

# 小秦岭镰子沟金矿床辉钼矿 Re-Os 年龄和锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

代军治<sup>1,2</sup>, 高菊生<sup>1</sup>, 钱壮志<sup>2</sup>, 王 渊<sup>3</sup>, 周金隆<sup>3</sup>, 高 毅<sup>3</sup>

DAI Junzhi<sup>1,2</sup>, GAO Jusheng<sup>1</sup>, QIAN Zhuangzhi<sup>2</sup>, WANG Yuan<sup>3</sup>, ZHOU Jinlong<sup>3</sup>, GAO Yi<sup>3</sup>

1. 西北有色地质矿业集团有限公司, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学, 陕西 西安 710054;

3. 咸阳西北有色七一二总队有限公司, 陕西 咸阳 712000

1. Northwest Geological and Mining Group Co., Ltd., for Nonferrous Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. No. 712 General Party Co., Ltd., of Northwest Mining and Geology for Nonferrous Metals, Xianyang 712000, Shaanxi, China

**摘要:** 镰子沟金矿床位于小秦岭金矿集区西部, 矿体受断裂和石英脉体控制, 围岩蚀变以钾化和硅化为主。矿床浅部以金矿为主, 深部发现金钼(共)伴生矿体。为了确定镰子沟金矿床成岩、成矿时代, 选择镰子沟金矿床正长斑岩和金钼矿石分别进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 同位素研究。获得正长斑岩的 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄加权平均值为 1802.9±9.9Ma, 此年龄明显早于小秦岭地区金矿床的形成时代; 获得辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 128.8±6.5Ma, 指示矿床形成于早白垩世, 晚于区域已知花岗岩形成时代。综合研究认为, 镰子沟金矿床的形成与区域花岗岩无关, 可能与深部流体或隐伏岩浆有关。

**关键词:** 地质特征; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; Re-Os 年龄; 成岩成矿时代; 镰子沟金矿床

**中图分类号:** P618.51; P597<sup>+.3</sup>      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-2552(2019)08-1369-09

**Dai J Z, Gao J S, Qian Z Z, Wang Y, Zhou J L, Gao Y. Zircon U-Pb age of intrusive rocks and molybdenite Re-Os age for Lianzigou Au deposit in Xiaoqinling area and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(8):1369-1377**

**Abstract:** The Lianzigou gold deposit is located in the west of Xiaoqinling Au ore concentration area. The orebodies are hosted in the upper strata of Taihua Group and controlled by fault fracture zone or quartz veins. The wall rock alteration is dominated by potassium alteration and silicification. Au(Mo) orebodies have been discovered in the depth of the deposit. To constrain its petrogenic and metallogenic ages, the authors carried out LA-ICP-MS zircon U-Pb dating on syenite porphyry and Re-Os dating on molybdenite, respectively. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of syenite porphyry gave a weighted average age of 1802.9±9.9Ma, which is clearly older than the age of large-scale gold mineralization in the Xiaoqinling area. Re-Os dating on molybdenite from the Au orebodies gave an isochron age of 128.8±6.5Ma, indicating that the Au and Mo mineralization occurred in Early Cretaceous. The Re-Os age is younger than the petrogenic ages of granites in the Xiaoqinling area, showing that there is no direct relationship between the known granitic magmatism and the mineralization of the Lianzigou Au deposit. Deep fluids or concealed magmatic intrusion probably played an important role in mineralization.

**Key words:** geological characteristics; LA-ICP-MS zircon U-Pb age; Re-Os age; petrogenic and metallogenic ages; Lianzigou Au deposit

小秦岭是中国重要的金矿集中区和矿产地, 区内矿床类型以石英脉型为主, 构造蚀变岩型、糜棱岩型、复合型及爆破角砾岩型次之<sup>[1-6]</sup>。近年来, 随着整装勘查区危机矿山深部找矿工作证实及矿产

收稿日期: 2017-11-01; 修订日期: 2018-06-05

资助项目: 西北有色地质矿业集团博士后项目《金堆城外围金、钼矿床成矿特征与找矿预测研究》(编号: 西色地发[2016]46号)

作者简介: 代军治(1978-), 男, 博士, 高级工程师, 从事金属矿产资源勘查研究和技术管理。E-mail: daijunzhi@163.com

资源潜力评价的实施,认为小秦岭深部找矿潜力巨大,仍存在“第二个小秦岭”。长期以来是地勘单位和科研院校重点关注地区,先后开展了大量研究工作,取得丰硕的研究成果,但在成矿时代、成矿物质来源、成矿与燕山期花岗岩的关系等研究方面仍未达成共识:部分学者认为,小秦岭地区金矿床在时间和空间上与燕山期花岗岩和基性脉岩关系密切<sup>[1-2,4,7]</sup>;多数学者倾向于小秦岭金成矿受太华群、燕山期花岗岩和构造多重因素控制<sup>[5,8-10]</sup>;部分学者则提出金矿与燕山期花岗岩无关,与深部流体或幔源流体有关<sup>[6,11-14]</sup>。镰子沟金矿床位于华北板块南缘小秦岭金矿集区西部,是陕西小秦岭地区即葫芦沟构造蚀变岩型金矿之后发现的第二个蚀变岩型金矿床,矿体受断裂构造和钾化蚀变岩控制明显,目前成矿时代及成矿规律仍然不明晰。本文通过镰子沟金矿床成岩、成矿时代的研究,为小秦岭地区金矿成矿规律、成矿过程与找矿预测提供新的证据。

## 1 矿区地质

镰子沟金矿床位于华北板块南缘小秦岭西部驾鹿金矿田内,区域出露地层为太古宇太华群和中元古界高山河群(图1)。太华群岩石主要由片麻岩、混合岩、斜长角闪岩、变粒岩、浅粒岩及磁铁石英岩等组成,原岩为一套海相中基性火山沉积岩系,形成时代为2.9~1.9Ga<sup>[17]</sup>。太华群是区域金矿的主要赋矿层位,自下而上分为大月坪组、三关庙组、洞沟组、板石山组和秦仓沟组。高山河群以一层不稳定的石英砾岩层与下伏地层角度不整合接触,主要由滨海-浅海相碎屑岩及镁质碳酸盐岩(中部)组成。矿区主要为太华群秦仓沟组斜长片麻岩和高山河群变石英砂岩夹泥砂质板岩。

