

造山型矿床、成矿模式及找矿潜力

陈衍景^{1,2}

(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, 广东 广州 510640;

2. 北京大学造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871)

摘要:矿床新类型的识别往往导致大批矿床和成矿省的发现, 预测和识别矿床新类型是矿床研究的重要任务之一。造山型金矿的普遍性和重要性已被世界范围的大量研究所证明, 但其他矿种的造山型矿床却很少被涉及。笔者提出了造山型矿床的概念及其变质流体成矿的实质, 建立了矿床、矿田和成矿省等不同尺度的造山型矿床成矿模式及其随时间演化的 3 阶段模式, 强调会聚造山作用的挤压伸展转变期是大规模成矿时间, 同造山成矿系统的特点是成矿年龄滞后于造山作用时间。通过矿床实例研究证明了造山型银矿床、铅锌矿床、铜矿床和钼矿床的客观存在, 阐明了中国巨大的造山型矿床的勘查潜力, 例证了运用矿田尺度成矿模式进行成矿预测的有效性和重要意义。

关键词:造山型金矿; 造山型矿床; 增生造山; 碰撞造山; 成矿模式

中图分类号:P612 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2006)06-1181-16

1 前言

矿床勘查的历史告诉我们, 发现矿床新类型, 如卡林型金矿床, 往往带动大批矿床或成矿省的发现, 进而推动一个地区或国家矿业经济的快速发展, 而且导致成矿理论研究的突破和勘查技术及其组合的创新。中国境域大陆造山带丰富, 蕴涵多种类型的矿床, 且矿种多样, 并以此有别于其他国家, 是中国学者开展研究并取得自主创新的有利条件。

在国际同行聚焦于造山型金矿研究的潮流中, 笔者根据中国造山带地质成矿特点, 以比较矿床学^[1]为指导, 通过分析 Au 与 Ag, Mo, Cu, Sb 等成矿元素的地球化学行为的相似性和差异, 认为这些元素以同一成因类型共生于一造山带中, 特别是碰撞造山带中^[2-4]; 既然国内外学者在世界范围的造山带中识别了大量的造山型金矿, 那么, 似乎还应该存在着大量的造山型钼、铜、银、锑矿床或钨金、铜金、金银等矿床^[5]。基于以上认识, 在 Groves 等^[6]系统论证了造山型金矿的概念、特征和普遍性的基础上, 笔者及合作者致力于探索造山型 Au-Ag, Ag, Pb-Zn-Ag, Mo(-Au), Cu(-Au), Sb(-Au) 等矿床的存在与否, 解剖了秦岭等地若干代表性矿床的地质地球化学特征, 首先确证了中国秦岭等造山带客观发育了脉状造山型 Mo, Cu, Ag, Sb 等元素及其组合的矿床, 认为中国广泛的大

陆碰撞造山带内可能潜在着大量脉状造山型铜矿、银矿、钼矿、铅锌矿等, 而这类矿床长期被国内外学者忽视。因此, 本文旨在与同行交流新认识和研究结果, 期望将世界“造山型金矿”研究热潮拓展为“造山型矿床”研究, 呼吁同行重视在大陆碰撞造山带地区寻找造山型铜矿、银矿、钼矿、铅锌矿和造山型金矿等。

2 识别矿床新类型的重要意义

矿床新类型的识别, 往往带动大批矿床或成矿省的发现, 进而带动一个地区或国家矿业经济的快速发展。为说明这一点, 下面列举一些实例。

1962 年美国学者识别出了卡林型金矿, 导致美国西部卡林型金矿省的发现, 使美国跃升为世界第二大产金国。1978 年之后, 中国学者开始寻找卡林型金矿, 发现了陕甘川和滇黔桂两个世界级的卡林型-类卡林型金矿省 (分别是世界第二和第三大)^[7]。其中, 甘肃阳山金矿黄金储量已达 220 t^[7]。

为借鉴山东焦家金矿的找矿经验, 1973 年中国学者在山东焦家金矿召开了现场讨论会, 随后发现大批焦家式矿床, 即构造蚀变岩型或蚀变破碎带型金矿床, 河南省熊耳山金矿田和崞山地区的申家窑金矿就是典型实例^[8]。

再如, 继提出斑岩铜矿的板块构造模式^[9]之后, Heald 等^[10]

收稿日期: 2006-11-20; 改回日期: 2006-12-22

基金项目: 国家 973 项目 (2006CB4035008)、国家自然科学基金项目 (40425006 和 40352003) 以及中国科学院地球化学研究所百人计划项目资助。

作者简介: 陈衍景, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 从事区域成矿学和矿床地质地球化学研究; E-mail: yjchen@pku.edu.cn。

论证了浅成低温热液型金矿的成矿模式及其与斑岩成矿系统的内在联系,带动了环太平洋和中亚造山带两个巨型浅成低温热液成矿带的发现,目前全球已发现 20 个该类型的超大型金矿(>100t Au)^[9],20 个矿床黄金总储量>6584 t。在中国相继发现了福建紫金山、黑龙江团结沟、金厂等大型金矿^[10]。

20 世纪 80 年代初,Meinert^[11]报道了国外一些矽卡岩型的含金性,部分中国学者^[12,13]也呼吁重视寻找矽卡岩型金矿,致使中国很多矽卡岩型矿床中发现了伴生金的重要价值,至少有 70 个矽卡岩产地中含金,金储量>1000 t^[14]。

然而,矿床类型对于区域构造环境却有明显的选择性。例如,浅成低温热液型金银矿床主要产于环太平洋造山带和中亚造山带,SEDEX 型铅锌矿倾向于发育在弧前盆地,密西西比河谷型(MVT)铅锌矿多产于前陆盆地,VMS 型铜锌矿床倾向产于弧后盆地或水下裂谷盆地,卡林型-类卡林型金矿产于弧后伸展盆地^[15-16]。就中国华北克拉通南北缘的造山带而言,北缘造山带(即兴蒙造山带)斑岩型、矽卡岩型、浅成低温热液型等与岩浆活动关系密切的成矿系统较为发育,卡林型和造山型金矿系统发育较少;相反,南缘造山带(即秦岭)发育世界第二大卡林型-类卡林型金矿省、中国最大的脉状银铅锌成矿省、中国第二大造山型金矿省(小秦岭—熊耳山)。因此,预测和寻找矿床新类型,必须充分考虑成矿地质环境的制约。

3 从造山型金矿到造山型矿床——概念和成矿模式的跨越

3.1 造山型金矿的概念与模型和矿床地质特征

科学掌握矿床成因类型划分方案是指导找矿勘查的重要依据,是矿床学家长期努力研究的重要课题之一。由于制约矿床形成的因素较多,因而矿床成因分类方案也较多^[4]。板块构造兴起以来,许多学者倾向于将矿床成因类型划分与成矿地球动力学背景结合起来,从而更好地理解矿床的形成机理和区域成矿规律。在金矿床成因类型研究中,许多学者根据世界级超大型矿床或矿集区的特征,将原生金矿床分为造山型、卡林型-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^[17,18],提出了区分上述金矿系统的标志性特征和有利的成矿背景^[19]。

据研究^[5,17,19],造山型金矿(orogenic-type gold deposit)是变质地体中受构造控制的脉状后生金矿床,在时间和空间上与增生造山作用有关。造山型金矿的概念包括了过去有些文献中常见的石英脉型、韧性剪切带型、构造蚀变岩型以及一些网脉状的金矿床。它们主要形成于中地壳的绿片岩相环境,有些文献中也常称为中温或中深成热液矿床。但是,最新研究表明,造山型金矿的形成温度和压力变化范围较大,深可达 25 km 以上,浅至近地表,据此,Groves 等^[9]提出了地壳连续模式(Crustal continuum model,图 1)。根据造山型金矿的研究结果,Kerrich 等^[17]认为以往文献中常见的一些概念应

该废弃。例如:(1)很多造山型金矿床中 Ag 含量较高,Au/Ag 比的平均值为 5 左右,有时伴随 W、Mo 或 Te 的富集,因此,“单金矿床”(gold-only)^[20]的概念是错误的,不宜使用;(2)由于造山型金矿对围岩没有显著的选择性,因此“浊积岩型”(turbidite-type)、“板岩型”(slate-hosted type)、“绿岩带型”、“火山岩型”等概念已失去科学意义,而且,这些矿床已被包括在造山型或其他相应的金矿类型中;(3)朝鲜半岛和中国东部花岗岩中的脉状金矿床,其特征与产于绿岩带和浊积岩中造山型金矿床相似,因此也应为造山型。同样道理,简单地根据成矿时间而区分太古宙、元古宙和显生宙造山型金矿,也没有意义。Kerrich 等^[17]总结造山型金矿或成矿省的特征如下:

