

文章编号: 0258-7106 (2005) 03-0193-13

大陆动力学演化与成矿研究: 历史与现状*

——兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用

毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张作衡, 王义天, 王志良, 赵财胜, 杨富全, 李厚民

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 地球动力学演化过程与成矿作用是当今矿床学研究的前沿。文章回顾了自 20 世纪 60 年代以来, 有关大陆动力学演化与成矿的研究历史和当前的研究动向。综述了几个研究大阶段, 即: 海底喷流成矿作用、大陆边缘成矿作用、板内成矿作用及地质历史演化过程的大陆汇聚或增生与多期次成矿。同时, 以华南地区为例, 将大陆侧向和垂向增生作为切入点, 阐述了华南世界级有色、稀有、贵金属成矿省在地质历史过程中的成矿作用, 并提出在该成矿省进一步实现找矿突破的重要科学问题。

关键词 地质学; 区域成矿作用; 大陆动力学; 海底成矿作用; 大陆成矿; 大陆增生; 华南地区; 综述

中图分类号: P611

文献标识码: A

矿床作为一种有经济意义的特殊类型的岩石, 是一定地质事件的产物。每一套矿产组合必定产出于一定的地质环境中, 它们的区域分布特点和规律与地球演化过程中某些特殊事件密切相关。换一句话说, 矿床及其组合的产出和分布指示着特定的地球动力学事件。现代地质勘查和找矿越来越依赖于科学技术的进步, 实施新技术找矿的前提是对成矿环境的厘定以及对不同环境中成矿系统的确认和与之相应的矿床模型的构筑。所以, 无论是学术界还是勘查界始终将成矿环境的探索放在首位。在过去的几年中, 以大陆动力学演化与成矿为目标, 在全球进行了大量而系统的研究工作, 中国针对 3 大构造-成矿域的 3 个国家重点基础研究发展规划项目 (973) 先后实施, 取得了一系列重要进展。本文试用近年取得的资料, 比较系统地综述了地球动力学演化过程与成矿作用的研究历史和现状, 重点论述了中国最大的成矿省——华南地区的大陆增生与成矿研究现状及其存在的问题。

1 现代海底成矿作用的观察与研究

20 世纪 60 年代以前, 矿床学的主要研究内容是对矿床本身的描述, 探讨与矿床有关的岩石和控矿构造特征, 同时按照成矿元素组合、与矿床有关的岩石类型和矿床的形成温度对矿床进行分类。20 世纪 60 年代以后, 矿床学家越来越注意矿产组合的区域分布规律与构造演化的关系, 例如, 在地

槽开裂早期有基性-超基性岩浆活动, 并伴随着铬铁矿矿床和含黄铁矿型铜矿床的形成; 而在地槽褶皱回返的晚期则有大量花岗岩浆活动, 并伴随有与之相关的稀有金属和钨锡矿床的形成 (Smirnov, 1977)。20 世纪 60 ~ 70 年代, 板块构造研究的快速进展, 以及发现海槽、海沟和洋中脊正在以喷流作用方式形成的块状金属硫化物矿床 (Degens et al., 1969; Shanks et al., 1977; Norman et al., 1983), 推动了共生矿床研究的发展。人们通过重新思考和深入研究, 发现原来与岩浆活动关系不明确的一些矿床, 它们的成矿方式可能类似于现代海底可以看到的成矿作用, 这些矿床是洋中脊、海沟、海槽或弧后盆地喷流作用的产物。按照赋矿围岩, 这类矿床可以分为以火山岩为主岩的块状硫化物矿床和以沉积岩为主岩的块状硫化物矿床 (Hutchinson, 1973; Lambert, 1976; Turner et al., 1978; Large, 1980; Franklin et al., 1982), 例如, 在塞浦路斯确认的代表形成于古洋脊环境的、与蛇绿岩有关的块状硫化物矿床 (Adamides, 1979), 在日本发现的形成于岛弧环境的黑矿型块状硫化物矿床 (Sato, 1974)。在大量研究的基础上, Sawkins (1976) 和 Hutchinson (1980) 提出贱金属块状硫化物矿床可以指示构造演化环境。也就是说, 在地球不同部位 (包括洋中脊、海槽、弧前、弧后和大陆边缘凹陷) 产出有不同类型的矿床组合, 这些矿床组合及其成因类型又是地球动力学过程的良好指示。80 年代初, 《矿床与全球构造环境》 (Mitchell et al., 1981) 和《矿床与板块构造》 (Sawkins, 1984) 专著先后问世。这两部专著基于 Wilson (1968) 的板块构造演

* 本文得到国家自然科学基金重点基金 (40434011) 和国家自然科学基金青年基金 (40402011)、国家重点基础研究发展规划项目 (G1999043211 和 G1999043216) 的联合资助

第一作者简介 毛景文, 男, 1956 年生, 研究员, 主要从事矿床和地球化学研究。E-mail: jingwenmao@263.com。

收稿日期 2005-03-14; 改回日期 2005-04-19。张绮玲编辑。

化旋回研究,全面总结了不同构造环境(包括大陆热点、裂谷和拗拉槽、被动大陆边缘和内部盆地、海洋环境、俯冲环境、碰撞造山环境和转换断层、大陆地壳线性断裂)中的矿床产出特征和分布规律。尽管是一个初步的轮廓,但是它们奠定了现代地球动力学演化与成矿作用的基础。

2 大陆汇聚过程的成矿作用

20 世纪 80 年代,对同生矿床的研究达到了空前的高潮。通过现代与古代成矿作用的类比,较准确地厘定了大多数同生矿床的形成环境和过程(翟裕生等, 1999)。与此同时,地处板块汇聚带大陆边缘一侧的环太平洋成矿带——全球最大的跨洲际巨型成矿带引起了大家的高度重视。研究的重点集中于以下问题:如此多的斑岩铜矿、浅成低温热液型铜金矿和其他与花岗岩活动有关的矿床是如何形成的?其成矿环境和控矿的主导因素是什么? Sillitoe (1972) 首先提出了斑岩铜矿形成于板块俯冲带的大陆边缘, Mitchell (1973) 提出大洋板块俯冲的角度对于斑岩铜矿的形成及其物质组分有着明显的制约。近 10 年来,通过对安第斯大陆边缘和西南太平洋岛弧的岩石学研究和地球物理探测,发现在汇聚活动大陆边缘,下插洋壳板块性质的变化制约着岩浆活动和成矿作用的发生:俯冲板块由正常倾斜变成缓倾斜或平坦再到正常倾斜时,在平坦处发生脱水;而在由平坦处向正常倾斜转折时,软流圈物质上涌。这些上涌物质与含水岩石圈发生反应,生成大面积壳幔同熔型岩浆,然后上侵形成火山-岩浆弧(James et al., 1999)。通过航磁调查,可以在这些岩浆活动区清楚地看出异常(Behn et al., 2001),这种异常正是寻找潜在大型矿集区的重要标志。当俯冲板块下插时一旦被撕裂(tear up)、开天窗(window)或后卷(roll back),软流圈物质将直接进入下地壳,导致下地壳与洋壳同熔形成花岗质岩浆,然后上侵到地壳浅部形成岩浆岩及其有关的斑岩铜矿和斑岩-浅成低温热液型铜金矿床,甚至在剪切带中出现中温石英脉型金矿床(Kerrick et al., 2000; Sillitoe et al., 2003)。