近EW向的朱家沟-小河断裂、回马坪-蜂王断裂及NE向太子坪-上坪断裂、高山河-驾鹿断裂构成了区域主构造格架。矿区构造以角度不整合和

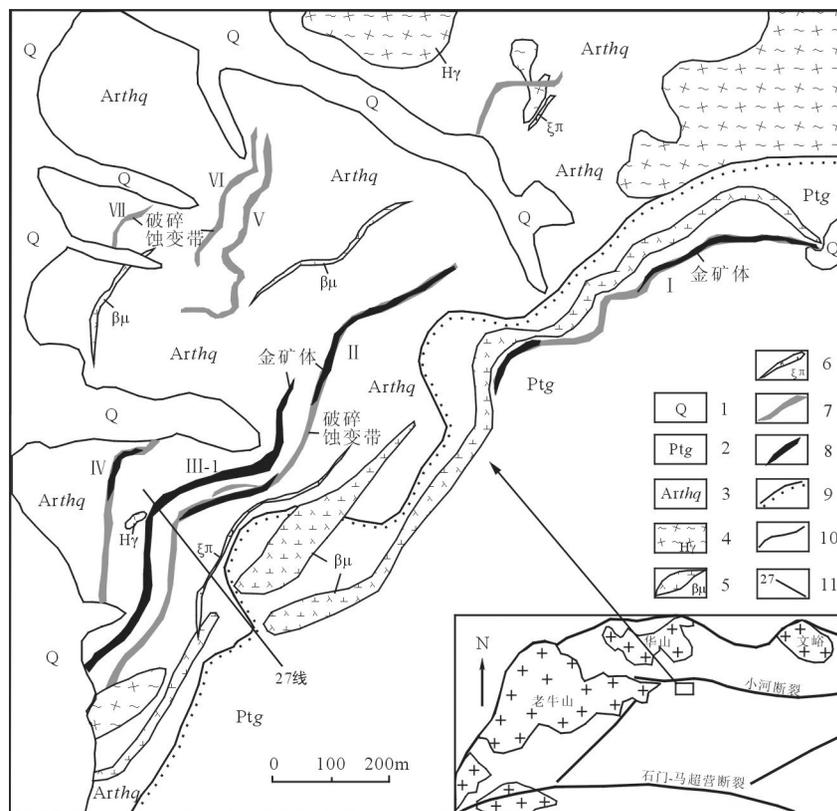


图1 镰子沟金矿床地质图<sup>[15-16]</sup>

Fig. 1 Geological map of the Lianzigou Au deposit

1—第四系;2—中元古界高山河群;3—新太古界太华群秦仓沟组;4—片麻状混合岩;5—辉绿岩脉;6—正长斑岩脉;  
7—破碎蚀变带;8—金矿体;9—不整合地质界线;10—地质界线;11—勘探线

断裂破碎带构造为主。断裂构造主要是高山河—驾鹿断裂旁侧的次级 NE—NNE 向断裂,是镰子沟金矿床的控矿构造,穿切不整合界面。

区域岩浆岩以燕山期华山、老牛山花岗岩和元古宙小河花岗岩为主,其次为各类混合岩。矿区范围内除正长斑岩脉、辉绿岩脉和由太华群变质而成的混合花岗岩外,不发育其他岩浆岩(图1)。2种脉岩均呈 NE 向,与矿区构造线方向一致。正长斑岩与矿体形态相似,靠近主矿体,呈斑状结构,斑晶主要为粗粒钾长石,基质以细粒钾长石为主,副矿物有锆石、屑石、磷灰石、磁铁矿。钾长石铁染化、高岭土化、绢云母化蚀变强烈,部分钾长石仅残余蚀变斑晶。辉绿岩脉穿切矿区秦仓沟组和高山河群,局部被正长斑岩穿切(镰子沟 31 勘探线附近)。

## 2 矿床(体)地质特征

镰子沟金矿床矿体受区内 NE—NNE 向断裂构造控制,以蚀变碎裂岩型和石英脉型赋存于太华群秦仓沟组内,部分产于不整合界面之上的高山河群内。现已圈出金矿体 8 个(I、II-1、II-2、III-1、III-2、V、VI、XI)、金钼矿体 2 个(IV、VIII号)。其中,III-1、II-2 号为主矿体,分布于秦仓沟组的破碎蚀变带中;I 号矿体分布于高山河群内(图1);IV、VIII 号矿体为隐伏金(钼)矿体,分布于 III-1 矿体上下盘,在深部分别有与 III-2、II-2 号矿体合并或相交的趋势(图2)。矿体整体走向 35°~80°,倾向 SE,倾角 25°~55°,金矿体倾角较陡,金钼矿体倾角较缓。矿体形态多为脉状、似脉状、透镜状,长 55~550m,厚 1.01~2.55m。矿石类型以石英脉型为主,蚀变碎裂岩型次之,浅表少量氧化型矿石。石英脉型矿石金品位略高,一般为  $2 \times 10^{-6}$ ~ $6 \times 10^{-6}$ ,蚀变碎裂岩型矿石金品位一般为  $0.5 \times 10^{-6}$ ~ $3 \times 10^{-6}$ ,氧化型矿石金品位则高达上百。金钼矿体中金平均品位为  $2.3 \times 10^{-6}$ ,共生钼最高 0.8%,一般小于 0.06%。

镰子沟金矿床围岩蚀变以破碎带为中心向两侧对称或不对称分布。蚀变带中部以钾化和硅化最强烈,其次为叠加于其上的少量碳酸盐化和重晶石化,中外带以碳酸盐化、绿泥石化、高岭土化、绢云母化蚀变为主,晚期褐铁矿化沿构造破碎带或矿物裂隙叠加于早期各阶段矿化蚀变岩之上。

矿石中金属矿物以黄铁矿和方铅矿为主,其次为黄铜矿、辉钼矿、黝铜矿、闪锌矿、碲化物<sup>[16]</sup>;

