

大陆碰撞成矿理论的创建及应用*

陈衍景^{1,2}

CHEN YanJing^{1,2}

1. 北京大学 造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871

2. 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

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

2. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2012-10-01 收稿, 2013-01-16 改回.

Chen YJ. 2013. The development of continental collision metallogeny and its application. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 1-17

Abstract The importance of the continental collision metallogeny is addressed in this paper. The development history of the continental collision metallogeny is divided into five periods, namely, preparation (before 1970), incubation (1971 ~ 1990), birth (1991 ~ 2000), growth (2001 ~ 2010) and maturation (2011 and thereafter). The hardcore of the continental collision metallogeny is considered to include four tectonic models for Collisional orogeny, Metallogeny and Fluid flow (abbreviated to CMF) at differing scales (global tectonics, orogen, terrane and deposit). It also contains the characterizations of four classes of hydrothermal mineral systems formed in continental collision regime as well as their comparative illustrations with the mineral systems formed in other tectonic settings. The paper also introduces several successful ore-exploration examples guided by the continental collision metallogeny. The facts presented in the paper show that Chinese geologists have contributed much to the development of the continental collision metallogeny, by utilizing the unique conditions of abundant continental collision orogens in China.

Key words Continental collision metallogeny; Tectonic model for Collisional orogeny, Metallogeny and Fluid flow (CMF model); Hydrothermal mineral system; Epizonogenism; Ore exploration

摘要 本文阐明了大陆碰撞成矿理论的重要性, 将大陆碰撞成矿理论的发展史划分为 1970 年以前的预备期, 1971 ~ 1990 年的孕育期, 1991 ~ 2000 年的诞生期, 2001 ~ 2010 年的成长期和 2011 年以后的成熟期; 指出大陆碰撞成矿理论的核心内容是 4 个不同尺度(全球构造、造山带、地体、矿床)的碰撞造山流体成矿模式(CMF 模式)和 4 种类型成矿系统的特征及其与其它环境同类成矿系统的对比; 介绍了运用大陆碰撞成矿理论指导找矿预测的成功范例。事实证明, 中国学者发挥中国碰撞造山带丰富的自然优势, 为发展大陆碰撞成矿理论做出了重大贡献。

关键词 大陆碰撞成矿理论; 碰撞造山流体成矿模式; 热液矿床; 浅成作用; 找矿勘查

中图法分类号 P611

我国大陆碰撞造山带丰富、典型、宏伟和复杂, 大陆碰撞成矿理论是我国地质矿产勘查的重大需求。大陆碰撞是四种类型的板块边界之一, 包括了板块演化 Wilson 旋回六个阶段中的最后两个, 但《板块构造》、《矿床学》和《区域成矿学》等教材长期缺乏对大陆碰撞成矿作用的阐述, 是学科发展之不足(Chen *et al.*, 2000)。因此, 大陆碰撞成矿理论是学科

发展的必需。

大陆碰撞成矿作用研究始于 1971 年, 至今已 40 多年, 经历了由“碰撞不成矿”(Guild, 1971)到“碰撞成矿”的艰难过程, 形成了日趋成熟的大陆碰撞成矿理论。笔者幸运地在 1984 年就注意大陆碰撞成矿作用的重要性, 从此开始了至今已达 30 年的大陆碰撞成矿理论研究(后述), 所提出的碰撞

* 本文受国家 973 计划项目(2006CB403500)、国家攀登预研 39 号项目 02 课题、国家科技攻关计划 96-915-03-05 专题、国家自然科学基金项目(40730421、40425006、U1139301)和国家危机矿山项目(20089934)联合资助。

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

造山成岩成矿与流体作用模式被称为“陈氏 CMF 模式”编入国内外矿床教材 (Pirajno, 2009; 翟裕生等, 2011)。这使笔者有义务介绍大陆碰撞成矿理论的研究进展及其应用成绩。

笔者于 1992 年在《豫西金矿成矿规律》(第 187 页)中写到:“可以预言,正如 60 年代对大陆边缘的地质研究高潮和突破导致 70 年代环太平洋地区找矿热潮和斑岩矿床成矿模式的诞生一样,80 年代对碰撞造山带的地质研究的热潮和突破势必导致 90 年代对碰撞造山带地区成岩成矿研究的热潮和突破。此外,在全球范围内,我国拥有最典型和最多的碰撞型造山带,是研究碰撞造山过程成岩成矿作用的最佳场所,为我国学者在板块构造研究领域取得领先于国际水平的成果提供了良好的条件。据此,作者近年研究了这一问题,尝试性地建立了碰撞造山带成岩成矿模式(陈衍景等,1990,1991),用于说明碰撞造山带地区的热液矿床和大陆内部远离 B 型俯冲带的斑岩矿床的成因”。现在看来,关于大陆碰撞成矿研究的进展和历史业已证明了 20 年前对学科发展把握的准确性,鼓励笔者回顾大陆碰撞成矿理论的发展历史,再次展望未来这一领域的研究态势和问题。

本文重点介绍大陆碰撞成矿理论的发展历史、核心内容和找矿应用实例。

1 大陆碰撞成矿理论的重要性

1.1 多学科的空白点或薄弱环节

众所周知,板块构造理论是现代固体地球科学的最基本理论,她科学地阐明了岩石圈结构和岩石圈块体运动、变形的规律(李春昱等,1986),其核心内容包括:(1)确立了岩石圈板块划分的 4 类边界(洋中脊、海沟、碰撞缝合带和转换断层)及板块边缘地质作用特征和差异,特别是截然不同的运动学方式或应力特点(拉张离散、剪切俯冲、挤压碰撞和转换

走滑),划分了若干板块;(2)通过剖析洋盆的发展演化历史,建立了岩石圈板块及其边界发展演化的 6 阶段 Wilson 旋回,即东非期(大陆裂谷)、红海期(大洋裂谷)、大西洋(洋中脊快速扩张)、太平洋期(洋中隆慢速扩张)、地中海期(残留海,大洋俯冲向大陆碰撞转换,且二者同时存在)、喜马拉雅-阿尔卑斯(大陆碰撞),准确而全面地刻画了现今全球构造格局和构造作用特点;(3)明确了软流圈对流(含地幔柱活动)是岩石圈板块运动的主要机制,阐明了岩石圈板块运动的规律和派生现象,特别是地质历史中的超大陆旋回以及相关重大地质、环境、气候和生命演化事件。

板块构造理论的成功之处还表现于:(1)促进了地球科学与其他自然科学之间的交叉渗透,融现代观测技术、高温高压实验和地质理论模拟于一体,使地球科学成为现代自然科学体系的重要组成部分;(2)支撑了地球科学各分支学科快速发展,并在地质学分支学科发展中得到检验和完善。例如,板块构造理论与地震学、火山学、岩石学等学科结合,成功解释了全球 3 大地震带的空间分布和震源机制,环太平洋火山带成因,推动了大陆内部蛇绿岩套、安山岩套、双变质带、超高压榴辉岩带、蓝片岩带等的发现。在矿床学领域,近 40 年提出的重要成矿模式,如斑岩铜矿成矿构造模式、铜镍硫化物矿床构造成矿模式、绿岩带成矿模式、海底喷流成矿模式、造山型金矿的增生成矿模式,都是运用板块构造理论而获得的结果(图 1;陈衍景等,2008; Pirajno, 2009;及其引文)。然而,这些成矿模式都是针对离散和俯冲板块边界成矿作用而建立的,缺乏对大陆碰撞体制成矿作用的阐释。

在板块构造理论框架中,大陆碰撞是划分岩石圈板块的 4 种边界之一,是 Wilson 旋回 6 个阶段的最后 2 个,其重要性不言而喻。缺乏大陆碰撞成矿理论或相关成矿模式,制约着板块构造理论、矿床学、区域成矿学、矿床地球化学等诸多分支学科的发展和完善,自然是构造地质学家和矿床学家期

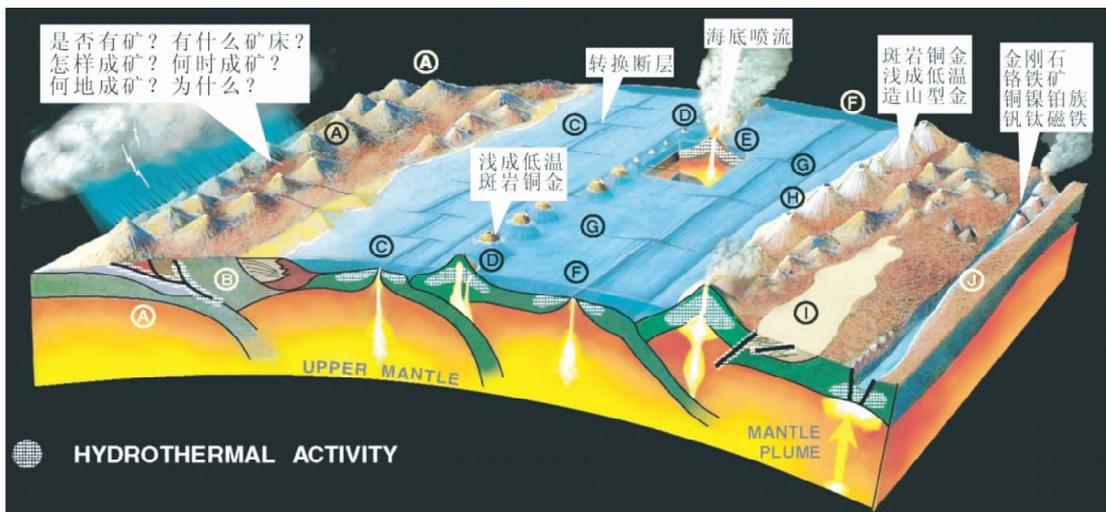


图 1 板块构造和成矿系统示意图(据 Pirajno, 2009 略有修改)

Fig. 1 Sketch showing plate tectonics and mineral systems (slightly modified after Pirajno, 2009)

待解决的重大问题。

1.2 找矿勘查急需的科学理论支撑

我国经济快速增长对矿产资源的需求急增,而探明资源保有量日趋减少,剪刀差日益加大,是制约经济可持续发展的瓶颈。同时,地表矿床越来越少,找矿目标转向隐伏或深部矿床,找矿难度加大,对于成矿理论和勘查技术的依赖程度增高。大量实例表明,以成矿模式为基础的多元信息综合分析和勘查是高效率找矿的最佳途径,而成矿模式的科学性和实用性则是关键。因此,科学而实用的成矿模式始终是矿床学及相关学科研究的核心内容,也是难度最大的科学问题。

大陆碰撞造山作用是大陆形成的最主要方式,全球各大陆广泛发育了不同时期的碰撞造山带。事实上,世界古老克拉通在很大程度上都是通过大陆增生-碰撞造山作用而形成的太古宙或元古宙的碰撞造山带(陈衍景和富士谷,1992)。在前寒武纪,至少存在 Kenorland、Columbia 和 Rodinia 等3次超大陆会聚事件,发生了3次全球性的大陆碰撞造山作用,伴随了强烈的成矿作用(Groves *et al.*, 1998; Kerrich *et al.*, 2000; Goldfarb *et al.*, 2001; Pirajno, 2009; Li *et al.*, 2011; Deng *et al.*, 2013a, b),尤其以造山型金矿床为代表(Goldfarb *et al.*, 2001)。在显生宙,伴随 Gondwana 和 Pangea 超大陆会聚,同样发生了十分强烈的大陆碰撞造山-成矿作用,形成于多条碰撞造山带和成矿带,而且地质和矿床记录更为丰富、完整,发育了多种类型的成矿系统,尤其以我国最具代表性。

值得强调,滨太平洋、古特提斯和古亚洲洋造山带是世

界三大全球性大陆造山带(马福臣等,1992;图2),均在我国发育,使我国成为显生宙大陆造山带最为发育的地区。其中,中亚造山带(古亚洲洋带)和古特提斯造山带是世界最大的两条碰撞型造山带,呈东西向横穿中国大陆地区,使我国大陆碰撞造山带最为宏伟和宽广,分别以帕米尔-喜马拉雅山脉和阿勒泰-天山地区为代表。华北克拉通、塔里木地块、阿拉善地块、柴达木地块、扬子地块等前寒武纪陆块被大陆碰撞造山带分隔包围,它们在显生宙碰撞造山过程中强烈活化,稳定性被破坏,似呈造山带内地体构造的特征。因此,在世界范围内,我国陆区的大陆碰撞造山作用最典型、最丰富、最强烈、最复杂。更重要的是,我国碰撞造山带内蕴藏丰富的金、银、铜、铅、锌、钨、钼、汞、锑等多种金属的热液矿床,与造山带耦合的盆地中蕴涵着我国主要的油气资源。

