

# 豫西小秦岭地区秦南金矿床热液独居石 U-Th-Pb 定年及其地质意义

强山峰<sup>1,2</sup>, 毕诗健<sup>2,3</sup>, 邓晓东<sup>2,3</sup>, 郭连巧<sup>4</sup>, 李建威<sup>2,3\*</sup>

1. 河南省灵宝市国土资源局,河南灵宝 472500

2. 中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北武汉 430074

4. 安徽省地质实验研究所,安徽合肥 230001

**摘要:** 小秦岭地区是我国最重要的金矿产区之一,目前对该区金矿床成矿作用存在两种不同的观点,即与秦岭造山带造山作用有关的早中生代成矿和与中国东部构造体制大转折有关的晚中生代成矿。在矿床地质研究的基础上,利用激光剥蚀 ICP-MS 方法对小秦岭矿集区北矿带秦南金矿床的热液独居石进行了 U-Th-Pb 定年,获得了高精度的年龄数据,为北矿带金矿床成矿时代和成矿构造背景提供了新的制约。岩相学研究表明,所研究的独居石具有完好的晶形,与载金矿物黄铁矿和石英的结构关系表明它们近于同时形成。13 个独居石颗粒的 U-Th-Pb 同位素组成在  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  和  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  图解上均位于谐和线上或其附近,其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{233}\text{Th}$  加权平均年龄分别为  $120.9 \pm 0.9$  Ma(MSWD=1.0) 和  $122.6 \pm 1.9$  Ma(MSWD=2.6),在误差范围内完全一致。本次定年结果与小秦岭南矿带众多典型金矿床的 Re-Os 年龄和  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄一致,表明独居石的 U-Th-Pb 同位素体系自矿物形成后一直处于封闭体系,其 U-Pb 和 U-Th-Pb 年龄可以解释为秦南金矿床的成矿时代,从而表明秦南金矿床形成于燕山期。对已有可靠年龄数据的统计分析表明,小秦岭地区绝大多数金矿床形成于早白垩世,证明该区金成矿作用集中发生于晚中生代,可能与华北克拉通岩石圈减薄作用有关。

**关键词:** 小秦岭;热液独居石;U-Th-Pb 定年;地质年代学;金矿床;岩石圈减薄。

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2013)01-0043-14

收稿日期: 2012-03-18

## Monazite U-Th-Pb Ages of the Qinnan Gold Deposit, Xiaoqinling District: Implications for Regional Metallogenesis and Tectonic Setting

QIANG Shan-feng<sup>1,2</sup>, BI Shi-jian<sup>2,3</sup>, DENG Xiao-dong<sup>2,3</sup>, GUO Lian-qiao<sup>4</sup>, LI Jian-wei<sup>2,3\*</sup>

1. Land and Resource Bureau, Lingbao, Henan Province, Lingbao 472500, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Laboratory of Geological Research, Hefei 230001, China

**Abstract:** Two contrasting models have been proposed to explain the large-scale gold mineralization in the Xiaoqinling gold district, which is the second largest gold producer in China. The first model advocates that gold deposits in the Xiaoqinling district formed in the Triassic in relation to continental collision of the Qinling Orogen, whereas the second indicates that gold mineralization occurred in the Early Cretaceous and was genetically related to lithospheric thinning of the North China Craton. In this paper, we present high precision monazite U-Th-Pb ages of the Qinnan gold deposit in the north metallogenic belt of the Xiaoqinling district, by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). Petrographic observations show the monazite occurs as euhedral grains and invariably intergrown with quartz and pyrite, suggesting that monazites are of hydrothermal origin and precipitate with gold-bearing minerals coevally. In the  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$

**基金项目:**国家自然科学基金项目(Nos. 41202052, 90814004);中央高校基本科研业务费专项资金(Nos. CUG110833, CUG120102);地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项基金(No. MSFGPMR201005)。

**作者简介:**强山峰(1971—),男,高级工程师,矿产普查与勘探专业。E-mail:dkqsf@163.com

\* 通讯作者:李建威,E-mail: jwli@cug.edu.cn

$^{232}\text{Th}$  diagrams, all of the 13 analyses are concordant or nearly concordant, with weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  ages of  $120.9 \pm 0.9$  Ma (MSWD=1.0) and  $122.6 \pm 1.9$  Ma (MSWD=2.6), respectively. These ages are reproducible with existing geochronological data for major gold deposits in the Xiaoqinling district, demonstrating that the U-Th-Pb isotopes of the monazite have remained closed since its precipitation, and thus the U-Th-Pb ages can be reliably interpreted as the mineralizing age of the Qinnan gold deposit. A synthesis of available age constraints suggests that gold mineralization throughout the Xiaoqinling district occurred with a relatively short time interval in the Early Cretaceous and was likely related to the lithospheric thinning of the North China Craton at that time.

**Key words:** Xiaoqinling district; hydrothermal monazite; U-Th-Pb dating; geochronology; gold deposits; lithospheric thinning.

位于华北克拉通南缘的小秦岭地区是我国规模仅次于胶东的第二大金矿集区,已发现数十个大中型石英脉型金矿床(Mao *et al.*, 2002),含金石英脉主要呈近东西向成群展布;依据金矿脉的空间分布可将矿集区划分为4个矿带,即南矿带、北矿带、中矿带和西矿带(黎世美等,1996),其中以南、北矿带探明的黄金储量最多。小秦岭地区金矿床成矿时代的研究一直是该区成矿作用和成矿规律研究的重点,经过长期研究已积累了大量同位素年龄数据。早期研究多以蚀变含钾矿物的K-Ar定年及石英和黄铁矿等矿物中流体包裹体 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和Rb-Sr等时线定年为主(李华芹等,1993;胡正国,1994;薛良伟等,1996)。根据这些方法获得的年龄结果跨度很大,从太古代至新生代均有,这种情况为小秦岭地区金矿成矿作用时间的准确限定及成矿构造背景的解释带来了很大的不确定性。

近年来,蚀变矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、辉钼矿Re-Os等同位素定年方法被广泛应用于成矿年代学的研究,使定年的精度和数据的可靠性得到极大提高。徐启东等(1998)和王义天等(2002)对小秦岭东闯和红土岭金矿床进行了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年,结果显示这些矿床均形成于早白垩世。最近我们对小秦岭南矿带的代表性矿床开展了系统的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和Re-Os年代学研究,证明南矿带金矿床主要形成于 $135\sim120$  Ma(毕诗健,2011;Li *et al.*, 2012a, 2012b)。但另一方面,李厚民等(2007)和李诺等(2008)获得北矿带大湖和马家洼等石英脉型Au-Mo矿的辉钼矿Re-Os年龄为 $268.4\sim215.4$  Ma,表明本区存在三叠纪的成矿作用。部分学者据此认为早中生代印支期是小秦岭地区金成矿的重要时期,金矿床的形成主要与秦岭造山带的造山作用有关(卢欣祥等,2008;蒋少涌等,2009)。

辉钼矿因其不含普通锇并且具有较高的同位素封闭温度( $500\sim650$  °C),因此是成矿年代学的理想研究对象,可以实现对热液矿床的直接定年(Raith and Stein, 2000; Selby *et al.*, 2002)。但遗

憾的是小秦岭地区大多数金矿床不含辉钼矿,因而限制了这一方法的广泛应用。含钾蚀变矿物(主要是云母和钾长石)的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年通常可以给出可靠的成矿年龄(Li *et al.*, 2003, 2006),但由于这些矿物中的氩同位素封闭温度不高(一般 $<350$  °C),可能容易受到后期构造—热事件的干扰而使其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄比矿床的实际年龄年轻(Selby *et al.*, 2002)。最近一些学者(蒋少涌等,2009)就提出,小秦岭地区晚白垩世的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄可能不代表成矿年龄,而是印支期成矿遭受后期热事件的改造年龄。

独居石和磷钇矿是石英脉型金矿中较为常见的热液副矿物,对这些矿物进行U-Th-Pb年龄测定是准确限定成矿时代的有效途径(Brown *et al.*, 2002; Rasmussen *et al.*, 2009; Sarma *et al.*, 2011)。独居石是一种富含轻稀土的磷酸盐矿物,因其含有较高的U、Th及较低的普通铅(Overstreet, 1967; 邱昆峰和杨立强, 2011),经常能形成一致的U-Pb和Th-Pb年龄。另一方面,独居石的U-Pb同位素体系封闭温度较高(约 $530\sim720$  °C)(Harrison *et al.*, 2002),不易受到后期热事件的干扰,是理想的U-Th-Pb定年对象(Stern and Berman, 2000; Rasmussen *et al.*, 2009; Sarma *et al.*, 2011)。鉴于此,本文利用激光剥蚀ICP-MS方法对小秦岭北矿带秦南金矿的热液独居石进行原位U-Th-Pb同位素定年以确定秦南金矿的形成时间,并结合前人研究资料对小秦岭地区中生代金矿的成矿时代和成矿构造背景进行讨论。

## 1 区域地质背景

小秦岭金矿集区位于华北克拉通南缘,西起陕西华山,东至河南灵宝—朱阳盆地西北边缘,南北两侧分别以巡马道一小河断裂带和太要—故县断裂带为界(图1)(胡正国, 1994)。区内主要出露晚太古

