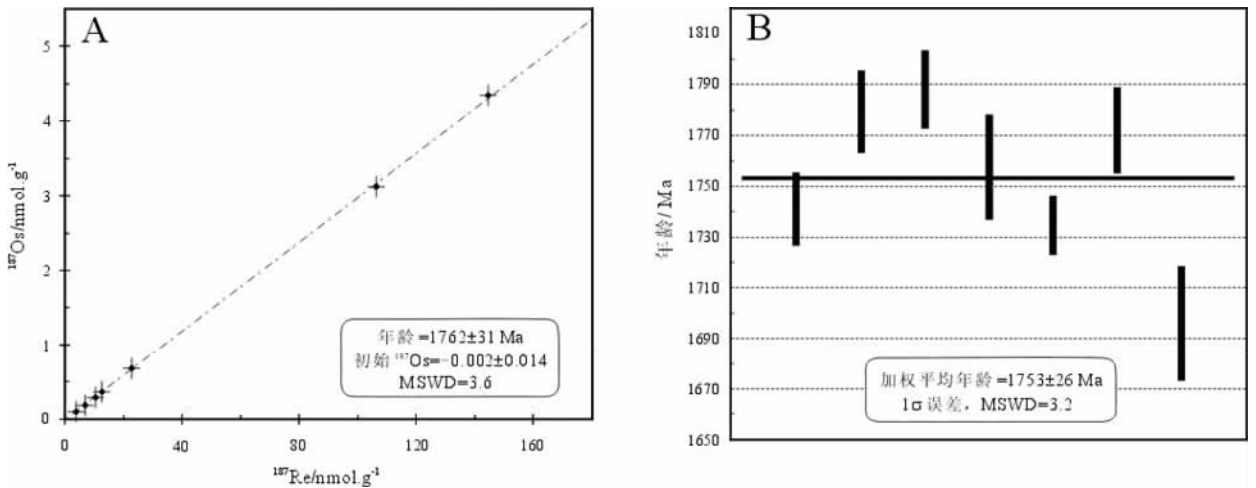


图 4 寨凹钼矿辉钼矿 ReOs 等时线年龄图(A)和加权平均年龄图(B)

Fig.4 Re-Os isochron (A) and weighted average age (B) of molybdenites from the Zhaiwa deposit

5 寨凹钼矿成矿年龄

由表 2 可知, 辉钼矿中 Re 的含量在 $(1.05 \sim 42.99) \times 10^{-6}$ 之间, Re 与 ^{187}Os 含量变化协调, 给出的 9 件模式年龄介于 $(1603.1 \pm 10.8) \sim (2031.9 \pm 10.2)$ Ma 之间。其中, LG-14 样品给出了偏大年龄 2031.9 ± 10.2 Ma, 而 LG-21 样品给出了偏小年龄 1603.1 ± 10.8 Ma。考虑到 Re 和 ^{187}Os 在辉钼矿单晶中存在失耦现象 (Stein *et al.*, 2003; 杜安道等, 2007), 认为样品 LG-14 与 LG-21 均为呈薄膜状产于石英与围岩接触面的辉钼矿 (图 3D), 纯度和均匀性低于另外 7 件团块状和叶片状辉钼矿, 可能受失耦现象的影响, 因此予以剔除。

采用 ^{187}Re 衰变常数 λ 值 $= 1.666 \times 10^{-11} / \text{a}$ (Smoliar *et al.*, 1996), 利用 ISOPLOT 软件 (Model 3, Ludwig, 1999) 将 7 件数据回归成一条直线, 求得等时线年龄为 1762 ± 31 Ma

(1σ 误差, MSWD = 3.6; 图 4A), 7 件模式年龄的加权平均值为 1753 ± 26 Ma (1σ 误差, MSWD = 3.2; 图 4B), 与等时线年龄在误差范围内一致。从 MSWD 值及拟合概率来看, 等时线年龄和加权平均模式年龄都是可靠的。 ^{187}Os 初始值为 -0.002 ± 0.014 , 接近于 0, 表明辉钼矿形成时几乎不含 ^{187}Os , 辉钼矿中的 ^{187}Os 系由 ^{187}Re 衰变形成, 符合 ReOs 同位素体系模式年龄计算条件, 说明所获得模式年龄也可反映辉钼矿的结晶时间。总之, 寨凹钼矿床辉钼矿 ReOs 等时线年龄提供了一个准确的成矿时间, 即 1762 ± 31 Ma。