无疑,要正确认识和掌握上述碰撞造山带的成矿、成藏规律,有效地实施找矿勘查工作,就需要大陆碰撞成矿理论作为科学支撑。

2 大陆碰撞成矿理论发展的历史阶段性

陈衍景等(1999)、Chen *et al.* (2000)曾详细总结了20世纪大陆碰撞成矿研究的进展、问题和发展态势,特别罗列了国内外学者在1971~1999年期间取得的里程碑式的成果或进展,并藉此对大陆碰撞成矿作用研究划分为三个阶段,即:1970年以前的“预备阶段”,1971~1990年期间的“初级阶段”,1990年之后的高级阶段。其中,预备与初级阶段的划分标志是1970年板块构造理论的正式提出,初级与高级阶段的划分标志是1990年首次提出“碰撞造山成岩成矿与流体作用模式”(陈衍景等,1990)。

2010年,“大陆碰撞成矿理论及找矿应用”作为国家973项目“华北大陆边缘造山过程与成矿”的重要成果,被选为国家“十一五”973计划项目的重大成果而巡展。这标志着大陆碰撞成矿理论已趋成熟,也使作者有理由再次回顾大陆碰撞成矿理论的发展历史,展望未来的发展趋势。本文将大陆碰撞成矿理论的发生、发展划分为5个时期,即1970年之前的预备期,1971~1990年的孕育期,1991~2000年的诞生期,2001~2010年的成长期,2011年以后的成熟期。以下简称各时期的研究工作特点和取得的重大进展。

2.1 预备期(1970年以前)

在板块理论提出之前,有关成矿作用的研究工作是以槽台理论为指导的,该期研究工作的特点是描述,不可能将成矿作用与碰撞造山作用相联系。但是,科学家们已经较好地描述了大陆造山带内的成矿特点、矿床类型等,积累了较多的资料和经验。例如,我国地质前辈们基于秦岭、华南、燕山、三江等地的研究,提出了多旋回成矿和燕山期成矿等认识(如黄汲清,1979及其引文);基于华北、西伯利亚等地台区的构造-成矿研究,提出了地台活化和活化区成矿的学术

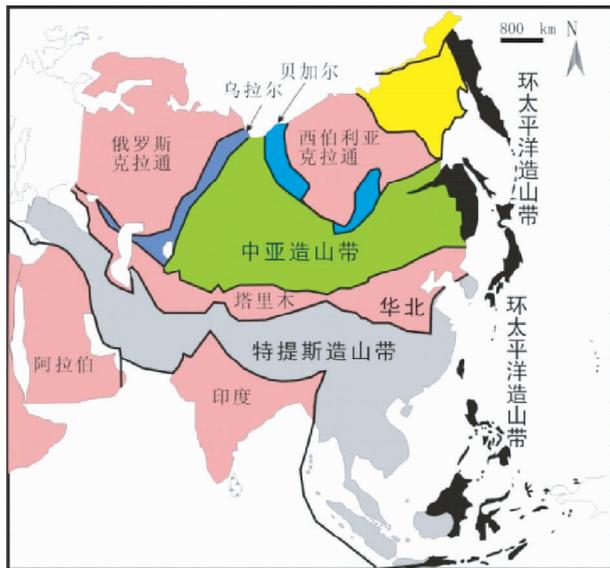


图2 中国及亚洲构造示意图(据 Sengor and Natal' in, 1996)

Fig. 2 Sketch showing the tectonics of China and Asia (after Sengor and Natal' in, 1996)

思想(陈国达, 1960)。其实,他们已经认识到大陆碰撞造山事件与大规模成矿事件之间的时空耦合关系,只是局限于当时科学发展的水平,没有使用“大陆碰撞”这样的概念而已。无论如何,前辈们关于大陆碰撞造山带地质和矿床的研究和思想,启迪了我们对大陆碰撞体制成矿作用的专门研究。关于这一点,至少对本文作者而言,是符合实际情况的(详见陈衍景, 2002)。因此,为纪念前辈们的贡献,本文仍将 1970 年之前的研究作为大陆碰撞成矿作用研究的预备期。

2.2 孕育期(1971~1990年)

板块构造理论成功地阐释了大洋板块和洋-陆结合带的地质和成矿作用,激励科学家们竞相将其运用到大陆内部和前寒武纪地质与成矿研究中,即“登陆”和“复古”。这种尝试和探索,无疑孕育着大陆碰撞成矿理论的诞生。

20 世纪 70 年代, Guild (1971, 1972) 首先指出:“在大陆与大陆碰撞的情况下,两个板块由于具有浮力,都不能下倾很远,同时力被剧烈的压碎作用所分散,这种碰撞不产生火成岩,并且明显地缺乏热液矿床”;认为特提斯造山带的一些始新世以后的矿床形成与洋壳消减带的钙碱性岩浆作用有关。Bromley (1975) 也将西欧的锡矿床解释为洋壳消减的结果。但是, Mitchell (1974) 和 Mitchell and Garson (1976) 发现洋壳俯冲成矿模式无法解释这些锡矿床的成因,认为英格兰西南部花岗岩类和 Sn、Cu、U 矿床是碰撞造山体制的产物;科瓦列夫(1980)提出碰撞造山带可能是金、锡、铀、重晶石、油气等多种矿床的形成场所。

20 世纪 80 年代, Mitchell and Garson (1981) 提出喜马拉雅、东南亚、英格兰西南部、葡萄牙、纳米比亚、法国中央地块西部等地的锡或铀等矿床与大陆碰撞作用有关。该观点得到 Sawkins (1984) 的赞同,后者进一步认为钨锡矿床和铀矿床往往与碰撞过程形成的 S 型花岗岩有关,且多为二云母花岗岩。涂光炽和丁抗(1986)认为豫陕交界处的汞锑矿床是秦岭-中亚细亚全球性汞锑成矿带的一部分,形成于燕山期,而华北与华南板块在三叠纪对接。胡受奚等(1988)提出东秦岭地区 A 型俯冲作用导致大量燕山期花岗岩类和斑岩矿床的形成。Kerrich and Wyman (1990) 提出 Abitibi 和 Yilgarn 金矿省以及南澳大利亚 Ballarat 地区和意大利 Monte Rosa Lodes 地区的金矿床形成于洋盆闭合或陆壳增生过程。此间,陈衍景(1984)提出中国大陆东南边缘早侏罗世的地体拼贴碰撞导致福建大田县大合变质带中局部出现中级变质-混合岩化-花岗岩化三位一体现象以及铜-硫铁矿的矿化富集作用(前锋硫铁矿);陈衍景(1986)将板块敛合边界的远距离效应划分为俯冲型、地体拼贴型和大陆碰撞型,认为大陆碰撞作用可以导致较大范围的 A 型俯冲、花岗岩浆作用、区域变质作用和成矿作用。陈衍景等(1990)通过分析大陆碰撞体制单个 A 型俯冲板片的物质变化,认为仰冲板片可依次将出现脉状热液矿床带、花岗岩基及矿化带和斑岩-爆破角砾岩及成矿带,首次建立了“碰撞造山成岩成矿模式”(又称 A

型俯冲成岩成矿与流体作用模式),并以豫西地区金矿研究资料证明了模式的科学性和实用性,解释和预测了河南省金矿的形成与分布规律。该模式发表后立即被《黄金科技信息》(1990)转载。

自 Guild (1971) 否定碰撞成矿的可能性开始,到陈衍景等(1990)从动力学机制上分析论证大陆碰撞成矿的可能性和客观性,历时 20 年,实现了由“碰撞不成矿”到“碰撞能成矿”的转变。此间,关于大陆碰撞成矿研究的总体特点是:(1)套用 Sillitoe (1972) 的洋壳俯冲成岩成矿模式解释大陆碰撞造山带的洋盆闭合以后的成矿事件(如 Bromley, 1975),该模式也被用于解释我国绝大多数地区的洋盆消失之后的成矿作用(吉黑、胶东、华南、三江、青藏高原、秦岭、祁连、阿尔金、昆仑、天山、阿勒泰、大兴安岭等),特别是斑岩矿床,所得认识虽有部分学者至今仍然坚持,但多被质疑或推翻。(2)一组学者主张大陆碰撞过程中形成了一些铀、锡、钨、金等矿床(Mitchell and Garson, 1981; Sawkins, 1984; Kerrich and Wyman, 1990)或大量多种金属矿床(陈衍景, 1986; 陈衍景等, 1990; 胡受奚等, 1988),而另一组学者则认为碰撞不可能成矿(Guild, 1971, 1972; Bromley, 1975),表现为“碰撞能成矿”与“碰撞不成矿”之间的争论,未能实施碰撞成矿的动力学机制和碰撞体制的矿床地质特征研究。(3)与 70 年代相比,80 年代“碰撞不成矿”观点减弱,主张“碰撞能成矿”的学者越来越多,主要原因是大陆碰撞造山带的构造几何学和动力学研究取得了突破,提出了陆内俯冲、薄皮构造等概念(Hsu, 1979),1982 年彭罗斯会议重新肯定了 A 型俯冲的重要性, S-I-M-A 或改造型-同熔型-幔源型-A 型花岗岩分类体系及其与成矿关系的认识趋于成熟(胡受奚等, 1988)。

2.3 诞生期(1991~2000年)

在《豫西金矿成矿规律》中,陈衍景和富士谷(1992)初步提出了大陆碰撞成矿理论的框架,包括:(1)确定大陆碰撞造山带岩石圈/地壳加厚-隆升的主要机制是不同规模、不同层次、不同样式的板片堆叠,或称广义 A 型俯冲或陆内俯冲,完整的大陆碰撞造山过程包括了早期岩石圈/地壳挤压-缩短-加厚,中期减压-伸展-热隆升,晚期伸展-减薄-垮塌;(2)更详细地阐述了矿田尺度的大陆碰撞成矿模式的动力学机制,提出了矿床尺度和成矿省尺度的大陆碰撞成矿模式的雏形;(3)揭示了大陆碰撞成矿作用三阶段演化的特点和挤压向伸展转变期大规模成矿的规律,以及成矿物质和流体侧向源的特点;(4)论证了大陆碰撞过程主要发育断控、浆控和层控等三类热液成矿系统,初步厘定了三类矿床的极性空间分布规律、地质地球化学特征和找矿标志。继后,引入大陆碰撞造山过程的 $P-T-t$ 轨迹,加以完善三阶段成矿规律(陈衍景, 1996; Chen, 1998),分析了影响大陆碰撞造山带成矿分带规律的地质因素和成矿模式变异的方式(陈衍景, 1998),讨论了运用大陆碰撞成矿模式开展地质勘查的方法和注意

事项(陈衍景和杨泽军, 1998)。

在此期间, 翟裕生等(1992)提出“长江中下游夹持在华北地块与扬子地块之间的狭窄地带, 两大地块中生代以来的强烈碰撞控制了接合带附近的成岩成矿作用”; 周涛发和岳书仓(1998)进一步指出该区成矿发生于挤压向伸展转变期。王德滋等(1998)提出中国东部中生代火山岩和有关矿床“是两大动力体系联合作用的结果, 其一为库拉-古太平洋板块与欧亚板块的碰撞俯冲作用, 其二为华北板块与扬子板块的碰撞、拼贴及其后续的伸展、引张作用”。秦岭、胶东以及华北克拉通周缘的金矿床被解释为大陆碰撞的结果(Chen *et al.*, 1998; Sui *et al.*, 2000; 胡受奚等, 1997; 鲁安怀等, 1998)。张进江等(1998)通过对小秦岭-熊耳山金矿田构造解析, 提出同造山挤压期发育增厚型剪切带, 常为含矿构造; 后造山伸展期发育减薄型剪切带, 常为破矿构造。新疆北部等中亚造山带地区碰撞成矿的重要性已被大批学者共识(Chen, 1997; Chen HY *et al.*, 2000; 陈衍景和张程宁, 1991; 陈衍景等, 1995; 谢才富等, 1998; 李华芹等, 1998)。青藏三江地区的玉龙成矿带被解释为大陆碰撞造山作用的产物(陈衍景等, 1997)。在矿种方面, 中国绿岩带型金矿床(Chen *et al.*, 1998)、中国矽卡岩型金矿床(Chen, 1996; 陈衍景等, 1997)、中国卡林型金矿床(Zhang *et al.*, 2000)等均被认为主要形成于陆陆碰撞环境。