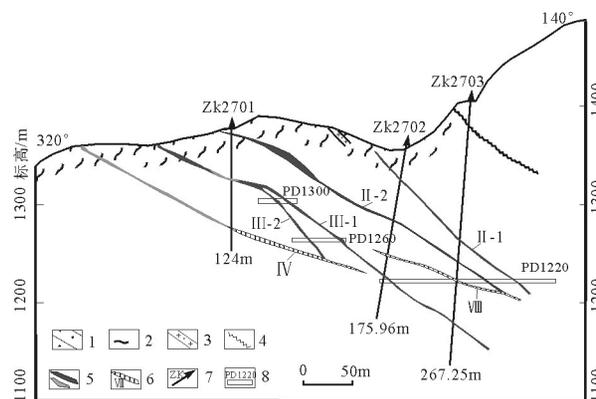


图2 镰子沟金矿床 27 线剖面

Fig. 2 Geological section along No. 27 exploration line of the Lianzigou Au deposit

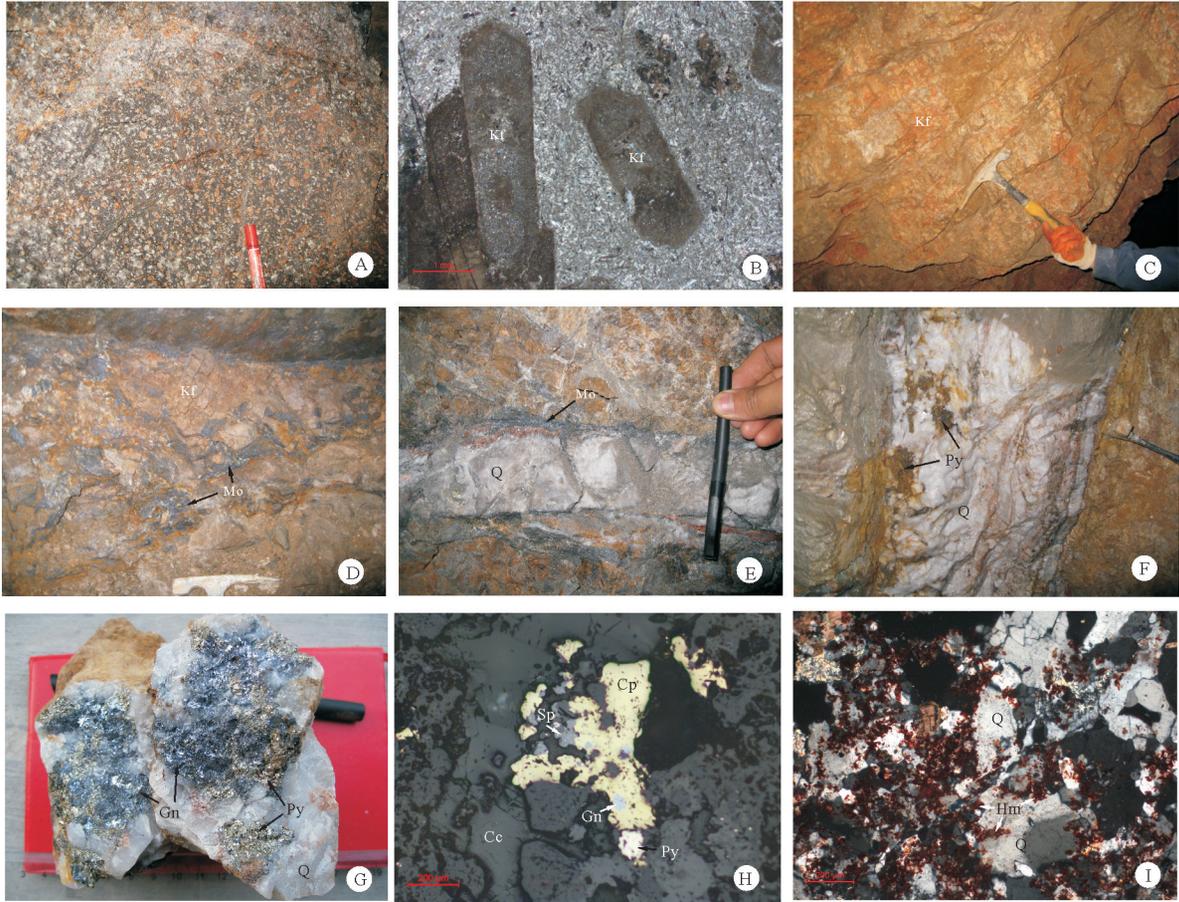
1—高山河群碎屑岩;2—秦仓沟组斜长片麻岩;3—正长斑岩;4—不整合接触面;5—金矿体及矿化体;6—金钼矿体;7—钻孔;8—坑道

脉石矿物主要有石英、钾长石,其次为绿泥石和绿帘石、高岭土、方解石和绢云母,少量重晶石。金主要以粒间金状态赋存于碲化物与硫化物(如碲化物与锌黝铜矿、碲铅矿与黄铜矿)、硫化物与脉石矿物粒间,其次是裂隙金和包裹金。辉钼矿呈薄膜状分布于钾化脉体的裂隙中或断裂破碎带两壁的断层泥中。

矿石结构有自形、半自形、他形晶粒结构、胶结(交代)结构、包含结构、碎裂结构等;矿石构造主要有块状、脉状、细脉—网脉状、角砾状、浸染状、碎裂状等。

根据矿石矿物共生组合、脉体相互穿插关系等特征,将镰子沟金矿床成矿阶段划分为 5 个阶段:①钾长石±石英早期蚀变阶段,以带状、团块状、条带状钾长石(图版 I—C)或脉状钾长石—石英脉为特征,硫化物不发育,矿化弱;②石英—辉钼矿(或黄铁矿)阶段(图版 I—D、E),以薄膜状、裂隙脉状辉钼矿±石英细脉或石英—黄铁矿细网脉交代钾化蚀变岩为特征,该阶段金、钼同时成矿,矿石的钼品位较高,金品位略低,在 VIII 号金(钼)矿体中为钾长石—石英—辉钼矿阶段,在其他金矿体中为石英—黄铁矿阶段;③石英—多金属硫化物—碲化物阶段(图版 I—F、G、H),以多金属硫化物型脉体的出现为特征,是主成矿阶段,黄铁矿、方铅矿、黄铜矿等多金属硫化物和碲化物发育,伴有微量重晶石、方解石等脉石矿物,金品位较高;④赤铁矿化阶段,以红褐色赤铁

