

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.372>



# 华北克拉通南缘早白垩世区域大规模岩浆—热液成矿系统

赵新福<sup>1,2\*</sup>, 李占轲<sup>2\*</sup>, 赵少瑞<sup>2</sup>, 毕诗健<sup>2</sup>, 李建威<sup>1,2</sup>

1.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

2.中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

**摘要:** 华北克拉通南缘在中生代发生了大规模的成矿作用,主要的矿床类型有脉状金矿床(石英脉型、构造蚀变岩型)、斑岩型钼矿床、脉状银铅锌矿床。对于这些矿床的成因和成矿动力学背景,目前还存在不少争议,但近年来越来越多的成矿年代学证据表明,这些矿床均主要形成于早白垩世,且与区域上广泛发育的岩浆活动具有高度的时空一致性。在归纳总结华北克拉通南缘主要矿床类型地质特征和时空分布的基础上,简述各类矿床的成矿物质来源以及它们之间的成因联系,指出这些不同类型的矿床组成了一个巨型的岩浆—热液成矿系统。华北克拉通南缘成矿作用与其邻近的东秦岭—大别成矿带的成矿作用具有一致性,均受中国东部早白垩世大规模伸展作用控制,是统一的地球动力学背景下的产物。结合地球物理的资料认为,早白垩世岩石圈伸展及其导致的岩浆作用最可能与晚中生代古太平洋板块向东亚大陆边缘俯冲作用有关,上涌的岩浆热液在合适的构造体制下,与上地壳的岩石和流体发生交代和流体混合,最终在浅部形成大规模的岩浆—热液成矿系统。

**关键词:** 华北克拉通南缘; 中生代成矿作用; 岩浆—热液成矿系统; 成矿构造体制; 矿床学。

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2019)01-0052-17

收稿日期: 2018-11-03

## Early Cretaceous Regional-Scale Magmatic-Hydrothermal Metallogenic System at the Southern Margin of the North China Craton

Zhao Xinfu<sup>1,2\*</sup>, Li Zhanke<sup>2\*</sup>, Zhao Shaorui<sup>2</sup>, Bi Shijian<sup>2</sup>, Li Jianwei<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract:** The southern margin of the North China Craton has a large-scale ore-forming event during the Mesozoic, and includes three major deposit types of lode gold (as either quartz veins or disseminated ores), porphyry Mo, and quartz vein-type Ag-Pb-Zn deposits. Ore genesis and geodynamic setting for these deposits, however, are still in a matter of debate. Geochronological studies in recent years have revealed that all of these deposits were formed during the Early Cretaceous, and show close spatial-temporal relationship with regional large-scale magmatism. In this study, we make a summary of geological features and regionally spatial-temporal distribution of the major deposit types, and discuss their probable metal sources and possible genetic links between different deposit types. We suggest that these different types of deposits formed a giant regional magmatic-hydrothermal metallogenic system. Moreover, the mineralization event at the southern margin of the North China Craton has ages and geological features consistent with those deposits in the neighboring eastern Qinling-Dabie metallogenic belt. They

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos.41822203, 41772074, 91514303); 中央高校基本科研业务费专项资金(Nos.CUG140618, CUGCJ1711)。  
**作者简介:** 赵新福(1982—),男,教授,主要从事矿床学教学和研究工作,ORCID: 0000-0002-1344-6808. E-mail: xfzhao@cug.edu.cn

\***通讯作者:** 赵新福, E-mail: xfzhao@cug.edu.cn; 李占轲, E-mail: lizk@cug.edu.cn

**引用格式:** 赵新福, 李占轲, 赵少瑞, 等, 2019. 华北克拉通南缘早白垩世区域大规模岩浆—热液成矿系统. 地球科学, 44(1): 52—68.

were formed in the same geodynamic setting, which was controlled by the Early Cretaceous large-scale extensional events of the East China. In combination with geophysical data, such an extensional and magmatic event at a lithospheric scale was mostly likely related to the subduction of the Paleo-Pacific Plate underneath the East Asia continent. Upwelling of the magmas and the related hydrothermal fluids were extensively interacted with upper crustal rocks and shallow-derived fluids, and formed a regional scale magmatic-hydrothermal metallogenetic system at the priority structures of upper crustal level.

**Key words:** southern margin of North China Craton; Mesozoic metallogenetic event; magmatic-hydrothermal ore-forming system; geodynamic setting; ore deposit.

华北克拉通在中生代发生了大规模的克拉通破坏和减薄,大量的研究已表明克拉通减薄的峰期发生在早白垩世,以广泛发育的岩浆活动、断陷盆地和变质核杂岩为标志(朱日祥等,2011)。与克拉通破坏相对应的是,在华北克拉通东部的周缘地区发生了大规模的成矿作用,主要的矿床类型有脉状金矿床(石英脉型、构造蚀变岩型)、斑岩型钼矿床、脉状银铅锌矿床、矽卡岩型铁矿床等(图1)。其中,又以华北克拉通南缘的矿床类型最为多样,华北克拉通南缘广泛发育的斑岩型钼矿床是世界上最重要的斑岩钼矿成矿带(黄典豪等,1994;李诺等,2007;Mao et al., 2008; Li et al., 2017);小秦岭和熊耳山地区发育了大量的脉状金矿床,是我国仅次于胶东地

区的第二大金矿集区(Mao et al., 2002; Chen et al., 2004; Li et al., 2012a);近年来前人在熊耳山和崤山地区又发现了大量的脉状银铅锌矿床(Chen et al., 2004; 燕长海和刘国印, 2004; Li et al., 2013)。最新的年代学资料表明,这些金、钼、银铅锌矿床均主要形成于早白垩世(Mao et al., 2002, 2008; 李永峰等, 2005; 叶会寿等, 2006; Li et al., 2012a, 2012b, 2013),与华北克拉通破坏峰期的时代较为一致,但它们之间的成因联系目前还不甚清楚。这些时代一致的矿床是否构成了华北南缘一个区域性岩浆—热液成矿系统是一个十分值得探讨的问题。

近年来,不同学者对华北南缘斑岩型钼矿和脉状银铅锌矿床的成因认识已取得较多的共识,它们

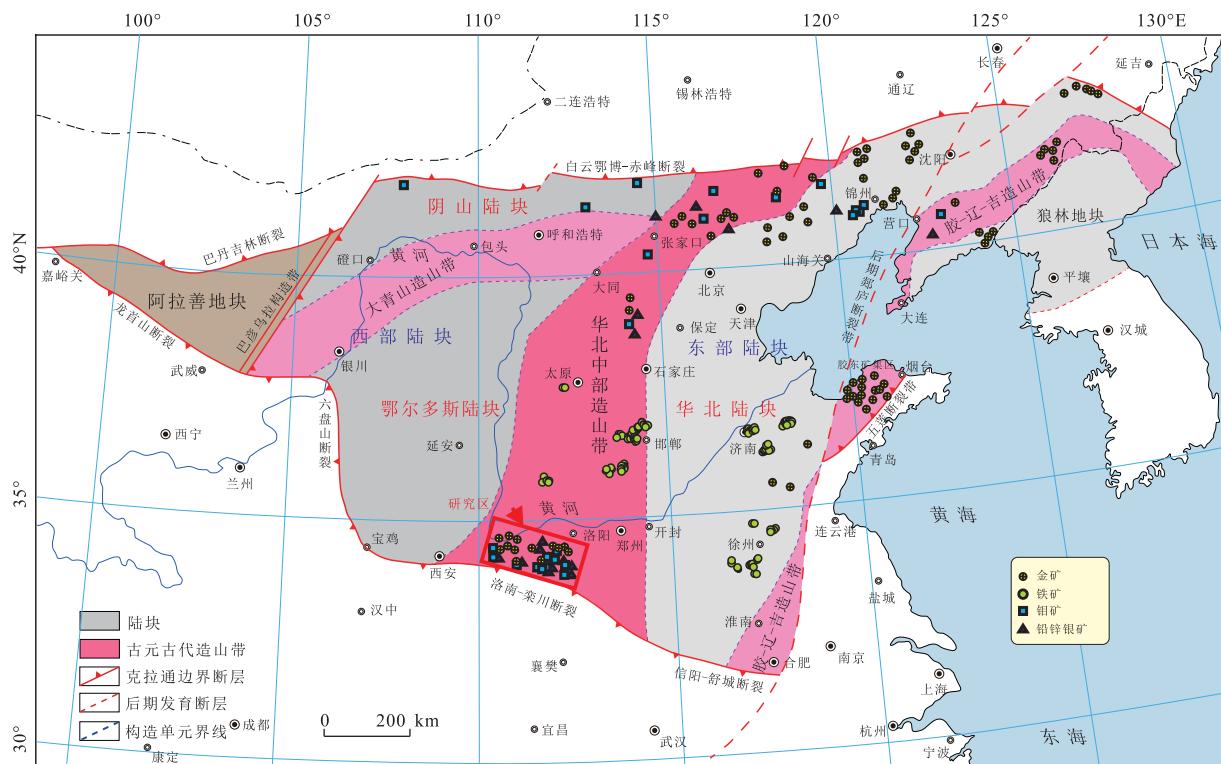


图1 华北克拉通中生代主要矿床类型及其分布

Fig.1 The distribution of major Mesozoic deposits in North China Craton

据 Zhao et al.(2012a)修改

均是早白垩世岩浆热液事件的产物,但对成矿大地构造背景仍存在早白垩世克拉通破坏相关和印支期陆陆碰撞造山后的伸展作用相关的两种学术观点(陈衍景等,2003;毛景文等,2006,2009;叶会寿等,2006;李诺等,2009;李占轲,2013).而对该区脉状金矿床的成因,目前还有较大的争议,主要可以概括为两种观点:(1)印支期造山作用形成的造山型金矿受到早白垩世热事件的叠加(蒋少涌等,2009;Li et al.,2011);(2)与早白垩世克拉通破坏相关的岩浆活动有关的金矿床(Li et al.,2012a,2012b;Tang et al.,2013;唐克非,2014).另外,这些不同矿床类型间的成因联系还不甚清楚,虽然斑岩型钼矿和脉状银铅锌矿床在空间上和成因上均与岩浆作用有关,但是它们与同期金矿床之间的关系有待研究.本文将在归纳总结华北克拉通南缘主要矿床类型地质特征和时空分布的基础上,简述各类矿床的成矿物质来源及它们之间的成因联系,进而探讨华北克拉通南缘中生代大规模成矿作用的动力学背景,及其与华北克拉通破坏之间的可能成因联系.

