

华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题^{*}

陈衍景^{1,2} 翟明国³ 蒋少涌⁴

CHEN YanJing^{1,2}, ZHAI MingGuo³ and JIANG ShaoYong⁴

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

2. 北京大学造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

4. 南京大学地球科学系内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210093

1. Key Laboratory of Metallogenic Dynamics, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

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

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2009-10-10 收稿, 2009-11-12 改回。

Chen YJ, Zhai MG and Jiang SY. 2009. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11):2695–2726

Abstract The significant achievements in past four-year study of Orogenesis and Metallogenesis Surrounding the North China Continent, which is a huge project granted by the National 973-Program, are briefly summarized in this paper. The concepts of ultramafic-mafic rock-hosted hydrothermal Cu-Ni-precious metals deposit and epizonogenism are defined; and consequently, the hydrothermal ore-systems can be classified into three series, i. e. magmatic, metamorphic and epizonogenic. On the basis of discovery and identification of numerous orogenic-type Ag, Pb-Zn, Cu and Mo deposits in the interest area, a new term of orogenic-type deposits and a new element zoning model for orogenic-type ore-system have been introduced to renew the concept of orogenic-type gold and its crustal continuum model, respectively. Indosinian mineralizations, especially intrusion-related hypothermal Mo mineralization, were determined to have occurred in both southern and northern margins of the North China continent. Intra-continental intrusion-related hypothermal ore-systems are rich in CO₂, K and F, which differ from those developed in island arcs. The Carlin-type and Carlin-like gold deposits in compressive orogenic areas usually contain CO₂-H₂O fluid inclusions which cannot be observed the same kind ore-systems developed in back-arc Basin-and-Range provinces. The Central Asian and Central China orogenic belts have been from strongly continental accretion and weakly continental collision and weakly continental accretion and strongly continental collision, respectively, which leads them to have quite different type ore-systems and metallic commodities. The eastern portions of the North China continent and its adjacent orogenic belts accommodate large-scale Yanshanian mineralization gradiently younging eastward, with differing genetic types and metal inventories, which possibly resulted from their tectonic evolution combined with interaction with Pacific plate. Pre-collision hydrothermal ore-systems were reworked more or less, of which some re-mobilized and re-emplaced as other genetic types of ore deposits. Intrusion-related hypothermal Mo mineralizations of ca 1.9 Ga and 1.75 Ga and orogenic type Ag-Au-Mo mineralization of ca 430 Ma were recently discovered in Qinling Mountains, whilst the Mongolia-Hinggan Mountains were reported to have Devonian orogenic Cu-Au lodes, indicating the exploration potential for pre-Mesozoic ore deposits. Ore-system is evidenced to be an ideal probe to geodynamics, and by this way the post-120Ma erosion total of Qinling-Dabie-SuLu orogen is estimated less than 10 km with an average rate of 0.04 mm per year, suggesting that the rapid uplift must occur before 130 Ma if there is. It is constrained that the Paleo-Asian Ocean closed from west to east along the Solonker-Yanji geosuture during the period of from 260 to 250 Ma; while the northern branch of the Paleo-Tethys Ocean was finally closed at ca 220 Ma. The North China craton is revealed to have been involved in supercontinent cycles including Kenor, Columbia, Rodinia, Gondwana and Pangea, as well as the Lomagundi Event which is characterized by positive $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ excursion; and deposition of the khondalite series in North China craton was dated to be <2.3 Ga. Suggested key open issues include: duration and geologic marker of onset and end of continental collision orogenesis; identification and

^{*} 本文得到国家 973 计划项目“华北大陆边缘造山过程与成矿” (2006CB403500) 和国家自然科学基金项目 (40730421, 40425006) 的资助。

第一作者简介: 陈衍景, 男, 1962 年生, 矿床学博士, 教授, E-mail: yjchen@pku.edu.cn; ggyjchen@126.com

targeting of pre-Mesozoic ore-systems; regional regularities and differences of Yanshanian large-scale mineralizations; and detailed process and mechanism of transition and/or combination of tectonic domains or regimes.

Key words North China craton; Central Asia orogen; Central China orogen; Metallogenesis; Orogenesis

摘要 本文简要总结了国家 973 计划项目“华北大陆边缘造山过程与成矿”前 4 年取得的重要进展,包括提出了镁铁质岩石容矿的热液铜镍-贵金属矿床、浅成作用的概念,将热液成矿系统分为岩浆热液、变质热液和浅成热液三大系列;基于一批造山型银、铅锌、铜、钼等矿床的发现或识别,将造山金矿的概念和成矿分带模式拓展为造山型矿床;确定华北克拉通南缘和北缘均发生了印支期成矿事件,尤其是浆控高温热液型钼矿床;发现大陆内部浆控高温热液成矿系统以富 CO_2 、富钾、富氟为特征,不同于岛弧区同类矿床;挤压造山带的卡林型-类卡林型金矿成矿系统也以含 CO_2 - H_2O 包裹体而区别于弧后盆岭省的同类成矿系统;发现中央造山带和中亚造山带在成矿类型、优势矿种等方面差异显著,缘于它们分别经历了弱增生-强碰撞和强增生-弱碰撞的造山作用;确定华北陆块及其陆缘造山带东部在燕山期大规模成矿,自西向东成矿年龄梯级变新,优势成矿类型和矿种不同,缘于太平洋板块作用叠合于造山带自身的演化;发现碰撞前的热液成矿系统均或多或少地遭受改造,甚至活化、再就位成另类矿床;在秦岭造山带新发现了 1.9Ga 和 1.75Ga 浆控热液钼矿床以及 430Ma 的造山型银金钼矿床,在兴蒙造山带新发现了泥盆纪造山型铜金矿床,据此预测了前中生代矿床的找矿潜力;提出矿床是地球动力学研究的探针,厘定秦岭-大别-苏鲁造山带在 120Ma 之后的隆升剥蚀幅度总体小于 10km,平均每年 0.04mm,快速隆升剥蚀只能发生在 130Ma 之前;初步厘定古亚洲洋沿索伦-延吉缝合带自西向东闭合于 260~250Ma,古特提斯洋北支最终闭合于 220Ma;揭示华北克拉通对于 Kenor、Columbia、Rodinia、Gondwana 和 Pangea 超大陆事件均有响应,发现了拉马甘迪 (Lomagundi) 事件的碳同位素正向漂移现象,确定孔兹岩系主要形成于 2.3Ga 以后。提出急需加强研究的重要科学问题是大陆碰撞造山事件的起止时限和标志,前中生代成矿系统的识别和预测,燕山期大规模成矿的区域规律性和差异性,构造域叠合-转化过程的细节和机理。

关键词 华北克拉通; 中亚造山带; 中央造山带; 成矿作用; 造山作用

中图法分类号 P542.2; P611

多学科交叉研究、大量数据积累以及测试技术革新使成矿作用的研究思路发生了根本性的变化,主要表现在:将矿床形成过程与地球系统演化、不同圈层相互作用等联系起来,更深刻地理解矿产资源的形成和赋存规律;认识到矿床和矿集区是特定地质过程中物质循环和元素富集的结果,开始以矿床作为探针反演地球动力学背景(陈衍景等, 2008);有关特提斯、古亚洲洋和环太平洋三大成矿域的研究日趋深入,显示出矿集区与全球构造之间的内在联系;在全球构造框架中,板块边界(特别是大陆边缘)往往并发多种地质作用,导致多类成矿系统的发育(翟裕生等, 2002)。以上表明,大陆边缘等板块边界的成矿作用是当前和未来相当长时期成矿与找矿研究的主题。

华北古大陆的终极克拉通化完成于 1.85Ga 之前(翟明国和彭澎, 2007),是我国最古老的大陆地壳发育区。华北克拉通以北的兴蒙造山带是古亚洲洋演化、闭合的产物,隶属古亚洲洋构造-成矿域,是世界范围内显生宙大陆增生最显著的地区,应是典型的增生型造山带或强增生-弱碰撞而形成的大陆造山带。华北克拉通以南的秦岭-大别-苏鲁造山带属于古特提斯构造域,记录了古特提斯洋北支的发展演化,发育世界最大规模的超高压变质带,属世界范围典型的碰撞型造山带或弱增生-强碰撞形成的大陆造山带。中生代以来,华北克拉通及其南北邻造山带的东段均受太平洋板块作用的叠加改造,表现出滨太平洋构造-成矿域的特征。华北大陆及其周边造山带是我国最主要的矿产地,涵盖国家 16 个重点勘查区的 6 个和所有 11 个急需金属矿种,铁、铝、金等储量名列我国前茅,稀土、钼、银等矿种独具优势,矿产资

源丰富,找矿潜力巨大。可见,华北大陆及其边缘造山带会聚全球三大构造-成矿域(图 1),在世界范围内独一无二;既有不同陆缘构造环境的矿床,还有三大成矿域的优势矿床,更独有成矿域叠合体制的矿床,成矿类型复杂多样,传统成矿理论难以解释,是发展大陆边缘造山-成矿理论理想的研究区。

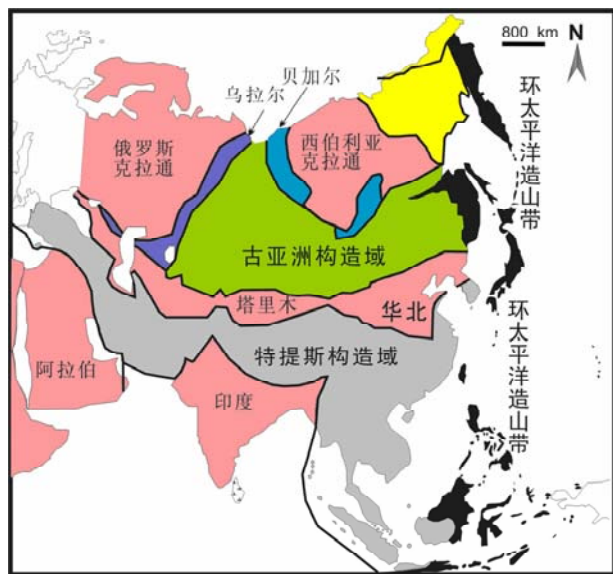


图 1 华北古大陆及邻区构造框架(据 Sengör and Natal'in, 1996, 修改)

Fig. 1 Tectonic framework of the North China continent and adjacent areas (modified after Sengör and Natal'in, 1996)

鉴于华北大陆及其边缘造山带成矿研究的理论意义和实际意义,国家 973 计划于 2006 年启动了“华北大陆边缘造山过程与成矿”项目,旨在以“比较矿床学”学术思想(涂光炽和李朝阳,2006)为指导,研究揭示大陆边缘增生、碰撞和构造域转换体制下元素活化-迁移-富集成矿机理,发展大陆边缘造山-成矿理论。项目分 8 个课题实施(图 2),迄今执行 4 年,取得了一些重要进展,发现了一些新的重要科学问题,为促进同行了解、关注和解决这些问题,本文予以简单介绍(未包括测试和勘探技术方面的进展及其应用成果)。

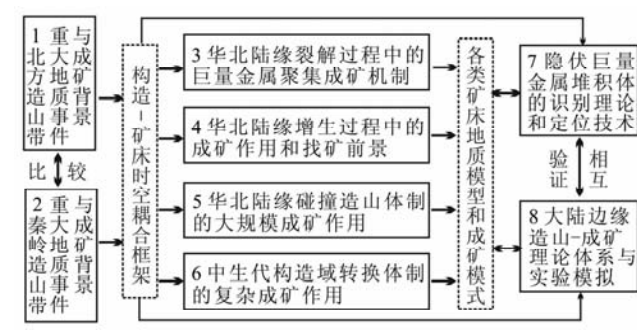


图 2 华北大陆边缘造山与成矿研究课题及其关系
Fig. 2 Research issues and their relationships of the marginal orogeny and metallogeny of the North China continent

1 造山-成矿理论研究的突破和进展

本项目基于对华北大陆边缘造山带成矿作用研究,获得了一些新发现、新认识,提出了一些新概念和新模型,它们不但能够用于说明华北陆缘造山带,而且能够适用于其它地区或类似构造环境,因而具有普遍的科学意义。举例如下:

1.1 从造山型金矿到造山型矿床:概念和成矿元素分带模式的跨越

Groves *et al.* (1998) 论述了造山型金矿床的概念、特征和成因,使造山型金矿成为至今不衰的研究热点。但是,迄今国际学术界只重视研究造山型金矿,而没有注意到其它矿种的造山型矿床存在。我们认为,造山型金矿实为变质热液金矿,而产生变质热液的变质作用总伴随造山作用发生;由于 Ag、Cu、Pb、Zn 等元素与金元素的地球化学行为具有相似性和共生性,既然金可以在造山-变质过程中活化形成造山型金矿,Ag、Cu、Pb、Zn、Mo 等元素也同样可以形成造山型矿床。因此,我们将造山型金矿概念拓展为造山型矿床(陈衍景, 2006);将造山型金矿的连续地壳模式修正为断控造山型矿床成矿元素分带模式(图 3),并说明了造山型矿床与浅成热液矿床的关系,也就是成矿深度浅于 5km 者基本属于浅成热液矿床,大于 5km 者为造山型矿床(后述);将造山型矿床发育的构造背景由原来单一的俯冲增生型造山带拓展为

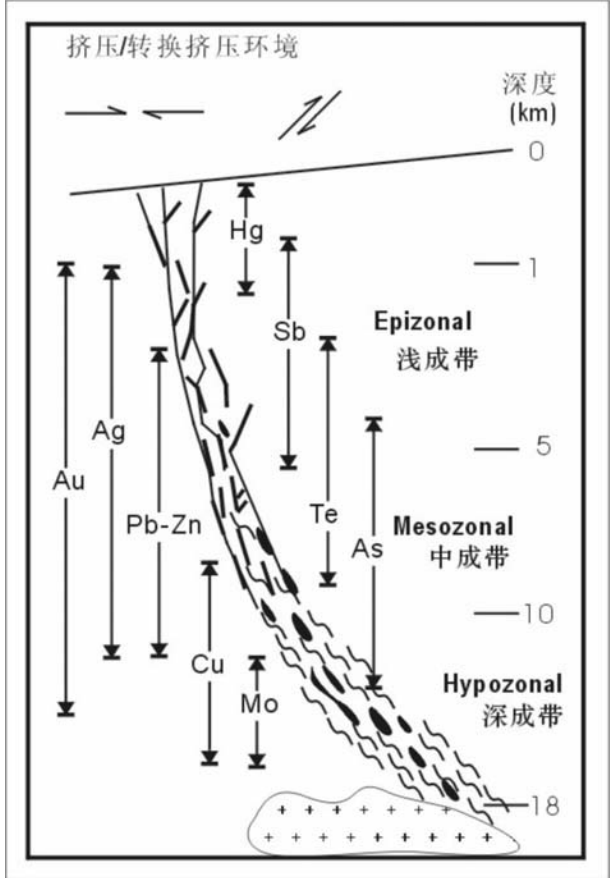


图 3 断控造山型矿床成矿元素分带模式(陈衍景, 2006)
Fig. 3 Element zoning model for fault-controlled orogenic-type ore-system (Chen YJ, 2006)

俯冲增生型造山带、大陆碰撞造山带和陆内挤压/走滑造山带,预测我国大陆造山带具有巨大的寻找造山型矿床的潜力;在世界范围内,我们首先识别出造山型银矿(Chen *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2009; 张静等, 2009)、造山型铅锌矿(祁进平等, 2007, 2009; 姚军明等, 2008)、造山型铜矿(李文博等, 2007, 2008)和造山型钼矿床(邓小华等, 2008b; 李诺等, 2007a, 2008b; 倪智勇等, 2008, 2009)的实例(参见后述);确定小秦岭和胶东分别是主要形成于大陆碰撞挤压体制和后碰撞伸展-岩石圈折沉体制的两类造山型金矿省(Hou *et al.*, 2007; 蒋少涌等, 2009)。

1.2 浅成作用和热液矿床分类的新方案

在各类地质体中,热液矿床的矿物和元素成分、地质地球化学特征、形成机制和过程、时空分布规律等都最为复杂,其研究难度最大。因此,热液矿床分类是矿床学家长期研究的难题之一,目前尚无统一的矿床分类方案,矿床类型名称尤其混乱。要科学地揭示热液矿床的形成和分布规律,合理

地进行热液矿床分类,就必须搞清热流体(热液)的产生机理、来源及其性质,原因在于热液矿床是热流体作用的产物。众所周知,岩浆热液和变质热液分别伴随岩浆作用($>573^{\circ}\text{C}$)和变质作用($>200^{\circ}\text{C}$)而产生,其形成温度和压力较高。事实上,在地表至地下10km(约 $<2.7\text{ kbar}$)范围内,也不可避免地发生50~300 $^{\circ}\text{C}$ 范围(设地温梯度为 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$)的地质作用和流体作用,本文将这一温度、压力(或深度)范围的地质作用称为浅成作用(epizonogenesis),将其派生的热液和热液矿床称为浅成热液(epizonogenic fluid)和浅成热液矿床(epizonogenic hydrothermal deposit)。

值得说明,浅成作用涵盖了成岩作用(Winkler, 1976)或改造作用(涂光炽, 1986, 1987, 1988),在温度压力条件等方面也与之相当。成岩作用(diagenesis)被局限于沉积岩(Winkler, 1976);而改造作用(reworking)常被理解为先成矿床或地质体在后期地质作用中发生物质成分、结构构造或产出形式等方面的变化的过程。

热液中的气相组分含量随压力增高而增高,随温度的增高而降低;溶质的溶解度或盐度随温度的增高而增高。一般而言, H_2O 和 CO_2 是热液的最主要成分或溶剂(Winkler, 1976; 陈衍景等, 2007), CO_2 汽化温度显著高于 H_2O ,富 CO_2 流体通常形成于较大的压力条件下。因此, $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比值或 CO_2 含量和盐度可以标定热液的特征和来源,即:浅成热液的盐度低、贫 CO_2 ,变质热液盐度高、富 CO_2 ,岩浆热液盐度高、 CO_2 含量变化大;与之相应,高盐度(含子晶)流体包裹体,特别是含 CO_2 的多子晶包裹体被作为浆控高温热液矿床的标志,低盐度-富 CO_2 包裹体被作为变质热液矿床或造山型矿床的标志,而低盐度-贫 CO_2 的水溶液包裹体被作为浅成热液矿床的特征(陈衍景等, 2007)。然而,由于浆控高温热液矿床和变质热液矿床往往在成矿中晚期遭受浅成热液作用的叠加或改造,致使成矿中、晚阶段捕获的流体包裹体不具有成因意义,只有早阶段流体包裹体才能作为成因判别依据。

基于上述,根据成矿流体的来源、性质,可以较好地将热液矿床划分为3个大类或系列(参见陈衍景等, 2007, 2008): (1)浆控高温(或岩浆)热液矿床,包括斑岩型、爆破角砾岩型、矽卡岩型、IOCG型和浆控热液脉状矿床(如河南土门萤石脉型钼矿床、华南钨锡石英脉等); (2)造山型(或变质热液)矿床,包括文献中常见的中温中深成脉状矿床(Mesothermal)、韧性剪切带型、石英脉型、构造蚀变岩型、绿岩带型、浊积岩型、浅变质碎屑岩型、海相火山岩型、VSH型(Victoria slate-hosted),等; (3)浅成热液矿床,包括陆相火山岩容矿的浅成低温热液矿床(epithermal),沉积岩容矿的卡林型金矿、MVT型铅锌矿和一些低温热液作用形成的银、汞、铀以及碲等分散元素矿床,海底喷流作用(发生在岩石圈-水圈界面)形成的火山岩容矿的VMS型和沉积岩容矿的SEDEX型。

1.3 增生型和碰撞型造山带的成矿差异

科迪勒拉和阿尔卑斯-喜马拉雅造山带分别被作为增生型和碰撞型造山带的典型代表(Sengör *et al.*, 1993; 陈衍景, 2000; Xiao *et al.*, 2003, 2004)。大陆内部的增生型和碰撞型造山带均先后经历了大陆增生和碰撞两个过程,因此二者之间的区别是相对的,可以分别理解为强增生-弱碰撞和弱增生-强碰撞所形成的造山带或俯冲-碰撞造山带。所谓大陆增生,就是大洋板块俯冲熔融和变质脱水诱发上覆仰冲板块地幔楔熔融而产生具有陆壳成分特征的中酸性岩浆,大量岩浆上涌-冷凝而形成新的陆壳或使陆壳体积增大(垂向加厚和/或侧向加宽)的过程;以形成新生陆壳为特征的造山作用即为增生型造山作用,以新生陆壳为主体的造山带就是增生型造山带。随大洋板块俯冲消减,两个彼此分离的大陆开始对接、碰撞造山,此过程的中酸性岩浆主要来自原有陆壳的熔融,因此没有显著的大陆或陆壳增生,甚至由于部分陆壳深俯冲并拆沉于地幔软流圈中,反而使陆壳体积减少。通常,大陆碰撞造山作用的强弱取决于两个因素: (1)发生碰撞的两个大陆的规模,规模越大,碰撞造山作用越强; (2)碰撞前大陆增生作用的强弱,增生作用越强、增生地体越多,碰撞作用越弱(陈衍景, 2000; Chen *et al.*, 2007)。不难理解,增生型与碰撞型造山带相比,地壳成熟度较低,火山岩地层较多,沉积岩地层较少,各类岩浆岩较多,变形-变质程度相对较弱,超高压变质岩(特别是榴辉岩)较少,造山带宽度较大。据此,位于华北克拉通北缘的中亚造山带(兴蒙)造山带属于典型的增生型,而位于南缘的中央造山带(秦岭-大别-苏鲁造山带)应属典型的碰撞型。中亚与中央造山带成矿作用的差异性和相似性可在一定程度上反映世界范围内增生型与碰撞型造山带的成矿差异性和相似性。

初步研究发现,两造山带成矿系统存在如下显著差异(参见后述): (1)在陆缘裂解或沟-弧-盆体制下,南秦岭发育了Sedex型钼矿带(重晶石、毒重石)和厂坝-银洞子铅锌银矿带,VMS型铜锌矿床较少,而兴蒙则有较多重要的VMS型或VMS-Sedex过渡型的铜铅锌矿床(如狼山-渣尔太成矿带); (2)西秦岭发育世界第二大卡林型-类卡林型金矿省,而兴蒙造山带尚未发现重要的此类矿床; (3)秦岭大量发育沉积岩容矿的汞锑矿床(如公馆矿田)、MVT型铅锌矿(如马元)等,而兴蒙造山带此类矿床少见; (4)秦岭地区总体缺乏碰撞前形成的浆控高温热液型和浅成低温热液型矿床,而兴蒙造山带蕴含大量此类矿床(如黑龙江多宝山和蒙古欧玉陶勒盖); (5)在碰撞造山体制下,秦岭造山带大量发育造山型金、银、铅锌、钼等矿床(后述),而兴蒙造山带此类矿床较少,但发育浆控高温热液型铜金钼矿床(如乌努格吐铜金矿床)和浅成浅成低温热液型矿床(如额仁陶勒盖、银都等银矿床); (6)在燕山期构造域转化体制下,中亚和中央造山带东段都显示了多类矿床爆发式形成的特点,但中央造山带总体缺乏浅成低温热液成矿系统,造山型成矿系统发育(如胶

东),而兴蒙造山带东段恰相反,发育团结沟、金厂等著名的浅成低温热液金矿床;(7)就浆控高温热液型成矿系统而言(特别是燕山期),中央造山带以钼钨矿床为主(如栾川钼矿田),铜金矿床较少,而兴蒙造山带东段恰相反;(8)两个造山带均发现了古生代的造山型成矿系统,秦岭地区的银洞沟矿床系银金钼矿化(李晶等,2009),而兴蒙造山带的白乃庙矿床为铜金矿化(李文博等,2007,2008)。显然,上述诸多差异均可通过考虑造山带地壳成熟度、岩浆岩/沉积岩比

例以及大陆增生和碰撞的强弱而得到合理解释。

尽管存在上述差异,由于两造山带都经历了陆缘裂解、增生、碰撞以及构造域转化等不同体制的构造作用过程,因此成矿作用也表现出不少相似性(表1):(1)都发育了陆缘裂解体制的与碱性岩有关的稀土矿床(白云鄂博和湖北庙垭);(2)都发育裂解或沟-弧-盆体制的海底热液喷流沉积矿床;(3)均发育增生、碰撞和构造域转化体制的浆控高温热液型、造山型和浅成热液型成矿系统;等等。

表 1 中央造山带和中亚造山带的成矿系统的差异

Table 1 Contrasting ore systems in the Central Asia and Central China orogens

构造体制	地区	沉积岩容矿 浅成热液型	火山岩容矿 浅成热液型	海底喷流 沉积型	造山或变质 热液型	浆控高温 热液型
构造转换	南缘	多: 卢氏汞锑	少	无	多: 胶东金	多: 大别钼
	北缘	少	多: 团结沟金	无	少	多: 金厂金
陆陆碰撞	南缘	多: 西秦岭金	少	无	多: 小秦岭金	多: 栾川钼
	北缘	少	多: 银都银矿	无	中等: 夹皮沟	多: 乌山铜
陆缘增生	南缘	少	?	少: VMS 型	少	未见
	北缘	少	多: 奥尤特	少: VMS 型	少	多: 多宝山铜
陆缘裂解	南缘	?	?	多: Sedex 型	无	少: 庙垭
	北缘	?	?	多: VMS 型	无	少: 白云鄂博