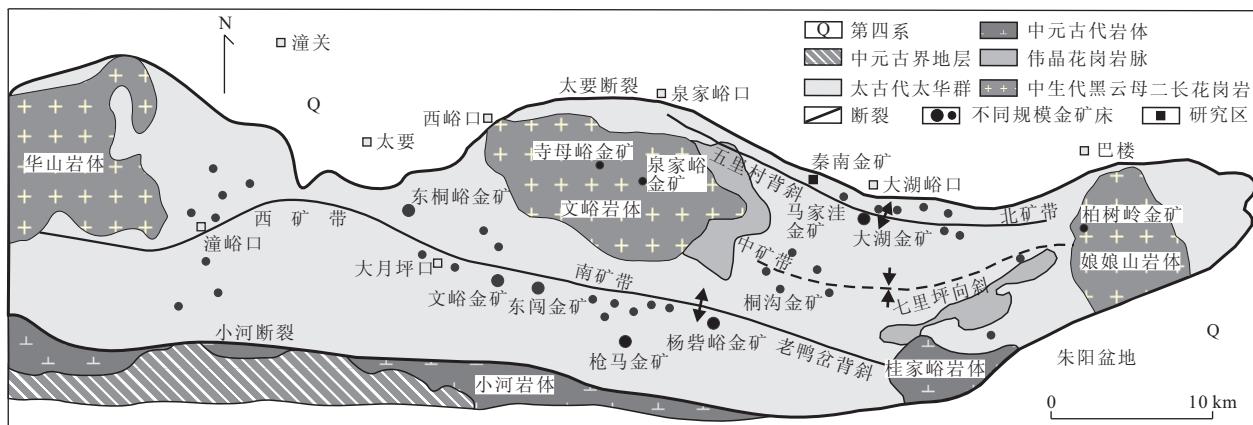


图 1 华北南缘小秦岭金矿区域地质和金矿床分布图(据黎世美等, 1996, 略有简化)

Fig. 1 Simplified geological map of the Xiaoqinling gold district, southern North China Craton and the distribution of major gold deposits (modified from Li *et al.*, 1996)

代—古元古代太华群中深变质火山—沉积岩系(锆石 U-Pb 年龄为  $2.9 \sim 2.0$  Ga; Liu *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2010), 其上为中—新生代陆相地层或松散沉积物, 二者呈角度不整合接触。区内岩浆岩发育, 出露面积较大的有中元古代桂家峪二长花岗岩(全岩 Rb-Sr 等时线年龄为  $1642 \pm 30$  Ma; 黎世美等, 1996)和小河花岗岩(锆石 U-Pb 年龄为  $1748 \pm 25$  Ma; 王亨治, 1987)以及若干中生代中酸性侵入岩, 包括华山黑云母二长花岗岩、文峪和娘娘山花岗岩体。锆石 U-Pb 定年结果显示华山岩体属于由两次岩浆活动形成的复式岩体, 分别为晚三叠世( $204.7 \pm 1.6$  Ma; 胡建等, 2010)及早白垩世( $146 \pm 2 \sim 131.9 \pm 0.8$  Ma; 郭波等, 2009; 胡建等, 2010; Mao *et al.*, 2010), 而文峪和娘娘山岩体的 U-Pb 年龄介于  $141.0 \pm 1.6$  Ma 和  $127.7 \pm 0.6$  Ma 之间(Mao *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2012a)。

区内地质构造复杂, 主要构造格架由轴向近东西的复式褶皱和区域性太要—故县断裂及巡马道—小河断裂组成, 且广泛发育受边界深大断裂控制的脆—韧性断裂构造, 它们控制了小秦岭地区金矿床的产出与分布(图 1)。其中, 脆—韧性构造断裂走向以近 EW 向为主, 规模最大且成群成带产出, 沿走向和倾向均具有波状起伏的特点(栾世伟等, 1985; 冯建之等, 2009), 其次为 NW、NE 及近 SN 向断裂。

黎世美等(1996)将小秦岭地区的金矿脉划分为 4 个矿带(图 1), 分别是大月坪—潼峪口矿带(西矿带)、老鸦岔—杨砦峪矿带(南矿带)、七树坪—雷家

坡矿带(中矿带)及五里村—灵湖矿带(北矿带), 其中以南矿带规模最大, 探明黄金储量最多。含金石英脉主要呈东西向成群密集展布, 单条矿脉沿走向延伸可达几公里甚至十几公里。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 矿区地质

秦南金矿床位于小秦岭金矿集区北矿带、五里村—安家窑次级背斜核部(图 1), 地理坐标为  $110^{\circ}38'58''E \sim 110^{\circ}40'01''E, 34^{\circ}27'47''N \sim 34^{\circ}27'53''N$ , 面积约  $6.37\text{ km}^2$ 。矿区主要出露太古界太华群焕池峪组, 岩性以黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩为主, 局部可见伟晶岩、混合岩等。其中, 黑云斜长片麻岩主要呈灰色, 鳞片粒状变晶结构, 片麻状构造, 主要矿物有斜长石( $45\% \sim 60\%$ )、角闪石( $5\% \sim 30\%$ )、黑云母( $15\% \sim 20\%$ )和石英( $10\% \sim 15\%$ )。斜长石多为粒状或短板状, 粒径  $1.5 \sim 3.0\text{ mm}$  为主, 多已发生绢云母、绿帘石化和碳酸盐化。

区内构造主要为近东西向展布的五里村背斜, 呈舒缓波状横贯矿区, 由北西西向经安家窑转为东西向, 轴面北倾, 倾角约  $70^{\circ}$ 。褶皱两翼不对称, 北翼地层倾角  $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ , 南翼  $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ (河南灵化集团有限公司, 2005)。桐沟金矿太阳沟秦南矿区资源储量核查报告)。矿区内发育一系列韧—脆性断裂, 以近东西向断裂为主, 北东和北西向次之(图 2)。近东西向断裂为主要控矿构造, 一般规模较大, 主要充填含金石英脉及构造蚀变岩等, 倾向北西、倾角一般为  $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。其他方向的断裂规模一般较小, 常呈平行

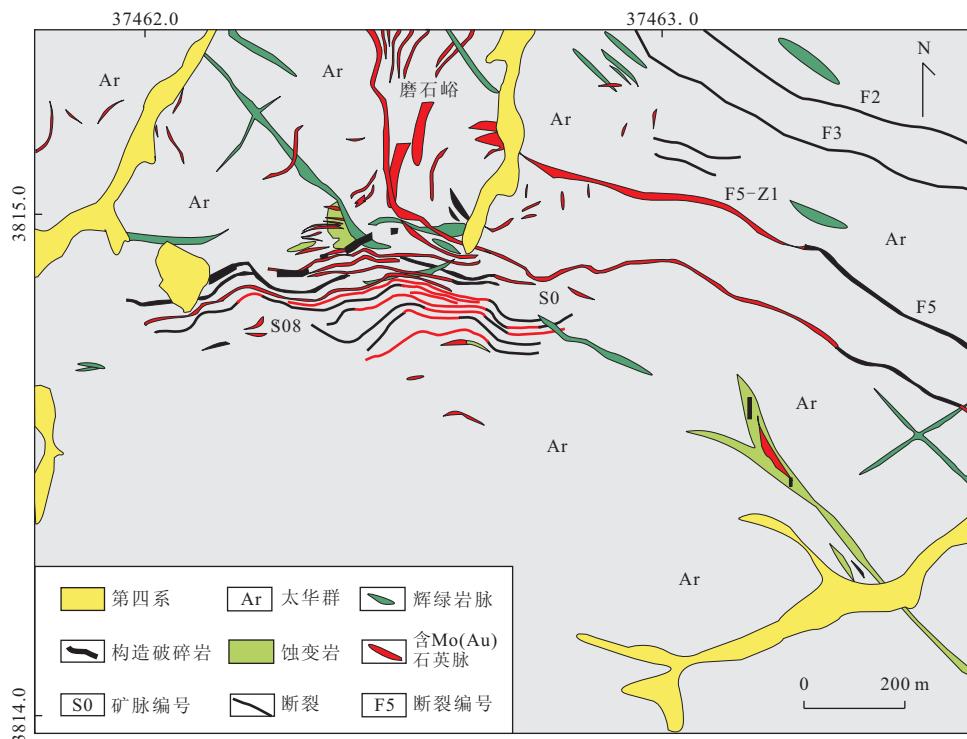


图2 秦南金矿矿区地质简图(张元厚等,2009)

Fig. 2 Geological sketch map of Qinnan gold deposit, Xiaoqinling district showing the distribution and occurrence of gold lodes

的断裂束产出,产状一般较陡,多被岩脉充填。基性岩脉在矿区广泛发育,可见其侵入太华群变质岩中,并被含金石英脉切割或彼此平行展布,主要岩石类型为辉绿岩、辉长岩、辉绿玢岩及煌斑岩等。野外观察辉绿岩脉主要呈灰绿—暗绿色,块状构造,具有典型的辉绿结构,主要矿物为斜长石(40%)、普通辉石(30%)及角闪石(20%);次要矿物为黑云母、微斜长石及石英。岩石蚀变强烈,斜长石常发生钠黝帘石化,辉石发生黑云母化和绿泥石化。本文未能对这些岩脉开展年代学研究,但近期对小秦岭杨砦峪、枪马、大湖等金矿床中辉绿岩脉的锆石U-Pb定年结果表明,小秦岭金矿区的基性岩脉主要侵位于古元古代晚期约1.82~1.84 Ga左右(王团华等,2008;毕诗健等,2011;强山峰,未发表资料),另有部分岩脉形成于晚中生代(Li et al., 2012a, 2012b)。