## 1 地质背景

华北克拉通南缘与秦岭造山带北缘毗邻,二者以洛南—栾川断裂为界(图1和图2).华北南缘由小秦岭、崤山、熊耳山、外方山等隆起区以及卢氏、洛

宁、栾川、鲁山等凹陷区组成。区域地层主要由太古代—早元古代变质结晶基底及晚古元古代以来的盖层组成。基底岩石主要为太古宇—古元古界太华群中深变质火山—沉积岩，岩性以斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩及混合岩为主，是区内金矿床的主要赋矿围岩。盖层主要由古元古界熊耳群浅变质火山岩，中元古界官道口群滨海相碳酸盐岩，以及出露面积相对较小的新元古代、古生代和白垩纪地层，呈构造不整合上覆于太华群结晶基底之上。

华北克拉通南缘的构造演化过程大致可以分为4个阶段：(1)晚太古代—古元古代结晶基底的形成；(2)中元古代—新元古代伸展裂谷与被动大陆边缘；(3)新元古代晚期—中三叠世受古特斯洋关闭、以多期弧—陆碰撞为主的板块构造运动；(4)中生代陆—陆碰撞事件及其之后的构造体制转换(张国伟等, 1996). 中三叠世扬子板块和华北克拉通南缘的碰撞造山事件深刻改变了区域的构造地质演化, 中生代以前华北南缘属于华北板块的组成部分, 具有华北板块的地质构造特征; 自早中生代开始, 受秦岭造山运动的影响经历了造山期南北向的挤压缩短和造山后的伸展作用. 在晚中生代, 华北克拉通南缘主要受到古太平洋板块俯冲为主导的构造体制控制, 并经历了中国东部岩石圈减薄事件(张国伟等, 1996; Wu *et al.*, 2005; 朱日祥等, 2011). 以上多期次的中生代构造活动形成了多组韧性断裂带。

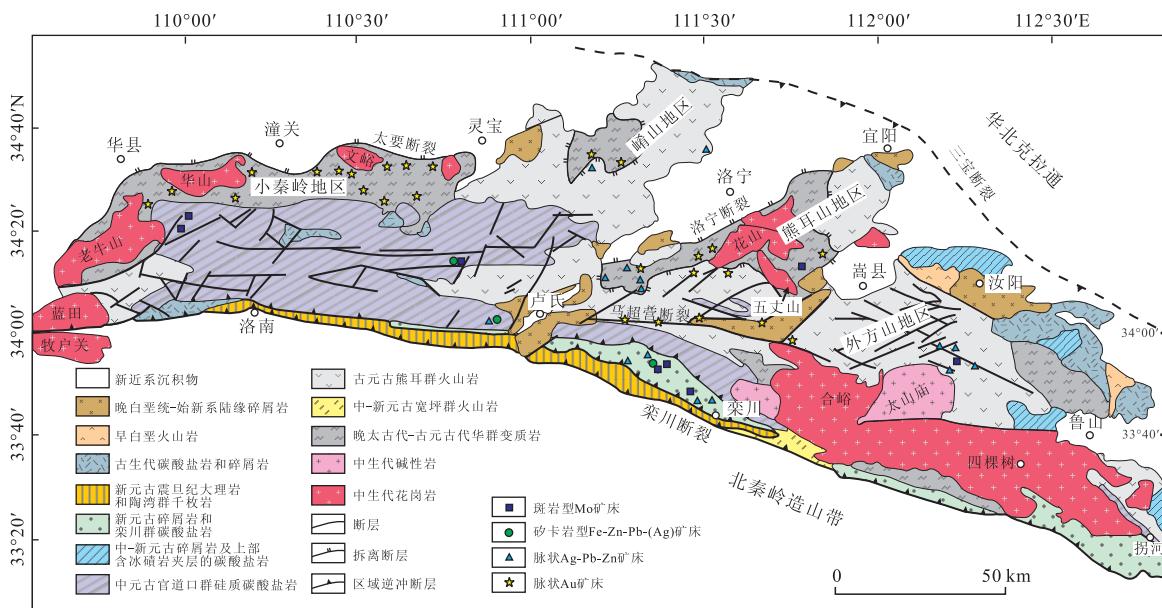


图2 华北克拉通南缘地质简图及主要类型的矿床分布

Fig.2 Simplified geological map of the south margin of the North China Craton, also showing the locations of major deposit types

修改自 Mao *et al.* (2010)

系统,并产生了大规模的伸展拆离运动、岩浆活动及成矿作用。区内的岩浆活动频繁,主要包括少量古—中元古代花岗岩体和广泛发育的晚古元古代熊耳群火山岩。最重要的岩浆活动发育在晚中生代,发育了大面积的中酸性岩体(Mao et al., 2010; Li et al., 2012b),大的岩基包括老牛山、华山、花山、五丈山、合峪、大山庙等岩体,其次是一些小的斑岩体、岩株和岩脉。此外,古元古代及晚中生代还发育有大量的伟晶岩脉和基性岩脉(毕诗健, 2011; Li et al., 2012b; Deng et al., 2013a; Zhao et al., 2015)。其中广泛发育的中生代岩浆作用与区域的成矿作用具有紧密的时空联系(Mao et al., 2008, 2010; Li et al., 2012a, 2012b)。

华北克拉通南缘金属矿产类型多样(图2),尤其金、钼资源储量巨大,是我国重要的多金属矿产资源产地,包括了著名的小秦岭、熊耳山金矿集区以及栾川、外方山等钼矿集区,长期以来一直是国内矿床学研究和矿产勘查的热点(黄典豪等, 1994; Stein et al., 1997; Mao et al., 2002; Chen et al., 2004; Li et al., 2012a, 2012b)。过去十多年前人在华北克拉通南缘又先后探明了一批银铅锌矿床,使这一地区逐渐成为华北克拉通重要的银铅锌资源产地(燕长海和刘国印, 2004; Chen et al., 2004; 毛景文等, 2006; 叶会寿等, 2006; Li et al., 2013)。

## 2 金矿床时空分布与矿床特征

### 2.1 金矿床时空分布

华北克拉通南缘累计探明黄金储量1 300余吨,是我国仅次于胶东的第二大黄金矿集区(Mao et al., 2002; Li et al., 2012a)。金矿床集中分布于小秦岭和熊耳山地区,代表性金矿床有文峪,东闯,红土岭,祁雨沟和上官等。金矿类型主要包括石英脉型和蚀变岩型,石英脉型矿床主要分布在小秦岭地区,而熊耳山地区以蚀变岩型矿床为主。

小秦岭地区已发现含金石英脉1 200余条,金矿床40多处,除少数小型金矿床为蚀变岩型外,其余均为石英脉型金矿。矿脉主要赋存于晚太古代—早元古代太华群变质岩中,含金石英脉大多受区域NNW向断裂控制,此外还有少量矿脉赋存于NE向断裂中。熊耳山地区的金矿床主要产于古元古代熊耳群火山岩中,类型以构造蚀变岩型为主(约占全区储量的80%以上),此外还有少量的隐爆角砾岩型金矿。

近年来前人利用含金蚀变岩中含钾矿物(绢云母、黑云母等)的激光阶段加热Ar-Ar定年,热液成因独居石U-Pb定年和含金石英脉中辉钼矿的Re-Os定年等方法获得了华北克拉通南缘一批金矿床的成矿年龄(如王义天等, 2002; 李厚民等, 2007; Han et al., 2007; 姚军明等, 2009; Li et al., 2012a, 2012b; Tang et al., 2013),表明绝大多数金矿床形成于154~118 Ma,且主要集中在135~120 Ma之间;但也有少数的矿床,主要是Au-Mo共生的矿床,有晚三叠纪的成矿年龄报道,如小秦岭的大湖金钼矿床(Li et al., 2011; Jian et al., 2014)。

### 2.2 金矿床地质特征及成矿流体

华北克拉通南缘中生代的金矿床虽然在成矿地质特征和矿物组成上存在微小的差异,但成矿作用从早期到晚期一般都经历了粗粒黄铁矿—石英(—钾长石)阶段、石英—中细粒黄铁矿阶段、石英—多金属硫化物阶段和石英—碳酸盐阶段(毕诗健, 2011; Li et al., 2012b; 唐克非, 2014)。粗粒黄铁矿—石英(—钾长石)阶段形成乳白色、致密块状的石英大脉,零星分布有粗粒自形、立方体状的黄铁矿,石英脉周围数米范围内可有钾长石化。石英—中细粒黄铁矿阶段形成的石英往往呈烟灰色并含有大量的中细粒、半自形—他形黄铁矿,黄铜矿可少量出现,并可见少量自然金和银金矿等金矿物。石英—多金属硫化物阶段的典型特征是大量的黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿沿裂隙穿插早期的黄铁矿和石英等矿物,或者是多金属硫化物呈脉状或浸染状分布于烟灰色石英脉中。自然金或银金矿多呈浑圆状包裹于硫化物内或者分布于硫化物颗粒之间,是主要的金成矿阶段。石英—碳酸盐阶段金矿物呈石英—碳酸盐细脉的形式穿插或胶结早阶段形成脉体。

金矿床的脉石矿物中流体包裹体主要有3种类型,单相富CO<sub>2</sub>包裹体、CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O包裹体和H<sub>2</sub>O溶液包裹体,含子晶包裹体比较少见。激光拉曼分析显示单相富CO<sub>2</sub>包裹体中还含有少量的CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O和H<sub>2</sub>O溶液包裹体中也普遍存在CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>等成分(范宏瑞等, 2003; Li et al., 2012b; Tang et al., 2013)。包裹体显微测温数据显示,成矿流体均一温度峰值主要集中在250~320℃,盐度集中在8%~11% NaCl eqv,表明金矿床成矿流体是一种中温、低盐度的CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl流体。然而,需要指出的是小秦岭地区的樊岔、高山河、Q8801脉、Q185脉和熊耳山地区的前河金矿、祁雨沟金矿有含子晶或高温高盐度包裹体的报道(Chen et al.,

2009; Fan *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2013).

统计小秦岭和熊耳山地区典型金矿床的氢氧同位素数据,除少数样品落于岩浆水范围内,其余大部分位于岩浆水和大气降水线之间(毕诗健, 2011; Li *et al.*, 2012b; 唐克非, 2014),并且其氢氧同位素组成与区域上早白垩世斑岩型钼矿床成矿流体的氢氧同位素组成相似,表明成矿流体可能主要来自于深部岩浆作用,在流体循环过程中有大气降水等外部流体的加入。碳同位素数据显示,方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值位于 $-7.6\text{\textperthousand} \sim -1.6\text{\textperthousand}$ 之间,铁白云石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值位于 $-7.2\text{\textperthousand} \sim -1.6\text{\textperthousand}$ 之间(毕诗健, 2011; Li *et al.*, 2012b),与煌斑岩和玄武岩中的高温碳同位素组成一致,暗示部分成矿热液可能来自岩浆冷却过程中的脱挥发分或者是地幔去气作用。这一结果也与稀有气体同位素研究结果一致。前人对载金矿物黄铁矿中流体包裹体中的稀有气体同位素组成进行研究发现,小秦岭和熊耳山地区大部分样品位于地壳氦和地幔氦之间,并且靠近地幔氦,表明成矿流体中含有大量的幔源组分(毕诗健, 2011; Li *et al.*, 2012a; 唐克非, 2014)。主要硫化物 S 同位素组成也集中在 $-2$ 至 $+5$ 的较小范围内(聂凤军等, 2001; 李永峰等, 2005; 赵海香, 2011; Li *et al.*, 2012a; Tang *et al.*, 2013; 朱日祥等, 2015),暗示该地区大部分金矿床硫源大致相同并且具有深源岩浆来源的特征。

### 2.3 金矿床成因争论及成矿时代

对于华北克拉通南缘金矿床的成矿时代和成因分类,目前还存在一定的争议,主要可以概括为两个观点:(1)早中生代(晚三叠世)造山型金矿,金成矿事件主要与三叠纪陆陆碰撞造山的变质作用有关,但受到了晚中生代岩浆—热液事件的热扰动(蒋少涌等, 2009; Li *et al.*, 2011),(2)晚中生代(早白垩世)与岩浆作用有关的热液矿床,成矿作用与华北克拉通晚中生代克拉通破坏及大规模的岩浆作用密切相关(Li *et al.*, 2012a, 2012b; 朱日祥等, 2015)。