表 2 大陆内部与岛弧区浆控高温热液型成矿系统的对比(陈衍景等,2008)

Table 2 Contrasting intrusion-related hypothermal ore-systems of intra-continent and island arc (Chen *et al.*, 2008)

特征	岩浆弧(岛弧和陆缘弧)	大陆内部(碰撞带,陆内造山带和断裂岩浆带)
主导性构造机制	大洋岩石圈俯冲-部分熔融	大陆地壳或岩石圈部分熔融
源区岩石学特征	海水浸泡的洋壳,缺乏碳酸盐	贫水的大陆壳,含碳酸盐
源区化学成分	富 Na, Cl, H ₂ O; 贫 K, F, CO ₂	贫 Na, Cl, H ₂ O; 富 K, F, CO ₂
岩浆岩特征	钙碱系列,缺乏碱性岩和碳酸岩	高钾钙碱性系列,钾玄系列,碱性岩、碳酸岩
稀土元素地球化学	LREE/HREE 高,负 Eu 异常弱	LREE/HREE 低,负 Eu 异常强
同位素地球化学	I _{Sr} 低,ε _{Nd} 和 ε _{Hf} 高,δ ¹⁸ O 低	I _{Sr} 高,ε _{Nd} 和 ε _{Hf} 低,δ ¹⁸ O 高
流体特征	K/Na 低, F/Cl 低, CO ₂ /H ₂ O 低	K/Na 高, F/Cl 高, CO ₂ /H ₂ O 高
围岩蚀变	富水蚀变: 云母化、绿泥石化强烈	贫水蚀变: 钾长石化、绿帘石化和萤石化显著
成矿元素组合	铜金为主,伴生少量 Mo, Pb, Zn	钼或铜钼为主,伴生 W, Sn, REE
流体包裹体	少见富 CO ₂ 包裹体	常见富 CO ₂ 包裹体
代表性矿床	西太平洋新生代斑岩铜金矿带	东秦岭燕山期斑岩钼矿带

1.4 高盐度富 CO₂ 流体: 大陆内部浆控高温热液矿床的标志特征

研究发现(陈衍景等,2008;陈衍景和李诺,2009),大陆内部的浆控高温热液矿床,包括不同金属元素的斑岩型、矽卡岩型、爆破角砾岩型、脉型和 IOCG 型矿床,无论其发育在碰撞造山带、陆内断裂-岩浆岩带还是活化陆内造山带或

克拉通边缘,其围岩蚀变普遍以钾长石化、绿帘石化、萤石化、碳酸盐化等相对贫水蚀变为主,而绢云母化、绿泥石化、黑云母化等富水蚀变较弱;常发育纯 CO₂ 包裹体、CO₂-H₂O 包裹体、含子晶多相包裹体和水溶液包裹体等 4 类流体包裹体;成矿流体具有高盐度、富 CO₂ 的特点,且往往富 F、富 K。相反,活动大陆边缘岛弧区同类矿床的钾长石化较弱或钾长石化带较窄,萤石化和碳酸盐化较弱,绢云母化、绿泥石化、

黑云母化等富水蚀变较强,不同级别的泥化较强;流体包裹体以含子晶多相包裹体和水溶液包裹体为主,很少见到 CO_2 - H_2O 包裹体,更无纯 CO_2 包裹体;成矿流体为贫 CO_2 的高盐度水溶液($\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 型)。分析表明,两种不同构造背景的浆控高温热液成矿系统围岩蚀变及成矿流体性质的差异缘于其源区物质成分的差别,即:大陆壳具有较高的 K/Na 、 F/Cl 、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 等比值,而大洋壳则具有极低的 K/Na 、 F/Cl 、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 等比值。

1.5 热液成因的铜镍硫化物±贵金属矿床的发现及其重要意义

与基性-超基性岩有关的铜镍硫化物±贵金属(PGE, Au)矿床被作为岩浆作用成矿的典型(Naldrett, 1989)。最近,一些学者开始重视热液活动对成矿作用的贡献,特别是对PGE成矿的贡献。例如,Molnar *et al.* (2001)认为加拿大萨德伯里矿床成岩过程和成岩后构造变质过程的热液作用形成了网脉状矿石;王瑞廷等(2003)认为流体作用促进了煎茶岭铜镍矿床的形成或成矿后改造;Wang *et al.* (2008)认为云南金宝山矿体中铂族元素富集和铂族矿物形成与热液活动有关;汤中立和李文渊(1995)认为热液作用导致了金川超大型矿床脉状和网脉状高品位铜矿石形成以及Pt、Pd富集,而Ripley *et al.* (2005)也认为金川矿床至少经历两期流体作用的改造或成矿元素富集。尽管如此,此类矿床仍然被解释为主要由岩浆熔离作用形成,热液作用只有次要贡献,或者只是改造了岩浆成因的矿床(汤中立和李文渊,1995;王瑞廷等,2003;Molnar *et al.*, 2001;Ripley *et al.*, 2005;Wang *et al.*, 2008)。因此,人们还没有充分认识到由热液作用直接形成的基性-超基性岩容矿的铜镍硫化物±贵金属矿床的存在。

根据航磁和重力异常等资料,内蒙兴业集团于2006年在河南省唐河县发现了与超基性岩有关的周庵大型铜镍-铂族-金等多元素矿床。本项目研究发现(王建国等,2006;糜梅,2008;糜梅等,2009),该矿床主要矿体产于超基性岩的蚀变岩包壳中,呈“元宝状”(图4),系岩浆熔离作用无法解释;矿石矿物以稀疏浸染状或显微网脉浸染状分布于强蚀变超基性岩中,缺乏标志岩浆熔离成因的海绵陨铁结构。超基性岩含有石榴子石和较多的尖晶石,橄榄石 $f_0 > 90$;岩石轻稀土富集,其 La/Sm_N 比值为 $1.3 \sim 4.7$, Sm/Yb_N 比值为 $1.9 \sim 4.4$,原始地幔标准化微量元素配分型式显示弱负Nb异常;矿体和岩体的 Ni/Cu 比值分别为 $2.0 \sim 2.3$ 和 $5 \sim 83$;强蚀变样品PGE含量高于弱蚀变样品约一个数量级, $\text{Pd/Ir} = 1.4 \sim 21$, $\text{Pt/Ir} = 2.4 \sim 22$,表明PPGE相对IPGE富集。这些特征表明,周庵“岩体”实为构造侵位的地幔岩,地幔岩遭受含水流体交代作用而蚀变矿化,致使PGE、Au、Ni、Cu等成矿元素富集至岩体边缘或顶部成矿。因此,周庵矿床可作为首例热液成因的基性-超基性岩容矿的铜镍硫化物±贵金属(PGE, Au)矿床。

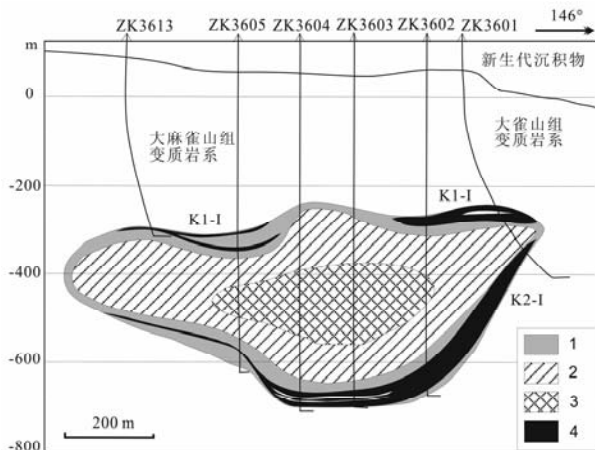


图4 河南周庵 Cu-Ni-PGE 矿床与超基性岩空间关系 (据王建国等,2006 修改)

1. 强蚀变带; 2. 弱蚀变带; 3. 微弱蚀变核; 4. 矿体

Fig. 4 Spatial relationship of Cu-Ni-PGE orebodies and ultra-basic rock (modified after Wang JM *et al.*, 2006)

1. Intensively altered zone; 2. weakly altered zone; 3. slightly altered core; 4. orebodies

按照岩浆熔离成矿的传统观点,铜镍硫化物±贵金属矿床只能围绕岩浆结晶分异较充分的基性-超基性杂岩体进行,结晶分异不充分的岩体或玄武岩、大洋地壳、构造侵位的地幔岩等均不利于成矿。热液成因铜镍硫化物±贵金属矿床类型的识别,不仅实现了铜镍硫化物±贵金属矿床成矿理论的突破,而且大大拓宽了找矿思路,按照热液成矿的观点,所有遭受了热液蚀变的各类基性-超基性岩都有可能发生Cu、Ni、PGE、Au、Co等元素的矿化。

秦岭和兴蒙造山带发育了不同时期的蛇绿岩套,弧后盆地(如二郎坪弧后盆地)也发育基性-超基性岩,一些古老地体中(如南秦岭的碧口、安康、陡岭、武当、随县等地体)发育基性-超基性岩侵入岩,按照热液成矿的观点,它们具有寻找铜镍±贵金属矿床的潜力。事实上,碧口地体北缘的煎茶岭铜镍矿床产于强蚀变镁质超基性岩体中,容矿岩体同样可能属于构造侵位的地幔岩,其7件样品Re-Os同位素模式年龄介于851.0—1242.5Ma,其中的4件样品给出 $878 \pm 27\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 3.5$)的等时线年龄(王瑞廷等,2003),与周庵岩体5件样品的Re-Os同位素等时线年龄($1009 \pm 79\text{Ma}$, $\text{MSWD} = 1.1$)(糜梅,2008)相接近,可能记录了1050Ma左右扬子板块北缘块体拼合、地幔岩构造侵位事件(晋宁运动)。

1.6 提出成矿系统是地球动力学研究的有效探针

地质学家很早就已经认识到矿床是岩石圈板块运动与演化的产物,不同类型的成矿系统发育在不同的构造环境,某些特定的构造环境有利于某些类型矿床的形成。例如,大

陆裂解地带有利于铬铁矿、铜镍硫化物矿床、钒钛磁铁矿、铂族元素矿床、与火成碳酸岩或碱性岩有关的稀土元素矿床发育,由洋壳俯冲引发的岩浆弧区有利于斑岩型铜金矿床和浅成低温热液型金、银、铜矿床发育,海底热液活动(喷流)有利于层状铜锌、铅锌矿床的形成,被动大陆边缘有利于巨量铁、锰、铝等金属矿床沉积,残留海盆地常发育巨厚蒸发岩系并蕴涵巨型钾盐等盐类矿床,等等。而且,前已涉及,不同的构造-物质背景导致不同类型的成矿系统发育,即使发育了相同类型的成矿系统,其地质地球化学特征也有所不同。例如:前述大陆内部浆控高温热液成矿系统的成矿流体相对于岩浆弧区同类成矿系统具有较高的 K/Na 、 F/Cl 、 CO_2/H_2O 等比值,钾长石化、绿帘石化、萤石化、碳酸盐化等明显较强;大陆碰撞带的卡林型-类卡林型金矿床往往发育 CO_2-H_2O 包裹体,但活动大陆边缘弧后盆岭省的同类金矿床则不发育 CO_2-H_2O 包裹体(详见后述)。更重要的是,矿床是一种独特而复杂的地质体,往往是多种地质过程综合作用的结果,更全面或完整地记录了地球演化的过程,避开了某些简单地质体只能给出某方面信息的片面性;在各类地质体中,只有矿床是经过了大量工程勘查的地质体,其三维形态、内部结构、元素和矿物组分特征及其变化被详细而准确地揭示出来,使基于矿床研究而得出的关于地球动力学演化的认识具有更高的可靠性。例如,河南舞阳铁矿勘探过程中,60 多个钻孔打穿了赋矿太华超群推覆体,清楚地揭示太华超群推覆到震旦系地层之上,给出了推覆体底面的三维形态(陈衍景和富士谷,1992)。因此,本项目提出,成矿系统是地球动力学研究的有效探针,并通过列举大量研究实例予以说明(陈衍景等,2008)。

2 华北克拉通构造演化与成矿

华北克拉通是华北大陆边缘造山与成矿的前提,它的终极克拉通化完成于 1850Ma 以前,其北边界为康保-赤峰断裂,南边界为黑沟-栾川断裂。1850 ~ 250Ma 期间,华北克拉通作为统一的大陆整体与其它板块相互作用,其地质演化受到板缘构造作用的影响。华北克拉通北缘,即内蒙地轴-燕山-辽吉地区,很大程度上表现为中亚造山带的特征,而南缘(华熊地块-胶东地块)则表现出古特提斯造山带的特征,甚至可分别作为兴蒙造山带和中央造山带的一部分。在 250Ma 之后,华北大陆与北部的西伯利亚和南部的扬子大陆板块碰撞,并与东部太平洋板块相互作用,华北克拉通的整体性又遭受了破坏,表现出内部不同地区(块体)之间的差异性,也作为整体表现出与南北缘造山带之间的差异性。因此,华北克拉通构造演化与成矿研究是华北大陆边缘造山与成矿研究的一部分。近期关于华北克拉通早前寒武纪研究演化与成矿研究的主要进展或新问题如下(以地质时代顺序):

2.1 花岗绿岩地体发育与 Kenor 超大陆聚合

关于硅铝质大陆壳形成方式,学者们提出了多种解释,端元性观点之一是地球形成初期就形成了现今规模的硅铝质大陆壳,之二是陆核经过不断增生、积累使陆壳体积达到现今规模(详见 Taylor and McLennan, 1985, 及其引文)。关于现今各大陆的早前寒武纪克拉通核心的性质,一些学者则认为它们由多个地块或地体在不同时期拼贴而成;一些学者则认为它们原本就是统一的“铁板一块”的太古宙克拉通,或者由统一的太古宙大陆分裂而来。就华北克拉通而言,钱祥麟(1996)认为现今统一的华北克拉通至少在太古宙就已经形成,根据是华北克拉通周缘和内部均发育太古宙孔兹岩系(Khondalite Series, 又译为孔达岩系,原岩为稳定台地相沉积物)发育;相反,一些学者(陈衍景和富士谷,1992;胡受奚等,1997; Zhao GC *et al.*, 2005, 2006; Zhai *et al.*, 2005)认为华北克拉通是由多个地块/地体在 1850Ma 之前历经多次增生、拼贴形成,各地块或地体的基底是 2500 Ma 之前形成的不同样式的花岗岩-绿岩带。

最新研究表明(翟明国和彭澎, 2007; Santosh *et al.*, 2007; Xu XS *et al.*, 2009): 华北克拉通地区的孔兹岩系均形成于古元古代,而非太古宙(详见下述);现今华北克拉通确由多次拼贴形成,至少两次重要的陆块会聚、拼贴事件分别在 2100 ~ 1850Ma(后述)和 2600 ~ 2500Ma 期间。其中,2600 ~ 2500Ma 期间的会聚拼贴事件与全球性 Kenor(或 Uran)超大陆聚合事件(Kerrick *et al.*, 2000; Bekker and Eriksson, 2003)吻合。例如,周艳艳等(2009a, b)研究证明登封花岗-绿岩地体的 TTG 建造形成于 2500 ~ 2600Ma 之间的岛弧岩浆作用,并在 2340 ~ 1850Ma 期间遭受了构造热事件的改造,在 2500 ~ 2600Ma 时嵩箕地块与华熊地块之间尚有洋盆相隔。另外, Li *et al.* (2002)此前就报道了遵化地区豆荚状铬铁矿 Re-Os 等时线年龄为 2547 ± 10 Ma,考虑到铬铁矿矿床(点)及其含矿超基性岩体被 2.5Ga 左右的花岗岩类侵入破坏,认为遵化含铬铁矿超镁铁质岩代表古洋壳碎片,洋盆闭合于 2.5Ga 左右,即 2.5Ga 发生了陆块会聚作用。

2.2 孔兹岩系形成时代的重新厘定

华北克拉通广泛发育一套典型的孔兹岩系,例如:华熊地块太华超群中的水滴沟群、胶东地区的荆山群和粉子山群、辽吉地块的集安群、辽西地区的建平群、内蒙大青山地区的丰镇群、乌拉山地区的桑干群上部、阿拉善地块的贺兰山群和太行山区的阜平群湾子组(Chen YJ *et al.*, 1998b; 陈衍景等, 2000; 翟明国和彭澎, 2007; 及其引文)。这套岩石建造因变质程度较深(角闪岩相-麻粒岩相),曾长期被作为太古宙(如:董申保等, 1986; 钱祥麟, 1996)。同时,该套地层富含石墨矿床、条带状铁建造、富磷沉积物,具有 PAAS 型稀土元素配分特征(Chen YJ *et al.*, 1998b),被一些学者认为属于 2300 ± 50 ~ 1850Ma 期间形成的古元古代地层(陈衍景,

1990; 陈衍景等, 2000; 胡受奚等, 1997; 及其引文)。然而, 由于缺乏准确的同位素年代学研究资料, 太古宙与古元古代之争长期悬而不决。最近, Xu XS *et al.* (2009)、Wan YS *et al.* (2006) 运用 SHRIMP 或 LA-ICPMS 技术研究了这套负变质岩中碎屑锆石的形成年龄和变质年龄, 确定它们的沉积时间均在 2300 ~ 1850Ma 之间, 特别是 2300 ~ 2150Ma 之间。

需要说明, 重新厘定孔兹岩系及其同期地层(如溇沱群, 绛县群, 安沟群, 辽河群, 嵩山群)的形成时代(参见翟明国和彭澎, 2007), 奠定了正确认识华北克拉通形成演化与早前寒武纪成矿规律的基础。

2.3 Jatulian 事件的揭示及其重要意义

Jatulian 或 Lomagundi 事件最早由 Schidlowski 发现(参见汤好书等, 2008, 2009b), 最初以古元古代碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 显著正异常为标志; 事件始于 2300 \pm 50Ma, 其后直到 2050Ma 期间发生了一系列全球性大气圈、生物圈、水圈和沉积圈性质的剧变, 形成了众多超大型沉积-变质矿床(如石墨、Fe、U、P、REE、Pb、Mg、B 等)和叠层石, 被作为地球表层系统的灾变事件(陈衍景, 1990; 陈衍景等, 2000)以及古元古代之成铁纪(Siderian)与层侵纪(Rhyasian)分界。因此, 最近 20 年国际前寒武纪研究的最大突破就是对 Jatulian 事件的确证和对其性质的重新认识。然而, Jatulian 事件研究在我国长期被忽视, 致使孔兹岩系等典型的 Jatulian 事件之后的沉积物被长期错误地划归太古宙。

最近, 汤好书等(2008, 2009c)研究表明, 辽北辽河群关门山组 42 件白云岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 3.5 ~ 5.9‰ 之间, 具有明显的正异常特征, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 15.4 ~ 24.8‰; 辽南辽河群大石桥组等碳酸盐地层也显示了明显的 $\delta^{13}\text{C}$ 正向漂移, 确证 Jatulian 事件在华北克拉通表现强烈。而且, 通过碳氧同位素和元素地球化学以及同位素地质年代学研究, 进一步证明了大石桥超大型菱镁矿和后仙俗超大型硼矿床成矿过程的复杂性(汤好书等, 2009a, b, c), 包括初始蒸发沉积、成岩作用、区域变质和流体交代作用以及成矿后的局部蚀变作用(Jiang *et al.*, 1997, 2004; Jiang and Jiang, 2000; 陈从喜等, 2003)。王慧媛和彭晓蕾(2008)通过研究辽宁翁泉沟超大型硼镁铁矿的磁铁矿成因, 证明翁泉沟硼镁铁矿也经历了与大石桥菱镁矿类似的形成过程。

值得强调, Jatulian 事件是深刻理解 Kenor 超大陆在成铁纪裂解和 Columbia 超大陆在造山纪(Orosirian: 2050 ~ 1800Ma)聚合的关键环节。Xu XS *et al.* (2009)最新研究表明, 华北克拉通南缘太华超群之荡泽河群角闪岩、片麻岩(原岩为火山岩)主要形成于 2.5 ~ 2.3Ga, 佐证了成铁纪裂解事件在华北克拉通的存在。

2.4 华北克拉通形成与 Columbia 聚合

与 Columbia 超大陆聚合过程(Zhao GC *et al.*, 2002)相类似, 现今的华北克拉通(不含未知的解体出去的部分)是由

多个块体分阶段拼合而形成的(翟明国和彭澎, 2007; Zhao GC *et al.*, 2005, 2006; Zhai MG *et al.*, 2005; Santosh *et al.*, 2007)。

就华北克拉通南缘(陈衍景和富士谷, 1992; Chen and Zhao, 1997)而言, 嵩箕地块的早前寒武纪变质基底包括了如下构造层(自下而上): 石碑河 TTG 杂岩(>2.5Ga)、登封群岛弧火山-沉积岩(2.6 ~ 2.45Ga)、安沟群双模式火山岩(2.3 ~ 2.15Ga)、嵩山群变质碎屑沉积岩(2.0 ~ 1.85Ga), 各构造层之间均为不整合接触, 变质程度依次降低。华熊地块包括了太华复合地体和崤山山地体, 太华复合地体以发育太华超群为特征, 主要岩性单位有背孜群(>2.6Ga)、荡泽河群(2.6/2.5 ~ 2.3Ga)和水滴沟群孔兹岩系(2.3 ~ 2.15Ga); 崤山山地体不发育太华超群, 早前寒武纪变质基底与中条山相似, 自下而上为天爷庙杂岩(>2.3Ga)、绿片岩相变质的崤山群双模式火山岩(2.3 ~ 2.15Ga)和铁铜沟群磨拉石建造(2.05 ~ 1.85Ga)。上述表明, 华北克拉通南缘至少发生了两次属于 Columbia 超大陆旋回的会聚拼贴事件, 分别为 2.15Ga 的嵩阳运动和 1.85Ga 的中岳运动。事实上, 周艳艳等(2009b)对登封地区 TTG 岩石的测年数据中也明显记录了这两次变质事件。

2.5 1850 ~ 1700Ma 华北克拉通裂解-成矿事件的确定

Columbia 超大陆会聚之后, 华北克拉通作为统一的大陆板块而经历了 1850 ~ 250Ma 期间的陆缘裂解、增生和碰撞体制的构造作用(后述), 使克拉通边缘表现出相邻造山带的特征, 甚至个别裂解碎块被卷入造山带内部。例如, 南缘的华熊地块表现为秦岭造山带的特征, 北缘的内蒙地轴表现出兴蒙造山带的部分特征。在这一过程中, 现今范围的华北克拉通的整体性没有被破坏, 因此克拉通内部受陆缘造山作用影响较弱, 盖层沉积物变质变形微弱, 并蕴涵铝土矿、铁、煤等风化或沉积矿床。

华北克拉通在 1850 ~ 1700Ma 期间发生了裂解事件。在克拉通内部广泛发育该时期的基性脉岩(翟明国和彭澎, 2007; Hou GT *et al.*, 2006, 2008; Peng P *et al.*, 2008); 狼山-渣尔泰山发育了双裂谷体系, 形成了霍各乞、东升庙等众多铜铅锌矿床或含矿岩系(Ding and Jiang, 2000; 彭润民等, 2007a, b); 白云鄂博地区发育了岩浆碳酸岩脉, 并促进了白云鄂博稀土铈铁矿床的形成(Xu C *et al.*, 2008a, b); 内蒙丰镇和河北怀安地区分别发育了浑源窑透辉石碳酸岩脉和右所堡正长岩-透辉石碳酸岩脉(阎国翰等, 2007); 河北大庙地区发育斜长岩杂岩体, 形成了大庙磷钛铁矿矿床(陈伟等, 2008); 吕梁地区发育了小两岭组裂谷火山岩建造(徐勇航等, 2007)。另外, 豫陕交界处的熊耳群虽然被很多学者解释为陆缘弧火山岩建造(Zhao GC *et al.*, 2005; He YH *et al.*, 2008; 胡受奚等, 1997; 陈衍景和富士谷, 1992), 但也有不少学者认为是与地幔柱活动有关的裂谷火山岩(Zhao TP *et al.*, 2002; 徐勇航等, 2008)。

现在面临的新问题是,地幔柱活动有利于铬铁矿、PGE-铜镍硫化物等岩浆矿床发育(Pirajno, 2009),但华北克拉通地区尚未发现有重要价值的 1850 ~ 1700Ma 的该类型矿床,值得进一步研究。

2.6 中生代华北克拉通破坏与成矿

中元古代-古生代期间,虽然华北克拉通南缘和北缘受到板缘造山带地质作用的影响(He YH *et al.*, 2009a,b; Fan *et al.*, 2008; 汤好书等, 2009a; 胡受奚, 1988),但总体而言,华北克拉通不同地区的地质演化和沉积地层发育表现出较好的统一性,如长城系至下奥陶统浅海台地相地层的发育,上奥陶统至下石炭统的缺失,上石炭统至三叠系煤系地层的发育,岩浆活动的缺失或微弱,热液矿床的匮乏等,均显示了其作为克拉通或地台的整体性或完整性。进入中生代,华北克拉通开始“被活化”,发育较多岩浆岩和热液矿床(Chen YJ *et al.*, 2007),其整体性和统一性也随即遭受破坏。