6 讨论

6.1 东秦岭熊耳期成矿事件

东秦岭钼矿带钼矿化类型主要包括斑岩型、斑岩-夕卡岩型、矽卡岩型、碳酸岩脉型、石英脉型和萤石脉型等矿床, 其成矿年龄集中在 $160 \sim 110$ Ma、 220 Ma 左右以及 1762 Ma,

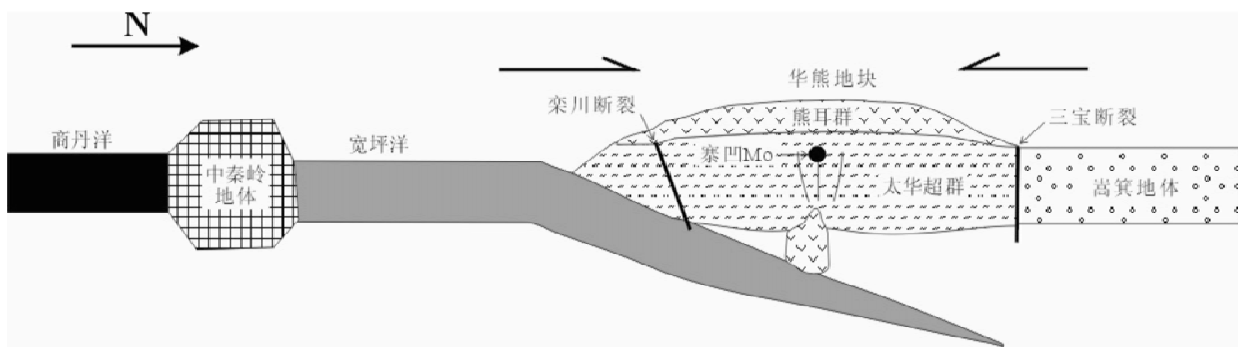


图5 秦岭造山带(1.85~1.5Ga)构造演化示意图(据陈衍景等,2003修改)

Fig.5 Tectonic evolution within the Qinling Orogen (during 1.85~1.5Ga; modified after Chen *et al.*, 2003)

分别对应于燕山期、印支期和熊耳期(1.85~1.45Ga; 胡受奚等, 1988)成矿事件。

燕山期成矿事件(160~110Ma)是东秦岭最重要的大规模成矿期,研究最为深入。黄典豪等(1994)获得黄龙铺热液碳酸岩脉型钼矿成矿年龄为220~231Ma,最早报道了印支期成矿事件;李诺等(2008)最新测得大湖金钼矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 218 ± 41 Ma,进一步揭示了印支期成矿事件的客观性。

作者测得的寨凹钼矿的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 1762 ± 31 Ma,给出了东秦岭钼矿带存在熊耳期钼矿化事件的信息,进一步拓宽了东秦岭钼矿带的找矿思路(邓小华等, 2008a)。事实上,魏庆国等(2009)最新测得龙门店钼矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 1875Ma,也证明了熊耳期或古元古代成矿事件的存在。东秦岭经历了长期、复杂的地质演化,但熊耳期的钼矿床仍能保存,说明熊耳期成矿事件较为强烈。值得一提的是,王官福等(1995)利用古地磁方法对熊耳山地区各类金矿床进行研究,发现存在熊耳期金矿化,熊耳山区多期成矿的特点。无论如何,东秦岭至少在熊耳期有 Mo 矿床形成。

6.2 Re 含量与成矿物质来源

胡受奚等(1988)研究表明,以钼为主的矿床中辉钼矿 Re 含量多数为 $10 \times 10^{-6} \sim 29 \times 10^{-6}$,明显低于以铜或以钨为主的钼矿。Mao *et al.* (1999)认为,从幔源经壳幔混源到壳源,辉钼矿 Re 含量各递降一个数量级,从 $n \times 10^{-4}$ 经 $n \times 10^{-5}$ 变化为 $n \times 10^{-6}$ 。Berzina *et al.* (2005)研究表明,西伯利亚和蒙古的 Cu-Mo 矿床辉钼矿 Re 含量 ($199 \times 10^{-6} \sim 460 \times 10^{-6}$)明显高于 Mo-Cu 矿床中辉钼矿 Re 含量 ($6 \times 10^{-6} \sim 57 \times 10^{-6}$),影响辉钼矿 Re 含量的主要因素为母岩浆成分、成矿流体中 Re 含量以及辉钼矿结晶时的物理化学条件。