需要指出的是晚三叠世造山型矿床成因提出的主要依据是基于一些早期的同位素年龄数据,如小秦岭地区桐峪 Q8 号脉钾长石的 Rb-Sr 等时线年龄为 208.2 Ma 以及 F5 矿脉中绢云母的 K-Ar 年龄为  $237.5 \pm 4.8$  Ma(胡正国, 1994)等,以及大湖金矿的晚三叠系辉钼矿 Re-Os 年龄和独居石 U-Pb 年龄(Li *et al.*, 2011)。然而除了大湖金矿外,近年来最新的定年方法对华北克拉通南缘小秦岭和熊耳山矿集区大多数金矿床的成矿年龄数据主要集中在 135~120 Ma 之间(王义天等, 2002; 李厚民等,

2007; Han *et al.*, 2007; 姚军明等, 2009; 毕诗健, 2011; Li *et al.*, 2012a, 2012b; Tang *et al.*, 2013)。野外的地质证据表明,大湖金矿的钼矿脉与金矿脉存在空间分带(下钼上金),并且最新的研究表明钼矿石英脉中的流体包裹体具有高盐度和富硫酸盐子晶的特征(Jian *et al.*, 2014),明显不同于金矿石英脉中低盐度、富含 CO<sub>2</sub> 包裹体的特征。因此,Jian *et al.*(2014)结合同位素的研究认为大湖金—钼矿床的成矿流体应主要来自于岩浆热液。

为进一步弄清小秦岭地区金—钼成矿的关系,笔者对大湖矿床南缘的红土岭金—钼矿床开展了研究。该矿床与大湖金—钼矿床具有一致的地质矿化特征,矿化以含金黄铁矿脉为主,但也有少量含辉钼矿石英脉,且两种矿脉均赋存于东西向断裂构造中。对含钼石英脉和含金石英脉的流体包裹体研究表明,两者具有截然不同的流体特征。钼矿石英脉中的包裹体大部分为高盐度,并且含有硫酸盐或硫化物子晶(图 3),而金矿石英脉中的包裹体具有低盐度和富含 CO<sub>2</sub> 的特征(图 3),与大湖矿床所得到的研究结果十分相似(Jian *et al.*, 2014),表明大湖和红土岭矿床中的金和钼矿化并非来自于同一个成矿流体。最新的年代学(独居石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os)定年表明钼矿脉和金矿脉分别形成于 203 Ma 和 130 Ma 左右,并且通过黄铁矿微量元素和原位 S 同位素分析显示钼矿脉和金矿脉中的黄铁矿形成于完全不同的两套流体体系(赵少瑞, 未发表资料),说明红土岭金—钼矿床的含钼石英脉和含金石英脉分别形成于晚三叠世和早白垩世两种完全不同的构造体制,但两类矿脉的沉淀和产状均继承了早期的 EW 向断裂构造。此外,大湖和红土岭矿床的钼矿脉与金矿脉的 Pb 同位素组成也截然不同(图 4),证实了两类矿体的流体和成矿物质来源不同。大湖和红土岭矿床晚三叠世的钼成矿作用,从流体包裹体特征、成矿时代和 Pb 同位素组成上,与区域上晚三叠世黄龙铺和黄水庵等碳酸岩型钼矿床十分相似(黄典豪等, 1984, 2009),可能是同一期成矿作用的产物。

钼矿体石英中发育大量含子矿物的包裹体,主要有辉钼矿/铜蓝(图 3a)、黄铁矿(图 3b)、石盐(图 3c)和尚不确定成分的不透明矿物(图 3c);金矿体则主要发育气液两相(图 3d, 3f)和含 CO<sub>2</sub> 三相包裹体(图 3e, 3f),局部可见二者共存。综上所述,最新的研究证据表明华北克拉通南缘小秦岭地区不存在晚三叠世的金矿床,但有少量脉状钼矿化,可能与晚三叠世碳酸岩岩浆活动作用有关。目前熊耳山大部分金矿床的

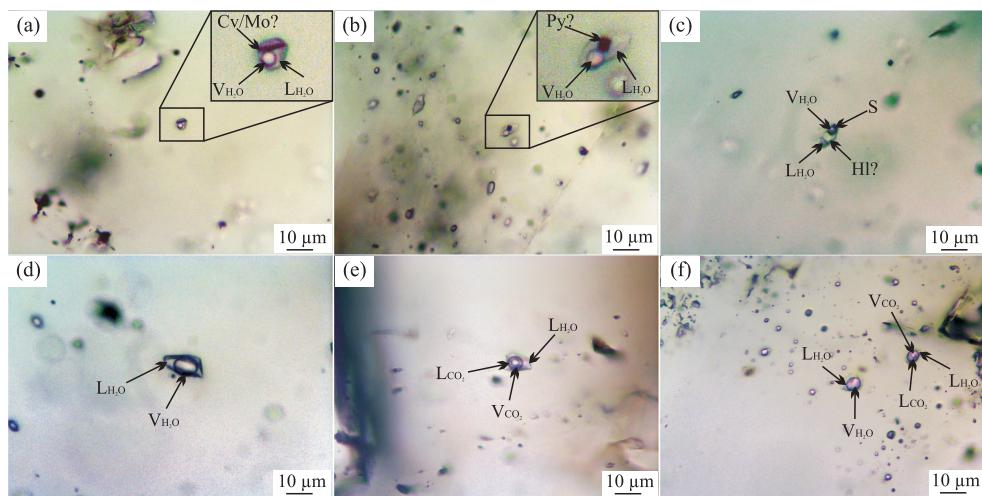


图3 红土岭钼床钼(a~c)、金(d~f)矿脉石英中流体包裹体对比

Fig.3 Comparison of fluid inclusions from the Mo (a–c) and Au (d–f) veins from the Hongtuling deposit

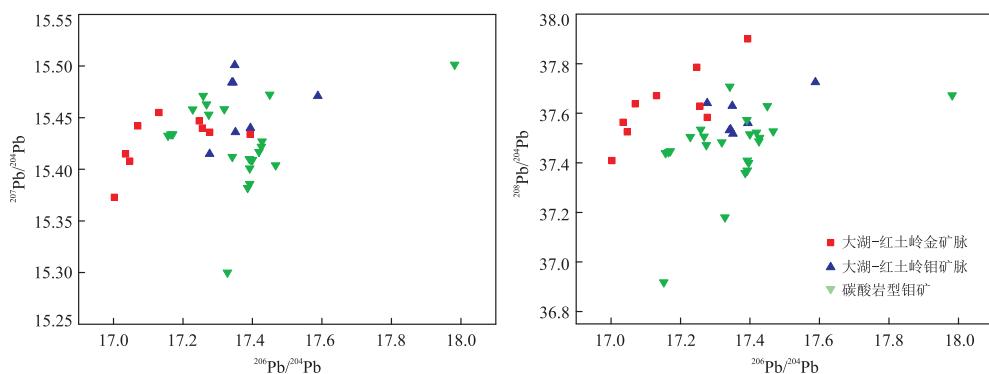


图4 华北克拉通南缘大湖、红土岭金—钼矿脉及小秦岭碳酸岩型钼矿 Pb 同位素组成对比

Fig.4 Comparison of Pb isotopes for the Dahu and Hongtuling lode Au-Mo deposits and the carbonatite related Mo deposits from the southern margin of the North China Craton

大湖和红土岭数据来自笔者未发表数据;碳酸岩型钼矿包括黄龙铺和黄水庵,数据引自黄典豪等(1984, 2009)

已知可靠年龄均集中在早白垩世,对于熊耳山地区是否存在少量的三叠系金矿化,目前仍没有可靠的年代学证据,需要开展进一步的研究工作。

### 3 钼矿床时空分布及矿床特征

#### 3.1 钼矿床时空分布

华北克拉通南缘及其紧邻的东秦岭一大别钼矿带探明钼资源量总计超过800万吨,已超过美国Climax-Henderson地区成为全球最大的钼成矿带(Mao et al., 2011; Gao et al., 2015; Yang et al., 2015; Chen et al., 2017)。主要的钼矿类型为斑岩型,另外有少量的矽卡岩型、石英脉型和碳酸岩脉型等,其中斑岩型钼矿约占区域总钼资源量的95%以上。斑岩型矿床中的成矿元素多由单一的钼组成,如

金堆城、鱼池岭和东沟等超大型钼矿(Li et al., 2014; Yang et al., 2015);也可与矽卡岩型矿床共生组成钼—钨或钼—铁组合,如南泥湖—三道庄的超大型钼—钨矿和上房沟的超大型钼—铁矿(Cao et al., 2015; Yang et al., 2017);石英脉型矿床多为单一的成矿元素钼以及少量与金矿脉共生的含钼石英脉,如嵩县的脉型钼矿床和小秦岭的大湖矿床和红土岭矿床(Jian et al., 2014);而碳酸岩脉型矿床的成矿元素为钼—铅组合,如黄龙铺和黄水庵钼—铅矿(黄典豪等, 1984, 2009)。

钼矿床主要分布在中晚元古代火山岩和碳酸盐岩地层区域(图2),包括熊耳群安山岩、官道口群白云岩和栾川群白云岩,少数钼矿床产出于大型花岗岩基内。辉钼矿Re-Os同位素年代学研究表明,华北克拉通南缘大多数钼矿床形成于156~132 Ma和

122~116 Ma 两个时期(黄典豪等, 1994; Stein *et al.*, 1997; 李永峰等, 2005; 叶会寿等, 2006; Mao *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2013). 除此之外, 区域上有少数小型钼矿床形成于三叠纪(如黄龙铺和黄水庵碳酸岩脉型钼矿; 黄典豪等, 1994; Stein *et al.*, 1997)、元古代(如寨凹石英脉型钼矿; Deng *et al.*, 2013a, 2013b).

前人对于区内花岗岩的主微量和同位素资料的研究发现, 大于 127 Ma 的花岗岩一般具有埃达克质花岗岩的地球化学特征, 可能形成于加厚下地壳的部分熔融(Li *et al.*, 2012b; Zhao *et al.*, 2012b; 高昕宇等, 2017); 而小于 127 Ma 的花岗岩主要为岩石圈强烈减薄环境下的产物, 并强调幔源或新生物质的加入(戴宝章等, 2009; 高昕宇等, 2017). 这两期岩浆活动事件分别对应了华北克拉通南缘两期斑岩型钼矿的形成事件(Mao *et al.*, 2010; 高昕宇等, 2017).

### 3.2 矿床地质特征及成矿流体

斑岩型钼矿是华北克拉通南缘最重要的钼矿床类型, 矿体主要产于斑岩体内部或斑岩与围岩的接触带上, 矿体形态受岩体顶部产状的控制. 部分斑岩钼矿的围岩为碳酸盐地层, 可在外接触带形成矽卡岩型矿体, 如南泥湖—三道庄钼(钨)矿床(向君峰等, 2012). 斑岩型钼矿床的矿石类型主要包括网脉状矿石和浸染状矿石. 两类矿石的矿物组成基本相同, 主要为辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿和方铅矿等. 斑岩型矿床的围岩蚀变主要为钾长石化、绿帘石化、绢云母化及硅化等.