自西向东,克拉通破坏程度变强。表现在岩石圈和地壳厚度逐渐变薄,沿太行山断裂和郯庐断裂出现重力梯级带(Yuan, 1996a),并发育两条近南北向的岩浆-矿床带,岩浆-成矿作用年龄分别集中在 140 ~ 102Ma 和 135 ~ 100Ma(Chen *et al.*, 2007),自西向东变新。事实上,这种自西向东成岩、成矿年龄变新的现象也见于华北克拉通南缘、北缘及其邻近的造山带内。例如,华北克拉通南缘华熊地块的主成矿年龄在 130 ~ 140Ma 之间,而胶东则为 120Ma(Yang and Zhou, 2001; Chen YJ *et al.*, 2005; 侯明兰等, 2006; 蒋少涌等, 2009)。而且,蒋少涌等(2009)认为,小秦岭是碰撞造山体制形成的造山型金矿田,而胶东金矿省则形成于太平洋板块俯冲诱发的加厚岩石圈两阶段拆沉作用过程中;Sun WD *et al.* (2007)则认为胶东矿集区缘于太平洋板块俯冲方向改变所引起的应力场变化。

中生代华北克拉通破坏始于边缘。表现在:(1)华北克拉通南缘和北缘均发育三叠纪或印支期的花岗岩类岩浆侵入和内生矿床成矿作用,而华北克拉通内部则缺乏三叠纪的岩浆岩和内生矿床(后述);(2)华北克拉通南缘和北缘大量发育侏罗纪或燕山早期的花岗岩类和内生矿床,而克拉通内部则相对贫乏,尤其缺乏早中侏罗世花岗岩和矿床;(3)早白垩世的中酸性岩浆活动和多种金属成矿作用遍及华北克拉通南北缘(含胶东),但在华北克拉通内部只沿太行山断裂带和郯庐断裂带及其附近发育;(4)克拉通边缘的地壳和岩石圈厚度、地球物理场(Yuan, 1996a)及地貌等变化或起伏幅度大,而克拉通内部变化幅度较小。

由上可见,中侏罗世及其以前,华北克拉通的构造演化主要受古亚洲洋和古特提斯构造-成矿域的影响;在白垩纪及其以后,华北克拉通地质演化主要受太平洋板块活动的引领;在晚侏罗世-白垩纪初,古亚洲洋和古特提斯构造域的东段转化为太平洋构造域,引发了大规模、多样式、多矿种的成矿作用(翟明国等, 2003; 陈根文等, 2008)。

3 北缘造山带构造演化和成矿

位于华北克拉通北缘的兴蒙造山带是中亚造山带的一部分。中亚造山带由古亚洲洋长期演化及其与相邻板块相互作用形成,以古生代小型陆块与缝合带相嵌、新生代山-盆耦合的地质构造格局为特征(陈衍景, 2000)。古亚洲洋曾存在于西伯利亚、塔里木-华北古大陆之间,是包括了众多小洋盆和微陆块的多岛洋;古亚洲洋俯冲消减导致岩浆弧大量发育和陆壳显著增生,洋盆于古生代末(局部可能延至中生代初)闭合,然后西伯利亚与塔里木-华北古大陆之间发生碰撞造山作用,形成中亚造山带。由于大陆碰撞期间的强大挤压应力被两大陆之间的块体旋转、走滑、压剪、拉分等作用所消耗,因此,这种由多岛洋演化、闭合而形成的大陆造山带具有强增生、弱碰撞的特点,被称为增生型造山带。在古亚洲洋闭合之后的中生代,中亚造山带东段(即兴蒙造山带)又与北部的蒙古-鄂霍茨克和东部的太平洋板块相互作用,且受到南部特提斯构造域演化的远距离影响,叠加了中生代构造变形、岩浆活动和成矿作用。由于上述原因,兴蒙造山带的构造格局、过程和成矿类型、矿床分布规律等变得异常复杂,研究难度较大;而且,兴蒙造山带多属森林、草甸、戈壁、冻土覆盖区,基岩出露较少,连续性差,增加了研究工作的难度。因此,总体而言,兴蒙造山带的地质研究程度较低,仍有一些基础性的重大地质和成矿问题尚未解决,例如:(1)兴蒙造山带经历了强烈的古生代增生造山作用,应有大量古生代增生体制的成矿系统发育,但大兴安岭及其以东地区的古生代矿床较少;(2)大兴安岭及其以东地区中生代成矿作用强烈,成矿事件究竟与太平洋板块活动有关,还是与蒙古-鄂霍茨克洋闭合有关,拟或是兴蒙造山带在中生代自身演化的结果?(3)蒙古、俄罗斯等国的中亚造山带内发现了大批超大型铜矿(欧玉陶勒盖等)、铀矿(红石、乔巴山等)和金矿(巴列依、达拉松、克留切夫等),而我国境内尚未发现超大型的同类矿床,其原因是什么?境外巨型成矿带如何在境内延伸?等等。我们围绕这些问题开展了研究,取得了一些重要进展或新认识。

3.1 白云鄂博矿区年龄谱系的建立和矿床成因再认识

白云鄂博超大型稀土铌钽铁矿的成因倍受世界瞩目,本项目(杨奎锋等, 2007; Fan HR *et al.*, 2006, 2008; Xu C *et al.*, 2008a, b; Yang XY *et al.*, 2009)展开综合研究。首先确定了成矿过程的年龄谱系(Fan HR *et al.*, 2008):(1)利用锆石 LA ICPMS U-Pb 分析,获得矿区英云闪长岩的年龄分别为 1890 ± 22 Ma、 2023 ± 16 Ma 和 2025 ± 19 Ma,含蓝晶石片麻岩和片理化片麻岩年龄分别为 1905 ± 9 Ma、 1893 ± 7 Ma 和 1881 ± 14 Ma,确定了基底杂岩(白云鄂博群主体)由变质岩和 TTG 组成,形成于 1850Ma 之前的早前寒武纪。(2)用同位素稀释质谱法(TIMs)和 SHRIMP 法测得侵位于

白云鄂博群及基底杂岩的碳酸岩脉(部分岩脉发生稀土矿化)的锆石 U-Pb 年龄(上交点)分别为 1416 ± 77 Ma 和 1374 ± 42 Ma, 继承锆石年龄分别为 1925 ± 8 Ma 和 1962 ± 42 Ma, 确定碳酸岩脉侵位于 1400Ma 左右, 侵位过程中捕获了基底杂岩中的锆石。(3) 获得矿区矽卡岩单颗粒金云母 Rb-Sr 等时线年龄为 309 ± 12 Ma (杨奎锋等, 2007), 晚于前人获得的稀土矿物 Th-Pb 等时线年龄 ($398 \sim 555$ Ma) 以及切割稀土矿脉的黄铁矿 Re-Os 等时线年龄 439 ± 86 Ma, 证明矽卡岩化晚于主要的 REE 矿化。(4) 对 1:5 万和 1:25 万白云鄂博幅地质图中标出的从晚泥盆纪到中侏罗纪的各类侵入体或岩脉进行 LA-ICPMS U-Pb 年龄研究, 15 件样品中多数岩石中含有古老继承锆石(年龄 $1.8 \sim 2.5$ Ga), 而年轻锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值均在 $263 \sim 281$ Ma 之间, 年龄范围狭窄(不足 20Ma), 其 328 个测试点年龄的统计峰值为 269Ma, 证明它们均为二叠纪侵入岩, 而非过去认为的泥盆纪、石炭纪、三叠纪或侏罗纪(范宏瑞等, 2009); 而且, 所有这些二叠纪岩浆岩具有成矿后岩浆活动的特征。(5) 主成矿事件发生在加里东期, 即早古生代末(章雨旭等, 2008; Fan *et al.*, 2006, 2008; Yang *et al.*, 2009)。

通过矿物组合和流体包裹体研究, 发现矿石和脉石矿物中发育 3 类包裹体, 即两/三相富 CO_2 包裹体、三相高盐度含子晶(个别子晶为稀土矿物)包裹体和两相水溶液包裹体; 显微测温研究表明初始成矿流体还含有较高的稀土元素, 成矿流体为 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}-(\text{F}-\text{REE})$ 体系, 成矿流体的沸腾或不混溶作用导致成矿物质的快速沉淀聚集。

综合多方面结果, 认为白云鄂博矿床属于多因叠加的成矿系统, 并可能与澳大利亚的 Olympic Dam 相似, 属于 IOCG 型(陈衍景等, 2007; Pirajno, 2009)。

3.2 狼山-渣尔泰山成矿带矿床成因新认识

内蒙古狼山-渣尔泰山是我国最重要的铅锌铜(金)成矿带之一, 包括了东升庙、炭窑口、霍各乞、甲生盘、朱拉扎嘎等著名矿床(丁梯平等, 1992; Ding and Jiang, 2000)。彭润民等(2007a, b)研究表明, 矿田形成于两期构造-成矿作用。早期成矿事件发生在中元古代陆缘裂陷槽发育过程中, 裂陷槽由两个裂陷中心组成, 裂陷中心分别位于狼山东南侧和西北侧, 裂陷中心发育强烈的海底热水喷流-沉积成矿作用以及局部的海底岩浆活动, 形成层状-似层状的热液沉积型(含 SEDEX 和 VMS 型)矿床或矿胚。晚期成矿作用发生在古生代的造山过程中(可能为海西期), 表现为矿区大量发育石英-黄铜矿脉、粗晶闪锌矿脉、含黄铜矿硫化物脉等, 这些脉体充填于切穿围岩地层的裂隙中, 一些裂隙同时穿切了变质变形的地层的片理构造, 且脉体两侧围岩蚀变显著; 晚期成矿的另一证据是脉状矿体的黄铜矿、黄铁矿、石英等矿物中流体包裹体的起爆温度高于 300°C , 高于矿区层状-似层状的热液沉积型矿体中矿物包裹体的起爆温度。因此, 狼山-渣尔泰山铅锌铜(金)成矿带的矿床可概括为陆缘裂陷环境的

热水沉积成矿作用叠加后期挤压造山过程的热液成矿作用的多因复成矿床, 简称为造山叠加热水沉积型矿床(Orogenic-overprinted hydrothermal sedimentary type deposit)。事实上, 类似的造山叠加热水沉积型矿床也见于其它地区, 如辽宁红透山铜矿(顾连兴等, 2004, 2005; Gu LX *et al.*, 2007)、陕甘交界处的厂坝-银洞子铅锌银矿田(Jiang SY *et al.*, 1995; Li YH *et al.*, 1995; 王天刚等, 2008)、青海锡铁山铅锌矿床(吴昌志等, 2008)、河南水洞岭和大河铜矿床(徐勇航等, 2009)。

虽然对于狼山-渣尔泰山地区的造山叠加成矿作用的时间、成矿流体的性质、矿化类型等诸多问题尚待深入研究, 但初步的矿床成因认识突破将会拓宽该地区 and 相似地区的找矿思路, 引领新的找矿突破。

3.3 古亚洲洋最终闭合时间和空间的厘定

索伦-延吉缝合带长期被作为古亚洲洋最晚的缝合带(祁进平等, 2005 及其引文)。内蒙古锡林浩特地区是该缝合带穿过的基岩出露较好的地区之一, 自然为研究揭示古亚洲洋闭合过程的理想地区之一。据 Chen B *et al.* (2009) 研究, 锡林浩特地区的基岩包括 4 类: (1) 含蓝片岩的蛇绿混杂带, 虽与晚古生代地层共生, 但其时代争议颇多。(2) 分布于索伦蛇绿混杂带南北两侧的锡林浩特绿片岩相-低角闪岩相的变质杂岩, 原岩为沉积岩系, 长期被作为前寒武纪岩块; 锆石 U-Pb 年龄主要为古生代 ($305 \sim 530$ Ma), 次为前寒武纪 ($780 \sim 900$ Ma 和 $1500 \sim 2800$ Ma); 年龄变化范围指示锆石来源复杂, 个别锆石甚至有变质增生边, 显示源岩主要为弧岩浆岩; 考虑到 < 340 Ma 的年龄数据只有 3 个, 可能受到变质作用影响, 认为变质地层是沉积于 305Ma 之前的古生代弧前沉积物, 而非前寒武纪陆块; 碎屑锆石除来自弧岩浆岩之外, 还来自南蒙微大陆和华北克拉通, 表明锡林浩特杂岩系两个陆块对接前的沉积物。(3) 与洋壳俯冲有关的白音宝力道弧岩浆杂岩, 由辉长岩、闪长岩、英云闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩组成, 其锆石表面年龄介于 $510 \sim 303$ Ma, 铀铅谐和年龄为 311 ± 5 Ma, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $0 \sim 18$ (但 1 颗锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -11), 岩石 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 6.2 \sim 2.5$, I_{Sr} 介于 $0.7037 \sim 0.7068$, 表明岩浆岩属于晚古生代陆缘弧岩浆作用的产物。(4) 碰撞体制发育的哈拉图后碰撞花岗岩杂岩体, 主要由二长花岗岩和少量花岗闪长岩组成, 侵位于前述 3 类岩石中, 其锆石 U-Pb 年龄是 234 ± 6 Ma; 该岩体 FeO、MgO、CaO、TiO₂、Cr、V、Sr 等含量低, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 1 \sim -2$, $I_{\text{Sr}} = 0.7043 \sim 0.7061$; 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $+12 \sim -4.5$, 两颗锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 低至 -18 和 -26 , 表明花岗岩属壳源, 源区岩性不均, 包括了年轻洋壳、弧岩浆岩以及前寒武纪陆壳。上述信息可将索伦缝合带代表的古亚洲洋闭合时间限定在 $311 \sim 234$ Ma 之间。

Zhang SH *et al.* (2009) 研究表明, 华北克拉通北缘发育安第斯型岩浆弧环境的年龄为 $324 \sim 300$ Ma 的闪长岩和花岗闪长岩类, 而后碰撞花岗岩类的年龄为 $254 \sim 237$ Ma, 据此确

定古亚洲洋闭合时间和华北-蒙古弧碰撞时间限定在 290 ~ 250Ma。

李承东等(2007)测得索伦-延吉缝合带南侧的吉林桦甸色洛河地区陆弧高镁安山岩锆石 SHRIMP 年龄为 $252 \pm 5\text{Ma}$, 表明 252Ma 时仍存在着古亚洲洋板块倾向南的俯冲作用。此外, 范宏瑞等(2009)测得白云鄂博地区辉长岩-闪长岩-花岗闪长岩套 15 件样品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值在 263 ~ 281Ma 之间, 所研究样品似显弧岩岩特点。考虑到白云鄂博位于华北克拉通的最西北角, 而 254 ~ 237Ma 期间大量发育后碰撞花岗岩类, 我们认为古亚洲洋在兴蒙造山带西部的闭合时间应晚于 263Ma, 早于 254Ma。

综合上述, 我们认为, 古亚洲洋在华北克拉通以北地区的最晚闭合位置是索伦-延吉缝合带; 古亚洲洋沿索伦-延吉缝合带自西向东闭合, 彻底闭合时间为 260 ~ 250Ma。

3.4 华北陆块北缘晚古生代岩浆弧增生与成矿事件的确定

古亚洲洋自西向东逐渐闭合, 中亚造山带以古生代大陆增生强烈为特征, 晚古生代岩浆弧及岩浆-流体成矿系统的广泛发育已属不争的事实(陈衍景, 2000 评述)。但是, 晚古生代岩浆弧是否能够延伸至华北克拉通北缘的“内蒙地轴”一带, 能否形成重要矿床, 属于前人较少研究和讨论的问题。

根据范宏瑞等(Fan HR *et al.*, 2008; 范宏瑞等, 2009)在白云鄂博地区获得的大量二叠纪岩浆岩年龄以及张拴宏等(2007)、王惠初等(2007)、Zhang SH *et al.* (2009)研究总结, 基本可以肯定华北古陆北缘发育晚古生代岩浆弧, 岩浆弧空间范围总体以“内蒙地轴”为中心位置, 自西向东持续时间增长, 至吉林东部可能延迟到三叠纪初; 而且, 晚古生代弧岩浆活动可能有早、晚两个主要期次。

第 1 期发生在泥盆纪-石炭纪, 时限在 390 ~ 324Ma, 岩石组合为正长岩、二长岩、二长闪长岩及基性岩(辉石岩及角闪岩), 岩体主要起源于岩石圈地幔部分熔融, 并有古老地壳物质的混染。偏碱性者多分布在内蒙地轴南侧, 分布受近东西向深大断裂制约, 与东坪金矿区、哈达门沟金矿等有成因联系, 也与后仙峪硼矿区矿体与闪长岩脉接触带蚀变岩的金云母-绿帘角闪岩年龄为 $386.5 \pm 3.9\text{Ma}$ (MSWD = 1.4) (汤好书等, 2009a) 所反映的信息相一致。究竟上述岩石分布是否能够代表活动大陆边缘岩浆岩极性特征, 尚待进一步研究确定。

第 2 期岩浆活动为晚石炭世-二叠纪, 分布范围较广, 岩性组合主要为角闪辉长岩-闪长岩-石英闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩, 岩体侵位年龄为 324 ~ 259Ma。岩石化学以钙碱性-高钾钙碱性、准铝质及 SiO_2 含量变化大为特征。花岗质岩石普遍具 I 型花岗岩及埃达克岩特征。大多数石炭纪岩体(如隆化、波罗诺、虎什哈岩体等)具有较低的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-17.1 \sim -11.5$)及锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-38.3 \sim -11.2$), 表明其源于古老下地壳物质的重熔。岩石组合、岩石化学及同位素地球化学特征表明其形成于安第斯型大陆边缘, 与古亚洲洋板块向华北地块的俯冲有关, 并导致了内蒙古车户沟斑

岩铜钼矿床、哈达庙斑岩型金矿(鲁颖淮等, 2009a)和吉林小西南岔斑岩-夕卡岩型铜金矿床等一批矿床的形成。其中, 车户沟矿床的细脉状黄铜矿 Rb-Sr 等时线年龄为 $260 \pm 14\text{Ma}$ (刘建明, 2007, 项目成果交流), 浸染状辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 $258 \pm 3\text{Ma}$; 哈达庙金矿成矿斑岩锆石 LA-ICPMS 铀铅年龄为 $271.8 \pm 3.3\text{Ma}$ (MSWD = 2.3, $n = 15$) (鲁颖淮等, 2009a); 小西南岔含矿高镁闪长岩 SHRIMP 锆石年龄为 $257 \pm 3\text{Ma}$ (郭峰, 项目内部交流)。

此外, 据张拴宏(973 项目成果交流), 北京西山上古生界地层中的凝灰岩夹层锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $296 \pm 4\text{Ma}$, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 $-15.9 \sim -10.7$, 表明凝灰岩成岩岩浆主要来源于内蒙隆起区地壳, 同样指示晚古生代内蒙隆起区有安第斯型活动陆缘的火山活动。

3.5 印支期构造-岩浆-成矿事件的发现

据李锦轶等(2007)、张拴宏等(2007)、Zhang LC *et al.* (2009)和 Wan B *et al.* (2009)等, 华北克拉通北缘和兴蒙造山带南部发育了较多的晚二叠世和三叠纪的花岗岩类以及相关斑岩型-夕卡岩型钼矿床。如鸡冠山斑岩钼矿之成矿斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $245 \pm 2.7\text{Ma}$ (曾庆栋等, 2009b) 花岗岩类主要为花岗岩、二长花岗岩、正长花岗岩、石英闪长岩, 其形成年龄介于 254 ~ 204Ma (详见李锦轶等, 2007)。其中, 花岗岩类具有高钾、高硅、高碱的特征, 成因类型复杂, 多数呈现同碰撞壳源花岗岩特征(如哈拉图岩体, Chen B *et al.*, 2009), 或显示高分异 I 型花岗岩(如鸡冠山)或 A 型花岗岩的特征, 部分具有埃达克岩的地球化学特征。这些岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -10.6 到 -8.8 , 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -14.9 到 -6.7 , 可能是碰撞体制形成的花岗岩类。据鲁颖淮等(2009b), 松辽盆地以东的黑龙江金厂金矿蚀变花岗岩围岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $198.0 \pm 3.9\text{Ma}$, 成矿闪长岩体的两组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄分别为 $202.1 \pm 3.0\text{Ma}$ 和 $111.5 \pm 1.2\text{Ma}$, 代表了两期岩浆-流体活动, 显然 200Ma 左右的花岗岩应形成于印支期末。

另外, 在 NE 向太行山-大兴安岭构造带与东西向兴蒙造山带交汇处及太行山腹地, 可见较多的同期闪长岩、基性脉岩和碱性岩等, 如河北涿鹿县矾山含磷矿床的辉石岩-正长岩-碳酸岩杂岩体和山西怀仁县窑子头煌斑岩-碳酸岩脉(阎国翰等, 2007), 它们多属于以幔源为主的壳幔混源或幔源岩浆岩, 可能是华北与中蒙地块碰撞时诱发的华北克拉通板块撕裂(Tear up)或板片构造窗(Slab window)构造作用的产物。例如, 据牛晓露等(2009), 矾山杂岩体 Sm-Nd 等时线年龄为 $243.4 \pm 9.7\text{Ma}$, Rb-Sr 等时线年龄为 $218 \pm 8\text{Ma}$, 属于以幔源为主的壳幔相互作用的产物。

3.6 世界首例造山型铜矿的识别—白乃庙铜矿

内蒙古白乃庙铜(伴金、钼)矿床位于华北板块北缘的温都尔庙加里东期增生带内, 其成矿时间、成因类型和构造环

境一直存在分歧。陈衍景(2006)和李文博等(2007, 2008)研究表明,石英脉型和蚀变岩型矿体受EW向韧-脆性剪切带控制,成矿过程分为三个阶段:早阶段石英-黄铁矿,乳白色石英和粗粒黄铁矿变形、破碎;中阶段多金属硫化物充填胶结早阶段变形、破碎的石英角砾和黄铁矿裂隙;晚阶段为穿切早中阶段矿物组合的石英-碳酸盐细脉。流体包裹体包括富CO₂型、含CO₂型和水溶液型;早、中、晚阶段均一温度分别为248~380℃、215~241℃和137~181℃;盐度分别为4.34wt% NaCl. eqv ~ 6.59wt% NaCl. eqv、2.90wt% NaCl. eqv ~ 4.18wt% NaCl. eqv 和 0.50wt% NaCl. eqv ~ 2.00wt% NaCl. eqv; 流体包裹体气相成分为CO₂、CH₄和N₂。成矿流体盐度低,富CO₂。白乃庙铜矿床地质特征、成矿流体与造山型矿床一致,属于首例造山型铜矿。

运用高精度单颗粒激光熔融氩法对含矿石英脉中的黑云母和白云母矿物进行了年龄测定,获得黑云母样品22点⁴⁰Ar/³⁹Ar等时线年龄为396±2Ma(MSWD=20),白云母样品23点⁴⁰Ar/³⁹Ar等时线年龄为358±2Ma(MSWD=11),矿床形成于泥盆纪,与赋矿地层白乃庙群的峰期变质作用年龄(384.5±6Ma)基本一致,也与晚志留世-泥盆纪时温都尔庙增生岩浆弧与华北克拉通北缘的碰撞拼贴时间吻合,因此认为白乃庙铜金矿床形成于碰撞造山体制。

3.7 早古生代岛弧背景斑岩型铜矿及其找矿前景

据李文博等(2008),白乃庙铜金钼矿床赋矿于白乃庙群,白乃庙群为一套变质的中基性火山岩、火山碎屑岩、凝灰岩,局部夹硅铁建造等,其形成时代有元古代与早古生代之争。聂凤军等(1994)曾报道白乃庙矿区及附近侵入于白乃庙群的岩浆岩类侵位年龄为428~466 Ma,而白乃庙群形成于1130Ma左右。本项目通过岩石地球化学和同位素地球化学研究揭示,白乃庙群为岛弧火山岩建造,并发育在大陆基底之上;通过锆石SHRIMP定年,获得其上覆细别河群岛弧火山岩年龄为449±8(n=15, MSWD=1.31),侵入于白乃庙群的花岗闪长斑岩侵位年龄为430±6Ma(n=13, MSWD

=1.1),白乃庙北矿带容矿破碎斑岩年龄为445±6Ma(n=14, MSWD=2.4),辉钼矿Re-Os等时线年龄为444±30(MSWD=2.8)。上述表明,白乃庙群是形成于早古生代或更早的增生背景的火山岩-沉积岩建造,细别河群为形成于早古生代晚期(430Ma左右)的火山岩建造,白乃庙矿区的侵入岩也形成于早古生代晚期(466~420Ma);白乃庙矿区北矿带被铜矿体穿切的、破碎的、含辉钼矿的二长花岗斑岩可能是444Ma左右形成的斑岩铜钼矿床,但该斑岩铜钼矿床在400~350Ma期间遭受构造热事件破坏,并转变为断裂控制的脉状造山型铜(伴钼金)矿床。无论如何,华北大陆北缘造山带存在早古生代或加里东期的斑岩型铜矿化。