国外学者在大陆碰撞成矿研究方面也取得了重要成绩。Koons(1991)提出新西兰南阿尔卑斯地区的金矿床形成于碰撞造山后期的隆升过程中。Ricard(1992)提出巴布亚新几内亚的Porgera金矿与弧陆碰撞体制的碱性岩浆活动有关。Kerrich and Feng(1992)认为碰撞边界的石英脉型金矿床形成于地体或大陆碰撞过程中, 成矿流体具有多源性。Seltmann *et al.*(1994)主编了题为Metallogenesis of Collisional Orogens的论文集, 系统讨论了德国-波兰-捷克等地海西期碰撞造山体制的多种类型的成矿作用。Shatov *et al.*(1996)则论证了哈萨克斯坦等地的钨锡钼矿床主要形成于大陆碰撞过程。Groves *et al.*(1998)在主张造山型金矿主要形成于洋壳俯冲诱发增生型造山过程的同时, 注意到内会聚造山作用(大陆碰撞)也可形成一些规模较小的造山型金矿床。Kerrich *et al.*(2000)也认为大陆碰撞只能形成小规模造山型矿床, 但认为中国和伊朗的类卡林型金矿床主要形成于大陆碰撞环境。

综上所述可见这一时期的主要进展有:(1)国外大陆碰撞造山带均报道了碰撞环境的成矿现象, 尤其以海西造山带为代表;(2)在国内, 除冈底斯成矿带的重要性尚未被证实之外, 其余重要成矿带的大量矿床被解释为大陆碰撞体制的产物, 只是部分地区被解释为“后碰撞”或“碰撞后”而已;(3)在各类热液矿床中, 除VMS和SEDEX明显属于碰撞前的同生矿床之外, 均有被确定为形成于大陆碰撞体制的实例报道;(4)较系统地创建了大陆碰撞成矿理论框架;(5)大陆碰撞成矿理论的科学性和实用性被勘查实践所验证, 预测区发现了一

批大型、超大型矿床, 如河南熊耳山南坡、夏馆银金铅矿田和东沟超大型钼矿床(后述); (6)作者不完全统计, 此间我国学者发表与大陆碰撞成矿有关的论著逾100篇, 是1971~1990年期间国内外学者发表同类论文总数的10倍。显然, 在大陆碰撞成矿理论的诞生过程中, 我国学者扮演了最重要的角色。由于我国学者在大陆碰撞成矿作用研究中的重要成绩和我国陆区大陆碰撞成矿的重要性, 国家攀登计划项目“地质流体及其成矿效应”(刘丛强为首席科学家)专设“碰撞造山体制的流体作用及其成矿效应”课题(陈衍景和郑永飞担任课题负责人), 展开深入研究。此外, 2000年《中国科学(D辑)》出版了题为“大陆碰撞与成矿”的论文增刊。

2.4 成长期(2001~2010年)

20世纪末大陆碰撞成矿理论的诞生及其所带动的找矿勘查突破, 全球各大陆碰撞造山带碰撞造山体制成矿作用的客观性被揭示, 激励更多学者关注并加入到大陆碰撞成矿作用研究的行列。进入21世纪, 大陆碰撞成矿理论迅速成熟, 大碰撞带找矿突破引人注目, 大陆碰撞成矿研究倍受重视并成为国际矿床研究的重大前沿。该时期的重要进展或研究特点是:

(1)进一步完善了成矿省尺度、矿田尺度和矿床尺度的大陆碰撞成矿与流体作用模式, 即CMF模式(陈衍景, 2002, 2006; 陈衍景等, 2003, 2007, 2008, 2009; Chen *et al.*, 2004, 2005, 2007, 2008, 2009, 2012), 修正了国外学者提出的全球构造成矿模式(陈衍景等, 2007);

(2)我国学者提出的大陆碰撞成矿理论被称为“陈氏CMF模式”编入国外教材(Pirajno, 2009)、科研著作(Pirajno, 2012)和国内矿床教材(翟裕生等, 2011), 被用于分析澳大利亚(如Kreuzer *et al.*, 2007)、伊朗(Aliyari *et al.*, 2009)等国外碰撞造山带的成矿规律, 相关研究的国际合作加强, 全球化趋势明显;

(3)国内外学者提出了与成矿省尺度CMF模式大同小异的成矿模式(如Robb, 2005; 侯增谦, 2010), 并强调了类似的要点, 例如, 水平运动是大陆碰撞造山带的主导性造山机制, 成矿过程的三阶段演化, 构造应力体制转变时大规模成矿, 造山型、岩浆热液型和浅成热液型(含MVT铅锌矿、卡林型金矿、浅成低温热液型金银矿床)是优势成矿系统;

(4)大陆碰撞体制主要成矿系统的特征及其与其它构造环境同类矿床的差异被揭示出来(陈衍景等, 2004, 2007, 2008; 陈衍景和李诺, 2009; Chen HY *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2006, 2011; Chen and Wang, 2011; Li *et al.*, 2012b; Yang *et al.*, 2012, 2013), 如大陆碰撞造山体制的斑岩矿床具有更强的钾长石化、萤石化、碳酸盐化等;

(5)一批矿床被排他性地证明形成于大陆碰撞造山体制, 如小秦岭金矿田(祁进平等, 2006), 熊耳山区的铁炉坪银矿(陈衍景等, 2003)、上宫金矿(Chen *et al.*, 2008)等, 甘肃阳山金矿(张莉等, 2009), 新疆望峰金矿(Zhang *et al.*,

2012a)。

(6) 高温高压实验开始用于模拟完善大陆碰撞成矿理论 (Xiong *et al.*, 2005; Xiong, 2006);

(7) 以大陆碰撞成矿理论为指导, 在青藏高原发现了世界级的冈底斯铜多金属成矿带 (郑有业等, 2002; 芮宗瑶等, 2003; 侯增谦, 2010), 引起世界关注。

特别强调, 该时期国家 973 项目“印度-亚洲大陆主碰撞带成矿作用” (侯增谦、王二七任首席科学家) 的实施, 扩大了大陆碰撞成矿理论的国内外影响。

2.5 成熟期 (2011 年及以后)

Chen *et al.* (2000) 在“未来研究”中提出的近期研究热点和可望突破的问题是: 碰撞造山带的精细几何结构和挤压造山隆起和伸展隆起机制; 韧性剪切的发育与造山作用的关系和对矿床、岩石发育的控制; 碰撞造山过程的岩浆活动和演化及其与地球动力学背景演化的关系; 岩浆发生的机理和与流体作用的关系; 碰撞造山过程的流体作用、演化及其动力学机制, 流体作用对岩浆作用、成矿作用、变质作用、构造变形的贡献; 成矿流体的产生、运移、演化和对矿床定位的控制, 成矿物质的活化、迁移、沉淀的条件及其与矿体定位空间的关系, 矿体定位空间的特征与矿床类型的关系, 矿床类型与成矿系列的关系; 碰撞造山带岩石圈内不同层次物质和能量交换, 岩石圈下部物质和能量的上迁, 以及它们对浅层构造背景和演化的控制, 对浅层岩浆活动、流体作用和成矿作用的控制; 碰撞造山带地球物理探测和解释, 区域地球化学填图和异常发现与解释; 流体作用对地球物理和地球化学资料的叠加和改造作用; 碰撞造山带与山前盆地和山间盆地的构造耦合和物质交换。

上述问题在 2000 年以来的研究中被同行们高度重视, 并取得了重要认识或突破, 但仍有必要继续加强研究。考虑到大陆碰撞成矿理论已趋成熟, 作者认为如下问题尚值得未来研究关注, 并可望在近期研究中获得重要突破:

(1) 大陆碰撞体制的优势和劣势矿种是哪些? 它们分属何种成因类型?

(2) 同类成矿系统, 大陆碰撞体制的与其他构造背景的相似和差异?

(3) 高温高压实验模拟、数值模拟等是现代固体地球科学理论发展的重要支撑, 大陆碰撞成矿理论的验证性实验模拟和数值模拟工作亟待加强。

(4) 现有大陆碰撞成矿理论植根于秦岭等国内的典型大陆碰撞造山带, 那么, 境外大陆碰撞带是否符合大陆碰撞成矿理论?

(5) 同样属于碰撞造山带, 但不同大陆碰撞造山带之间存在显著的成矿差异, 甚至同一造山带不同区域存在显著的成矿差异, 那么, 造成这种成矿差异的原因是什么? 有哪些规律性? 这一问题的解决, 可为确定大陆碰撞造山带某一区域的找矿潜力和主攻类型, 提供关键依据。

(6) 一个区域的地质演化史中, 往往经历多次大陆碰撞甚至多次超大陆旋回, 是否每次碰撞都伴随强烈的成矿作用? 保存程度如何?

3 大陆碰撞成矿理论的核心内容

大陆碰撞成矿理论的创建过程漫长, 内容丰富。其核心内容是一套不同尺度的成矿动力学模式和物理、化学基本原理, 三类四种成矿系统的地质地球化学特征、形成规律及其与岛弧等其它构造环境同类矿床之间应有的差异性和相似性; 护幔内容为矿床学、构造地质学、岩石学、地球化学、地球物理学等方面的证据, 或与多学科核心内容的有机链接; 外延或辅证表现在产学研方面的应用。下面简要介绍核心内容。

3.1 不同尺度的大陆碰撞成矿模式

大量研究资料显示 (如 Chen *et al.*, 2007): ①我国大陆碰撞造山带大量发育花岗岩, 蕴涵重要矿集区, 如秦岭、三江、天山-阿勒泰等是多种金属矿床聚集地; ②大陆碰撞带的大规模花岗岩浆侵入和成矿事件伴随或尾随于大陆碰撞作用, 滞后于最晚洋盆闭合事件约 50Ma, 例如, 秦岭地区的古洋盆于三叠纪彻底闭合, 大规模花岗岩和成矿事件发生在晚三叠世-早白垩世, 而晚白垩世至今的“碰撞后”时期并不成矿; ③地球物理探测和构造地质研究证实世界各大陆碰撞带均以板片堆叠 (或广义的 A 型俯冲或陆内俯冲) 为突出特征和地壳加厚-造山隆升机制, 如大别造山带存在大陆深俯冲现象。因此, 我们创建了一系列不同尺度的 CMF 模式 (Continental collision orogeny, metallogeny and fluid flow)。

3.1.1 造山带或成矿省尺度 CMF 模式

该模式雏形见于陈衍景和富士谷 (1992) 以及陈衍景 (1998), 经历多次修改 (陈衍景等, 2008; Chen *et al.*, 2005, 2012; Pirajno, 2009), 现已趋完善。其要点为 (图 3): ①大规模成矿作用发生在挤压加厚造山带地壳/岩石圈的伸展减薄、根部拆沉垮塌过程中, 多类矿床同时或陆续形成; ②伴随的花岗岩类 (含埃达克岩) 由壳源, 经壳幔同熔, 向幔源和 A 型演化; ③区域性大断裂由缓倾斜的逆冲断裂经走滑剪切演变为陡倾斜的正断层, 应力场由挤压经伸展向可能的拉张演化; ④碰撞体制的岩浆、变质、流体、成矿作用集中在挤压造山作用强烈的 MBT (主边界逆冲断层) 与 RBT (反向边界逆冲断层) 之间的造山带内部。该模型是评估造山带成矿潜力的重要依据, 其基本单元是地体尺度 CMF 模式 (图 4)。

3.1.2 地体或矿田尺度 CMF 模式

该模式 (图 4) 的要点或新认识是: ①随 A 型俯冲板片的下插, 下插板片因温度压力升高而依次发生浅成 (改造)、变质和熔融作用, 使板片内物质依晶格能由低到高的顺序活化迁移, 派生成矿流体和长英质熔体, 导致仰冲板片依序发育

