

胶东和小秦岭:两类不同构造环境中的造山型金矿省*

蒋少涌¹ 戴宝章¹ 姜耀辉¹ 赵海香¹ 侯明兰²

JIANG ShaoYong¹, DAI BaoZhang¹, JIANG YaoHui¹, ZHAO HaiXiang¹ and HOU MingLan²

1. 南京大学地球科学系 内生金属成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210093

2. 中国冶金总局山东局, 济南 250014

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

2. Shandong Bureau of China Metallurgical Geology Bureau, Jinan 250014, China

2009-03-30 收稿, 2009-05-29 改回.

Jiang SY, Dai BZ, Jiang YH, Zhao HX and Hou ML. 2009. Jiaodong and Xiaozhiling: two orogenic gold provinces formed in different tectonic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11):2727–2738

Abstract Jiaodong and Xiaozhiling areas are two largest gold metallogenic provinces in China. On the basis of field observation and compilation and evaluation of available research progresses and data in these two areas, we argued that gold deposits in both Jiaodong and Xiaozhiling are orogenic gold deposits, but formed in different geological settings. The Jiaodong gold deposits formed in an accretionary orogenic setting while the Xiaozhiling was in a collisional orogenic setting. The Jiaodong gold deposits are likely formed in an active continental margin related to subduction of the Pacific plate in early Cretaceous (ca. 130 ~ 120Ma). They are mainly hosted in Mesozoic granitoids and controlled by NNE-trend or NE-trend fault zones. The ore-forming fluids have low salinity and high CO₂ contents, and the He-Ar isotopic systematics in fluid inclusion show fingerprint of mantle-derived fluid input. As the consequence of roll-back of the Pacific slab and increase in density of lower crust when changed into eclogite after thickened by compression, part of the lithospheric mantle and lower crust were delaminated, which led to intensive crust-mantle interaction and extensive magmatism with formation of gold deposits in Jiaodong. In contrast, in the Xiaozhiling area gold deposits are mainly controlled by brittle-ductile shear zones (mainly EW-trend) in metamorphic basement rocks of Taihua Group, and show no close connection with Mesozoic granites. Geological features of these deposits (e. g., hydrothermal fluid with low salinity and high CO₂ contents, and originated mainly from metamorphic water) are consistent with those of orogenic gold deposits worldwide. Some vein-type Au-Mo deposits have been dated at 215 ~ 256Ma through method of molybdenite Re-Os geochronology, which support the idea that the gold deposits in the Xiaozhiling area mainly formed in Indosinian period, when collision between North China Craton and Yangtze Block took place.

Key words Jiaodong gold province; Xiaozhiling gold province; Subduction-related accretion orogenesis; Continental collision orogenesis; Orogenic gold deposit

摘要 胶东和小秦岭是我国排名前两位的金矿产地,根据对这两个地区的实地野外考察、室内研究及对已有大量研究成果的总结,我们认为胶东与小秦岭地区的金矿床均可归入造山型金矿的范畴,它们分别形成于增生型造山体制和碰撞型造山体制。胶东金矿床形成于早白垩世(130~120Ma左右)与洋壳俯冲(增生)造山相关的活动大陆边缘环境,矿床主要产于中生代花岗岩体中,严格受断裂带(NNE向或NE向为主)控制,成矿流体具有低盐度高CO₂含量的特征,He-Ar同位素研究显示成矿过程有幔源物质的加入。综合金矿床及中生代岩浆岩(特别是与成矿近同时的早白垩世郭家岭花岗岩及基性岩脉)的地质地球化学特征与成岩成矿动力学,我们提出在俯冲的太平洋板块后退的背景下,胶东地区增厚地壳中的榴辉岩相下地壳及下伏岩石圈地幔发生两阶段拆沉,强烈的壳幔相互作用最终导致了早白垩世普遍的岩浆活动及金的爆发成矿的模式。小秦岭地区金矿床主要以大型含金石英脉的形式产出,产于太华群变质基底脆性-韧性剪切带(EW向为主)中,而与区域内燕山期大型花岗岩岩基没有直接联系,矿床地质特征(如低盐度高CO₂,以变质流体为主的成矿热液)与造山型金矿吻合,He-Ar同位素特征表明金矿床形成时有幔源物质的加入。小秦岭地区脉状Au-Mo矿床印支期成矿年龄(215~256Ma,辉钼矿Re-Os)表

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)课题(2006CB403506)资助。

第一作者简介: 蒋少涌,男,1964年生,教授,博导,从事矿床地球化学研究, E-mail: shyjiang@nju.edu.cn

明印支期是小秦岭地区金成矿的主要时期,小秦岭金矿属于陆陆(华北与扬子)碰撞造山过程中形成的造山型金矿。

关键词 胶东金矿省;小秦岭金矿省;俯冲增生造山;陆陆碰撞造山;造山型金矿

中图法分类号 P618.51

1 引言

胶东金矿省和小秦岭金矿省是我国两个最著名的金成矿区带,赋存有许多大型-超大型的金矿床,它们均位于华北地台的边缘区域,其中胶东金矿省位于华北地台的东南部边缘,而小秦岭金矿省位于华北地台的南部边缘(图1)。

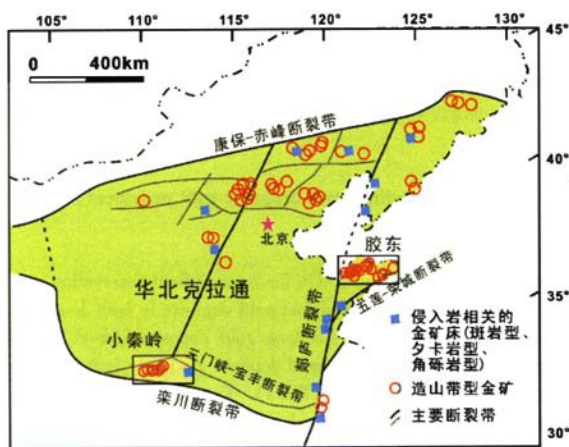


图1 胶东金矿省与小秦岭金矿省大地构造位置
(据 Chen *et al.*, 1998 修编)

Fig. 1 Geological locations of the Jiaodong and Xiaolingling gold provinces (after Chen *et al.*, 1998)

前人在这两个金矿省开展了大量的地质、地球化学研究工作,积累了十分丰富的数据和资料,然而对其成因却一直存在较大争论。随着近年来国际上造山型金矿床新概念的提出,一些学者认为胶东和小秦岭金矿均属于造山型金矿(Chen *et al.*, 1998; Goldfarb *et al.*, 2001; 毛景文, 2001, 2003; Li *et al.*, 2002; Qiu *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2002; Kerrich *et al.*, 2005; Groves and Beirlein, 2007);但也有一些学者持反对意见,如翟明国等(2004)提出胶东金矿是非造山型金矿,属陆内成矿作用。我们在进行华北陆缘造山与成矿作用 973 课题研究过程中,分别对这两个金矿省开展了地质地球化学研究,通过对比,我们发现这两个金矿省的成矿作用既有许多惊人的相似性,又有许多截然不同的差异处。我们初步认为,这两个金矿省中的主要金矿床可能均属于造山型金矿,其中,胶东金矿床属于与太平洋板块俯冲有密切关联的俯冲(增生)过程中形成的造山型金矿,成矿过程与华北东部中生代岩石圈减薄和两期拆沉作用有关,主成矿期为燕山期;而小秦岭金矿属于与扬子板块和华北板块碰撞造山

作用有密切关联的地质过程中形成的造山型金矿,主成矿期为印支期。下面,我们通过对这两个金矿省的成矿地质背景、成岩成矿特征、成矿年代等的异同对比,来阐明我们的观点,建立金成矿模型。

2 地质概况

胶东地区是我国最大的金矿产地,累计探明黄金储量已超过 900t (Qiu *et al.*, 2002)。区内出露地层以前寒武纪变质地层为主,广泛分布于中部及北部地区,主要有晚太古、古元古以及新元古代变质岩。晚太古代变质基底主要包括麻粒岩、角闪岩、片麻岩以及绿片岩,锆石 SHRIMP U-Pb 年代学的结果表明角闪岩的原岩形成于 $2530 \pm 17\text{Ma}$,在 $1852 \pm 37\text{Ma}$ 时发生变质作用(Zhang *et al.* 2003)。早元古代变质岩石主要包括片麻岩、片岩、大理岩、硅质岩及麻粒岩;而新元古代变质岩石主要为一些浅变质岩,包括板岩、硅质岩和大理岩(Chen *et al.* 1993)。区内岩浆岩十分发育(徐金方等,1989;孟繁聪等,2001;杨进辉等,2003),有玲珑片麻状黑云母花岗岩(在牟平-乳山成矿带称为昆嵛山花岗岩),郭家岭似斑状花岗闪长岩,和切穿郭家岭岩体的艾山似斑状二长花岗岩。区内脉岩(基性脉岩、中酸性脉岩、酸性脉岩和钾长伟晶岩)比较发育,特别是煌斑岩与金矿脉走向一致,几乎都受 NE 向断裂控制,分布在矿脉的上下盘或其中间,与金矿脉相互穿插、包裹,甚至发生矿化。据刘辅臣(1984)统计,走向为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 的断裂控制着 68% 的脉岩和 92% 的矿体。按煌斑岩与金矿体的切穿关系,煌斑岩可分为成矿前、成矿期和成矿后 3 种。区内断裂构造极其发育。直接控制金矿分布的构造带,基本呈 NE-NNE 向,规模一般都比较,不论在航片上,还是在卫星片上大都有清晰的线性构造显示。具有明显多期不同性质、不同层次的活动特点,其晚期的活动,主要显示以左旋压扭性的构造面为主。代表性的断裂带有黄(县)-掖(县)断裂带、招(远)-平(度)断裂带、金牛山断裂带等。其中黄-掖断裂带控制了焦家、新城等大型-超大型金矿床的分布和产出、招-平断裂带控制了玲珑金矿田的分布和产出、金牛山断裂带控制了牟乳金矿田的分布和产出。