寨凹矿床辉钼矿 Re 含量为 $1.05 \times 10^{-6} \sim 42.99 \times 10^{-6}$,不但与成矿元素以钼为主,铜矿化弱的特征相吻合,而且说明成矿物质来自壳源或壳幔混源,或者辉钼矿结晶时的物理化学条件变化较大。

6.3 矿床成因类型和构造环境

熊耳群火山岩形成构造背景一直存在争议,前人根据岩石学、地球化学等特征得出了截然不同的观点,即岩浆弧(胡受奚等,1988;贾承造等,1988;陈衍景和富士谷,1992;Zhao *et al.*, 2004; He *et al.*, 2008)和裂谷(孙枢等,1985;Zhao *et al.*, 2002)。事实上,特定的构造背景有利于形成特定类型的矿床(Kerrick *et al.*, 2000),矿床是地球动力学的有效探针(陈衍景等, 2008),例如,大陆裂谷带有利于形成铬铁矿、铜镍硫化物、钒钛磁铁矿,岩浆弧有利于形成浆控高温热液型和浅成低温型矿床等。而且,不同背景的同类矿床之间也势必存在一些尚未被揭示的差异(陈衍景等, 2008),例如,大陆内部的浆控高温热液型矿床成矿流体具有较高的 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 、K/Na 和 F/Cl 等比值,而岩浆弧背景的则相反(陈衍景和李诺,2009)。

流体包裹体研究显示(邓小华等, 2008a),寨凹矿床主要发育水溶液型和含子晶型流体包裹体,指示成矿流体具有高盐度(28.47 wt% NaCl. eqv ~ 28.6 wt% NaCl. eqv)的水溶液, CO_2 含量较低,不但与岩浆热液矿床特征(Mernagh *et al.*, 2007; 陈衍景等,2007)相似,而且符合岩浆弧背景的浆控高温热液矿床的特征(陈衍景和李诺,2009)。考虑到寨凹钼矿的年龄为 1762 ± 31 Ma,与熊耳群火山岩年龄为 1.76Ga(赵太平等,2004)相一致,加之多数学者主张熊耳群属于火山弧火山岩,因此,认为寨凹钼矿床是岩浆弧体制的浆控高温热液型矿床,而熊耳群则属于与 B 型俯冲有关的岩浆弧火山岩建造,即:古宽坪洋壳沿栾川断裂向北俯冲到华熊地块之下而派生熊耳群弧火山岩建造(图5)。

7 结论

(1)寨凹钼矿床的辉钼矿 Re-Os 模式年龄介于 $1603.1 \pm 10.8 \sim 2031.9 \pm 10.2$ Ma,其中 7 件样品给出了精确的等时线年龄为 1762 ± 31 Ma(1(误差, MSWD = 3.6), 模式年龄的加权平均值为 1753 ± 26 Ma(1 σ 误差, MSWD = 3.2),二者高度

一致, 确证了寨凹钼矿形成于古元古代, 指示了东秦岭熊耳期成矿事件的存在。

(2) 寨凹钼矿的辉钼矿 Re 含量为 $1.05 \times 10^{-6} \sim 42.99 \times 10^{-6}$, Re 与 ^{187}Os 含量变化协调, 反映了其成矿物质来源的不均匀性和多源性。

(3) 寨凹钼矿形成于活动大陆边缘弧背景, 为古宽坪洋壳沿栾川断裂向北俯冲到华熊地块之下而诱发的弧岩浆作用的结果, 虽遭受后期改造和破坏, 仍有部分保留至今。

(4) 寨凹钼矿的形成指示秦岭造山带在中元古代初期为洋陆俯冲的挤压背景, 指示熊耳群构造环境为洋陆俯冲的岩浆弧背景, 而非裂谷。

致谢 研究工作得到陈衍景教授的指导, 野外工作得到河南有色地矿局有关同行的大力支持, 样品处理得到北京大学倪德宝高级工程师的帮助, 两位评审人提出了宝贵的修改意见, 特致谢意!