图版 I Plate I



A、B—正长斑岩；C—强烈钾化围岩；D—钾化脉体裂隙中薄膜状辉钼矿；E—钾长石-石英脉型金(钼)矿石，辉钼矿分布于脉体两侧；F—石英脉型金矿体；G—多金属硫化物型矿石，方铅矿、黄铁矿共生产出；H—方解石交代共生黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿；I—细粒状赤铁矿集合体交代石英。Q—石英；Kf—钾长石；Cc—方解石；Mo—辉钼矿；Py—黄铁矿；Cp—黄铜矿；Gn—方铅矿；Hm—赤铁矿；Sp—闪锌矿

矿发育为特征，赤铁矿呈脉状或微细粒状沿矿体(石)裂隙胶结早成矿期的钾长石、石英、硫化物等(图版 I-1)；⑤方解石-石英阶段，以石英-方解石细脉穿切各阶段蚀变脉体为特征，硫化物较少，成矿弱。

### 3 成岩与成矿时代

#### 3.1 正长斑岩 U-Pb 年龄

根据脉岩的相互穿插关系和蚀变、矿化信息，本次采集镰子沟矿段 1300m 标高坑道内正长斑岩脉体样品(LZ-20)，用 LA-ICP-MS 技术对其中的锆石进行 U-Pb 同位素测试。锆石单矿物分选在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司进行，锆石制靶及阴极发光(CL)照相在北京锆年领航科技有限公司完成，LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年工作

在中国科学院大陆碰撞与高原隆升重点实验室进行。测试方法及流程见参考文献[18]。

正长斑岩锆石呈无色，透明度好，多具磨圆性质，为球粒状及不规则状，极少部分呈短柱状，大小为 50~100 $\mu\text{m}$ 。阴极发光图像显示，绝大多数锆石颜色较深，多呈云雾状，明暗相间的条带结构锆石相对少；部分锆石保存了继承锆石残核，核部颜色发暗，边部具有明亮环带；少数锆石颜色偏白(图 3)，可能与锆石中 Th 含量高、Pb 含量低有关。本次选择镰子沟矿段正长斑岩内 24 颗锆石的 25 个点进行 U-Pb 测试(表 1)，结果显示，镰子沟矿段正长斑岩锆石的 Th/U 值为 0.28~1.32，多数在 0.4~1.0 之间(表 1)，具有岩浆锆石的 Th、U 含量特征。根据锆石 CL 图像和年龄测试数据，锆石可分为 4 组：第 1 组由 11 颗锆石组成(3、6、10~12、18~21、23、24 号)，锆石

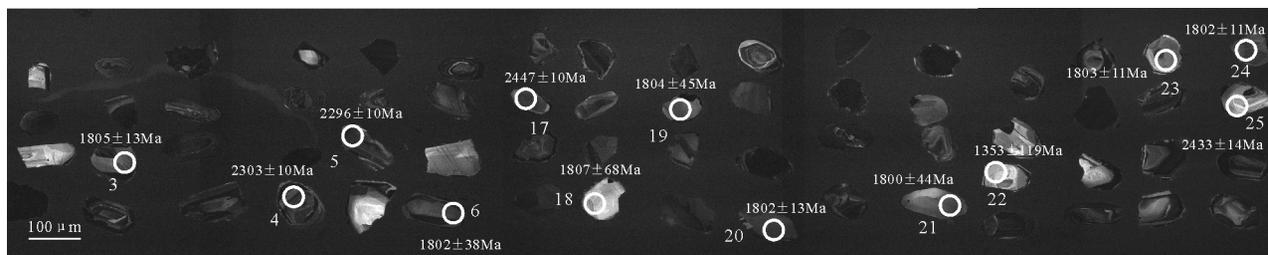


图3 镰子沟金矿床正长斑岩锆石阴极发光(CL)图像及测试位置

Fig. 3 CL images of the analyzed zircons of syenite-porphry from the Lianzigou Au deposit

CL 图像呈云雾状、部分显示振荡环带, 获得较好的谐和年龄, 在谐和图上与不一致线的交点年龄为  $1803 \pm 21\text{Ma}$ , 其  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄加权平均值为  $1802.9 \pm 9.9\text{Ma}$  (MSWD=0.0057) (图 4-b), 可代表正长斑岩的结晶年龄, 即正长斑岩形成于  $1802.9 \pm$

$9.9\text{Ma}$ ; 第 2 组锆石 (4、5、7、14、16、17 号) 显示明显的核幔结构, 表面年龄较老, 为捕获或继承锆石, 其中 7、14、16、17 号测点  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄加权平均值为  $2450 \pm 11\text{Ma}$ , 4、5 号测点  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄加权平均值为  $2300 \pm 13\text{Ma}$ , 指示捕获或继承锆石形成于古元古

表 1 镰子沟金矿床正长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic data for syenite-porphry from the Lianzigou Au deposit