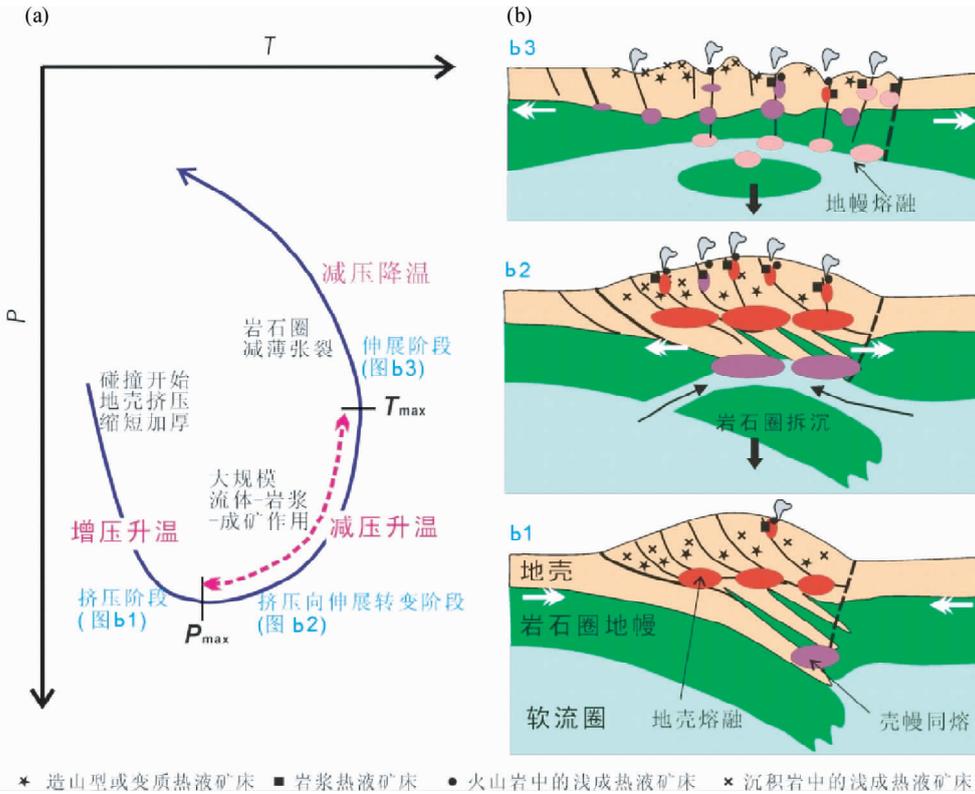


图3 成矿省/造山带尺度的CMF模式(据陈衍景等, 2008; Chen *et al.*, 2005, 2012; Pirajno, 2009; 略有修改)

Fig.3 CMF model at orogen or metallogenic province scale (modified after Chen *et al.*, 2005, 2008, 2012; Pirajno, 2009)

脉状热液矿床带(D带)、浅源深成花岗岩带(G带)和深源浅成酸性岩体及矿化带(P带);②伴随碰撞造山作用的3阶段构造-热演化(P - T - t 轨迹),成岩、成矿和流体作用呈现3阶段演化特点;③中阶段挤压-伸展转变体制的减压-增温条件导致大规模成矿作用,使成矿时间滞后于洋盆最终闭合;④碰撞体制可发育多种金属的浅成、变质和岩浆热液矿床;⑤至少部分成岩、成矿物质和流体来自俯冲陆壳板片,即侧向源。该模型阐明了矿床与岩浆岩之间的成因和空间关系,不同类型矿床、不同矿种之间的成因联系和空间分布上的极性分带规律,是大陆碰撞造山带开展成矿带、矿床、矿种的缺位或定位预测的关键依据。

特别说明,模式中D-G-P带的发育程度、宽度等受地温梯度、俯冲角度、俯冲速度、俯冲板片成分等多种因素的影响(详见陈衍景,1998)。设地温梯度为 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$,G带花岗岩浆产生的深度约为 20km (相当于 600°C);如果再设A俯冲角度为 45° ,则D带最大宽度为 20km ;显然,当俯冲角 $<45^{\circ}$ 时,D带宽度大于 20km ;相反,则D带宽度小于 20km 。

3.1.3 矿体或矿床尺度CMF模式

就地体尺度CMF模式中的D带断控脉状矿床而言(图5):①BDL(韧脆性转变带)之下的流体为(超)静岩压力,之上为静水压力系统;②深部流体上升至BDL时即减压沸腾,快速卸载成矿物质,同时水压致裂导致围岩角砾化或破裂,使浅部低温流体涌入、混合,成矿物质沉淀;③BDL深度受

控于温度、压力及温度/压力梯度,随造山带热演化而上下浮动,控制流体沸腾-混合作用及矿化富集带的深度上下变化;④不同阶段流体沸腾-混合所跨越的总深度即为最佳成矿深度范围,是找矿评价的目标空间。该模型为矿床深部潜力评价和矿体定位预测提供了依据。

3.1.4 全球构造-成矿模式

由于“碰撞不成矿”观点的影响,国际主流的全球构造-成矿模式图(Groves *et al.*, 1998, 2003; Goldfarb *et al.*, 2001)空白了大陆碰撞体制的成矿作用,只阐述了岛弧区和活动大陆边缘的主要成矿系统类型(图6中的右半部分)。我们在给出了造山带、地体和矿床尺度的CMF模式之后,有理由增补大陆碰撞造山带(图6左半部分),从而得到更全面而完善的全球构造-成矿模式(图6)。其中,成矿系统的分类方案和依据详见陈衍景(2010)。

3.2 成矿系统的特征:与俯冲体制成矿系统对比

大陆碰撞体制可发育变质热液、岩浆热液和浅成热液三类成矿系统,它们各具特征,与俯冲体制同类成矿系统的差异明显。

3.2.1 变质热液型(造山型)成矿系统

笔者及合作者(陈衍景等, 1990; 陈衍景和富士谷, 1992; 陈衍景, 1996, 2006)分析了A型俯冲过程的物质活化迁移规律,提出了地体尺度的CMF模式,认为D带可发生

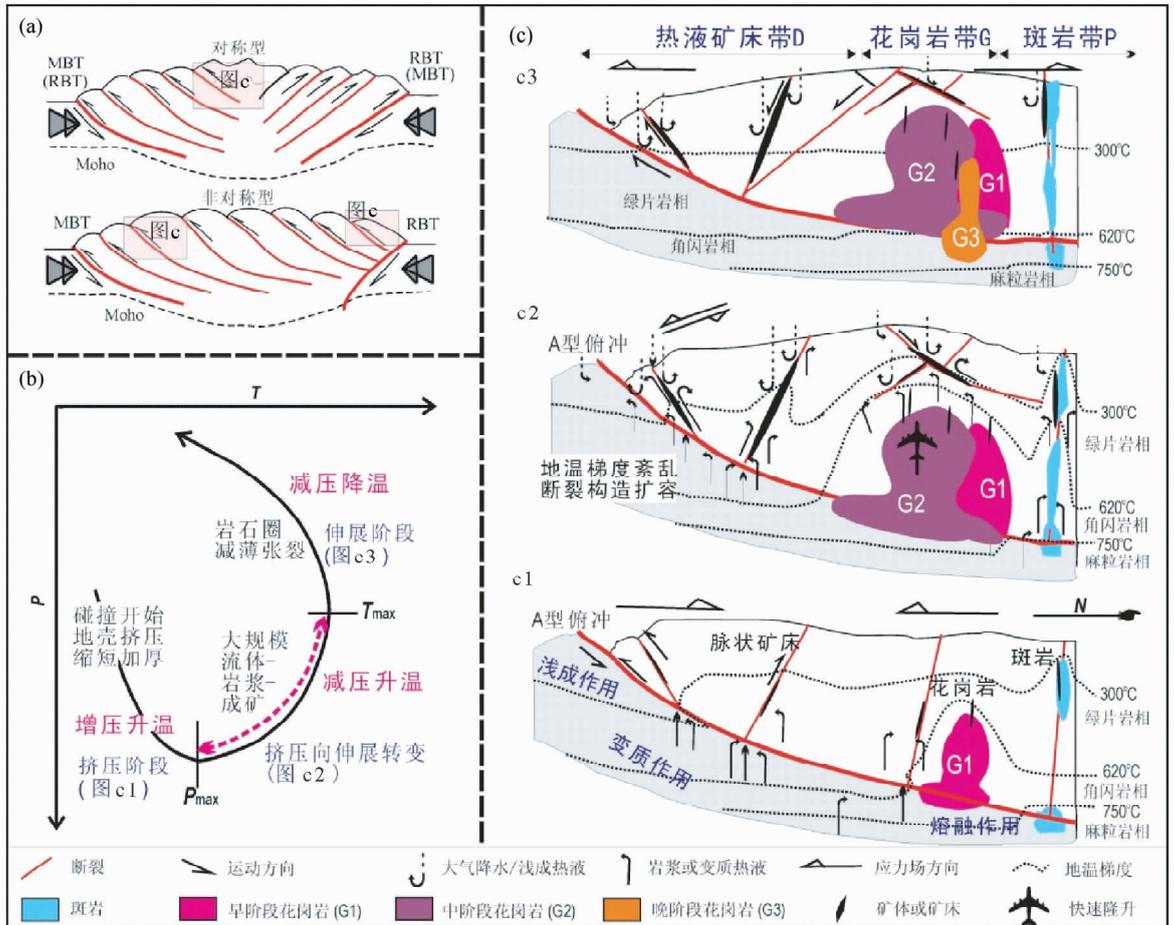


图4 矿田/地体尺度的CMF模式(据陈衍景等,1990,2003;陈衍景和富士谷,1992;陈衍景,1996;Chen *et al.*,2004,2008;Pirajno,2009修改)

Fig.4 CMF model at orefield or terrane scale (modified after Chen and Fu, 1992; Chen, 1996; Chen *et al.*, 1990, 2003, 2004, 2008; Pirajno, 2009)

多种金属元素矿化,形成多种金属元素矿床,在同一含矿断裂构造带内,可见从深部高温到浅部低温金属元素的成矿分带现象。据此,在秦岭等造山带识别和研究了一批变质热液型(即造山型)Mo、Cu、Au、Ag、Pb-Zn等矿床(邓小华等,2008;倪智勇等,2008;Sui *et al.*,2000;Chen *et al.*,2004;Zheng *et al.*,2012;Zhang *et al.*,2012b;祁进平等,2009)以及相关浅成热液型Hg-Sb、Pb-Zn、Au等矿床(张颖等,2010;张静等,2002;陈衍景等,2004),提出了断控脉状矿床的元素垂向分带模式(图7a)。

Groves *et al.* (1998)通过对西澳大利亚、加拿大和美国阿拉斯加地区的金矿床研究,认为这些金矿省的成矿热液属于变质流体,而变质流体来自洋壳俯冲-增生造山过程中的俯冲洋壳的变质脱水作用;由于变质脱水伴随俯冲造山作用发生,故将这类金矿床称为造山型,并提出了造山型矿床连续地壳模式(图7b)。他们还认为,这种背景下往往只形成单金矿床(Gold-only)或金矿省。Groves等人的工作引起了国际造山型金矿研究和找矿热潮。

由上可见,大陆碰撞体制的变质热液可以形成多种元素的金属矿床,而洋壳俯冲环境主要形成单金矿床。至于B型俯冲能否形成Cu、Pb-Zn、Mo、Ag等矿床,尚需探讨。关于造山型矿床的地质地球化学特征,已有详细介绍(陈衍景,2006,2010;陈衍景等,2007),此不赘述。这里需要强调的是,造山型矿床往往出现延深大于地表延长的现象,值得勘查时重视。

3.2.2 岩浆热液成矿系统

按照地体尺度的CMF模式,可在G带发育云英岩型、矽卡岩型和石英脉型钨、锡、铋、钽、稀土、铀等矿床,在P带可发育含斑岩型、爆破角砾岩型、夕卡岩型、IOCG型、热液脉型矿床。研究发现(陈衍景等,2007,2008,2009;陈衍景和李诺,2009;Chen and Wang,2011;Li *et al.*,2012a,b;Yang *et al.*,2012,2013),这类岩浆热液型矿床与其它大陆内部环境的岩浆热液矿床的流体特征类似,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