## 2.2 矿化特征

秦南矿区金矿体均产于蚀变构造岩带内,多与石英脉空间关系密切。金矿脉主要由含金石英脉、矿化蚀变岩、糜棱岩和碎裂岩等组成。矿脉严格受压扭性断裂控制,常具膨大收缩、尖灭再现的特点(图2)。区内金矿脉主要有S0号脉群和F5-Z1号脉(河南灵化集团有限公司,2005。桐沟金矿太阳沟秦南矿区资源储量核查报告),其中S0号脉群中的金矿脉

均严格受近东西向断裂控制(图2)。0II号矿体为矿区最大矿体,金资源储量达2.3 t,该矿体可分为0II1、0II2、0II3和0II4四个矿体。0II1矿体东西长约458 m,南北宽为40~316 m,分布标高为980~1 260 m,矿体厚度平均为0.97 m,金品位平均为 $6.43 \times 10^{-6}$ ;0II2号矿体位于0II矿脉西段第26至第34勘探线之间,矿体长约130 m,标高为668~890 m,平均厚1.30 m,平均品位为 $5.67 \times 10^{-6}$ ;0II3矿体分布在第34至第42勘探线之间,矿体长约97 m,标高为890~930 m间,平均品位为 $9.51 \times 10^{-6}$ ;0II4矿体位于0II矿脉西段第46至第56勘探线之间,长约170 m,标高为551~805 m,平均厚约1.87 m,平均品位为 $5.99 \times 10^{-6}$ 。F5-Z1号矿脉分布在五里村背斜北翼,向北倾斜,是东部大湖金矿区主矿脉F5控矿断裂带的西延部分。F5-Z1号矿脉充填于F5号脉西部分枝下盘,全长约500 m,厚0.20~6.10 m,延伸大于110 m。矿脉呈弧形展布,走向北西,倾向 $25^\circ \sim 65^\circ$ ,倾角 $45^\circ \sim 65^\circ$ 。矿体多呈脉状、透镜状及条带状,在走向和倾向上均具有尖灭再现、分枝复合等特征。

秦南金矿床的矿石矿物主要为黄铁矿,其次为辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等。在黄铁矿、石英等矿物的微裂隙及颗粒间还发现少量自然金或银金

矿等(图 3). 矿石内还发育有大量富 Te-Se-Bi-Ni 的矿物, 包括碲银矿、含硒方铅矿、自然铋、碲镍矿等. 矿石结构以自形一半自形、他形粒状结构、压碎结构、充填结构等为主(图 3). 黄铁矿多呈团块状、浸染状、细脉状或网脉状充填于石英脉或蚀变围岩中, 受成矿期构造应力作用而呈碎裂状结构(图 3a), 其内部不规则张性裂隙常被成矿中晚期的石英、金属硫化物、碲铋矿物以及自然金充填(图 3b). 辉钼矿呈浸染状、团块状分布在蚀变岩或石英脉内, 显微镜下辉钼矿多以叶片状集合体形式产出(图 3c). 方铅矿较为少见, 仅在局部发育并被辉钼矿、碲铅矿、碲银矿等穿插或溶蚀交代(图 3c, 3d). 黄铜矿常呈不规则粒状交代黄铁矿(图 3b), 与磁黄铁矿、闪锌矿共生呈网脉状胶结石英角砾, 三者常被晚期碲、硒、铋、镍矿物连晶交代(图 3e, 3f). 脉石矿物以石英为主, 绢云母、方解石、绿泥石次之, 微量矿物有绿帘石、独居石、锆石、榍石等. 围岩蚀变较发育, 主要为硅化、钾长石化、黄铁矿化等. 蚀变带由硅化钾化片麻岩质碎裂岩、硅化钾化碎裂岩、黄铁绢英岩化碎裂岩、硫化物石英脉组成, 分带性较明显, 各蚀变带之间为渐变过渡关系.

秦南金矿床具有多期、多阶段成矿的特点, 根据野外观察和矿相学研究, 将成矿作用从早到晚划分为 4 个阶段: I. 黄铁矿—石英阶段, 以黄白色自形粗粒黄铁矿与乳白色自形石英为特征; II. 石英—黄铁矿阶段, 形成含金黄铁矿石英脉, 矿物组合为烟灰色石英、灰黄色黄铁矿及少量自然金和碲化物; III. 多金属硫化物阶段, 矿物组合为石英、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿及金银矿和碲化物; IV. 石英—碳酸盐阶段, 形成石英、方解石脉, 蚀变及矿化均较弱. 其中石英—黄铁矿和多金属硫化物阶段为金成矿阶段.

### 3 样品测试方法

将矿石样品磨制光薄片后用 5%  $\text{HNO}_3$  擦拭光薄片表面, 并用超声波进行清洗后干燥, 以保证样品的清洁. 利用偏光显微镜对光薄片进行详细观察, 初步了解样品的矿物组成及结构关系. 选取独居石含量较高的样品开展详细的扫描电子显微镜观察和能谱分析(SEM-EDS), 进一步了解独居石的组成、纯度、结构及与其他矿物之间的关系. 以反射光照相和背散射图像为基础, 选取不含包裹物或微裂隙不发

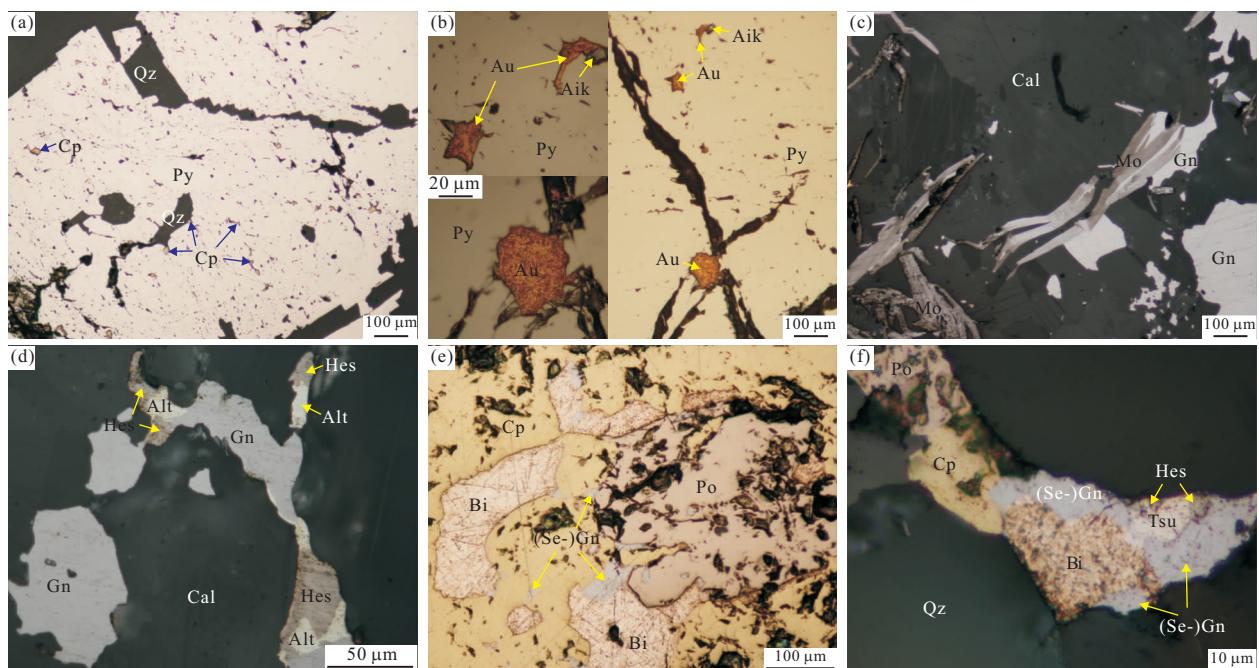


图 3 秦南金矿床矿石矿物及共生组合

Fig. 3 Reflected-light photomicrographs of ore minerals from Qinnan gold deposit

a. 黄铁矿“之”字形追踪张裂隙内充填了晚期石英脉, 矿物内部的孔隙内有黄铜矿充填;b. 针硫铋铅矿及自然金交代黄铁矿;c. 叶片状辉钼矿穿插交代方铅矿;d. 碲化物集合体溶蚀交代方铅矿;e. 碲、硒、铋、镍矿物交代黄铜矿、磁黄铁矿;f. 自然铋、楚碲铋矿、碲银矿、含硒方铅矿共生交代黄铜矿、磁黄铁矿. Py. 黄铁矿; Cp. 黄铜矿; Po. 磁黄铁矿; (Se-)Gn. (含硒)方铅矿; Mo. 辉钼矿; Aik. 针硫铋铅矿; Au. 自然金; Bi. 自然铋; Tsu. 楚碲铋矿; Hes. 碲银矿; Alt. 碲铅矿; Qz. 石英; Cal. 方解石

育的区域进行原位 U-Th-Pb 同位素分析,实验分析工作在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用激光剥蚀等离子体耦合质谱仪(LA-ICP-MS)进行。激光剥蚀系统为 Geo-Las2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流( $\text{Ar} + \text{He}$ )中加入少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度(Hu *et al.*, 2008)。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008, 2010a)完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu *et al.*(2008, 2010a, 2010b)。获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正,以扣除普通 Pb 的影响。独居石 U-Pb 加权平均年龄计算( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  年龄,误差为  $1\sigma$ )及谐和图绘制采用 ISOPLOT(3.0 版)软件完成。