分析点号	Th/ $10^{-6}$	U/ $10^{-6}$	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
LZ-20-3	88	114	0.77	0.11033	0.00159	4.7408	0.07512	0.31165	0.00404	1805	13	1774	13	1749	20
LZ-20-6	49	56	0.87	0.11013	0.00375	4.75394	0.16408	0.31309	0.00551	1802	38	1777	29	1756	27
LZ-20-10	118	110	1.08	0.11014	0.00168	4.51894	0.07516	0.29757	0.00388	1802	14	1734	14	1679	19
LZ-20-11	24	31	0.78	0.11036	0.00468	4.799	0.20184	0.31536	0.00623	1805	48	1785	35	1767	31
LZ-20-12	96	345	0.28	0.11027	0.00195	4.96993	0.09337	0.32686	0.0044	1804	17	1814	16	1823	21
LZ-20-18	23	30	0.76	0.11045	0.00647	4.96918	0.28668	0.32627	0.00828	1807	68	1814	49	1820	40
LZ-20-19	88	143	0.62	0.11027	0.00404	4.85384	0.17904	0.31922	0.00485	1804	45	1794	31	1786	24
LZ-20-20	113	130	0.87	0.11017	0.00154	4.89413	0.07565	0.32216	0.00419	1802	13	1801	13	1800	20
LZ-20-21	25	45	0.56	0.11004	0.00437	4.83971	0.19082	0.31896	0.00623	1800	44	1792	33	1785	30
LZ-20-23	167	200	0.84	0.1102	0.00125	4.61519	0.06121	0.30373	0.00383	1803	11	1752	11	1710	19
LZ-20-24	269	283	0.95	0.11013	0.00131	5.04404	0.0692	0.33215	0.00422	1802	11	1827	12	1849	20
LZ-20-4	151	273	0.55	0.14625	0.0017	8.59821	0.11647	0.42639	0.00543	2303	10	2296	12	2289	25
LZ-20-5	93	263	0.35	0.14573	0.00165	8.49724	0.11317	0.42289	0.00536	2296	10	2286	12	2274	24
LZ-20-7	100	267	0.37	0.15914	0.00197	10.33216	0.1462	0.47087	0.00609	2447	11	2465	13	2487	27
LZ-20-14	213	324	0.66	0.15962	0.00209	10.1717	0.15091	0.46215	0.00612	2452	11	2451	14	2449	27
LZ-20-16	259	197	1.32	0.15983	0.00238	10.08622	0.16535	0.45768	0.00609	2454	13	2443	15	2429	27
LZ-20-17	114	194	0.59	0.15919	0.00189	10.19534	0.14012	0.46448	0.00588	2447	10	2453	13	2459	26
LZ-20-1	130	227	0.57	0.1391	0.00473	6.39143	0.1963	0.33325	0.00487	2216	60	2031	27	1854	24
LZ-20-8	200	184	1.09	0.32585	0.00338	14.3458	0.17879	0.3193	0.00401	3598	9	2773	12	1786	20
LZ-20-9	314	368	0.85	0.18304	0.00481	8.821	0.19457	0.34952	0.00498	2681	44	2320	20	1932	24
LZ-20-15	97	190	0.51	0.14523	0.0046	6.00355	0.16877	0.29981	0.00439	2291	56	1976	24	1690	22
LZ-20-25	35	48	0.73	0.15786	0.00273	6.63535	0.12122	0.30483	0.00428	2433	14	2064	16	1715	21
LZ-20-2	42	66	0.63	0.0839	0.04434	1.38335	0.72769	0.11958	0.00603	1290	1181	882	310	728	35
LZ-20-13	444	436	1.02	0.04605	0.00656	0.34164	0.04832	0.05381	0.00088	/	259	298	37	338	5
LZ-20-22	43	68	0.64	0.08664	0.00519	2.18226	0.12608	0.18267	0.00291	1353	119	1175	40	1082	16

注: “/”表示无数据

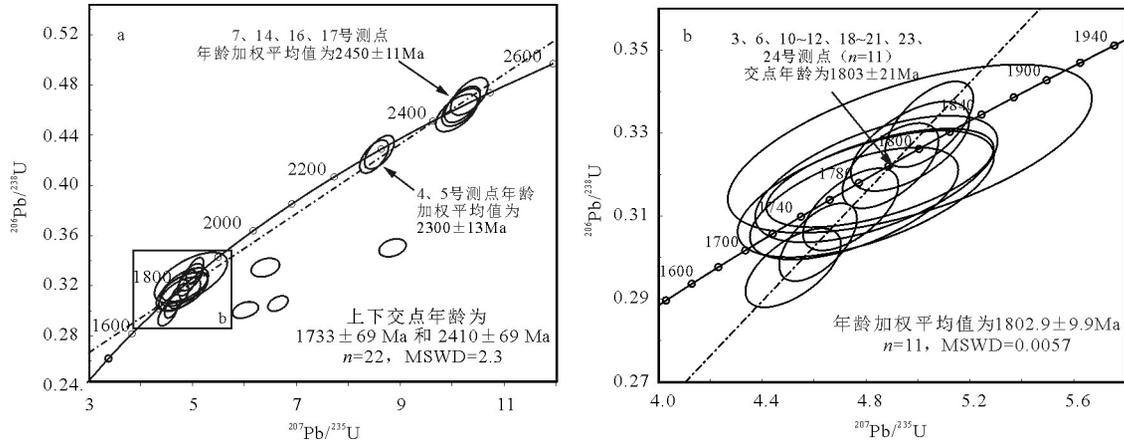


图4 镰子沟金矿床正长斑岩锆石U-Pb谐和图

Fig. 4 Concordia diagrams of zircon U-Pb ages for syenite-porphphyry from the Lianzigou Au deposit

代,且早期可能存在2期岩浆活动;第3组锆石(2、13、22号)虽然获得较小的表面年龄( $1290 \pm 1181\text{Ma}$ 、 $1353 \pm 119\text{Ma}$ ),但误差过大(表1),属不可靠年龄,不参与年龄计算;第4组锆石(1、8、9、15、25号)CL图像偏白,年龄数据谐和度差,在谐和图上远离谐和曲线(图4-a),可能由于Pb丢失引起,也不参与年龄计算。

### 3.2 辉钼矿Re-Os年龄

为准确厘定镰子沟金矿床的成矿时代,笔者选取了1220中段VIII号金(钼)矿体中4件钾长石-石英脉型(LZ-11、LZ-12、LZ-13、LZ-14)和1件碎裂岩型(LZ-15)矿石进行了辉钼矿Re-Os同位素测年。镰子沟金矿床金(钼)矿石中辉钼矿颗粒细小,且与断层泥混合产出,难以采用手工提纯法进行挑选。本次选择无污染浮选法对采集的辉钼矿样品进行提纯,优选出纯度均大于50%的单矿物(符合测试要求)进行测试。自然界中的Re和Os主要富集于辉钼矿中,除与基性、超基性岩有关的硫化物矿床外,其他矿床硫化物中的Re和Os含量甚微,基本

不影响Re-Os同位素测年。辉钼矿浮选提纯工作在西北有色地质研究院完成,辉钼矿Re-Os同位素测试工作在国家地质实验测试中心Re-Os同位素实验室完成。分析方法及程序详见Du等<sup>[19]</sup>。