胶东地区可划分出三条大的金成矿带,即招远-莱州金矿带、栖霞-蓬莱金矿带和牟平-乳山金矿带(图2)。招远-莱州金矿带,呈 NE-NNE 向展布,储量占整个胶东金矿储量的近 90%。金矿脉主要产于玲珑花岗岩内。该带产出有特大型金矿 5 个(焦家、阜山、三山岛、新城、台上(玲南)),大型金矿床 3 个(仓上、玲珑、望儿山),中小型金矿床众多。金矿床类型主要有破碎-蚀变岩型和石英脉型。栖霞-蓬莱金矿带,沿 NE-NNE 向断裂带分布。金矿脉围岩既有胶东群变质

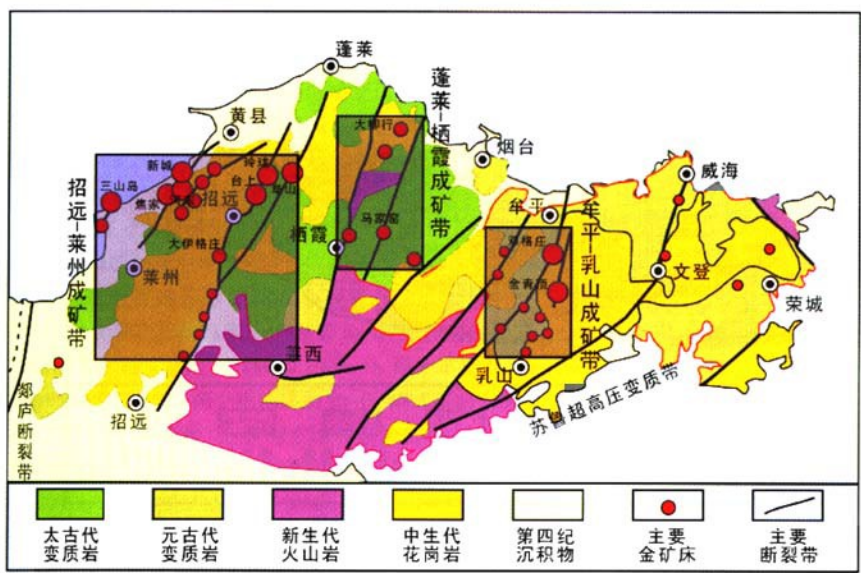


图2 胶东金矿省中金矿床分布及地质简图
(据杨敏之,1998; Fan *et al.* , 2003 综合而成)
Fig.2 Simplified geological map and gold deposit distribution in the Jiaodong gold province
(modified after Yang, 1998; Fan *et al.* , 2003)

岩,又有郭家岭花岗岩。典型矿床有黑岚沟金矿(石皮山、齐家沟、黑金顶)、大柳行金矿、河西金矿等。牟平-乳山金矿带,主要沿 NNE 向断裂带分布,NNE 向与 NEE 向构造交汇处出现大型金矿床,金矿床呈等距构造格式分布。金青顶、邓格庄金矿床是该矿带的两个大型金矿床。

小秦岭地区位于华北克拉通南缘,属秦岭碰撞造山带的边缘组成部分,近 NE 向展布,是我国仅次于胶东的第二大黄金产地。受中生代秦岭(T_{12} 全面碰撞,据张国伟等,1996;或主碰撞发生于晚三叠世,据 Meng *et al.* , 2000)碰撞造山的影响,小秦岭地区受到强烈挤压,其南北边界断裂(南侧为黑沟-栾川断裂带,北侧为三门峡-宝丰断裂带)是两条反向的逆冲推覆带。在碰撞造山及随后的陆内造山过程中,伸展体制导致小秦岭地区最终演化为一变质核杂岩(张进江等,1998,2003),主要发生于早-中白垩世(毛景文等,2005)。该区构造分带特征显著,作为本区刚性基底的太华群深变质岩系出露于太要-故县断裂与巡马道-小河断裂之间(图3),而浅变质的盖层(秋岔群,熊耳群,官道口群,震旦系,寒武系和早奥陶统及新生界地层)出露于巡马河-小河断裂与铁炉子-栾川断裂之间。岩浆作用贯穿本区整个地质演化历史,晋宁期花岗岩以小秦岭南侧呈 EW 向带状展布的小河岩体为代表,主要为黑云二长花岗岩;燕山期花岗岩在本区广泛发育,呈巨大岩基,代表性岩体有华山岩体、文峪岩体和娘娘山岩体,岩性以黑云二长花岗岩和黑云母花岗岩为主。基性岩脉主要有辉绿岩、辉长辉绿岩、辉长辉绿玢岩、辉长玢岩及煌斑岩脉等。小秦岭基底内部断裂构造非常发育,正是这些断

万方数据

裂控制了小秦岭金矿床的产出和分布,同时也控制了本区岩脉的产出。断裂走向以 EW 为主,规模最大,其次为 NW 向、NE 向和近 SN 向。小秦岭金矿的矿体严格受剪切构造带的控制,表现为早期的韧性剪切带经后期脆韧性变形叠加而形成张性扩容空间,有利于矿体就位(胡正国等,1994)。石英脉型金矿是本区最主要的矿床类型,遍布于变质核杂岩内部,可分为北、中、南三个大的成矿带(图3),代表性矿床有文峪、东闯、杨砦峪、金铜岔、桐峪和枪马等大中型金矿。

3 成岩、成矿特征

3.1 成岩成矿时代

对胶东地区花岗岩的研究由来已久,认识各不相同,其中对成岩年龄的确定是最为关键的问题之一,而早期人们利用 K-Ar、Rb-Sr、Ar-Ar 等方法获得的成岩年龄变化范围很大(如 Chen *et al.* , 2005)。随着高精度锆石 SHRIMP U-Pb 定年技术的应用,目前已经取得共识:玲珑花岗岩的成岩年龄为 150 ~ 160Ma,而郭家岭花岗岩闪长岩的成岩年龄为 126 ~ 130Ma (Wang *et al.* , 1998; 罗镇宽和苗来成,2002; Qiu *et al.* , 2002)。

关于胶东金矿的成矿时代已存在较长时间的争论,前人曾提出了从前寒武纪至燕山期成矿的各式各样的观点。对成矿年代的确定与对矿床成因的厘定是紧密联系在一起的,如早期提出的绿岩带型金矿成因主要是依据成矿期为太古代至早元古代(沈保丰和骆辉,1994)。随着研究的深入及更

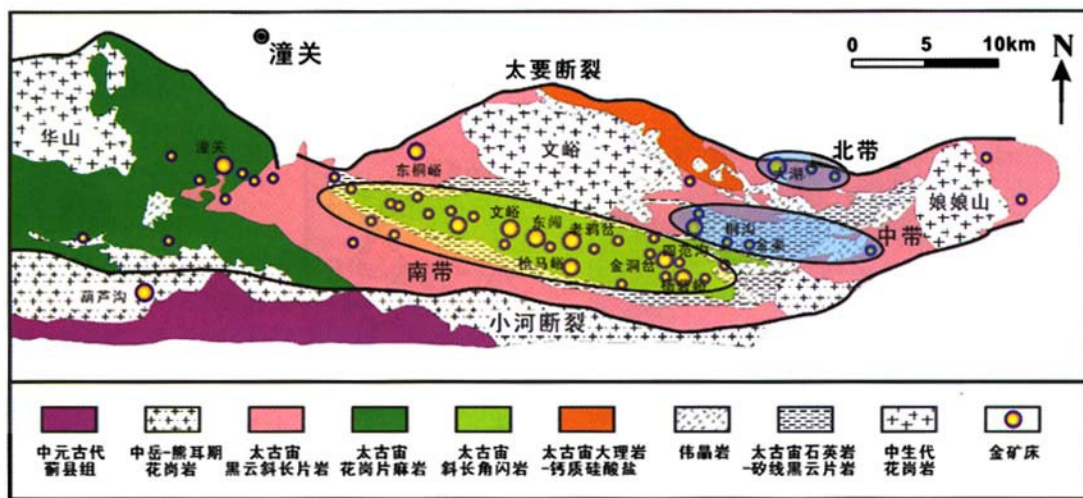


图3 小秦岭地区金矿床分布及地质简图

(据 Fan *et al.*, 2000; 范宏瑞等, 2003; 陈衍景, 2006 综合而成)

Fig. 3 Simplified geological map and gold deposit distribution in the Xiaqingling gold province (modified after Fan *et al.*, 2000; Fan *et al.*, 2003; Chen, 2006)