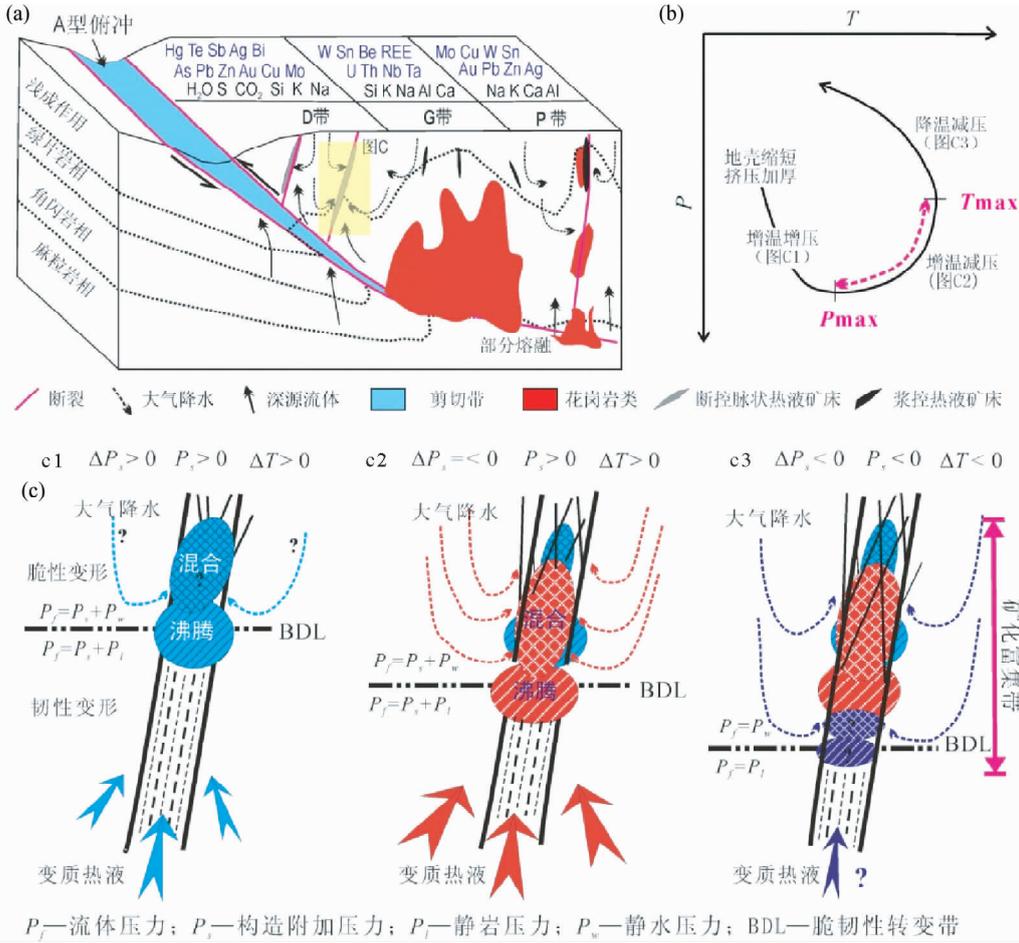


图5 矿床尺度 CMF 模式示意图 (据陈衍景和富士谷, 1992; 李晶等, 2004; Zhang *et al.*, 2012b 修改)

Fig.5 Deposit scale CMF model (modified after Chen and Fu, 1992; Li *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2012b)

浅成热液成矿系统 (起源深度 < 10 km, T < 300 °C, 低盐度-贫 CO₂ 流体)
 ● 海底热液矿床 ⊗ 沉积岩容矿的浅成热液矿床 ● 火山岩容矿的浅成热液矿床

岩浆热液成矿系统 (起源深度 > 10 km, T > 300 °C, 高盐度-含 CO₂ 流体)
 ■ 与岩浆侵入体密切相关的斑岩型、爆破角砾岩型、矽卡岩型、云英岩型、各种脉型

变质热液成矿系统 (起源深度 > 10 km, T > 200 °C, 低盐度-富 CO₂ 流体)
 * 构造控制的造山型 Au, Ag, Pb-Zn, Cu, Mo 等矿床

增生楔 花岗岩类
 陆壳 洋壳
 软流圈 岩石圈地幔

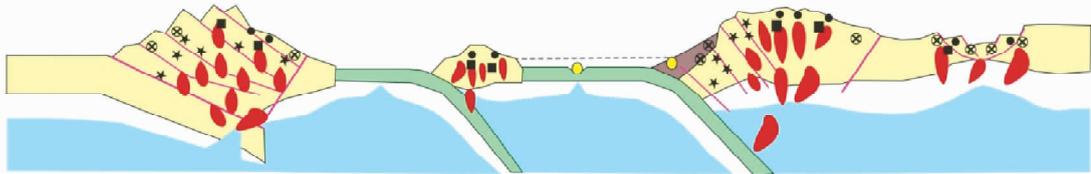


图6 热液矿床的全球构造成矿模式 (据 Groves *et al.*, 1998; 陈衍景等, 2007; 陈衍景, 2010 修改)

Fig.6 Global tectono-metallogenic model for hydrothermal mineral systems (modified after Groves *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2007; Chen, 2010)

包裹体、CO₂-H₂O 包裹体、含子晶多相包裹体和水溶液包裹体等多类流体包裹体;成矿流体具有高盐度、富 CO₂ 的特点,且往往富 F、富 K。但是,它们与岩浆弧 (含陆缘弧和岛弧)环境的同类矿床差异较大,后者钾长石化较弱,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 CO₂-H₂O 包裹体,更无纯 CO₂ 包裹体;成矿流体为贫 CO₂ 的高盐度水溶液 (NaCl-H₂O 型)。分析表明,两种不同构造背景的岩浆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,

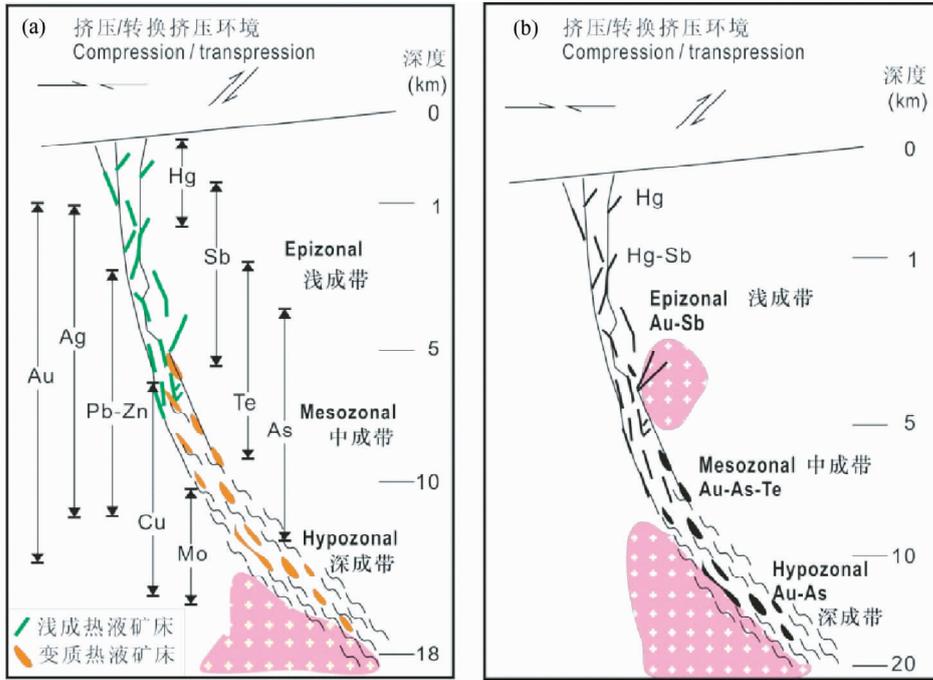


图7 大陆碰撞(a, 据陈衍景, 2006)和洋壳俯冲(b, 据 Groves *et al.*, 1998)体制的造山型成矿系统元素垂向分带模式

Fig.7 Vertical element zonation for orogenic-type mineral systems formed in continental collision (a, after Chen, 2006) and oceanic subduction (b, after Groves *et al.*, 1998)

表1 大陆碰撞型与大洋俯冲型造山带斑岩矿床地质地球化学特征对比

Table 1 Contrasting geology and geochemistry of porphyry systems in continental collision and oceanic subduction orogens

特征	俯冲型造山带	碰撞型造山带
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, 可见碱性岩、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, $\delta^{18}O$ 低	I_{Sr} 高, ϵ_{Nd} 和 ϵ_{Hf} 低, $\delta^{18}O$ 高
成矿流体特征	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、碳酸盐化
成矿元素组合	铜金为主, 可伴 Mo, Pb, Zn	钼或铜钼为主, 伴生 W, Sn, REE
流体包裹体	水溶液, 含子晶, 没有或偶见含 CO ₂ 包裹体	水溶液, 含子晶, 常见多种富 CO ₂ 包裹体
代表性矿床	环太平洋岛弧带新生代斑岩铜金矿床	东秦岭、大别山中生代斑岩钼矿床

即: 大陆壳具有较高的 K/Na、F/Cl、CO₂/H₂O 等比值, 而大洋壳则具有极低的 K/Na、F/Cl、CO₂/H₂O 等比值。

两种不同环境岩浆热液矿床的差异突出地表现于斑岩矿床(表1)。值得强调, 大陆碰撞体制斑岩矿床形成压力大(表2), 最大可勘深度达8km 甚至更高, 明显大于岛弧区的1~4km (Kerrick *et al.*, 2000)。

3.2.3 浅成热液型成矿系统的差异: 以微细粒浸染型金矿为例

不同尺度的 CMF 模式告诉我们, 大陆碰撞环境不可能

发育海底热液矿床 (seafloor hydrothermal deposit, 简记为 SFH), 如 VMS 型和 Sedex 型块状硫化物矿床, 但可发育沉积岩容矿的浅成热液矿床 (sedimentary-hosted epizonogenic hydrothermal deposit, 简记为 SEH) 和火山岩容矿的浅成热液矿床 (volcanic-hosted epizonogenic hydrothermal deposit, 简记为 VEH) 或习称的浅成低温热液矿床 (epithermal deposit)。而且, 在大陆碰撞造山带中, 发育 SEH 型与 VEH 型矿床的相对概率与碰撞前大陆增生造山作用的强弱密切相关, 强增生大陆碰撞造山带往往发育大量 VEH 型矿床, 而 SEH 型矿床

表2 秦岭部分斑岩钼矿的成矿压力

Table 2 Ore-forming pressure estimation of porphyry Mo systems in Qinling

矿床	最大压力 (MPa)	可勘深度 (km)	资料来源
鱼池岭	194	6.9	李诺等, 2009
金堆城	243	8.7	杨永飞等, 2009a
南泥湖	300	10.7	杨永飞等, 2009b
东沟	117	4.2	杨永飞等, 2011
上房沟	180	6.4	杨艳等, 2009
秋树湾	154	5.5	李晶, 2009

注: 设岩石密度为 2.8g/cm^3

较少, 如中亚造山带(陈衍景等, 2009); 相反, 弱增生大陆碰撞造山带往往发育大量 SEH 型矿床, VEH 型矿床较少, 如秦岭和喜马拉雅山脉。显然, 大陆碰撞造山体制浅成热液成矿特征与大洋俯冲造山体制存在显著差异, 后者大量发育 VEH 型矿床, 次为 SFH 型和 SEH 型矿床。而且, 即使同一种类型的成矿系统, 因成矿构造环境不同也显示出差异。下面以 SEH 型金矿床为例加以说明。

SEH 型矿床包括了文献中常见的 Hg-Sb 矿床, 低温分散元素矿床, 微细粒浸染型或卡林型金矿床, MVT 型铅锌矿床, 矽岩型铀矿床等。就 SEH 型金矿床而言, 美国西部(内华达州、犹他州等)和我国陕甘川、滇黔桂是世界最著名的三个金矿省(Kerrich *et al.*, 2000)。美国西部 SEH 金矿省形成于共识的弧后盆岭省, 而我国陕甘川和滇黔桂则属于大陆碰撞造山带或其前陆褶冲带, 分属两种截然不同的构造背景, 但成矿作用都发生于挤压向伸展的转变带或转变期(陈衍景等, 2004)。据 Hofstra and Cline (2000), 美国西部弧后盆岭省的微细粒浸染型矿床不发育富/含 CO_2 包裹体, 温度低于 300°C , 深度 $< 6.5\text{km}$, 不与造山型金矿共存, 常与浅成低温热液型(VEH)甚或矽卡岩型矿床有密切的时间、空间和成因联系, 一些学者将其归属为浅成低温热液型(如: Bagby and Berger, 1985; Berger and Henley, 1989), 或者被解释为远源夕卡岩型(Boyle, 1979); 相反, 碰撞造山带(陕甘川和滇黔桂)SEH 型金矿床常发育富/含 CO_2 包裹体, 常见 $> 300^\circ\text{C}$ 的案例, 压力高达 200MPa 或更高, 深度高达 7km , 常与造山型金矿共生, 矿集区很少发育浅成低温热液型(VEH)或岩浆热液矿床, 部分矿床被解释为造山型或卡林型与造山型之间的过渡(Zhang *et al.*, 2000, 2006; 陈衍景等, 2004; 李晶等, 2007; 马星华等, 2008; 刘家军等, 2008)。

4 大陆碰撞成矿理论的找矿应用

实践是检验真理的标准, 也是科学研究的目标。“碰撞不成矿”的国际主流观点长期禁锢勘探学家的找矿思路, 尤其是制约碰撞造山带地区的找矿工作部署和主攻目标选择。

一整套不同尺度的 CMF 模式为我国广袤的碰撞造山带地区的找矿勘查提供了科学理论依据, 推动了找矿勘查的突破。特别是地体尺度 CMF 模式, 涉及宽度范围一般为 $15 \sim 50\text{km}$ (相当于 $1/50000$ 或 $1/200000$ 图幅范围), 明确了成矿元素、成矿类型的极性分带规律及其与区域性断裂和花岗岩类的空间关系, 尤其适合于大中比例尺的成矿预测, 预测结果易于查验, 可操作性强。目前, 大陆碰撞成矿理论已被不同学者和勘查部门运用到我国各碰撞造山带地质研究和找矿预测、评价, 推动了找矿勘查的突破。以下略举几例。