(1)成矿多与增生型造山作用(accretionary orogeny)有关^[21](图 2)。

(2)多位于重要超岩石圈构造附近,或者位于复杂的变质火山-深成岩地体或沉积地体的构造边界附近。

(3)在多个外来地体不断拼贴增生的造山带,造山作用持续时间较长,成矿时间范围较大,但总是同步或滞后于赋矿地体的峰期变质作用,或造山构造作用晚期。

(4)矿床分布于复杂的大型地质构造单元中,构造单元是岩性、应变、变质级等方面的陡变带或梯度带,属于造山带环境。

(5)绝大多数产于绿片岩相变质地体中。

(6)矿床受构造控制,产于超岩石圈断裂带的二级或更次级的断层羽中,赋矿构造主要是高角度的斜向走滑带、逆掩推覆带,也可有横向断裂。

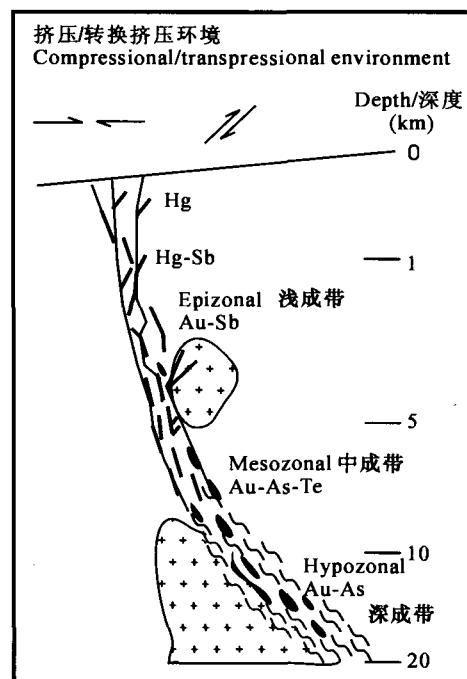
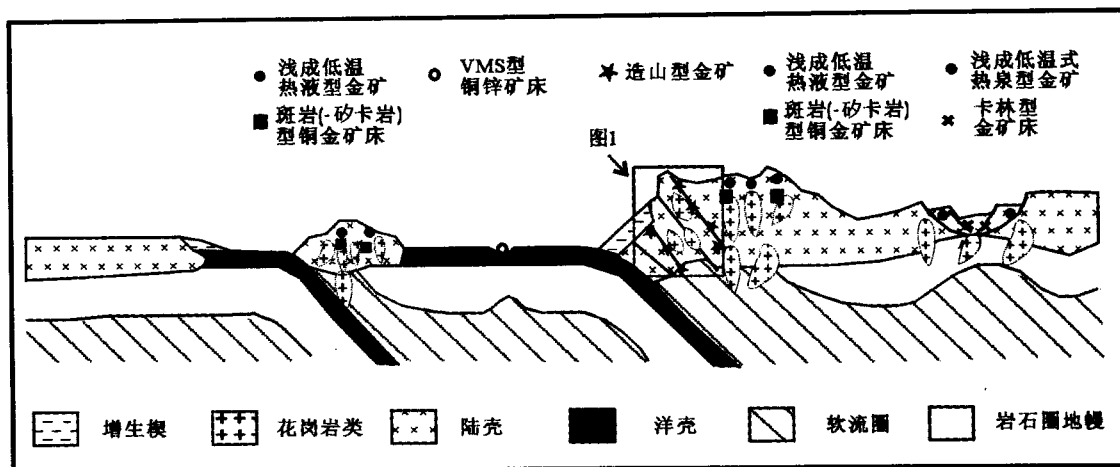


图 1 造山型金矿的地壳连续模式^[9]

Fig.1 Crustal continuum model for orogenic-type gold deposits^[9]

图 2 造山型金矿及相关矿床形成的板块构造模式^[9]Fig.2 Plate tectonic model for orogenic gold and other related deposits^[9]

(7)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。

(8)绿片岩相域的蚀变矿物组合以石英、碳酸盐、云母、(±钠长石)、绿泥石和黄铁矿(±白钨矿和电气石)为主。

(9)与区域背景的元素丰度相比,Au、Ag(As、Sb、Te、W、Mo、Bi、B)强富集,Cu、Pb、Zn、Hg 和 Tl 弱富集,As、Sb 和 Hg 在浅部低温域的富集程度增强。

(10)成矿流体为低盐度的富碳水溶液,通常盐度(NaCl)低于 6%, $(\text{CO}_2+\text{CH}_4)$ 含量为 5%~30% mol,少量 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 不混溶,常见含 CO_2 水溶液包裹体、富 CO_2 包裹体和水溶液 3 类包裹体。

(11)在初-脆性剪切带内,流体压力从超静岩(supralithostatic)变化到低于静岩(sublithostatic)。

(12)尽管在矿区范围内存在一定程度的成矿元素分带性,但单个矿床或矿脉系统的垂直延伸大,可超过 2 km,且没有垂直分带现象或分带性较弱,侧向分带较明显。

根据前面列举的众多特征中,能够作为区别于其他类型金矿床的标志性特征是:矿床主要产于造山带(含俯冲型和碰撞型)的断裂构造中,成矿流体具有富 CO_2 、低盐度的特点,成矿作用发生在造山峰期变质之后。据此,华北克拉通边缘造山带(胶东、阴燕辽、东秦岭)和中国多数大陆造山带内的脉状金矿已被论证为造山型^[24]。

3.2 造山型金矿概念及其地壳连续模型的局限和问题

值得指出,造山型金矿的概念、地壳连续模型以及矿床地质特征等主要来源于对澳大利亚 Yilgarn、加拿大 Abitibi 和美国阿拉斯加 Juneau 金矿带等金矿省的研究和资料归纳^[9],这些地区基本上只有脉状金矿床,缺乏其他类型矿床(类似于中国胶东地区),明显不同于东秦岭等多类型、多矿种发育的造山型金矿省,因此,Groves 等^[9]总结的矿床地质特征和成矿规律也难免以偏概全。下面列举一些尚未涉及到的,或者

没有解决,甚至自相矛盾的问题。

(1)前人论证了造山型金矿的特征和形成机理,并掀起了日渐增强的国际造山型金矿研究热潮,但至今国外学者尚未讨论是否存在其他矿种的造山型矿床。大家知道,Au、Ag、Cu、Mo、Sb、Tl 等成矿元素都属于亲硫元素,在很多地质环境中的地球化学行为相似,当金在造山过程中活化、迁移、富集成矿时,这些元素至少应该发生一定程度的活化、迁移和富集矿化^[25]。因此,在科学逻辑上,造山带中还应该存在造山型的其他矿种,特别是银、铜、钼、锑、碲、萤石等,需要进一步研究识别。

(2)造山型金矿研究的热潮导致世界各地大量报道造山型金矿的发现和确认,其中不乏 Au-Sb, Au-Ag, Au-Te, Au-Pb-Ag, Au-Cu 等综合矿床。例如,澳大利亚的 Wiluna 金锑矿床^[26]、中国湖南沃溪金锑钨矿床^[27]和新疆萨瓦亚尔顿金锑矿床^[28]、河南栾川康山金银铅矿床^[29]、河南洛宁上官金(-碲)矿床^[30]、河南灵宝大湖金钼矿床(上部为金矿,下部为钼矿)、内蒙古白乃庙铜(-金-钼)矿床和白乃庙金(-铜)矿床,等等。现在应该研究的问题是,这些矿床中的金矿化被确定为造山型,而相伴发生的 Cu、Ag、Pb、Sb、Te 矿化是否属于造山型?

(3)在不少造山型金矿省,特别是中国东秦岭地区,还大量发育构造控制的脉状铅锌矿、银矿、铜矿等。这些矿床与造山型金矿产于同一构造单元,甚至产于同一条断裂构造或褶皱构造内,且矿床地质地球化学特征基本一致。例如,河南熊耳山金矿田发现了纸房石英脉型钼矿、铁炉坪银(-铅锌金)矿^[31];桐柏地区的河前庄复背斜既控制了银洞坡金矿的定位,还控制了破山银矿、银洞岭银矿的产出^[32]。这些矿床是否属于造山型,或者它们与造山型金矿之间有何成因联系,显然值得研究。

(4)在 Groves 等^[9]的地壳连续模型图中,深部为金矿

床,浅部为汞锑矿床,而且二者产于同一条断裂带内,并由同一流体系统形成(图1)。既然金矿床被确定为造山型,那么,汞锑矿床是否也属于造山型呢?

(5) 造山型金矿的地壳连续模型只在一定程度上考虑了矿床尺度的垂向矿化元素分带,并未考虑地体或矿田尺度的侧向矿化分带,更未考虑造山带或成矿省尺度的多类矿床的成矿带分布规律。

(6) 在造山过程中,变质成矿流体沿断裂构造带上升,通过水-岩相互作用而形成造山型金矿^[9]。如果变质成矿流体在不整合面(如河南半宽金矿^[20])、特殊岩性层(如炭质层、BIF层)、背斜褶皱构造轴部(如河南银洞坡^[21])等有利空间位置被圈蔽,并通过水-岩相互作用而形成层控矿床,那么,在科学逻辑上,这类层控矿床似乎也应是造山型矿床。如此,造山带地区潜在着层控造山型金、银、铜、钼等矿床,这类矿床也应属找矿勘查的目标。

(7) 在造山型金矿的成矿构造环境的讨论中,许多学者倾向于将成矿作用与增生型造山作用相联系,认为造山型金矿主要产于大洋板块俯冲的增生楔^[9],或者增生地体的拼贴带^[9]。但是,在环太平洋俯冲增生造山带中,除北美 Cordilleran 造山带内发育造山型金矿外,其他多数地区并没有造山型金矿^[9]。相反,很多造山型矿床位于大陆内部的碰撞造山带,如东秦岭、俄罗斯的蒙古-鄂毕茨克造山带等造山型金矿省。

(8) 虽然大陆内部的造山型金矿床被解释为古老大陆边缘增生型造山带环境的产物^[9],但很多造山型矿床的形成时间却远远晚于增生型造山作用,甚至晚于洋盆闭合后的碰撞造山作用^[9](详见参考文献[19])中的图5。例如,西澳 Yilgarn 金矿省的碰撞时间是2 650~2 630 Ma (Cassidy 个人通讯),成矿时间为2 640~2 600 Ma^[22];加拿大 Aibitibi 金矿省,造山时间为2 710~2 670 Ma,成矿时间为2 600 Ma^[23]。这些地区的金矿化作用发生时间甚至晚于同造山花岗岩类,被解释为加厚岩石圈根部拆沉作用的结果^[24]。

(9) 在 Goldfarb 等^[25]提供世界造山型金矿分布图中,造山型金矿要么位于前中生代的造山带,要么产于中生代造山带内的古老地体或地体边缘。造山型金矿与这种地体究竟有何成因联系?这些矿床的成矿地质背景可否理解为地体与大陆或地体的碰撞造山作用?