加合适的同位素定年方法的采用, 目前已经比较一致的认为其形成于晚中生代 (120Ma 左右, 杨进辉和周新华, 2000; Yang and Zhou, 2001; Qiu *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2008)。前人采用的定年方法主要有蚀变岩中绢云母的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年、金矿脉中黄铁矿的 Rb-Sr 定年、金矿脉中热液锆石的 U-Pb 定年等, 且研究工作大多数均集中在招远-莱州金矿带和牟平-乳山金矿带, 而对于栖霞-蓬莱金成矿带内的金矿床还缺乏可靠的成矿年龄数据。我们最近获得了蓬莱金矿区河西金矿硫化物 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 $122 \pm 3\text{Ma}$; 黑岚沟和大柳行金矿硫化物 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 $118 \pm 7\text{Ma}$ (侯明兰等, 2006), 与其他两个金矿带的成矿年龄一致, 这一结果进一步支持整个胶东金矿省三大金矿带中金的成矿性具有同一性, 在 120Ma 左右发生了金的爆发性成矿作用。这一成矿事件与 130 ~ 120Ma 胶东地区增厚的榴辉岩相地壳及下伏的富集岩石圈地幔发生强烈广泛的拆沉作用相关联, 拆沉物质部分熔融并与上涌的软流圈地幔相互作用形成该区活跃的岩浆-流体作用, 造成了岩浆-流体-成矿系统短时间内爆发了高强度、大规模的金质堆积 (Hou *et al.*, 2007; 姜耀辉等, 2007)。

对于小秦岭地区的中生代花岗岩岩体已有一些年龄报道, 如老牛山岩体 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 143Ma (卢欣祥, 1999), 华山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $146 \pm 15\text{Ma}$, 文峪岩体和娘娘山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果分别为 $138 \pm 3\text{Ma}$ 和 $142 \pm 3\text{Ma}$ (毛景文等, 2005), 可见本区大规模酸性岩浆活动时限集中于早白垩世, 上述花岗岩为太华群基底变质岩重熔的产物; 而对于与区域金矿化空间关系更为密切的各种基性岩脉目前尚缺乏可靠的年龄数据, SHRIMP U-Pb 定年表

明, 岩脉中的锆石绝大多数为继承锆石, 反映出华北陆块阜平运动 (2500 ~ 2400Ma)、华北南缘熊耳群火山喷发事件 (1850Ma)、震旦纪构造活动 (850 ~ 700Ma) 以及扬子陆块俯冲拼贴于华北南缘的造山事件 (约 200Ma), 仅个别锆石记录了燕山期的年龄 (约 130Ma), 可能代表岩墙岩浆侵位活动的时间 (王团华等, 2008)。

关于小秦岭金矿省的成矿时代存在许多不同的认识和看法, 提出的成矿期包括元古代的中岳期或晋宁期; 或中生代的燕山期或印支期, 或是多期成矿 (沈保丰和骆辉, 1994; 李俊建, 1997; Chen *et al.*, 1998; 卢欣祥等, 1999; 薛良伟等, 1999)。之所以出现这种局面, 我们认为主要是由于成矿年龄的精确测定一直是矿床学界的一大难题, 同时由于在本区研究中早期采用了一些不精确的测年方法或不合适的测年矿物或岩石。由于小秦岭金矿产于变质地层中且可能经历了多期变质-变形和构造-岩浆热事件, 当采用蚀变矿物的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年时, 不同学者在不同矿区获得的年龄差别很大 (徐启东等, 1998; 李绍儒等, 1998; 薛良伟等, 1999; 王义天等, 2002; 毛景文等, 2005), 不象产在中生代花岗岩中的胶东金矿床, 不同学者采用蚀变矿物的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年时, 所获年龄大体相同, 并与用硫化物的 Rb-Sr 法和热液锆石的 U-Pb 法获得的年龄一致 (Yang and Zhou, 2001; Qiu *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003; Hu *et al.*, 2004)。

Li *et al.* (2002) 对小秦岭地区东闯矿床不同阶段矿脉中石英和绢云母进行了 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年, 获得了 $142.9 \pm 2.9\text{Ma}$, $132.2 \pm 2.6\text{Ma}$, $128.3 \pm 6.2\text{Ma}$ 等三个年龄值, 因而认为该矿床主要形成于 143 ~ 128Ma 之间。王义天等 (2002) 则对小秦岭地区红土岭金矿 Q875 矿脉中矿化蚀变的糜棱岩

中黑云母进行了 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年, 获得的年龄为 128 ~ 126Ma。由于该糜棱岩的原岩为前寒武纪的斜长角闪片麻岩, 它很可能受到过多期的变质变形作用和热液蚀变作用, 而目前测得的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄有可能只是记录了最后一次构造-岩浆热事件的年龄。在我们对小秦岭地区金矿野外考察过程中, 发现许多矿床中含金石英脉中均产有辉钼矿, 特别是在大湖金矿, 已构成有工业价值的钼矿体。在小秦岭地区文峪和娘娘山花岗岩体及接触带中也产有少量辉钼矿石英脉, 这些脉体不含金, 当地老百姓作为钼矿在小规模开采。李厚民等(2007)对这两种产状的辉钼矿进行了 Re-Os 同位素定年研究, 分别获得了印支期(三个辉钼矿的 Re-Os 模式年龄 223.0 ~ 232.9Ma)和燕山期(两个辉钼矿的 Re-Os 模式年龄 129.1 ~ 130.8Ma)的成矿年龄, 后者与文峪和娘娘山花岗岩体的成岩年龄(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 138.4 ~ 141.7Ma, 毛景文等, 2005a)较为接近。李诺等(2008)进一步对大湖金矿中辉钼矿进行了 Re-Os 同位素定年, 获得 Re-Os 等时线年龄为 $218 \pm 41\text{Ma}$, 与李厚民等(2007)的结果相互印证。

对于小秦岭金矿印支期成矿的观点, 前人已有过报道, 如小秦岭潼峪 F5 矿脉中绢云母的 K-Ar 法年龄为 237.5Ma (胡正国等, 1994), 小秦岭金矿中钾长石的 Rb-Sr 等时线年龄为 208.2Ma (王秀璋, 1992), 金矿岔 S60 号石英脉中流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 278Ma (李华芹等, 1993)。由于受方法和测年矿物的局限性, 同位素体系的封闭性、多期地质事件的叠加性等诸多因素的影响, 我们对前人获得的这些年龄值变化范围较大的印支期成矿的间接年龄信息应持谨慎态度。但直接从含金石英脉中获得的辉钼矿的 Re-Os 年龄(李厚民等, 2007; 李诺等, 2008)使我们确信小秦岭金矿具有印支期成矿的特点。尽管一些定年工作的结果显示小秦岭地区可能存在燕山期成矿, 如 Li 等(2002)对东闯金矿床矿脉中的石英以及蚀变矿物绢云母进行 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年获得 143 ~ 128Ma 的年龄, 但到目前为止, 从小秦岭含金石英脉中获得的燕山期成矿的直接证据(如在胶东金矿区获得的含金石英脉中黄铁矿的 Rb-Sr 等时线年龄和含金石英脉中热液锆石的 U-Pb 年龄)还非常少, 这方面工作还值得进一步加强。

3.2 岩石成因及与成矿的关系

在胶东地区, 与金矿床空间关系密切的岩浆岩包括玲珑花岗岩、郭家岭花岗岩以及基性岩脉。其中, 玲珑花岗岩地球化学特征($\text{Sr} = 401 \times 10^{-6} \sim 580 \times 10^{-6}$; $\text{Y} = 3.0 \times 10^{-6} \sim 5.3 \times 10^{-6}$; $\text{Mg}^\# = 0.35 \sim 0.46$)具有埃达克质岩的性质, 其 Sr-Nd 同位素组成位于太古代变质岩区(图 4), 表明它们来源于加厚下地壳的部分熔融(Hou *et al.*, 2007)。锆石 SHRIMP U-Pb 定年显示玲珑花岗岩成岩年龄为 $158 \pm 3\text{Ma}$ (Wang *et al.*, 1998), 明显早于本区金矿床形成时代(120Ma 左右)。对于郭家岭花岗岩, 张旗等(2001)认为其属于埃达克岩(adakite), 并根据高的 Sr/Y 比值推论这些岩石的岩浆

来源于高压镁铁质下地壳的部分熔融, 并以石榴子石为残留相。而 Yang 等(2003)研究了郭家岭花岗闪长岩后认为, 该花岗闪长岩与 adakite 岩的成因不同, 而类似于钠质花岗岩和 TTG 岩系, 是由下部地壳镁铁质岩石脱水部分熔融形成的。我们最近的工作表明, 郭家岭花岗岩的地球化学特征($\text{Sr} = 642 \times 10^{-6} \sim 1035 \times 10^{-6}$; $\text{Y} = 7.4 \times 10^{-6} \sim 10.8 \times 10^{-6}$; $\text{Mg}^\# = 0.46 \sim 0.53$)具有典型埃达克岩的特征, 其 Sr-Nd 同位素组成(图 4)反映了拆沉的下地壳发生部分熔融并与上涌的软流圈地幔发生相互作用形成了郭家岭花岗岩(Hou *et al.*, 2007)。郭家岭花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 130 ~ 126Ma (Wang *et al.*, 1998), 略早于金矿床的成矿时代。对于与金矿成因关系更为密切的中基性岩脉, 到底是来源于胶东群的部分熔融(徐红等, 2000), 还是来源于古老的富集岩石圈地幔(Fan *et al.*, 2001), 也是一个争论的问题。Yang *et al.* (2004)的研究表明胶东地区基性岩脉侵位时间在 125Ma 左右, 它们起源于富集而不均一的岩石圈地幔, 富集过程可能与古老的俯冲事件有关。胶东地区金成矿作用与郭家岭花岗闪长岩以及基性岩脉的同时性, 以及金矿床中记录的幔源信息(如张连昌等, 2002; 毛景文等, 2005; Mao *et al.*, 2008)表明金与上述岩浆岩的来源关系密切。