4.1 豫西地区的成矿预测和找矿验证

熊耳山矿田。陈衍景等(1990)和《豫西金矿成矿规律》第 184 页指出, 马超营断裂是倾向北的 A 型俯冲带, 马超营断裂与花山花岗岩基之间的熊耳山南坡是断控脉状金银铅锌矿床密集区。1992 年该预测区只有上宫和康山 2 个重要金矿, 截止 2010 年, 预测区发现大中型金矿 8 个、大型银矿 2 个、中型银矿 1 个(图 8)。

夏馆金银铅矿田。《豫西金矿成矿规律》第 171 ~ 172 页和图 4 ~ 5 明确指出, 朱夏断裂带是倾向北的 A 型俯冲带, 其北侧应发育 CMF 模式的 D 带热液矿床, 做图预测了“夏馆金银铅矿段”(陈衍景和富士谷, 1992)。1999 年以来, 面积不足 100km^2 的预测区内发现了银洞沟、板厂和东洼 3 个大型银铅锌金矿床(详见张静等, 2004, 2009)。

东沟超大型钼矿。《豫西金矿成矿规律》第 85、90、184 页反复强调, 合峪-太山庙花岗岩基北侧是寻找斑岩型-爆破角砾岩型钼和铅锌银金矿化的有利地带, 特别说明了汝阳南部“八亩地岩体钼矿化”的重要性; 陈衍景(1998)再次做图预测八亩地为 P 带含矿岩体(地学前缘 1998 年增刊第 109 ~ 118 页图 8C)。截止 2006 年底, “八亩地”被勘探证实为钼储量 > 70 万吨的世界级超大型斑岩钼矿(现称东沟钼矿床; 详见杨永飞等, 2011)。

4.2 东秦岭巨型造山型银矿省的勘查

根据地体尺度 CMF 模式成矿元素分带规律和元素地球化学行为, 在国际范围初显造山型金矿研究热潮之时, 率先确定铁炉坪银矿属于造山型(陈衍景等, 2003; Chen *et al.*, 2004), 建立了断控脉状矿床元素分带模式, 提出大陆碰撞造山带具有巨大的断控脉状银、铅锌、钼、铜等矿床找矿潜力(陈衍景, 2006), 推动了东秦岭地区一批大型脉状造山型银铅锌矿床的发现, 使东秦岭查明银金属量超过 $2.5 \times 10^4\text{t}$, 成为世界级巨型银矿省(详见陈衍景等, 2009)。

4.3 甘肅阳山金矿的科学勘查

武警黄金部队依据碰撞成矿理论部署了秦岭地区的找矿工作, 发现了甘肅阳山等多个大型、超大型金矿床。笔者及合作者于 2004 ~ 2006 年期间研究阳山金矿带的成矿富集规律, 确定该矿床属于卡林型(或 SEH 型)与造山型之间的

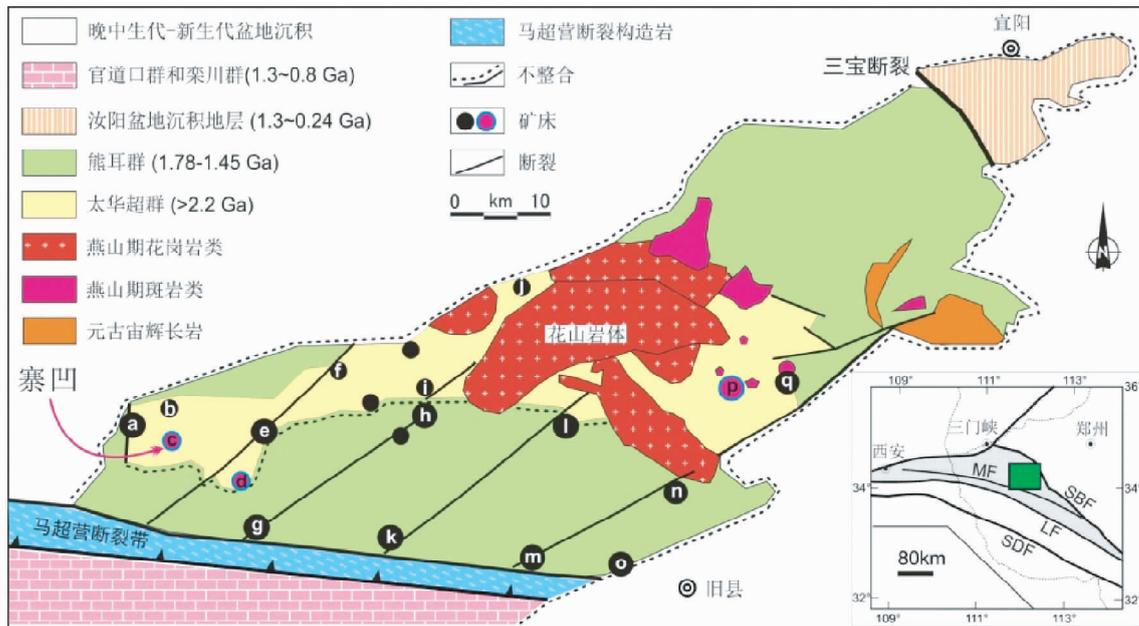


图8 熊耳山矿田矿床分布图(据 Deng *et al.*, 2013a, b)

MF-马超营断裂;LF-栾川断裂. 矿床名称: a-沙沟银铅锌矿床;b-嵩坪沟银铅矿;c-寨凹钼矿;d-龙门店钼矿;e-铁炉坪银铅矿;f-小池沟金矿;g-康山金银铅矿;h-上官金矿;i-虎沟金矿;j-沙坡岭钼矿;k-红庄金矿;l-青岗坪金矿;m-潭头金矿;n-瑶沟金矿;o-前河金矿;p-雷门沟钼矿;q-祁雨沟金矿

Fig. 8 Ore deposit distribution in the Xiongershan orefield (after Deng *et al.*, 2013a, b)

MF-Machaoying fault; LF-Luanchuan Fault. Deposit names: a-Shagou Ag-Pb-Zn; b-Haopingou Ag-Pb; c-Zhaiwa Mo-Cu; d-Longmendian Mo; e-Tieluping Ag-Pb; f-Xiaochigou Au; g-Kangshan Ag-Pb; h-Shangong Au; i-Hugou Au; j-Shapoling Mo; k-Hongzhuang Au; l-Qinggangping Au; m-Tantou Au; n-Yaogou Au; o-Qianhe Au; p-Lwimengou Mo; q-Qiyugou Au

过渡型,容矿断裂总体属于脆性剪切带;根据矿床尺度 CMF 模式,我们认为深部寻找富矿体的潜力较大(详见杨荣生等, 2006, 2009; 李晶等, 2007, 2008),建议黄金部队加大勘探深度,推动探明黄金资源储量快速超过 300t(至 2006 年底)。

4.4 驱龙铜矿和冈底斯成矿带的勘查突破

西藏驱龙铜矿被认为是我国唯一的 10^7 t Cu 级别的铜矿床。驱龙铜矿的勘查突破得益于郑有业等(2002)对成矿潜力的科学判断,而他们对驱龙铜矿和冈底斯成矿带找矿潜力的分析正是按照 CMF 模式进行的。郑有业等(2002)明确指出“在中新世(22~12Ma),在冈底斯大规模隆升(达到极限)之后,进入后造山伸展阶段,导致深部物质的减压分熔,形成富含挥发分、侵位能力极强的花岗岩浆(陈衍景等 1999),沿 NE、NW 及 S-N 向构造侵位产生一系列的斑岩、相关的小岩体及火山岩,在浅部发生蚀变矿化、喷气或热泉(羊八井)活动,形成与伸展走滑作用有关的斑岩型(冲江-驱龙)、隐爆角砾岩型(洞嘎)、矽卡岩型(冲木达)、剪切带型(安张) Cu, Mo, Au (Pb, Zn, Ag)矿床系列”。

5 结论

大陆碰撞成矿理论是多个学科发展的薄弱环节,是我国

地质矿产勘查的重大需求,我国具备开展相关研究得天独厚的自然条件。

大陆碰撞成矿作用研究始于“碰撞不成矿”,历经全球科学家 40 多年的努力,现已形成了基本成熟的大陆碰撞成矿理论。期间,我国学者做出了重要贡献。

大陆碰撞成矿理论的核心内容是 4 个不同尺度(全球构造,造山带,地体,矿床)的碰撞造山流体成矿模式(CMF 模式)和 4 种类型成矿系统及其特征。

大量勘查实践证明,大陆碰撞成矿理论适合于指导大陆碰撞造山带的成矿预测和找矿勘查。

致谢 在近 30 年的大陆碰撞成矿研究历程中,涂光炽、徐克勤、冯钟燕、刘英俊、芮宗瑶、魏绮英等已故导师和老师给予鼓励和指导;胡受奚、欧阳自远、富士谷、王尔康、王德滋、翟裕生、常印佛、孙枢、马福臣、马映军、应思淮、翟明国、蒋志、张国伟、李曙光、李廷栋、肖序常、许志琴、栾世伟、李继亮、田兴友、李文范、张复新以及 Pirajno F 等导师或老师们给予悉心指导和热情帮助;刘丛强、郑永飞、柴育成、姚玉鹏、郭进义、刘羽、于晟、王长锐、张峰、夏斌、夏萍等教授给予大力支持;北京大学、南京大学、中科院广州地化所、贵阳地化所、地质与地球物理研究所等单位的老师、同事和同学参加了部分研究工作;武警黄金部队和河南、新疆、陕西、西藏、内蒙、山东等相关地勘单位给予多方面的帮助;在此一并表示衷心

感谢!