(10) 对于一个规模较大的成矿省或造山带,如东秦岭、中亚造山带和 Yilgarn 克拉通,其内部往往包括多个不同时代的地体或构造单元,不同地体或构造单元的变形变质时间差异较大,指示造山带形成时间持续较长,是通过多次增生造山而形成的。但是,这些成矿省的大规模成矿时间却是统一的,且往往与最晚一次的造山事件关系密切^[26]。

(11) 模拟实验已证明,VMS 型矿床中的 Au、Cu、Ag 等元素在挤压构造域活化迁移后,在伸展构造域重新沉淀富集^[27]。在世界范围的增生型造山带中,除环太平洋造山带之外,中亚造山带等大陆内部的增生型造山带均遭受了增生造山之

后的碰撞造山作用。那么,在陆陆碰撞造山作用是否改造或破坏先成矿床?增生过程形成的造山型矿床等能否被保存下来?被改造、破坏的斑岩型、VMS 型矿床中的 Cu、Au、Zn 等成矿元素可否重新活化、迁移、富集为新的造山型矿床?显然,这是制约着大陆内部碰撞造山带地区找矿勘查工作部署的重要问题。

4 造山型矿床及其成矿模式

鉴于国外学者提出的造山型金矿概念、地壳连续模型和成矿地球动力学模式等尚有很多局限、没有解决的或自相矛盾的问题,笔者基于长期的实际研究和比较矿床学^[28]的学术思路,下面论述造山型矿床的概念及其不同尺度的成矿模式。

4.1 造山型矿床及其地壳连续模式——矿床尺度的成因模式

金与很多成矿元素的地球化学行为相似,既然造山型金矿概念成立,那么,造山型银、铅锌、铜、钼等矿床的概念也应成立。因此,笔者将造山型金矿的概念拓展到造山型矿床,并建立了更全面的矿床尺度的地壳连续模式(图3)。事实上,已经研究例证了一些造山型矿床的存在,这些矿床的地质地球化学特征与邻近的造山型金矿几乎完全一致,均为构造控制的脉状变质热液矿床(见下文)。例如,河南铁炉坪银矿^[24,29]、银洞沟银铅锌金矿^[24]等,内蒙白乃庙铜矿^[24]、陕西铜厂铜矿等,河南冷水北沟、百炉沟等大型-超大型铅锌银多金属矿床^[24],河南灵宝大湖和嵩县纸房石英脉型钼矿等。

造山型矿床是构造控制的脉状后生热液矿床,在时间、空间和成因上与板块会聚型造山作用密切相关,成矿流体主

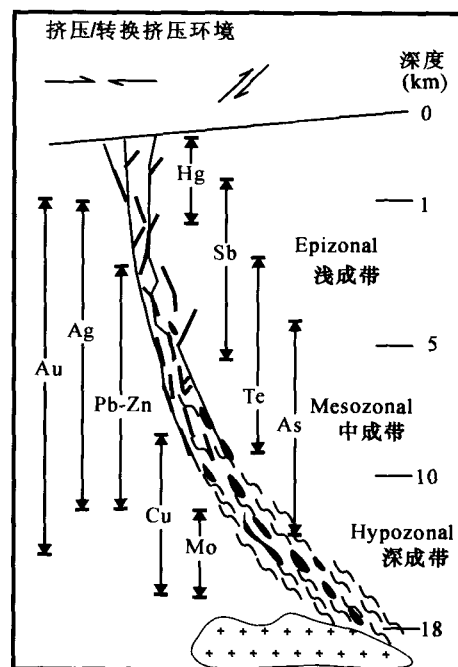


图3 矿床尺度的造山型矿床成矿模式——地壳连续模式
Fig.3 Crustal continuum model for orogenic-type deposits: deposit-scale

要来自矿区下部的变质脱水作用(含地幔脱水、脱气),成矿系统在浅部或晚阶段有较多大气降水热液混入。就断裂构造控制的成矿系统而言,有利于流体沸腾、混合和成矿物质富集的时间是赋矿断裂构造变形的韧性-脆性转换期^[2,3,26,33],空间是赋矿断裂构造变形的韧性-脆性转换带^[37-39];就褶皱构造控制的成矿系统而言,由透水层和不透水层构成的背斜褶皱有利于成矿流体圈蔽、聚积,使上升的变质流体在不透水层之下聚积、循环,下渗的大气降水热液在圈蔽层之上循环,圈蔽层附近流体物理化学性质发生急变与混合,有利于形成层控造山型矿床,如银洞坡炭质层控型金矿^[40]。

值得说明的是,由于热液矿床形成深度不超过花岗岩浆的产生深度,而实验证明在水汽饱和的条件下长英质岩石在 620℃ 开始熔融并在 640℃ 达到重熔,加之造山带地热梯度多为 35℃/km^[41],则造山型矿床形成深度应浅于 18 km。

4.2 造山型矿床与其他类型矿床的关系——矿田尺度的成因模式

据涂光炽先生^[42],改造作用(Reworking)与沉积作用、变质作用和岩浆作用并列为不同温度范围(彼此之间可有重叠)4种成岩、成矿作用。在造山带地区,除沉积成岩作用较弱外,其他3种地质作用均较强烈。

改造作用介于沉积成岩作用(<50℃)和变质作用(>200℃)之间,包括构造变形和中低温流体活动,在地壳浅层广泛而强烈,导致大量中-低温热液矿床形成^[43]。显然,改造作用也是造山作用的表征之一,因此,由改造成矿作用主导而形成的卡林型-类卡林型金矿、MVT 铅锌矿床、砂岩型铜矿、低温热液矿床(含分散元素矿床和汞锑矿床等)等,虽然其成

矿温度和压力通常低于造山型矿床,但可与造山型矿床共存于同一造山带或成矿省(如三江地区、秦岭地区),甚至可在同一矿区连续过渡(图3)。

会聚造山带是中酸性岩浆发育最有利的地区,因此也是岩浆控矿系列矿床(含斑岩型、矽卡岩型、爆破角砾岩型、浅成低温热液型等)最有利的地区^[25,19]。如此以来,造山型成矿省往往伴随大量中酸性岩浆岩和浆控系列矿床。

将成矿省或赋矿地体的造山型矿床、改造型矿床、浆控系列矿床以及中酸性岩浆活动与造山作用有机地联系起来,建立地体尺度或矿田尺度的成矿模式,有助于理解造山型矿床成矿机理,掌握矿床的成带分布规律,指导成矿预测和勘查评价,因此是矿床地质研究的重要使命和矿床勘查的需求。

针对地体增生型和碰撞型造山带中的单个俯冲体制或单个增生地体而建立的地体尺度的成矿模式见图4,也称A型俯冲成岩成矿模式或碰撞造山成岩成矿与流体作用模式(CMF模式)^[23]。该模式的变异及各带发育情况受多种因素的控制,并曾多次详细讨论^[2,39],本文不再赘述。需要补充说明的是,当俯冲板片为镁铁质岩石或中基性麻粒岩时,G带花岗岩类不发育,其特征即转变为B型俯冲。

特别指出,俯冲地体/板片的进变质脱水作用与仰冲地体/板片的退变质作用是同时发生的。在成矿过程中,赋矿地体及其赋矿构造,即仰冲地体或板片及其断裂系统,在构造变形、变质作用等方面总表现为晚造山(late orogenic)或后造山(post orogenic)的特征。因此,忽视俯冲地体或板片的同造山进变质脱水,而简单地根据赋矿地体的“后造山变质特征”将成矿时间认定在后造山阶段,是片面而错误的。

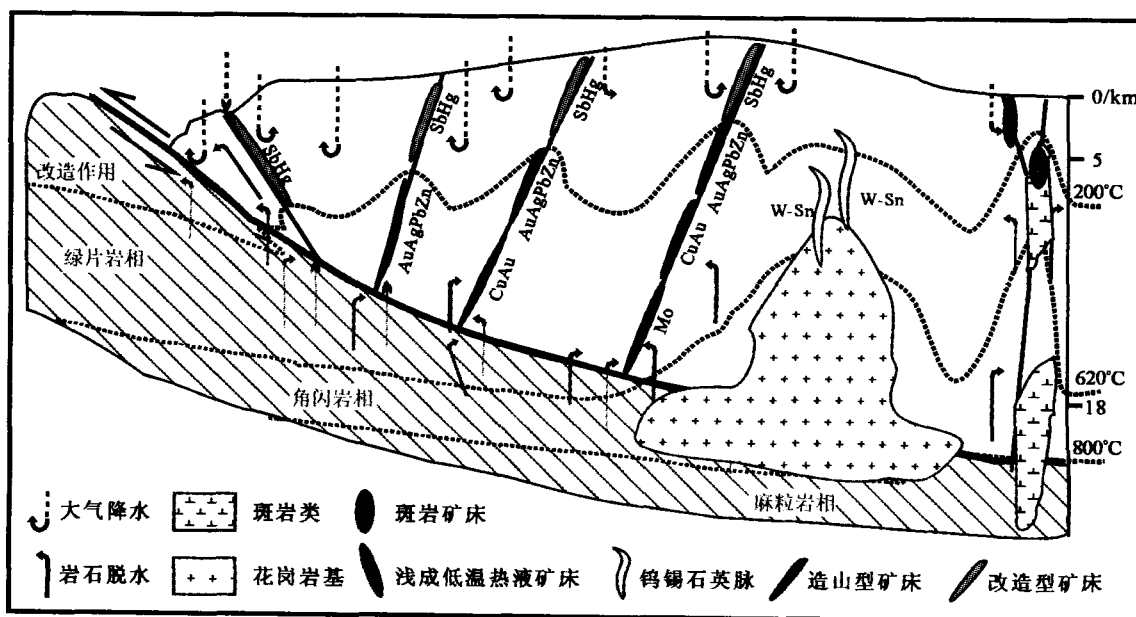


图 4 地体尺度的造山型矿床构造成矿模式

Fig.4 Tectono-metallogenic model for terrane-scale orogenic deposits

4.3 造山型矿床形成的板块构造环境——成矿省尺度的成因模式

关于造山型金矿床形成的板块构造背景,目前有两种,其一是国外学者^[6,15-17,19]提出的增生型造山带,即活动大陆边缘的弧前增生楔;其二是笔者及合作者多次论证的碰撞造山带^[2-5,41-45]。借助造山型金矿的研究结果,笔者认为造山型矿床形成的地球动力学背景是会聚型造山作用,包括增生型和碰