在小秦岭地区, 分布有华山、文峪和娘娘山等几个巨大中生代花岗岩基, 它们是太华群变质基底重熔的产物, 在空间上与赋存于变质岩中的金矿床并不直接相关。本区众多基性岩脉与金矿床在空间上往往关系更为密切, 其中, 辉绿岩脉侵位早于含金石英脉, 而煌斑岩脉形成于成矿晚阶段或成矿期后(倪师军等, 1994)。倪师军等(1994)还指出, 岩脉的大量产出反映了区域性地壳拉张构造环境, 但它们对金成矿的制约关系主要在于矿化剂而非金源。小秦岭地区基性岩脉已报道的 Sr-Nd 同位素组成变化范围很大(图 4), 显示了地幔源区及岩浆演化过程中壳幔相互作用的复杂性, 也可能与所采样品的新鲜程度、代表性或分析测试的可靠性等因素有关, 有必要进一步开展此方面的精细研究。

3.3 矿床地质特征

胶东及小秦岭地区的金矿床在很多地质特征上都表现出造山型金矿的属性, 例如矿床的产出分布严格受韧性剪切带或区域深大断裂及其次级断裂控制。在胶东金矿省, 控矿构造为一系列 NNE 向断裂带, 其中发育含金矿化蚀变, 或为石英脉及煌斑岩、辉绿岩、闪长玢岩脉充填。金矿床主要分布于三山岛断裂、焦家断裂、招平断裂、金牛山断裂、金青顶断裂等断裂带中, 矿体主要产出于中生代花岗岩体内部或花岗岩与基底变质岩交界部位。胶东地区蚀变岩型、石英脉型金矿床在物质组成上有很大的相似性, 黄铁矿是各种类型金矿中最普遍最主要的硫化物, 黄铁绢英岩在胶东地区绝大多数矿床中都是金矿体的重要组成部分。小秦岭地区的金矿床类型以石英脉型为主, 也有蚀变岩型、蚀变岩-石英脉复合型等。石英脉型金矿床主要产出于小秦岭变质核杂岩太华

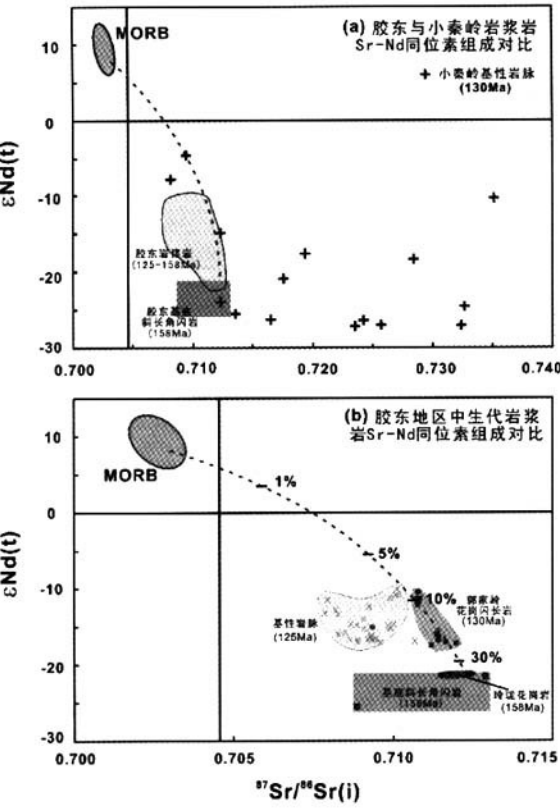


图4 胶东金矿区-小秦岭金矿区中生代岩浆岩 Sr-Nd 同位素组成
(胶东地区数据: 杨进辉等, 2003; Guo *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2004; Hou *et al.*, 2007; 小秦岭地区数据: 王团华等, 2008)
Fig. 4 Sr-Nd isotopic compositions of Mesozoic granites in the Jiaodong and Xiaolinling gold provinces
(Data from Yang *et al.*, 2003; Guo *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2004; Hou *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008)

群组成的基底岩系中, 矿体受脆性-韧性剪切带控制。金矿矿体即为大型含金石英脉, 金属硫化物条带状、团块状或浸染状分布其中, 矿体随剪切带伸展状况呈现出局部膨大、尖灭及分支复合, 可呈脉状、透镜体或似层状。剪切带(含金石英脉)走向 NWW 为主, 控制了本区已探明金储量的 90% 以上。含金石英脉与围岩界线清晰, 矿石可分为黄铁矿型、多金属硫化物型和氧化型, 除石英外, 碳酸盐矿物也是非常普遍的脉石矿物, 围岩蚀变类型包括硅化、绢云母化、黄铁矿化、碳酸盐化、钾长石化、绿泥石化、绿帘石化和黑云母化等, 蚀变分带明显, 胡正国等(1994)根据蚀变组合特征将小秦岭地区石英脉型金矿床的围岩蚀变划分为青磐岩化和绢英岩化。

3.4 成矿流体以富 CO₂ 为特征

流体包裹体研究表明胶东和小秦岭金矿床均以存在富 CO₂ 流体为特征 (徐九华等, 1997; Jiang *et al.*, 1999; Qiu *et*
万方数据

al., 2002; 范宏瑞等, 2000, 2003; 侯明兰等, 2007; 张祖青等, 2007; 倪智勇等, 2008)。对胶东金矿省各矿床石英流体包裹体研究表明, 主要存在两种类型的流体包裹体: CO₂-H₂O 包裹体和中低盐度的 NaCl-H₂O 溶液包裹体。CO₂-H₂O 包裹体气相以 CO₂ 为主, 可含少量 CH₄、H₂S、CO。其中, 黄铁绢英岩的石英中含有丰富的 CO₂-H₂O 包裹体, 而黄铁矿石英脉和多金属硫化物石英脉中富 CO₂ 与富 H₂O 的 CO₂-H₂O 包裹体共存。显微测温结果显示, 黄铁绢英岩中的 CO₂-H₂O 包裹体的均一温度范围为 230 ~ 300℃; 而黄铁矿和多金属硫化物石英包裹体的均一温度为 220 ~ 390℃。成矿早期流体为富含挥发份 (流体密度 0.92 ~ 0.99g/cm³)、中低盐度 (4.15% ~ 5.23% NaCl eq.) 的流体; 到主成矿期温度逐渐升高, 盐度变化范围大 (1.02% ~ 15.5% NaCl eq.), 水溶液以 NaCl 为主, 气体仍以 CO₂ 为主, 但可含少量的 CH₄、H₂S、CO 及有机质等的流体 (流体密度 0.32 ~ 0.99g/cm³); 成矿期后的流体盐度、温度及 CO₂ 含量降至最低。

研究者对小秦岭地区石英脉型金矿床开展了一系列流体包裹体研究工作 (Jiang *et al.*, 1999; 范宏瑞等, 2000, 2003; 倪智勇等, 2008), 石英脉中的流体包裹体主要可分成两期, 即第一阶段不含金或金含量很低的乳白色石英大脉中的包裹体与第二阶段含金石英脉或硫化物-石英脉中的包裹体, 另外还可见含矿微弱的石英-碳酸盐脉, 可作为成矿流体演化的第三个阶段。早阶段乳白色石英大脉应是富水热液在开放空间沉积充填的产物, 可能形成于秦岭碰撞造山作用早期的挤压-伸展转换期 (陈衍景和富士谷, 1992; 陈衍景, 1996); 主成矿阶段流体为中低盐度 CO₂-H₂O-HCl 型热液, 早期可见富 CO₂ 包裹体, 后演化至 CO₂-H₂O 包裹体, 均一温度早期 280 ~ 360℃, 后降低至 210 ~ 280℃, 此过程中可能发生了 CO₂-H₂O-HCl 流体的沸腾作用, 造成金及硫化物的沉淀; 成矿末期或成矿后热液演变为低盐度富水流体。

3.5 金成矿过程中有幔源物质的加入

对胶东金矿省各矿床黄铁矿中流体包裹体的 He-Ar 同位素研究 (张连昌等, 2002; 毛景文等, 2005) 表明, ³He/⁴He 值为 0.38 ~ 2.36R/Ra, ⁴⁰Ar/³⁶Ar 值为 310 ~ 1148。在 He-Ar 同位素组成相关图 (图 5) 上, 显示明显的壳-幔流体混合特征, 表明成矿过程中有幔源流体的加入。对小秦岭金矿省黄铁矿及石英中流体包裹体的 He-Ar 同位素研究 (毛景文等, 2005) 也显示了类似的结果。

3.6 成矿流体的起源及演化

在胶东金矿省, 金成矿流体以起源于地幔的深源流体为主, 混有少量大气降水, 而在小秦岭金矿省, 金成矿流体则以起源于中上地壳的变质流体为主, 混有少量大气降水 (图 6)。

胶东金矿省中石英的 δ¹⁸O 值变化在 13.8‰ ~ 18.3‰, 成矿流体的 δ¹⁸O 值在 4.9‰ ~ 10.9‰ 之间, 流体包裹体中 δD 变化从 -78‰ 变化到 -101‰, 表明成矿流体类似于岩浆水,