钼矿床成矿流体在成矿早期都属于中高温度( $300\sim 500^{\circ}\text{C}$ )、中高盐度( $10\%\sim 40\%$  NaCl equiv)、富含  $\text{CO}_2$  的  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$  流体体系; 随着成矿作用的进行, 成矿温度和盐度逐渐降低, 成矿晚期流体演化为低温( $100\sim 250^{\circ}\text{C}$ )、低盐度( $<8\%$  NaCl equiv)、贫  $\text{CO}_2$  的  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  流体体系(李诺等, 2007, 2009; 杨艳等, 2009). 不同斑岩型钼矿床中成矿流体的氢—氧同位素组成总体上比较一致(武广等, 2013), 大部分样品位于初始岩浆水范围内, 以及初始岩浆水与大气降水线之间的区域, 表明成矿流体主要来自岩浆热液, 但成矿过程中有大气降水等外部流体的加入. 华北南缘钼矿床的硫同位素组成主要集中于  $0\sim 3\text{\textperthousand}$ (黄典豪等, 1994; 李永峰等, 2005), 显示为低的正值, 具有深源硫的特点.

## 4 银铅锌矿床时空分布及矿床特征

### 4.1 银铅锌矿床时空分布

华北克拉通南缘银铅锌矿床主要集中于熊耳山、外方山和栾川等地区的太华群、熊耳群以及栾川群中(燕长海和刘国印, 2004; 毛景文等, 2006, 2009; 叶会寿等, 2006; 李占轲, 2013). 这些银铅锌矿床依据产状主要可分为两类: 一类围绕中生代斑岩体产出, 呈层状、透镜状、脉状等产出于斑岩体的围岩中, 比如栾川地区南泥湖矿田内的骆驼山(叶会寿等, 2006)和冷水北沟矿床(燕长海和刘国印, 2004; Wang *et al.*, 2013); 另一类银铅锌矿床与斑岩体无明显的空间联系, 主要受断裂构造控制, 矿体呈脉状赋存于太华群变质岩的断裂带内, 独立成矿或与脉状金矿床伴(共)生, 如熊耳山地区下峪矿田的沙沟矿床(毛景文等, 2006; Li *et al.*, 2013)和蒿坪沟矿床(叶会寿等, 2006).

铅锌矿矿石矿物 Rb-Sr 定年、与矿体密切相关的热液蚀变矿物及矿物内流体包裹体 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年等数据表明, 两类银铅锌矿床均主要形成于  $147\sim 115\text{ Ma}$ (毛景文等, 2006, 2009; 叶会寿等, 2006; Li *et al.*, 2013). 其中, 熊耳山地区沙沟、蒿坪沟、铁炉坪等银铅锌矿床形成于  $135.3\pm 2.4\text{ Ma}$  至  $147.0\pm 1.5\text{ Ma}$ , 栾川地区骆驼山、赤土店、冷水北沟等银铅锌矿床形成于  $137.3\pm 5.4\text{ Ma}$  至  $139.6\pm 2.6\text{ Ma}$ (燕长海和刘国印, 2004; 杨晨英等, 2016; Cao *et al.*, 2015), 而外方山地区老代仗沟、三元沟等银铅锌矿床相对年轻, 形成于  $124.7\pm 1.2\text{ Ma}$  至  $115.9\pm 0.9\text{ Ma}$ (叶会寿等, 2006; 李占轲, 2013; Li *et al.*, 2017).

### 4.2 银铅锌矿床地质特征及成矿流体

上文已述, 华北克拉通南缘银铅锌矿床大体可分为产于斑岩型钼矿床外围和产于古老变质岩断裂带内两类, 这两类银铅锌矿床的主要地质和成矿流体特征可以用南泥湖矿田和下峪矿田为代表来分别阐述.

南泥湖矿田位于栾川矿集区内, 围绕南泥湖和上房沟两个斑岩体, 从内向外依次发育有南泥湖和上房沟斑岩型—矽卡岩型钼(钨)矿床、骆驼山矽卡岩型硫铁铅锌矿床、石窖沟和冷水北沟热液脉型银铅锌矿床(图 5). 骆驼山矿床位于南泥湖矿床外围西侧, 矿区地层主要是一套中浅变质的大理岩地层. 矿体主要呈层状或者透镜状产出于层间断裂带的矽卡岩内, 矿化与矽卡岩化密切相关. 冷水北沟矿床位于南泥湖矿田西北角, 热液银铅锌脉主要产于栾川群

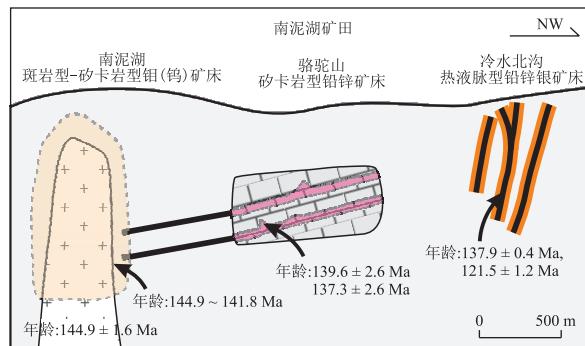


图5 南泥湖矿田斑岩型—矽卡岩型钼(钨)矿—矽卡岩型硫铁铅锌矿—热液脉型银铅锌矿成矿系列示意

Fig.5 A sketch showing a metallogenetic system for the porphyry-skarn Mo-(W), skarn Pb-Zn, and lode Pb-Zn-Ag deposits in the Nannihu orefield

图改自李占轲(2013); 年龄数据引自李永峰等(2005)、叶会寿等(2006)、向君峰等(2012)、李占轲(2013)、杨晨英等(2016)

南泥湖组云母石英片岩和大理岩中,矿体呈脉状、透镜状赋存于NNE向断裂带的断裂内。矿脉两侧围岩蚀变非常发育,蚀变类型包括硅化、绢云母化、碳酸盐化以及绿泥石化,其中硅化和绢云母化与矿化关系最为密切,蚀变强度与矿化规模成正比。

南泥湖矿田不同类型铅锌矿床的定年结果主要集中在137~139 Ma(燕长海和刘国印,2004; 李占轲,2013; 杨晨英等,2016),表明不同类型的矿床可能是同一期成矿事件的产物。主成矿阶段硫化物的硫同位素分析结果显示南泥湖钼矿(0.93‰~2.86‰),骆驼山硫铁铅锌矿床(0.24‰~6.46‰)和冷水北沟银铅锌矿床(0.70‰~8.07‰)的硫同位素组成自斑岩体向外呈现塔式分布的特点,具有向围岩硫同位素组成靠近的趋势(周作侠等,1993),指示成矿热液内的硫主要来自岩浆热液,远离斑岩体的位置则逐渐有地层硫参与成矿。前人通过石英H-O同位素组成的统计分析也发现(周作侠等,1993; 燕长海和刘国印,2004)从斑岩体、钼矿床到银铅锌矿脉,H-O同位素组成具有从岩浆水逐渐向大气水靠近的趋势(李占轲,2013)。这一现象进一步说明银铅锌的成矿流体与钼矿床一样,主要来自形成斑岩体的岩浆热液,但远离斑岩体的断裂体系中有大气水的加入。基于以上分析,笔者认为南泥湖矿田以斑岩体岩浆—热液活动为主导,由中心向外依次发育斑岩型钼(钨)矿床、矽卡岩型硫铁铅锌矿床和热液脉型银铅锌矿床,3个矿床类型构成了典型的岩浆—热液成矿系列,银铅锌矿床是斑岩岩浆活动的远端产物(图5)。

熊耳山地区下峪矿田是第二类热液脉型银铅锌矿床的主要聚集区,自西向东发育有沙沟、蒿坪沟、东草沟和铁炉坪等矿床。矿体主要赋存于新太古代—古元古代太华群变质岩中,大部分银铅锌矿脉主要沿着NNE向断裂构造带产出。矿田内岩浆活动并不发育,仅在矿田北部有蒿坪沟花岗斑岩体出露,但花岗斑岩体内部及接触带均未见有规模的矿化,表明该斑岩体可能并不是成矿岩体。下峪矿田热液碳酸盐矿物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为-5.82‰~-1.39‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为9.62‰~17.61‰,指示成矿流体比岩浆热液更富 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ ,可能以变质流体为主,或者是变质流体和岩浆流体的混合(李占轲,2013)。位于马超营断裂南侧的中元古代—晚元古代海相碳酸盐和碎屑岩在华北克拉通和扬子克拉通碰撞过程中向北俯冲至熊耳山地体之下(陈衍景等,2003),它们可能在晚中生代时期因地壳大规模岩浆活动而发生变质脱挥发分,为下峪矿田的银铅锌成矿作用提供流体来源(陈衍景等,2003)。上述中元古代—晚元古代海相碳酸盐和碎屑岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为-2.8‰~0.8‰和9.1‰~16.7‰(祁进平等,2005),略高于沙沟和蒿坪沟矿床成矿流体的C-O同位素组成,进一步暗示这些矿床的成矿流体与区域上广泛分布的元古代海相沉积岩的变质脱挥发分有关。

## 5 讨论

### 5.1 华北克拉通南缘早白垩世岩浆—热液成矿系统

以上分析表明,华北克拉通南缘的3类主要矿床:金矿床、斑岩钼矿床和银铅锌矿床,均主要形成于早白垩世(图6)。在一个较短时期内,形成一系列大型—超大型矿床,需要巨量的成矿物质和持续的热源及流体的供给,与特殊的重大地质事件有关。前人对世界主要金矿床或金矿集区的研究发现,大规模成矿作用受岩石圈尺度因素的控制(Groves *et al.*, 2005; Bierlein *et al.*, 2006),其中最根本的是由软流圈地幔上涌主导的陆下岩石圈减薄和伸展,上涌的软流圈导致地幔岩石圈和地壳的广泛熔融,持续驱动地壳流体大范围地流动和循环,将成矿物质输送到地壳层次和热液体系中参与成矿。这一过程往往形成由多种矿床类型组成、不同矿床类型间又相互联系的成矿系统。华北克拉通南缘3类主要矿床的成矿流体研究均显示有岩浆热液或地幔物质组分加入,鉴于三者紧密的时间和空间联系,因此它

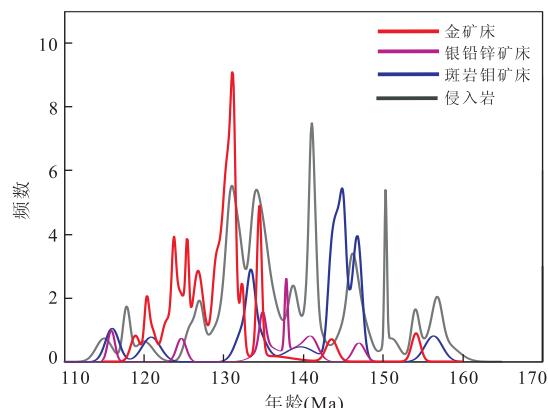


图 6 华北克拉通南缘侏罗纪—白垩纪岩浆岩及典型类型矿床年龄统计结果

Fig.6 Histogram for the Jurassic-Cretaceous intrusions and major deposit types for the southern margin of North China Craton

数据主要引自 Li *et al.* (2012a)、李占轲 (2013)、唐克菲 (2014)