## 4 分析结果

光学显微镜和扫描电镜观察表明,含金石英脉中的独居石主要呈半自形—他形或不规则集合体的形式存在,粒度多为 40~200  $\mu\text{m}$ ,与石英、黄铁矿及蚀变绢云母等矿物之间具有平衡结构(图 4)。背散射图像显示,独居石没有明显的环带结构,部分颗粒表面常出现微细裂隙或呈港湾状结构(图 4a),少数情况下独居石矿物内部含石英、黄铁矿等矿物包裹体(图 4b)。

利用 LA-ICPMS 对 13 颗热液独居石进行测试分析,其 U-Th-Pb 同位素比值及表观年龄结果列于表 1 中,独居石的 U-Pb 年龄谐和曲线如图 5 所示。所有分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表观年龄介于  $124 \pm 10 \text{ Ma}$  和  $119 \pm 3 \text{ Ma}$  ( $1\sigma$ ) 之间,在误差范围内完全一致(表 1)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  谐和图解上,有 11 个点位于谐和线上或谐和线的附近(图 5a)。值得注意的是,有两个测点(QN25-11、QN25-13)的  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  比值趋于负值(显示为 0),这主要是由于这两个独居石颗粒的 U 含量较低,从而导致放射成因  $^{207}\text{Pb}$  含量较低,使得测试误差较大,经过普通铅校正后同位素比值呈现负值。但这两个点仍然给出了与其他点一致的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄。所有 13 个测点

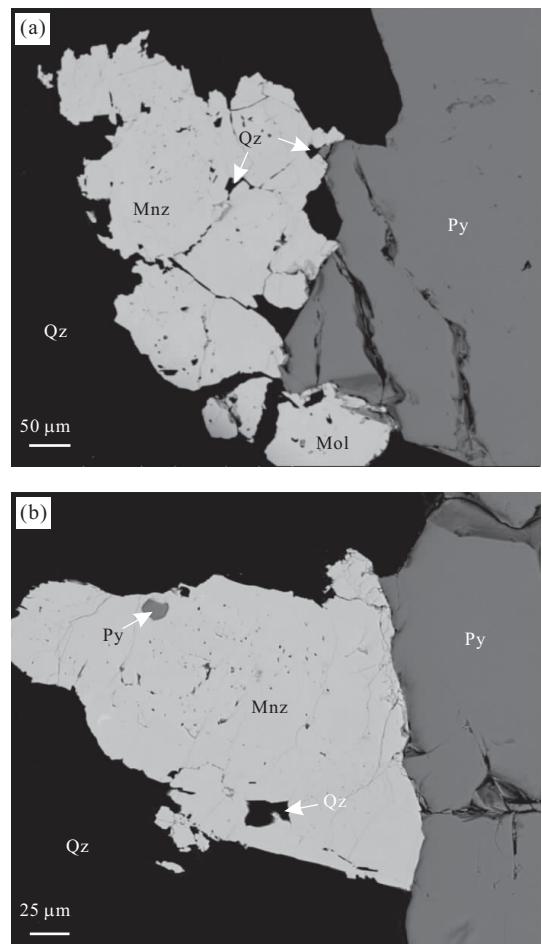


图 4 秦南金矿床热液独居石与石英、黄铁矿等载金矿物的共生关系

Fig. 4 Textural relationship between hydrothermal monazite and quartz and pyrite from the Qinnan gold deposit  
a. 中细粒独居石颗粒发生碎裂,形成微细裂隙或呈孤岛状被石英充填,并与黄铁矿紧密共生;b. 半自形独居石与黄铁矿、石英共边生长,并包裹有黄铁矿、石英等热液矿物;Qz. 石英;Mnz. 独居石;Py. 黄铁矿

的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $121 \pm 1 \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD}=1.0$ )。 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ — $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和图上,有 9 个点位于谐和线上或其附近(图 5b),其  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  加权平均年龄为  $122.6 \pm 1.9 \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD}=2.6$ ),与  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄在误差内完全吻合。

## 5 讨论

### 5.1 独居石 U-Pb 定年的适用性及对秦南金矿床成矿时代的限定

独居石不仅在沉积岩、变质岩和过铝质火成岩中较为常见(Edwards and Harrison, 1997; Foster

表 1 秦南金矿床热液独居石 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 Results of LA-ICPMS monazite U-Pb dating from Qinnan gold deposit

测试点号	U-Th-Pb 同位素比值						年龄(Ma)					
	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$
QN25-1	0.127 29	0.008 85	0.018 64	0.000 18	0.006 11	0.000 08	122	8	119	1	123	2
QN25-2	0.129 83	0.181 18	0.019 44	0.001 60	0.006 17	0.000 12	124	164	124	10	124	2
QN25-3	0.126 69	0.022 78	0.019 12	0.000 25	0.005 99	0.000 08	121	21	122	2	121	2
QN25-4	0.012 11	0.129 06	0.019 48	0.001 07	0.006 78	0.000 09	12	130	124	7	137	2
QN25-5	0.068 17	0.004 53	0.018 79	0.000 11	0.005 91	0.000 06	67	4	120	1	119	1
QN25-6	0.114 55	0.027 75	0.019 09	0.000 32	0.006 13	0.000 07	110	25	122	2	124	1
QN25-7	0.128 73	0.072 78	0.018 71	0.000 55	0.006 30	0.000 09	123	66	119	3	127	2
QN25-8	0.247 24	0.063 33	0.018 95	0.000 44	0.006 22	0.000 09	224	52	121	3	125	2
QN25-9	0.129 11	0.011 35	0.019 32	0.000 18	0.006 07	0.000 07	123	10	123	1	122	2
QN25-10	0.130 13	0.050 44	0.018 83	0.000 40	0.006 16	0.000 08	124	45	120	3	124	2
QN25-11	0.000 00	0.050 44	0.019 47	0.000 57	0.007 18	0.000 10	0	0	124	4	145	2
QN25-12	0.129 45	0.090 28	0.019 36	0.000 71	0.006 65	0.000 09	124	81	124	5	134	2
QN25-13	0.000 00	0.000 00	0.019 32	0.000 48	0.006 77	0.000 11	0	0	123	3	136	2

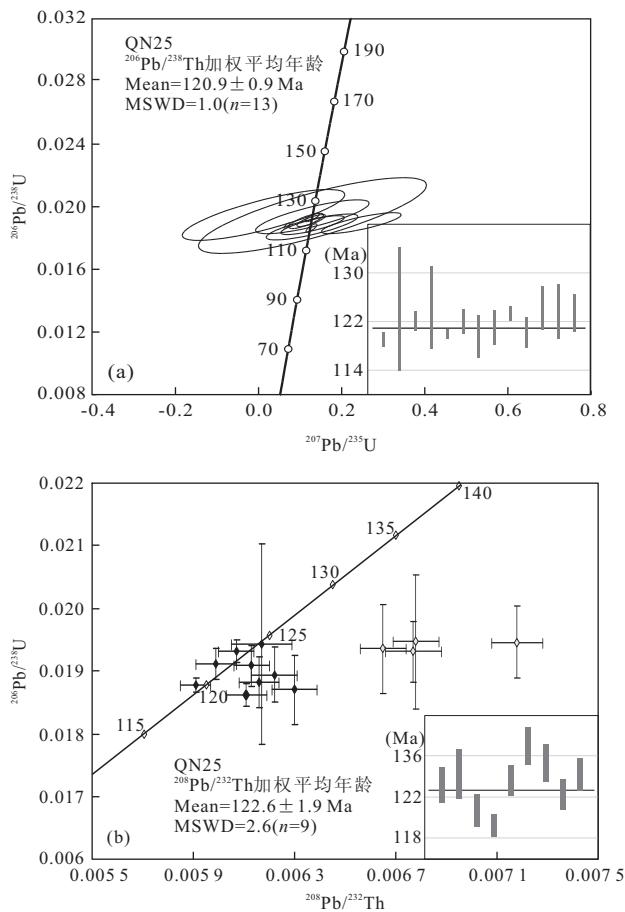


图 5 秦南金矿床热液独居石 U-Th-Pb 谱和曲线图

Fig. 5 Concordia U-Pb (a) and U-Th-Pb diagrams (b) of hydrothermal monazite grains from the Qinnan gold deposit obtained by LA-ICP-MS analysis

a.  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  谱和图; b.  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谱和图

*et al.*, 2002; Dahl *et al.*, 2005),而且是石英脉型金矿、斑岩型铜金矿、IOCG 等矿床类型的主要热液副矿物之一。利用热液独居石的 U-Th-Pb 定年可以直接限定热液矿床的形成时代 (Brown *et al.*, 2002; Salier *et al.*, 2004; Tallarico *et al.*, 2004; Rasmussen *et al.*, 2009; Vielreicher *et al.*, 2010; Sarma *et al.*, 2011). Rasmussen *et al.* (2007) 通过对南非 Witwatersrand 金矿床赋矿围岩(页岩、砂岩及砾岩等)中独居石的 U-Pb 定年获得该矿床的成矿时代约为 2.05 Ga, 略晚于或同步于区内强烈的峰期变质作用。对澳大利亚 Tom's Gully 金矿床含金石英脉中热液独居石的 SHRIMP U-Pb 定年结果表明, 该矿床的成矿时代为  $1780 \pm 10$  Ma, 比区内古元古代大规模岩浆作用的时间( $1835 \sim 1820$  Ma)晚 45 Ma 左右, 从而证明金矿成矿与区域岩浆活动没有成因联系 (Rasmussen *et al.*, 2006). 最近, Sarma *et al.* (2011) 对印度 Dharwar 克拉通内 Gadag 和 Ajjanahalli 金矿床中的热液独居石进行了 U-Pb 定年, 结果分别为  $2522 \pm 6$  Ma 和  $2520 \pm 9$  Ma, 与区内花岗岩的侵位时代( $2516 \pm 10$  Ma)在误差范围内近乎完全一致, 说明 Dharwar 克拉通的金矿床及岩浆活动均形成于克拉通化的晚阶段, 且岩浆活动在金成矿过程中具有重要作用。这些研究充分表明, 利用独居石的 U-Th-Pb 定年可以获得可靠的成矿年龄。