在大陆板块碰撞造山期间,由于岩石圈在缩短,一般很少伴随有矿化作用(Guild, 1972)。在 Mitchell 和 Garson (1981) 及 Sawkins (1984) 的专著中虽然把与碰撞造山有关的矿床作为一章描述,但是,所列举的事例大多数为与后碰撞花岗岩有关的钨锡矿床及一些前陆盆地的同生 U-V 矿床和砂岩铀矿。即使在 Seltmann 等 (1994) 主编的《碰撞造山带中的成矿作用》专著中,所有论文讨论的钨锡和稀有金属矿床都是与后碰撞花岗岩有关的成矿作用之结果。在此基础上, Groves 等 (1998) 和 Goldfarb 等 (1998) 提出了造山型金矿的概念,强调造山过程、剪切带控矿和变质流体成矿 3 个要素。Goldfarb 等 (2001) 进一步全面总结了全球造山型金矿在地球历史中的产出和分布规律,提出每一次造山运动必然是造山型金矿形成的高峰期。由于对造山型金矿的定义不够严格,且大多数金矿的成矿年龄明显晚于造山过程,因而越来越多的学者呼

吁放弃使用这个概念。陈衍景 (1996; 1999) 运用 Jamieson (1991) 的碰撞造山 $P-T-t$ 轨迹提出成矿作用出现在由挤压向伸展的转变时期; Marignac 和 Coney (1999) 通过对法国中央高原区域金属矿床的研究指出:“阿尔卑斯和喜马拉雅的研究结果表明,最重要的成矿作用不是发生在碰撞过程中,而是碰撞后的伸展过程中。”事实上,造山带中绝大多数矿床并不产生于造山期而是产生于后造山的伸展期,例如,中亚南天山世界级巨型金矿成矿带(Yakubchuk, 2001; 毛景文等, 2002)、中国天山和阿尔泰山地区的矿床都是如此,大规模成矿作用出现在 290 ~ 270 Ma, 晚于碰撞峰期 23 ~ 20 Ma (李华芹等, 1998; Mao et al., 2004a; 2005c)。

3 陆内伸展体制内的大规模成矿作用

得益于放射性同位素测年技术的快速发展和精度的提高,尤其是 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、Re-Os 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素方法的广泛运用,越来越多矿床精确年龄的测定使人们有机会进一步认识一些难以厘定的成矿环境。从目前研究来看,陆内伸展,包括其他大环境(例如,碰撞造山)中的伸展和松弛构造,是形成大型矿集区及大矿的最有利环境,也是当今全球成矿地球动力学研究的前沿。伸展体制(extension system)包括:①被动大陆边缘弧后伸展带;②活动大陆边缘岩浆-火山弧后伸展带;③后碰撞伸展带;④拉分走滑盆地;⑤板内热点与地幔柱活动区。

对北美科迪勒拉造山带东侧发育的世界级卡林型金矿、密西西比河谷型铅锌矿、浅成低温热液金和银矿以及一些大型斑岩铜矿的成矿环境过去一直争论不休,近几年的同位素精确测年证明这些矿床均形成于 34 ~ 42 Ma,成矿环境为造山带弧后伸展盆地(Hofstra et al., 2000; Howard, 2003; Bettles, 2002)。Hofstra 等 (2000) 进一步推测这些伸展盆地可能下伏有黄石地幔柱,地幔柱活动导致变质热穹隆和拆离断裂的发育,成矿流体为变质流体而不是通常认为的大气降水。

过去对前寒武纪金矿和西澳大利亚的研究,认为它们形成于地体增生过程,最近的辉钼矿系统测年数据表明其形成时代均晚于碰撞峰期,而与后造山岩浆活动一致,因而提出太古宙金矿是后造山伸展环境的产物(Stein H., 2002 个人交流)。Qiu 和 Groves (1999) 通过对西澳 Yilgarn 地盾中一系列世界级金矿的研究,剖析了前人对成矿环境的认识,提出了大规模成矿作用与岩石圈拆沉的耦合关系。Huston 等 (2002) 在 Pilbara 地体北部研究时指出,多期次成矿事件往往与火山-岩浆侵入活动及其变形期次相吻合,它们都与伸展有关,或在裂谷中,或在拉分-弧后盆地中,或在岩浆底辟位引起的穹隆中。

即使在大陆边缘造山带中,大型矿集区并不出现在岩石圈挤压带中而是在走滑断裂的拉分部位或张性撕裂部位(Garza et al., 2001)。三江地区和扬子克拉通西缘的中新生代大型矿集区主要产出在一系列走向南北的走滑拉分盆地

中,例如囊谦多金属矿集区、玉龙斑岩铜矿集区、兰坪-思茅 Pb-Zn-Cu 矿集区和临沧锆铀煤矿集区等。它们出现在西藏高原隆升过程产生的走滑拉分盆地中(王登红等,2002;侯增谦等,2004)。Drew(2003)通过对地震产生的断裂系统的观察和研究,建立了走滑拉分盆地控制斑岩铜矿的成矿模型。在秘鲁至智利的巨型斑岩铜矿带东侧的中生代火山盆地中,存在一个中生代铁氧化物-铜-金矿带,包括脉状-热液角砾岩型-交代层状砂卡岩型矿化。Sillitoe(2003)认为这条与主弧平行的伸展带与俯冲板块后卷相呼应。

在执行 973 项目时,笔者对中国大陆中生代及局部晚古生代成矿作用及其地球动力学背景进行了比较系统的研究,提出了中国北方中生代岩石圈伸展与大规模成矿相耦合的地球动力学模式(毛景文等,2003a;2005a)以及后碰撞过程与大规模成矿、同碰撞过程中的走滑拉分和局部伸展与大规模成矿等成矿地球动力学模型(毛景文等,2005b),论证了岩石圈伸展与大规模成矿的关系。

4 地质历史中的大陆增生与成矿

随着大陆动力学与成矿作用研究的持续深入,发现大陆中的爆发式成矿作用不仅在空间上表现为非均一性,而且在时间上也有明显的不均一性。Goldfarb(2001)详细研究了全球金矿成矿事件的时空分布,发现自太古宙以来,出现过 5 次金矿爆发成矿,恰好与超大陆聚合在时间上相吻合,进而完善和充实了碰撞造山与金矿大规模成矿的理论。就同一个地区而言,成矿作用也并不是在同一时间发生,例如中亚北天山的大规模成矿作用发生在石炭纪,而南天山则发生于二叠纪。Yakubchuk(2003)指出导致这种矿产资源分布特点的根本因素是地体发生了多次侧向增生。汤中立等(2002)和毛景文等(2003b)对北祁连山进行研究时,确定该区自中元古代以来出现过 9 次成矿作用,其中的两次大爆发期与大陆增生密切相关。大陆增生通常表现为侧向和垂向增生,大陆侧向增生通常为从大陆内部向边部迁移,相应的成矿时代从古到新。Hart 等(2002)研究阿拉斯加西南边缘成矿时举出一个很好的例证,它与陈毓川等(1995)研究江南古陆南缘多金属成矿得出的时空分布规律可谓异曲同工。大陆垂向增生的特点有 2 个:其一是地幔柱区,大量溢流玄武岩的分布反映了深部岩浆喷溢到地表,导致地壳垂向增生,并伴随有与镁铁质-超镁铁质岩浆有关的矿床的发育,例如 Noril'sk 超大型铜镍硫化物矿和攀枝花大型钒钛磁铁矿床的产出;其二是地幔岩浆底侵与下地壳相互作用,形成花岗岩岩浆,之后上侵定位到地壳内部而引起大陆地壳增生,例如 320~300 Ma 中亚-新疆-蒙古造山的大陆地壳增生事件,但是,该地带的大陆增生事件没有伴随明显的矿化作用。总之,大陆增生与成矿作用的研究刚刚开始,通过系统和深入的研究,必将更加全面地认识大陆地球动力学过程和矿产资源时空分布的规律性。