们很可能形成于一个巨型的区域岩浆—热液的成矿体系。

在这 3 类矿床中, 斑岩型钼矿床和外围似层状—脉状银铅锌矿床的成因联系已比较明确。世界上斑岩型铜—钼矿床的外围通常发育有贱金属矿床, 从斑岩体向外可呈现铜—钼、锌—铅、银—金的元素分带 (Sillitoe, 2010; Catchpole *et al.*, 2015)。在斑岩矿田内发育的斑岩型、矽卡岩型、热液脉型、浅成低温型矿床共同构成与斑岩岩浆活动有关的成矿系列 (Sillitoe, 2010)。华北克拉通南缘的第一类银铅锌矿床就产在斑岩钼矿田内, 并同时发育有矽卡岩型铅锌矿床和热液脉型银铅锌矿床, 这些铅锌

(银)矿床与斑岩钼矿床具有相同的成矿时代、相似的成矿流体和物质来源, 共同构成了典型的斑岩岩浆—热液成矿系列 (如南泥湖矿田)。另一类银铅锌矿床虽然与斑岩岩浆活动的空间关系不太明确, 但矿体主要产于太华群变质地体内的断裂带中, 如下峪矿田。地球物理资料显示下峪矿田深部存在隐伏花岗质岩体, 其中心位于沙沟矿区南部 2 km 处的寨凹地区 (张天义和朱嘉伟, 1996), 岩体冷凝过程中分异出的热液可能是下峪矿田银铅锌矿床成矿流体的来源之一。同时 C-O 和 Pb 同位素特征指示下峪矿田银铅锌矿脉的成矿流体可能是由变质流体与岩浆流体混合而成 (李占轲, 2013)。因此, 该类银铅锌矿床可能与同期深部岩浆活动有密切关系。晚中生代区域大规模岩浆活动在向上侵位的过程中使俯冲到熊耳地体之下的官道口群和栾川群海相地层发生变质脱水作用而产生大量流体及成矿物质。深部岩浆冷凝过程中释放的岩浆流体可能部分加入到上述变质流体中, 变质流体或混合流体沿深大断裂及次级断裂带向上运移, 最终在熊耳山核部太华群变质岩内 NNE 向断裂带内沉淀成矿 (Li *et al.*, 2013) 形成第二类银铅锌矿床。因此, 尽管变质地体内的脉状银铅锌矿床并不直接受斑岩岩浆活动的控制, 但其流体来源受同期区域内大规模岩浆活动的影响, 属于早白垩世大的岩浆—热液成矿体系的产物。

早白垩世金矿床与斑岩型钼矿和脉状银铅锌矿床的关系是下一步需要研究的问题。Pb 同位素的统计结果显示 (图 7), 金矿床相对于斑岩钼矿和脉状银铅锌矿床的分布范围有所不同, 表明金矿床与钼矿床和银铅锌矿床成矿流体的来源有所差异, 或者

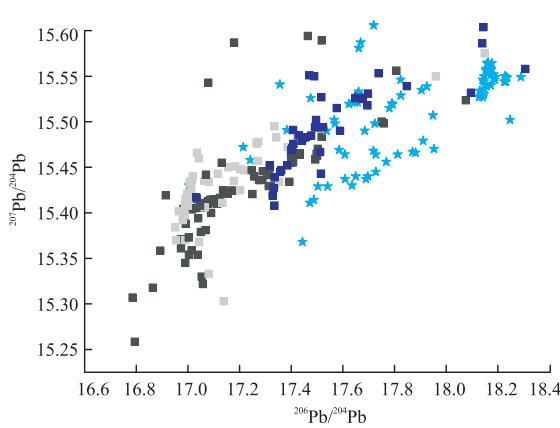
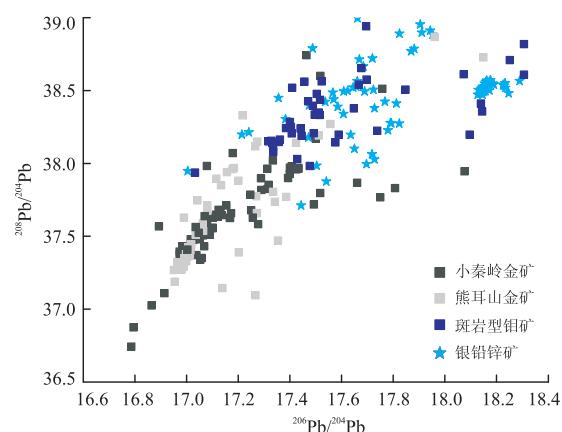


图 7 华北克拉通南缘晚中生代金矿床、钼矿床和银铅锌矿床 Pb 同位素组成对比

Fig.7 Pb isotope for Au, Mo, and Pb-Zn-Ag deposits at the southern margin of the North China Craton

铅同位素数据主要来源: 小秦岭金矿床据聂凤军等 (2001)、赵海香 (2011); 熊耳山金矿床据王炯辉等 (2016)、张苏坤等 (2016); 斑岩型钼矿床据焦建刚等 (2010)、李洪英等 (2011)、Li *et al.* (2017); 银铅锌矿床据陈衍景等 (2003)、Li *et al.* (2013, 2016)



成矿热液经历了不同的演化作用。需要指出的是,华北克拉通南缘金矿床中常发育大量碲金矿、碲金银矿、碲铋矿和碲铅矿等碲化物矿以及自然碲和自然铋等(Bi *et al.*, 2011; Jian *et al.*, 2014)。国内外目前所报道的富含碲化物的矿床均与岩浆作用有密不可分的成因联系,如浅成低温热液型金矿床、火山成因块状硫化物矿床、矽卡岩型铜金矿床、斑岩型金矿床、岩浆铜镍硫化物矿床、与碱性岩有关的一些脉状金矿床等(Ciobanu *et al.*, 2002; Pals *et al.*, 2003; Törmänen and Koski, 2005; Cook *et al.*, 2009)。而华北南缘金矿床的产出往往伴随着花岗质岩浆和中—基性脉岩的侵位,表现出与岩浆作用的密切关系。尽管这些金矿体不完全产出于区内出露的大花岗岩基中,但一般位于岩体周围的2~5 km范围。同时在熊耳山地区,还存在与花岗斑岩有关的隐爆角砾岩型金矿床(祁雨沟金矿,唐克非,2014),为金矿与花岗质岩浆作用的联系提供了直接的证据。而与金矿脉的形成具有密切时空联系的中—基性脉岩常常与矿脉共用同一套构造体系,这些脉岩与金矿脉存在相互穿插的关系,表明二者成矿时代一致,暗示基性岩浆活动与大规模金成矿作用紧密相关。并且Li *et al.*(2012a)对金矿床同位素和稀有气体的研究表明,成矿流体往往显示有强烈的岩浆热液或地幔流体信息,但成矿流体是岩浆热液与大气降水等外部流体混合所形成,表明成矿流体经历了漫长的运移和与围岩反应的历史(图8)。

综上所述,华北克拉通南缘的3类主要矿床,尽管在矿床类型和成矿流体与成矿物质来源上可能有所差异,但均与早白垩世区域上大规模的岩浆活动具有密切的成因联系,岩浆活动及岩浆热液驱动的地壳流体活动形成了多种不同类型的矿床组合。基于此笔者建立了华北南缘早白垩世金矿床、斑岩型钼矿床、银铅锌矿床的综合岩浆—构造成矿模式(图8)。华北克拉通南缘3类矿床的成矿流体研究均显示有岩浆热液或地幔物质组分加入,鉴于三者紧密的时间和空间联系,它们很可能形成于一个克拉通破坏背景下巨型区域岩浆—热液的成矿体系。

## 5.2 华北克拉通南缘成矿系统与其南缘地块早白垩世成矿作用的可能联系

华北克拉通南缘地理空间上紧邻东秦岭—桐柏一大别造山带,近年来的研究表明东秦岭—桐柏一大别造山带也发育了巨量的燕山期岩浆作用及其相关的成矿作用,岩浆岩时间集中于110~145 Ma,峰期在130 Ma左右(Wu *et al.*, 2005; 朱江等,2018)。从该区埃达克岩的研究情况来看,造山带岩石圈减薄作用的时间应开始于135 Ma左右,这一时间和岩浆岩的性质与华北克拉通南缘完全一致。同时该带发育了一系列与华北克拉通南缘特征一致的矿床类型(如沙坪沟斑岩钼矿、汤家坪钼矿、老湾金矿、破山银矿等,图9)(陈红瑾等,2013; 杨梅珍等,2014)。这些矿床的形成均与早白垩世的岩浆作用有密切的成因联系。该带的斑岩钼矿已和

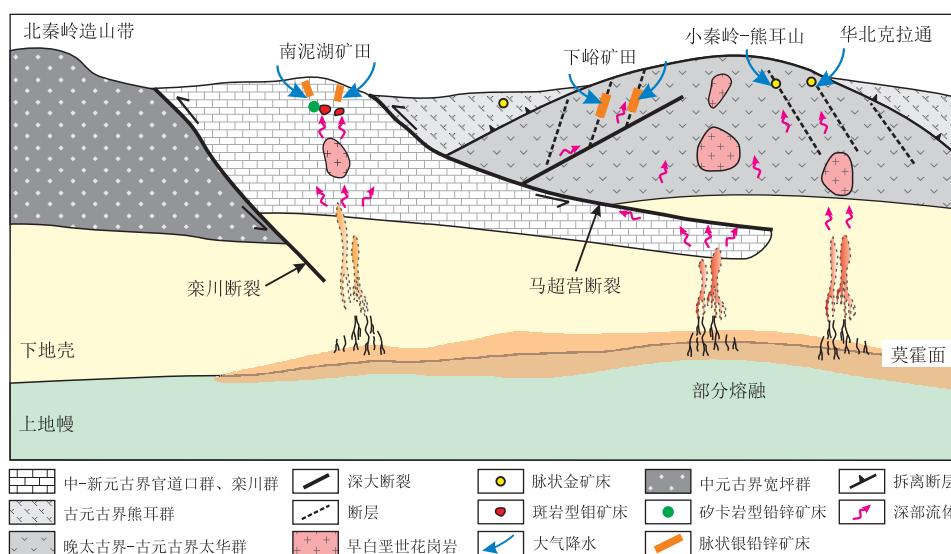


图8 华北克拉通南缘早白垩世成矿模式示意图及不同矿床类型间的成因联系

Fig.8 A sketch showing the possible genetic links between the Early Cretaceous deposit types in the southern margin of the North China Craton

修改自李占轲(2013)