References

- Aliyari F, Rastad E, Mohajjel M and Arehart GB. 2009. Geology and geochemistry of D-O-C isotope systematics of the Qolqoleh gold deposit, northwestern Iran: Implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 36: 306 – 314
- Bagby WC and Berger BR. 1985. Geologic characteristics of sediment-hosted, disseminated precious-metal deposits in the western United States. *Reviews in Economic Geology*, 2: 169 – 202
- Berger BR and Henley RW. 1989. Advances in the understanding of epithermal gold-silver deposits, with special reference to the western United States. *Economic Geology Monograph*, 6: 405 – 423
- Boyle RW. 1979. The geochemistry of gold and its deposits. *Bulletin of Geological Survey of Canada*, 280: 1 – 580
- Bromley AV. 1975. Tin mineralization of Western Europe: Is it related to crustal subduction? *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 84: B28 – B30
- Chen GD. 1960. Activation of Platform and Ore Exploration Guide. Beijing: Chinese Geological Publishing House, 1 – 408 (in Chinese)
- Chen HY, Bao JX, Zhang ZJ, Liu YL, Ni P and Ling HF. 2000. Isotopic indication to source of ore materials and fluids of the Wangfeng gold deposit in Tianshan: A case study of metallogenesis during collisional orogenesis. *Science in China (Series D)*, 43 (Suppl.): 156 – 166
- Chen HY, Chen YJ and Liu YL. 2001. Metallogenesis of the Ertix gold belt, Xinjiang and its relationship to Central Asia-type orogenesis. *Science in China (Series D)*, 44(3): 245 – 255
- Chen YJ. 1984. Preliminary study of the Dahe metamorphic belt, Fujian Province. Bachelor's Degree Thesis. Nanjing: Department of Geosciences, Nanjing University, 1 – 49 (in Chinese)
- Chen YJ. 1986. Types and examples of far-field impacts of tectonism at convergent plate boundaries. *Proceedings of Oral Presentations at the May 20th Symposium*. Nanjing: Department of Geosciences, Nanjing University, 12 – 15 (in Chinese)
- Chen YJ, Fu SG, Chen ZM and Sun YD. 1990. Tectonic model for metallogenesis of gold deposits in Henan Province. *Geological Information of Henan*, (2): 9 – 14 (in Chinese)
- Chen YJ and Zhang CN. 1991. The mineralization model for gold deposits in the western Zhunge'er area. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 21(1): 61 – 66 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Fu SG, Xie HS and Qiu YZ. 1991. Genetic model of intracontinental porphyry deposits distant from B-type subduction zone. *Proceedings of the Forth National Symposium of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. Beijing: Seismological Press, 253 – 255 (in Chinese)
- Chen YJ and Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan. Beijing: Seismological Press, 1 – 234 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Fu SG, Wu DH, Wu XD and Jing J. 1995. The coupling of the gold mineralization with the collisional orogenesis and the distribution of gold deposits, northern Xinjiang. *Gold Geology*, (3): 8 – 16 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 1996. Skarn gold deposits in China. *Resource Geology*, 46 (6): 369 – 376
- Chen YJ. 1996. Fluidization model for intracontinental collision and its metallogenic significance: Theoretical inference and evidences from gold deposits, the eastern Qinling Mountains. *Earth Science Frontiers*, 3(4): 282 – 289 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 1997. Mineralization during collisional orogenesis and its control of the distribution of gold deposits in Junggar Mountains, Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 71(1): 69 – 79
- Chen YJ, Qin S and Li X. 1997. Mineralization time, space, geodynamic background and metallogenic model of the skarn gold deposits, China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 33(4): 456 – 466 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 1998. Fluidization model for continental collision in special reference to study on ore-forming fluid of gold deposits in the eastern Qinling Mountains, China. *Progress in Natural Sciences*, 8(4): 385 – 393
- Chen YJ. 1998. Constraints and their mechanism on the petrogenic and metallogenic model for collision orogenesis. *Earth Science Frontiers*, 5(Suppl.): 109 – 118 (in Chinese)
- Chen YJ and Yang ZJ. 1998. A guide to the petrogenic and metallogenic model for collision orogenesis. *Mineral Deposits*, 17(Suppl.): 83 – 86 (in Chinese)
- Chen YJ, Guo GJ and Li X. 1998. Metallogenic geodynamic background of Mesozoic gold deposits in granite-greenstone terrains of North China craton. *Science in China (Series D)*, 41(2): 113 – 120
- Chen YJ, Chen HY, Liu YL, Guo GJ, Lai Y, Qin S, Huang BL, Zhang ZJ, Sui YH, Li C, Li Z, Li P, Li X, Wang HH, Zhu MX, Gao XL and Wei QY. 2000. Progress and records in the study of endogenous mineralization during collisional orogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 45(1): 1 – 10
- Chen YJ. 2002. Several important problems in study of regional metallogenesis in China: Their relationship to continental collision. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 319 – 328 (in Chinese with English abstract)
- 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: 551 – 568 (in Chinese with English abstract)
- 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 (5 – 6): 560 – 575
- Chen YJ, Zhang J, Zhang FX, Pirajno F and Li C. 2004. Carlin and Carlin-Like gold deposits in western Qinling Mountains and their metallogenetic time, tectonic setting and model. *Geological Review*, 50(2): 134 – 152 (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(5): 530 – 549
- 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, 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, 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. 2008. The Shanggong gold deposit, Eastern Qinling Orogen, China: Isotope geochemistry and implications for ore genesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 252 – 266
- 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 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, 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(2): 245 – 261
- 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 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 2010. On epizonogenism and genetic classification of

- hydrothermal deposits. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 27–34 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ and Wang Y. 2011. Fluid inclusion study of the Tangjiaping Mo deposit in Dabie Shan, Henan Province; Implications for the nature of the porphyry systems of post-collisional tectonic settings. *International Geology Review*, 53(5–6): 635–655
- Chen YJ, Pirajno F, Wu G, Qi JP and Xiong XL. 2012. Epithermal deposits in North Xinjiang, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, 101(4): 889–917
- Deng XH, Li WB, Li N, Mei M and Zhang Y. 2008. Fluid inclusions constraints on the origin of the Zhifang Mo deposit in Songxian County, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2133–2148 (in Chinese with English abstract)
- Deng XH, Chen YJ, Santosh M and Yao JM. 2013a. Genesis of the 1.76Ga Zhaiwa Mo-Cu and its link with the Xiong'er volcanics in the North China Craton: Implications for accretionary growth along the margin of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 10.1016/j.precamres.2012.02.014
- Deng XH, Chen YJ, Santosh M, Zhao GC and Yao JM. 2013b. Metallogeny during continental outgrowth in the Columbia supercontinent: Isotopic characterization of the Zhaiwa Mo-Cu system in the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 10.1016/j.oregeorev.2012.11.004
- Fan HR, Xie YH, Zhao R and Wang YL. 2000. Dual origins of Xiaoqinling gold-bearing quartz veins: Fluid inclusion evidence. *Chinese Science Bulletin*, 45(15): 1424–1430
- Goldfarb RJ, Groves DI and Cardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18: 1–75
- Groves DI, Goldfarb RJ, Gebre-Mariam M, Hagemann SG and Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other Au deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13: 7–27
- Guild PW. 1971. Metallogeny: A key to exploration. *Mining Engineering AIME*, 23(1): 69–72
- Guild PW. 1972. Metallogeny and the new global tectonics. 24th Intern. Geol. Congr. Proc., 4: 17–24
- Hofstra AH and Cline JS. 2000. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13: 163–220
- Hou ZQ. 2010. Metallogenesis of continental collision. *Acta Geologica Sinica*, 84: 30–58 (in Chinese with English abstract)
- Hsu KJ. 1979. Thin-skinned plate tectonics during Neo-Alpine orogenesis. *American Journal of Science*, 279(4): 353–366
- Hu SX, Lin QL, Chen ZM and Li SM. 1998. Geology and Metallogeny of the Collision Belt between the South China and North China Plates. Nanjing: Nanjing University Press, 1–558 (in Chinese)
- Hu SX, Zhao YY, Xu JF and Ye Y. 1997. Geology of Gold Deposits in North China Platform. Beijing: Science Press, 1–220 (in Chinese)
- Huang JQ. 1979. On the multi-cyclic development of geosynclinal fold belt. *Science in China*, 9(4): 384–397 (in Chinese)
- Kerrick R and Feng R. 1992. Archean geodynamics and the Abitibi-Pontiac collision: Implications for advection of fluids at transpressive collisional boundaries and the origin of giant quartz vein systems. *Earth Science Reviews*, 32: 33–60
- Kerrick R and Wyman D. 1990. Geodynamic setting of mesothermal gold deposits; An association with accretionary tectonic regimes. *Geology*, 18: 882–885
- 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(Suppl.): 1–68
- Koons PO. 1991. Gold mineralization as a consequence of continental collision: An example from the Southern Alps, New Zealand. *Earth and Planetary Science Letter*, 13: 1–9
- Kovalev AA. 1980. Plate Tectonics and Exploration. In: Suo L (translated). Beijing: Geological Publishing House, 1–265 (in Chinese)
- Kreuzer OP, Blenkinsop TG, Morrison RJ and Peters SG. 2007. Ore controls in the Charters Towers goldfield, NE Australia; Constraints from geological, geophysical and numerical analyses. *Ore Geology Reviews*, 32: 37–80
- Li CY, Guo LZ and Zhu X. 1986. *Fundamental Issues with Plate Tectonics*. Beijing: Seismological Press (in Chinese)
- Li HQ, Xie CF and Chang HL. 1998. Geochronology of Mineralization of Nonferrous and Precious Metallic Deposits in Northern Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House, 1–264 (in Chinese)
- Li J, Chen YJ and Liu YX. 2004. Typomorphic characteristics of pyrite from the lode gold deposits in North China craton: Implications for fluid mineralization. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 93–102 (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, Qin Y, 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. 2009. Fluid inclusion and Re-Os isotope studies of Leimengou and Qiushuwan porphyry deposits. Ph. D. Dissertation. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1–110 (in Chinese with English summary)
- Li N, Chen YJ, Ni ZY and Hu HZ. 2009. Characteristics of ore-forming fluids at 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, Santosh M, Yao JM, Sun YL and Li J. 2011. The 1.85Ga Mo mineralization in the Xiong'er Terrane, China: Implications for metallogeny associated with assembly of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 186: 220–232
- Li N, Chen YJ, Ulrich T and Lai Y. 2012a. Fluid inclusion study of the Wunugetu Cu-Mo Deposit, Inner Mongolia, China. *Mineralium Deposita*, 47: 467–482
- Li N, Ulrich T, Chen YJ, Thompson TB, Peace V and Pirajno F. 2012b. Fluid evolution of the Yuchiling porphyry Mo deposit, East Qinling, China. *Ore Geology Reviews*, 48: 442–459
- Liu JJ, Liu GC and Liu YF. 2008. Discovery and significance of scheelite orebodies in the Zhaishang gold deposit, southern Gansu. *Geology in China*, 35(6): 1113–1120 (in Chinese with English abstract)
- Lu AH, Lu GX and Wang WZ. 1998. Continent-continent collision and fluid mineralization in southern Wendeng. *Acta Geoscientia Sinica*, 19(2): 187–194 (in Chinese with English abstract)
- Ma FC, Tian XY, Liu CC and Ying SH. 1992. Several relationships to stable progress in the fundamental study of earth sciences. *Advance in Earth Sciences*, 7(3): 97–100 (in Chinese)
- Ma XH, Liu JJ, Li LX, Mao JG and Guo YQ. 2008. Zhaishang gold deposit in Gansu Province: Characteristics, evolution of ore-forming fluids and their metallogenic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2069–2078 (in Chinese with English abstract)
- Mitchell AHG. 1974. Southwest England granites: Magmatism and tin mineralization in a post-collision tectonic setting. *Trans. Instn. Min. Metall.*, 83: B95–97
- Mitchell AHG and Garson MS. 1976. Mineralization at plate boundaries. *Minerals Sci. Eng.*, 8(2): 129–169
- Mitchell AHG and Garson MS. 1981. *Mineral Deposits and Global Tectonic Settings*. London: Academic Press, 1–405
- 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 Xiaoqinling gold field, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2058–2068 (in Chinese with English abstract)
- Pirajno F. 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Berlin: Springer, 1–1250
- Pirajno F. 2012. *The Geology and Tectonic Settings of China's Mineral Deposits*. Berlin: Springer, 1–679
- Qi JP, LAI Y, Ren KX and Tang GJ. 2006. The Sr-isotope constraint on the origin of the Xiaoqinling gold field. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 2543–2550 (in Chinese with English abstract)