撞型造山作用(图5)。而且,认为主要形成于碰撞造山体制,理由是:(1)增生型造山作用持续时间较长,而造山型矿床形成时间较短,往往发生在最晚一次的增生型造山作用的晚期或之后,此背景更似碰撞造山体制;(2)含较多地体(含增生、移植和外来)科迪勒拉型造山带(Cordilleran type)^[13-16,46]发育造山型金矿省,而缺乏外来地体的安第斯型(Andean type)造山带基本没有造山型矿床;(3)在科迪勒拉型造山带中,多数

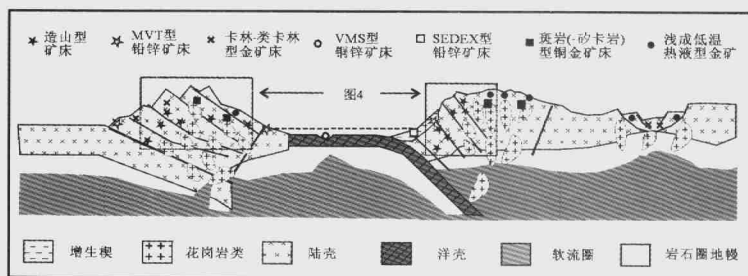


图5 造山型成矿省发育的板块构造模式

Fig.5 Plate tectonic model for orogenic metallogenic provinces

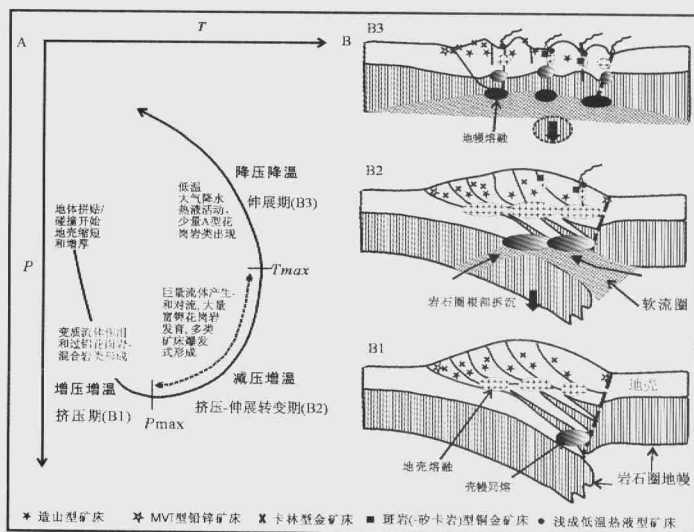


图6 会聚造山带构造背景演化与大规模成矿之耦合关系的3阶段模式

Fig.6 Three-stage model showing the coupling between large-scale metallogeny and tectonic evolution of the convergent orogens (accretionary and collisional orogens)

造山型金矿位于古老地体内部或边缘,指示地体碰撞拼贴与成矿的密切联系;(4)碰撞造山作用包括陆-陆碰撞、弧-陆碰撞、弧-弧碰撞和地体拼贴等多种方式,地体增生到陆缘是碰撞造山作用的形式之一;(5)当洋盆彻底闭合后,洋-陆俯冲造山体制转变为陆-陆碰撞造山体制,活动大陆边缘造山带转变为大陆碰撞造山带,科迪勒拉型和安第斯型的陆缘造山带分别演化为中亚型和秦岭型(或阿尔卑斯型)大陆碰撞造山带^[6],两类大陆碰撞造山带均发育造山型成矿省,且大规模成矿时间同步于或略晚于陆陆碰撞造山作用^[14,63],显然,这类造山型矿床无法用 Groves 等人的增生型造山-成矿模式所能解释。

4.4 造山带构造演化与大规模成矿——3 阶段成矿模式

前面分别讨论了矿床、矿田和成矿省尺度的成矿模式,这些模式都是在着重于分析成矿机理和发育空间的基础上而建立的,可以较好地用于指导不同尺度的矿床评价和成矿预测,是寻找大型、超大型矿床、矿田和成矿省的重要理论依据。然而,对于任何一个造山型成矿省、矿田或单个矿床的矿区而言,其地球动力学背景都是随时间而改变的,而造山型成矿系统却是在特定的地球动力学环境中发育的,并随地球动力学环境的演化而发生、发展和消亡。因此,在造山带漫长

的地质演化过程中,厘定出最有利的大规模成矿时间,对于区域性成矿预测和找矿评价,也是至关重要的科学依据。

前已述及,目前已知造山型成矿省发育在两类构造环境,即增生型造山带和大陆碰撞造山带,两类造山带的共同特点是:(1)地壳和岩石圈加厚,主要的加厚机制是挤压背景下的地体或大陆壳碎块之间的推覆叠置、走滑挤出、陆内俯冲等;(2)复杂的造山带演化过程总可分解为 3 个阶段(图 6),即早阶段挤压隆升,地壳加厚和温度梯度增高,中阶段挤压向伸展转变,地壳热隆升,晚阶段伸展,地壳和岩石圈减薄以及热异常消退。根据这些共同特征,笔者提出了造山型矿床及相关类型矿床成矿作用和岩浆作用演化的 3 阶段模式(图 6)。

值得指出的是,该 3 阶段模式在矿床尺度^[37-38]、矿田(地体)尺度^[2-3]和成矿省尺度^[14-19](图 6)均有具体表现,并由物理化学原理将大规模成矿时间限定在挤压向伸展转变体制。在同位素年代学方面,“成矿年龄晚于造山作用”或晚于同造山花岗岩活动,至少应滞后于地体与大陆之间或大陆与大陆之间的洋盆闭合时间。因此,再次强调,“成矿年龄滞后”现象是造山成矿和造山型矿床的典型特征或标志;根据“成矿年龄滞后”而否定造山过程中成矿或否定造山型矿床的观点是

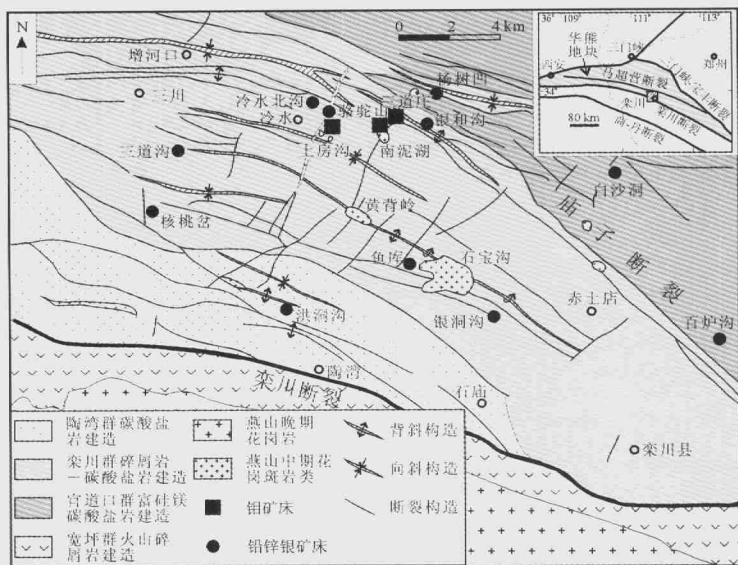


图 7 河南冷水北沟铅锌银矿床区域地质简图^[6]

Fig.7 Regional geology of the Lengshuibeiou Pb-Zn-Ag deposit, Henan^[6]

错误的,根源在于不了解成矿系统发育的过程和特征,尤其是忽视了中高级变质系统、岩浆系统的封闭温度(>550℃)与造山型矿床等热液矿床封闭温度(<200℃)的显著差异,而封闭温度的差异在区域性造山背景可以导致很大范围的“时钟”起始计时的差异。

5 造山型矿床实例

造山型矿床存在与否,其特征是否与前述一系列成矿模式吻合,是判别模式正确与否的标志,也是判别造山型矿床概念之必要性的依据。造山型金矿的实例已有大量报道,一定程度上证明了造山型矿床概念及其成矿模式的科学性和必要性。