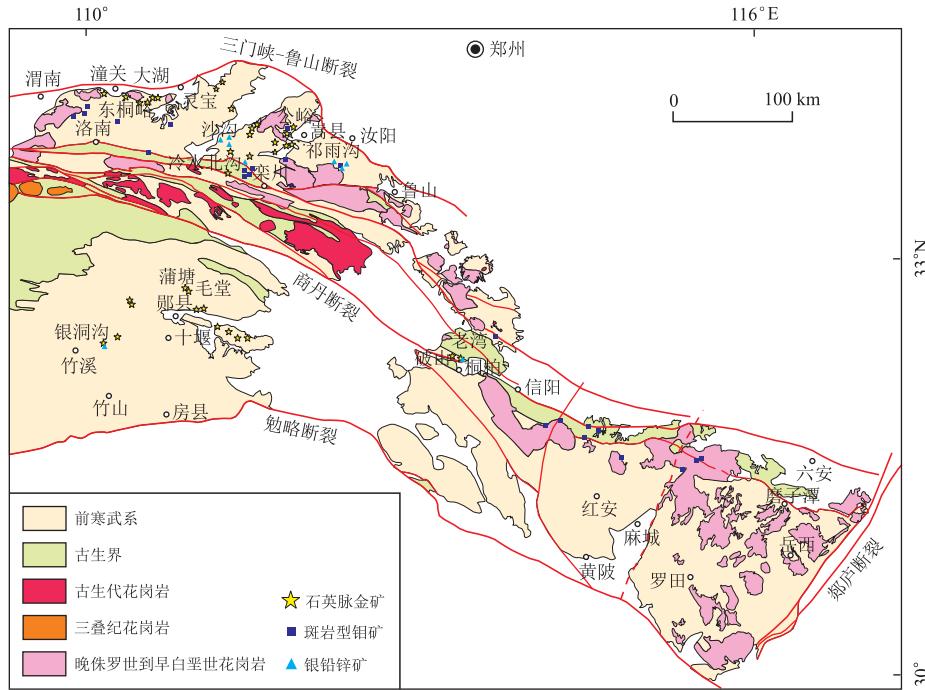


图 9 华北克拉通南缘及东秦岭—桐柏一大别岩浆岩分布及早白垩世斑岩钼矿床、脉状金矿床和银铅锌矿床分布图

Fig.9 A simplified map showing the Early Cretaceous intrusions and porphyry Cu, lode Au and Au-Pb-Zn deposits in both southern margin of the North China Craton and eastern Qinling-Dabie orogen

底图据高昕宇等(2017)

华北克拉通南缘的斑岩钼矿一起,组成了全球最大的斑岩型钼矿带。同时近年来的研究表明武当—桐柏地区多个中—大型石英脉型金矿也形成于早白垩世( $123\sim135$  Ma),如东秦岭地区的毛塘—蒲塘隐爆角砾岩型金矿(未发表数据),桐柏山北坡老湾石英脉型金矿(杨梅珍等,2014)、破山银铅锌矿和南坡的卸甲沟—黑龙潭金矿。这些矿床从矿床特征和成矿时代上均与华北克拉通南缘的金矿床和脉状银铅锌矿床高度相似,其矿床成因和成矿机理应具有一致性。

以上分析表明,华北克拉通南缘及其邻区东秦岭—桐柏一大别造山带的主要成矿作用均形成于早白垩世且矿床类型相似。考虑到华北克拉通与扬子板块早在三叠纪就发生碰撞拼合到一起,在早白垩世时这两个板块及夹持的造山带应具有统一的地球动力学背景。因此,将华北克拉通早白垩世岩浆活动和成矿作用与周边地块的成矿作用作为一个整体的地质事件来综合考虑,可能是下一步认识区域成矿作用机制和矿床成因的关键一步。

### 5.3 早白垩世大规模成矿作用的动力学背景

现有的地球化学和地质年代学研究资料表明,华北克拉通在晚中生代发生了强烈的破坏作用,在早白垩世( $130\sim120$  Ma)达到高峰(Wu et al.,

2005;朱日祥等,2011)。华北克拉通破坏必然伴随强烈的岩石圈伸展和壳幔相互作用,进而诱发巨量岩浆活动及大规模成矿作用(Li et al., 2012b; 朱日祥等,2015)。早白垩世北东向断陷盆地、变质核杂岩、双峰式岩浆岩的发育,指示了强烈的伸展构造背景,与华北克拉通南缘大规模岩浆活动和成矿作用的时间及构造背景一致。

从晚侏罗世至早白垩世,华北克拉通南缘花岗岩基和斑岩体的岩石类型呈现由 I 型、I-A 型向 A 型过渡的趋势(毛景文等,2009; Wang et al., 2013),指示成岩成矿环境由挤压背景逐渐向伸展背景转化。斑岩型矿床中的钼通常具有地壳来源的特点(Klemm et al., 2008)。最近研究表明,经历了元古代金属元素再富集的陆下岩石圈地幔在新生代发生部分熔融,也可形成斑岩型钼(铜)矿床(Pettke et al., 2010)。华北南缘钼矿斑岩体全岩 Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素数据显示,形成斑岩体的岩浆可能主要来源于华北南缘太华群结晶基底的部分熔融。太华群 Mo 元素丰度为  $1.00\times10^{-6}\sim6.97\times10^{-6}$ (胡志宏等,1986),高于全球地壳 Mo 平均丰度( $1.0\times10^{-6}$ ; Taylor 和 McLennan, 1995),能够为区域大规模钼矿化提供所需的物质来源。晚中生代华北克拉通破坏过程中热的软流圈逐渐向上底侵所诱

发的岩石圈部分熔融和玄武质岩浆底侵可能是造成古老下地壳发生熔融的诱因。在这一过程中幔源组分也可参与到成岩与成矿过程中,如华北南缘部分斑岩体 Nd 同位素模式年龄和锆石 Hf 同位素模式年龄比太华群的年龄要小,可能是富集地幔组分加入而造成的(戴宝章等,2009;李洪英等,2011;Yang et al., 2017)。

考虑到早白垩世华北克拉通南缘,东秦岭—桐柏一大别造山带,太行山地区,乃至整个中国东部的岩浆活动的时代和地球化学性质都高度一致,笔者认为它们很可能受控于一个更大的构造域的统一控制。大量地质和地球物理研究已表明,由古西太平洋板块(Izanagi 板块)俯冲引发的软流圈地幔非稳态流动是导致华北克拉通东部岩石圈地幔发生整体破坏的主要驱动力(朱日祥等,2011)。因此,早白垩世岩石圈伸展及其导致的岩浆作用最可能与晚中生代古太平洋板块向东亚大陆边缘俯冲有关。造山带发生岩石圈减薄、构造伸展,软流圈地幔上涌导致玄武岩浆底侵,并形成富水的岩石圈地幔,同时促使中下地壳熔融形成岩浆。上涌的岩浆热液在合适的构造体制下,与上地壳的岩石和流体发生交代和流体混合,形成大规模的岩浆—热液成矿系统。这一岩浆—构造体制的形成很可能与晚中生代古太平洋板块长期俯冲形成的大地幔楔以及俯冲板片的转向或后撤作用有关(Li et al., 2012a; 朱日祥等,2015; 夏群科等,2017)。

## 6 结论

(1) 华北克拉通南缘中生代脉状金矿床(石英脉型、构造蚀变岩型)、斑岩型钼矿床、脉状银铅锌矿床均主要形成于早白垩世,且与区域上广泛发育的岩浆活动具有紧密的成因联系,组成了一个巨型的岩浆—热液成矿系统。

(2) 华北克拉通南缘晚中生成矿作用与邻区的东秦岭—桐柏一大别成矿带的成矿作用具有统一的动力学背景,均是中国东部早白垩世大规模伸展作用的产物。

(3) 中生代大规模岩浆活动与成矿作用可能受晚中生代古太平洋板块向东亚大陆边缘形成的大地幔楔以及俯冲板片的转向或回撤作用这一地球动力学背景控制。

致谢:感谢小秦岭及熊耳山地区矿山地质人员对野外工作的大力支持和帮助;感谢两位匿名审稿人的建议!

## References

- Bierlein, F.P., Groves, D.I., Goldfarb, R.J., et al., 2006. Lithospheric Controls on the Formation of Provinces Hosting Giant Orogenic Gold Deposits. *Mineralium Deposita*, 40(8): 874—886. <https://doi.org/10.1007/s00126-005-0046-2>
- Bi, S.J., 2011. The Mesozoic Large-Scale Mineralization in the Xiaoqinling Gold District: A Relationship with the Destruction of the North China Craton (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 15—74 (in Chinese with English abstract).
- Bi, S.J., Li, J.W., Zhou, M.F., et al., 2011. Gold Distribution in As-Deficient Pyrite and Telluride Mineralogy of the Yangzhaiyu Gold Deposit, Xiaoqinling District, Southern North China Craton. *Mineralium Deposita*, 46 (8): 925—941. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0359-2>
- Cao, H.W., Zhang, S.T., Santosh, M., et al., 2015. The Luan-chuan Mo-W-Pb-Zn-Ag Magmatic-Hydrothermal System in the East Qinling Metallogenic Belt, China: Constraints on Metallogenesis from C-H-O-S-Pb Isotope Compositions and Rb-Sr Isochron Ages. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 751—780. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2015.06.005>
- Catchpole, H., Kouzmanov, K., Pirlitz, B., et al., 2015. Zoned Base Metal Mineralization in a Porphyry System: Origin and Evolution of Mineralizing Fluids in the Morococha District, Peru. *Economic Geology*, 110 (1): 39—71. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.1.39>
- Chen, H.J., Chen, Y.J., Zhang, J., et al., 2013. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotope Characteristics of the Ore-bearing Intrusion from the Shapinggou Molybdenum Deposit, Jinzhai County, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 131—145 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y.J., Pirajno, F., Li, N., et al., 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 (2): 245—261. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.11.003>
- Chen, Y.J., Pirajno, F., Sui, Y.H., 2004. Isotope Geochemistry of the Tieluping Silver-Lead Deposit, Henan, China: A Case Study of Orogenic Silver-Dominated Deposits and Related Tectonic Setting. *Mineralium Deposita*, 39 (5—6): 560—575. <https://doi.org/10.1007/s00126-004-0429-9>
- Chen, Y.J., Sui, Y.H., 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 (3): 551—568 (in Chinese with English abstract).