黑龙江省多宝山铜(钼)矿床位于额尔古纳地块北部南缘。据Wu *et al.* (2005, 2008)和武广(2008),额尔古纳地块的前寒武纪地层在兴凯-萨拉伊尔造山事件(550~500Ma)中遭受强烈变质,并被加里东期花岗岩侵入,其基底由前寒武纪变质岩和花岗岩类组成,并卷入晚古生代的增生型造山事件中。研究表明,多宝山斑岩铜钼矿床的成矿斑岩主要为花岗闪长斑岩,侵入到一套以辉石安山岩-英安岩-流纹岩及火山碎屑岩为主的岛弧火山岩建造中。斑岩体蚀变强烈,具斑岩型矿床蚀变及组合特征。铜钼矿体既赋存于花岗斑岩体内部,也产于火山岩中。锆石SHRIMP定年结果表明,火山岩围岩时代为寒武纪(507±6Ma, n=11, MSWD=1.7),多宝山铜钼矿床辉钼矿Re-Os模式年龄为506±10Ma(赵一鸣和吴良士, 2004),说明多宝山地区存在早古生代岛弧岩浆作用和斑岩型成矿作用。

以上表明,兴蒙造山带具有较大的早古生代斑岩矿床的找矿潜力。

3.8 中生代成矿多样性和东西差异性

中亚造山带东部中生代成矿作用异常强烈,矿化类型复杂多样,成矿时间上显示多幕式的特点,且自西向东成矿时代变新(表3),具体说明如下:

表3 中亚造山带显生宙成矿作用的東西差异

Table 3 Eastward variation of Phanerozoic mineralizations in the Central Asia orogenic belt

区段	狼山以西	阴山-大兴安岭	燕山+小兴安岭	吉黑褶皱带
古生代	++++++	+++	+	+
250~200Ma	++	+	++	+
190~160Ma	+	++	++	+
150~130Ma		+++	++++	++
120~100Ma		+	++	+++++

注:“+”数量示意各时期成矿作用强度或矿床相对多少。

在狼山以西的中亚造山带,包括天山、阿勒泰、准噶尔以及蒙古造山带西部,成矿作用主要发生在古生代,早中生代

成矿作用较为次要,基本缺乏晚中生代成矿作用,两个成矿高峰分别为340Ma和280Ma(Chen *et al.*, 2007)。

狼山以东、嫩江以西的阴山-大兴安岭地区主要发育了古生代、三叠纪、早中侏罗世(160~190Ma)、晚侏罗世-早白垩世之交(130~150Ma)的4期成矿系统,并以古生代和130~150Ma时期的矿床最为重要,120Ma之后的成矿作用较弱。该区古生代矿床如白乃庙铜金矿床(李文博等,2007,2008)、多宝山铜钼矿床(杜琦,1988;武广等,2009b)、哈达庙金矿(鲁颖淮等,2009a)、三叠纪成矿事件,除前文列举部分矿床外,白乃庙金矿也被认为改期形成的造山型金矿(钟日晨和李文博,2009);160~190Ma期间的矿床有乌努格吐山铜钼矿床(李诺等,2007b)、碾子沟钼矿床(陈志广等,2008)、三矿沟铁铜矿床(葛文春等,2005;刘军等,2009)等;130~150Ma期间发生了该区最强烈的成矿事件,形成了额仁陶勒盖、甲乌拉等大量浅成低温热液矿床(祁进平等,2005)、敖伦花斑岩铜钼矿床(马星华等,2009;舒启海等,2009)、太平沟斑岩钼矿床(王建国等,2009;王圣文等,2009)、洛古河斑岩钼矿(武广等,2009a)以及阴山-张家口金矿带(Chen YJ *et al.*, 1998a)和黑龙江砂宝斯等造山型金矿(武广等,2007)。

位于松辽盆地南缘的燕山-辽西地区已经很少保留古生代形成的热液矿床,但最近该区发现大量印支期花岗岩和斑岩钼铜矿床(详见张拴宏等,2007;曾庆栋等,2009a)。但是,该区最重要的矿床主要形成于燕山期,160~190Ma期间的矿床以杨家杖子-兰家沟钼矿田(Chen YJ *et al.*, 2007)为代表,130~150Ma期间的矿床以排山楼金矿和寿王坟铜矿(Chen YJ *et al.*, 2007)为代表,120Ma以后的矿床以红石砬子金矿(祁进平等,2004)为代表。松辽盆地北缘的小兴安岭地区主要发育130Ma以后(多晚于120Ma)的岩浆-流体成矿系统,如团结沟金矿田(祁进平等,2005;孙丰月等,2008)。

松辽盆地以东的吉黑褶皱带几乎没有保留160Ma以前的热液矿床;大部分热液矿床形成于130Ma以后,如黑龙江的金厂金矿田(张宇等,2008;鲁颖淮等,2009b)和小西南岔金铜矿床(Chen YJ *et al.*, 2007);吉林延边一带的五星山、闹枝和刺猬沟等小型金矿床可能形成于130~150Ma之间(祁进平等,2005)。但是,辽吉地块的一些脉状金矿则主要形成于130Ma之前,如夹皮沟金矿田(Chen YJ *et al.*, 1998a)。

4 南缘造山带构造演化和成矿

华北南缘造山带(秦岭-大别-苏鲁,本文主要讨论秦岭;图5)经历了复杂的地质演化过程,其主体构造格架的形成被认为是三个陆块相互作用的结果,即华北、秦岭和扬子陆块(张国伟等,2001)。地球化学研究揭示了造山带内部不同块体的区域不均一性(张本仁等,2002);沉积地层学研究发现华北古板块南缘在新元古代发育二郎坪等裂解盆地(孙枢等,1985;胡受奚等,1988);古特提斯洋在秦岭造山带地区自东向西闭合,最终完成于晚三叠世(Yin and Harrison,

1996);大地构造重建和构造解析表明它为多期俯冲-碰撞的复合型大陆碰撞造山带,造山带浅层向南推覆与深部扬子板片向北俯冲并存(张国伟等,2001);高压-超高压变质带指示了大陆地壳三叠纪深俯冲现象的发生(Li S *et al.*, 1994);沉积古地磁和反射地震研究发现秦岭造山带的侧向缩短变形在侏罗纪仍非常强烈,结束于侏罗纪与白垩纪之交(Zhu RX *et al.*, 1998);岩石圈地学断面综合研究揭示洋盆闭合后经历了碰撞挤压、走滑和伸展3个阶段,造山带结构为不对称扇形的蘑菇云朵状,岩石圈深、中、浅部的构造方向不同,显示立交桥结构的特点,指示碰撞后发生了动力学调整(Yuan, 1996b);大量同位素测年数据表明,秦岭造山带最主要的花岗岩浆活动和流体成矿作用始于220Ma,主要发生于侏罗纪和白垩纪的挤压向伸展转换背景下,形成了多个巨型矿集区,蕴涵了不同成因类型的多种金属矿床(陈衍景和富士谷,1992;Chen YJ *et al.*, 2007);变质核杂岩隆升机制的构造解析证明,东秦岭127Ma之前的伸展构造作用发生在造山期的区域挤压背景下,由花岗岩浆的穹隆作用诱发,而127Ma之后的伸展构造则由岩石圈引张减薄所致(张进江等,1998;陈根文等,2008)。尽管如此,仍有一些重要科学问题尚未解决:(1)至少古生代存在勉略洋和商丹洋倾向北的洋壳俯冲,但为何尚未发现岩浆弧环境的斑岩型、浅成低温热液型矿床以及弧前增生楔环境的造山型矿床?甚至晚古生代岩浆弧杂岩也不明确?(2)很多学者主张“碰撞不成矿”,但为何秦岭地区的绝大多数超大型金、银、钼矿床恰恰形成于洋盆闭合之后的陆陆碰撞体制?(3)同为秦岭造山带,为何东部与西部的成矿类型、矿种、时间等存在明显差异?西秦岭总体缺乏斑岩-流体成矿系统,而东秦岭却发育世界第一大斑岩钼钨矿带?(4)不少学者主张三叠纪进入碰撞后的陆内造山阶段,但为何还存在与二叠纪连续沉积的大量三叠纪海相地层,为何三叠纪构造挤压强烈并至少持续到侏罗纪末?针对上述问题,我们开展了研究,取得了部分进展。

4.1 古元古代浆控高温热液钼成矿事件的发现

华北克拉通南缘或秦岭造山带最北缘发育了厚达7600m的1.85~1.45Ga的熊耳群火山岩建造,但相关矿床长期缺乏报道,相关成矿类型、成矿强度和保存程度等鲜见研究。

最近,邓小华等(2008a, 2009b)和魏庆国等(2009)分别研究了熊耳山区的寨凹钼矿和龙门店钼矿,测定其Re-Os等时线年龄分别为等时线年龄为 1762 ± 31 Ma (1σ 误差, MSWD = 3.6)和1875Ma (MSWD = 1.08),确证了熊耳期(1.85~1.45Ga)成矿事件的存在。

据邓小华等(2008a)研究,寨凹钼矿床属于浆控高温热液脉状矿化,成因与寨凹隐伏岩体相关。据本文第一作者野外考察,龙门店钼矿床(伴随银铅锌金矿化),包括了多个矿化点,与正长岩或二长岩侵入有关。因此,认为寨凹和龙门店

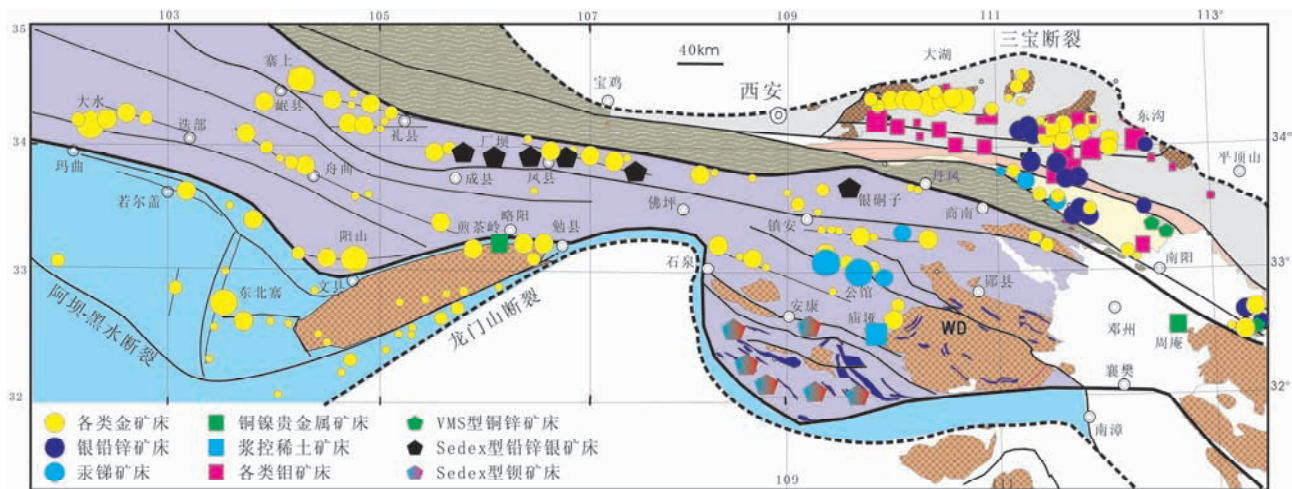


图5 秦岭造山带构造格局和矿床分布示意图

Fig.5 Tectonic framework of and ore-system distribution in Qinling orogen

钼矿床代表了与熊耳群岩浆作用有关的一期成矿事件,这次成矿事件由于华北克拉通南缘结晶基底的保护而幸存至今。

4.2 新元古代-早古生代构造体制的确定和造山型矿床的发现

新元古代-早古生代是 Rodinia 超大陆裂解期,扬子板块周缘表现明显(胡受奚和徐金方, 2008),但碧口地体北缘被认为是岛弧区(叶霖等, 2009),而华北古大陆南缘则较好发育了会聚板块边缘的沟弧盆体系(胡受奚, 1988; 许志琴等, 2006; 刘军锋等, 2009),即:沿商丹断裂带发育代表大洋板块向北俯冲的蛇绿混杂带,秦岭群分布区为古岩浆弧,二郎坪群、陶湾群分布区为弧后盆地,栾川断裂以北为弧后大陆区,沟-弧-盆体系结束于志留纪。这一构造格局被越来越多的资料所证明,相关的成矿系统被发现,举例如下:

据李晶等(2009),河南内乡县夏馆银多金属矿田内新发现了银洞沟造山型银金钼矿床,赋矿地层为二郎坪群,该矿床5件辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄介于 $423.4 \pm 4.4 \sim 432.2 \pm 3.4$ Ma,加权平均年龄为 429.3 ± 3.9 Ma (MSWD = 0.73),不但证明了二郎坪弧后盆地在志留纪弧-陆碰撞事件中闭合,而且显示了弧陆碰撞事件导致了造山型成矿系统的发育。向华等(2009)通过北桐柏秦岭群变质岩锆石年代学和矿物学研究,确定秦岭群内存在 430 ~ 450 Ma 弧岩浆岩,弧-陆碰撞导致了麻粒岩相变质,峰期变质时间为 430 ~ 445 Ma,418.7 Ma 已经进入退变质作用阶段,退变质作用至少持续到 404.7 ± 6.5 Ma。

徐勇航等(2009)对于河南二郎坪群中的大河、水洞岭等 VMS 型矿床之含矿火山岩的地球化学研究确证了二郎坪群形成于新元古代-早古生代的弧后盆地。李彝等(2009)研究表明,与二郎坪群相当的陕西斜峪关群中的基性熔岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 472 ± 11 Ma,斜峪关群蕴含铜峪 VMS 型铜矿床,铜峪铜矿床赋矿围岩被煤沟花岗闪长岩侵

入,后者具有埃达克质岩特征,形成于岩浆弧环境,其 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄加权平均值为 439.3 ± 3 Ma。

据阎国翰等(2007)介绍,二郎坪弧后盆地北侧方城县发育 Rb-Sr 等时线年龄为 786 Ma 的双山角闪云霞正长岩-碳酸岩杂岩体,是弧后大陆裂解体制的产物。

我们认为,古岩浆弧区的浆控热液成矿系统可能因后期强烈隆升而无法保存下来,但二郎坪群、斜峪关群分布区具有较大的寻找新元古代-早古生代 VMS 型矿床的潜力,弧后大陆区可能发育新元古代-早古生代与碱性岩-碳酸岩有关的矿床,弧后盆地系统保留了较多的弧-陆碰撞过程中的造山型成矿系统。

4.3 印支期成矿事件的识别及成因解释

自黄典豪等(1994)报道黄龙铺热液碳酸岩脉型钼矿床的辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 220 ~ 231 Ma 和等时线年龄为 221 Ma 以来,秦岭地区是否存在印支期的重要成矿事件一直颇受关注。李诺等(2008b)大湖金钼矿床6件辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 218 ± 41 Ma (2 σ 误差, MSWD = 38),并罗列了前人获得的一些印支期成矿年龄,例如,小秦岭东桐峪金矿床的碱性长石 Rb-Sr 等时线年龄为 208.2 Ma,15 号含金石英脉中蚀变白云母 K-Ar 年龄为 237.54 ± 4.80 Ma。据 Chen YJ *et al.* (2008),上官金矿早阶段矿物 Rb-Sr 等时线年龄为 242 ± 11 Ma,石英 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 222.83 ± 24.91 Ma。据朱赖民(项目口头报告),甘肃武山县温泉斑岩型钼矿床5件辉钼矿 Re-Os 模式年龄在 $212.7 \pm 2.6 \sim 215.1 \pm 2.6$ Ma 之间,加权平均值为 214.1 ± 1.1 Ma,等时线年龄为 214.4 ± 7.1 Ma;温泉岩体 K-Ar 年龄 223 ~ 226 Ma 和 SHRIMP U-Pb 锆石年龄 223 ± 7 Ma 相吻合。现在看来,至少秦岭造山带北部确实存在着印支期的重要成矿事件。

关于印支期成矿事件的构造背景,前人较少探讨。结合秦岭造山带的构造演化历史,考虑到印支期成矿系统主要保

西秦岭是我国最大的卡林-类卡林型金矿省,也是仅次于美国西部的世界第二大卡林-类卡林型金矿省。目前,关于卡林-类卡林型金矿床的特征、构造背景和成矿机制的认识以及成矿模式等都是基于对美国西部卡林型和类卡林型金矿床研究而获得的,不少学者习惯以美国卡林型-类卡林型金矿的地质特征和成矿模式作为西秦岭等地的矿床地质特征和成矿模式。但是,美国卡林-类卡林型金矿省形成于活动大陆边缘的弧后盆岭省,而西秦岭卡林-类卡林型金矿省则发育于大陆碰撞造山带,且成矿同位素年龄介于 220 ~ 100Ma 之间,以 170 Ma 为高峰,地球动力学背景是碰撞造山过程挤压-伸展转变期的减压增温体制,已有成矿模式无法解释西秦岭卡林-类卡林型金矿床的成因和地质地球化学特征(陈衍景等, 2004)。

表 4 阳山金矿与造山型和卡林型金矿的地质和成矿流体特征对比

Table 4 The geological and ore-fluid features of the Yangshan deposit and their comparison with the orogenic- and Carlin-types gold deposits

对比项目	浆控高温热液型	变质热液或造山型	美国西部卡林型	西秦岭类卡林型
构造背景	造山带、裂谷或伸展区	造山带	弧后盆地省	碰撞造山带
赋矿地质体	中酸性浅成侵入体及其围岩	变质体	沉积地层	浅变质沉积建造
岩性控制	中酸性侵入体	任意岩性	钙质粉砂岩	碳质千枚岩、钙质粉砂岩、花岗斑岩
控矿构造	次火山机构	韧性剪切带	层间或正断层	剪切带和层间断层
矿体形态、边界	筒状,饼状,透镜状,脉状,囊状;边界清楚	脉状;边界清楚	脉状,似层状;边界模糊	脉状,似层状;边界模糊
矿石类型	斑岩,角砾岩,砂卡岩,石英脉	石英脉,蚀变岩	蚀变的沉积岩	蚀变千枚岩,石英脉,蚀变花岗斑岩
矿石矿物组合	黄铁矿为主,因矿种和类型而异	黄铁矿为主	黄铁矿、毒砂等	黄铁矿、毒砂等
矿化元素组合	Cu,Au 等,因矿种而异	Au,Ag(±As,Sb,Te,W,Mo,Bi,B)	Au-As-Sb-Hg	Au-As-Sb-Hg±U±W
自然金	除砂卡岩型外,其它可见明金	粒度较粗,常见明金	粒度较细,无明金	粒度较细,偶见明金
包裹体类型	纯 CO ₂ ,CO ₂ -H ₂ O,水溶液,含子晶	纯 CO ₂ ,CO ₂ -H ₂ O,水溶液	水溶液,偶见含子晶包裹体	纯 CO ₂ ,CO ₂ -H ₂ O,水溶液
流体 CO ₂ 含量	部分 >10mol%	>5~30mol%	<10mol%	5~30mol%
流体盐度	1~>30 wt% NaCl. eqv	<6wt% NaCl. eqv	<8wt% NaCl. eqv	<5wt% NaCl. eqv
流体来源	岩浆热液+浅成热液	变质热液+浅成热液	浅成热液(岩浆热液	浅成热液(变质热液
成矿温度	200~500℃	200~500℃	160~250℃	150~375℃
成矿压力	20~160MPa	50~400MPa	25~65MPa	85~222MPa(捕获)
流体压力	静岩-静水压力交替	(超)静岩为主,静水为次	静水为主,静岩为次	静岩-静水压力交替
流体不混溶	强	强	弱	一般

注:造山型金矿和美国卡林型金矿资料主要参照陈衍景(2006)、Kerrick *et al.* (2000)、Cline and Hofstra (2000) 和 Hofstra and Cline(2000); 浆控高温热液型金矿主要参照 Pirajno (2009)、陈衍景和李诺(2009); 西秦岭金矿床为本项目研究结果,并参照陈衍景等 (2004) 总结。

鉴于上述,本项目在区域研究的基础上,重点解剖了阳山超大型金矿床(杨荣生等, 2006, 2009; 李晶等, 2007, 2008; 刘红杰等, 2008; 张莉等, 2009; 秦艳等, 2009; 毛世东等, 2009; 郭俊华等, 2009)、寨上特大型金矿床(马星华等, 2008; 刘家军等, 2008; Liu JJ *et al.*, 2008)和马鞍桥大型金矿床(朱赖民等, 2009),揭示了西秦岭卡林-类卡林型金矿床的地质地球化学特征及其与美国西部同类矿床的相似性和差异(表4)。突出的差异是:(1)西秦岭金矿受断裂构造(尤其是剪切带,甚至是韧性剪切带)控制明显,而美国同类矿床赋矿断裂多为高角度的张性或脆性构造;(2)西秦岭金矿床成矿温度更高、压力更大;(3)西秦岭金矿床常发育 CO₂-H₂O 包裹体甚至纯 CO₂ 包裹体,呈现变质热液的特征,而美国卡林型金矿未见此两类包裹体,但偶见含子晶包裹体,个别表现出岩浆热液的特征;(4)西秦岭金矿床赋矿围岩遭受显著的变质作用,多为千枚岩、板岩或各类片岩,而美国金矿赋矿围岩未遭受变质或变质微弱;(5)西秦岭金矿床可偶见明金,而美国同类矿床罕见明金;(6)西秦岭金矿床成矿作用与岩浆活动没有直接联系,总体表现为典型卡林型金矿与造山型金矿的过渡,或兼有二者特征,而美国同类矿床成矿作用与岩浆作用关系密切,甚至被作为浅成低温热液型或远源砂卡岩型。根据上述差异,我们认为,西秦岭金

成矿的驱动力来自同造山挤压变质或浅层构造作用,而美国金成矿驱动力来自伸展、拉张背景的深部岩浆上升侵位作用;CMF 模式适合于解释西秦岭及类似构造背景的卡林型-类卡林型金矿的形成及其与造山型金矿的关系,西秦岭卡林型-类卡林型金矿省之下存在巨大的造山型金矿的找矿潜力(图7),即西秦岭金矿省深部可能存在着资源量巨大的造山型金矿省。

4.6 确定东秦岭是世界首例造山型银多金属成矿省

按照造山型矿床的概念、特征、空间分带模式和矿田、成矿省尺度的 CMF 模式,认为东秦岭是一个潜力巨大的金、银、铅、锌、钼等多种金属的造山型金矿省,因此提出了研究识别和进一步寻找造山型矿床的具体建议(陈衍景, 2006)。本项目进一步研究确定东秦岭北坡发育了一个巨大的造山型银铅锌成矿省,该成矿省包括熊耳山、栾川、夏馆、桐柏等4个重要矿田(图8,表5),已确定达到大型或超大型规模的造山型银矿床有:洛宁县铁炉坪(Chen YJ *et al.*, 2004)和沙沟矿床(银储量约 3000 吨,铅锌储量 > 50 万吨),栾川县赤土点、冷水北沟(银资源量 > 8000 吨,铅锌资源量 > 300 万吨)、百炉沟、西沟-银洞沟(祁进平, 2006; 祁进平等, 2007,

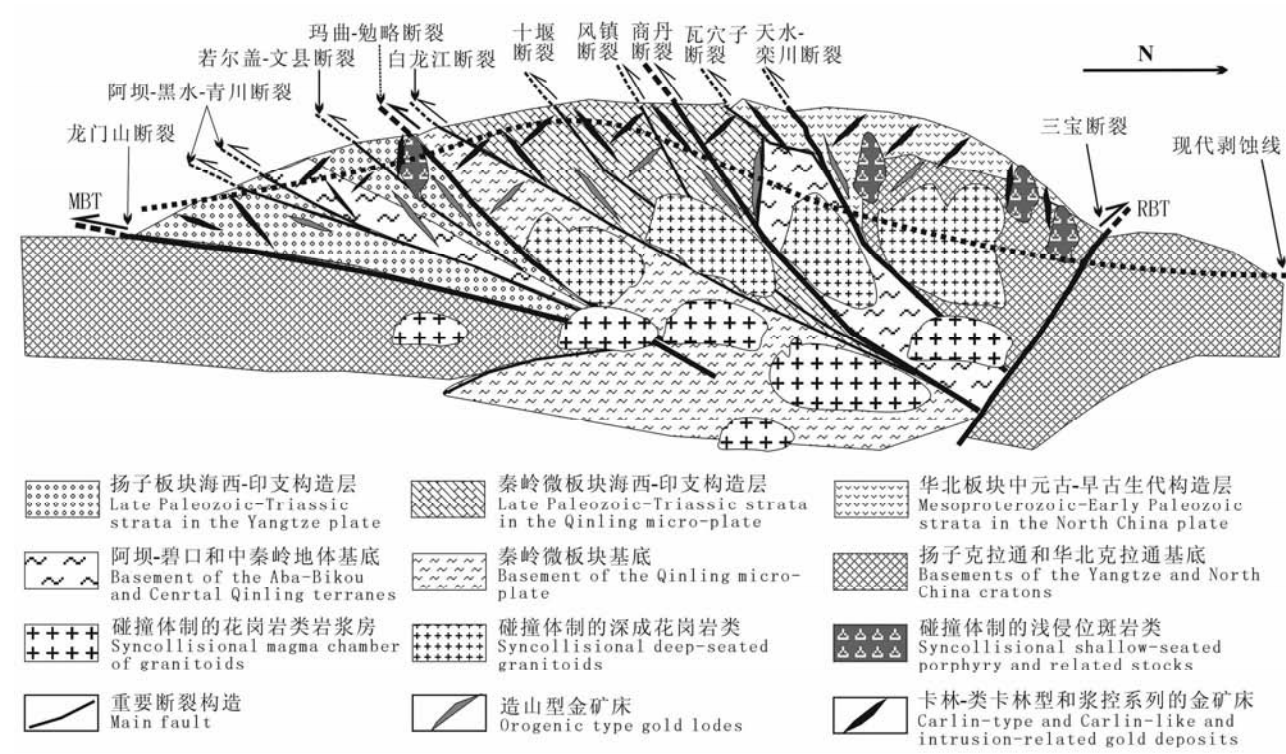


图7 西秦岭卡林型-类卡林型金矿成矿模式(据陈衍景等, 2004)