5.1 造山型银矿

最近,河南省的东秦岭地区发现了一批造山型银矿(伴生铅锌、金、铜),已确定达到大型规模的造山型银矿床有洛宁县铁炉坪、沙沟(据姚公一口头介绍,银储量>2 000 t,铅锌储量>50 万 t),卢氏徐家湾矿床,栾川县赤土点、冷水北沟(银资源量>8 000 t,铅锌资源量>300 万 t)、百炉沟(祁进平, 2006)、土地庙沟、内乡县银洞沟矿床,桐柏县破山银矿床。此外,达到中型规模的造山型银矿床有洛宁县葛坪沟矿床和桐柏县银洞岭银矿。这些矿床分布于华北克拉通南缘的熊耳山金银矿田、熊耳火山弧的卢氏—栾川中元古代弧前盆地、中元古代的宽坪增生地体、新元古代的二郎坪地体等不同构造单元。其中,铁炉坪、破山、银洞沟等矿床的详细研究结果已有报道^[23,24],本文不再重复。

5.2 造山型铅锌矿

关于造山型铅锌矿床的实例尚无报道。笔者认为,过去报道的一些密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床中,可能部分属于造山型。以下简单介绍河南栾川冷水北沟矿床^[25]。

冷水北沟铅锌银矿床位于东秦岭栾川断裂北侧(图7),矿床赋存于中—新元古代浅变质碎屑岩建造中,受断裂控制,矿体呈脉状。矿石主要由金属硫化物,少量石英和碳酸盐组成,围岩蚀变和成矿过程分为4个阶段,以石英—黄铁矿组合(I阶段)、黄铁矿—闪锌矿组合(II阶段)、多金属硫化物(III阶段)和碳酸盐(IV阶段)为标志。包裹体研究表明,成矿流体为含CH₄的碳水体系,盐度(NaCl)为0.22%~13.8%。从早到晚,流体包裹体均一温度为420°~340℃(I)、370°~280℃(II)、320°~260℃(III)和<260℃(IV)。I、II阶段的流体盐度(NaCl)低于8%,III阶段流体盐度(NaCl)增高至13.8%,甚至偶见子晶。I、II阶段的流体包裹体均一压力分为两组,即180~200 MPa和70~80 MPa,代表着深约8 km的静水与静岩压力系统的共存或交替;III阶段只有70~80 MPa一组压力,指示开放环境注入的静水压力体系。I、II阶段静岩与静水压力系统的交替现象完全吻合于断层阀模式,含CH₄的CO₂-H₂O流体的脉动沸腾消耗了流体成矿系统热能,并使盐度不断增加,成矿。成矿II阶段广泛存在沸腾流体包裹体组合(图8),

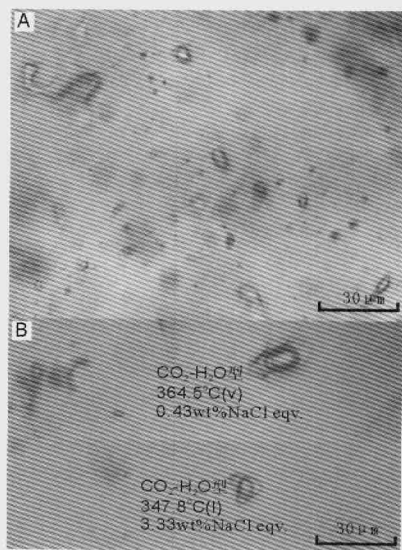


图8 冷水北沟II阶段石英中沸腾包裹体群^[25]

A—充填度变化较大的沸腾包裹体群;
B—异相均一的CO₂-H₂O型包裹体

Fig.8 Fluid inclusion populations showing fluid boiling in stage II quartz of the Lengshuibeiou deposit^[25]

A—Fluid inclusions with contrasting filling ratios, implying fluid boiling;
B—Allophased homogeneous CO₂-H₂O fluid inclusions with different homogenization ways at similar temperatures

也证明流体沸腾现象的存在。以上表明,冷水北沟是一个典型的形成于碰撞造山挤压向伸展转变期的造山型 Pb—Zn—Ag 矿床实例。

5.3 造山型铜矿

铜矿床的资源类型主要为斑岩型、矽卡岩型、VMS型、矽岩型、铜镍硫化物型铜矿床,脉状铜矿床基本被忽视,而造山型铜矿存在与否更无人涉及。然而,笔者在考查内蒙古白乃庙大型铜矿(伴生金和钼)、陕西铜厂大型铜矿和河南竹园沟铜矿点时,注意到这些矿床的地质特征与造山型金矿几乎完全一致,其主要矿石类型为石英脉—硫化物型,且石英脉构造变形、破碎强烈,黄铜矿等多金属硫化物则沿石英脉中的构造裂隙或石英脉角砾之间的孔隙充填、胶结(图9),截然不同VMS型铜矿和斑岩型铜矿床,认为它们可能属于造山型矿床。此外,云南雪鸡坪铜矿床被作为典型的斑岩型成矿系统,但其高品位矿石是石英脉型,石英脉型矿石具有造

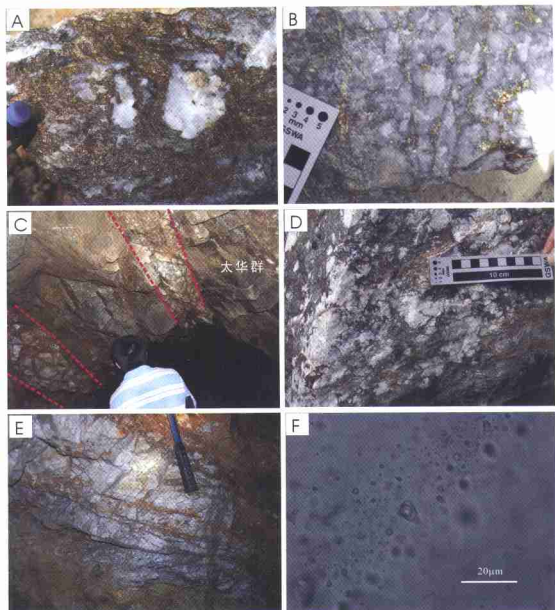


图9 造山型铜矿床和钼矿床地质和流体包裹体特征

A—陕西铜厂铜矿, 早阶段石英脉角砾被中阶段黄铜矿等硫化物充填胶结; B—云南雪鸡坪铜矿, 中阶段黄铜矿等硫化物沿石英脉共轴裂隙充填胶结; C—河南竹园沟铜矿, 构造破碎的含铜石英脉被太华群高级变质岩; D—内蒙古白乃庙铜矿, 黄铜矿等胶结角砾化的石英脉, 并被棕色碳酸盐脉穿切; E—河南纸房铜矿床, 含辉钼矿(铅灰色)石英脉贯入熊耳群火山岩, 石英脉破碎; F—河南大湖金钼矿床, 含辉钼矿石英脉之石英矿物中的富 CO_2 三相包裹体

Fig.9 Geology and fluid inclusions of orogenic Cu or Mo deposits

A—Tongchang Cu deposit, Shaanxi: filling and cementing of early-stage quartz-vein fragments by middle-stage sulfides such as chalcopyrite; B—Xuejiping Cu deposit, Yunnan: filling and cementing of coaxial fissures by middle-stage sulfides such as chalcopyrite along quartz veins; C—Zhuyuangou Cu deposit, Henan: injection of structurally fractured Cu-bearing quartz veins into high-grade metamorphic rocks of the Early Cambrian Taihua Group; D—Bainaimiao Cu deposit, Inner Mongolia: cutting of chalcopyrite-cemented and brecciated quartz veins by brown carbonate veins; E—Zhihang Mo deposit, Henan: injection of molybdenite (lead gray)-bearing quartz veins into volcanic rocks of the Xiong'er Group and fracturing of quartz veins; F—Dahu Au-Mo deposit, Henan: CO_2 -rich three-phase inclusions in quartz of molybdenite quartz veins

山型金矿系统的特征(图9-B),同样显示了造山型成矿作用的叠加。另据顾连兴等^[4]研究,辽宁红透山VMS型铜矿床的后期叠加成矿作用强烈,富矿体也属石英脉型,且与造山型金矿特征类似。鉴于上述,笔者认为造山型铜矿可能在大陆碰撞造山带具有一定的广泛性,只是过去对这些矿床的成矿作用特征未能正确认识,现以内蒙古白乃庙铜矿为例,予以简单说明^[4]。

内蒙古白乃庙铜矿床位于中亚造山带东段,索伦缝合带以南,是中国著名的大型铜矿之一,前人曾进行了大量研究,先后提出了斑岩型、VMS型、火山热液型、火山热液型-改造型、斑岩型-火山热液型的复合型等多种观点^[4]。事实上,如此多的成因观点和分歧已暗示该矿床与典型斑岩型、VMS型成矿系统存在显著差异,应考虑其为矿床新类型。前人的研究和笔者的多次野外考查表明,矿床受EW向或NW向断裂构造控制,矿石主要为石英脉型和构造蚀变岩型。成矿过程分为3个阶段:早阶段矿物组合为石英-黄铁矿,因遭受强烈构造作用而变形、破碎,部分呈构造角砾;中阶段多金属硫化物(伴少量石英)充填于早阶段石英脉的构造裂隙或角砾的间隙中,未见变形、破碎;晚阶段石英碳酸盐脉穿切早、中阶段脉体和矿物。铜矿化主要发生在中阶段,即多金属硫化物阶段。

据李文博^[4]研究,矿床流体包裹体类型有纯液相、富液相、富气相、纯气相、CO₂三相和含子晶等多类包裹体。从早到晚,包裹体均一温度变化于400~140℃,成矿系统的初始温度较高;富液相包裹体的均一温度和盐度逐渐降低,而且,早阶段矿物中的次生包裹体的均一温度和盐度与中阶段矿物中原生包裹体相似,表明早阶段石英矿物受到中阶段流体作用叠加。相邻的富气相包裹体异相均一,均一温度相近,纯气相和纯液相包裹体在空间上与硫化物关系密切,几乎所有的CO₂三相包裹体向气相均一,表明成矿流体发生了以CO₂