从测试结果(表2)可以看出,5件辉钼矿样品的Re含量变化较大,为 $70.41 \times 10^{-9} \sim 390.70 \times 10^{-9}$ ,平均 $182.21 \times 10^{-9}$ ;  $^{187}\text{Os}$ 含量较低,为 $0.15 \times 10^{-9} \sim 0.78 \times 10^{-9}$ ,平均 $0.44 \times 10^{-9}$ ;普通Os含量较高,为 $0.20 \times 10^{-9} \sim 3.77 \times 10^{-9}$ ,平均 $1.99 \times 10^{-9}$ 。 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值为0.14~1.04,远小于20,指示普通Os中含有非放射成因 $^{187}\text{Os}$ ,不能直接用于模式年龄计算,必须扣除普通Os中非放射成因 $^{187}\text{Os}$ 进行修正计算<sup>[20]</sup>(详见讨论部分)。对于辉钼矿 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 值小于10的样品, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} - ^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 等时线年龄可与地质背景相符<sup>[21]</sup>。镰子沟金矿床辉钼矿 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值(1.07~8.02)小于10,采用Ludwig<sup>[22]</sup>编写的3.0版Isoplot程序计算等时线年龄并绘图,得到 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值为 $0.75 \pm 0.13$ ,等时线年龄为 $128.8 \pm 6.5\text{Ma}$ (MSWD=15)(图5),可代表镰子沟金矿床的成矿年龄。

表2 镰子沟金矿床辉钼矿Re-Os同位素测试结果

Table 2 Analytical result of Re-Os isotopes of molybdenites from the Lianzigou Au deposit

样名	矿石类型	样重/g	Re/ $10^{-9}$		普Os/ $10^{-9}$		$^{187}\text{Re}/10^{-9}$		$^{187}\text{Os}/10^{-9}$		$^{187}\text{Os}/\text{普Os}$
			测定值	2 $\sigma$	测定值	2 $\sigma$	测定值	2 $\sigma$	测定值	2 $\sigma$	
LZ-11	钾长石-石英脉型	0.25	97.11	1.51	0.20	<0.01	61.04	0.95	0.15	<0.01	0.78
LZ-12		0.25	390.70	2.48	2.88	0.02	245.56	1.56	0.78	<0.01	0.27
LZ-13		0.19	173.25	1.66	0.25	<0.01	108.89	1.04	0.26	<0.01	1.04
LZ-14		0.25	179.59	1.80	3.77	0.07	112.88	1.13	0.62	<0.01	0.16
LZ-15	碎裂岩型	0.25	70.41	0.71	2.84	0.04	44.25	0.44	0.39	<0.01	0.14

## 4 讨论

### 4.1 辉钼矿模式年龄计算

Re-Os 定年法是基于  $^{187}\text{Re}$  衰变产生  $^{187}\text{Os}$  来计算地质年龄<sup>[23-24]</sup>。一般认为,辉钼矿中的  $^{187}\text{Os}$  主要是放射成因而成,辉钼矿中几乎不含普通 Os 或含微量普通 Os,不会显著影响 Re-Os 年龄的准确计算,但统计研究发现,少量矿床中辉钼矿的普 Os 中含有不可忽视的非放射成因  $^{187}\text{Os}$ ,对辉钼矿 Re-Os 模式年龄产生较大影响,在 Re-Os 年龄计算中必须考虑扣除非放射成因  $^{187}\text{Os}$  的贡献<sup>[20]</sup>。当硫化物中  $^{187}\text{Os}/\text{普 Os}$  值小于 20 时,必须考虑普 Os 对模式年龄的影响<sup>[20-21]</sup>。钼子沟矿床除辉钼矿外,其他矿物基本不含 Re、Os,辉钼矿中普通 Os 含量非样品不纯引起。按照李超等<sup>[20]</sup>提出的计算方法和程序,在求得初始  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  值的基础上,利用  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  初始比值对含有普通 Os 样品的非放射成因  $^{187}\text{Os}$  进行扣除后,得到修正后的模式年龄,获得钼子沟辉钼矿模式年龄为 121~158Ma(表 3),与等时线年龄接近,指示测试可靠度较高。辉钼矿 Re-Os 测年结果表明,钼子沟金矿床形成于早白垩世。

### 4.2 成岩、成矿年龄及地质意义

基性脉岩(煌斑岩、辉绿岩、辉长闪长岩等)往往与金矿床存在密切的时空和成因联系<sup>[1,25-26]</sup>。前人根据小秦岭金矿区各种脉岩的相互穿切关系,判断它们形成的先后序依次为:辉长辉绿岩→辉绿玢岩→正长斑岩→云煌岩,而金矿的形成介于正长斑

岩和云煌岩之间<sup>[1]</sup>。前已述及,钼子沟矿区辉绿岩发育,辉绿岩在局部被正长斑岩穿切,指示辉绿岩的形成应早于或接近于正长斑岩的形成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定给出钼子沟金矿床正长斑岩的年龄为  $1802.9 \pm 9.9\text{Ma}$ ,形成于古元古代。近年来对小秦岭金矿集区大量基性脉岩的锆石 U-Pb 定年发现,除部分脉岩形成于燕山期外,越来越多的证据显示这些基性脉岩多形成于古元古代<sup>[27-28]</sup>,明显早于小秦岭地区金矿床的形成。钼子沟辉绿岩、正长斑岩与小秦岭金矿集区内基性脉岩及熊耳群火山岩(1.8~1.75Ga)<sup>[29]</sup>的时代基本一致,与金矿成矿无关,是华北板块在古元古代末发生大规模裂解的响应<sup>[30]</sup>。

辉钼矿 Re-Os 等时线年龄给出的钼子沟金矿床成矿年龄为  $128.8 \pm 6.5\text{Ma}$ ,略晚于金堆城钼矿床的形成时代(138Ma)<sup>[19]</sup>,与河南构造蚀变岩型金矿(前河、公峪)<sup>[31]</sup>及石英脉型金矿(杨砦峪、东闯、Q875)<sup>[32]</sup>的形成时代一致,表明早白垩世是小秦岭地区金矿的主要成矿期之一。在缺乏高精度测年数据的时代,一般认为秦岭地区的金矿床多与中生代花岗岩有关,特别是文峪花岗岩<sup>[2,4,7]</sup>。近年来,精确的 Ar-Ar、Re-Os、U-Pb 等同位素测年和地球化学分析证明,中生代小秦岭地区已出露的花岗岩主要形成于 160~130Ma(晚侏罗世—早白垩世),如华山岩体锆石 U-Pb 年龄为  $134 \pm 1\text{Ma}$ <sup>[33]</sup>,老牛山岩体锆石 U-Pb 年龄为  $146 \pm 1\text{Ma}$ <sup>[34]</sup>,文峪岩体锆石 U-Pb 年龄为  $138 \pm 3\text{Ma}$ <sup>[14]</sup>。这些花岗质岩体均是古老地壳物质部分熔融的产物,形成于区域挤压向伸展转换的开始,仅有少量幔源物质参与<sup>[35]</sup>。而小秦岭地区绝大多数金矿床成矿年龄集中于 130~120Ma(早白垩世)<sup>[32,36]</sup>,部分金矿床形成于印支期<sup>[6]</sup>,如东桐峪 217Ma<sup>[37]</sup>、大湖 218Ma<sup>[38]</sup>等,这些金矿床的成矿流体