Fig.7 Metallogenic model for the West Qinling Carlin-type and Carlin-like gold province (Chen YJ *et al.* , 2004)

2009)、土地庙沟,内乡县银洞沟、板厂和东洼矿床(张静等, 2007, 2009),桐柏县破山银矿床(张静等, 2008a, b)和嵩县上庄坪、土地庙沟等银多金属矿床。这些矿床分布于东秦岭造山带北坡的不同构造单元,其突出特点是常与铅、锌、金等金属元素伴生,或者与这些元素的独立矿床共生于统一矿田。

需要说明的是,栾川银铅锌矿田的部分矿床由于具有层控特点而被一些学者解释为 Sedex 型(如刘国印等, 2007; 严海麒等, 2007),矿区辉长岩被前人解释为海底热液喷流系统的热源。然而,包志伟等(2009)发现辉长岩被西沟矿床的矿体切穿,测得辉长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 $147.5 \pm 1.7\text{Ma}$,证明矿床形成于 147Ma 之后的燕山期。

4.7 东秦岭是多期次、多类型钼矿化的巨型钼矿省

东秦岭钼矿带是我国最重要的钼矿带(图9),目前探明金属储量超过 $5 \times 10^6\text{t}$,已超过美国西部的 Climax-Henderson 钼矿带而成为世界第一大钼矿带(李诺等, 2007a)。前人研究认为,该区钼矿床类型以斑岩型、矽卡岩型为主,成矿作用主要发生在燕山期(胡受奚, 1988; 罗铭玖等, 1991; 李永峰等, 2005)。

本项目研究表明,空间上,东秦岭地区钼成矿作用集中于秦岭造山带的北坡,即商丹断裂或朱夏断裂以北的华北克拉通南缘和北秦岭造山带,而南秦岭造山带和扬子克拉通

北缘鲜有发育(李诺等, 2007a); 时间上,大型、超大型钼矿床主要形成在燕山期,但古元古代、古生代和三叠纪也存在不同规模的钼成矿作用(详见前述); 成因类型上,除斑岩型、矽卡岩型外,尚有碳酸岩脉型(许成等, 2009),浆控高温热液作用形成的萤石脉型土门钼矿床(邓小华等, 2009a)和石英脉型寨凹钼矿床(邓小华等, 2008a, 2009b),造山型大湖石英脉金-钼矿床(李诺等, 2008b; 倪智勇等, 2008, 2009)、纸坊石英脉型钼矿床(邓小华等, 2008b)等。

钼不但能够以独立矿种出现,例如,鱼池岭钼矿(李诺等, 2009a, b)、汤家坪钼矿(杨艳等, 2008; 王运等, 2009)、金堆城钼矿(杨永飞等, 2009a); 亦可与金、银、钨、铁、铜、铅、锌、稀土等形成多元素矿床,例如,秋树湾钨-钼矿床(李晶, 2009),大湖金-钼矿床(李诺等, 2008b; 倪智勇等, 2008, 2009),南泥湖和三道庄钨-钼矿床(杨永飞等, 2009b; 石英霞等, 2009),上房沟钨-铁矿床(杨艳等, 2009),黄龙铺钼-稀土矿床(许成等, 2009)。

综上所述,东秦岭钼矿省是包括了多成因、多期次、伴生多种成矿元素的复杂钼矿省,其形成与华北克拉通南缘基底变质岩系和盖层熊耳群具有较高的钼元素地球化学背景有关(胡受奚, 1988)。考虑到华北克拉通北缘也发育杨家杖子-兰家沟钼矿田、西拉木伦钼矿带(曾庆栋等, 2009a),我们初步认为华北克拉通是一个富钼的地球化学块体。

表 5 东秦岭北坡的造山型银多金属矿床

Table 5 The orogenic-type silver-dominated ploy-metal deposits in NE Qinling

	矿床	县市	伴生元素	g/t Ag	资源量 *	东经°	北纬°	矿体及规模	**
1	蒿岔河	潼关	Pb		小型	110.23	34.45		1
2	沙沟	卢氏?	Pb,Zn	~3000	大型			30 多个薄脉状矿体	5
3	蒿坪沟	洛宁	Pb,Zn, Au		中型	111.30	34.18		1
4	程家沟	洛宁	Au-Pb		小型	111.34	34.18		1
5	铁炉坪	洛宁	Pb, Zn, Au	293	1217	111.36	34.15	17 个银矿体, 5 个铅矿体, 矿带 2000 × 300 ~ 400m	2
6	大麻院	洛宁	Pb		小型	111.44	34.19		1
7	冷水北沟	栾川	Pb, Zn		超大型			6 个主矿脉	3
8	西沟	栾川	Pb, Zn		大型			2 个主要似层状矿体	3
9	赤土店	栾川	Pb, Zn		大型				3
10	百炉沟	栾川	Pb, Zn		大型				3
11	上庄坪	嵩县	Au, Pb, Zn		2558	111.88	33.63	5 个矿体	1
12	土地庙沟	嵩县	Pb,Zn	237	2849	112.08	33.65	5 个矿体; 2 号矿体长 1900m, 厚 2.89m.	1
13	板厂	内乡	Cu, Pb, Zn, Au	11.2 – 153	2183	111.71	33.41	1 号矿体长 3000m, 厚 5 – 30m; 2 号矿体长 3600m, 厚 2 ~ 25m.	1
14	东洼	内乡	Au, Pb, Zn	123 – 4825	811	111.80	33.50	1 号矿体长 1200m, 厚 0.50 – 1.92m	1
15	银洞沟	内乡	Au, Pb, Zn, Au		>2000				4
16	破山	桐柏	Pb-Zn	299	2662	113.38	32.58	13 个矿体, 主矿体 1900 × 530 × 5.38 m.	1
17	银洞岭	桐柏	Pb,Zn	296	1914	113.40	32.52	6 个矿体, 1 号矿体 1320 × 530 × 2.12m.	1
18	老洞坡	桐柏	Pb,Zn,Ag			113.50	32.51		1

注: * 资源量指银金属量,单位为 t; ** 资料出处: 1. WMG 公司的数据库; 2. Chen YJ *et al.* (2004); 3. 祁进平(2006); 4. 张静等(2007); 5. 据 Found 公司资料

4.8 中生代成矿复杂性和东西差异

中生代是中央造山带成矿爆发时期,除 VMS 型铜锌矿床、Sedex 型铅锌银矿床(李红中等, 2009; 王天刚等, 2008)和钼矿床、周庵和煎茶岭两个铜镍-铂族元素矿床(糜梅等, 2009)以及寨凹(邓小华等, 2009b)、龙门店(魏庆国等, 2009)钼矿床和银洞沟银金钼矿床(李晶等, 2009)之外,其它能够确定成矿时代的各类热液矿床均为中生代形成。然而,自西秦岭至胶东,不同地区的主要成矿元素、矿床类型、成矿时代确有很大差异,并与兴蒙造山带自西向东的变化特点颇为相似。

西秦岭大规模成矿作用发生在侏罗纪,以 170 ~ 180Ma 为高峰,主要形成卡林型-类卡林型和造山型金矿、沉积岩容矿的浅成热液型汞锑矿床、铅锌矿。东秦岭主成矿时间为

140Ma 左右,主要为造山型金、银、铅锌、钼和浆控高温热液型钼、钨、金、铜等,只有个别矿床形成于印支期,而东沟超大型钼矿床成矿年龄小于 120Ma(戴宝章等, 2009)。大别山区矿床较少,汤家坪钼矿(杨艳等, 2008; 王运等, 2009)等矿床主要形成于 130Ma 之后,成矿年龄 > 130Ma 者罕见,但属于大别山前陆褶冲带的长江中下游地区发育大量 150 ~ 100Ma 期间的浆控高温热液型成矿系统(Chen YJ *et al.*, 2007; 闫峻等, 2009)。在郯庐断裂带以东的宁镇、宁芜盆地中的大量岩浆-流体成矿系统和胶东金矿床主要形成在 130Ma 之后(Pan and Dong, 1999; Chen YJ *et al.*, 2005; 蒋少涌等, 2009); 郯庐断裂带及两侧的与碳酸岩有关的稀土矿床和与富钾碱性岩有关的金矿床也形成于 120Ma 左右或之后(Qiu *et al.*, 2000; 邱检生等, 2009)。

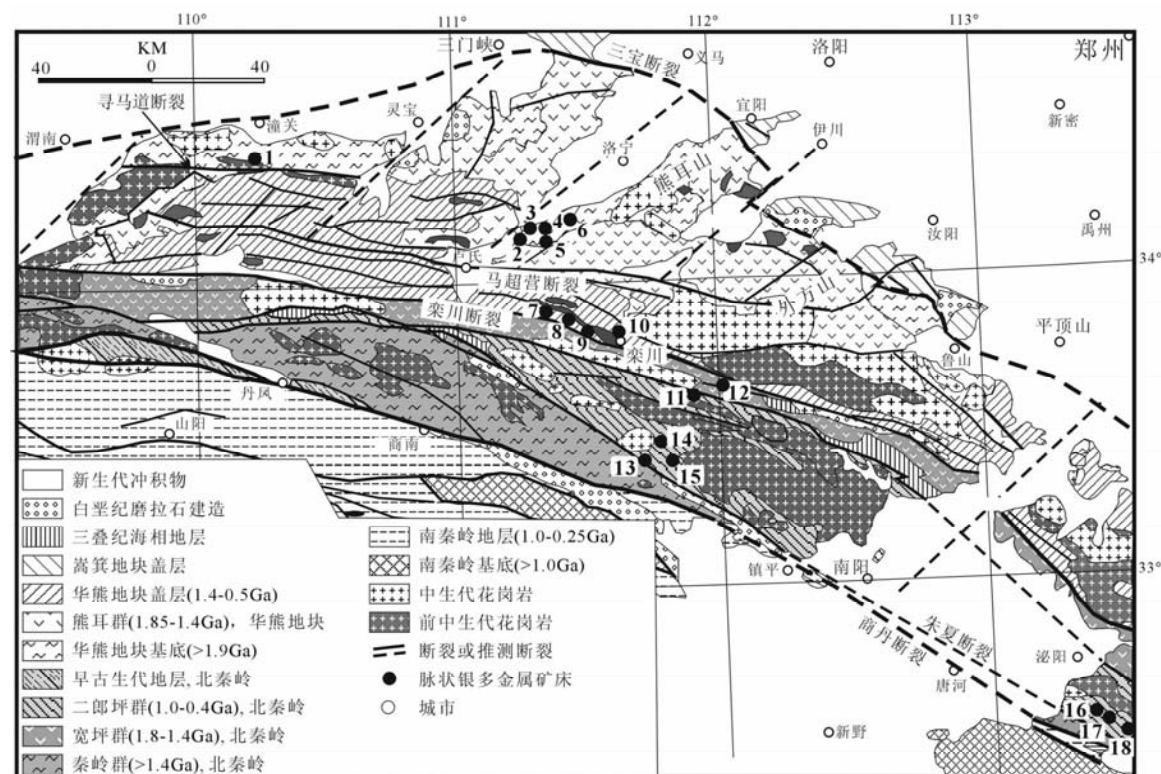


图8 东秦岭造山型银多金属成矿省地质图(图中矿床编号与表5一致)

Fig. 8 Geology of the NE Qinling orogenic-type Ag-dominated poly-metal province

4.9 造山带隆升剥蚀幅度和时间：来自矿床的约束

不同类型的成矿系统发育在地壳不同深度或造山带演化的不同阶段,造山带内成矿系统的类型、特征等可以用于约束造山带隆起-剥蚀的程度和时间。例如,浅成低温热液型矿床形成于 < 2km 的地表或近地表环境(陈衍景等, 2007),在长期隆升剥蚀的古老造山带很难保留,这类矿床的保存指示成矿后的隆升剥蚀相对较弱。同样,形成于 1 ~ 5km 的斑岩型成矿系统的保存也指示成矿后造山带隆升的幅度不会超过 5km。就东秦岭北坡而言,大量发育 130 ~ 145Ma 的斑岩型、爆破角砾岩型矿床(如祁雨沟金矿,李诺等, 2008a; 姚军明等, 2009; Chen YJ *et al.*, 2009)和 110 ~ 120Ma 的东沟超大型斑岩钼矿床(叶会寿等, 2006; 戴宝章等, 2009),说明东秦岭北坡在 120Ma 之后的隆升剥蚀幅度总体小于 5km,即平均每年隆升 0.04mm。因此,如果东秦岭造山带曾经快速隆升,也只能在 130Ma 之前。

大别超高压榴辉岩形成深度被估算为 100 ~ 220km,年龄为 220 ~ 180Ma,现地表所见为经历了 100 ~ 220km 折返、隆升的超高压榴辉岩地体(详见 Li C *et al.*, 2001)。侵位于含超高压榴辉岩的片麻岩地体的时代为 118Ma 的汤家坪斑岩钼矿系统(杨艳等, 2008; 王运等, 2009)至今保留,指示 120Ma 以后隆升剥蚀总量不足 5km,平均速率约为

0.04mm/y。如此,在 220 ~ 120Ma 期间,汤家坪矿区快速隆升了 100 ~ 220km,平均每年隆升 1 ~ 2mm。从汤家坪矿区反映的结果可见,大别造山带在 220 ~ 120Ma 期间的隆升速度是 120Ma 以后隆升速度的 24 ~ 48 倍。

以上认识与根据流体包裹体估算的中央造山带若干典型脉状矿床成矿压力和深度结果基本一致,即白垩纪以来的剥蚀深度总体小于 10km(表6)。

5 急需加强研究的重大科学问题

综观已有进展和存在问题,认为如下 4 个科学问题十分关键、重大,急需加强研究解决。

5.1 前中生代成矿系统的识别和预测

按照现有成矿理论或模型,华北陆缘造山带东部多期次复杂多样的构造演化过程中应有多类型的巨量成矿系统发育,但过去发现、识别出来的较少。本项目关于狼山-渣尔太山、多宝山、白乃庙、厂坝-银洞子等矿田和周庵、铜峪等重要矿床的研究,以及对辽宁后仙峪、河南嵩县寨凹、龙门店和内乡县银洞沟等矿床同位素地质年代学研究,均显示了前中生代多类成矿系统的存在,使前中生代成矿系统在华北陆缘造山带初见端倪,暗示加强研究识别和成矿预测的必要性。

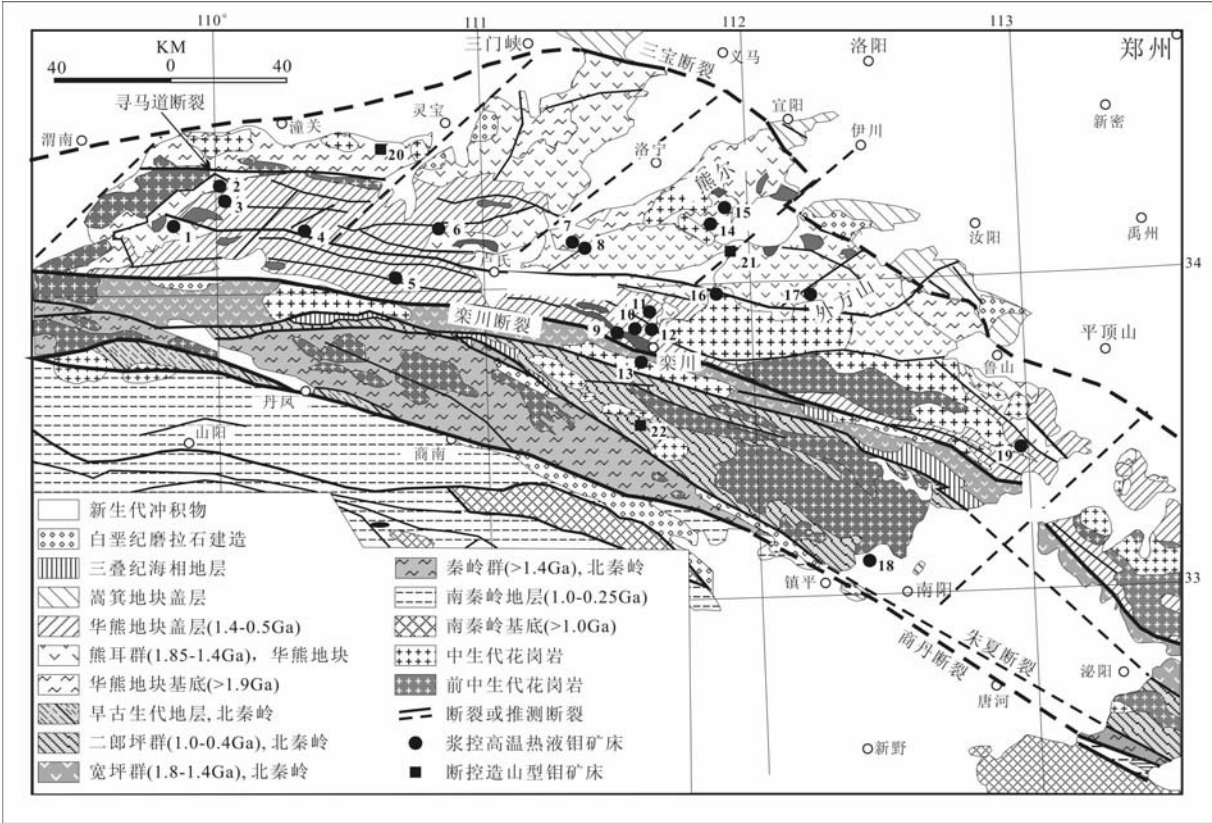


图9 东秦岭钼矿省矿床分布

1-金城; 2-黄龙铺; 3-石家湾; 4-木龙沟; 5-夜长坪; 6-银家沟; 7-寨凹; 8-龙门店; 9-上房沟; 10-南泥湖; 11-马圈; 12-三道庄; 13-石宝沟; 14-黄水庵; 15-雷门沟; 16-鱼池岭; 17-东沟; 18-秋树湾; 19-土门; 20-大湖; 21-纸坊; 22-太平镇

Fig.9 Distribution of Mo deposits in the NE Qinling Molybdenum Province

1-Jinduicheng; 2-Huanglongpu; 3-Shijiawan; 4-Mulonggou; 5-Yechangping; 6-Yinjiagou; 7-Zhaiwa; 8-Longmendian; 9-Shangfanggou; 10-Nannihu; 11-Majuan; 12-Sandaozhuang; 13-Shibaogou; 14-Huangshui'ai; 15-Leimengou; 16-Yuchiling; 17-Donggou; 18-Qiushuwan; 19-Tumen; 20-Dahu; 21-Zhifang; 22-Taipingzhen.

表6 中央造山带若干脉状矿床成矿压力和深度

Table 6 Metallogenic pressures and depths of several lode deposits in Central China orogen

矿床	早阶段		中阶段		晚阶段		文献
	MPa	深度 km	MPa	深度 km	MPa	深度 km	
纸房钼矿 ^b	180 ~ 220	6.9 ~ 8.5	180 ~ 220	6.9 ~ 8.5			邓小华等, 2008b
大湖金钼矿 ^a	~ 331	11.8	~ 237	8.5			倪智勇等, 2008
玲珑金矿 ^a	325	11.6	162 ~ 191	5.8 ~ 6.9	45 (187)	4.5 (6.7)	张祖青等, 2007
三山岛金矿 ^a	~ 300	~ 10.7	120 ~ 200	4.3 ~ 7.1			Fan <i>et al.</i> , 2003
上官金矿 ^a	200 ~ 285	7.1 ~ 10.5	100 ~ 160	3.5 ~ 5.7			范宏瑞等, 1998
银洞沟银矿 ^a	280 ~ 320	10 ~ 11.4	250 ~ 277	8.9 ~ 9.9	90 ~ 92	9 ~ 9.2	张静等, 2004
冷水北沟银矿 ^b			180 ~ 200	6.9 ~ 7.7	70 ~ 80	7 ~ 8	祁进平等, 2007
阳山金矿 ^b	~ 222	~ 8.5	~ 168	~ 6.5			李晶等, 2007

注: 早、中阶段按照静岩压力计算深度,晚阶段按照静水压力计算(括号内数据按静岩应力计算),
注 a 者中深变质岩围岩设密度为 2.8g/cm³,注 b 者沉积岩或火山岩设密度为 2.6g/cm³。本表引自陈衍景等(2008)

值得高度重视的是,这些前中生代矿床都或多或少地遭受了后期造山过程的改造(彭润民等, 2007a,b),只有少数矿床尚可保留原貌,多数矿床已经面目全非,甚至重就位或再活化迁移富集而转变为另一种成因类型的矿床,如造山型矿床(陈衍景, 2006)。这要求我们在研究识别和预测前中生代成矿系统时不能照搬现有成矿理论,尤其不能照搬基于现代海底或大陆边缘成矿系统而建立的成矿模式。那么,如何在大陆内部的古老俯冲-碰撞造山带地区识别碰撞前形成的成矿系统呢?这是一个崭新的重大而关键的科学问题,需要我们重视研究。

5.2 燕山期大规模成矿的区域规律性和差异性

华北大陆及其边缘造山带在燕山期爆发式成矿,已是不争的事实。本项目研究发现,无论是华北克拉通、中亚造山带、中央造山带还是中央造山带的前陆褶冲带,自西向东都有成矿年龄变新趋势,矿化类型和优势矿种也有不同程度的差异。例如,松潘褶皱带、汉南隆起、长江中下游等均是中央造山带的前陆褶冲带,但松潘褶皱带蕴含大量卡林型-类卡林型金矿床,汉南隆起及其周围蕴含 MVT 型铅锌矿,而长江中游地区以矽卡岩型铁铜金等矿床著名;南秦岭构造带西部是著名的卡林型-类卡林型金矿省,南秦岭中部此类矿床相对较少,但银矿床增多,南桐柏-南大别构造带成矿系统发育较少。再如,华熊地块和胶北地体都在中生代卷入中生代造山事件,两地均以造山型金矿著名,但华熊地块还大量发育造山型银、铅锌矿床和一些钼矿床,而且是世界最大的浆控高温热液钼成矿省;即使是华熊地块内部,小秦岭、熊耳山、鲁山、舞阳地体之间也有很大的成矿差异。显然,搞清这些差异的原因,不但可以实现成矿理论的创新,而且更能有效地指导找矿预测。

上述差异只是初步认知,尚需准确查明其细节,揭示规律性,找出制约因素。我们建议关注如下 4 个因素:(1) 地球动力学过程细节和矿田构造的差异;(2) 不同成矿省或矿田之间成矿物质背景的差异,特别是地壳浅部物质成分和岩性的差异,因为地质勘查工作只能在地表开展;(3) 赋矿构造或赋矿岩体的特征、演化及其对矿床形成的制约作用,成矿元素活化、迁移、沉淀聚集的过程细节及其制约因素;(4) 成矿省或矿田后期破坏程度,特别是隆升风化剥蚀程度。

5.3 构造域叠合-转化过程的细节和机理

华北大陆边缘造山带汇聚世界三大构造域,在世界范围独一无二,是大陆边缘造山-成矿研究领域的学术制高点,中国学者有责任将这种自然优势变为学科发展优势。本项目已经初步揭示三大构造域的叠合、转化过程于中生代开始并完成,转化-叠合的关键时期是中、晚侏罗世和早白垩世。但是,叠合-转化的准确时限需要进一步研究厘定,其过程细节、标志及其机理需要深入揭示,叠合-转化过程的岩

浆、流体作用及其成矿效应需要查明,叠合-转化事件与周边板块活动的关系需要分析。

5.4 大陆碰撞造山事件的起止时限和标志

大陆碰撞是板块 Wilson 旋回的重要阶段之一,是大陆形成(多数克拉通实为古老的碰撞带)和超大陆聚合的关键步骤,也是划分板块构造的 4 种边界之一。毋庸置疑,现今的中亚造山带和中央造山带都是经历了大陆碰撞之后方可成为大陆内部造山带的。但是,关于两个造山带大陆碰撞造山的起始和结束时间及其持续时限,至今认识不一,而且分歧较大,争论激烈,严重制约对有关重要科学问题的研究深入。例如,对于华北与西伯利亚板块碰撞拼合时间或古亚洲洋闭合时间存在两种不同观点,一为晚泥盆世-早石炭世,一为二叠纪甚或三叠纪初(详见范宏瑞等, 2009; Zhang SH *et al.*, 2009)。再如,不同学科领域的学者对于“碰撞后”或“后碰撞”(Post-collision)的概念似有不同理解。

我们认为,缺乏明确而共识的地质判别标志,已是制约准确厘定大陆碰撞造山起止时间的关键。何以界定碰撞前、碰撞期和碰撞后?碰撞期与碰撞后的沉积作用、构造作用、变质作用、岩浆作用、成矿作用等究竟存在哪些不同或区分标志?我们如何抛开 Pearce 图件而去辨别同碰撞花岗岩和碰撞后花岗岩?等等,急需深入研究。

值得深思的是,“后碰撞”或“碰撞后”概念被众多学者用于青藏高原的研究中,青藏高原被绝大多数学者认定是典型的“碰撞后”构造演化阶段。但是,2008 年汶川大地震却夺走了近 10 万人的生命。那么,青藏高原是否属于碰撞后阶段?我们究竟如何从发震机制上区别象汶川地震这样的“碰撞后”构造地震与“同碰撞”构造地震?