逸失为特征的沸腾作用。激光拉曼测试显示,白乃庙铜矿床流体包裹体的气相成分主要为CO₂、CH₄和N₂;纯液相包裹体成分主要为水溶液,个别为液态CO₂;纯气相包裹体成分为CO₂、CH₄、N₂和H₂O或其混合物。

以上表明,白乃庙铜矿床地质特征和成矿流体特征与造山型矿床特征完全一致,表明为造山型铜金矿床。

5.4 造山型铜矿

斑岩型(砂卡岩型)矿床是最主要的铜矿资源,倍受地质学者和勘查学家重视,而脉状铜矿床的实例则鲜见报道,更无人研究造山型铜矿床了。但是,按照前面的成矿模式和元素地球化学行为的分析,发现具有重要经济价值的造山型铜矿也是可能的。受这一学术思路的引领,笔者考查了河南东秦岭地区新近发现的一批铜矿床(点),发现其中不少矿床属于典型的断裂构造控制的脉状矿床,例如,方城县土门董石英脉-构造蚀变岩型铜矿床,西峡县天宝寨石英脉型铜矿点,嵩县纸房石英脉型铜矿床(图9-E),洛宁县寨凹石英脉-构造蚀变岩型铜矿床,灵宝县大湖石英脉型铜矿床。同样,这些矿床的地质特征与脉状造山型金矿类似,可能属于造山型。为证明造山型铜矿的存在,笔者首先解剖了大湖矿床,原因在于该矿床与大湖造山型金矿属于同一条石英脉,只是造山型金矿在浅部,铜矿在深部。

小秦岭是国内外学者共识的造山型金矿田^[5],大湖铜-金矿床位于小秦岭地体的最北缘,毗邻文峪花岗岩体(图10)。据李诺对流体包裹体的初步研究(图9-F,未刊资料),成矿过程同样分为3个阶段,早阶段形成石英脉,中阶段为辉钼矿-硫化物网脉,晚阶段为石英-碳酸盐网脉。早阶段流体包裹体主要为纯CO₂单相或两相包裹体,少量富CO₂三相包裹体,中阶段为富CO₂三相包裹体和含子晶包裹体,晚阶段全部为水溶液包裹体。晚阶段水溶液包裹体的均一温度为248~251℃,而早、中阶段的包裹体在均一之前爆裂,爆裂

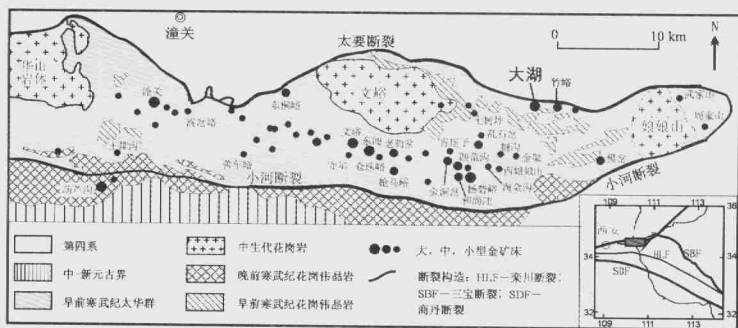


图10 小秦岭造山型金矿田地质和大湖金铜矿床地质背景

Fig.10 Geology of the Xiaolingling orogenic Au field, showing the geological setting of the Dahu Au-Mo deposit

温度范围为 250~300℃,主要集中在 290~300℃。这些特征表明,大湖铜矿床的主成矿温度应高于 300℃,流体成矿系统具有深成带(hypozonal)造山型矿床的特征。

6 找矿思路和成矿预测实例

6.1 中国造山带地区的找矿思路

中国广泛发育大陆碰撞造山带,不少大陆碰撞造山带是由增生型造山带演变而来,不但碰撞和增生造山过程中可形成大量造山型矿床,而且碰撞前形成的一些其他类型的矿床,如 VMS 型、SEDEX 型、斑岩型、浅成低温热液型等矿床,也可在碰撞造山过程中重新改造、活化和重新就位,而形成造山型矿床,因此,中国具有寻找造山型矿床的巨大潜力,这要求中国地质工作者和地勘队伍拓宽和转变已有找矿思路。例如,国外很多大型、超大型斑岩铜矿产于岩浆弧环境,成矿时间与岩浆弧发育时间一致,中国众多大陆碰撞造山带也经历了岩浆弧发育过程,因此,中国地质工作者长期致力于寻找岩浆弧发育时期的斑岩铜矿,但收效甚微,迄今发现的岩浆弧时期的斑岩型矿床寥寥无几。造成这种局面的可能原因之一是,后期的陆陆碰撞造山作用破坏了原有的斑岩型等成矿系统,而被破坏的斑岩铜矿、VMS 铜锌矿床等转变为白乃庙、

雪鸡坪、铜厂、红透山(局部石英脉型富矿体)造山型铜矿床。因此,在中国大陆碰撞造山带地区,应按照前面建立的一系列造山型矿床的形成模式,高度重视寻找断脉状造山型铜矿。

6.2 成矿预测实例

根据具体地质环境拓宽找矿思路,按照成矿模式进行成矿预测,然后部署地质调查,是发现矿床和成矿省的有效途径。在前述不同尺度的造山型矿床成矿模式中,笔者特别推荐地体尺度的成矿模式(图 4)的科学性和实用价值。理由是:地体尺度的成矿模式与通常国内外部署的地质调查范围相当,或者与 1:5 万和 1:20 万地质图的面积极相当,易于实施地质矿产调查;成矿模式中的关键性地质体,如区域性断裂、大型剪切带、大型花岗岩基和含斑岩岩体等,也是地质工作者乐于和习惯于研究的对象;该模式明确标明了多类矿床的空间分带关系及其与重要地质体或醒目标志地质现象的配置关系,易于根据其中 1~2 种现象预测找矿靶区。更重要的是,依据该模式已经取得了找矿预测的成功,下面略举 2 个例子。

实例一——河南熊耳地体。地体尺度的造山成矿模式是基于熊耳山区的研究而提出^[9]。在 1990 年提出该模式之前,熊耳地体只有 3 个金矿(康山、上官、祁雨沟)和 1 个钼矿(雷门沟)(图 11)。在 1990 年提出成矿模式之后,熊耳地体发

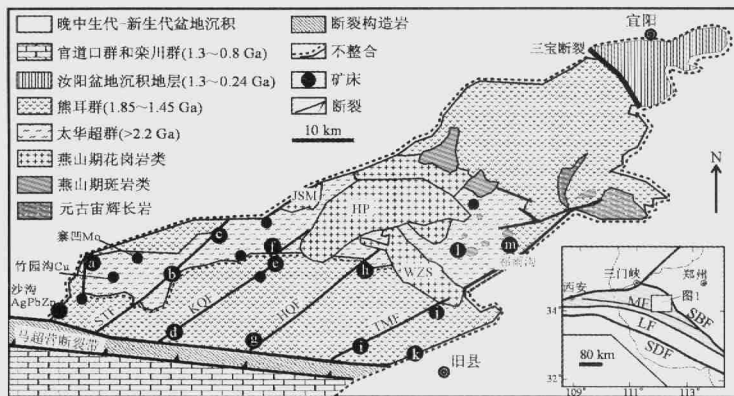


图 11 熊耳地体地质和矿床分布图

a—嵩坪沟银钼矿;b—铁炉坪银钼矿;c—小池沟金矿;d—康山金银铜矿;e—上官金矿;f—虎沟金矿;g—红庄金矿;h—青沟坪金矿;
i—潭头金矿;j—瑶沟金矿;k—前河金矿;l—雷门沟(金)矿;m—祁雨沟金矿;WSG—五丈山岩体;HSG—花山岩体;
JSM—金山庙断裂;KQF—三门—铁炉坪断裂;HQF—红庄—青沟坪断裂;TMF—陶村—马园断裂;
SBF—三岔断裂;SDF—商丹断裂;MF—马超营断裂;LF—栗川断裂

Fig.11 Map showing the geology and distribution of ore deposits in the Xiong'er terrane

a—Songpinggou Ag—Pb deposit;b—Tieluping Ag—Pb deposit;c—Xiaochigou Au deposit;d—Kangshan Au—Ag—Pb deposit;e—Shanggong Au deposit;
f—Hugou Au deposit;g—Hongzhuang Au deposit;h—Qinggangping Au deposit;i—Tantou Au deposit;j—Yaogou Au deposit;k—Qianhe Au deposit;
l—Leimengou Mo (-Au) deposit;m—Qiyugou Au deposit;WSG—Wuzhangshan intrusion;HSG—Huashan intrusion;
JSM—Jinshanmao STF—Sanmen—Tieluping fault;KQF—Kangshan—Qiliping fault;HQF—Hongzhuang—Qinggangping fault;
TMF—Taocun—Mayuan fault;SBF—Sanbao fault;SDF—Shangdan fault;MF—Macaoying fault;LF—Luanchuan fault