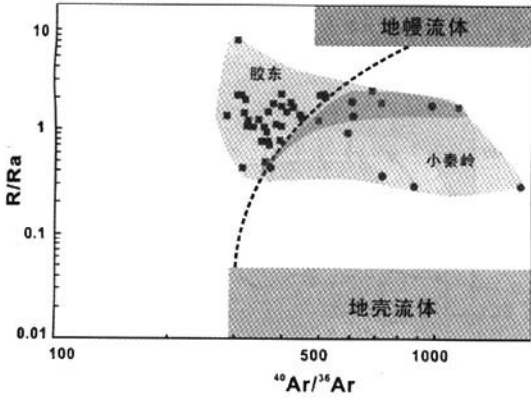


图5 胶东金矿省和小秦岭金矿省成矿流体 He-Ar 同位素关系图

(胶东金矿数据: 张连昌等, 2002; 毛景文等, 2005; 小秦岭金矿数据: 毛景文等, 2005)

Fig. 5 He-Ar isotopic compositions of ore-forming fluids in the Jiaodong and Xiaoqinling gold provinces

(Data from Zhang *et al.*, 2002; Mao *et al.*, 2005)

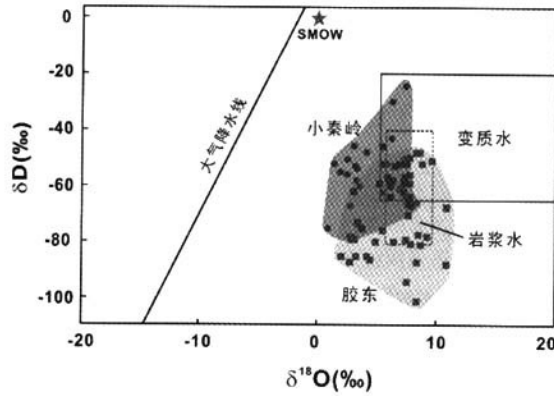


图6 胶东金矿区-小秦岭金矿区成矿流体 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系图

(胶东金矿区资料据: 张连昌等, 2002; Fan *et al.*, 2003; 毛景文等, 2005; 侯明兰等, 2007; 小秦岭金矿区资料据: 范宏瑞等, 2000; 毛景文等, 2005)

Fig. 6 Oxygen and hydrogen isotopic compositions of ore-forming fluids in the Jiaodong and Xiaoqinling gold provinces

(Data from Zhang *et al.*, 2002; Fan *et al.*, 2000, 2003; Mao *et al.*, 2005; Hou *et al.*, 2007)

较低的氢同位素组成可能表明流体中有 CH_4 的存在, 与地幔起源的流体特征吻合。部分样品显示较低的氧同位素组成, 可能表明成矿晚期伴有少量大气降水的参与(图6)。在主成矿期成矿流体表现出明显的多期、多来源特征。温度降低和流体不混溶是导致金等成矿元素沉淀和富集的重要机制。

小秦岭金矿省中成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 δD 值总体高于胶东金矿的成矿流体, 结合对含金石英脉期次的划分可以看万方数据

出, 主成矿期的成矿流体以变质水为主, 混入了少量大气降水, 同时也不能排除有部分岩浆水的加入, 而成矿晚期的流体中大气降水的比例明显增加, 这与该期流体包裹体中 CO_2 含量很低的事实相吻合。

4 矿床成因讨论

造山型金矿自提出以来, 在国内外掀起了研究和讨论的热潮。它主要指在变质地体中受构造控制的脉状后生金矿床, 在时间和空间上与板块俯冲增生或碰撞造山作用有关, 矿床受控于脆性-韧性变形的转变带或转变期, 金沉淀与构造变形作用同步, 造山型金矿的形成温度和压力变化范围较大, 深可达 25km 以上, 浅至近地表, 但大多数大型矿床产在 5 ~ 15km 深度 (Groves *et al.* 2003; Goldfarb *et al.* 2005)。造山型金矿成矿流体的显著特征是低盐度 ($< 10\%$) 和富 CO_2 (10% ~ 25%) 的中性至弱碱性溶液 (Zhou *et al.*, 2002)。根据上述定义, 我们知道并不是产在造山带中的金矿就一定是造山型金矿, 例如, 浅成低温热液型金矿床主要产于环太平洋造山带和中亚造山带, 在华北地台北缘的兴蒙造山带和南缘的秦岭造山带均产有斑岩型、矽卡岩型等与岩浆活动关系密切的铜金多金属成矿系统。现有研究表明, 原生金矿床类型可分为造山型、卡林型一类卡林型、斑岩型、浅成低温热液型、铁氧化物型、矽卡岩型、VMS/Sedex 型等几种主要类型, 它们有着各自的成矿特征及形成环境 (陈衍景等, 2007)。对于造山型金矿, 近年来的研究也已经由原先的 Groves 等人提出的狭义的俯冲增生型造山-成矿模式扩展为两种造山-成矿模式, 即活动大陆边缘俯冲增生过程形成的造山型金矿和大陆碰撞造山过程中形成的造山型金矿 (陈衍景, 2006)。我们认为, 胶东金矿和小秦岭金矿正是在这两种不同类型的造山-成矿过程中形成的矿床, 下面对其成矿模式分别加以论述。

4.1 胶东金矿-板块俯冲(增生)过程中形成的造山型金矿

国外学者提出的造山型金矿, 主要与洋壳俯冲相关的陆缘增生背景有关, 主要产于大洋板块俯冲的增生楔, 或者增生地体的拼贴带 (Goldfarb *et al.*, 2001; Kerrich *et al.*, 2000, 2005)。如在环太平洋俯冲增生造山带中, 北美的 Cordilleran 造山带内就发育有许多典型的造山型金矿。

国外产在太古代克拉通中典型的造山型金矿 (如西澳 Yilgarn 和加拿大 Superior Province), 矿体绝大多数产于绿岩带中, 产于同构造期花岗岩中者不足 5% ~ 10%, 大多形成于 2.7 ~ 2.6Ga 的构造-岩浆热事件中 (Phillips and Zhou, 1999)。而胶东地区的金矿则截然不同, 它们大多赋存在中生代花岗岩中, 仅极少部分 ($< 5\%$) 产于前寒武纪斜长角闪岩等变质岩中 (Zhou *et al.*, 2002)。尽管前人曾经把这些矿床归于“与侵入岩有关的岩浆热液型金矿” (Sillitoe and Thompson, 1998; Lang *et al.*, 2000), 但目前的研究表明它们

与岩浆岩(特别是最主要的容矿围岩玲珑型花岗岩)无直接的成因关联,虽然成矿时代与郭家岭型花岗岩相近,但矿体的产出也与郭家岭型花岗岩无直接关系,而直接受控于断裂构造。已有学者提出胶东金矿为造山型金矿(Goldfarb *et al.*, 2001; Qiu *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2002; 毛景文等, 2003),其中 Qiu *et al.* (2002)认为这些金矿的形成与太平洋板块的俯冲消减作用有关,他们同时也指出,与国外的典型造山型金矿相比,胶东的金矿相对于太平洋板块俯冲带来讲,构造位置上的确位于更靠内陆一侧。陈衍景(1994)以及 Zhou and Lu (2000)将胶东金矿的形成与华北陆块和扬子陆块的碰撞作用相联系;毛景文等(2003)也认为胶东金矿是与华北陆块和扬子陆块的碰撞之后的伸展作用有关的造山型金矿。而翟明国等(2004)认为胶东金矿与狭义的造山型金矿有别,是一种陆内的非造山带成矿作用,是在华北东部中生代构造转折和岩石圈减薄的大背景下,由于大规模的陆壳特别是下地壳的重熔活化和岩浆活动,壳幔物质大比例的交换和混合,流体作用异常活跃而形成的一个岩浆-流体-成矿系统。

通过与影响胶东地区地质演化的主要构造运动的时间进行对照发现,胶东金矿的形成($\sim 125\text{Ma}$)晚于华北与扬子陆块开始拼接碰撞(T_{1-2} ,据张国伟等,1996) $80 \sim 100\text{Ma}$ 以上,而包括胶东在内的中国东部地区在晚侏罗世和白垩纪时期成为受太平洋板块及 Izanagi 板块俯冲影响的活动大陆边缘(Mayuyama *et al.*, 1997; Zhou and Li, 2000; Zhu *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2006),俯冲起始时间可能为侏罗纪或者更早(Zhou and Li, 2000; Li and Li, 2007),Sun *et al.* (2007)指出,太平洋板块俯冲方向在 125Ma 左右时发生了近 80° 的转折,从而使胶东地区应力场发生了重要转变,并引起大规模岩浆活动及金爆发成矿等效应。有鉴于此,我们认为胶东金矿应是在侏罗纪-白垩纪时期古太平洋板块向中国东部俯冲消减大背景下引发的拆沉作用和壳幔相互作用形成的一种造山型金矿,归属于板块俯冲(增生)过程中形成的造山型金矿。

华北克拉通东部中生代岩石圈减薄可以用两阶段拆沉模式来解释(姜耀辉等, 2007),即早阶段(晚侏罗世)较深($>80\text{km}$)岩石圈地幔的拆沉和晚阶段(早白垩世)加厚下地壳连同其下岩石圈地幔的拆沉,这一系列拆沉作用是由俯冲的古太平洋板块持续后退所诱发的。在早侏罗世晚期古太平洋板块已经俯冲到华北克拉通东部岩石圈地幔之下,此时,华北克拉通东部处于活动陆缘环境,玄武质岩浆的底侵作用造成下地壳加厚,胶东晚侏罗世玲珑花岗岩起源于加厚下地壳的部分熔融。从晚侏罗世开始,古太平洋板块的板片后退,形成了弧后拉张环境,在早白垩世发生了加厚下地壳连同其下岩石圈地幔的拆沉作用。这种拆沉作用一方面是由古太平洋板块持续后退引起的,另一方面是由于上述加厚下地壳的部分熔融形成榴辉岩残留而造成其密度加大。胶东早白垩世郭家岭花岗岩是由拆沉的下地壳发生部分熔融