5 华南地区大陆增生与成矿

中国在执行 973 计划以来,先后设立了 3 个项目,即“大规模成矿作用与大型矿集区预测”、“中国西部中亚型造山与成矿”和“印度与亚洲大陆主碰撞带成矿作用”,分别对东部中生代、西北部晚古生代和青藏高原南部新生代大陆成矿作用及其相应的地球动力学背景进行研究,取得了一系列重要进展,全面推动了中国的矿产资源研究,上了一个大台阶。这 3 个研究项目的共同点是它们各自集中在某些特定的地区和时间段。然而,在不少地区的地质历史中,成矿作用的发生并不是一次而是多期次。由于华南地区地处太平洋板块、欧亚板块与特提斯板块的接合部位,多方位、多次发生的侧向和垂向大陆增生,导致了地质历史中多期次成矿作用的发生,即使在中生代成矿也表现出非均一性。正是由于华南地区具备这些得天独厚的特点,为中国地质学家进行大陆动力学演化与成矿关系的创新性研究,从而攀登世界科学高峰提供了重要的契机。

华南地区包括扬子地块和华夏地块,两个地块之间的界线目前尚有争议,但多趋向于以绍兴-宜春-凭祥为界。华南地区是中国地质研究程度较高的地区,翁文灏先生最早关于南岭型和扬子型两类不同花岗岩的著名论述,徐克勤先生(Hsu, 1943)最早在国际刊物上介绍南岭钨矿,令世界震惊中国丰富的钨矿资源,都是华南地区的成果。一方面,由于华南地区的地质演化历史悠久而具有特殊性,进入中生代以来它又受到 3 大板块相互作用的影响,形成的特殊地质现象和一大批世界级矿床历来为地质学家所关注,研究程度不断深化,取得了一大批重要成果;另一方面,随着地质和找矿工作的深入,制约着进一步找矿评价的重大科学问题也越来越显现。主要研究进展和目前存在的问题如下。

5.1 Rodinia 超大陆聚合和裂解过程与金属元素巨量富集

扬子地块西缘的康定地轴和南缘的江南古陆以及浙西、武夷和云开古陆是华南发育的几个前寒武纪古陆。研究表明赣东北-皖南蛇绿岩的时代为 1.0 Ga(徐备等,1989;周新民等,1989;Chen et al., 1991;李献华等,1994),双溪坞岛弧为 1.0~0.9 Ga(程海,1993),扬子地块西北缘西乡岛弧的时代是 0.95~0.9 Ga(Ling et al., 2003);毛景文等(2001)通过对宝坛地区大坡岭铜镍硫化物的测定,获得 Re-Os 等时线年龄为 0.98 Ga,这些数据可能反映了中国境内 Rodinia 超大陆聚合的时代。但是,这个时代稍晚于全球各主要大陆由 Grenville 期造山带所反映的 Rodinia 超级大陆聚合的时代。一般认为 Rodinia 超级大陆在 1.3~1.0 Ga 聚合(如 Moores, 1991;Hoffman, 1991;Karlstrom et al., 1999;Burrett et al., 2000)。对于这些晚于 1.0 Ga 的造山带,存在 2 种不同的解释:①一些陆块从未成为 Rodinia 超级大陆的一部分;②Rodinia 超级大陆的最终聚合一直延续到 0.9 Ga,而不是 1.0 Ga。因此,在对 Rodinia 超级大陆限定时,必须对所谓全球性

1.0~1.3 Ga 的 Grenville 期造山带进行重新评估,特别是认真研究晚于 1.0 Ga 的造山带和经典的 1.0~1.3 Ga 的 Grenville 期造山带的关系及其在 Rodinia 聚合中的作用。Li 等(1995)详细研究了华南新元古代岩浆岩年代学、沉积盆地和岩相古地理资料,并与澳大利亚和 Laurentia 进行了对比,他们将华南置于两者之间,认为华南是连接澳大利亚和 Laurentia 的“纽带”和 Rodinia 超级大陆的“核心”。这一再造模式得到了随后一些研究的支持(如 Li Z X et al., 1999; Li X H et al., 2002)。然而,另一些研究人员则认为华南新元古代岩浆活动与岛弧和造山作用有关(周新民等,1992;Zhou et al., 2002a; 2002b; 周金城等,2003),提出扬子地块在 865~760 Ma 期间被西、西北缘和东南缘两个活动岛弧环绕,是一个被海洋岩石圈俯冲带包围的孤立陆块,而不是 Rodinia 超大陆的一部分(Zhou et al., 2002a; 2002b)。因此,华南是否是连接澳大利亚和 Laurentia 的“纽带”和 Rodinia 超级大陆的“核心”仍然需要进一步的研究,特别需要精确的年代学和古地磁资料的约束。

对 Rodinia 超级大陆裂解的动力学机制的探索还处于初步阶段。Li 等(1999)根据广西北部基性岩脉(827 Ma)与澳大利亚 Gairdner 岩墙群年龄(827 Ma)完全一致,提出在 825 Ma 前华南有一地幔柱,它引发了华南新元古代大规模的地壳抬升、去顶、大陆裂谷作用及同时期的地壳重熔,由此导致了 Rodinia 泛大陆的裂解。这个地幔柱模式得到了一系列研究的支持,如扬子地块西北缘存在约 820 Ma 铁船山组拉斑玄武岩和双峰式碱性火山岩(Ling et al., 2003)、扬子地块西缘有约 800 Ma 苏雄组双峰式火山岩(Li et al., 2002)、扬子地块广泛分布的 825~820 Ma 花岗岩(Li et al., 2003a)以及裂谷盆地的形成(Wang et al., 2003)。最近, Li 等(2003c)研究了扬子地块西缘约 750 Ma 基性岩脉的元素和 Nd 同位素地球化学特征,发现这些基性岩脉具拉斑质玄武岩的特征,与澳大利亚地幔柱成因的 Gairdner 基性岩脉和铁船山拉斑玄武岩(Ling et al., 2003)相同,根据这些地幔柱成因的基性岩脉以及扬子地块广泛的 780~750 Ma 岩浆活动,他们推测华南及邻近的 Rodinia 陆块可能存在另一个地幔柱,并注意到 Rodinia 超级大陆的大多数地区普遍存在同时代(830~740 Ma)的双峰式岩浆活动,因此进一步提出这两个地幔柱活动的时间(825~800 Ma 和 780~750 Ma)是一个超级地幔柱(mantle superplume)的两次主要爆发期。目前对这一(超级)地幔柱模式还存在争议,如 Zhou 等(2002a; 2002b)认为扬子地块新元古代岩浆活动是岛弧成因的,地幔柱模式缺乏高温熔融形成的苦橄岩等直接证据;Gu 等(2002)分析了新元古代板溪群沉积岩的元素地球化学特征,认为板溪群形成于弧后盆地,而不是板内裂谷,推论华夏地块和扬子地块的拼贴发生在 0.8 Ga;另外,华夏地块是否也存在相应的地质记录,这些都需要新的数据来进行验证。