秦南金矿床含金石英脉中独居石与主成矿期的石英和黄铁矿之间经常呈共结边结构, 且包裹有热液成因的石英和黄铁矿等矿物(图 4), 表明独居石

与载金矿物黄铁矿等几乎同时形成。BSE 图像和 EDS 能谱分析结果显示, 秦南金矿的独居石结构简单, 不发育成分带(图 4), 这与岩浆成因独居石具有的典型平直岩浆环带的特征存在差异(Wan *et al.*, 2004), 也与典型的变质热液成因独居石明显不同, 后者通常显示复杂的生长结构, 且常存在化学成分和年龄分带明显的差异性环带(Foster *et al.*, 2002; Kohn and Malloy, 2004)。综上认为, 秦南金矿石英脉中的独居石为热液成因, 是成矿作用过程中直接从热液体系中结晶沉淀的。因此, 独居石的 U-Th-Pb 定年可以为秦南金矿的成矿时代提供直接和可靠的制约。13 个独居石颗粒的 U-Th-Pb 同位素组成在  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  和  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  图解上均位于谐和线上或附近, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{233}\text{Th}$  加权平均年龄分别为  $120.9 \pm 0.9\text{ Ma}$  和  $122.6 \pm 1.9\text{ Ma}$ (图 5)。上述 U-Pb 和 U-Th-Pb 年龄的一致性表明独居石的 U-Th-Pb 同位素体系自形成后一直处于封闭体系, 没有发生过同位素的丢失或干扰, 独居石的 U-Pb 和 U-Th-Pb 年龄可以解释为秦南金矿床的成矿时代。据此认为秦南金矿形成于早白垩世 120 Ma 左右。

## 5.2 华北南缘晚中生代大规模成矿作用

华北克拉通南缘是我国重要的多金属成矿区, 其中小秦岭地区以金矿为主, 而邻近的熊耳山地区除发育大量金矿外, 还有大量钼矿和银—铅—锌矿的产出(叶会寿, 2006)。李厚民等(2007)、李诺等(2008)以及王义天等(2010)获得小秦岭北矿带大湖和马家洼金钼矿的辉钼矿 Re-Os 年龄分别介于  $215.4 \sim 255.6\text{ Ma}$  和  $232.5 \sim 268.4\text{ Ma}$ 。以上结果表明小秦岭北矿带存在早中生代(印支期)Au-Mo 成矿作用。但本文研究显示, 小秦岭北矿带同样存在晚中生代(燕山期)的成矿事件。对小秦岭南矿带主要大一中型金矿床蚀变矿物的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年结果表明, 南矿带主要金矿床的成矿年龄集中在  $134.4 \pm 0.7 \sim 120.3 \pm 0.6\text{ Ma}$  之间(毕诗健, 2011; Li *et al.*, 2012a, 2012b)。前人的几项研究也给出了早白垩世的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄, 其中东闯金矿蚀变绢云母和红土岭 Q875 号脉蚀变黑云母的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄分别为  $132\text{ Ma}$  和  $129 \sim 127\text{ Ma}$  左右(徐启东等, 1998; 王义天等, 2002)。早白垩世的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄得到了柏树岭、寺母峪、泉家峪等金矿床(图 2)辉钼矿 Re-Os 年龄的证实( $131 \sim 134\text{ Ma}$ ; 李厚民等, 2007; 毕诗健, 2011)。显然, 近年来高精度的同位素年代学研究表明, 虽然小秦岭地区存在印支期和

燕山期两次成矿作用, 但大多数矿床形成于晚中生代早白垩世早期(毕诗健, 2011; Li *et al.*, 2012a, 2012b)。

位于小秦岭以东的熊耳山 Au-Mo-Ag-Pb-Zn 矿集区主要是晚中生代成矿作用的产物。熊耳山地区祁雨沟爆破角砾岩型金矿的钾长石  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄为  $115 \sim 125\text{ Ma}$ (王义天等, 2001)、单颗粒黄铁矿的 Rb-Sr 等时线年龄为  $126 \pm 11\text{ Ma}$ (Han *et al.*, 2007)、辉钼矿的 Re-Os 年龄为  $135.6 \pm 5.6\text{ Ma}$ (姚军明等, 2009), 前河金矿床蚀变绢云母的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄为  $127 \pm 1.6\text{ Ma}$  至  $123.8 \pm 1.3\text{ Ma}$ (Tang *et al.*, 2011)。这些年龄与小秦岭地区金矿床的年龄数据基本一致。熊耳山地区还是我国最重要的钼矿集区之一, 主要类型有矽卡岩型和斑岩型(李永峰, 2005; 周珂等, 2009)。其中, 雷门沟、上房沟和南泥湖钼矿的辉钼矿 Re-Os 年龄分别为  $132.4 \pm 2.0\text{ Ma}$ 、 $144.8 \pm 2.1\text{ Ma}$  和  $141.8 \pm 2.1\text{ Ma}$ (李永峰, 2005)。最近探明的鱼池岭斑岩型钼矿及石窑沟斑岩型钼矿的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄分别为  $131.2 \pm 1.4\text{ Ma}$ (周珂等, 2009) 和  $131.3 \pm 2.4 \sim 134.3 \pm 2.6\text{ Ma}$ (高亚龙等, 2010)。斑岩型钼矿床的外围还发育众多热液脉状银—铅锌矿床, 其成矿年龄也集中在晚中生代。如蒿坪沟 Ag-Pb-Zn 矿床绢云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄为  $135\text{ Ma}$ (叶会寿, 2006)。可见, 熊耳山和小秦岭地区大规模成矿作用的成矿时代近乎一致, 主要集中在晚中生代早白垩世。

## 5.3 华北南缘晚中生代成矿作用的构造背景

华北南缘小秦岭—熊耳山地区不同类型的矿床形成时代大多集中在早白垩世, 表明它们的形成受统一的动力学背景控制。大量地质事实表明, 晚中生代早白垩世时期包括小秦岭—熊耳山地区在内的华北克拉通南缘处于强烈的伸展构造环境。在华北南缘小秦岭—熊耳山地区自西向东依次发育有小秦岭、崤山、熊耳山等变质核杂岩体。张进江等(1998)对小秦岭变质核杂岩进行了详细的构造解析和  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代学研究, 证明区域性伸展作用发生在  $135 \sim 123\text{ Ma}$ 。小秦岭地区的文峪岩体及其周围有辉绿岩和辉长岩脉的侵位, 其锆石 U-Pb 年龄为  $130 \sim 125\text{ Ma}$  左右, 与区内大多数金矿床的成矿时间基本一致(Li *et al.*, 2012a), 暗示这一地区早白垩世时期受强烈的伸展构造背景控制。位于小秦岭周缘的老牛山侵入杂岩、蓝田、牧户关和蟒岭岩体等中酸性岩基含有大量暗色微粒包体并有基性岩脉的

侵入,这些基性岩脉和暗色微粒包体的锆石以及榍石 U-Pb 年龄为 150~132 Ma(Ding *et al.*, 2011; 胡浩等, 2011; 刘锐等, 未发表资料),表明该区晚中生代时期存在强烈的基性岩浆活动和壳幔相互作用,进一步确证早白垩时期的伸展构造背景。位于熊耳山地区的太山庙铝质 A 型花岗岩的侵位年龄为 115 ± 2 Ma(叶会寿等, 2008);嵩县—宝丰盆地中的钾玄质火山岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 117 ± 2 Ma(谢桂青等, 2007),同样记录了华北克拉通南缘伸展背景下的岩浆活动。

小秦岭—熊耳山地区位于秦岭造山带的前陆地区,该区的晚中生代伸展构造背景究竟是与秦岭造山带造山后伸展有关还是属于另外一个独立的构造体制是目前争论较大的一个问题。大量研究表明华北与扬子克拉通的碰撞及秦岭造山带的造山作用发生于早—中三叠世(Ames *et al.*, 1996; Hacker *et al.*, 1996),并于晚三叠世进入造山后伸展阶段。秦岭造山带西段即西秦岭分布有大量 I 型花岗岩、环斑花岗岩(卢欣祥等, 1996)、辉长岩—正长岩(郭敬辉等, 2005; Yang and Wu, 2009)及煌斑岩脉,其侵位时代主要为 230~200 Ma。最近对苏鲁地体基性脉岩及有关正长岩的研究也证实华北与扬子板块的陆陆碰撞对造山带和前陆地区的影响可能在早侏罗世已经结束(Yang *et al.*, 2007)。相反,秦岭造山带东段即东秦岭的中酸性侵入岩主要形成于侏罗纪末期和早白垩世(郭波等, 2009; Mao *et al.*, 2010; 胡浩等, 2011; 王晓霞等, 2011),而西秦岭广大地区迄今为止尚未发现晚侏罗世—早白垩世岩浆岩的侵位。西秦岭和东秦岭(包括华北南缘)中生代岩浆活动时空分布的巨大差异进一步证明秦岭造山带的造山旋回可能在中—晚侏罗世以前已经结束。