- Qi JP, Song YW, Li SQ and Chen FK. 2009. Single-grain Rb-Sr isotopic composition of the Xigou Pb-Zn-Ag deposit, Luanchuan County, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2843 – 2854 (in Chinese with English abstract)
- Ricards SP. 1992. Collision-related alkalic magmatism and associated gold mineralization; Early magmatic fluids in the meso-epithermal Porgera gold deposit, Papua New Guinea. *EOS*, 73(14): 372
- Robb L. 2005. *Introduction to Ore-Forming Processes*. Malden: Blackwell, 1 – 384
- Rui ZY, Hou ZQ, Qu XM, Zhang LS, Wang LS and Liu YL. 2003. Metallogenic epoch of Gangdese porphyry copper belt and uplift of Qinghai-Tibet Plateau. *Mineral Deposits*, 22(3): 217 – 225 (in Chinese with English abstract)
- Sawkins FJ. 1984. *Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics*. Berlin: Springer, 1 – 325
- Seltmann R, Kampf H and Moller P. 1994. *Metallogenesis in Collisional Orogens*. Potsdam: GeoForschungsZentrum Potsdam, 1 – 434
- Sengor AMC and Natal' in BA. 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of synthesis. In: Yin A and Harrison TM (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 486 – 640
- Shatov V, Seltmann R and Kremenetsky A. 1996. *Granite-related Ore Deposits of Central Kazakhstan and Adjacent Areas*. St. Petersburg: Glagol Publishing House
- Sillitoe RH. 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 67: 184 – 197
- Sui YH, Wang HH, Gao XL, Chen HY and Li Z. 2000. Ore fluid of the Tieluping silver deposit of Henan Province and its illustration of the tectonic model for collisional petrogenesis, metallogenesis and fluidization. *Science in China*, (Series D), 43 (Suppl.): 108 – 121
- Tu GC and Ding K. 1986. The Qinling-Central Asia Sb-Hg belt: The third Sb-Hg belt of global significance. In: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (ed.). *Collections of Geochemistry*. Beijing: Science in China Press, 8 – 13 (in Chinese)
- Wang DZ, Ren QJ and Qiu JS. 1998. Geology and geochemistry of gold deposits associated with Mesozoic continental volcanism in East China. In: Hu SX, Wang HN, Wang DZ and Zhang JR (eds.). *Geology and Geochemistry of Gold Deposits in East China*. Beijing: Science in China Press, 267 – 338 (in Chinese)
- Xie CF, Li HQ and Chang HL. 1998. A syn-collision epithermal gold deposit: Shiyintan gold deposit, eastern Tianshan. *Mineral Deposit*, 17(Suppl.): 425 – 428 (in Chinese)
- Xiong XL, Adam TJ and Green TH. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218: 339 – 359
- Xiong XL. 2006. Trace element evidence for growth of early continental crust by melting of rutile-bearing hydrous eclogite. *Geology*, 34: 945 – 948
- 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 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 Y, Zhang J, Yang YF and Shi YX. 2009. Characteristics of fluid inclusions and its geological implication of the Shangfanggou Mo deposit in Luanchuan County, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2563 – 2574 (in Chinese with English abstract)
- Yang 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 Yang Y. 2009b. Fluid inclusion study of the Nannihu porphyry Mo-W deposit, Luanchuan County, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2550 – 2562 (in Chinese with English abstract)
- Yang YF, Li N and Wang LJ. 2011. Fluid inclusion study of the Donggou porphyry Mo deposit, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27: 1453 – 1466 (in Chinese with English abstract)
- Yang YF, Li N and Chen YJ. 2012. Fluid inclusion study of the Nannihu giant porphyry Mo-W deposit, Henan Province, China: Implications for the nature of porphyry ore-fluid systems formed in a continental collision setting. *Ore Geology Reviews*, 46: 83 – 94
- Yang YF, Chen YJ, Li N, Mi M, Xu YL, Li FL and Wan SQ. 2013. Fluid inclusion and isotope geochemistry of the Qian'echong giant porphyry Mo deposit, Dabie Shan, China: A case of NaCl-poor, CO₂-rich fluid systems. *Journal of Geochemical Exploration*, 124: 1 – 13
- Zhai YS, Yao SZ, Lin XD, Jin FQ, Zhou XR, Wan TF and Zhou ZG. 1992. Metallogenic regularity of iron and copper deposits in the Middle and Lower Valley of the Yangtze River. *Mineral Deposits*, 11(1): 1 – 11 (in Chinese with English abstract)
- Zhai YS, Yao SZ and Cai KQ. 2011. *Mineral Deposits*. 3rd Edition. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 369 (in Chinese)
- Zhang FX, Chen YJ, Li C, Zhang J and Ma JQ. 2000. Geological and geochemical character and genesis of the Jinlongshan-Qinling gold deposits in Qinling orogen: Metallogenic mechanism of the Qinling-pattern Carlin-type gold deposits. *Science in China (Series D)*, 43 (Suppl.): 95 – 107
- Zhang J, Chen YJ, Zhang FX and Li C. 2002. Geochemical study of ore fluid in Jinlongshan Carlin-type gold deposit belt in southwestern Shaanxi Province. *Mineral Deposit*, 21(3): 283 – 291 (in Chinese with English abstract)
- 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, Zhang FX and Li C. 2006. Ore fluid geochemistry of the Jinlongshan Carlin-type gold deposit ore belt in Shaanxi Province, China. *Chinese J. Geochem.*, 25: 23 – 32
- Zhang J, Yang Y, Hu HZ, Wang ZG, Li GP and Li ZL. 2009. S-C-Pb isotope geochemistry of the Yindonggou Orogenic-type silver deposit in Neixiang County, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2833 – 2842 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Chen YJ, Yang Y and Deng J. 2011. Lead isotope systematics of the Weishancheng Au-Ag belt, Tongbai Mountains, central China: Implication for ore genesis. *International Geology Review*, 53(5): 656 – 676
- Zhang JJ, Zheng YD and Liu SW. 1998. *Structural Features, Genetic Mechanism and Tectonic Evolution of the Xiaoqinling Metamorphic Core Complex*. Beijing: Ocean 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 L, Chen HY, Chen YJ, Qin YJ, Liu CF, Zheng Y and Jansen NH. 2012a. Geology and fluid evolution of the Wangfeng orogenic-type gold deposit, Western Tian Shan, China. *Ore Geology Reviews*, 49: 85 – 95
- Zhang L, Zheng Y and Chen YJ. 2012b. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Tiemurt Pb-Zn-Cu deposit, Altay, Xinjiang, China: A case study of orogenic-type Pb-Zn systems. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 69 – 79
- Zhang Y, Chen YJ, Qi JP, Leng CB and Zhao CH. 2010. Geochemistry of Gongguan-Qingtonggou Hg-Sb deposit in Xunyang, Shaanxi Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 30(1): 98 – 106 (in Chinese with English abstract)
- Zheng Y, Zhang L, Chen YJ, Qin YJ and Liu CF. 2012. Geology, fluid inclusion geochemistry and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the

- Wulasigou Cu deposit and their implications for ore genesis, Altay, Xinjiang, China. *Ore Geology Reviews*, 49: 128 – 140
- Zheng YY, Wang BS, Fan ZH and Zhang HP. 2002. Analysis of tectonic evolution in the eastern section of the Gangdise Mountains, Tibet and the metallogenic potentialities of copper gold polymetal. *Geological Science and Technology Information*, 21(2): 55 – 60 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF and Yue SC. 1998. Significant progresses in the study of the Middle-Lower Yangtze copper-gold metallogenic belt. *Mineral Deposit*, 17(Suppl.): 149 – 152 (in Chinese)

附中文参考文献

- 陈国达. 1960. 地台活化说及其找矿意义. 北京: 地质出版社, 1 – 408
- 陈衍景. 1984. 福建省大合变质带初步研究. 学士学位论文. 南京: 南京大学地球科学系, 1 – 49
- 陈衍景. 1986. 板块敛合远距离效应的类型及实例. 南京大学五二〇学术报告会论文集. 南京: 南京大学地球科学系, 12 – 15
- 陈衍景, 富士谷, 陈泽铭, 孙冶东. 1990. 河南省金矿成矿构造模式. 河南地质情报, (2): 9 – 14
- 陈衍景, 张程宁. 1991. 西准噶尔地区金矿成矿模式. 长春地质学院学报, 21(1): 61 – 66
- 陈衍景, 富士谷, 谢鸿森, 裴愉卓. 1991. 大陆内部远离 B 型俯冲带的斑岩矿床形成模式. 第四届全国矿物岩石地化学学术会议摘要. 北京: 地震出版社, 253 – 255
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 1 – 234
- 陈衍景, 富士谷, 吴德华, 吴锡丹, 靖军. 1995. 新疆北部金矿化与碰撞造山作用的耦合及金等矿床的分布规律. 黄金地质, 1(3): 8 – 16
- 陈衍景. 1996. 碰撞造山体制的流体演化模式: 理论推导和东秦岭金矿床氧同位素证据. 地学前缘, 3(4): 282 – 289
- 陈衍景, 秦善, 李欣. 1997. 中国矽卡岩型金矿的成矿时间, 空间地球动力学背景和成矿模式. 北京大学学报(自然科学版), 33(4): 456 – 466
- 陈衍景. 1998. 影响碰撞造山成岩成矿模式的因素及其机制. 地学前缘, 5(增刊): 109 – 118
- 陈衍景, 杨泽军. 1998. 碰撞造山成岩成矿模式的运用方法. 矿床地质, 17(增刊): 83 – 86
- 陈衍景, 陈华勇, 刘玉琳, 郭光军, 赖勇, 秦善, 黄宝玲, 张增杰, 隋颖慧, 李超, 李震, 李萍, 李欣, 王海华, 朱梅湘, 高秀丽, 魏倚英. 1999. 碰撞造山过程内生矿床作用的研究历史和进展. 科学通报, 44(16): 1681 – 1689
- 陈衍景. 2002. 中国区域成矿研究的若干问题及其与陆陆碰撞的关系. 地学前缘, 9(4): 319 – 328
- 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
- 陈衍景, 张静, 张复新, Pirajno F, 李超. 2004. 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. 地质论评, 50: 134 – 152
- 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
- 陈衍景, 倪培, 范洪瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 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, 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(6): 1059 – 1073
- 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, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题. 岩石学报, 25(11): 2695 – 2726
- 陈衍景. 2010. 初论浅成作用和热液矿床成因分类. 地学前缘, 17(2): 27 – 34
- 邓小华, 李文博, 李诺, 糜梅, 张颖. 2008. 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
- 侯增谦. 2010. 大陆碰撞成矿论. 地质学报, 84: 30 – 58
- 胡受奚, 赵懿英, 徐金方芳, 叶英. 1997. 华北地台金矿地质. 北京: 科学出版社, 1 – 220
- 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 黎世美. 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, 1 – 558
- 黄汲清. 1979. 试论地槽褶皱带的多旋回发展. 中国科学, 9(4): 384 – 397
- 科瓦列夫. 1980 (Kovalev AA. 1978). 板块与找矿. 见: 锁林译. 北京: 地质出版社, 1 – 263
- 李春昱, 郭令智, 朱夏. 1986. 板块构造基本问题. 北京: 地震出版社
- 李华芹, 谢才富, 常海亮. 1998. 新疆北部有色金属贵金属矿床成矿作用年代学. 北京: 地质出版社, 1 – 264
- 李晶, 陈衍景, 刘迎新. 2004. 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. 矿物岩石, 24(3): 93 – 102
- 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, 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. 2009. 秋树湾和雷门沟斑岩矿床成矿流体与铼钨同位素研究. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 1 – 110
- 李诺, 陈衍景, 倪智勇, 胡海珠. 2009. 河南省嵩县鱼池岭斑岩钼矿床成矿流体特征及其地质意义. 岩石学报, 25(10): 2509 – 2522
- 刘家军, 刘光智, 廖延福. 2008. 甘肃寨上金矿床中白钨矿矿体的发现及其特征. 中国地质, 35(6): 1113 – 1120
- 鲁安怀, 吕古贤, 王文正. 1998. 文登南部陆陆碰撞与流体成矿. 地球学报, 19(2): 187 – 194
- 马福臣, 田兴有, 刘长春, 应思淮. 1992. 地质科学基础研究稳定发展的几个关系. 地球科学进展, 7(3): 97 – 100
- 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
- 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
- 祁进平, 赖勇, 任康绪, 唐国军. 2006. 小秦岭金矿田成因的铼同位

- 素约束. 岩石学报, 22: 2543-2550
- 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单矿物铋-锑同位素组成特征. 岩石学报, 25(11): 2843-2854
- 芮宗瑶, 侯增谦, 曲晓明, 张立生, 王龙生, 刘玉琳. 2003. 冈底斯斑岩铜矿成矿时代及青藏高原隆升. 矿床地质, 22(3): 217-225
- 涂光炽, 丁抗. 1986. 全球性第三条汞锑矿带——秦岭-中亚细亚汞锑成矿带. 地球化学文集. 北京: 科学出版社, 8-13
- 王德滋, 任启江, 邱检生. 1998. 中国东部与中生代陆相火山作用及其有关金成矿的地质学和地球化学. 见: 胡受奚, 王鹤年, 王德滋, 张景荣主编. 中国东部金矿地质学及地球化学. 北京: 科学出版社, 267-338
- 谢才富, 李华芹, 常海亮. 1998. 东天山石英滩金矿: 一个碰撞造山期的浅成热液金矿. 矿床地质, 17(增刊): 425-428
- 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): 2983-2994
- 杨永飞, 李诺, 杨艳. 2009b. 河南省栾川南泥湖斑岩型钼(钨)矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 25(10): 2550-2562
- 杨永飞, 李诺, 王丽娟. 2011. 河南省东沟超大型钼矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 27(5): 1453-1466
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 金福全, 周询若, 万天丰, 周宗桂. 1992. 长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究. 矿床地质, 11(1): 1-11
- 翟裕生, 姚书振, 蔡克勤. 2011. 矿床学. 第三版. 北京: 地质出版社, 1-369
- 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, 1-120
- 张静, 陈衍景, 张复新, 李超. 2002. 陕西金龙山卡林型金矿带成矿流体地球化学研究. 矿床地质, 21(3): 283-291
- 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, 杨艳, 胡海珠, 王志光, 李国平, 李忠烈. 2009. 河南银洞沟造山型银矿床碳硫铅同位素地球化学. 岩石学报, 25(11): 2833-2842
- 张莉, 杨荣生, 毛世东, 鲁颖淮, 秦艳, 刘红杰. 2009. 阳山金矿床铋铅同位素组成特征与成矿物质来源. 岩石学报, 25(11): 2811-2822
- 张颖, 陈衍景, 祁进平, 冷成彪, 赵成海. 2010. 陕西旬阳公馆-青铜沟汞锑矿床地球化学研究. 矿物学报, 30(1): 98-106
- 郑有业, 王保生, 樊子琿, 张华平. 2002. 西藏冈底斯东段构造演化及铜金多金属成矿潜力分析. 地质科技情报, 21(2): 55-60
- 周涛发, 岳书仑. 1998. 长江中下游铜金成矿带主要研究进展. 矿床地质, 17(增刊): 149-152