在扬子地块西缘和南缘发育有一套大致与 Rodinia 聚合及裂解时代相同的金属矿床,包括与花岗岩有关的锡多金属

矿床(一洞、九毛和岔河)、与镁铁质-超镁铁质岩有关的铜镍硫化物矿床(宝坛)、块状硫化物铜矿(西裘)和东川铜矿等。最近,在华夏地块的武夷山隆起东侧发现了元古宙丁家山和峰岩等铅锌矿,尽管在这些矿床主矿体的上部有一些矿脉,但绝大多数表现为层状,具有同生特点。过去对上述矿床的成矿机制和分布特点曾进行过研究(毛景文等,1988;华仁民,1989;陈毓川等,1995),但是由于缺少矿床精确的成矿年龄数据,尤其是不同类型矿床在成矿时与 Rodinia 超大陆聚合和裂解的时空关系基本不清楚,直接影响到对成矿规律的全面认识和找矿方向的进一步确定。还有一些矿床类型必须进行深入研究,例如,东川铜矿长期被认为是典型的砂岩型铜矿(冉宗英,1983;华仁民,1989),但是邱华宁等(2002)翔实的 Ar-Ar 同位素测年资料显示,该矿床的成矿时代为 810~779 Ma,表明其并非是中元古代早期同生成矿作用的产物,而可能为 Rodinia 超大陆裂解时期的结果。

5.2 峨眉山幔柱:大陆垂向增生过程金属元素堆积成矿

在刚完成的“大规模成矿作用与大型矿集区预测”973 项目中,曾把“地幔柱及其成矿效应”列为课题进行研究,在地幔柱研究方面取得了以下 3 方面的重要进展:

(1) 通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 法和全岩 Ar/Ar 法对峨眉山大陆溢流玄武岩及其相关侵入岩的精确定年,将峨眉山大火成岩省的形成时间分成 3 个岩浆活动阶段:260 Ma 的起始阶段,256~254 Ma 的岩浆大规模喷发阶段和 253~251 Ma 的晚期阶段,这些不同时代的岩浆活动对应于峨眉山二叠纪地幔柱冲击作用的不同阶段。

(2) 基于对扬子地块西北缘(保兴、木里、三江口)晚古生代海相玄武岩和扬子地块西南缘(桂西-滇东)晚古生代玄武岩 10 余个柱状剖面的系统研究,初步摸清了其时空分布规律和成因。研究发现,这些原来未被认为是峨眉山玄武岩的火山岩,与传统的峨眉山玄武岩无论在化学组成上还是在时代上均十分相似,它们都是峨眉山地幔柱的产物。从而将峨眉山大火成岩省的分布范围从原来的约 30 万 km² 扩大到了目前的约 50 万 km²。

(3) 确定了峨眉山大火成岩省是地幔柱活动产物的确切证据:①首次在滇西丽江地区发现了地幔柱环境产生的层状苦橄岩;②结合现代实验岩石学资料,确定峨眉山玄武岩的高镁原始岩浆的熔融温度超过 1550℃,比正常的地幔潜能温度高 200~300℃,说明岩浆熔融过程中在峨眉山大火成岩省分布区存在异常热的地幔;③对峨眉山大火成岩省不同类型岩石的定年结果显示,峨眉山大火成岩省的形成时间范围在 10 Ma 时段,与现代实验模拟的地幔柱冲击岩石圈的时限相吻合;④通过对峨眉山大火成岩省及周边二叠纪茅口组灰岩的地层对比,发现在大火成岩省的形成过程中发生了千米尺度的地壳隆升。峨眉山大火成岩省所记录的地壳快速穹状隆起,是显生宙以来世界上 8 个大陆溢流玄武岩省中保存最好、最完整的,从而为理论预测地幔柱冲击岩石圈可导致地壳千米尺度的隆升作用提供了全球唯一的实例。这一研究成果引

起了国际地学界的极大关注和好评。

就现阶段而言,对峨眉山幔柱本身的研究已经达到世界先进或领先水平,下一步应加强它与新疆塔里木及天山地区二叠纪火山岩的对比研究,探讨两者之间的关系,它们是不是同一事件的产物。还应在松藩-甘孜地区的二叠纪溢流玄武岩开展工作,厘定这些溢流玄武岩是否为峨眉山大火成岩省的一部分。深入探讨在大陆垂向增生过程中铜镍硫化物矿床和钒钛磁铁矿矿床的形成机制及其在空间上的分布规律。在过去的研究中,由于某些原因和资金短缺,对于峨眉山幔柱成矿效应的研究很少,初步总结出在低钛玄武岩区形成与浅成侵入岩有关的铂钯矿床,例如,金宝山和杨柳坪;在高钛玄武岩区形成钒钛磁铁矿床,例如攀枝花和新街等;当岩浆向上运移过程中在地壳熔融膏盐层或金属硫化物层则形成铜镍硫化物矿床,例如力马河等。但是,这种推测需要翔实的科学研究予以证实或修正。尤其是在峨眉山这样一个出露面积较小的地幔柱区却有这么丰富多彩的矿产资源组合,为什么?它是否可能有像西伯利亚地幔柱区 Noril'sk 那样的超大型铜镍硫化物矿床或其他超大型矿床的潜力?

5.3 中生代大陆多阶段多方位增生过程与成矿大爆发

华南地区在中新生代明显受到古亚洲、特提斯和环太平洋3大构造域相互作用的影响,经历了复杂交替的挤压、拉张和走滑活动(舒良树等,2002;2004),同时在中生代中晚期出现大规模或大爆发成矿作用(毛景文等,1999;2004b;华仁民等,1999)。从地质演化历史看,三叠纪晚期(240~220 Ma)印支地块、华南地块与华北地块碰撞对接(任纪舜等,2000;张国伟等,2001),整个华南地区岩石圈大幅度加厚,之后到侏罗纪早期出现局部裂解,到白垩纪全面伸展(Li, 2000; Li et al., 2004)。由于大陆动力学演化的差异性,导致在同一时期空间上的分区性明显,在西部自中生代以来先后受到古特提斯和新特提斯板块的影响,造成大陆增生,造山带弧后盆地大面积发育;而东部在白垩纪晚期由于太平洋板块向西俯冲,在武夷-云开以东地区出现大陆边缘火山弧,而武夷-云开地区增生为一个高大山脉。与构造分区相对应,成矿作用分带性突出:在东部(主要包括闽、浙、赣、粤、湘、皖)以大规模花岗岩侵入与W、Sn、REE、Nb、Ta、Cu、Fe和Mo大爆发成矿为特征,而西部则以盆地流体成矿为主,形成罕见的Au、Pb、Zn、Sb、Hg、Ag大面积低温成矿域。

(1) 三叠纪大陆增生过程研究进展及有关问题

印支运动主要发育在东南亚及华南地区,多数学者认为东亚环太平洋主动大陆边缘的形成、发展及中国东部由古亚洲洋和古特提斯构造域向环太平洋构造域的重要转变发生在印支期。但是,对早中生代(T₁-J₂;大约250~180 Ma)华南地块所处的地球动力学背景的研究相对薄弱。普遍认为,华南地块内部构造变形和岩浆作用受其周缘地块在三叠纪对接的制约。北缘与华北地块于印支期发生深俯冲碰撞(徐树桐等,1994;张国伟等,2001);南缘古特提斯洋沿金沙江-澜沧江一带俯冲碰撞(钟大赉等,1998;莫宣学等,1998)。印支

期华南内陆以挤压为其主要背景,表现为以湘赣裂谷带为中心的背冲构造格局(Chen, 2001),其中闽西武夷山一带主体向南东逆冲推覆,而湘赣至雪峰山地区以向北西逆冲推覆为特征。华南印支期构造变形的时限初步约束在245~190 Ma之间(王岳军等,2005),吻合于下侏罗统以前地层褶皱变形、中侏罗统以来地层褶皱构造不发育的地质事实。与之相伴的是一套可能呈面状展布于湘、桂、粤、赣、闽诸省,由中上地壳物质重熔而来的印支期强过铝质-准铝质高钾花岗岩、二长花岗岩和花岗闪长岩。