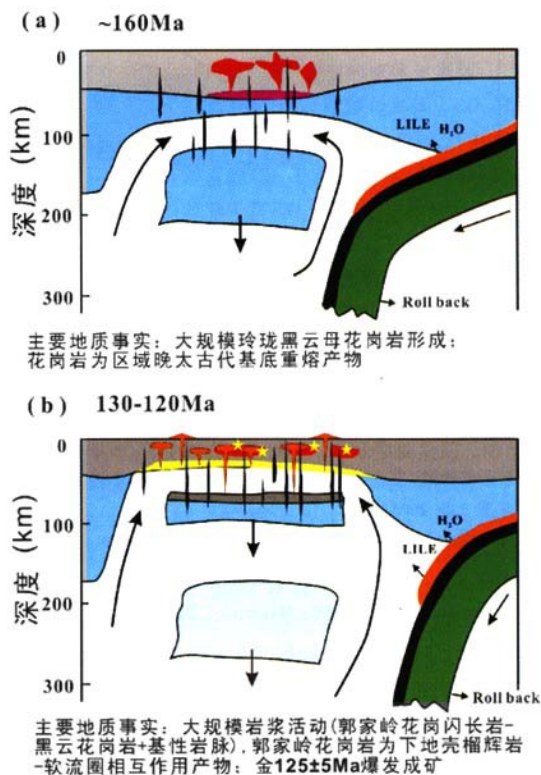


图7 胶东地区中生代成岩成矿模式图

Fig. 7 Petrogenic and ore-genetic models for the Jiaodong gold province

并与上涌的软流圈地幔相互作用而形成的,胶东早白垩世煌斑岩是由拆沉的岩石圈地幔的部分熔融体与软流圈地幔的部分熔融体发生混合而形成的。这次拆沉作用造成了软流圈地幔与下地壳的直接接触,从而诱发了华北克拉通东部广泛而强烈的早白垩世岩浆活动和大规模成矿作用。相应的岩浆岩及金矿床成因模型如图7所示。

4.2 小秦岭金矿-大陆碰撞造山过程中形成的造山型金矿

碰撞造山过程是否能形成矿床,国际上曾持怀疑态度(Guild, 1971; Kerrich *et al.*, 2000),近年来我国许多学者通过对青藏高原、西南三江、秦岭、天山、华北等一系列碰撞造山环境成矿作用的研究(陈衍景, 1996; Chen *et al.*, 2000; 毛景文, 2001; 顾雪祥等, 2001; 毛景文等, 2003; 侯增谦等, 2003),明确肯定了碰撞造山带环境巨大的成矿潜力。陈衍景等(2003)在秦岭地区提出了包括金成矿作用在内的CMF碰撞造山成矿模型。

中国东部在燕山期经历了大规模的拆沉作用,导致岩石圈减薄、软流圈物质上涌和剧烈的岩浆活动和壳-幔相互作用。这一事件在胶东地区表现很明显,但是否可向内地一直

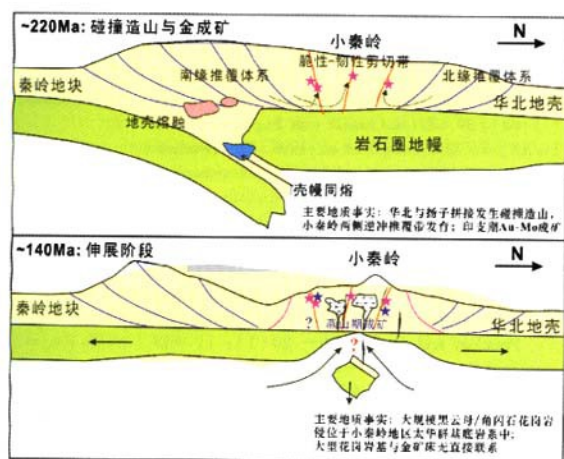


图8 小秦岭地区金矿床成岩成矿模式图

Fig. 8 Petrogenetic and ore-genetic models for the Xiaolinling gold province

延伸到小秦岭地区,尽管有的学者持肯定态度(王义天和毛景文,2002;毛景文等,2003),但我们认为应当慎重,值得进一步的工作来验证。从目前比较可靠的成矿年龄数据(如金矿脉中共生的辉钼矿 Re-Os 年龄)来看,小秦岭地区金矿的主成矿期应为印支期,其成矿动力学背景应与华北-扬子的碰撞造山事件相联系,因而它可能属于性质不同于胶东的造山型金矿。如果将来的工作能进一步证实与古太平洋板块俯冲有关的燕山期的拆沉作用与减薄事件也强烈影响到小秦岭地区,并形成了相应的金矿,则小秦岭金矿可能就具有不同于世界上其他地区的造山型金矿的两阶段复合成矿特征,即从早期的碰撞造山延续到晚期的俯冲(增生)造山成矿。图8中我们总结了小秦岭金矿成矿的模式图。但应当指出,该模式图还很初步,值得进一步深入的研究来证实和完善。

5 结论

地质、地球化学和年代学系统研究和总结表明,在华北地台东缘和南缘分布的胶东和小秦岭金矿省均属于造山型金矿,但两者产出的构造背景有所不同:胶东金矿形成于增生型造山体制,小秦岭金矿形成于碰撞型造山体制。

胶东金矿省矿床主要产于中生代花岗岩岩体中,矿体严格受断裂带(NNE向或NE向为主)控制,成矿流体具有低盐度高 CO_2 含量的特征,成矿过程有幔源物质的加入。在俯冲的太平洋板块后退的背景下,胶东地区增厚地壳中的榴辉岩相下地壳及下伏岩石圈地幔发生了两阶段拆沉,引发强烈的壳幔作用,形成早白垩世普遍的岩浆活动及金的爆发成矿。

小秦岭金矿省矿床主要以大型含金石英脉的形式产于太华群变质基底的脆性-韧性剪切带(EW向为主)中,成矿万方数据

流体具有低盐度高 CO_2 含量的特征,以变质流体为主,金矿床形成时有幔源物质的加入。主成矿期为印支期,属于陆陆(华北与扬子)碰撞造山过程中形成的造山型金矿。

致谢 十分感谢陈衍景教授及两位审稿人对本文提出的宝贵意见,使本文得到很大提高。感谢华北大陆边缘造山与成矿973项目各位同事与本文作者的有益讨论,使我们对华北东、南边缘的这两大金矿区有了进一步的了解。

References

- Chen YJ. 1994. The Gold Deposits in Greenstone Belts, China. In: The Current Progresses in the Study of Gold Deposits, China. Chinese Seismological Press, p. 4-29 and p. 99-102 (in Chinese)
- Chen YJ. 1996. Fluid model for intracontinental collision and its metallogenic significance: Theoretical inference and evidences from gold deposits, the eastern Qinling Mountains. *Earth Science Frontiers*, 3(3-4): 282-289 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 2006. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential. *Geology in China*, 33(6): 1181-1196 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Chen HY, Liu YL *et al.* 2000. Progress and records in the study of endogenetic mineralizations during collisional orogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 45(1): 1-10
- Chen YJ and Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan, China (in Chinese). Chinese Seismological Press, Beijing, 234
- Chen YJ, Guo GJ and Li X. 1998. Metallogenic geodynamic background of gold deposits in granite-greenstone terrane of the North China craton. *Science in China Series D*, 41(2): 113-120
- Chen YJ, Ni P, Fan HR *et al.* 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, Jiaodong Province, eastern China. *International Geology Review*, 47: 530-547
- Chen YJ, Sui YH and Pirajno F. 2003. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits: Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, east Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 551-568 (in Chinese with English abstract)
- Fan HR, Xie YH, Zhai MG *et al.* 2003. A three stage fluid flow model for Xiaolinling lode gold metallogenesis in the Henan and Shanxi provinces, central China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 260-266 (in Chinese with English abstract)
- Fan HR, Xie YH, Zhao R *et al.* 2000. Dual origins of Xiaolinling gold-bearing quartz veins: Fluid inclusion evidence. *Chinese Science Bulletin*, 45(15): 1424-1429
- Fan HR, Zhai MG, Xie YH *et al.* 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at Sanshandao gold deposit, Jiaodong gold province, China. *Mineralium Deposita*, 38: 739-750
- Fan WM, Guo F, Wang YJ *et al.* 2001. Postorogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China. *Phys. Chem. Earth, Part A Solid Earth Geod.* 26: 733-746
- Goldfarb RJ, Groves DI and Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geological time: A synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18: 1-75
- Groves DI and Beirlein FP. 2007. Geodynamic settings of mineral deposit systems. *Journal of the Geological Society*, 164: 19-30
- Groves DI, RJ Goldfarb and Robert F. 2003. Gold deposits in metamorphic belts: Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Economic Geology*, 98: 1-29
- Gu XX, Tang JX, Wang CS *et al.* 2001. Himalayan collision orogenesis and formation of the large enriched mineral district: Scientific problems and thinking. *Journal of Chengdu University of*