综上所述认为,秦岭造山带可能于晚三叠世已进入造山后伸展阶段,因此可以认为华北克拉通南缘晚中生代的伸展体制可能与秦岭造山带的造山作用已经没有关联,而是属于另外一个独立的构造体制。已有大量研究表明,华北克拉通自古生代以来经历了强烈的岩石圈减薄,减薄幅度达 100~120 km,减薄的高峰期可能集中在早白垩世(Wu *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2008)。广泛分布于华北克拉通东部和周缘的晚中生代侵入岩、断陷盆地、变质核杂岩及金—多金属矿床被认为是华北克拉通岩石圈减薄的产物(Li *et al.*, 2003; 2006; Lin *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2008; 李三忠等, 2010; 毕诗健,

2011; Li *et al.*, 2012a)。因此,本文及前人的研究结果,支持包括小秦岭—熊耳山地区在内的华北克拉通南缘晚中生代伸展构造及该构造体制下的大规模成矿作用与华北克拉通的岩石圈减薄有关。岩石圈减薄背景下的大面积岩浆活动和异常的地热梯度必将为大规模金成矿作用带来丰富的热源、流体和成矿物质,而中—上地壳层次广泛发育的伸展构造网络则为成矿流体的循环运移和金矿脉的沉淀提供了良好的构造场地。

## 6 结论

(1) 小秦岭地区北矿带秦南金矿床含金石英脉中热液独居石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $120.9 \pm 0.9$  Ma(MSWD=1.0),  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  加权平均年龄为  $122.6 \pm 1.9$  Ma(MSWD=2.6),二者在误差范围内完全一致,证明定年结果可靠,代表了秦南金矿床的成矿时代,即秦南金矿床形成于早白垩世 120 Ma 左右。研究进一步证明热液独居石可用来精确限定热液脉状金矿床的成矿时代。

(2) 小秦岭地区北矿带存在燕山期的成矿事件,这与南矿带大规模金成矿作用的时间基本吻合。结合华北克拉通南缘熊耳山地区大多数金—钼—铅锌—银矿床的成矿年代学资料,可知华北克拉通南缘不同类型矿床的形成时代基本一致,均主要集中在晚中生代早白垩世。

(3) 华北南缘在晚中生代处于强烈的伸展构造背景,区内燕山期大规模成矿作用是晚中生代华北克拉通岩石圈减薄的成矿响应。

致谢:文中矿床地质部分参考了秦南金矿地质勘探报告,研究生夏炎和任志媛参与了部分野外工作。扫描电镜和 LA-ICPMS 分析测试工作得到了张素新和胡兆初研究员的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢!

## References

- Ames, L., Zhou, G., Xiong, B., 1996. Geochronology and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Metamorphism with Implications for Collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons, Central China. *Tectonics*, 15: 472–489. doi: 10.1029/95TC02552
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that Do Not Report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192(1–2): 59–79. doi: 10.1016/S0009-2541(02)

- 00195—X
- Bi, S. J. , 2011. The Mesozoic Large-scale Mineralization in the Xiaoqinling Gold District, Southern Margin of the North China Craton: A Relationship with the Destruction of the North China Craton (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Bi, S. J. , Li, J. W. , Li, Z. K. , 2011. Geological Significance and Geochronology of Paleoproterozoic Mafic Dikes from Xiaoqinling Gold District, Southern Margin of the North China Craton. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(1): 17—32 (in Chinese with English abstract).
- Brown, S. M. , Fletcher, I. R. , Stein, H. J. , et al. , 2002. Geochronological Constraints on Pre-, Syn- and Postmineralisation Events at the Cleo Deposit. Eastern Goldfields Province, Western Australia. *Economic Geology*, 97: 541—559. doi: 10.2113/gsecongeo.97.3.541
- Dahl, P. S. , Hamilton, M. A. , Jercinovic, M. J. , 2005. Comparative Isotopic and Chemical Geochronometry of Monazite, with Implications for U-Th-Pb Dating by Electron Microprobe: An Example from Metamorphic Rocks of the Eastern Wyoming Craton (U. S. A.). *American Mineralogist*, 90(4): 619—638. doi: 10.2138/am.2005.1382
- Ding, L. X. , Ma, C. Q. , Li, J. W. , et al. , 2011. Timing and Genesis of the Adakitic and Shoshonitic Intrusions in the Laoniushan Complex, Southern Margin of the North China Craton: Implications for Post-Collisional Magmatism Associated with the Qinling Orogen. *Lithos*, 126 (3—4): 212—232. doi: 10.1016/j.lithos.2011.07.008
- Edwards, M. A. , Harrison, T. M. , 1997. When Did the Roof Collapse? Late Miocene N-S Extension in the High Himalaya Revealed by Th-Pb Monazite Dating of the Khula Kangri Granite. *Geology*, 25: 543—546. doi: 10.1130/0091-7613(1997)025<0543:WDTRCL>2.3.CO;2
- Feng, J. Z. , Yue, Z. S. , Xiao, R. G. , et al. , 2009. Mineralization Regularity and Metallogenetic Prognosis of Deep-Seated Gold Deposits, Xiaoqinling Gold District. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Foster, G. , Gibson, D. , Parrish, R. , et al. , 2002. Textural, Chemical and Isotopic Insights into the Nature and Behavior of Metamorphic Monazite. *Chemical Geology*, 191: 181—207. doi: 10.1016/S0009-2541(02)00156-0
- Gao, Y. L. , Zhang, J. M. , Ye, H. S. , et al. , 2010. Geological Characteristics and Molybdenite Re-Os Isotopic Dating of Shiyaogou Porphyry Molybdenum Deposit in the East Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 729—739 (in Chinese with English abstract).
- Guo, B. , Zhu, L. M. , Li, B. , et al. , 2009. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Composition of the Huashan and Heyu Granite Plutons at the Southern Margin of North China Craton: Implications for Geodynamic Setting. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 265—281 (in Chinese with English abstract).
- Guo, J. H. , Chen, F. K. , Zhang, X. M. , et al. , 2005. Evolution of Syn- to Post-Collisional Magmatism from North Sulu UHP Belt, Eastern China: Zircon U-Pb Geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 4: 1281—1301 (in Chinese with English abstract).
- Hacker, B. R. , Wang, X. , Eide, E. A. , et al. , 1996. The Qinling-Dabie Ultra-High-Pressure Collisional Orogen. In: Yin, A. , Harrison, M. , eds. , *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge University Press, Cambridge, 345—370.
- Han, Y. G. , Li, X. H. , Zhang, S. H. , et al. , 2007. Single Grain Rb-Sr Dating of Euhedral and Cataclastic Pyrite from the Qiyugou Gold Deposit in Western Henan, Central China. *Chinese Science Bulletin*, 52 (13): 1820—1826. doi: 10.1007/s11434-007-0248-3
- Harrison, T. M. , Catlos, E. J. , Montel, J. M. , 2002. U-Th-Pb Dating of Phosphate Minerals. In: Kohn, M. J. , Rakovan, J. , Hughes, J. M. , eds. , *Phosphates: Geochemical, Geobiological, and Materials Importance*, Vol. 48. Reviews in Mineralogical Society of America, Washington, 523—558.
- Hu, H. , Li, J. W. , Deng, X. D. , 2011. LA-ICPMS Zircon U-Pb Dating of Granitoid Intrusions Related to Iron Copper Polymetallic Deposits in Luonan-Lushi Area of Southern North China Craton and Its Geological Implications. *Mineral Deposits*, 30(6): 979—1001 (in Chinese with English abstract).
- Hu, J. , Zhang, Z. Z. , Jiang, S. Y. , 2010. The Genesis and Tectonic Significance of Mesozoic HuaShan High Ba-Sr Granite, Shanxi Province. Abstract of the Petrology and Geophysics Conference, Beijing, 51—52 (in Chinese).
- Hu, Z. C. , Gao, S. , Liu, Y. S. , et al. , 2008. Signal Enhancement in Laser Ablation ICP-MS by Addition of Nitrogen in the Central Channel Gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8): 1093—1101. doi: 10.1039/b804760j
- Hu, Z. G. , 1994. Complex Structures of the Small Qinling (Shaanxi Segment) Metamorphic Core and Associated Gold Deposits. *Geotectonica et Metallogenesis*, 18(2): 147—154 (in Chinese with English abstract).