南岭纬向构造体系经历了长期复杂的演变,燕山期前纬向构造带的组分以褶皱为主,印支期纬向构造带的组分则以断裂和花岗岩为主。最主要的3条EW向断裂带为:佛冈-丰良断裂带、韶关-泉州断裂带、高要-惠来断裂带。在佛冈-丰良断裂带北侧是上地幔凹陷区,南侧为上地幔变异区,沿断裂带有一系列冲断裂分布,它们一般向北倾斜,倾角陡,发育糜棱岩化、片理化和构造角砾岩带。韶关-泉州断裂带在航磁图片上呈现为EW向断裂分布的异常带,在重力图上为一条EW向展布的梯级带,其异常等值线较密集。印支运动使其强烈挤压,成为产状平缓的EW向穹窿,燕山期花岗岩沿该隆起带的脊部多次侵入。高要-惠来断裂带由一系列EW向冲断裂、隐伏基底断裂组成,伴有片理、片麻理、硅化破碎、糜棱岩化等,构造盆地发育,并有燕山期酸性、碱性岩浆多次喷出或侵入。到目前为止,对这样一些可能记录着印支大陆增生时代和动力学过程的重要现象尚没有进行解剖。

在华南地块周缘地区存在强烈的印支期俯冲/碰撞造山作用,如在华南地块北缘,扬子地块与秦岭-大别-苏鲁造山带于印支期发生深俯冲碰撞或顺时针旋转俯冲碰撞;在华南地块西南缘,古特提斯洋沿金沙江-澜沧江一带俯冲碰撞,Bentong-Raub缝合带及澜沧江一带碰撞后火山岩、蓝片岩、同碰撞型花岗岩等暗示古特提斯洋于晚二叠世-早中三叠世俯冲,羌塘-Sibumasu陆块于印支期与华南陆块碰撞拼合;在华南地块西北缘甘孜-理塘洋于印支期关闭并导致了义敦弧及龙门山前陆褶冲带的形成;在华南地块西南缘的越南中北部(如Song-Ma带)和泰国北部的变形变质作用及热年代学记录,证实了印支陆块于印支期顺时针旋转与华南陆块拼合在一起。因此,华南内陆印支期构造演化是否与华南周缘构造事件密切相关,是开展华南中生代动力学研究的一个关键问题。华南内陆在周缘构造作用的影响下是否导致了华南陆块内部的陆内俯冲或走滑旋转,该因素是否可作为华南陆内变形、构造-岩浆作用与成矿响应之间内在联系的动力学机制,是否是华南燕山期构造伸展、大量花岗岩浆侵入和巨量成矿元素富集的起因呢?这些重要的科学问题也有待于进一步厘定。

(2) 花岗岩、火山岩及基性岩墙研究新进展

华南地区花岗岩广泛分布。中科院地球化学研究所(1979)、莫柱荪(1980)和南京大学地质系(1981)研究总结了华南花岗岩类的成因及其与成矿的关系。徐克勤等(1982)提出的“同熔型”和“重熔型”花岗岩分类,与当时风靡全球的“s

型”和“Ⅰ型”花岗岩分类(White et al., 1974)以及“磁铁矿型”和“钛铁矿型”花岗岩分类(Ishihara, 1977)三角鼎立,有力地推动了世界及华南地区花岗岩的深入研究。最近几年,在华南地区确认了一些印支期花岗岩,它们主要分布于湘桂地区,主要由一套过铝质-准铝质高钾花岗岩和二长花岗岩组成,是俯冲碰撞环境下中、上地壳物质重熔的结果。这些三叠纪花岗岩类的形成可能与陆壳的推覆、叠置、加厚或同碰撞构造背景有关,形成时代为 205 ~ 235 Ma(Wang et al., 2002)。同时,印支期也存在着一些局部伸展构造背景下的岩浆作用,例如在武夷山北段发现的三叠纪碱性正长岩(Wang et al., 2003a),郭锋等(1997)在湘南发现一些印支期下地壳基性岩包体,表明华南可能存在着印支期岩石圈的伸展或基性岩浆底侵作用。到目前为止,从花岗岩类研究入手探讨华南印支期的动力学背景和过程进入了一个新的阶段。

近几年的工作发现,在闽西-赣南-粤东地区存在一个中侏罗世内陆裂谷带。它东起福建永定,经江西寻乌、陇南、全南到广东始兴,全长 250 km,宽 60 ~ 80 km,以盆地双峰式火山岩(玄武岩和流纹岩)和盆地边缘同期侵入的 A 型花岗岩和橄榄辉长岩为特征。通过单颗粒锆石 U-Pb 法、全岩⁴⁰Ar-³⁹Ar 法及 Rb-Sr 法获得了一批高精度数据,年龄范围在 165 ~ 188 Ma,峰值在 175 Ma 左右。测定的岩石类型有拉斑玄武岩、碱性玄武岩(赵振华, 1998;王岳军等, 2004)、碱性花岗岩及石英正长岩和霓辉正长岩(Chen et al., 2002; Li Z X et al., 2003)。从岩石化学上来看,中侏罗世与晚侏罗世的岩石有一定的区别,中侏罗世玄武质岩石无明显的 Nb、Ta 异常,明显不同于与俯冲作用有关的玄武质岩(McCulloch et al., 1991), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 接近 0, 锶同位素初始值相对较高, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.7065 ~ 0.7086(Li et al., 2003b; Xie et al., 2005), 与中侏罗世碱性正长岩、A 型花岗岩、钾玄岩侵入岩体、双峰式火山岩、基性岩脉、花岗闪长岩、闪长岩组合具有类似的构造环境,这些暗示中国东南部在燕山早期存在局部岩石圈伸展和裂解事件。少量的晚侏罗世玄武岩具有明显的 Nb、Ta 异常,相对为高镁质(Li et al., 2004),可能反映了由俯冲引起的增生大陆边缘环境。

白垩纪火山岩和花岗岩呈面状或线性分布并不明显,主要集中于武夷山东侧。福建沿海和台湾地区的白垩纪钙碱性花岗质岩石为钙碱性 I 型,模拟计算表明其中明显有地幔组分加入,岩浆源区存在俯冲组分(Yui et al., 1996)。白垩纪镁铁质岩具有明显的 Nb 和 Ta 负异常,锶同位素初始值相对较高且变化较大, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7051 \sim 0.7145$, 钕同位素初始值相对较低, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.5119 \sim 0.5128$, 岩浆源区存在俯冲组分(Lan et al., 1995; Li et al., 1998; 谢昕等, 2001; 葛小月等, 2003; Xie et al., 2005), 构造上明显与古太平洋板块向欧亚大陆俯冲有关(Jahn et al., 1976; 1990; Holloway, 1982; 黄莹等, 1986; Charvet et al., 1994; Lampierre et al., 1997; Zhou et al., 2000)。

岩石学研究还表明晚侏罗世—白垩纪华南为板内伸展-

裂谷环境,类似于北美的“盆岭构造”(Gilder et al., 1991; 1996; Li, 2000),花岗岩岩浆活动与岩石圈伸展有关。还发现了 3 条平行的 NE 向低 ϵ_{Nd} 、低 TDM 带,表明玄武质岩浆沿 3 条超壳断裂对地壳进行底垫,由于壳幔强烈作用而引起巨量的中酸性岩浆活动及大陆增生(Hong et al., 1998; 周新民等, 2003)。

虽然岩石学研究的快速进展推动了对华南地区中生代大陆动力学过程的认识,但还存在以下一些重要问题亟待深化:从中侏罗世的板内环境到白垩纪的俯冲大陆边缘环境,什么时间开始转换并完成的?白垩纪古太平洋板块俯冲时,在大陆边缘为什么出现几条裂谷带而不是造山带?为什么早侏罗世花岗岩和火山岩很少出现?反映了什么大陆动力学特征?导致华南东部白垩纪大面积岩石圈伸展的主要原因是什么?