- Chen, Y.J., Wang, P., Li, N., et al., 2017. The Collision-Type Porphyry Mo Deposits in Dabie Shan, China. *Ore Geology Reviews*, 81: 405 – 430. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.03.025>
- Ciobanu, C.L., Cook, N.J., Stein, H., 2002. Regional Setting and Geochronology of the Late Cretaceous Banatitic Magmatic and Metallogenetic Belt. *Mineralium Deposita*, 37 (6/7): 541 – 567. <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0272-9>
- Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Mao, J.W., 2009. Textural Control on Gold Distribution in As-Free Pyrite from the Dongping, Huangtuliang and Hougou Gold Deposits, North China Craton (Hebei Province, China). *Chemical Geology*, 264(1–4): 101 – 121. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.02.020>
- Dai, B.Z., Jiang, S.Y., Wang, X.L., et al., 2009. Petrogenesis of the Granitic Porphyry Related to the Giant Molybdenum Deposit in Donggou, Henan Province, China: Constraints from Petrogeochemistry, Zircon U-Pb Chronology and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (11): 2889 – 2901 (in Chinese with English abstract).
- Deng, X.H., Chen, Y.J., Santosh, M., et al., 2013a. Genesis of the 1.76 Ga Zhaiwa Mo-Cu and Its Link with the Xiong'er Volcanics in the North China Craton: Implications for Accretionary Growth along the Margin of the Columbia Supercontinent. *Precambrian Research*, 227: 337 – 348. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.02.014>
- Deng, X.D., Li, J.W., Zhao, X.F., et al., 2013b. U-Pb Isotope and Trace Element Analysis of Columbite-(Mn) and Zircon by Laser Ablation ICP-MS: Implications for Geochronology of Pegmatite and Associated Ore Deposits. *Chemical Geology*, 344: 1 – 11. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.02.014>
- Fan, H.R., Hu, F.F., Wilde, S.A., et al., 2011. The Qiyugou Gold-Bearing Breccia Pipes, Xiong'ershan Region, Central China: Fluid-Inclusion and Stable-Isotope Evidence for an Origin from Magmatic Fluids. *International Geology Review*, 53(1): 25 – 45. <https://doi.org/10.1080/00206810902875370>
- Fan, H.R., Xie, Y.H., Zhai, M.G., et al., 2003. A Three Stage Fluid Flow Model for Xiaoqinling Lode Gold Metallogenesis in the Henan and Shaanxi Provinces, Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 19 (2): 260 – 266 (in Chinese with English abstract).
- Gao, X.Y., Zhao, T.P., Yuan, Z.L., et al., 2017. Geochemistry and Petrogenesis of the Heyu Batholith in the Southern Margin of the North China Block. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (12): 3485 – 3506 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y., Mao, J.W., Ye, H.S., et al., 2015. A Review of the Geological Characteristics and Geodynamic Setting of the Late Early Cretaceous Molybdenum Deposits in the East Qinling-Dabie Molybdenum Belt, East China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 108: 81 – 96. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2015.04.025>
- Groves, D.I., Vielreicher, R.M., Goldfarb, R.J., et al., 2005. Controls on the Heterogeneous Distribution of Mineral Deposits through Time. *Geological Society, London, Special Publications*, 248 (1): 71 – 101. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2005.248.01.04>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11434-007-0248-3>
- 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).
- Hu, Z.H., Hu, S.X., Zhou, S.Z., et al., 1986. The Geochemical Background of Gold in Taihua Group and the Sources of Ore-Forming Materials of Gold Deposits in Xiaoqinling Area, Western Part of Henan Province, China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 16 (2): 63 – 73 (in Chinese with English abstract).
- Huang, D.H., Hou, Z.Q., Yang, Z.M., et al., 2009. Geological and Geochemical Characteristics, Metallogenetic Mechanism and Tectonic Setting of Carbonatite Vein-Type Mo (Pb) Deposits in the East Qinling Molybdenum Ore Belt. *Acta Geologica Sinica*, 83 (12): 1968 – 1984 (in Chinese with English abstract).
- Huang, D.H., Wang, Y.C., Nie, F.J., et al., 1984. Isotopic Composition of Sulfur, Carbon and Oxygen and Source Material of the Huanglongpu Carbonatite Vein-Type of Molybdenum (Lead) Deposits. *Acta Geological Sinica*, 58(3): 252 – 264 (in Chinese with English abstract).
- Huang, D.H., Wu, C.Y., Du, A.D., et al., 1994. Re-Os Isotope Ages of Molybdenum Deposits in East Qinling and Their Significance. *Mineral Deposits*, 13 (3): 221 – 230 (in Chinese with English abstract).
- Jian, W., Lehmann, B., Mao, J., et al., 2014. Mineralogy, Fluid Characteristics, and Re-Os Age of the Late Triassic Dahu Au-Mo Deposit, Xiaoqinling Region, Central China: Evidence for a Magmatic-Hydrothermal Origin. *Economic Geology*, 110 (1): 119 – 145. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.1.119>
- 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 (11): 2727—2738 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, J. G., Tang, Z. L., Qian, Z. Z., et al., 2010. Metallogenetic Mechanism, Magma Source and Zircon U-Pb Age of Jinduicheng Granitic Porphyry, East Qinling. *Earth Science*, 35(6): 1011—1022 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2010.114>
- Klemm, L.M., Pettke, T., Heinrich, C.A., 2008. Fluid and Source Magma Evolution of the Questa Porphyry Mo Deposit, New Mexico, USA. *Mineralium Deposita*, 43(5): 533—552. <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0181-7>
- 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, H. Y., Mao, J. W., Wang, X. X., et al., 2011. Sr, Nd, Pb Isotopic Characteristics of Granite in Jinduicheng Area and Their Geological Significance. *Geology in China*, 38(6): 1536—1550 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Y., Ye, H. S., Wang, X. X., et al., 2014. Geology and Ore Fluid Geochemistry of the Jinduicheng Porphyry Molybdenum Deposit, East Qinling, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 641—654. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2013.07.032>
- Li, J. W., Bi, S. J., Selby, D., et al., 2012a. Giant Mesozoic Gold Provinces Related to the Destruction of the North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 349—350: 26—37. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.06.058>
- Li, J. W., Li, Z. K., Zhou, M. F., et al., 2012b. The Early Cretaceous Yangzhaiyu Lode Gold Deposit, North China Craton: A Link between Craton Reactivation and Gold Veining. *Economic Geology*, 107(1): 43—79. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.1.43>
- Li, N., Chen, Y. J., Fletcher, I. R., et al., 2011. Triassic Mineralization with Cretaceous Overprint in the Dahu Au-Mo Deposit, Xiaoqinling Gold Province: Constraints from SHRIMP Monazite U-Th-Pb Geochronology. *Gondwana Research*, 20(2/3): 543—552. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.12.013>
- Li, N., Chen, Y. J., Sun, Y. L., et al., 2009. Molybdenite Re-Os Isochron Age of the Yuchiling Porphyry Mo Deposit, Henan Province and Its Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 413—421 (in Chinese with English abstract).
- Li, N., Chen, Y. J., Zhang, H., et al., 2007. Molybdenum Deposits in East Qinling. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 186—198 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. F., Mao, J. W., Hu, H. B., et al., 2005. The Fluid Inclusions and Their He-Ar-S-H-O Isotopic Compositions and Tracing to the Source of Ore-Forming Fluids for the Gongyu Gold Deposit, Western Henan. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1347—1358 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. K., 2013. Metallogenesis of the Silver-Lead-Zinc Deposits along the Southern Margin of the North China Craton (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. K., Bi, S. J., Li, J. W., et al., 2017. Distal Pb-Zn-Ag Veins Associated with the World-Class Donggou Porphyry Mo Deposit, Southern North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 82: 232—251. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.12.001>
- Li, Z. K., Li, J. W., Cooke, D. R., et al., 2016. Textures, Trace Elements, and Pb Isotopes of Sulfides from the Haopinggou Vein Deposit, Southern North China Craton: Implications for Discrete Au and Ag-Pb-Zn Mineralization. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171(12): 99. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1309-x>
- Li, Z. K., Li, J. W., Zhao, X. F., et al., 2013. Crustal-Extension Ag-Pb-Zn Veins in the Xiong'ershan District, Southern North China Craton: Constraints from the Shagou Deposit. *Economic Geology*, 108(7): 1703—1729. <https://doi.org/10.2113/econgeo.108.7.1703>
- Mao, J. W., Goldfarb, R., Zhang, Z. W., et al., 2002. Gold Deposits in the Xiaoqinling-Xiongershan Region, Qinling Mountains, Central China. *Mineralium Deposita*, 37(3—4): 306—325. <https://doi.org/10.1007/s00126-001-0248-1>
- Mao, J. W., Pirajno, F., Xiang, J. F., et al., 2011. Mesozoic Molybdenum Deposits in the East Qinling-Dabie Orogenic Belt: Characteristics and Tectonic Settings. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 264—293. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.07.009>
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Bierlein, F., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.06.027>
- 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. <https://doi.org/10.1080/08120090903416203>
- Mao, J. W., Ye, H. S., Wang, R. T., et al., 2009. Mineral Deposit Model of Mesozoic Porphyry Mo and Vein-Type Pb-Zn-Ag

- Ore Deposits in the Eastern Qinling, Central China and Its Implication for Prospecting. *Geological Bulletin of China*, 28 (1): 72—79 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J.W., Zheng, R.F., Ye, H.S., et al., 2006.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating of Fuchsite and Sericite from Altered Rocks Close to Ore Veins in Shagou Large-Size Ag-Pb-Zn Deposit of Xiong'ershan Area, Western Henan Province, and Its Significance. *Mineral Deposits*, 25 (4): 359—368 (in Chinese with English abstract).
- Nie, F.J., Jiang, S.H., Zhao, M.Y., et al., 2001. Lead and Sulfur Isotopic Studies of the Wenyu and the Dongchuang Quartz Vein Type Gold Deposits in Xiaoqinling Area, Henan and Shaanxi Provinces, Central China. *Mineral Deposits*, 20(2): 163—173 (in Chinese with English abstract).
- Pals, D.W., Spry, P.G., Chrysoulis, S., 2003. Invisible Gold and Tellurium in Arsenic-Rich Pyrite from The Emperor Gold Deposit, Fiji: Implications for Gold Distribution and Deposition. *Economic Geology*, 98 (3): 479—493. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.3.479>
- Pettke, T., Oberli, F., Heinrich, C.A., 2010. The Magma and Metal Source of Giant Porphyry-Type Ore Deposits, Based on Lead Isotope Microanalysis of Individual Fluid Inclusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 296 (3—4): 267—277. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.05.007>
- Qi, J.P., Zhang, J., Tang, G.J., et al., 2005. Carbon and Oxygen Isotope Composition of the Meso-Neoproterozoic Strata South of the Xiong'er Terrane: Evidence of the CMF Model. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (5): 1365—1372 (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1): 3—41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Stein, H.J., Markey, R.J., Morgan, J.W., et al., 1997. Highly Precise and Accurate Re-Os Ages for Molybdenite from the East Qinling Molybdenum Belt, Shaanxi Province, China. *Economic Geology*, 92(7/8): 827—835. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.92.7-8.827>
- Tang, K.F., 2014. Characteristics, Genesis, and Geodynamic Setting of Representative Gold Deposits in the Xiong'ershan District, Southern Margin of the North China Craton (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Tang, K.F., Li, J.W., Selby, D., et al., 2013. Geology, Mineralization, and Geochronology of the Qianhe Gold Deposit, Xiong'ershan Area, Southern North China Craton. *Mineralium Deposita*, 48(6): 729—747. <https://doi.org/10.1007/s00126-012-0451-2>
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1995. The Geochemical Evolution of the Continental Crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241. <https://doi.org/10.1029/95rg00262>
- Törmänen, T.O., Koski, R.A., 2005. Gold Enrichment and the Bi-Au Association in Pyrrhotite-Rich Massive Sulfide Deposits, Escanaba Trough, Southern Gorda Ridge. *Economic Geology*, 100 (6): 1135—1150. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.6.1135>
- Wang, C.M., He, X.Y., Yan, C.H., et al., 2013. Ore Geology, and H, O, S, Pb, Ar Isotopic Constraints on the Genesis of the Lengshuibigou Pb-Zn-Ag Deposit, China. *Geosciences Journal*, 17 (2): 197—210. <https://doi.org/10.1007/s12303-013-0011-5>
- Wang, J.H., Chen, L., Su, Q.W., et al., 2016. Geology, Isotopic Geochemistry and Metallogenesis of Huaishuping Gold Deposit in Songxian County, Henan Province. *Mineral Deposits*, 35(3): 524—538 (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).
- Wu, F., Lin, J., Wilde, S., 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. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.019>
- Wu, G., Chen, Y.C., Li, Z.Y., et al., 2013. Fluid Inclusion and Isotopic Characteristics of the Yinjiagou Pyrite-Polymetallic Deposit, Western Henan Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 87(3): 353—374 (in Chinese with English abstract).
- Xia, Q.K., Cheng, H., Liu, J., et al., 2017. The Distribution of the Early Cretaceous Hydrous Lithospheric Mantle in the North China Craton: Constraints from Water Content in Peridotites of Tietonggou. *Earth Science*, 42(6): 853—861 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.075>
- Xiang, J.F., Mao, J.W., Pei, R.F., et al., 2012. New Geochronological Data of Granites and Ores from the Nannihu-Sandaozhuang Mo(W) Deposit. *Geology in China*, 39 (2): 458—473 (in Chinese with English abstract).
- Yan, C.H., Liu, G.Y., 2004. Metallogenetic Characteristics and Ore-Prospecting Suggestions of Lead-Zinc Polymetallic Deposits in Southwestern Henan Province of China. *Geological Bulletin of China*, 23 (11): 1143—1148 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C.Y., Ye, H.S., Xiang, J.F., et al., 2016. Rb-Sr Isochron Age of Sulfide Minerals in Luotuoshan Pyrite-Polymetallic Deposit of Western Henan Province and Its Geological Significance. *Mineral Deposits*, 35(3): 573—590.