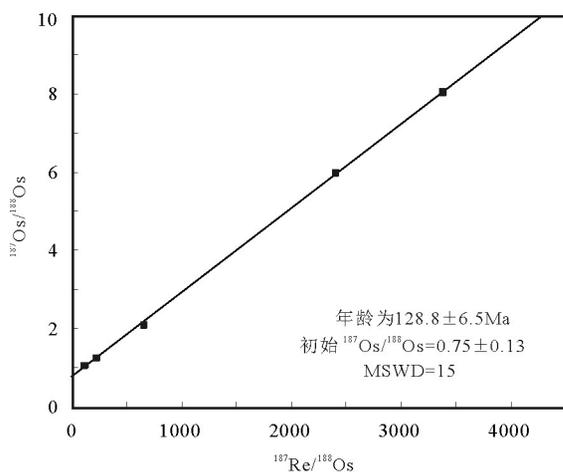


图 5 钼子沟金矿床辉钼矿 Re-Os 等时线图

Fig. 5 Re-Os isotopic isochron diagram of molybdenites from the Lianzigou Au deposit

表 3 钼子沟金矿床辉钼矿 Re-Os 同位素参数及模式年龄  
Table 3 Re-Os isotopic parameters and model ages of the molybdenites from the Lianzigou Au deposit

样名	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$		$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$		等时线初始值 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	模式年龄/Ma 修正后
	测定值	2 $\sigma$	测定值	2 $\sigma$		
LZ-11	2399	47.08	5.96	0.11		130.19
LZ-12	655	6.87	2.08	0.02		121.25
LZ-13	3388	69.72	8.02	0.18	0.75 $\pm$ 0.13	128.72
LZ-14	229	5.06	1.25	0.03		131.35
LZ-15	119	1.95	1.07	0.02		158.63

注:扣除非放射成因的普 Os 中  $^{187}\text{Os}$  计算模式年龄方法见李超等<sup>[20]</sup>

多为幔源流体<sup>[11]</sup>。中生代早期金矿成矿年龄早于区域花岗岩的形成年龄,而晚期金矿成矿年龄基本滞后于这些花岗岩的成岩年龄,与区域变质核杂岩<sup>[39]</sup>的形成时代吻合,是晚中生代区域伸展构造背景的产物。无论是早期金矿还是晚期金矿均与区域已出露花岗岩在形成时代上存在差距。虽然镰子沟金矿床成矿年龄与华山花岗岩的形成时代接近,但略滞后,且已结晶花岗质岩体是否还能分异出大量的成矿流体,仍有待进一步证实。小秦岭地区中生代花岗岩的微量元素分析也显示,这些花岗岩中Au含量较低( $0.3 \times 10^{-9} \sim 0.9 \times 10^{-9}$ )<sup>[40]</sup>,难以为金成矿提供足够的金属物源。硫同位素分析表明,区域已出露花岗岩的硫同位素值均为较小的正值(2.1‰~4.3‰),平均3.4‰<sup>[10]</sup>。镰子沟金矿床距华山岩体约10km,含矿热液总硫值为-3.6‰<sup>[41]</sup>,与区域出露的花岗岩明显不同。因此,镰子沟金矿床的形成与华山花岗岩关系不密切,矿体受张性构造和石英脉控制,矿区钾化蚀变强烈且广泛,具有岩浆热液蚀变特征,指示成矿可能与深部流体或早白垩世隐伏岩浆有关,是早白垩世华北克拉通岩石圈大规模减薄背景下的产物<sup>[12,42]</sup>。

## 5 结论

镰子沟金矿床是产于小秦岭太华群上部层位的构造蚀变岩型金矿床,本文通过矿区正长斑岩锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os测年,获得如下结论。

(1)正长斑岩锆石U-Pb测年表明,成岩作用发生于古元古代( $1802.9 \pm 9.9$ Ma),与区域多数基性脉岩及熊耳群火山岩的形成时代相当,远早于小秦岭地区大规模金矿化时间,成岩与成矿不存在成因关系。

(2)镰子沟金矿床矿石中辉钼矿与其他矿床不同,含有较高的普通Os,计算模式年龄时需要扣除普通Os。辉钼矿Re-Os等时线年龄为 $128.8 \pm 6.5$ Ma,通过<sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os初始比值修正计算的模式年龄与等时线年龄基本一致,指示矿化作用发生于早白垩世,略晚于区域花岗岩的形成时代。

(3)综合地质、地球化学及同位素证据,认为镰子沟矿床成矿与中生代花岗岩无直接关系。

**致谢:**野外工作得到镰子沟金矿汪道东总经理、李栋副总经理等的大力支持,锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os同位素测试及数据处理分别得到中国地质大学(武汉)张东阳博士和中国地质科学院侯李