(3) 矿产资源研究面临着新突破

华南地区中生代成矿的明显特征在东部表现为大花岗岩省与大规模成矿作用,而在西部是低温流体与大规模成矿作用。就研究程度来讲,东部高,西部比较低。

在华南地区,针对矿产资源的大规模科学研究始于新中国成立后的第 5 个五年计划,在对长江中下游宁芜地区与陆相火山岩有关的铁矿的研究中,提出了一个具有重要影响的宁芜玢岩铁矿成矿模式(宁芜玢岩铁矿编写小组, 1978)。与此同时,从事钨矿地质勘查的地质工作者在实践中总结出著名的赣南钨矿矿化蚀变五层楼模式。在“六五”期间实施的国家科技攻关计划中,对南岭地区的有色和稀有金属矿床进行了全面研究,划分出 5 个矿床成矿系列、6 个矿床成矿亚系列和 21 个矿床成矿模式(陈毓川等, 1989)。常印佛等(1992)和翟裕生等(1992)对长江中下游地区铜铁矿床的持续深入研究,提出了两大成矿系统的概念。国际上,对现代海底成矿作用的观察和对古代类似矿床的研究,引导了人们对华南地区远离花岗岩体的远成或超远成矿床成因的研究和思考,产生了同生沉积-后生改造的成矿理论(涂光炽, 1984; 1987; 1988)。由于超大型矿床的巨大经济效益,20 世纪 80 年代末至 90 年代初以来,超大型矿床形成过程及其背景一直是重要的科学研究项目,涂光炽等(2000)、裴荣富等(1998)和赵振华等(2003)领导的科研集体对中国大型、超大型矿床进行了深入的解剖。华南地区由于聚集大量的大型、超大型矿床,成为最主要的研究对象,这些研究取得了一些列重要进展。例如:超大型矿床与深部过程的耦合性、超大型矿床对矿床类型的选择性、超大型矿床的时空偏在性等。在刚完成的 973 项目“大规模成矿作用与大型矿集区预测”中总结了与花岗岩有关的三大成矿系统(华仁民等, 2003),还提出和论述了埃达克岩与斑岩铜矿的关系(张旗等, 2001; 2002; Wang et al., 2003b; Xiong et al., 2003)。通过项目有关课题对部分矿床年龄的系统测定,毛景文等(2003a)初步提出 170 ~ 150 Ma, 140 ~ 125 Ma 和 110 ~ 80 Ma 3 次爆发式成矿作用,并论证了它们可能与侏罗纪晚期局部伸展和白垩纪岩石圈全面大减薄相关。

在 20 世纪 80 年代,随着滇、黔、桂地区卡林型金矿的发

现,西南地区以 Au、Pb、Zn、As、Sb、Hg 为主的一个大面积低温成矿域的形成背景和过程,已经成为突出的科学问题而引起高度重视。在国家自然科学基金重点项目“低温地球化学”(涂光炽负责)和 973 项目“大规模成矿作用与大型矿集区预测”中“低温流体成矿系统”课题(胡瑞忠负责)的支持下,该方面的研究取得了明显的进展。研究表明:①大面积低温成矿作用的成矿流体为大规模运移的盆地流体;②低温矿床中的成矿物质主要来自于基底和周围地层;③大面积低温成矿作用主要发生在 155 ~ 80 Ma 之间,与区内燕山中晚期在拉张背景下由地幔上涌而形成的幔源性脉岩的时代相当;④区内各低温矿种之间在形成机制上具有相似性;⑤燕山晚期地幔上涌导致的热异常和地壳拉张引起的驱动力对驱动盆地流体大规模运移成矿,形成大面积低温成矿域起着重要的控制作用;⑥该区富成矿元素的晚元古代地层和早古生代黑色岩系的广泛发育,以及长时间大面积缺少强烈的花岗质岩浆活动,是发生大面积低温成矿的重要前提条件。最近几年,对于低温成矿域中铅锌、锑、汞矿的研究,初步证明其形成过程类似于密西西比河谷型矿床,大面积盆地流体对流循环,从围岩中萃取成矿组分,在适宜的构造空间卸载成矿。

矿产资源研究虽已取得了丰硕成果,但是仍存在下列重要科学问题亟待解决:①绝大多数矿床缺少精确年龄资料,妨碍了对成矿作用时空演化的全面认识;②对一大批大型-超大型矿床(例如:凡口、泗顶、大厂、马坑、铜陵和大宝山等)的成因争论激烈,影响建立合理的成矿模式;③花岗岩成矿系统的研究急需深化,这是厘定南岭地区不同尺度成矿分带的关键因素;④华南东部地区中生代大陆动力学事件的研究尚在进行之中,其与不同类型和不同时代矿化组合的关系尚待确定;⑤华南西部地区低温成矿域形成的动力学背景长期以来令人费解,最近毛景文等(2005b)认为其成矿动力学背景为中生代特提斯大洋板块向东俯冲的增生大陆边缘弧后伸展盆地,但是这仅仅是问题的提出。正是由于存在以上 5 个重要问题,严重地制约着人们全面客观地认识成矿规律,总结出合理的成矿动力学模型,从而也严重地制约着人们对有利找矿地段及其矿床类型的确定。

致谢 这一综合性研究成果是 2005 年 973 项目的立项报告中的部分内容,李献华、王岳军、赵振华、毛建仁、吴淦国、张德全等同仁提供了部分材料和很好的建议,涂光炽、陈毓川、李廷栋、裴荣富、翟裕生、滕吉文、任纪舜等先生在百忙之中给予了有益的指导,在此一并表示衷心的感谢。