References

Berzina AN, Sotnikova VI, Economou-Eliopoulos M and Eliopoulos DG. 2005. Distribution of rhenium in molybdenite from porphyry Cu-Mo and Mo-Cu deposits of Russia (Siberia) and Mongolia. *Ore Geology Reviews*, 26: 91 – 113

Chen YJ and Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan, China (in Chinese). Chinese Seismological Press, Beijing, 234p (in Chinese)

Chen YJ and Li N. 2009. Nature of ore-fluids of intracontinental intrusion-related hypothermal deposits and its difference from those in island arcs. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (10): 2477 – 2508 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ and Zhao YC. 1997. Geochemical characteristics and evolution of REE in the Early Precambrian sediments: Evidences from the southern margin of the North China craton, *Episodes*, 20(2): 109 – 116

Chen YJ, Chen HY, Zaw K, Pirajno F and Zhang ZJ. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 31: 139 – 169

Chen YJ, Ni P, Fan HR, Pirajno F, Lai Y, Su WC and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085 – 2108 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ, Pirajno F, Li N, Guo DS and Lai Y. 2009. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe-hosted gold deposit, Qinling orogen, Henan province, China: Implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 35: 245 – 261

Chen YJ, Pirajno F and Sui YH. 2004. Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, Henan, China: A case study of orogenic silver deposits and related tectonic setting. *Mineralium Deposita*, 39: 560 – 575

Chen YJ, Pirajno F and Qi JP. 2008. The Shangong Gold Deposit, Eastern Qinling Orogen, China: Isotope Geochemistry and Implications for Ore Genesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 252 – 266

Chen YJ, Sui YH and Pirajno F. 2003. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits: Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, east Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 552 – 568 (In Chinese with English abstract)

Chen YJ, Xiao WJ and Zhang JJ. 2008. Ore-system as a geodynamic probe. *Geology in China*. 35(6), 1059 – 1073 (in Chinese with

English abstract)

Chen YJ. 2006. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential. *Geology in China*, 33: 1181 – 1196 (In Chinese with English abstract)

Deng XH, Chen YJ, Yao JM, Li WB, Li N, Wang Y, Mei M and Zhang Y. 2008a. Fluid inclusion constraints on the origin of the Zhaiwa Mo deposit, Luoning County, Henan province. *Geology in China*, 35 (6): 1250 – 1266 (In Chinese with English abstract)

Deng XH, Li WB, Li N, Mei M and Zhang Y. 2008b. Study of fluid inclusions and ore genesis of the Zhiafng Mo deposit in Songxian Coutury, Henan province. *Acta Geologica Sinica*, 24(9): 2133 – 2148 (In Chinese with English abstract)

Du AD, Qu WJ, Wang DH, Li HM, Feng CY, Liu H, Ren J and Zeng FG. 2007. Subgrain-size decoupling of Re and ^{187}Os within molybdenite. *Mineral Deposit*, 26(5): 572 – 580 (In Chinese with English Abstract)

Fan HR, Xie YH and Wang YL. 1993. The properties of magmatic hydrothermal fluid of Huashan granitic batholith in western Henan province and their relationship to gold mineralization. *Acta Petrol. Sin.*, 9: 136 – 145 (In Chinese with English abstract)

Fan HR, Xie YH, Zheng XZ and Wang YL. 2000. Ore-forming fluids in hydrothermal breccia-related gold mineralization in Qiyugou, Henan Probince. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 559 – 563 (in Chinese with English abstract)

Guo DS, Chen YJ and Qi JP. 2007. Isotope geochemistry and ore genesis of the Qiyugou gold deposit, Henan: A synthesis. *Geological Review*, 53(2): 217 – 228 (in Chinese with English Abstract)

He YH, Zhao GC, Sun M and Wilde SA. 2008. Geochemistry, isotope systematics and petrogenesis of the volcanic rocks in the Zhongtiao Mountain: An alternative interpretation for the evolution of the souther margin of the North China Craton. *Lithos*, 102: 158 – 178

Hu SX (ed.). 1988. *Geology and Metallogeny of the Collision Belt Between the South China and North China Plates*. Nanjing: Nanjing University Press, 558 (in Chinese)

Huang DH, Wu CY, Du AD and He HL. 1994. Re-Os isotopic ages of molybdenum deposits in east Qinling and their significance. *Mineral Deposits*, 13(3): 221 – 230 (in Chinese with English abstract)

Jia CZ, Shi YS and Guo LZ. 1988. *Plate Tectonics of Eastern Qinling Mountains of China*. Nanjing University Press, Nanjing, 130 (In Chinese with English abstract)

Kerrich R, Goldfarb R, Groves D, Garwin S and Jia YF. 2000. The characteristics, origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Sci China Ser D*. 43(supp): 1 – 68

Li J, Sun YL, He K and Xian WS. 2009. The improved molybdenite Re-Os dating method and its application. *Acta Petrologica Sinica*, in press (In Chinese with English abstract)