致谢 本文总结的是整个 973 项目成员及其研究生们集体劳动的成果,项目立项和执行过程中得到涂光炽等众多院士和科技部、中科院、自然科学基金会、教育部等相关部门以及项目主持单位负责人、专家指导和大力支持,翟裕生院士、张国伟院士、滕吉文院士等项目专家组在研究科学问题和方法方面提出了具体的指导意见,野外工作得到内蒙古自治区和河南省等相关省市地勘单位和矿山的大力帮助,在此一并表示感谢。

References

- Bao ZW, Li CJ and Qi JP. 2009. SHRIMP zircon U-Pb age of the gabbro dyke in the Luanchuan Pb-Zn-Ag orefield, east Qinling orogen and its constraint on mineralization time. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (11): 2951 – 2956 (in Chinese with English abstract)
- Bekker A and Eriksson KA. 2003. A Paleoproterozoic drowned carbonate platform on the southeastern margin of the Wyoming Craton: a record of the Kenorland breakup. *Precambrian Research*, 120: 327 – 364
- Chen B, Jahn BM and Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture

- zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 245 – 257
- Chen CX, Jiang SY, Cai KQ and Mao B. 2003. Metallogenic Conditions of Magnesite and Talc Deposits in Early Proterozoic Mg-rich Carbonate Formations, Eastern Liaoning Province. *Mineral Deposit*, 22(2): 166 – 176 (in Chinese with English abstract)
- Chen GW, Xia H and Chen SQ. 2008. The Geological Evidences of Late Mesozoic Tectonic Transition in North China. *Geology in China*, 35(6): 1162 – 1177 (in Chinese with English abstract)
- Chen W, Zhao TP, Wei QG and Xu YH. 2008. The genesis of nelsonite from the Damiao Fe-Ti-P deposit, Hebei province, China: Evidence from apatite. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2301 – 2312 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ and Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan, China. Beijing: Chinese Seismological Press, 234 (in Chinese)
- Chen YJ and Li N. 2009. Nature of ore-fluids of intracontinental intrusion-related hypothermal deposits and its difference from those in island arcs. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2477 – 2508 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ and Zhao YC. 1997. Geochemical characteristics and evolution of REE in the Early Precambrian sediments: evidences from the southern margin of the North China craton. *Episodes*, 20: 109 – 116
- Chen YJ, Chen HY, Zaw K, Pirajno F and Zhang ZJ. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview. *Ore Geology Reviews*, 31: 139 – 169
- Chen YJ, Guo GJ and Li X. 1998a. Metallogenic geodynamic background of gold deposits in granite-greenstone terrains of North China craton. *Science in China Series D*, 41(2): 113 – 120
- Chen YJ, Hu SX and Lu B. 1998b. Contrasting REE geochemical features between Archean and Proterozoic khondalite series in North China Craton. *Mineralogical Magazine*, 62A(1): 318 – 319
- Chen YJ, Liu CQ, Chen HY, Zhang ZJ and Li C. 2000. Carbon isotope geochemistry of graphite deposits and ore-bearing khondalite series in North China: implications for several geoscientific problems. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 233 – 244 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Ni P, Fan HR, Pirajno F, Lai Y, Su WC and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085 – 2108 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Pirajno F and Qi JP. 2005. Origin of gold metallogeny and sources of ore-forming fluids, in the Jiaodong province, eastern China. *International Geology Review*, 47: 530 – 549
- Chen YJ, Pirajno F and Sui YH. 2004. Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, Henan, China: A case study of orogenic silver deposits and related tectonic setting. *Mineralium Deposita*, 39: 560 – 575
- Chen YJ, Pirajno F, Li N, Guo DS and Lai Y. 2009. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe-hosted gold deposit, Qinling orogen, Henan province, China: implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 35: 245 – 261
- Chen YJ, Xiao WJ and Zhang JJ. 2008. Ore-system as a geodynamic probe. *Geology in China*, 35(6): 1059 – 1073 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Zhang J, Zhang FX, Pirajno F and Li C. 2004. Carlin and Carlin-like gold deposits in Western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model. *Geological Review*, 50: 134 – 152 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 1990. Evidences for the catastrophe in geologic environment at about 2300Ma and the discussions on several problems. *Journal of Stratigraphy*, 14(3): 178 – 186 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 2000. Progress in the study of Central Asia-type orogenesis-metallogenesis in Northwest China. *Geological Journal of China Universities*, 6(1): 17 – 22 (in Chinese)
- Chen YJ. 2006. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential. *Geology in China*, 33: 1181 – 1196
- Chen ZG, Zhang LC, Wu HY, Wan B and Zeng QD. 2008. Geochemistry study and tectonic background of A style host granite in the Nianzigou Molybdenum deposit in Xilamulun Molybdenum metallogenic belt, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 24(4): 879 – 889 (in Chinese with English abstract)
- Cline JS and Hofstra AA. 2000. Ore-fluid evolution at the Getchell Carlin-type gold deposit, Nevada, USA. *European Journal of Mineralogy*, 12(1): 195 – 212
- Dai BZ, Jiang SY, Wang XL. 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 XH, Chen YJ, Yao JM, Li WB, Li N, Wang Y, Mei M and Zhang Y. 2008a. Fluid inclusion constraints on the origin of the Zhaiwa Mo deposit, Luoning county, Henan province. *Geology in China*, 35(6): 1250 – 1266 (in Chinese with English abstract)
- Deng XH, Li WB, Li N, Mei M and Zhang Y. 2008b. Study of fluid inclusions and genesis of the Zhifang Mo deposit in Songxian county, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2133 – 2148 (in Chinese with English abstract)
- Deng XH, Mei M and Yao JM. 2009a. Study of fluid inclusions and ore genesis of the Tumen Mo-fluorite vein deposit, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2537 – 2549 (in Chinese with English abstract)
- Deng XH, Yao JM, Li J and Sun YL. 2009b. Molybdenite Re-Os isotope age of the Zhaiwa Mo deposit and implications for Xiongerian mineralization in eastern Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2739 – 2746 (in Chinese with English abstract)
- Ding TP and Jiang SY. 2000. Stable isotope study of the Langshan polymetallic mineral district, Inner Mongolia, China. *Resource Geology*, 50: 25 – 38
- Ding TP, Jiang SY, Wan DF, Li JC, Sun B and Zhao DM. 1992. Stable isotope study of Proterozoic Pb-Zn deposits in North China. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing House, 1 – 127 (in Chinese with English abstract)
- Dong SB, Shen QH, Sun DZ and Lu LZ. 1986. Map and Explanation of Metamorphic Geology of China (1: 4000000). Beijing: Geological Publishing House, 37 (in Chinese)
- Du Q. 1988. The Duobaoshan Porphyry Copper Deposit. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 386 (in Chinese)
- Fan HR, Hu FF, Yang KF and Wang KY. 2006. Fluid unmixing/immiscibility as an ore-forming process in the giant REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolia, China: Evidence from fluid inclusions. *Journal of Geochemical Exploration*, 89: 104 – 107
- Fan HR, Hu FF, Yang KF, Liu S and Yang YH. 2008. Coupled U-Pb and Sm-Nd geochronology constrains intrusive of a REE-rich carbonatite dyke at the supergiant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, northern China. *The Gondwana 13 Program & Abstracts*, 43
- Fan HR, Hu FF, Yang KF, Wang KY and Liu YS. 2009. Geochronology framework of late Paleozoic dioritic-granitic plutons in the Bayan Obo area, Inner Mongolia, and tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2933 – 2938 (in Chinese with English abstract)
- Fan HR, Xie YH and Wang YL. 1998. Fluid-rock interaction during mineralization of the Shanggong structure-controlled alteration-type Au deposit in western Henan province, Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 14: 529 – 541 (in Chinese with English abstract)
- Fan HR, Zhai MG, Xie YH and Yang JH. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao

- deposit, Jiaodong gold province, China; *Mineralium Deposita*, 38: 739 – 750
- Ge WC, Wu FY, Zhou CY and Rahman AA. 2005. Emplacement age of the Tahe granite and its constraints on the tectonic nature of the Ergun block in the northern part of the Da Hinggan Range. *Chinese Science Bulletin*, 50(12): 2097 – 2105
- Gong HJ, Zhu LM, Sun BY, Li B and Guo B. 2009. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics and their geological significance of the Shahewan, Caoping and Zhashui granitic plutons in the South Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 248 – 264 (in Chinese with English abstract)
- Groves DI, Goldfarb RJ, Gebre-Mariam M, Hagemann SG and Robert F. 1998. Orogenic Au deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other Au deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13: 7 – 27
- Gu LX, Tang XQ, Zheng YC, Wu CZ, Tian ZM, Lu JJ, Xiao XJ and Ni P. 2004. Deformation, metamorphism and Ore-component remobilization of the Archean massive sulphide deposit at Hongtoushan, Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4): 923 – 934 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Tang XQ, Wang ZJ. 2005. Sulphide remobilization in NaCl solution at temperature of 362°C under differential stress. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1429 – 1434 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Zheng YC, Tang XQ, Zaw Khin, Della-Pasque F, Wu CZ, Tian ZM, Lu JJ, Ni P, Lin X, Yang FT and Wang XW. 2007. Copper, gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan, NE China. *Ore Geology Reviews*, 30: 1 – 29
- Guo JH, Mao SD, Chen YJ, Qin Y, Yang FL, Li JZ and Nan ZL. 2009. Geological features and ore controlling factors of the Yangshan gold field in Wen County, Gansu Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(2): 244 – 253 (in Chinese with English abstract)
- He YH, Zhao GC, Sun M and Han YG. 2009a. Petrogenesis and tectonic setting of volcanic rocks in the Xiaoshan and Waifangshan areas along the southern margin of the North China Craton: Constraints from bulk-rock geochemistry and Sr – Nd isotopic composition. *Lithos*, doi:10.1016/j.lithos.2009.08.008
- He YH, Zhao GC, Sun M and Xiao XP. 2009b. SHRIMP and LA-ICP-MS zircon geochronology of the Xiong'er volcanic rocks: Implications for the Paleo-Mesoproterozoic evolution of the southern margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 168: 213 – 222
- He YH, Zhao GC, Sun M, Wilde SA. 2008. Geochemistry, isotope systematics and petrogenesis of the volcanic rocks in the Zhongtiao Mountain: An alternative interpretation for the evolution of the southern margin of the North China Craton. *Lithos*, 102: 158 – 178
- Hofstra AH and Cline JS. 2000. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits. *SEG Reviews*, 13: 165 – 220
- Hou GT, Li JH, Yang MH, Yao WH, Wang CC and Wang YX. 2008. Geochemical constraints on the tectonic environment of the Late Paleoproterozoic mafic dyke swarms in the North China Craton. *Gondwana Research*, 13: 103 – 116
- Hou GT, Liu Y, Li JH and Qian XL. 2006. Evidence for ~1.8 Ga extension of the Eastern Block of the North China Craton from SHRIMP U – Pb dating of mafic dyke swarms in Shandong Province. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27: 392 – 401
- Hou ML, Jiang SY, Jiang YH and Ling HF. 2006. S-Pb isotope geochemistry and Rb-Sr geochronology of the Penglai gold field in the eastern Shandong province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2525 – 2533 (in Chinese with English abstract)
- Hou ML, Jiang YH, Jiang SY, Ling HF and Zhao KD. 2007. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, east China; implications for crustal thickening to delamination. *Geological Magazine*, 144(4): 619 – 631
- Hu SX (ed). 1988. *Geology and metallogeny of the collision belt between the South China and North China plates*. Nanjing: Nanjing University Press, 558 (in Chinese)
- Hu SX and Xu JF. 2008. The metallogeny of South China closely relationships to its geotectology. *Geology in China*, 35: 1045 – 1053 (in Chinese with English abstract)
- Hu SX, Zhao YY, Xu JF and Ye Y. 1997. *Geology of gold deposits in North China platform*. Beijing: Science Press, 220 (in Chinese)
- Huang DH, Wu CY, Du AD and He HL. 1994. Re-Os isotopic ages of molybdenum deposits in east Qinling and their significance. *Mineral Deposits*, 13(3): 221 – 230 (in Chinese with English abstract)
- Jiang SY and Jiang YH. 2000. Talc and magnesite deposits in China. *Mineralia Slovaca*, 32: 559 – 560
- Jiang SY, Chen CX, Chen YQ, Jiang YH, Dai BZ and Ni P. 2004. Geochemistry and genetic model for the giant magnesite deposits in the eastern Liaoning province. *China. Acta Petrologica Sinica*, 20(4): 765 – 772
- Jiang SY, Dai BZ, Jiang YH, Zhao HX and Hou ML. 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)
- Jiang SY, Palmer MR, Li YH and Xue CJ. 1995. Chemical compositions of tourmaline in the Qinling Yindongzi-Tongmugou Pb-Zn deposits, China: Implications for hydrothermal ore-forming processes. *Mineralium Deposita*, 30: 225 – 234
- Jiang SY, Palmer MR, Peng QM and Yang JH. 1997. Chemical and stable isotope (B, Si, and O) compositions of Proterozoic metamorphosed evaporite and associated tourmalines from the Houxianyu borate deposit, eastern Liaoning, China. *Chemical Geology*, 135: 189 – 211
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, Garwin S and Jia YF. 2000. The characteristics, origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Science in China Series D*, 43(supp): 1 – 68
- Li B, Zhu LM, Zhang GW. 2009. Geological characteristics, metallogenic setting, ore genesis of the Tongyu VHMS-type copper deposit in northwestern Qinling, Shaanxi. *Science in China series D*, in press (in Chinese)
- Li C, Chen YJ and He SD. 2001. East Qinling-Dabieshan lithosphere delaminating age, mechanism and direction – petrological evidences and stipulation. *Chinese Journal of Geochemistry*, 20(1): 59 – 72
- Li CD, Zhang FQ, Miao LC, Xie HQ and Xu YW. 2007. Zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of Late Permian high-Mg andesites in Seluohu area, Jilin province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 767 – 776 (in Chinese with English abstract)
- Li HZ, Zhou YZ, Yang ZJ, Gu ZH, Lü WC, He JG, Li W and An YF. 2009. Geochemical characteristics and their geological implications of cherts from Bafangshan-Erliehe area in western Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3094 – 3102 (in Chinese with English abstract)
- Li J, Chen YJ, Li QZ, Lai Y, Yang RS and Mao SD. 2007. Fluid inclusion geochemistry and genetic type of the Yangshan gold deposit, Gansu, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2144 – 2154 (in Chinese with English abstract)
- Li J, Chen YJ, Li QZ, Mao SD, Guo JH, Nan ZL and Yang RS. 2008. The C-H-O isotope systematics of the Yangshan gold deposit, Gansu and its implication for the ore-fluid origin. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 817 – 826 (in Chinese with English abstract)
- Li J, Qiu JJ and Sun YL. 2009. Re-Os isotope dating of the Yindonggou Ag-Au-Mo deposit, Henan province and its implication for Caledonian orogenic-metallogenic event. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2763 – 2768 (in Chinese with English abstract)
- Li J. 2009. Fluid inclusion and Re-Os isotope studies of Leimengou and

- Qiushuwan porphyry deposits. [PhD dissertation] Guangzhou: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry), 1 – 110 (in Chinese with English abstract)
- Li JH, Kusky TM and Huang XN. 2002. Archean podiform chromitites and mantle tectonites in ophiolitic mélangé, North China Craton: a record of early oceanic mantle processes. *GSA Today*, 12(7): 4 – 11
- Li JY, Gao LM, Sun GH, Li YP and Wang YB. 2007. Shuangjingzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 565 – 582 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Chen YJ, Ni ZY and Hu HZ. 2009a. Characteristics of ore-forming fluids of the Yuchiling porphyry Mo deposit, Songxian County, Henan Province, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2509 – 2522 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Chen YJ, Sun YL, Hu HZ, Li J, Zhang H and Ni ZY. 2009b. 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 YJ, Zhang H, Zhao TP, Deng XH, Wang Y and Ni ZY. 2007a. Molybdenum deposits in East Qinling. *Earth Science Frontiers*, 14: 186 – 198 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Lai Y, Lu YH and Guo DS. 2008a. Study of fluid inclusions and ore genetic type of the Qiyugou gold deposit, Henan. *Geology in China*, 35(6): 1230 – 1239 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Sun YL, Li J and Li WB. 2007b. Molybdenite Re-Os isochron age of the Wunugetu Shan porphyry CuMo deposit, Inner Mongolia and its implication for metallogenic geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2881 – 2888 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Sun YL, Li J, Xue LW and Li WB. 2008b. The molybdenite ReOs isotope age of the Dahu AuMo deposit, Xiaqingling and the Indosinian mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 24, 810 – 816
- Li S, Sun W, Zhang G, Chen J and Yang Y. 1996. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia Valley in the Mianlue tectonic arc, South Qinling: observations for a Paleozoic oceanic basin and its close time. *Science in China Series B*, 39: 300 – 310
- Li SG, Wang SS, Chen YZ, Liu DL, Qiu J, Zhou HX and Zhang ZM. 1994. Excess argon in phengite from eclogite: observations from dating of eclogite minerals by Sm-Nd, Rb-Sr, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ methods. *Chemical Geology*, 112: 343 – 350
- Li WB, Chen YJ, Lai Y and Ji JQ. 2008. Metallogenic time and tectonic setting of the Bainaimiao Cu-Au deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 4(4): 890 – 898 (in Chinese with English abstract)
- Li WB, Lai Y and Wang BG. 2007. Fluid inclusion study of the Bainaimiao Cu-Au deposit in Inner Mongolia, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 2165 – 2176 (in Chinese with English abstract)
- Li YF, Mao JW, Hu HB, Guo BJ and Bai FJ. 2005. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area. *Mineral Deposits*, 24(3): 292 – 304 (in Chinese with English abstract)
- Li YH, Jiang SY and Xue CJ. 1995. Silicon and oxygen isotope evidence for exhalative genesis of the Devonian Pb-Zn deposits in the Feng-Tai region, Qinling Mountains, China. *Chinese Science Bulletin*, 40(1): 87 – 88
- Liu GY, Yan CH, Song YW and Duan SG. 2007. Characteristics and genesis of Chitudian lead-zinc deposits in Luanchuan County. *Geological Survey and Research*, 30(4): 263 – 270 (in Chinese with English abstract)
- Liu HJ, Chen YJ, Mao SD, Zhao CH and Yang RS. 2008. Element and Sr-Nb-Pb isotope geochemistry of granite-porphyry dykes in the Yangshan gold belt, western Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1101 – 1111 (in Chinese with English abstract)
- Liu J, Wu G, Zhong W and Zhu MT. 2009. Fluid inclusions study of the Sankuanggou skarn Fe-Cu deposit, Heilongjiang Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2631 – 2641 (in Chinese with English abstract)
- Liu JF, Sun Y and Sun WD. 2009. LA-ICP-MS zircon dating from the Lajimiao mafic complex in the Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 320 – 330 (in Chinese with English abstract)
- Liu JJ, Liu GZ, Liao YF, Zheng WJ, Yue LX, Hua SG, Mao GJ and Wu SH. 2008. Discovery and significance of scheelite orebodies in the Zhaishang gold deposit, southern Gansu. *Geology in China*, 35(6): 1057 – 1064 (in Chinese with English abstract)
- Liu JJ, Mao GJ, Ma XH, Li LX, Guo YQ and Liu GZ. 2008. Discovery of Cu-Ni-Zn-Sn-Fe intermetallic compound and S-bearing alloy in the Zhaishang gold deposit, southern Gansu Province and its geological significance. *Science in China Series D*, 51(6): 769 – 777
- Lu XX, Dong Y, Chang QL, Xiao QH, Li XO, Wand XO and Zhang GW. 1996. Indosinian Shahewan rapakivi granite in Qinling and its dynamic significance. *Science in China Series D*, 39(3): 266 – 272
- Lu YH, Li WB, Zhong RC and Lai Y. 2009a. Metallogenic time and tectonic setting of the Hadamiao gold deposit in Xianghuangqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2615 – 262 (in Chinese with English abstract)
- Lu YH, Zhang Y, Lai Y and Wang YZ. 2009b. LA-ICPMS zircon U-Pb dating of magmatism and mineralization in the Jinchang gold ore-field, Heilongjiang province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2902 – 2912 (in Chinese with English abstract)
- Luo MJ, Zhang FM, Dong QY, Xu YR, Li SM and Li KH. 1991. Molybdenum deposits in China. Zhengzhou: Henan Press of Science and Technology, 118 – 128, 403 – 408 (in Chinese)
- Ma XH, Chen B, Lai Y and Lu YH. 2009. Petrogenesis and mineralization chronology study on the Aolunhua porphyry Mo deposit, Inner Mongolia, and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2939 – 2950 (in Chinese with English abstract)
- Ma XH, Liu JJ, Li LX, Mao GJ and Guo YQ. 2008. Zhaishang gold deposit in Gansu Province: Characteristics and evolution of ore-forming fluids and their metallogenic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2069 – 2078 (in Chinese with English abstract)
- Mao SD, Yang RS, Qin Y and Guo JH. 2009. Characteristics of gold-bearing mineral and occurrence of gold in the Yangshan gold field, Gansu province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2776 – 2790 (in Chinese with English abstract)
- Mi M, Chen YJ, Sun YL, Wang Y and Jiang HZ. 2009. Rare earth element and platinum-group element geochemistry of the Zhou'an Ni-Cu-PGE deposit in Henan province: Implications for hydrothermal origin. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2769 – 2775 (in Chinese with English abstract)
- Mi M. 2008. The geological and geochemical characteristics of Zhou'an Cu-Ni-PGE sulfide deposit, Henan. Ph. D. thesis, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1 – 94 (in Chinese with English abstract)
- Molnar F, Watkinson DH and Jones PC. 2001. Multiple hydrothermal processes in footwall unit of the north range, Sudbury igneous complex, Canada, and implications for the genesis of vein-type Cu-Ni-PGE deposits. *Economic Geology*, 96: 1645 – 1670
- Naldrett AJ. 1989. Magmatic sulfide deposits. New York: Oxford University Press, 186
- Ni ZY, Li N, Guan SJ, Zhang H and Xue LW. 2008. Characteristics of fluid inclusions and ore genesis of the Dahu Au-Mo deposit in the Xiaqingling gold field, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 24