References

- Adamides N G. 1979. The form and environment of formation of the Kalavassos ore deposits, Cyprus[A]. In: Panayiotou A, ed. Ophiolites[M]. Internal. Ophiolite Symp. Cyprus. 117 ~ 178.
- Behn G, Camus F, Carrasco P, et al. 2001. Aeromagnetic signature of porphyry copper systems in Northern Chile and its geologic implications[J]. *Econ. Geol.*, 96: 239 ~ 248.
- Bettles K. 2002. Exploration and geology, 1962-2002, at the Goldstrike property, Carlin Trend, Nevada[A]. In: Goldfarb R J and Nielsen R L, eds. Integrated methods for discovery: Global exploration in the twenty-first century[M]. USGS Special Publication, 9: 275 ~ 298.
- Burrett C and Berry R. 2000. Proterozoic Australia - Western United States (AUSWUS) fit between Laurentia and Australia[J]. *Geology*, 28: 103 ~ 106.
- Chang Y F, Liu X P and Wu C Y. 1991. The copper-iron belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 379 (in Chinese).
- Charvet J, Lapierre H and Yu Y W. 1994. Geodynamic significance of the Mesozoic volcanism of southeastern China[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 9: 387 ~ 396.
- Chen A. 2001. Mirror image thrusting in the south China orogenic belt: Tectonic evidence from western Fujian, Southeastern China[J]. *Tectonophysics*, 305: 497 ~ 519.
- Chen H. 1993. Geochemistry of Proterozoic island-arc volcanic rocks in Northwestern Zhejiang[J]. *Geochimica*, 22(1): 18 ~ 27 (in Chinese with English abstract).
- Chen J F, Foland K A, Xing F M, et al. 1991. Magmatism along the southeast margin of the Yangtze of Cathaysia blocks of China[J]. *Geology*, 19: 815 ~ 818.
- Chen P R, Hua R M, Zhang B T, et al. 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region: Petrological constraints and geodynamic settings[J]. *Science in China (Series D)*, 45: 755 ~ 768.
- Chen Y C, Pei R F, Zhang H L, et al. 1989. The geology of non-ferrous and rare metal deposits related to Mesozoic granitoids in Nanling regions. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 506 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Mao J W, Zou T R, et al. 1995. Metallogenic series of ore deposits and metallogenic evolution through geological history in North Guangxi[M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press. 1 ~ 433 (in Chinese).
- Chen Y J. 1996. Fluidization model of intracontinental collision and its metallogenic significance: Theoretical inference and evidences from gold deposits, the eastern Qinling Mountains[J]. *Earth Science Frontiers*, 3(3-4): 282 ~ 289 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Chen H Y, Liu Y L, et al. 1999. Research history and advance on endogenous metallogeny in the continental collision[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(16): 1681 ~ 1689 (in Chinese).
- Degens E T and Ross D A. 1969. Hot brines and recent heavy melt deposits in the Red Sea: A geophysical and geochemical account[M]. New York, Berlin, Heidelberg: Springer.
- Drew L J. 2003. Model of the porphyry copper and polymetallic vein family of deposits - applications in Slovakia, Hungary, and Romania[J]. *International Geology Review*, 45: 143 ~ 156.
- Faculty of Geology, Nanjing University. 1981. Different age granitoids and its relation to metallogeny in South China[M]. Beijing: Science

- Press. 1 ~ 395 (in Chinese) .
- Franklin J M, Lydon J W and Sangster D F. 1982. Volcanic-associated massive sulfide deposits[J]. *Econ. Geol.*, 75th Anniv: 485 ~ 627 .
- Garza R A P, Titley S R and Pimentel F B. 2001. Geology of the Escudida porphyry copper deposit, Antofagasta region, Chile[J]. *Econ. Geol.*, 96: 307 ~ 324 .
- Ge X Y, Li X H, Zhou H W, et al. 2003. Chronology, element geochemistry and Sr- Nd isotope of later Cretaceous mafic dikes swarms from South Hainan[J]. *Geochimica*, 32: 11 ~ 19 (in Chinese with English abstract) .
- Gilder S A, Keller G R, Luo M, et al. 1991. Timing and spatial distribution of rifting in China[J]. *Tectonophysics*, 197: 225 ~ 243 .
- Gilder S A, Gill J, Coe R S, et al. 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China[J]. *Journal of Geophysics Research*, 101 (B7): 13137 ~ 16154 .
- Goldfarb R J, Phillips G N and Nokleberg W J. 1998. Tectonic setting synorogenic gold deposits of the Pacific Rim[J]. *Ore Geology Review*, 13: 185 ~ 217 .
- Goldfarb R J, Groves D I and Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geological time: A global synthesis[J]. *Ore Geology Review*, 18: 1 ~ 75 .
- Groves D I, Goldfarb, R J, Gebre- Mariam M, et al. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of the crustal distribution and relationships to other gold deposit types [J]. *Ore Geology Review*, 13: 7 ~ 27 .
- Gu X X, Liu J M, Zheng M H, et al. 2002. Provenance and tectonic setting of the proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 72: 393 ~ 407 .
- Guild P M. 1972. Metallogeny and the new global tectonics [Z]. 24th IGC, 4: 17 ~ 24 .
- Guiyang Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1979. Geochemistry of granites from south China [M]. Beijing: Science Press. 1 ~ 421 (in Chinese) .
- Guo F, Fan W M, Li K, et al. 1997. Sm- Nd dating and petrogenesis of Mesozoic gabbro xenolith in Daoxian County, Hunan Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42: 1661 ~ 1664 (in Chinese) .
- Hart C J R, McCoy D T, Goldfarb R J, et al. 2002. Geology, exploration and discovery in the Tintina gold province, Alaska and Yukon[A]. In: Goldfarb R J and Nielsen R, eds. *Integrated methods for mineral discoveries: Global exploration in 2002* [M]. Society of Economic Geologist Special Publication. 9: 241 ~ 274 .
- Hoffman P F. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwana inside out[J]? *Science*, 252: 1409 ~ 1412 .
- Hofstra A H and Cline J S. 2000. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits [A]. In: Hagemann S G and Brown P E, eds. *Gold in 2000* [M]. *Reviews in Economy Geology*, 13: 163 ~ 220 .
- Holloway N H and North P B. 1982. Philippines: its relation to Asian mainland and role in evolution of South China[J]. *American Association Petrology Geology Bulletin*, 66: 1355 ~ 1383 .
- Hong D W, Xie X L and Zhang J S. 1998. Isotope geochemistry of granitoids in South China and their metallogeny[J]. *Resource Geology*, 48: 251 ~ 263 .
- Hou Z Q, Zhong D L and Deng W M. 2004. A tectonic model for porphyry copper-molybdenum-gold metallogenic belts on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geology in China*, 31: 1 ~ 14 (in Chinese with English abstract) .
- Howard K A. 2003. Crustal structure in the Elko-Carlin region, Nevada, during Eocene gold mineralization: Ruby-East Humboldt metamorphic core complex as a Guide to the deep crust[J]. *Econ. Geol.*, 98: 149 ~ 268 .
- Hsu K C. 1943. Tungsten deposits of southern Kiangsi, China[J]. *Econ. Geol.*, 38 (6): 431 ~ 470 .
- Hua R M. 1989. On the middle Proterozoic rifting in China and its control over stratabound copper deposits[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 13 (2): 150 ~ 160 (in Chinese with English abstract) .
- Hua R M and Mao J W. 1999. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in east China[J]. *Mineral Deposits*, 18 (4): 300 ~ 308 (in Chinese with English abstract) .
- Hua R M, Chen P R, Zhang W M, et al. 2003. Metallogenic systems related to Mesozoic and Cenozoic granitoids in South China[J]. *Science in China (Series D)*, 33: 335 ~ 343 (in Chinese) .
- Huang X, Sun S H, DePaolo D J, et al. 1986. Nd-Sr isotope study of Cretaceous magmatic rocks from Fujian province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2 (2): 50 ~ 63 (in Chinese with English abstracts) .
- Huston D L, Sun S S, Blewett R, et al. 2002. The timing of mineralization in the Archean North Pilbara terrain, Western Australia [J]. *Econ. Geol.*, 97: 733 ~ 755 .
- Hutchinson R W. 1973. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance [J]. *Econ. Geol.*, 68: 223 ~ 246 .
- Hutchinson R W. 1980. Massive base metal sulphide deposits as guides to tectonic evolution [A]. In: Strangway D W, ed. *The continental crust and its mineral deposits* [M]. Geological Association of Canada Special Paper. 20: 659 ~ 684 .
- Ishihara S. 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks [J]. *Mining Geology*, 27: 293 ~ 305 .
- Jahn B M, Chen P Y and Yan T P. 1976. Rb-Sr ages of granitic rocks in southeastern China and their tectonic significance [J]. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 86: 763 ~ 776 .
- Jahn B M, Zhou X H and Li J L. 1990. Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan: Isotopic and geochemical constraints [J]. *Tectonophysics*, 183: 145 ~ 160 .
- James D E and Sacks I S. 1999. Cenozoic formation of the Central Andes: A geophysical perspective[A]. In: Skinner, B J, ed. *Geology and ore deposits of the Central Andes* [M]. Society of Econ. Geol. Special Publication. 17: 1 ~ 26 .
- Jamieson R A. 1991. P-T-T paths of collisional orogenesis[J]. *Geologie Rundschau*, 180: 321 ~ 332 .
- Karlstrom K E, Harlan S S, Williams M L, et al. 1999. Refining Rodinia: Geologic evidence for the Australia - Western connection in the Proterozoic[J]. *GSA Today*, 9: 1 ~ 7 .
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D I, et al. 2000. The geodynamics of