Li N, Chen YJ, Zhang H, Zhao TP, Deng XH, Wang Y and Ni ZY. 2007. Molybdenum deposits in East Qinling. *Earth Science Frontiers*, 14: 186 – 198 (in Chinese with English abstract)

Li N, Sun YL, Li J, Xue LW and Li WB. 2008. Molybdenite Re-Os isotope age of the Dahu Au-Mo deposit, Xiaqingling and the Indosinian mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 810 – 816 (In Chinese with English abstract)

Liu GY, Wen SP, Tian KQ, Wang FR and Zhao YL. 2007. Isomerism of MoS_2 and Zhifang thick-vein type molybdenum deposit. *China Molybdenum industry*, 31(2): 14 – 17 (in Chinese with English abstract)

Ludwig K. 1999. *Isoplot/Ex Version 2.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Geochronology Center, Berkeley, Special Publication 1a

Mao JW, Xie GQ, Bierlein F, Qu WJ, Du AD, Ye HS, 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. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (18): 4607 – 4626

Mao JW, Zhang ZC and Zhang ZH. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance. *Geochimica et*

- Cosmochim Acta, 63(11-12): 1815-1818
- Mernagh TP, Bastrakov EN, Zaw K, Wygralak AS and Wyborn LAI. 2007. Comparison of fluid inclusion data and mineralization processes for Australian orogenic gold and intrusion-related gold systems. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 21-32
- Ni ZY, Li N, Guan SJ and Zhang H. 2008. Characteristics of fluid inclusions and ore genesis of the Dahu Au-Mo deposit in the Xiaqingling gold field, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2058-2068 (in Chinese with English abstract)
- Smoliar ML, Walker RJ and Morgan JW. 1996. Re-Os ages of group IA, IIA, IVA and IVB iron meteorites. *Science*, 271: 1099-1102
- Stein HJ, Scherst' en A, Hannah JL and Markey RJ. 2003. Subgrainscale decoupling of Re and ¹⁸⁷Os and assessment of laser ablation ICP-MS spot dating in molybdenite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(19): 3673-3686
- Sun S, Zhang GW and Chen ZM. 1985. *Geologic Evolution of the South of the North China Fault-block*. China Metallurgical Industry Press, Beijing, 267 (In Chinese)
- Wang GF, Chen ZH, Ding SY and Ren FG. 1995. The palaeomagnetic study of the mineralization age of gold deposits in the Xiongershan area, Henan Province. *Acta Geologica Sinica*, 69(3): 255-266 (In Chinese with English abstract)
- Wang HH, Chen YJ and Gao XL. 2001. The isotope geochemistry of the Kangshan gold deposit, Henan and its illustration of the CPMF model. *Mineral Deposit*, 20: 190-198 (In Chinese with English Abstract)
- Wei QG, Yao JM, Zhao TP, Sun YL, Li J, Yuan ZL, Qiao B. 2009. Discovery of a ~1.9Ga Mo deposit in the eastern Qinling orogen: Molybdenite Re-Os ages of the Longmudian Mo deposit in Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2747-2751 (in Chinese with English abstract)
- Yang QZ, Peng SL, Zhang SW and Liu LE. 2003a. Geological characteristics and ore-forming prospect of Zhai; wa copper ore of porphyry type in west Henan. *Contributions Geology and Mineral Resources Research*, 18(1): 43-46 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. *Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics*. Beijing: Science Press, 855 (in Chinese)