- Technology, 28(4): 344–349 (in Chinese with English abstract)
- Guild PW. 1971. Metallogeny: A key to exploration. American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers, 23(1): 69–72
- Hou ML, Jiang SY, Jiang YH *et al.* 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 SY, Shen K *et al.* 2007. Fluid inclusion and H-O isotope study of gold mineralization in the Penglai gold field, Eastern Shandong. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2241–2256 (in Chinese with English abstract)
- Hou ML, Jiang YH, Jiang SY *et al.* 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
- Hou ZQ, Lu QT, Wang AJ *et al.* 2003. Continental collision and related metallogeny: A case study of mineralization in Tibetan orogen. *Mineral Deposit*, 22(4): 319–333 (in Chinese with English abstract)
- Hu FF, Fan HR, Yang JH *et al.* 2004. Mineralizing age of Rushan lode gold deposit in Jiaodong Peninsula: SHRIMP U-Pb dating on hydrothermal zircon. *Chinese Science Bulletin*, 49(12): 1191–1198
- Hu ZG, Qian ZZ and Yan GM. 1994. Xiaolinling metamorphic core complex and gold deposits. Xi'an: Shaanxi Press of Science and Technology, 122p (in Chinese)
- Jiang N, Xu JH and Song MX. 1999. Fluid inclusion characteristics of mesothermal gold deposits in the Xiaolinling district, Shaanxi and Henan Provinces, People's Republic of China. *Mineralium Deposita*, 34: 150–162
- Jiang YH, Jiang SY, Hou ML *et al.* 2007. Jiaodong gold metallogenic province and delamination of thickened lower crust: Evidences from wallrock granites and lamprophyres. *Acta Mineralogica Sinica*, 27 (Supplement): 22–23 (in Chinese)
- Kerrick R, Goldfarb RJ and Richards JP. 2005. Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume, 1097–1136
- Kerrick R, Goldfarb RJ, Groves D *et al.* 2000. The characteristics, origins, and geodynamic settings of super giant gold metallogenic provinces. *Science in China*, 43: 1–68
- Lang JR, Baker T, Hart CJR *et al.* 2000. An exploration model for intrusion-related gold systems. *Society of Economic Geology Newsletter*, 40(1): 6–15
- Li H M, Ye HS, Mao JW *et al.* 2007. Re-Os dating of molybdenites from Au (Mo) deposits in Xiaolinling gold ore district and its geological significance. *Mineral Deposits*, 26(4): 417–423 (in Chinese with English abstract)
- Li HQ, Liu JQ and Wei L. 1993. Study on fluid inclusion chronology of hydrothermal deposits and its geological application. Beijing: Geol. Pub. House, 92–105 (in Chinese)
- Li JJ. 1997. A primary on metallogenic epoch of China's gold deposits. *Progress in Precambrian Research*, 20(1): 17–26
- Li JW, Vasconcelos PM, Zhang J *et al.* 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ constraints on a temporal link between gold mineralization, magmatism, and continental margin transtension in the Jiaodong gold province. *Journal of Geology*, 111: 741–751
- Li N, Sun YL, Li J *et al.* 2008. Molybdenite Re-Os isotope age of the Dahu Au-Mo deposit, Xiaolinling and the Indosinian mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 810–816 (in Chinese with English abstract)
- Li QL, Chen FK, Yang JH *et al.* 2008. Single grain pyrite Rb-Sr dating of the Linglong gold deposit, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 34(3): 263–270
- Li QZ, Chen YJ, Zhong ZQ *et al.* 2002. Ar-Ar dating on the metallogenesis of the Dongchuang gold deposit in the Xiaolinling area. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 488–493
- Li SR, Li QZ and Li WL. 1998. A new view on the genesis of the Xiaolinling gold field. *Gold Geology*, 4(1): 41–49 (in Chinese with English abstract)
- Liu FC, Lu ZX, Fan YX *et al.* 1984. On the relation between intermediate-basic dykes and mineralization in Linglong gold ore field. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, (4): 39–47 (in Chinese with English abstract)
- Lu XX, Yu XD, Dong Y *et al.* 1999. The metallogenetic epoch of gold deposits in Xiaolinling-Xiongershan region. *Gold Geology*, 5(1): 11–15 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZK and Miao LC. 2002. Granites and gold deposits in the Zhaolai area, Eastern Shandong Province. Beijing: Metallurgical Industry Press (in Chinese)
- Mao JW. 2001. Geology, Distribution and Classification of Gold Deposits in the Western Qinling Belt, Central China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(1): 11–13 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Li XF, Zhang RH *et al.* 2005. Mantle-derived fluid-related ore-forming system. Beijing: China Land Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Wang YT, Li HM *et al.* 2008. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D-O-C-S isotope systematics. *Ore Geology Reviews*, 33: 361–381
- Mao JW, Wang YT, Zhang ZH *et al.* 2003. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in the North China and adjacent areas: Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits. *Sciences of China (D)*, 33(8): 838–851 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Zhang ZH *et al.* 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169–188 (in Chinese with English abstract)
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G *et al.* 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750Ma to the present. *Island Arc*, 6, 121–142
- Meng FC, Sun DS and Li SR. 2001. Characteristics and Metallogeny of Cishan Granite, East Shandong (Jiaodong). *Mineral Deposits*, 20(4): 394–401 (in Chinese with English abstract)
- Meng QR and Zhang GW. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of Qinling, *Tectonophysics*, 323: 183–196
- Ni SJ, Li CY, Zhang C *et al.* 1994. Contributions of meso-basic dyke rocks to gold mineralization—As exemplified for Xiaolinling, China. *Journal of Chengdu University of Technology*, 21(3): 70–78 (in Chinese with English abstract)
- Ni ZY, Li N, Guan SJ *et al.* 2008. Characteristics of fluid inclusions and ore genesis of the Dahu Au-Mo deposit in the Xiaolinling gold field, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2058–2068 (in Chinese with English abstract)
- Phillips GN and Zhou T. 1999. Gold-only deposits and Archean granite. *Society of Economic Geology Newsletter*, 37: 1–13
- Qiu YM, Groves DI, McNaughton NJ *et al.* 2002. Nature, age and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits of Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China. *Mineral Deposita*, 37: 283–305 (in Chinese with English abstract)
- Shen BF and Luo H. 1994. The metallogenic characteristics of gold deposits of the Archean greenstone belts in north China platform. *Journal of Geology and Mineralization in North China*, 9(1): 87–96 (in Chinese with English abstract)
- Sillitoe RH and Thompson JFH. 1998. Intrusion-related vein gold deposits: Types, tectono-magmatic settings, and difficulties of distinction from orogenic gold deposits. *Resource Geology*, 48: 237–250
- Sun WD, Ding X, Hu YH *et al.* 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific, *Earth Planet Science Letters*, 266: 533–542
- Wang LC, Qiu YM, McNaughton NJ *et al.* 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the northern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of Granitoids. *Ore Geology Reviews*, 13: 275–291

- Wang TH, Mao JW and Wang YB. 2008. Research on SHRIMP U-Pb chronology in Xiaoqinling-Xionger shan area: The evidence of delamination of lithosphere in Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1273 – 1287 (in Chinese with English abstract)
- Wang TH, Mao JW, Xie GQ *et al.* 2008. Sr, Nd, Pb isotopic composition of the meso-basic dykes in the Xiaoqinling-Xionger shan area, Henan Province, central China and its tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1580 – 1591
- Wang XZ. 1992. Geochemistry of reforming-type gold deposits in China. Beijing: Science Press. 10 – 11, 33 – 34 (in Chinese)
- Wang YT and Mao JW. 2002. Mineralization in the post-collisional orogenic extensional regime: A case study of the Xiaoqinling gold deposit clustering area. *Geological Bulletin of China*, 21(8 – 9): 562 – 566
- Wang YT, Mao JW, Lu XX *et al.* 2002. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and geological implication of auriferous altered rocks from the middle-deep section of Q875 gold-quartz vein in Xiaoqinling area, Henan, China. *Chinese Science Bulletin*, 47(20): 1750 – 1755
- Wu FY, Lin JQ, Wilde SA *et al.* 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet Science Letters*, 233: 103 – 119
- Xu H and Xu GP. 2000. Geochemical characteristics and genesis of the lamprophyres in the Jiaodong gold ore district, Shandong Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(1): 36 – 44 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF, Shen BY, Niu ZL *et al.* 1989. Studies on gold mineralization-related granites from the Jiaodong block. *Geology of Shandong*, 5(2): 1 – 125 (in Chinese with English abstract)
- Xu JH, Xie YL and Shen SL. 1997. A comparison of ore-forming fluids between gold deposits in Xiaoqinling Mountains and Jiaodong Peninsula. *Mineral Deposit*, 16(2): 151 – 162 (in Chinese with English abstract)
- Xu QD, Zhong ZQ, Zhou HW *et al.* 1998. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Xiaoqinling gold area in Henan province. *Geological Review*, 44(3): 323 – 327 (in Chinese with English abstract)
- Xue LW, Pang JQ, Wang XG *et al.* 1999. Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of fluid inclusion of the No-303 quartz vein in Xiaoqinling region. *Geochimica*, 28(5): 473 – 478 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Chu MF, Liu W *et al.* 2003. Geochemistry and petrogenesis of Guojialing granodiorites from the northwestern Jiaodong Peninsula, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 692 – 700 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Chung SL, Zhai MG *et al.* 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: Evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73: 145 – 160
- Yang JH and Zhou XH. 2000. Rb-Sr isochron age pyrite and ore from Linglong gold deposit and their geological significances. *Chinese Science Bulletin*, 45(14): 1547 – 1553
- 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 MZ. 1998. The geochemistry of wallrock alteration zone of gold deposits-as exemplified by Jiaodong gold deposits. Beijing: Geological Publishing House. 1 – 120 (in Chinese with English summary)
- Zhai MG, Fan HR, Yang JH *et al.* 2004. Large-scale clusters of gold deposits in east Shandong: Anorogenic metallogenesis. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 85 – 93 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Men QR, Yu ZP *et al.* 1996. Orogenesis and dynamics of Qinling orogen. *Science in China (Series D)*, 26(3): 193 – 200
- Zhang JJ, Zheng YD and Liu SW. 1998. Mesozoic tectonic evolution and ore-deposits formation in the gold mine field of Xiaoqinling. *Chinese Journal of Geology*, 38(1): 74 – 84 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JJ, Zheng YD and Liu SW. 1998. The Xiaoqinling Metamorphic Core Complex: Structure, Genetic Mechanism and Evolution. Beijing: China Ocean Press, 17 – 63
- Zhang LC, Shen YC, Li HM *et al.* 2002. Helium and argon isotopic compositions of fluid inclusions and tracing to the source of ore-forming fluids for Jiaodong gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 559 – 565 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q *et al.* 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236 – 244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XO, Cawood PA, Wilde SA *et al.* 2003. Geology and timing of mineralization at the Cangshan gold deposit, northwestern Jiaodong Peninsula, China. *Mineral Deposita*, 38(2): 141 – 153 (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)
- Zhou T, Goldfarb RJ and Neil Phillips G. 2002. Tectonics and distribution of gold deposits in China-an overview. *Mineralium Deposita*, 37: 249 – 282
- Zhou T and Lu G. 2000. Tectonics, granitoids and Mesozoic gold deposits in East Shandong, China. *Ore Geology Reviews*, 16: 71 – 90
- Zhou XM and Li WX. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics* 326, 269 – 287
- Zhou XM, Sun T, Shen WZ *et al.* 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29: 26 – 33
- Zhu G, Wang YS, Liu GS *et al.* 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China. *Journal of Structure Geology*, 27: 1379 – 1398