- (9): 2058 – 2068 (in Chinese with English abstract)
- Ni ZY, Li N, Zhang H and Xue LW. 2009. Pb-Sr-Nd isotope constraints on the source of ore-forming elements of the Dahu Au-Mo deposit, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2823 – 2832 (in Chinese with English abstract)
- Nie FJ, Pei RF and Wu LS. 1994. Nd, Sr and Pb isotopic study of copper (gold) and gold deposit in Bainaimiao area, Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 13(4): 331 – 344 (in Chinese with English abstract)
- Niu XL, Chen B and Ma X. 2009. Clinopyroxenes from the Fanshan pluton, Hebei. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 359 – 373 (in Chinese with English abstract)
- Pan YM and Dong P. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. *Ore Geology Reviews* 15: 177 – 242
- Peng P, Zhai MG, Ernst RE, Guo JH, Liu F and Hu B. 2008. A 1.78 Ga large igneous province in the North China craton: The Xiong'er volcanic province and the North China dyke swarm. *Lithos*, 101: 260 – 280
- Peng RM, Zhai YS, Han XF, Wang ZG, Wang JP and Liu JJ. 2007a. Sinesedimentary volcanic activities in the cracking process of the Mesoproterozoic aulacogen of passive continental margin in Langshan-Zhaershan area, Inner Mongolia, and its indicating significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 1007 – 1017 (in Chinese with English abstract)
- Peng RM, Zhai YS, Han XF, Wang ZG, Wang JP and Shen CL. 2007b. Mineralization response to the structural evolution in the Langshan orogenic belt, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 679 – 688 (in Chinese with English abstract)
- Pirajno F. 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Berlin: Springer, 1 – 1250
- Qi JP, Chen YJ and Li QZ. 2004. The epithermal deposits in the northern margin of North China craton: spatiotemporal distribution and tectonic setting. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 82 – 92 (in Chinese with English abstract)
- Qi JP, Chen YJ and Pirajno F. 2005. Geological characteristics and tectonic setting of the epithermal deposits in the northeast China. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2005, 25(2): 47 – 59 (in Chinese with English abstract)
- Qi JP, Chen YJ, Ni P, Lai Y, Ding JY, Song YW and Tang GJ. 2007. Fluid inclusion constraints on the origin of the Lengshuibeiou Pb-Zn-Ag deposit, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2119 – 2130 (in Chinese with English abstract)
- Qi JP, Song YW, Li SQ, Chen FK. 2009. Single-grain Rb-Sr isotopic composition of the Xigou Pb-Zn-Ag deposit, Luanchuan, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2843 – 2854 (in Chinese with English abstract)
- Qi JP. 2006. *Geology, Geochemistry and Genesis of Vein-Type Lead-zinc-silver Deposits in Luanchuan, Henan* (Doctoral thesis). Beijing: Peking University, 1 – 125 (in Chinese with English abstract)
- Qian XL. 1996. The nature of the Early Precambrian continental crust and its tectonic evolution model. *Acta Petrologica Sinica*, 12(2): 169 – 178 (in Chinese with English abstract)
- Qin Y and Zhou ZJ. 2009. Organic geochemistry characteristics of Yangshan super-large gold deposit, Gansu province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2801 – 2810 (in Chinese with English abstract)
- Qiu JS, Lo CH, McInnes BIA and Zhou JC. 2000. Potash-rich magmatism and associated gold-copper mineralization in the Yishu deep fault zone and its vicinity, Eastern China. *Resource Geology*, 50: 269 – 280
- Qiu JS, Zhang XL, Hu J and Li Z. 2009. In situ LA-ICP-MS analyses of apatites from carbonatites in western Shandong province: Implications for petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2855 – 2865 (in Chinese with English abstract)
- Ripley EM, Sarkar A and Li C. 2005. Mineralogic and stable isotopic studies of hydrothermal alteration at the Jinchuan Ni-Cu deposit, China. *Economic Geology*, 100: 1349 – 1361
- Santosh M, Wilde SA and Li JH. 2007. Timing of Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism in the North China Craton: Evidence from SHRIMP U – Pb zircon geochronology. *Precambrian Research*, 159: 178 – 196
- Sengör AMC and Natal'in BA. 1996. Paleotectonics of Asia: fragments of synthesis. In: Yin A, Harrison TM (Eds.), *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 486 – 640
- Sengör AMC, Natal'in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299 – 307
- Shi YX, Li N and Yang Y. 2009. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Sandaozhuang Mo-W deposit in Luanchuan County, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2575 – 2587 (in Chinese with English abstract)
- Shu QH, Jiang L, Lai Y and Lu YH. 2009. Geochronology and fluid inclusion study of the Aolunhua porphyry Cu-Mo deposit in Arhorqin Area, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2601 – 2614 (in Chinese with English abstract)
- Sun FY, Wang L, Huo L and Wang KY. 2008. Fluid inclusion study on Wulaga gold deposit in Heilongjiang Province and implications for ore genesis. *Geology in China*, 35(6): 1267 – 1273 (in Chinese with English abstract)
- Sun S, Zhang GW and Chen ZM. 1985. *Geologic Evolution of the South of the North China Fault-block*. Beijing: Metallurgy Press, 267 (in Chinese)
- Sun WD, Ding X, Hu YH and Li XH. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262: 533 – 542
- Sun WD, Li SG, Chen YD and Li YJ. 2002. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, Central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt. *Journal of Geology*, 110: 457 – 468
- Tang HS, Chen YJ and Wu G. 2009a. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating and its geological implication of the Houxianyu boron deposit, Liangning province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2752 – 2762 (in Chinese with English abstract)
- Tang HS, Chen YJ, Wu G and Lai Y. 2008. The C-O isotope composition of the Liaohe Group, northern Liaoning province and its geologic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 129 – 138 (in Chinese with English abstract)
- Tang HS, Chen YJ, Wu G and Yang T. 2009b. Rare earth element geochemistry of carbonates of Dashiqiao Formation, Liaohe Group, eastern Liaoning province: Implications for Lomagundi Event. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3075 – 3093 (in Chinese with English abstract)
- Tang HS, Wu G and Lai Y. 2009c. The C-O isotope characteristics and genesis of the Dashiqiao magnesite deposit, Liaoning province, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 455 – 467 (in Chinese with English abstract)
- Tang ZL and Li WY. 1995. *Mineralized mechanism and geological contrast of Jinchuan Cu-Ni-(PGE) deposit*. Beijing: Geological Publishing House, 209 (in Chinese)
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, 312
- Tu GZ and Li CY. 2006. On comparative metallogeny. *Geochemica*, 35: 1 – 5 (in Chinese with English abstract)
- Tu GZ. 1986. On the formation of ore deposits by reworking, with remarks on the weakness of the present genetic classification of ore deposits. *Geochemical Collections*, Beijing: Science Press, 1 – 7

- (in Chinese with English abstract)
- Tu GZ. 1987. Geochemistry of Strata-bound Deposits in China (Vol. 2). Beijing: Science Press (in Chinese)
- Tu GZ. 1988. Geochemistry of Strata-bound Deposits in China (Vol. 3). Beijing: Science Press (in Chinese)
- Wan B, Hegner E, Zhang LC, Rocholl A, Chen ZG, Wu HY and Chen FK. 2009. Rb-Sr Geochronology of Chalcopyrite from the Chehugou Porphyry Mo-Cu Deposit (Northeast China) and Geochemical Constraints on the Origin of Hosting Granites. *Economic Geology*, 104: 351 – 363
- Wan YS, Song B, Liu DY, Wilde SA, Wu JS, Shi YR, Yin XY and Zhou HY. 2006. SHRIMP U – Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event. *Precambrian Research*, 149: 249 – 271
- Wang CY, Prichard HM, Zhou MF and Fisher PC. 2008. Platinum-group minerals from the Jinbaoshan Pd-Pt deposit, SW China: evidence for magmatic origin and hydrothermal alteration. *Mineralium Deposita*, 43: 791 – 803
- Wang HC, Zhao FQ, Li HM, Sun LX, Miao LC and Ji SP. 2007. Zircon SHRIMP ages of the dioritic rocks from northern Hebei: the geological records of Late Paleozoic magmatic arc. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 597 – 604 (in Chinese with English abstract)
- Wang HY and Peng XL. 2008. Genesis of magnetite of the Wengquangou consenite deposit, Fengcheng county, Liaoning province. *Geology in China*, 35: 1299 – 1306 (in Chinese with English abstract)
- Wang JG, Zhang J, Wang SW, Zhang D, Qi XJ, Wu GG and Zhao PZ. 2009. Characteristics of Fluid Inclusions and Metallogenetic Geodynamical Setting of the Taipinggou Mo Deposit in Inner Mongolia, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2621 – 2630 (in Chinese with English abstract)
- Wang JM, Chen YJ, Li SL, Wang GM and Mi M. 2006. Geological feature and cause of formation of Zhou'an PGE-Cu-Ni deposit. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 26(3): 31 – 37 (in Chinese with English abstract)
- Wang RT, He Y, Wang DS and Liu MW. 2003. Re-Os isotope age and its applications to the Jianchaling nickel-copper sulfide deposit, Lueyang, Shaanxi province. *Geological Review*, 49(2): 205 – 211 (in Chinese with English abstract)
- Wang SW, Wang JG, Zhang D, Qi XJ, Wu GG, Zhao PZ Yang ZF and Liu YB. 2009. Geochronological study on Taipinggou molybdenum deposit in Da Hinggan Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2913 – 2923 (in Chinese with English abstract)
- Wang TG, Ni P, Wang GG and Zhang T. 2008. Identification and significance of methane-rich fluid inclusions in Changba Pb-Zn deposit, Gansu province. *Acta Petrologica Sinica*, 24: 2015 – 2112 (in Chinese with English abstract)
- Wang XX, Wang T, Jahn BM, Hu NG and Chen W. 2007. Tectonic significance of Late Triassic post-collisional lamprophyre dykes from the Qinling Mountains. *Geological Magazine* 144(5): 837 – 848
- Wang Y, Chen YJ, Ma HW and Xu YL. 2009. Study on ore geology and fluid inclusions of the Tangjiaping Mo deposit, Shangcheng County, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 468 – 480 (in Chinese with English abstract)
- Wei QG, Yao JM, Zhao TP, Sun YL, Li J, Yuan ZL and Qiao B. 2009. Discovery of a ~1.9Ga Mo deposit in the eastern Qinling orogen: Molybdenite Re-Os ages of the Longmendian Mo deposit in Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2747 – 2751 (in Chinese with English abstract)
- Winkler HGF. 1976. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Berlin: Springer, 1 – 334
- Wu CZ, Gu LX, Feng H, Zhang ZZ, Liu SH, Wang CH and Wang ZY. 2008. Genetic types of orebodies in the Xitieshan lead-zinc deposit, Qinghai Province, Western China. *Geology in China*, 35: 1185 – 1196 (in Chinese with English abstract)
- Wu G, Chen YJ, Sun FY and Liu AK. 2008. Basement nature and tectonic evolution of Erguna massif in the northern Da Hinggan Mountains, China. The Gondwana 13 Program and Abstracts, Dali, 225 – 226
- Wu G, Chen YJ, Zhao ZH, Zhao TP, Li ZT and Zhang Z. 2009a. The geochemistry, zircon SHRIMP U-Pb age and petrogenesis of the East Luoguhe granites at the northern end of the Great Hinggan Range. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 233 – 247 (in Chinese with English abstract)
- Wu G, Liu J, Zhong W, Zhu MT, Mei M and Wan Q. 2009b. Fluid inclusion study of the Tongshan porphyry copper deposit, Heilongjiang province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2995 – 3006 (in Chinese with English abstract)
- Wu G, Sun FY, Zhao CS, Ding QF and WANG L. 2007. Fluid inclusion study on gold deposits in northwestern Erguna metallogenic belt, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2227 – 2240 (in Chinese with English abstract)
- Wu G, Sun FY, Zhao CS, Li ZT, Zhao AL, Pang QB and Li GY. 2005. Discovery of the Early Paleozoic post-collisional granites in northern margin of the Erguna massif and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2733 – 2743
- Wu G. 2008. Metallogenesis of nonferrous-precious metals in northern Great Hinggan Range. Guangzhou: Post-doctor Research Report of Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract)
- Xiang H, Zhang L, Zhong ZQ, Zhang HF, Zheng JP and Liu L. 2009. Zircon U-Pb geochronology and metamorphism of mafic granulite from north Tongbai, central China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 348 – 358
- Xiao WJ, Windley BF, Hao J and Zhai MG. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22: 1069 – 1089
- Xiao WJ, Zhang LC and Qin KZ. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304, 370 – 395
- Xu C, Campbell IH, Kynicky J, Allen CM, Chen YJ, Huang ZL and Qi L. 2008a. Comparison of the Daluxiang and Maoniuping carbonatitic REE deposits with Bayan Obo REE deposit, China. *Lithos*, 106: 12 – 24
- Xu C, Qi L, Huang ZL, Chen YJ, Yu XH, Wang LJ and Li ED. 2008b. Abundances and significance of platinum group elements in carbonatites from China. *Lithos*, 105: 201 – 207
- Xu C, Song WL, Qi L and Wang LJ. 2009. Geochemical characteristics and tectonic setting of ore-bearing carbonatite in Huanglongpu Mo ore field. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 422 – 430 (in Chinese with English abstract)
- Xu XS, Griffin WL, Ma X, O'Reilly SY, He ZY and Zhang CL. 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*, DOI 10.1007/s00710-009-0062-5
- Xu YH, Zhao TP and Chen W. 2009. Origin of Felsic Volcanic Rocks Associated with VMS-type Deposits in the Er'langping Group, East Qinling: Implications for Ore – forming Setting. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 399 – 412 (in Chinese with English abstract)
- Xu YH, Zhao TP, Peng P, Zhai MG, Qi L and Luo Y. 2007. Geochemical characteristics and geological significance of the Paleoproterozoic volcanic rocks from the Xiaoliangling Formation in the Luliang area, Shanxi province. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 1123 – 1132 (in Chinese with English abstract)
- Xu YH, Zhao TP, Zhang YX and Chen W. 2008. Geochemical

- characteristics and geological significances of the Dagushi Formation silicic clastic rocks, the Paleoproterozoic Xiong'er Group from the southern North China craton. *Geological Review*, 54: 145 – 154 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Li HB and Yao JX. 2006. The Early Palaeozoic terrane framework and the formation of the high-pressure (HP) and ultra-high pressure (UHP) metamorphic belts at the Central Orogenic Belt (COB). *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1793 – 1805 (in Chinese with English abstract)
- Yan GH, Mu BL, Zeng YS, Cai JH, Ren KX and Li FT. 2007. Igneous carbonates in North China craton: the temporal and spatial distribution, Sr and Nd isotopic characteristics and their geological significance. *Geological Journal of China Universities*, 13: 463 – 473 (in Chinese with English abstract)
- Yan HQ, Pei YH, Song YW and Yun H. 2007. Geological characteristics of stratiform lead-zinc-silver deposit in Xigou, Luanchuan, Henan province and its genesis. *Mineral Resources and Geology*, 21(3): 245 – 250 (in Chinese with English abstract)
- Yan J, Liu HQ, Song CZ, Xu XS, An YJ, Liu J and Dai LQ. 2009. Geochronology of the volcanic rocks from Fanchang-Ningwu volcanic basins in the Lower Yangtze Region and its implications. *Chinese Science Bulletin*, 54(12): 1716 – 1724 (in Chinese)
- Yang JH and Zhou XH. 2001. Rb-Sr, Sm-Nd and Pb isotope systematics of pyrite: implications for the age and genesis of lode gold deposits. *Geology*, 29(8): 711 – 714
- Yang KF, Fan HR, Hu FF, Li XH, Liu JY, Zhao YG, Liu S and Wang KY. 2007. Skarnization age in the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe ore district, Inner Mongolia, China: Rb-Sr isochrone dating on single-grain phlogopite. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 1018 – 1022 (in Chinese with English abstract)
- Yang RS, Chen YJ and Xie JL. 2009. X-ray photoelectron spectroscopic study on arsenian pyrite and arsenopyrite from the Yangshan gold deposit, Gansu province (North China). *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2791 – 2800 (in Chinese with English abstract)
- Yang RS, Chen YJ, Zhang FX, Li ZH, Mao SD, Liu HJ and Zhao CH. 2006. The chemical Th-U-Pb ages of monazite from the Yangshan gold deposit, Gansu province and their geologic and metallogenic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2603 – 2610 (in Chinese with English abstract)
- Yang XY, Sun WD, Zhang YX and Zheng YF. 2009. Geochemical constraints on the genesis of the Bayan Obo Fe – Nb – REE deposit in Inner Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, doi: 10.1016/j.gca.2008.12.003
- Yang Y, Zhang J, Liu JJ, Sun YL, Li J and Yang ZQ. 2008. Hydrothermal metallogeny of the Tangjiaping molybdenum deposit, Henan Province. *Geology in China*, 35(6): 1240 – 1249 (in Chinese with English abstract)
- Yang Y, Zhang J, Yang YF and Shi YX. 2009. Fluid inclusions geochemistry and ore genesis of Shangfanggou Mo-Fe deposit in Luanchuan County, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2563 – 2574 (in Chinese with English abstract)
- Yang YF, Li N and Ni ZY. 2009a. Fluid inclusion study of the Jinduicheng porphyry Mo deposit, Hua county, Shaanxi province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2983 – 2993 (in Chinese with English abstract)
- Yang YF, Li N and Shi YX. 2009b. Fluid inclusion study of the Nannihu porphyry Mo-W deposit in Luanchuan, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2550 – 2562 (in Chinese with English abstract)
- Yao JM, Zhao TP, Li J, Sun YL, Yuan ZL, Chen W and Han J. 2009. The 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)
- Yao JM, Zhao TP, Wei QG and Yuan ZL. 2008. Fluid inclusion features and genetic type of the Wangpingxigou Pb-Zn deposit, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2113 – 2123 (in Chinese with English abstract)
- Ye HS, Mao JW, Li YF, Guo BJ, Zhang CQ, Liu J, Yan QR and Liu GY. 2006. SHRIMP Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the superlarge Donggou porphyry Mo deposit in East Qinling, China, and its geological implication. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1078 – 1088 (in Chinese with English abstract)
- Ye L, Cheng ZT, Lu LN, Gao W and Pan ZP. 2009. Petrological geochronology and zircon SHRIMP U-Pb of Tongchang diorites, Mianlueing area, Southern Shaanxi province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2866 – 2876 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Harrison TM (eds), 1996. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge University Press, Cambridge, 640p
- Yuan XC. 1996a. *Atlas of Geophysics in China*. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 217
- Yuan XC. 1996b. Velocity structure of the Qinling lithosphere and mushroom cloud model. *Science in China Series D*, 39: 235 – 243
- Zeng QD, Liu JM, Zhang ZL, Chen WJ, Qin F, Zhang RB, Yu WB, Zhang XH and Zhai MG. 2009a. Mineralization types, geological characteristics and geodynamic background of molybdenum deposits in Xialmulun molybdenum polymetal metallogenic belt on northern margin of North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1225 – 1238 (in Chinese with English abstract)
- Zeng QD, Liu JM, Zheng ZL, Qin F, Chen WJ, Zhang RB, Yu CM and Ye J. 2009b. The ore-forming time of the Jiguanshan porphyry molybdenum deposit, northern margin of North China Craton and the Indosinian mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 393 – 398 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG and Peng P. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665 – 2682 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 547 – 561
- Zhai MG, Zhu RX, Liu JM, Meng QR, Hou QL, Hu SB, Li Z, Zhang HF and Liu W. 2003. The key timing of the Mesozoic tectonic in northeastern China. *Science in China series D*, 33(10): 913 – 920 (in Chinese)
- Zhai YS, Deng J and Tang ZL. 2002. *Metallogenic Systems at Continental Margin*. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 416 (in Chinese)
- Zhang BR, Gao S, Zhang HF and Han YW. 2002. *Geochemistry of Qinling Orogenic Belt*. Beijing: Science Press, 47 – 72 (in Chinese)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. *Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics*. Beijing: Science Press, 855 (in Chinese)
- Zhang J, Chen YJ, Chen HY, Zhang G and Yang Y. 2008a. Isotope geochemistry of the Weishancheng stratabound gold-silver ore belt, Tongbai County, Henan Province, China. *Earth Science Frontiers* (Online English edition), 15(4): 108 – 124
- Zhang J, Chen YJ, Li GP, Li ZL and Wang ZG. 2004. Characteristics of ore geology and fluid inclusion of the Yindonggou silver deposit, Neixiang county, Henan Province: implication for metallogenic type. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 55 – 64 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Chen YJ, Qi JP and Ge J. 2009. Comparison of the typical metallogenic systems in the north slope of the Tongbai-East Qinling Mountains and its geologic implications. *Acta Geologica Sinica* (English edition), 83(2): 396 – 410
- Zhang J, Chen YJ, Shu GM, Zhang FX and Li C. 2002. *Compositional*

- study of minerals within the Qinlingiang granite, southwestern Shaanxi Province and discussions on the related problems. *Science in China Series D*, 45: 662 – 672
- Zhang J, Qi JP, Qiu JJ, You SN and Li GP. 2007. Compositional study on ore fluid of the Yindonggou silver deposit in Neixiang county, Henan province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2217 – 2226 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Yang Y, Hu HZ, Wang ZG, Li GP and Li ZL. 2009. C-S-Pb isotope geochemistry of the Yindonggou orogenic-type silver deposit in Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2833 – 2842 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Yang Y, Lu YH, Chen YJ, Wan SQ and Ma HW. 2008b. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Poshan silver deposit, Henan province. *Geology in China*, 35(6): 1220 – 1229 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JJ, Zheng YD and Liu SW. 1998. Structural features, genetic mechanism and tectonic evolution of the Xiaoninling metamorphic core complex. Beijing: Marine Press (in Chinese with English abstract)
- Zhang L, Yang RS, Mao SD, Lu YH, Qin Y and Liu HJ. 2009. Sr and Pb isotopic feature and ore-forming material source of the Yangshan gold deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2811 – 2822 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LC, Wu HY, Wan B and Chen ZG. 2009. Ages and geodynamic settings of Xilamulun Mo – Cu metallogenic belt in the northern part of the North China Craton. *Gondwana Research*, 16: 243 – 254
- Zhang SH, Zhao Y, Liu J, Hu JM, Cheng ZL, Li M, Pei J L, Chen ZY and Zhou JX. 2007. Emplacement depths of the Late Paleozoic-Mesozoic granitoid intrusions from the northern North China block and their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 625 – 638 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Zhao Y, Song B, Hu JM, Liu SW, Yang YS, Chen FK, Liu XM and Liu J. 2009. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian – Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications. *Geological Society of America Bulletin*, 121: 181 – 200
- Zhang Y, Lai Y, Qing M, Wang YZ and Xu JJ. 2008. Ore-fluid geochemistry of the J0 orebody, Jinchang gold deposit, Heilongjiang Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1131 – 1144 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YX, Jiang SQ, Zhang QL, Lai XD, Peng Y and Yang XY. 2007. A discussion on forming time of the Bayan Obo Group and ore-forming time of the Bayan Obo giant REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolia. *Geology in China*, 35: 1129 – 1137 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZQ, Lai Y and Chen YJ. 2007. Fluid Inclusion study of the Linglong gold deposit, Shandong province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2207 – 2216 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA and Sun M. 2002. Review of global 2.1 – 1.8 Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth Science Reviews*, 59: 125 – 162
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited. *Precambrian Research*, 136: 177 – 202
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA, Li SH, Liu S and Zhang J. 2006. Composite nature of the North China Granulite-Facies Belt: tectonothermal and geochronological constraints. *Gondwana Research*, 9: 337 – 348
- Zhao TP, Zhou MF, Zhai MG and Xia B. 2002. Paleoproterozoic rift-related volcanism of the Xiong'er Group, North China craton: implications for the breakup of Columbia. *International Geology Review*, 44: 336 – 351
- Zhao YM and Wu LS. 2004. Metallogenesis of Major Metallic Ore Deposits in China. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 411 (in Chinese with English abstract)
- Zhong RC and Li WB. 2009. Fluid inclusion study on the Shisiwan gold deposit in Bainaimiao ore field, Inner Mongolia, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2973 – 2982 (in Chinese with English abstract)
- Zhou B, Wang FY, Sun Y, Sun WD, Ding X, Hu YH and Ling MX. 2008. Geochemistry and tectonic affinity of Shahewan orogenic rapakivi from Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1261 – 1272 (in Chinese with English abstract)
- Zhou YY, Zhao TP, Xue LW and Wang SY. 2009a. Geochemistry and origin of Neoproterozoic amphibolites in Songshan, Hennan province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3043 – 3056 (in Chinese with English abstract)
- Zhou YY, Zhao TP, Xue LW, Wang SY and Gao JF. 2009b. Petrological, geochemical and chronological constraints for the origin and geological significance of Neoproterozoic TTG gneiss in the Songshan area, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 331 – 347 (in Chinese with English abstract)
- Zhu LM, Zhang GW, Li B, Guo B, Kang L and Lv SL. 2009. Geology, isotope geochemistry and ore genesis of the Maanqiao gold deposit, Shaanxi province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 431 – 443 (in Chinese with English abstract)
- Zhu RX, Yang ZY, Wu HN, Ma XH, Huang BC, Meng ZF and Fang DJ. 1998. Palaeomagnetic constraints on the tectonic history of the major blocks of China during the Phanerozoic. *Science in China Series D*, 41(Sup.): 1 – 19

附中文参考文献

- 包志伟, 李创举, 祁进平. 2009. 东秦岭栾川铅锌银矿田辉长岩锆石 SHRIMP 铀铅年龄及成矿时代. *岩石学报*, 24(11): 2951 – 2956
- 陈从喜, 蒋少涌, 蔡克勤, 马冰. 2003. 辽东早元古代富镁质碳酸盐岩建造菱镁矿和滑石矿床成矿条件. *矿床地质*, 22(2): 166 – 176
- 陈根文, 夏换, 陈绍清. 2008. 华北地区晚中生代构造转折的地质证据. *中国地质*, 35(6): 1162 – 1177
- 陈伟, 赵太平, 魏庆国, 徐勇航. 2008. 河北大庙 Fe-Ti-P 矿床中铁钛磷灰岩的成因: 来自磷灰石的证据. *岩石学报*, 24(10): 2301 – 2312
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 234p
- 陈衍景, 李诺. 2009. 大陆内部浆控高温热液矿床成矿流体性质及其与岛弧区同类矿床的差异. *岩石学报*, 25(10): 2477 – 2508
- 陈衍景, 刘丛强, 陈华勇, 张增杰, 李超. 2000. 中国北方石墨矿床及赋矿孔达岩系碳同位素特征及有关问题讨论. *岩石学报*, 16(2): 233 – 244
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, F Pirajno, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征. *岩石学报*, 23(9): 2085 – 2108
- 陈衍景, 肖文交, 张进江. 2008. 成矿系统: 地球动力学的有效探针. *中国地质*, 35: 1059 – 1073
- 陈衍景, 张静, 张复新, Pirajno F. 李超. 2004. 西秦岭地区卡林-类卡林金矿床及其成矿时间、构造背景和模式. *地质论评*, 50: 134 – 152
- 陈衍景. 1990. 2300Ma 地质环境突变的证据及若干问题讨论. *地层*