- Huang, X. L. , Niu, Y. L. , Xu, Y. G. , et al. , 2010. Geochemistry of TTG and TTG-Like Gneisses from Lushan-Taihua Complex in the Southern North China Craton: Implications for Late Archean Crustal Accretion. *Precambrian Research*, 182(1—2): 43—56. doi: 10.1016/j.precamres.2010.06.020
- Jiang, S. Y. , Dai, B. Z. , Jiang, Y. H. , et al. , 2009. Jiaodong and Xiaoqinling: Two Orogenic Gold Provinces Formed in Different Tectonic Settings. *Acta Petrologica Sinica*, 25: 2727—2738 (in Chinese with English abstract).
- Kohn, M. J. , Malloy, M. A. , 2004. Formation of Monazite via Prograde Metamorphic Reactions among Common Silicates: Implications for Age Determinations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(1): 101—113. doi: 10.1016/S0016-7037(03)00258-8
- Li, H. Q. , Liu, J. Q. , Wei, L. , 1993. Chronology of Fluid Inclusion on Hydrothermal Ore Deposit and its Geological Application. Geological Publishing House, Beijing, 55—63 (in Chinese).
- Li, H. M. , Ye, H. S. , Mao, J. W. , et al. , 2007. Re-Os Dating of Molybdenites from Au (Mo) Deposits in Xiaoqinling Gold Ore District and Its Geological Significance. *Mineral Deposits*, 26(4): 417—424 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. W. , Vasconcelos, P. M. , Zhang, J. , et al. , 2003.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Constraints on a Temporal Link between Gold Mineralization, Magmatism, and Continental Margin Transtension in the Jiaodong Gold Province, Eastern China. *Journal of Geology*, 111(6): 741—751. doi: 10.1086/378486
- Li, J. W. , Vasconcelos, P. , Zhou, M. F. , et al. , 2006. Geochronology of the Pengjiakuang and Rushan Gold Deposits, Eastern Jiaodong Gold Province, Northeastern China: Implications for Regional Mineralization and Geodynamic Setting. *Economic Geology*, 101(5): 1023—1038. doi: 10.2113/gsecongeo.101.5.1023
- Li, J. W. , Li, Z. K. , Zhou, M. F. , et al. , 2012a. The Cretaceous Yangzhaiyu Lode Gold Deposit, North China Craton: A Link between Craton Reactivation and Gold Veining. *Economic Geology*, 107: 43—79. doi: 10.2113/econgeo.107.1.43
- Li, J. W. , Bi, S. J. , Selby, D. , et al. , 2012b. A Giant Mesozoic Gold Province in the North China Craton Resulted from Decratonization. *Earth and Planetary Science Letters*, 349—350: 26—37. doi: 10.1016/j.epsl.2012.06.058
- Li, N. , Sun, Y. L. , Li, J. , et al. , 2008. Molybdenite Re-Os Isotope Age of the Dahu Au-Mo Deposit, Xiaoqinling and the Indosian Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 810—816 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. M. , Qu, L. Q. , Su, Z. B. , et al. , 1996. The Geology and Metallogenetic Prediction of the Gold Deposit in Xiaoqinling. Geological Publishing House, Beijing, 39—53 (in Chinese).
- Li, S. Z. , Suo, Y. H. , Dai, L. M. , et al. , 2010. Development of the Bohai Bay Basin and Destruction of the North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 64—89 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. F. , 2005. The Temporal-spatial Evolution of Mesozoic Granitoids in the Xiong'ershan Area and Their Relationships to Molybdenum-Gold Mineralization(Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 15—17 (in Chinese).
- Lin, W. , Faure, M. , Monie, P. , et al. , 2008. Mesozoic Extensional Tectonics in Eastern Margin of Eurasia Continent, the Case Study of South-Liaodong Peninsula Dome, NE China. *Journal of Geology*, 116: 134—154. doi: 10.1086/527456
- Liu, D. Y. , Wilde, S. A. , Wan, Y. S. , et al. , 2009. Combined U-Pb, Hafnium and Oxygen Isotope Analysis of Zircons from Meta-igneous Rocks in the Southern North China Craton Reveal Multiple Events in the Late Mesoproterozoic-Early Neoarchean. *Chemical Geology*, 261(1—2Sp. Iss. SI): 139—153. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.10.041
- Liu, Y. S. , Hu, Z. C. , Gao, S. , et al. , 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257: 34—43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Liu, Y. S. , Gao, S. , Hu, Z. C. , et al. , 2010a. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons of Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51: 537—571. doi: 10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S. , Hu, Z. C. , Zong, K. Q. , et al. , 2010b. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55: 1535—1546. doi: 10.1007/s11434-010-3052-4
- Lu, X. X. , Dong, Y. , Chang, Q. L. , et al. , 1996. Indosian Shahewan Rapakivi Granite in Qinling and Its Dynamic Significance. *Science in China (Series D-Earth Sciences)*, 39(3): 266—272 (in Chinese with English abstract).

- Lu, X. X., Li, M. L., Wang, W., et al., 2008. Indosinian Movement and Metallogenesis in Qinling Orogenic Belt. *Mineral Deposits*, 27(6): 762—773 (in Chinese with English abstract).
- Luan, S. W., Cao, D. C., Fang, Y. K., et al., 1985. Geochemistry of Xiaoqinling Gold Deposits. *Journal of Mineralogy and Petrology*, (2): 2—7 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Goldfarb, R. J., Zhang, Z. W., et al., 2002. Gold Deposits in the Xiaoqinling-Xiong'ershan Region, Qinling Mountains, Central China. *Mineralium Deposita*, 37(3—4): 306—325. doi: 10.1007/s00126—001—0248—1
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Pirajno, F., et al., 2010. Late Jurassic-Early Cretaceous Granitoid Magmatism in Eastern Qinling, Central-eastern China: SHRIMP Zircon U-Pb Ages and Tectonic Implications. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(1): 51—78. doi: 10.1080/08120090903416203
- Overstreet, W. C., 1967. The Geologic Occurrence of Monazite: A Review of the Distribution of Monazite and of the Geologic Controls Affecting the Amount of Thorium in Monazite. Professional Paper, Geological Survey, USA.
- Poitrasson, F., Hanchar, J. M., Schaltegger, U., 2001. The Current State of Accessory Mineral Research. *Chemical Geology*, 191: 3—24. doi: 10.1016/S0009—2541(02)00146—8
- Qiu, K. F., Yang, L. Q., 2011. Genetic Feature of Monazite and Its U-Th-Pb Dating: Critical Considerations on the Tectonic Evolution of Sanjiang Tethys. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2721—2732 (in Chinese with English abstract).
- Raith, J. G., Stein, H. J., 2000. Re-Os Dating and Sulfur Isotope Composition of Molybdenite from Tungsten Deposits in Western Namaqualand, South Africa: Implications for Ore Genesis and the Timing of Metamorphism. *Mineralium Deposita*, 35(8): 741—753. doi: 10.1007/s001260050276
- Rasmussen, B., Fletcher, I. R., Muhling, J. R., et al., 2007. Bushveld-aged Fluid Flow, Peak Metamorphism and Gold Mobilization in the Witwatersrand Basin, South Africa: Constraints from in Situ SHRIMP U-Pb Dating of Monazite and Xenotime. *Geology*, 35: 931—934. doi: 10.1130/G23588A.1
- Rasmussen, B., Mueller, A. G., Fletcher, I. R., 2009. Zirconolite and Xenotime U-Pb Age Constraints on the Emplacement of the Golden Mile Dolerite Sill and Gold Mineralization at Mt Charlotte Mine, Eastern Goldfields Province, Yilgarn Craton, Western Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157: 559—572. doi: 10.1007/s00410—008—0352—7
- Rasmussen, B., Sheppard, S., Fletcher, I. R., 2006. Testing Ore Deposit Models Using in Situ U-Pb Geochronology of Hydrothermal Monazite: Paleoproterozoic Gold Mineralization in Northern Australia. *Geology*, 34: 77—80. doi: 10.1130/G22058.1
- Salier, B. P., Groves, D. I., McNaughton, N. J., et al., 2004. The World Class Wallaby Gold Deposit, Laverton, Western Australia: An Orogenic-style Overprint on Magmatic-hydrothermal Magnetite Calcite Alteration Pipe? *Mineralium Deposita*, 39: 473—494. doi: 10.1007/s00126—004—0425—0
- Sarma, D. S., Fletcher, I. R., Rasmussen, B., et al., 2011. Archaean Gold Mineralization Synchronous with Late Cratonization of the Western Dharwar Craton, India: 2.52 Ga U-Pb Ages of Hydrothermal Monazite and Xenotime in Gold Deposits. *Mineralium Deposita*, 2011(46): 273—288. doi: 10.1007/s00126—010—0326—3
- Selby, D., Creaser, R. A., Hart, C. J. R., et al., 2002. Absolute Timing of Sulfide and Gold Mineralization: A Comparison of Re-Os Molybdenite and Ar-Ar Mica Methods from the Tintina Gold Belt, Alaska. *Geology*, 30(9): 791—794. doi: 10.1130/0091—7613(2002)030<0791:ATOSAG>2.0.CO;2
- Stern, R. A., Berman, R. G., 2000. Monazite U-Pb and Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe, with an Application to in Situ Dating of an Archean Metasedimentary Rock. *Chemical Geology*, 172: 113—130. doi: 10.1016/S0009—2541(00)00239—4
- Tallarico, F. H. B., Figueiredo, B. R., McNaughton, N. J., et al., 2004. Geological and SHRIMP II U-Pb Constraints on the Age and Origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) Deposit, Carajas, Brazil. *Mineralium Deposita*, 39: 68—86. doi: 10.1007/s00126—003—0383—y
- Tang, K. F., Li, J. W., Bi, S. J., et al., 2011. Geology, Mineralization, and Geochronology of the Qianhe Gold Deposit, Southern North China Craton. *Mineralium Deposita* (in press).
- Vielreicher, N. M., Groves, D. I., Snee, L. W., et al., 2010. Broad Synchronicity of Three Gold Mineralization Styles in the Kalgoorlie Gold Field: SHRIMP U-Pb and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronological Evidence. *Economic Geology*, 105: 187—227. doi: 10.2113/gsecongeo.105.1.187
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Jian, P., 2004. Comparison of SHRIMP U-Pb Dating of Monazite and Zircon. *Chinese*