- Yang, M.Z., Lu, J.P., Fu, J.J., et al., 2014. Magmatic Hydrothermal Gold and Polymetallic Metallogenesis Related to Yanshanian Magmatism of Laowan Gold Belt, Tongbai Mountain: Evidence from Geochemistry, Geochronology and Ore-Controlled Structural Geological Constraints. *Mineral Deposits*, 33(3): 651–666 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y., Liu, Z.J., Deng, X.H., 2017. Mineralization Mechanisms in the Shangfanggou Giant Porphyry-Skarn Mo-Fe Deposit of the East Qinling, China: Constraints from H-O-C-S-Pb Isotopes. *Ore Geology Reviews*, 81: 535–547. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.026>
- Yang, Y., Zhang, J., Yang, Y.F., et al., 2009. Characteristics of Fluid Inclusions and Its Geological Implication of the Shangfanggou Mo Deposit in Luanchuan County, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2563–2574 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y.F., Chen, Y.J., Pirajno, F., et al., 2015. Evolution of Ore Fluids in the Donggou Giant Porphyry Mo System, East Qinling, China, a New Type of Porphyry Mo Deposit: Evidence from Fluid Inclusion and H-O Isotope Systematics. *Ore Geology Reviews*, 65: 148–164. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.011>
- 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*, 25(2): 374–384 (in Chinese with English abstract).
- Ye, H.S., Mao, J.W., Li, Y.F., et al., 2006. Characteristics and Metallogenic Mechanism of Mo-W and Pb-Zn-Ag Deposits in Nannihu Ore Field, Western Henan Province. *Geoscience*, 20(1): 165–174 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.W., Meng, Q.R., Yu, Z.P., et al., 1996. Orogenesis and Dynamics of the Qinling Orogen. *Science in China (Series D)*, 26(3): 193–200 (in Chinese).
- Zhang, S.K., Shi, B.T., Wang, J.H., et al., 2016. Characteristics of Isotopic Compositions and Metallogenic Model of Jijiawa Gold Deposit in the Western Henan. *Mineral Exploration*, 4(4): 552–560 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T.Y., Zhu, J.W., 1996. The Distinguishing Model of Remote Sensing of Shallow Buried Granite Mass in Eastern Qinling. *Henan Geology*, 14(4): 287–291.
- Zhao, G.C., Cawood, P.A., Li, S.Z., et al., 2012a. Amalgamation of the North China Craton: Key Issues and Discussion. *Precambrian Research*, 222–223: 55–76. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.016>
- Zhao, H.X., Jiang, S.Y., Frimmel, H.E., et al., 2012b. Geochemistry, Geochronology and Sr-Nd-Hf Isotopes of Two Mesozoic Granitoids in the Xiaoqinling Gold District: Implication for Large-Scale Lithospheric Thinning in the North China Craton. *Chemical Geology*, 294–295: 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.11.030>
- Zhao, H.X., 2011. Geochemistry of Ore-Forming Processes of the Xiaoqinling Gold District, Henan Province (Dissertation). Nanjing University, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Zhao, H.X., Jiang, S.Y., Dai, B.Z., et al., 2015. Geochronology and Hf Isotope Study of Pegmatite in the Xiaoqinling Area of NW China: Implication for Petrogenesis and Regional Metamorphism. *Journal of Earth Science*, 26(3): 295–305. <https://doi.org/10.1007/s12583-015-0537-8>
- Zhou, Z.X., Li, B.L., Guo, K.H., et al., 1993. Metallogeny of Gold-(Mo) Deposits in the Southern Margin of North China Craton. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, J., Wu, C.X., Peng, S.G., et al., 2018. Geochronology and Geochemistry of Volcanic Rocks from the Huangchengshan Volcanogenic Epithermal Silver Deposit, Dabie Orogen, China: Implications for Tectonic Setting. *Earth Science*, 43(7): 2404–2419 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.187>
- Zhu, R.X., Chen, L., Wu, F.Y., et al., 2011. Timing, Scale and Mechanism of the Destruction of the North China Craton. *Science in China (Series D)*, 41(5): 583–592 (in Chinese).
- Zhu, R.X., Fan, H.R., Li, J.W., et al., 2015. Decratonic Gold Deposits. *Science in China (Series D)*, 45(8): 1153–1168 (in Chinese).
- ## 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, 15–74.
- 陈红瑾, 陈衍景, 张静, 等, 2013. 安徽省金寨县沙坪沟钼矿含矿岩体锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 29(1): 131–145.
- 陈衍景, 隋颖慧, Pirajno, F., 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): 551–568.
- 戴宝章, 蒋少涌, 王孝磊, 2009. 河南东沟钼矿花岗斑岩成因: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约. *岩石学报*, 25(11): 2889–2901.
- 范宏瑞, 谢奕汉, 翟明国, 等, 2003. 豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用. *岩石学报*, 19(2): 260–266.
- 高昕宇, 赵太平, 原振雷, 等, 2017. 华北陆块南缘中生代合峪花岗岩的地球化学特征与成因. *岩石学报*, 26(12): 3485–3506.
- 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.
- 胡志宏, 胡受奚, 周顺之, 等, 1986. 豫西小秦岭太华群金的地

- 球化学背景及金矿成矿物质来源研究.吉林大学学报(地球科学版),16(2): 63—73.
- 黄典豪,侯增谦,杨志明,等,2009.东秦岭钼矿带内碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质—地球化学特征、成矿机制及成矿构造背景.地质学报,83(12): 1968—1984.
- 黄典豪,王义昌,聂凤军,等,1984.黄龙铺碳酸岩脉型钼(铅)矿床的硫、碳、氧同位素组成及成矿物质来源.地质学报,58(3): 252—264.
- 黄典豪,吴澄宇,杜安道,等,1994.东秦岭地区钼矿床的铼—锇同位素年龄及其意义.矿床地质,13(3): 221—230.
- 焦建刚,汤中立,钱壮志,等,2010.东秦岭金堆城花岗斑岩体的锆石 U-Pb 年龄、物质来源及成矿机制.地球科学,35(6): 1011—1022.
- 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,25(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.
- 李洪英,毛景文,王晓霞,等,2011.陕西金堆城矿区花岗岩 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其地质意义.中国地质,38(6): 1536—1550.
- 李诺,陈衍景,孙亚莉,等,2009.河南鱼池岭钼矿床辉钼矿铼—锇同位素年龄及地质意义.岩石学报,25(2): 413—421.
- 李诺,陈衍景,张辉,等,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.
- 李永峰,毛景文,胡华斌,等,2005.豫西公峪金矿床流体包裹体及其 He、Ar、S、H、O 同位素组成对成矿流体来源的示踪.岩石学报,21(5): 1347—1358.
- 李占轲,2013.华北克拉通南缘中生代银铅锌矿床成矿作用研究(博士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 毛景文,叶会寿,王瑞廷,等,2009.东秦岭中生代钼银铅锌多金属矿床模型及其找矿评价.地质通报,28(1): 72—79.
- 毛景文,郑榕芬,叶会寿,等,2006.豫西熊耳山地区沙沟银铅锌矿床成矿的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄及其地质意义.矿床地质,25(4): 359—368.
- 聂凤军,江思宏,赵月明,2001.小秦岭地区文峪和东闯石英脉型金矿床铅及硫同位素研究.矿床地质,20(2): 163—173.
- 祁进平,张静,唐国军,2005.熊耳地体南侧中晚元古代地层碳氧同位素组成:CMF 模式的证据.岩石学报,21(5): 1365—1372.
- 唐克非,2014.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(博士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 王炯辉,陈良,苏蔷薇,等,2016.河南省嵩县槐树坪金矿床地质、同位素地球化学特征与成矿作用.矿床地质,35(3): 524—538.
- 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 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄及其意义.科学通报,47(18): 1427—1431.
- 武广,陈毓川,李宗彦,等,2013.豫西银家沟硫铁多金属矿床流体包裹体和同位素特征.地质学报,87(3): 353—374.
- 夏群科,程徽,刘佳,等,2017.山东铁铜沟橄榄岩的水含量:华北克拉通早白垩世富水岩石圈的分布.地球科学,42(6): 853—861.
- 向君峰,毛景文,裴荣富,等,2012.南泥湖—三道庄钼(钨)矿的成岩成矿年龄新数据及其地质意义.中国地质,39(2): 458—473.
- 燕长海,刘国印,2004.豫西南铅锌多金属矿控矿条件及找矿方向.地质通报,23(11): 1143—1148.
- 杨晨英,叶会寿,向君峰,等,2016.豫西骆驼山多金属硫铁矿床硫化物 Rb-Sr 等时线年龄及其地质意义.矿床地质,35(3): 573—590.
- 杨梅珍,陆建培,付静静,等,2014.桐柏山老湾金矿带与燕山期岩浆作用有关的岩浆热液多金属矿床成矿作用——来自地球化学、年代学证据及控矿构造地质制约.矿床地质,33(3): 651—666.
- 杨艳,张静,杨永飞,等,2009.栾川上房沟钼矿床流体包裹体特征及其地质意义.岩石学报,25(10): 2563—2574.
- 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,毛景文,李永峰,等,2006.豫西南泥湖矿田钼钨及银铅锌矿床地质特征及其成矿机理探讨.现代地质,20(1): 165—174.
- 张国伟,孟庆任,于在平,等,1996.秦岭造山带的造山过程及其动力学特征.中国科学(D辑),26(3): 193—200.
- 张苏坤,史保堂,汪江河,等,2016.豫西熊耳山吉家洼金矿床同位素特征与成矿模式.矿产勘查,7(4): 552—560.
- 张天文,朱嘉伟,1996.东秦岭地区浅隐花岗岩体遥感识别模式.河南地质,14(4): 287—291.
- 赵海香,2011.河南小秦岭金矿成矿作用地球化学研究(博士学位论文).南京:南京大学.
- 周作侠,李秉伦,郭抗衡,等,1993.华北地台南缘金(钼)矿床成因.北京:地震出版社.
- 朱江,吴昌雄,彭三国,等,2018.大别山皇城山银矿区及外围陈棚组火山岩 U-Pb 年代学、地球化学和成矿构造背景.地球科学,43(7): 2404—2419.
- 朱日祥,陈凌,吴福元,等,2011.华北克拉通破坏的时间、范围与机制.中国科学(D辑),41(5): 583—592.
- 朱日祥,范宏瑞,李建威,等,2015.克拉通破坏型金矿床.中国科学(D辑),45(8): 1153—1168.