超博士的帮助,在此一并表示谢意。

## 参考文献

- [1] 栾世伟,曹殿春,方耀奎,等.小秦岭金矿床地球化学[J].矿物岩石,1985,5(2):1-117.
- [2] 栾世伟,陈尚迪.小秦岭金矿主要控矿因素及成矿模式[J].地质找矿论丛,1990,5(5):1-14.
- [3] 胡正国,钱壮志,闫广民,等.小秦岭拆离-变质杂岩核构造与金矿[M].西安:陕西科学技术出版社,1994:21-122.
- [4] 黎世美,瞿伦全,苏振邦,等.小秦岭金矿地质和成矿预测[M].北京:地质出版社,1996:39-178.
- [5] 王相,唐荣扬,李实,等.秦岭造山与金属成矿[M].北京:冶金工业出版社,1996,123-145.
- [6] 卢欣祥,尉向东,董有,等.小秦岭—熊耳山地区金矿时代[J].黄金地质,1999,5(1):11-16.
- [7] 晁援.关于小秦岭金矿时代探讨[J].陕西地质,1989,7(1):52-56.
- [8] 胡受奚,林潜龙,陈泽铭,等.华北与华南古板块拼合带地质与成矿[M].南京:南京大学出版社,1988:1-558.
- [9] 祁进平,赖勇,任康绪,等.小秦岭金矿田成因的锶同位素约束[J].岩石学报,2006,22(10):2543-2550.
- [10] 冯建之,岳铮生,肖荣阁,等.小秦岭深部金矿成矿规律与成矿研究[M].北京:地质出版社,2009:44-252.
- [11] 卢欣祥,尉向东,于在平,等.小秦岭—熊耳山地区金矿的成矿流体特征[J].矿床地质,2003,22(4):377-386.
- [12] Mao J W, Goldfarb R J, Zhang Z W, et al. Gold deposits in the Xiaoqinling-Xiong'er shan region, Qinling mountains central China[J]. Mineralium Deposita, 2002,37:306-325.
- [13] 蒋少涌,戴宝章,姜耀辉,等.胶东和小秦岭:两类不同构造环境中的造山型金矿省[J].岩石学报,2009,25(11):2727-2738.
- [14] 王义天,叶会寿,叶安旺,等.小秦岭文峪和娘娘山花岗岩体锆石SHRIMP U-Pb年龄及其意义[J].地质科学,2010,45(1):167-180.
- [15] 李栋,高毅,路卫东.小秦岭镰子沟蚀变岩型金矿地质特征及找矿标志[J].科技风,2014,4:67-69.
- [16] 王雷.小秦岭镰子沟金矿床地质地球化学特征与矿床成因探讨[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2016:37-66.
- [17] 时毓,于津海,徐夕生,等.陕西小秦岭地区太华群的锆石U-Pb年龄和Hf同位素组成[J].岩石学报,2011,27(10):3095-3108.
- [18] Su H M, Mao J W, He X R, et al. Timing of the formation of the Tianhuashan Basin in northern Wuyi as constrained by geochronology of volcanic and plutonic rocks[J]. Science China: Earth Sciences, 2013,56:940-955.
- [19] Du A D, Wu S Q, Sun D Z, et al. Preparation and Certification of Re-Os Dating Reference Materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. Geostandard and Geoanalytical Research, 2004,28(1):41-52.
- [20] 李超,屈文俊,杜安道,等.含有普通钨的辉钼矿Re-Os同位素定年研究[J].岩石学报,2012,28(2):702-708.
- [21] Stein H J, Scherstén A, Hannah J L, et al. Subgrain-scale decoupling of Re and <sup>187</sup>Os and assessment of laser ablation ICP-MS spot dating in molybdenite[J]. Geochimica et Cosmochimica,

- 2003,67: 3673-3686.
- [22] Ludwig K R. Isoplot/Ex, version 3.0: a geochronological tool kit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, 2001.
- [23] Luck J M, Allegre C J. The study of molybdenites through the  $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$  chronometer[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1982,61: 291-296.
- [24] 杜安道,何红蓼,殷宁万,等. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. *地质学报*, 1994,68(4): 339-347
- [25] Martínez M C, Tudela A N. Archean lamprophyre dykes and gold mineralization, Matheson, Ontario: the conjunction of LILE-enriched mafic magmas, deep crustal structures, and Au concentration[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1986,23(23): 324-343.
- [26] Rock Amp N M S, Groves D I. Do lamprophyres carry gold as well as diamonds?[J]. *Nature*, 1988,332(6161):253-255.
- [27] 王团华,毛景文,王彦斌. 小秦岭-熊耳山地区岩墙锆石 SHRIMP 年代学研究——秦岭造山带岩石圈拆沉的证据[J]. *岩石学报*, 2008,24(6): 1273-1287.
- [28] 毕诗健,李建威,李占轲. 华北克拉通南缘小秦岭金矿区基性脉岩时代及地质意义[J]. *地球科学*, 2011,36(1):17-32.
- [29] 赵太平,徐勇航,翟明国. 华北陆块南部元古宙熊耳群火山岩的成因与构造环境:事实与争议[J]. *高校地质学报*, 2007,132(2): 191-206.
- [30] 侯贵廷,李江海,刘玉琳,等. 华北克拉通古元古代末的伸展事件:拗拉谷与岩墙群[J]. *自然科学进展*, 2005,15(11): 1366-1373.
- [31] 唐克非. 华北克拉通南缘熊耳山地区金矿床时空演化、矿床成因及成矿构造背景[D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文,2014: 74-85.
- [32] 王义天,毛景文,卢欣祥,等. 河南小秦岭金矿区 Q875 脉中深部矿化蚀变岩的  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年龄及其意义[J]. *科学通报*, 2002,47(18): 1427-1431.
- [33] 郭波,朱赖民,李彝,等. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景[J]. *岩石学报*, 2009,25(2):265-281.
- [34] 朱赖民,张国伟,郭波,等. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿动力学背景[J]. *地质学报*, 2008,82(2): 204-220.
- [35] 王晓霞,王涛,齐秋菊,等. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J]. *岩石学报*, 2011,27(6): 1573-1593.
- [36] Li J W, Bi S J, Selby D, et al. Giant Mesozoic gold provinces related to the destruction of the North China craton[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2012,349(4):26-37.
- [37] 王秀璋,程景平,张宝贵,等. 中国改造型金矿床地球化学[M]. 北京: 科学出版社,1992:177.
- [38] 李诺,孙亚莉,李晶,等. 小秦岭大湖金钼矿床辉钼矿铼钨同位素年龄及印支期成矿事件[J]. *岩石学报*, 2008,24(4):810-816.
- [39] 张进江,郑亚东,刘树文. 小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制及构造演化[M]. 北京:海洋出版社,1998: 17-63.
- [40] 张本仁,骆庭川,高山,等. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1994: 1-466.
- [41] 代军治,钱壮志,高菊生,等. 小秦岭镰子沟金矿床地质特征、黄铁矿原位硫同位素分析及成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2018,48(6):1669-1682.
- [42] 毛景文,谢桂青,张作衡,等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 2005,31(1): 169-188.