- Science Bulletin, 49(14): 1501—1506. doi: 10.1360/03wd0638
- Wang, H. Z., 1987. Geological Characteristics and Ore Genesis of the Xiaoqinling Gold Field. *Mineral Deposits*, 6(1): 57—67 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T. H., Mao, J. W., Wang, Y. B., 2008. Research on SHRIMP U-Pb Chronology in Xiaoqinling-Xionger'shan Area: The Evidence of Delamination of Lithosphere in Qinling Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1273—1287 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. X., Wang, T., Qi, Q. J., et al., 2011. Temporal-spatial Variations, Origin and Their Tectonic Significance of the Late Mesozoic Granites in the Qinling, Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1573—1593 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. T., Mao, J. W., Lu, X. X., 2001.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating and Geochronological Constraints on the Ore-Forming Epoch of the Qiyugou Gold Deposit in Songxian County, Henan Province. *Geological Review*, 47(5): 551—555 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. T., Mao, J. W., Lu, X. X., et al., 2002.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating and Geological Implication of Auriferous Altered Rocks from the Middle-Deep Section of Q875 Gold-Quartz Vein in Xiaoqinling Area, Henan, China. *Chinese Science Bulletin*, 47(18): 1427—1431 (in Chinese with English abstract). doi: 10.1360/02tb9383
- Wang, Y. T., Ye, H. S., Ye, A. W., et al., 2010. Re-Os Age of Molybdenite from the Majiawa Au-Mo Deposit of Quartz Vein Type in the North Margin of the Xiaoqinling Gold Area and Its Implication for Metallogeny. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 140—145 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Lin, J. Q., Wilde, S. A., et al., 2005. Nature and Significance of the Early Cretaceous Giant Igneous Event in Eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1—2): 103—119. doi: 10.1016/j.epsl.2005.02.019
- Xie, G. Q., Mao, J. W., Li, R. L., et al., 2007. SHRIMP Zircon U-Pb Dating for Volcanic Rocks of the Daying Formation from Baofeng Basin in Eastern Qinling, China and its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2387—2396 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q. D., Zhong, Z. Q., Zhou, H. W., et al., 1998.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating of the Xiaoqinling Gold Area in Henan Province. *Geological Review*, 44(3): 323—327 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. S., Griffin, W. L., Ma, X., et al., 2009. The Taihua Group on the Southern Margin of the North China Craton: Further Insights from U-Pb Ages and Hf Isotope Compositions of Zircons. *Mineralogy and Petrology*, 97(1—2): 43—59. doi: 10.1007/s00710-009-0062-5
- Xue, L. W., Zhou, C. M., Pang, J. Q., et al., 1996. Inversion Tectonics and Prospecting Mineralogy of Tonggou Gold Deposit in Xiaoqinling Region. China University of Geosciences Press, Wuhan, 50—57 (in Chinese).
- Ye, H. S., 2006. The Mesozoic Tectonic Evolution and Pb-Zn-Ag Metallogeny in the South Margin of North China Craton (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., et al., 2008. Mesozoic Decratonization of the North China Block. *Geology*, 36(6): 467—470. doi: 10.1130/G24518A.1
- Yang, J. H., Wu, F. Y., 2009. Triassic Magmatism and Its Relation to Decratonization in the Eastern North China Craton. *Science in China (Series D-Earth Sciences)*, 52(9): 1319—1330. doi: 10.1007/s11430-009-0137-5
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2007. Rapid Exhumation and Cooling of the Liaonian Metamorphic Core Complex: Inferences from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Thermochronology and Implications for Late Mesozoic Extension in the Eastern North China Craton. *Geological Society of America Bulletin*, 119: 1405—1414. doi: 10.1130/B26085.1v.119 no. 11—12 p. 1405—1414
- Yao, J. M., Zhao, T. P., Li, J., et al., 2009. Molybdenite Re-Os Age and Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Geochemistry of the Qiyugou Gold System, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 374—384 (in Chinese with English abstract).
- Ye, H. S., Mao, J. W., Xu, L. G., et al., 2008. SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Geochemistry of the Taishanmiao Aluminous A-Type Granite in Western Henan Province. *Geological Review*, 54(5): 699—711 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. J., Zheng, Y. D., Liu, S. W., 1998. The Xiaoqinling Metamorphic Core Complex: Structure, Genetic Mechanism and Evolution. Ocean Press, Beijing, 17—63 (in Chinese).
- Zhou, K., Ye, H. S., Mao, J. W., et al., 2009. Geological Characteristics and Molybdenite Re-Os Isotopic Dating of Yuchiling Porphyry Mo Deposit in Western Henan Province. *Geological Review*, 28(2): 170—184 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

毕诗健, 2011. 小秦岭金矿集中区中生代成矿作用及与华北克拉通破坏的关系(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学(武汉)。

- 大学.
- 毕诗健,李建威,李占坤,2011. 华北克拉通南缘小秦岭金矿区基性脉岩时代及地质意义. 地球科学——中国地质大学学报,36(1):17—32.
- 冯建之,岳铮生,肖荣阁,等,2009. 小秦岭深部金矿成矿规律与成矿预测. 北京:地质出版社.
- 高亚龙,张江明,叶会寿,等,2010. 东秦岭石窑沟斑岩钼矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 年龄. 岩石学报,26(3):729—739.
- 郭波,朱赖民,李舜,等,2009. 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. 岩石学报,(2):265—281.
- 郭敬辉,陈福坤,张晓曼,等,2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞—碰撞后构造过程:锆石 U-Pb 年代学. 岩石学报,(4):1281—1301.
- 胡浩,李建威,邓晓东,2011. 洛南—卢氏地区与铁铜多金属矿床有关的中酸性侵入岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 矿床地质,30(6):979—1001.
- 胡建,张遵忠,蒋少涌,2010. 陕西华山中生代高 Ba-Sr 花岗岩成因及其构造意义. 北京:全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要,51—52.
- 胡正国,1994. 小秦岭陕西段变质杂岩核构造与金矿. 大地构造与成矿学,18(2):147—154.
- 蒋少涌,戴宝章,姜耀辉,等,2009. 胶东和小秦岭:两类不同构造环境中的造山型金矿省. 岩石学报,(11):2727—2738.
- 李厚民,叶会寿,毛景文,等,2007. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼—锇定年及其地质意义. 矿床地质,26(4):417—424.
- 李华芹,刘家齐,魏林,1993. 热液矿床流体包裹体年代学及其地质应用研究. 北京:地质出版社,55—63.
- 李诺,孙亚莉,李晶,等,2008. 小秦岭大湖金钼矿床辉钼矿铼锇同位素年龄及印支期成矿事件. 岩石学报,24(4):810—816.
- 李三忠,索艳慧,戴黎明,等,2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏. 地学前缘,17(4):64—89.
- 黎世美,等,1996. 小秦岭金矿地质和成矿预测. 北京:地质出版社.
- 李永峰,2005. 豫西熊耳山地区中生代花岗岩类时空演化与钼(金)成矿作用(博士学位论文). 北京:中国地质大学,15—17.
- 卢欣祥,董有,常秋岭,等,1996. 秦岭印支期沙河湾奥长环斑花岗岩及其动力学意义. 中国科学,26(3):244—248.
- 卢欣祥,李明立,王卫,等,2008. 秦岭造山带的印支运动及印支期成矿作用. 矿床地质,27(6):762—773.
- 栾世伟,曹殿春,方耀奎,等,1985. 小秦岭金矿床地球化学. 矿物岩石,(2):2—7.
- 邱昆峰,杨立强,2011. 独居石成因特征与 U-Th-Pb 定年及三江特提斯构造演化研究例析. 岩石学报,2721—2732.
- 王亨治,1987. 小秦岭金矿田地质特征及矿床成因. 矿床地质,6(1):57—67.
- 王团华,毛景文,王彦斌,2008. 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. 岩石学报,24(6):1273—1287.
- 王晓霞,王涛,齐秋菊,等,2011. 秦岭南中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义. 岩石学报,27(6):1573—1593.
- 王义天,毛景文,卢欣祥,2001. 嵩县祁雨沟金矿成矿时代的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年代学证据. 地质论评,47(5):551—555.
- 王义天,毛景文,卢欣祥,等,2002. 河南小秦岭金矿区 Q875 脉中深部矿化蚀变岩的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄及其意义. 科学通报,(18):1427—1431.
- 王义天,叶会寿,叶安旺,等,2010. 小秦岭北缘马家洼石英脉型金钼矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄及其意义. 地学前缘,140—145.
- 谢桂青,毛景文,李瑞玲,等,2007. 东秦岭宝丰盆地大营组火山岩 SHRIMP 定年及其意义. 岩石学报,(10):2387—2396.
- 徐启东,钟增球,周汉文,等,1998. 豫西小秦岭金矿区的一组<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年数据. 地质论评,44(3):323—327.
- 薛良伟,周长命,庞继群,等,1996. 小秦岭桐沟金矿反转构造及找矿矿物学. 武汉:中国地质大学出版社,50—57.
- 姚军明,赵太平,李晶,等,2009. 河南祁雨沟金成矿系统辉钼矿 Re-Os 年龄和锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素地球化学. 岩石学报,25(2):374—384.
- 叶会寿,2006. 华北陆块南缘中生代构造演化与铅锌银成矿作用(博士学位论文). 北京:中国地质科学院.
- 叶会寿,毛景文,徐林刚,等,2008. 豫西太山庙铝质 A 型花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征. 地质论评,54(5):699—711.
- 张进江,郑亚东,刘树文,1998. 小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制及构造演化. 北京:海洋出版社,17—63.
- 周珂,叶会寿,毛景文,等,2009. 豫西鱼池岭斑岩型钼矿床地质特征及其辉钼矿铼—锇同位素年龄. 地质论评,28(2):170—184.