附中文参考文献

- 陈衍景. 1999a. 中国绿岩带型金矿床. 见: 中国金矿研究新进展(第一卷上篇). 北京: 地震出版社, 4 – 29, 99 – 102
- 陈衍景. 1996. 陆内碰撞造山体制的流体作用模式及成矿的关系-理论推导和东秦岭金矿床的研究结果. *地学前缘*, 3(3 – 4): 282 – 289
- 陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力. *中国地质*, 33(6): 1181 – 1196
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 地震出版社, 234 页
- 陈衍景, 倪培, 范洪瑞, 等. 2007. 不同类型热液金矿床的流体包裹体特征. *岩石学报*, 23(9): 2085 – 2108
- 陈衍景, 隋颖慧, Pirajno F. 2003. CMF 模式的排他性证据和造山型银矿的实例: 铁炉坪银矿同位素地球化学. *岩石学报*, 19(3): 551 – 568
- 范宏瑞, 谢奕汉, 翟明国, 等. 2003. 豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用. *岩石学报*, 19(2): 260 – 266
- 顾雪祥, 唐菊兴, 王成善, 等. 2001. 喜马拉雅碰撞造山作用与(超)大型矿集区的形成: 科学问题与思考. *成都理工学院学报*, 28(4): 344 – 349
- 侯明兰, 蒋少涌, 姜耀辉, 等. 2006. 胶东蓬莱金成矿区的 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
- 侯明兰, 蒋少涌, 沈昆, 等. 2007. 胶东蓬莱金矿区流体包裹体和氢氧同位素地球化学研究. *岩石学报*, 23(9): 2241 – 2256
- 侯增谦, 吕庆田, 王安建, 等. 2003. 初论陆陆碰撞与成矿作用-以青藏高原造山带为例. *矿床地质*, 22(4): 319 – 333
- 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 2004. 胶东乳山含金石英脉型金矿的成矿年龄: 热液锆石 SHRIMP 法 U-Pb 测定. *科学通报*, 49(12): 1191 – 1198

- 胡正国, 钱壮志, 闫广民, 等. 1994. 小秦岭拆离-变质核杂岩构造与金矿. 西安: 陕西科学技术出版社, 122p
- 姜耀辉, 蒋少涌, 侯明兰, 等. 2007. 加厚下地壳拆沉过程中形成胶东金矿集区: 来自围岩花岗岩和煌斑岩的证据. 矿物学报, 27(增刊): 22-23
- 李厚民, 叶会寿, 毛景文, 等. 2007. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼-钨定年及其地质意义. 矿床地质, 26(4): 417-423
- 李华芹, 刘家齐, 魏林. 1993. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用. 北京: 地质出版社, 92-105
- 李俊建. 1997. 初论中国金矿床的成矿时代. 前寒武纪研究进展, 20(1): 17-26
- 李诺, 孙亚莉, 李晶, 等. 2008. 小秦岭大湖金钼矿床辉钼矿铼钨同位素年龄及印支期成矿事件. 岩石学报, 24(4): 810-816
- 李绍儒, 李强之, 李文良. 1998. 小秦岭金矿田矿床成因新认识. 黄金地质, 4(1): 41-49
- 刘辅臣, 卢作祥, 范永香, 等. 1984. 玲珑金矿中基性脉岩与矿化关系探讨. 地球科学-中国地质大学学报, (4): 39-47
- 卢欣祥, 尉向东, 董有, 等. 1999. 小秦岭-熊耳山地区金矿时代. 黄金地质, 5(1): 11-15
- 罗镇宽, 苗来成. 2002. 胶东招徕地区花岗岩和金矿床. 北京: 冶金工业出版社, 1-157
- 毛景文. 2001. 西秦岭地区造山型与卡林型金矿床. 矿物岩石地球化学通报, 20(1): 11-13
- 毛景文, 张作衡, 余立金, 等. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示. 中国科学(D), 2003, 33: 289-299
- 毛景文, 李晓峰, 张荣华, 等. 2005b. 深部流体成矿系统. 中国大地出版社
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 2005a. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. 岩石学报, 21(1): 169-188
- 孟繁聪, 孙岱生, 李胜荣. 2001. 胶东磁山花岗岩的特征及其成矿性. 矿床地质, 20(4): 394-401
- 倪师军, 李朝阳, 张诚, 等. 1994. 中基性脉岩对金矿成矿的贡献-以小秦岭金矿区为例. 成都理工学院学报, 21(3): 70-78
- 倪智勇, 李诺, 管申进, 等. 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岩. 岩石学报, 24(9): 2058-2068
- 沈保丰, 骆辉. 1994. 华北陆台太古宙绿帘带金矿的成矿特征. 华北地质矿产杂志, 9(1): 87-96
- 王团华, 毛景文, 王彦斌. 2008. 小秦岭-熊耳山地区岩墙锆石 SHRIMP 年代学研究-秦岭造山带岩石圈拆沉的证据. 岩石学报, 24(6): 1273-1287
- 王团华, 毛景文, 谢桂清, 等. 2008. 小秦岭-熊耳山地区中基性岩墙的 Sr-Nd-Pb 同位素组成及其大地构造意义. 地质学报, 82(11): 1580-1591
- 王秀璋. 1992. 中国改造型金矿床地球化学. 北京: 科学出版社, 10-11, 33-34
- 王义天, 毛景文. 2002. 碰撞造山作用期后伸展体制下的成矿作用-以小秦岭金矿集中区为例. 地质通报, 21(8-9): 562-566
- 王义天, 毛景文, 卢欣祥, 等. 2002. 河南小秦岭金矿区 Q875 脉深部蚀变岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其意义. 科学通报, 47(20): 1750-1755
- 徐红, 徐光平. 2000. 胶东煌斑岩的地球化学特征及成因探讨. 岩石矿物学杂志, 19(1): 36-44
- 徐金芳, 沈步云, 牛良柱, 等. 1989. 胶北地块与金矿有关的花岗岩类的研究. 山东地质, 5(2): 1-125
- 徐九华, 谢玉玲, 申世亮. 1997. 小秦岭与胶东金矿床的成矿流体特征对比. 矿床地质, 16(2): 151-162
- 徐启东, 钟增球, 周汉文, 等. 1998. 豫西小秦岭金矿区的一组 ^{40}Ar / ^{39}Ar 定年数据. 地质评论, 44(3): 323-327
- 薛良伟, 庞继群, 王祥国, 等. 1999. 小秦岭 303 号石英脉流体包裹体 Rb-Sr, ^{40}Ar - ^{39}Ar 成矿年龄测定. 地球化学, 28(5): 473-478
- 杨进辉, 周新华. 2000. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代. 科学通报, 45(14): 1547-1553
- 杨进辉, 朱美妃, 刘伟, 等. 2003. 胶东地区郭家岭花岗闪长岩的地球化学特征及成因. 岩石学报, 19(4): 692-700
- 杨敏之. 1998. 金矿床围岩蚀变带地球化学-以胶东金矿床为例. 北京: 地质出版社, 1-120
- 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 2004. 非造山带型金矿-胶东型金矿的陆内成矿作用. 地学前缘, 11(1): 85-93
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. 中国科学(D), 26(3): 193-200
- 张进江, 郑亚东, 刘树文. 1998. 小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制构造演化. 北京: 海洋出版社, 17-63
- 张进江, 郑亚东, 刘树文. 2003. 小秦岭金矿田中生代构造演化与矿床形成. 地质科学, 38(1): 74-84
- 张连昌, 沈远超, 李厚民, 等. 2002. 胶东地区金矿床流体包裹体的 He, Ar 同位素组成及成矿流体来源示踪. 岩石学报, 18(4): 559-565
- 张旗, 王焰, 钱青, 等. 2001. 中国东部中生代埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石学报, 17(2): 236-244
- 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