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2004. A Paleo-mesoproterozoic supercontinent: Assembly, growth and breakup. *Earth-Science Reviews*, 67: 91-123
- Zhao TP, Zhai MG, Xia B, Li HM, Zhang YX and Wan YS. 2004. Study on the zircon SHRIMP ages of the Xiong'er Group volcanic rocks: Constraint on the starting time of covering strata in the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 9(23): 2495-2502 (In Chinese with English abstract)
- Zhao TP, Zhou MF, Zhai M and Xia B. 2002. Paleoproterozoic rift-related volcanism of the Xiong'er Group, North China Craton: Implications for the breakup of Columbia. *International Geology Reviews*, 44: 336-351
- 附中文参考文献**
- 陈衍景, 李诺. 2009. 大陆内部岩浆控高温热液矿床成矿流体性质及其与岛弧区同类矿床的差异. *岩石学报*, 25(10): 2477-2508
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 234
- 陈衍景, 刘丛强, 陈华勇, 张增杰, 李超. 2000. 中国北方石墨矿床及赋矿孔达岩系碳同位素特征及有关问题讨论. *岩石学报*, 16(2): 233-244
- 陈衍景, 隋颖慧, F Pirajno. 2003. CMF模式的排他性依据和造山型银矿实例: 东秦岭铁炉坪银矿同位素地球化学. *岩石学报*, 19(3): 552-568
- 陈衍景, 肖文交, 张进江. 2008. 成矿系统: 地球动力学的有效探针. *中国地质*, 35(6): 1059-1073
- 陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力. *中国地质*, 33: 1181-1196
- 邓小华, 陈衍景, 姚军明, 李文博, 李诺, 王运, 糜梅, 张颖. 2008a. 河南省洛宁县寨凹组矿床流体包裹体研究及成矿成因. *中国地质*, 35(6): 1250-1266
- 邓小华, 李文博, 李诺, 糜梅, 张颖. 2008b. 河南嵩县纸房组矿床流体包裹体研究及矿床成因. *岩石学报*, 24(9): 2133-2148
- 杜安道, 屈文俊, 王登红, 李厚民, 丰成友, 刘华, 任静, 曾法刚. 2007. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 ¹⁸⁷Os 的失耦现象. *矿床地质*, 26(5): 572-580
- 范宏瑞, 谢亦汉, 王英兰. 1993. 豫西花山花岗岩岩浆热液性质及与金成矿的关系. *岩石学报*, 9: 136-145
- 范宏瑞, 谢亦汉, 郑学正, 王英兰. 2000. 河南祁雨沟热液角砾岩体型金矿床成矿流体研究. *岩石学报*, 16(4): 559-563
- 郭东升, 陈衍景, 祁进平. 2007. 河南祁雨沟金矿同位素地球化学和矿床成因分析. *地质论评*, 53(2): 217-228
- 胡受奚(主编). 1988. *华北与华南古板块拼合带地质和成矿*. 南京: 南京大学出版社, 588
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 何红廖. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼钼同位素年龄及其意义. *矿床地质*, 13(3): 221-230
- 贾承造, 施央申, 郭令智. 1988. *东秦岭板块构造*. 南京: 南京大学出版社, 130
- 李晶, 孙亚莉, 何克, 洗伟胜. 2009. 辉钼矿 Re-Os 同位素定年方法的改进与应用. *岩石学报*, 待刊
- 李诺, 陈衍景, 张辉, 赵太平, 邓小华, 王运, 倪智勇. 2007. 东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景. *地学前缘*, 14(5): 186-198
- 李诺, 孙亚莉, 李晶, 薛良伟, 李文博. 2008. 小秦岭大湖金钼矿床辉钼矿铼钼同位素年龄及印支期成矿事件. *岩石学报*, 24(4): 810-816
- 刘国印, 温森坡, 田恪强, 王凤茹, 赵永利. 2007. MoS₂ 的同质异相与纸房石英大脉型钼矿床. *中国钼业*, 31(2): 14-17
- 倪智勇, 李诺, 管申进, 张辉. 2008. 河南小秦岭金矿田大湖金-钼矿床流体包裹体特征及矿床成因. *岩石学报*, 24(9): 2058-2068
- 孙枢, 张国伟, 陈志明. 1985. *华北断块区南部前寒武纪地质演化*. 北京: 冶金工业出版社, 267
- 王官福, 陈志宏, 丁士任, 任富根. 1995. 河南熊耳山地区金矿成矿时代的古地磁研究. *地质学报*, 69(3): 255-266
- 王海华, 陈衍景, 高秀丽. 2001. 河南康山金矿同位素地球化学及其对碰撞造山成矿模式的例证. *矿床地质*, 20: 190-198
- 魏庆国, 姚军明, 赵太平, 孙亚莉, 李晶, 原振雷, 乔波. 2009. 东秦岭发现 ~1.9Ga 钼矿床——河南龙门店钼矿床 Re-Os 定年. *岩石学报*, 25(11): 2747-2751
- 杨群周, 彭省临, 张侍威, 刘灵恩. 2003. 豫西寨凹斑岩型铜矿地质特征及其成矿远景. *地质找矿论丛*, 18(1): 43-46
- 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, 855
- 赵太平, 翟明国, 夏斌, 李惠民, 张毅星, 万渝生. 2004. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约. *科学通报*, 49(22): 2342-2349