- 学杂志, 14(3): 178–186
- 陈衍景. 2000. 中国西北地区中亚型造山-成矿作用的研究意义和进展. 高校地质学报, 6(1): 17–22
- 陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力. 中国地质, 33: 1181–1196
- 陈志广, 张连昌, 吴华英, 万博, 曾庆栋. 2008. 内蒙古西拉木伦成矿带碾子沟矿区 A 型花岗岩地球化学和构造背景. 岩石学报, 24(4): 879–889
- 戴宝章, 蒋少涌, 王孝磊. 2009. 河南东沟钼矿花岗岩成因: 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, 24(11): 2889–2901
- 邓小华, 陈衍景, 姚军明, 李文博, 李诺, 王运, 糜梅, 张颖. 2008a. 河南省洛宁县寨凹钼矿床流体包裹体研究及矿床成因. 中国地质, 35(6): 1250–1266
- 邓小华, 李文博, 李诺, 糜梅, 张颖. 2008b. 河南嵩县纸房钼矿床流体包裹体研究及矿床成因. 岩石学报, 24(9): 2133–2148
- 邓小华, 糜梅, 姚军明. 2009a. 河南土门萤石脉型钼矿床流体包裹体研究及成因探讨. 岩石学报, 25(10): 2537–2549
- 邓小华, 姚军明, 李晶, 孙亚莉. 2009b. 东秦岭寨凹钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及熊耳期成矿事件. 岩石学报, 25(11): 2739–2746
- 丁悌平, 蒋少涌, 万德芳, 李金城, 宋彪, 赵敦敏. 1992. 华北元古宙铅锌成矿带稳定同位素研究. 北京: 北京科学技术出版社, 1–127
- 董申保, 沈淇韩, 孙大中, 卢良兆. 1986. 中国变质地质图及说明书 (1:400 万). 北京: 地质出版社, 37
- 杜琦. 1988. 多宝山斑岩铜矿床. 北京: 地质出版社. 1–386
- 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋, 王凯怡, 刘勇胜. 2009. 内蒙古白云鄂博地区晚古生代闪长质-花岗岩质岩石年代学框架及其地质意义. 岩石学报, 25(11): 2933–2938
- 范宏瑞, 谢亦汉, 王英兰. 1998. 豫西上官构造蚀变岩型金矿成矿过程中的流体-岩石反应. 岩石学报, 14: 529–541
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, Rahman AA. 2005. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约. 科学通报, 50(12): 1239–1247
- 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 李森, 郭波. 2009. 南秦岭沙河湾、曹坪、柞水岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 25(2): 248–264
- 顾连兴, 汤晓茜, 郑远川, 吴昌志, 田泽满, 陆建军, 肖新建, 倪培. 2004. 辽宁红透山铜锌块状硫化物矿床的变质变形和成矿组分再活化. 岩石学报, 20(4): 923–934
- 顾连兴, 汤晓茜, 王子江. 2005. 362℃ 和差异应力条件下硫化物在 NaCl 溶液中的再活化实验研究. 岩石学报, 2005, 21(5): 1429–1434
- 郭俊华, 毛世东, 陈衍景, 秦艳, 杨福立, 李建忠, 南争路. 2009. 甘肃文县阳山金矿田地质特征及控矿地质因素分析. 大地构造与成矿学, 33(2): 244–253
- 侯明兰, 蒋少涌, 姜耀辉, 凌洪飞. 2006. 胶东蓬莱金矿区的 S-Pb 同位素地球化学和 Rb-Sr 同位素年代学研究. 岩石学报, 22(10): 2525–2533
- 胡受奚(主编). 1988. 华北与华南古板块拼合带地质和成矿. 南京: 南京大学出版社, 558
- 胡受奚, 徐金方. 2008. 区域成矿规律对华南大地构造属性的联系. 中国地质, 35: 1045–1053
- 胡受奚, 赵懿英, 徐金方, 叶瑛. 1997. 华北地台金成矿地质. 北京: 科学出版社, 220
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 何红廖. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼-钼同位素年龄及其意义. 矿床地质, 13(3): 221–230
- 蒋少涌, 戴宝章, 姜耀辉, 赵海香, 侯明兰. 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
- 李森, 朱赖民, 张国伟. 2009. 北秦岭西部陕西铜峪 VHMS 型铜矿床矿化地质特征、成矿背景与矿床成因. 中国科学 D 辑, 待刊
- 李承东, 张福勤, 苗来成, 顾航强, 许雅雯. 2007. 吉林省洛河晚二叠世高镁安山岩 SHRIMP 锆石年代学及其地球化学特征. 岩石学报, 23: 767–776
- 李红中, 周永章, 杨志军, 古志宏, 吕文超, 何俊国, 李文, 安燕飞. 2009. 秦岭造山带西段八方山-二里河地区硅质岩的地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 25(11): 3094–3102
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 李亚萍, 王彦斌. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 23: 565–582
- 李晶, 陈衍景, 李强之, 毛世东, 秦艳, 郭俊华, 南争路, 杨荣生. 2008. 甘肃阳山金矿碳氢氧同位素与成矿流体来源. 岩石学报, 24(4): 817–826
- 李晶, 陈衍景, 李强之, 赖勇, 杨荣生, 毛世东. 2007. 甘肃阳山金矿流体包裹体地球化学和矿床成因类型. 岩石学报, 23(9): 2144–2154
- 李晶, 仇建军, 孙亚莉. 2009. 河南银洞沟银金钼矿床铼-钼同位素定年和加里东期造山-成矿事件. 岩石学报, 25(11): 2763–2768
- 李晶. 2009. 秋树湾和雷门沟斑岩矿床成矿流体与铼-钼同位素研究. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所) [博士学位论文]. 1–110
- 李诺, 陈衍景, 倪智勇, 胡海珠. 2009a. 河南省嵩县鱼池岭斑岩钼矿床成矿流体特征及地质意义. 岩石学报, 25(10): 2509–2522
- 李诺, 陈衍景, 孙亚莉, 胡海珠, 李晶, 张辉, 倪智勇. 2009b. 河南鱼池岭钼矿床辉钼矿铼-钼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, 赵太平, 邓小华, 王运, 倪智勇. 2007a. 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: 186–198
- 李诺, 赖勇, 鲁颖淮, 郭东生. 2008a. 河南祁雨沟金矿流体包裹体及矿床成因类型研究. 中国地质, 35(6): 1230–1239
- 李诺, 孙亚莉, 李晶, 李文博. 2007b. 内蒙古乌努格吐山斑岩铜钼矿床辉钼矿铼-钼等时线年龄及其成矿地球动力学背景. 岩石学报, 23(11): 2881–2888
- 李诺, 孙亚莉, 李晶, 薛良伟, 李文博. 2008b. 小秦岭大湖金钼矿床辉钼矿铼-钼同位素年龄及印支期成矿事件. 岩石学报, 24: 810–816
- 李文博, 陈衍景, 赖勇, 李建清. 2008. 内蒙古白乃庙铜金矿床的成矿时代和成矿构造背景. 岩石学报, 24(4): 890–898

- 李文博, 赖勇, 王保国. 2007. 内蒙古白乃庙铜金矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 23: 2165–2176
- 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 郭保健, 白凤军. 2005. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景. 矿床地质, 24(3): 292–304
- 刘国印, 燕长海, 宋要武, 段士刚. 2007. 河南栾川赤土店铅锌矿床特征及成因探讨. 地质调查与研究, 30(4): 263–270
- 刘红杰, 陈衍景, 毛世东, 赵成海, 杨荣生. 2008. 西秦岭阳山金矿带花岗岩元素及 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学. 岩石学报, 24(5): 1101–1111
- 刘家军, 刘光智, 廖延福, 郑卫军, 岳连雄, 华曙光, 毛光剑, 吴胜华. 2008. 甘肃寨上金矿床中白钨矿体的发现及地质特征. 中国地质, 35(6): 1057–1064
- 刘军, 武广, 钟伟, 朱明田. 2009. 黑龙江省三矿沟砂卡岩型铁铜矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 25(10): 2631–2641
- 刘军锋, 孙勇, 孙卫东. 2009. 秦岭拉庙庙镁铁质岩体锆石 LA-ICP-MS 年代学研究. 岩石学报, 25(2): 320–330
- 鲁颖淮, 李文博, 钟日晨, 赖勇. 2009a. 内蒙古镶黄旗哈达庙金矿床成矿时间和成矿构造背景. 岩石学报, 25(10): 2615–2620
- 鲁颖淮, 张宇, 赖勇, 王艳忠. 2009b. 黑龙江金厂金矿田岩浆和成矿作用的 LA-ICPMS 锆石定年. 岩石学报, 25(11): 2902–2912
- 罗铭玖, 张辅民, 董群英, 许永仁, 黎世美, 李昆华. 1991. 中国钼矿床. 郑州: 河南科学技术出版社, 18–128, 403–408
- 马星华, 陈斌, 赖勇, 鲁颖淮. 2009. 内蒙古敖伦花斑岩钼矿床成岩成矿年代学及地质意义. 岩石学报, 25(11): 2939–2950
- 马星华, 刘家军, 李立兴, 毛光剑, 郭玉乾. 2008. 甘肃寨上金矿床成矿流体性质与成矿作用探讨. 岩石学报, 24(9): 2069–2078
- 毛世东, 杨荣生, 秦艳, 郭俊华. 2009. 甘肃阳山金矿田载金矿物特征及金赋存状态研究. 岩石学报, 25(11): 2776–2790
- 糜梅, 陈衍景, 孙亚莉, 王焰, 江合中. 2009. 河南周庵铂族-铜镍矿床的稀土和铂族元素地球化学特征: 热液成矿的证据. 岩石学报, 25(11): 2769–2775
- 糜梅. 2008. 河南周庵铜镍铂族矿床地质地球化学研究. 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文: 1–94
- 倪智勇, 李诺, 管申进, 张辉, 薛良伟. 2008. 河南小秦岭金矿田大湖金-钼矿床流体包裹体特征及矿床成因. 岩石学报, 24(9): 2058–2068
- 倪智勇, 李诺, 张辉, 薛良伟. 2009. 河南大湖金钼矿床成矿物质来源的锆钨铅同位素约束. 岩石学报, 25(11): 2823–2832
- 聂凤军, 裴荣富, 吴良士. 1994. 内蒙古白乃庙地区铜(金)和金矿床钨、铈和铅同位素研究. 矿床地质, 13: 331–344
- 牛晓露, 陈斌, 马旭. 2009. 河北矾山杂岩体中单斜辉石的研究. 岩石学报, 25(2): 359–373
- 彭润民, 翟裕生, 韩雪峰, 王志刚, 王建平, 刘家军. 2007a. 内蒙古狼山-渣尔泰山中元古代被动陆缘裂陷槽裂解过程中的火山活动及其示踪意义. 岩石学报, 23: 1007–1017
- 彭润民, 翟裕生, 韩雪峰, 王志刚, 王建平, 沈存利. 2007b. 内蒙古狼山造山带构造演化与成矿响应. 岩石学报, 23: 679–688
- 祁进平, 陈衍景, Pirajno F. 2005. 东北地区浅成低温热液矿床的地质特征和构造背景. 矿物岩石, 25(2): 47–59
- 祁进平, 陈衍景, 李强之. 2004. 华北克拉通北缘浅成低温热液矿床: 时空分布和构造环境. 矿物岩石, 24(3): 82–92
- 祁进平, 陈衍景, 倪培, 赖勇, 丁俊英, 宋要武, 唐国军. 2007. 河南冷水北沟铅锌银矿床流体包裹体研究及矿床成因. 岩石学报, 23(9): 2119–2130
- 祁进平, 宋要武, 李双庆, 陈福坤. 2009. 河南省栾川县西沟铅锌银矿床铷-锶同位素研究. 岩石学报, 25(11): 2843–2854
- 祁进平. 2006. 河南栾川地区脉状铅锌银矿床地质地球化学特征及成因. 北京: 北京大学博士论文, 1–125
- 钱祥麟. 1996. 早前寒武纪大陆地壳的性质与构造演化问题. 岩石学报, 12(2): 169–178
- 秦艳, 周振菊. 2009. 甘肃省阳山超大型金矿床的有机地球化学特征研究. 岩石学报, 25(11): 2801–2810
- 邱检生, 张晓琳, 胡建, 李真. 2009. 鲁西碳酸岩中磷灰石的原位激光探针分析及其成岩意义. 岩石学报, 25(11): 2855–2865
- 石英霞, 李诺, 杨艳. 2009. 河南栾川县三道庄钼钨矿床地质和流体包裹体研究. 岩石学报, 25(10): 2575–2587
- 舒启海, 蒋林, 赖勇, 鲁颖淮. 2009. 内蒙古阿鲁科尔沁旗敖伦花斑岩铜钼矿床成矿时代和流体包裹体研究. 岩石学报, 25(10): 2601–2614
- 孙丰月, 王力, 霍亮, 王可勇. 2008. 黑龙江乌拉嘎大型金矿床流体包裹体特征及矿床成因研究. 中国地质, 35(6): 1267–1273
- 孙枢, 陈志明, 张国伟. 1985. 华北断块南部前寒武纪地质演化. 北京: 冶金工业出版社, 267
- 汤好书, 陈衍景, 武广, 赖勇. 2008. 辽北辽河群碳酸盐岩碳-氧同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 24(1): 129–138
- 汤好书, 陈衍景, 武广. 2009a. 辽宁后仙峪硼矿床氩-氩定年及其地质意义. 岩石学报, 25(11): 2752–2762
- 汤好书, 陈衍景, 武广, 杨涛. 2009b. 辽东辽河群大石桥组碳酸盐岩稀土元素地球化学及其对 Lomagundi 事件的指示. 岩石学报, 25(11): 3075–3093
- 汤好书, 武广, 赖勇. 2009c. 辽宁大石桥菱镁矿床的碳氧同位素组成和成因. 岩石学报, 25(2): 455–467
- 汤中立, 李文渊. 1995. 金川硫化铜镍(含铂)矿床成矿模式及地质对比. 北京: 地质出版社, 1–209
- 涂光炽, 李朝阳. 2006. 浅议比较矿床学. 地球化学, 35: 1–5
- 涂光炽. 1986. 论改造成矿兼评现行矿床成因分类中的弱点. 地球化学文集, 北京: 科学出版社, 1–7
- 涂光炽. 1987. 中国层控矿床地球化学(第二卷). 北京: 科学出版社
- 涂光炽. 1988. 中国层控矿床地球化学(第三卷). 北京: 科学出版社
- 王惠初, 赵凤清, 李惠民, 孙立新, 苗来成, 冀世平. 2007. 冀北闪长质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 晚古生代岩浆弧的地质记录. 岩石学报, 23: 597–604
- 王慧媛, 彭晓蕾. 2008. 辽宁凤城翁泉沟硼铁矿床磁铁矿的成因研究. 中国地质, 35: 1299–1306
- 王建国, 张静, 王圣文, 张达, 祁小军, 吴淦国, 赵丕忠. 2009. 内蒙古太平沟钼矿床流体包裹体特征及成矿动力学背景. 岩石学报, 25(10): 2621–2630
- 王建国, 陈衍景, 李胜利, 王国敏, 糜梅. 2006. 河南周庵铂族-铜镍矿床的地质特征及成因分析. 矿物岩石, 26(3): 31–37

- 王瑞廷, 赫英, 王东生, 刘民武. 2003. 略阳煎茶岭铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 地质论评, 49(2): 205–211
- 王圣文, 王建国, 张达, 祁小军, 吴淦国, 赵丕忠, 杨宗锋, 刘彦兵. 2009. 大兴安岭太平沟钼矿床成矿年代学研究. 岩石学报, 25(11): 2913–2923
- 王天刚, 倪培, 王国光, 张婷. 2008. 甘肃厂坝铅锌矿富甲烷流体包裹体的发现及其意义. 岩石学报, 24: 2105–2112
- 王运, 陈衍景, 马宏卫, 徐友灵. 2009. 河南省商城县汤家坪钼矿床地质和流体包裹体研究. 岩石学报, 25(2): 468–480
- 魏庆国, 姚军明, 赵太平, 孙亚莉, 李晶, 原振雷, 乔波. 2009. 东秦岭发现 ~1.9Ga 钼矿床——河南龙门店钼矿床 Re-Os 定年. 岩石学报, 25(11): 2747–2751
- 吴昌志, 顾连兴, 冯慧, 张遵忠, 刘四海, 王长华, 王震宇. 2008. 青海锡铁山铅锌矿床的矿体成因类型讨论. 中国地质, 35: 1185–1196
- 武广, 陈衍景, 赵振华, 赵太平, 李之彤, 张哲. 2009a. 大兴安岭北端洛古河东花岗岩的地球化学、SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和岩石成因. 岩石学报, 25(2): 233–247
- 武广, 刘军, 钟伟, 朱明田, 糜梅. 2009b. 黑龙江省铜山斑岩铜矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 25(11): 2995–3006
- 武广, 孙丰月, 赵财胜, 丁清峰, 王力. 2007. 额尔古纳成矿带西北部金矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 23(9): 2227–2240
- 武广. 2008. 大兴安岭北部有色金属-贵金属成矿规律. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所博士后报告
- 向华, 张利, 钟增球, 张宏飞, 郑建平, 刘理. 2009. 北桐柏地区镁铁质麻粒岩锆石 U-Pb 年代学及变质作用. 岩石学报, 25(2): 348–358
- 徐勇航, 赵太平, 陈伟. 2009. 东秦岭二郎坪群长英质火山岩成因及其对 VMS 型矿床成矿环境的制约. 岩石学报, 25(2): 399–412
- 徐勇航, 赵太平, 彭澎, 翟明国, 漆亮, 罗彦. 2007. 山西吕梁地区古元古界小两岭组火山岩地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 23: 1123–1132
- 徐勇航, 赵太平, 张玉修, 陈伟. 2008. 华北克拉通南部古元古界熊耳群大古石组碎屑岩的地球化学特征及其地质意义. 地质论评, 54: 145–154
- 许成, 宋文磊, 漆亮, 王林均. 2009. 黄龙铺钼矿田含矿碳酸岩地球化学特征及其形成构造背景. 岩石学报, 25(2): 422–430
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 姚建新. 2006. 中央造山带早古生代地体构架与高压/超高压变质带的形成. 地质学报, 80(12): 1793–1805
- 闫峻, 刘海泉, 宋传中, 徐夕生, 安亚军, 刘佳, 戴立群. 2009. 长江中下游繁昌-宁芜火山盆地火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 科学通报, 54(12): 1716–1724
- 严海麒, 裴玉华, 宋要武, 云辉. 2007. 河南栾川西沟层状铅-锌-银矿床地质特征及成因探讨. 矿产与地质, 21(3): 245–250
- 阎国翰, 牟保磊, 曾贻善, 蔡剑辉, 任康绪, 李凤棠. 2007. 华北克拉通火成碳酸岩时空分布和锆钽同位素特征及其地质意义. 高校地质学报, 13: 463–473
- 杨奎锋, 范宏瑞, 胡芳芳, 李向辉, 柳建勇, 赵永岗, 刘爽, 王凯怡. 2007. 白云鄂博巨型 REE-Nb-Fe 矿区夕卡岩化时代: 单颗粒金云母 Rb-Sr 法定年. 岩石学报, 23: 1018–1022
- 杨荣生, 陈衍景, 谢景林. 2009. 甘肃阳山金矿床含砷黄铁矿及毒砂的 XPS 研究. 岩石学报, 25(11): 2791–2800
- 杨荣生, 陈衍景, 张复新, 李志宏, 毛世东, 刘红杰, 赵成海. 2006. 甘肃阳山金矿独居石 Th-U-Pb 化学年龄及其地质和成矿意义. 岩石学报, 22(10): 2603–2610
- 杨艳, 张静, 刘家军, 孙亚莉, 李晶, 杨泽强. 2008. 河南汤家坪钼矿床流体成矿作用研究. 中国地质, 35(6): 1240–1249
- 杨艳, 张静, 杨永飞, 石英霞. 2009. 栾川上房沟钼铁矿床流体包裹体特征及其地质意义. 岩石学报, 25(10): 2563–2574
- 杨永飞, 李诺, 倪智勇. 2009a. 陕西省华县金堆城斑岩型钼矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 25(11): 2983–2993
- 杨永飞, 李诺, 石英霞. 2009b. 河南栾川南泥湖斑岩钼(钨)矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 25(10): 2550–2562
- 姚军明, 赵太平, 李晶, 孙亚莉, 原振雷, 陈伟, 韩军. 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
- 姚军明, 赵太平, 魏庆国, 袁振雷. 2008. 河南王平西沟铅锌矿床流体包裹体特征和矿床成因类型. 岩石学报, 24(9): 2113–2123
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 郭保健, 张长青, 刘珏, 闫全人, 刘国印. 2006. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. 地质学报, 80(7): 1078–1088
- 叶霖, 程增涛, 陆丽娜, 高伟, 潘自平. 2009. 陕南勉略宁地区铜厂闪长岩岩石地球化学及 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素年代学. 岩石学报, 25(11): 2866–2876
- 曾庆栋, 刘建明, 张作伦, 陈伟军, 覃锋, 张瑞斌, 于文斌, 张晓晖, 翟明国. 2009a. 华北克拉通西拉沐伦钼多金属成矿带钼矿化类型、特征及地球动力学背景. 岩石学报, 25(5): 1225–1238
- 曾庆栋, 刘建明, 张作伦, 覃锋, 陈伟军, 张瑞斌, 于昌明, 叶杰. 2009b. 华北克拉通北缘鸡冠山斑岩钼矿床成矿年代及印支期成矿事件. 岩石学报, 25(2): 393–398
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. 岩石学报, 23: 2665–2682
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学, 33(10): 913–920
- 翟裕生, 邓军, 汤中立. 2002. 古陆边缘成矿系统. 北京: 地质出版社. 1–416
- 张本仁, 高山, 张宏飞, 韩吟文. 2002. 秦岭造山带地球化学. 北京: 科学出版社. 1–187
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. 北京: 科学出版社, 855
- 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. 120
- 张静, 陈衍景, 陈华勇, 张冠, 杨艳. 2008a. 河南桐柏围山城层控金银成矿带同位素地球化学. 地学前缘, 15(4): 108–124
- 张静, 陈衍景, 李国平, 李忠烈, 王志光. 2004. 河南内乡县银洞沟银矿地质和流体包裹体特征及成因类型. 矿物岩石, 24(3): 55–64
- 张静, 祁进平, 仇建军, 尤世娜, 李国平. 2007. 河南省内乡县银洞沟银矿床流体成分研究. 岩石学报, 23(9): 2217–2226
- 张静, 杨艳, 胡海珠, 王志光, 李国平, 李忠烈. 2009. 河南内乡县

- 银洞沟造山型银矿床硫碳铅同位素地球化学. 岩石学报, 25(11): 2833–2842
- 张静, 杨艳, 鲁颖淮, 陈衍景, 万守全, 马宏卫. 2008b. 河南破山银矿床地质地球化学特征及成因研究. 中国地质, 35(6): 1220–1229
- 张莉, 杨荣生, 毛世东, 鲁颖淮, 秦艳, 刘红杰. 2009. 阳山金矿床锑铅同位素地球化学与成矿物质来源. 岩石学报, 25(11): 2811–2822
- 张拴宏, 赵越, 刘健, 胡健民, 陈正乐, 李森, 裴军令, 陈振宇, 周剑雄. 2007. 华北地块北缘晚古生代-中生代花岗岩体侵位深度及其构造意义. 岩石学报, 23: 625–638
- 张宇, 赖勇, 卿敏, 王艳忠, 徐佳佳. 2008. 黑龙江省金厂金矿床 J0 矿体流体地球化学研究. 岩石学报, 24(5): 1131–1144
- 张祖青, 赖勇, 陈衍景. 2007. 山东玲珑金矿流体包裹体地球化学特征. 岩石学报, 23(9): 2207–2216
- 章雨旭, 江少卿, 张绮玲, 赖晓东, 彭阳, 杨晓勇. 2008. 论内蒙古白云鄂博群和白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床成矿的年代. 中国地质, 35: 1129–1137
- 赵一鸣, 吴良士. 2004. 中国主要金属矿床成矿规律. 北京: 地质出版社, 411
- 钟日晨, 李文博. 内蒙古白乃庙矿田十四万金矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 25(11): 2973–2982
- 周滨, 汪方跃, 孙勇, 孙卫东, 丁兴, 胡艳华, 凌明星. 2008. 秦岭沙河湾造山带型环斑花岗岩地球化学及构造属性讨论. 岩石学报, 24(6): 1261–1272
- 周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 王世炎, 高剑峰. 2009b. 河南嵩山地区新太古代 TTG 质片麻岩的成因及其地质意义: 来自岩石学、地球化学及同位素年代学的制约. 岩石学报, 25(2): 331–347
- 周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 王世炎. 2009a. 河南嵩山地区新太古代斜长角闪岩的地球化学特征与成因. 岩石学报, 25(11): 3043–3056
- 朱赖民, 张国伟, 李犇, 郭波, 康磊, 吕拾零. 2009. 陕西省马鞍桥金矿床地质特征、同位素地球化学与矿床成因. 岩石学报, 25(2): 431–443