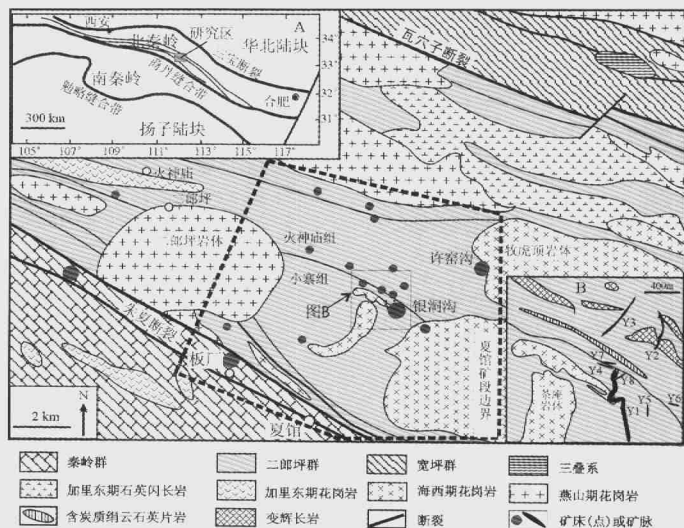


图 12 夏馆银金铅矿段地质产矿示意图(据参考文献[2,34,47]综合)

Fig.12 Geological map showing the ore occurrence of the Xiaoguan Ag-Au-Pb orefield (compiled after references [2, 34 and 47])

现了瑞沟等大中型金(银)矿 10 多处,大型银(铅锌)矿床 2 处、中型银铅矿床 1 处(图 11),各类金、银、钼、铜、铅锌矿点 100 多处。而且,所有矿床的成因类型、分带规律甚至成矿元素组合变化特征等,均与成矿模式完全一致。不仅如此,当时根据脉状矿床、花岗岩基、斑岩-爆破角砾岩的定向排列,提出马超营断裂是倾向北的陆内俯冲带观点,现也被更详细的构造解析研究所证明,即张国伟等^[10]厘定其为“指向南的厚皮推覆构造”。

实例二——河南二郎坪岩体的夏馆银金铅矿带。陈衍景等^[3]根据对朱夏断裂带及其北侧的析子堂金矿、许溜沟等金矿点的研究,认为朱夏断裂是倾向北的陆内俯冲带,并运用地体尺度的碰撞造山成岩成矿与流体作用模式,预测朱夏断裂北侧依次发育断控热液矿床带(析子堂、许溜沟金矿为代表)、花岗岩基带(四棵树、二郎坪岩体为代表)和柴川—金堆城斑岩及其钼多金属成矿带。其中,断控热液矿床带自西向东依次发育“官坡锦矿段、双槐树—石门矿矿段、桑坪—米坪铜金多金属矿段、夏馆银金铅矿段和析子堂金银矿段”^[4](参考文献[2]中的图 4-5)。1999 年以来,仅在“夏馆银金铅矿段”内就发现了银洞沟大型银金铅矿床和板厂大型银矿床(图 12)^[34,47]。

7 结论

(1)造山型矿床主要发育在大陆碰撞造山带和增生型造山带,中国大陆碰撞造山带丰富,造山型金、银、铜、铅、钼等矿床的找矿潜力巨大。

(2)矿床、矿田和成矿省尺度的造山型矿床成矿模式及其随时间演化的 3 阶段模式是预测造山型矿床的重要理论依据。

(3)会聚造山作用的挤压伸展转变期是大规模成矿时间,同造山成矿系统的同位素年龄晚于造山年龄是造山型矿床的本质特征。因此,依据成矿年龄晚于赋矿地体或造山带的挤压造山年龄,将成矿与造山剥离的观点是片面而错误的。

致谢:研究工作得到涂光炽院士和翟裕生院士的指导,赖勇、李文博、张静、祁进平等博士和研究生廖梅、李诺、邓小华、张颖、陆丽娜等参与部分研究工作,野外考查得到张复新教授和赵太平研究员、河南有色地质勘查局、Phelps Dodge 公司、Noranda 鹰桥公司的帮助,流体包裹体的研究得到范宏瑞和倪培教授的帮助,特致谢意。

参考文献(References):

- [1] 涂光炽, 李朝阳. 浅议比较矿床学[J]. 地球化学, 2006,35:1-5.
Tu Guangzhi, Li Chaoyang. On comparative metallogeny [J]. Geochemica, 2006,35:1-5(in Chinese with English abstract).
- [2] 陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律[M]. 北京:地震出版社,1992. 234.
Chen Yanjing, Fu Shigu. Gold Mineralization in West Henan, China [M]. Beijing:Seismological Press, 1992.234 (in Chinese with English abstract).
- [3] 陈衍景, 隋颖慧, Pirajno F. 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[J]. 岩石学报, 2003,19(3): 551-568.
Chen Yanjing, Sui Yinghui, Pirajno F. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits:Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, east Qinling orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003,19 (3):551-568 (in Chinese with English abstract).
- [4] Chen Y J, Pirajno F, Sui Y H. Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, Henan, China:A case study of orogenic silver deposits and related tectonic setting [J]. Mineralium Deposita, 2004,39: 560-575.
- [5] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic gold deposits:a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. Ore Geology Reviews, 1998,13:7-27.
- [6] 陈衍景, 张静, 张复新, 等. 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J]. 地质论评, 2004,50:134-152.
Chen Yanjing, Zhang Jing, Zhang Fuxin, et al. Carlin and Carlin-Like gold deposits in Western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model [J]. Geological Reviews, 2004,50(2), 134-152(in Chinese with English abstract).
- [7] 杨荣生, 陈衍景, 张复新, 等. 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 [J]. 岩石学报, 2006,22 (10):2603-2610.
Yang Rongsheng, Chen Yanjing, Zhang Fuxin, et al. The chemical Th-U-Pb ages of monazite from the Yangshan gold deposit, Gansu Province and their geologic and metallogenic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006,22(10):2603-2610(in Chinese with English abstract).
- [8] Sillitoe R H. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits[J]. Economic Geology, 1972,67:184-197.
- [9] Heald P, Foley N K, Hayba D O. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits:acid sulphate and adularia-sericitic types[J]. Economic Geology, 1987,82:1-26.
- [10] Chen Y J, Bao J X, Zhang Z J, et al.. Laumontitization as exploration indicator of epithermal gold deposits: A case study of the Axi and other epithermal systems in West Tianshan, China[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2003,22(4):289-303.
- [11] 祁进平, 陈衍景, Pirajno F. 东北地区浅成低温热液矿床的地质特征和构造背景[J]. 矿物岩石, 2005,25(2):47-59.
Qi Jinping, Chen Yanjing, Pirajno F. Geological characteristics and tectonic setting of the epithermal deposits in the northeast China[J]. Journal of Mineralogy and Petrology (Kuangwu Yanshi), 2005,25 (2): 47-59(in Chinese with English abstract).
- [12] Meinert L D. Gold skarn deposits-Geology and exploration criteria [J]. Economic Geology, 1989, Monograph 6:537-552.
- [13] 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 等. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京:地质出版社, 1990:354.
Zhao Yiming, Lin Wenwei, Bi Chengsi, et al. Skarn Deposits of China [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1990:354 (in Chinese).
- [14] 陈衍景, 陈华勇, Zaw K, 等. 中国陆区大规模成矿的地球动力学:以矽卡岩型金矿为例[J]. 地学前缘, 2004,11:57-83.
Chen Yanjing, Chen Huayong, Zaw K, et al. The geodynamic setting of large-scale metallogenesis in mainland China, exemplified by skarn type gold deposits [J]. Earth Science Frontiers, 2004,11: 57-83(in Chinese with English abstract).
- [15] Kerrich R, Goldfarb R J, Richards J P. Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework [J]. Economic Geology, 2005, 100 th Anniversary Volume, 1097-1136.
- [16] Groves D I, Beirlein F P. Geodynamic settings of mineral deposit systems [J]. Journal of the Geological Society, London, 2007,164: 19-30.
- [17] Kerrich R, Goldfarb R J, Groves D I, et al. The characteristics, origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces[J]. Science in China (Series D), 2000,43 (supp.):1-68.
- [18] 陈衍景, 赖勇, 李文博. 矿床是大陆动力学研究的理想探针[A]. 见:陈骏主编. 地质与地球化学研究进展[C]. 南京:南京大学出版社, 2006.279-284.
Chen Yanjing, Lai Yong, Li Wenbo. Ore deposits: the probe to continental geodynamics [A]. In:Chen Jun (ed.). Progresses in Geological and Geochemical Studies [C]. Nanjing:Nanjing University Press, 2006.279-284(in Chinese).
- [19] Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. Orogenic gold and geologic time:a global synthesis[J]. Ore Geology Reviews, 2001, 18:1-75.
- [20] Hodgson C J, and MacGeehan P J. A review of the geological characteristics of "gold only" deposits in the Superior Province of the Canadian Shield [A]. In:Geology of Canadian Gold Deposits: Canadian Institute of Mining and Metallogeny Special Paper 24[C]. 1982,211-229.
- [21] Kerrich R. Nature's gold factory [J]. Science, 2000, 284:2101-2102.
- [22] Zhou T H, Goldfarb R J, Phillips G N. Tectonics and distribution of gold deposits in China-an overview [J]. Mineralium Deposita, 2002, 37:249-282.

- [23] Hagemann S G, Luders V. P-T-X conditions of hydrothermal fluids and precipitation mechanism of stibnite-gold mineralization at the Wiluna lode-gold deposits, Western Australia: conventional and infrared microthermometric constraints [J]. *Mineralium Deposita*, 2003,38:936-952.
- [24] 陈华勇, 陈衍景, 倪培, 等. 南天山萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体研究[J]. *矿物岩石*, 2004,24(3):46-54.
Chen Huayong, Chen Yanjing, Ni Pei, et al. Fluid inclusion study of the Sawayardun Au deposit in southern Tianshan, China: implication for ore genesis and exploration [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology (Kuangwu Yanshi)*, 2004,24 (3):46-54 (in Chinese with English abstract).
- [25] 王海华, 陈衍景, 高秀丽. 河南康山金矿同位素地球化学及其对 CPMF 模式的例证[J]. *矿床地质*, 2001,20(2):190-198.
Wang Haihua, Chen Yanjing, Gao Xiuli. The isotope geochemistry of the Kangshan gold deposit, Henan and its illustration of the CPMF model [J]. *Mineral Deposit*, 2001,20(2):190-198(in Chinese with English abstract).
- [26] Chen Y J, Pirajno F, Qi J P, et al. Ore geology, fluid geochemistry and genesis of the Shangong gold deposit, eastern Qinling Orogen, China[J]. *Resource Geology*, 2006,56(2):99-116.
- [27] 张静, 陈衍景, 陈华勇, 等. 河南省桐柏县银洞坡金矿床同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 2006,22(10):2551-2560.
Zhang Jing, Chen Yanjing, Chen Huanyong, et al. Isotope geochemistry of the Yindongpo gold deposit, Tongbai County, Henan Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006,22(10):2551-2560(in Chinese with English abstract).
- [28] Chen Y J, Zhao T P, Deng J, et al. Genetic type and metallogenic mechanism of Bankuan gold deposit in special reference to the studies of fluid inclusions and isotopes in minerals [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1994,13(1):73-84.
- [29] Yeats C J, McNaughton N J, Ruettger D, et al. Evidence for diachronous Archean lode gold mineralization in the Yilgarn craton, Western Australia: a SHRIMP U-Pb study of intrusive rocks[J]. *Economic Geology*, 1999,94:1259-1276.
- [30] Kerrich R, Cassidy K F. Temporal relationships of lode gold mineralization to accretion, magmatism, metamorphism and deformation-Archean to present-a review [J]. *Ore Geology Review*, 1994,9:263-310.
- [31] Qiu Y, Groves D I. Late Archean collision and delamination in the southwest Yilgarn craton: the driving force for Archean orogenic lode gold mineralization[J]. *Economic Geology*, 1999,94:115-122.
- [32] Gu L X, Zheng Y C, Tang X Q, et al. Copper, gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan VHMS deposit, N.E. China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007,30:1-29.
- [33] Chen Y J, Pirajno F, Sui Y H. Geology and D-O-C isotope systematics of the Tieluping silver deposit, Henan, China: Implications for ore genesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005,9:106-119.
- [34] 张静, 陈衍景, 李国平, 等. 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[J]. *矿物岩石*, 2004,24(3):55-64.
Zhang Jing, Chen Yanjing, Li Guoping, et al. Characteristics of ore geology and fluid inclusion of the Yindonggou silver deposit, Neixiang county, Henan Province: implication for metallogenic type [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology (Kuangwu Yanshi)*, 2004,24(3):55-64(in Chinese with English abstract).
- [35] Li W B, Chen Y J, Lai Y. The Bainaimiao Cu deposit in Inner Mongolia, China: A possible orogenic-type Cu deposit [C]. In: Mao J W and Bierlein F P (eds). *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. Springer, Berlin, 2005.1321-1322.
- [36] 祁进平. 河南栾川地区脉状铅锌银矿床地质地球化学特征及成因[D]. 北京大学博士论文, 2006,1-129.
Qi Jinping. Geology, Geochemistry and Genesis of Vein-type Lead-zinc-silver Deposits in Luanchuan, Henan [D]. Ph.D dissertation, 2006,1-129.
- [37] 陈衍景, 林治家, Pirajno F, 等. 东秦岭上宫金矿流体成矿作用: 稳定同位素地球化学研究结果[J]. *矿物岩石*, 2004,24(3):13-21.
Chen Yanjing, Lin Zhijia, Pirajno F, et al. Hydrothermal metallogeny of the Shangong gold deposit: study on the stable isotope geochemistry [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology (Kuangwu Yanshi)*, 2004,24 (3):13-21 (in Chinese with English abstract).
- [38] 李晶, 陈衍景, 刘迎新. 华北克拉通若干脉状金矿的黄铁矿标型特征与流体成矿过程[J]. *矿物岩石*, 2004,24(3):93-102.
Li Jing, Chen Yanjing, Liu Yingxin. Typomorphic characteristics of pyrite from lode gold deposits in North China craton: implications for fluid mineralization [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology (Kuangwu Yanshi)*, 2004,24(3):93-102 (in Chinese with English abstract).
- [39] 陈衍景, 王海华, 陈华勇, 等. 碰撞造山体制的流体作用与矿床、花岗岩的空间分带[C]. 见: 陈毓川(主编). *当代矿产资源勘查评价的理论与方法*. 北京: 地震出版社, 1999,97-107.
Chen Yanjing, Wang Haihua, Chen Huayong, et al. Fluidization during continental collision and related zonal distribution of mineral deposits and granitoids [C]. In: Yuchuan Chen (ed.). *Current Theory and Methodology of Exploration for Mineral Resources*. Beijing: Seismological Press, 1999,97-107.
- [40] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学(3)[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
Tu Guangzhi (ed.). *Geochemistry of the Stratabound Deposits in China Volume 3*[M]. Beijing: Science Press, 1987 (in Chinese).
- [41] Chen Y J, Pirajno F, Qi J P. Origin of gold metallogeny and sources of ore-forming fluids, in the Jiaodong province, eastern China[J]. *International Geology Review*, 2005,47:530-549.
- [42] Pirajno F, Chen Y J. Hydrothermal ore systems associated with the extensional collapse of collision orogens [C]. In: Mao J W and

- Bierlein F P (eds). Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Springer, Berlin, 2005. 1045-1048.
- [43] Pirajno F, Chen Y J, Xiao W J. Hydrothermal ore systems associated with the collapse of orogens - key examples from eastern, central and northwestern China [C]. Extended Abstracts of 12th Quadrennial IAGOD Symposium. Moscow, 21-24 August 2006, 53-56.
- [44] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力[J]. 中国地质, 2006, 33: 221-238.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. The Qinghai-Tibet plateau and continental dynamics: A review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and processes and mechanisms for the rise of the plateau[J]. Geology in China, 2006, 33(2): 221-238 (in Chinese with English abstract).
- [45] 陈衍景. 中国西北地区中亚型造山—成矿作用的研究意义和进展[J]. 高校地质学报, 2000, 6(1): 17-22.
- Chen Yanjing. Progress in the study of Central Asia-type orogenesis-metallogenesis in Northwest China [J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6 (1): 17-22 (in Chinese with English abstract).
- [46] 侯增谦, 莫宜学, 杨志明, 等. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型[J]. 中国地质, 2006, 33: 340-351.
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Yang Zhiming, et al. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types[J]. Geology in China, 2006, 33(2): 340-351 (in Chinese with English abstract).
- [47] 张静, 燕光谱, 叶霖, 等. 河南内乡县银洞沟银多金属矿床碳—氢—氧同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2005, 21(5): 1359-1364.
- Zhang Jing, Yan Guangpu, Ye Lin, et al. The C-H-O isotope systematics of the Yindonggou Ag-dominated poly-metals deposit in the Neixiang county, Henan province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(5): 1359-1364 (in Chinese with English abstract).
- [48] 李文博. 内蒙古白乃庙铜矿床成矿流体系统研究 [R]. 北京大学博士后研究报告, 2006.
- Li Wenbo. Study of the Ore Fluid System of the Bainaimiao Copper Deposit, Inner Mongolia [R]. Research Report of Postdoctor, Peking University. 2006.
- [49] 祁进平, 赖勇, 任康绪, 等. 小秦岭金矿田成因的铍同位素约束[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2543-2550.
- Qi Jinping, Lai Yong, Ren Kangxu, et al. Sr-isotope constraint on the origin of the Xiaolinling gold field [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22: 2543-2550 (in Chinese with English abstract).
- [50] 陈衍景, 富士谷, 陈泽铭, 等. 河南省金矿成矿构造模式[J]. 河南地质情报, 1990, 2: 9-14.
- Chen Yangjing, Fu Shigu, Chen Zeming. Tectonic model for metallogenesis of gold deposits in Henan Province [J]. Geological Information of Henan, 1990, 2: 9-14 (in Chinese with English abstract).
- [51] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 1-855.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001. 1-855 (in Chinese).

Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential

CHEN Yan-Jing^{1,2}

(1. KLMD, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640 Guangdong, China;

2. Open Laboratory of Crust and Orogen Evolution, Department of Geology, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: Identification of a new type mineralization often leads to discovery of a great number of ore deposits and ore provinces. Predicting and identifying new type mineralizations is an important aim of ore deposit study. To date the majority of orogenic-type gold deposits has been well shown by worldwide studies. However, the other commodities of orogenic-type are rarely discussed. This paper addresses the concept of orogenic-type deposits which formed by fluid systems mainly sourced from metamorphic devolatilization. The paper also develops genetic models for orogenic deposits at various scales, including deposit-, orefield/terrain- and province/orogen-scales. The genetic models are linked to a three-stage tectonic evolution of convergent orogens. According to these models, the transition from compression to extension of thickened accretionary or/and collisional orogens is conducive to mineralizations; and the syn-orogenic ore-systems must be characteristically lagged behind compressional orogenesis. As case studies, orogenic-type silver, lead-zinc, molybdenum and copper deposits are reported in the paper. This implies that China has great potential for orogenic-type deposits. The logics and validity of the metallogenic models are evidenced by introduction of several successful ore deposit prediction.

Key words: orogenic-type gold deposit; orogenic-type deposit; accretionary orogeny; collisional orogeny; metallogenic model

About the author: CHEN Yan-Jing, male, born in 1962, received Ph.D in Nanjing University, and now a professor with both Guangzhou Institute of Geochemistry (CAS) and Peking University. His research interests include regional metallogeny and geology and geochemistry of ore deposits; E-mail: yjchen@pku.edu.cn.