- world-class gold deposits: Characteristics, space-time distribution, and origin [A]. In: Hagemann S G and Brown P E, eds. Gold in 2000 [M]. Reviews in Economic Geology, 13: 501 ~ 551.
- Lambert W. 1976. The McArthur zinc-lead-silver deposit: Features, metallogenesis and comparisons with other stratiform ores [A]. In: Wolf K H, ed. Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits [M]. Amsterdam: Elsevier. 6: 535 ~ 585.
- Lampierre H, Jahn B M, Charver J, et al. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China [J]. Tectonophysics, 274: 321 ~ 338.
- Lan C Y, Chung S L, Mertzman S A, et al. 1995. Mafic dikes from Chinmen and Liehyu islands of SE China, petrochemical characteristics and tectonic implication [J]. Journal of Geological Society of China, 38: 183 ~ 214.
- Large D E. 1980. Geological parameters associated with sediment-hosted, submarine exhalative Pb-Zn deposits: An empirical model for mineral exploration [J]. Geol. Jahrb., 40: 59 ~ 129.
- Li H Q, Xie C F, Chang H L, et al. 1998. Study on metallogenetic chronology of nonferrous and precious metallic ore deposits in Northern Xinjiang, China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 264 (in Chinese with English abstracts).
- Li X H, Zhou G Q, Zhao J X, et al. 1994. SHRIMP ion microprobe zircon U-Pb age for the NE Jiangxi ophiolite and its tectonics implications [J]. Geochimica, 23: 125 ~ 131 (in Chinese with English abstract).
- Li X H and McCulloch M T. 1998. Geochemical characteristics of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China: Age, origin and tectonic significance [A]. Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al. eds. Mantle dynamics and plate interaction in East Asia [M]. Washington: AGU, Geodynamics. 27: 405 ~ 419.
- Li X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in southeast China [J]. Journal of Asian Earth Science, 18: 293 ~ 305.
- Li X H, Li Z X, Zhou H, et al. 2002. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia [J]. Precambrian Research, 113: 135 ~ 154.
- Li X H, Li Z X, Ge W, et al. 2003a. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma [J]? Precambrian Research, 122: 45 ~ 83.
- Li X H, Chen Z G, Liu D Y, et al. 2003b. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi province, SE China, age, origin, and tectonic significance [J]. International Geology Review, 45: 898 ~ 921.
- Li X H, Chung S L, Zhou H W, et al. 2004. Jurassic intraplate magmatism in southeastern Hunan-eastern Guangxi: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, geochemistry, Sr-Nd isotopes and implications for tectonic evolution of SE China [A]. In: Malpas J, Fletcher C and Ali J R, eds. Tectonic process in the evolution of China [M]. Geological Society of London Special Publication. 226: 193 ~ 215.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. 1999. The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China [J]? Earth Planet. Sci. Lett., 173: 171 ~ 181.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. 2003c. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia [J]. Precambrian Research, 122: 85 ~ 109.
- Li Z X, Zhang L and Powell C W. 1995. South China in Rodinia: Part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia [J]. Geology, 23: 407 ~ 410.
- Ling W, Gao S, Zhang B, et al. 2003. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze Craton, South China: Implications for amalgamation and breakup of the Rodinia supercontinent [J]. Precambrian Research, 122: 111 ~ 140.
- Mao J W, Song S H, Chen Y C. 1988. Igneous rocks series and metallogenic series of tin polymetallic deposits in North Guangxi region [M]. Beijing: Beijing Sci. & Tech. Press. 1 ~ 196.
- Mao J W, Hua R M, Li X B. 1999. A preliminary study of large-scale metallogenic and large clusters of mineral deposits [J]. Mineral Deposits, 18: 291 ~ 299 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W and Du A D. 2001. Re-Os isotopic age of Cu-Ni sulphide ore in Baotan area of northern Guangxi and its geological significance [J]. Science in China (Series D), 31(12): 992 ~ 998 (in Chinese).
- Mao J W, Han C M, Wang Y T, et al. 2002. Geological characteristics, metallogenic model and criteria for exploration of the large South Tianshan gold metallogenic belt in Central Asia [J]. Geological Bulletin of China, 21(12): 858 ~ 868 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Wang Y T, Zhang Z H, et al. 2003a. 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 [J]. Sciences in China (Series D), 33(4): 289 ~ 300 (in Chinese).
- Mao J W, Zhang Z C, Yang J M, et al. 2003b. The metallogenic series and prospecting assessment of copper, gold, iron and tungsten polymetallic ore deposits in the west sector of the northern Qilian Mountains [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 437 (in Chinese).
- Mao J W, Goldfarb R J, Seltmann R, et al. 2003c. Tectonic evolution and metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan [M]. London: CERCAMS. 1 ~ 282.
- Mao J W, Konopelko D, Seltmann R, et al. 2004a. Postcollisional age of the Kumtor gold deposit and timing of Hercynian events in the Tien Shan, Kyrgyzstan [J]. Econ. Geol., 99: 1771 ~ 1780.
- Mao J W, Xie G Q, Li X F, et al. 2004b. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extensions from South China [J]. Earth Science Frontiers, 11(1): 45 ~ 56 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, et al. 2005a. Mesozoic large scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. Acta Petrologica Sinica, 21: 169 ~ 188 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Li X F, Li H M, et al. 2005b. Types and characteristics of

- endogenetic metallic deposits in Chinese orogenic belts and their metallogenetic process[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(3) : 342 ~ 372 (in Chinese with English abstract) .
- Mao J W, Goldfarb G J, Wang Y T, et al. 2005c. Late Paleozoic base and precious metal deposits, East Tianshan, Xinjiang, China: Characteristics and geodynamic setting[J]. *Episodes*, 28(1) : 23 ~ 36 .
- Marignac C and Cuney M. 1999. Ore deposits of the French Massif Central: Insight into the metallogenesis of the Variscan collision belt [J]. *Mineralium Deposita*, 34 : 472 ~ 504 .
- McCulloch M T and Gamble T A. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism[J]. *Earth Planet Science Letter*, 102 : 358 ~ 374 .
- Mitchell A H G. 1973. Metallogenic belts and angle of dip of Benioff zones [J]. *Nature*, 245 : 49 ~ 52 .
- Mitchell A H G and Garson M S. 1981. Mineral deposits and global tectonic settings[M]. London: Academic Press Inc. 1 ~ 405 .
- Mo X S, Ye B D, Pan W Z, et al. 1980. Geology of granites in Nanling regions[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 363 (in Chinese) .
- Mo X X, Shen S Y, Wei Q R, et al. 1998. The relation of lava-ophiolite to mineralization from medium-south segment in "three river"[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 130 (in Chinese with English abstract) .
- Moore E W. 1991. Southwest US-East Antarctic (SWEAT) connection: A hypothesis [J]. *Geology*, 19 : 425 ~ 428 .
- Ningwu Research Group. 1978. Porphyry iron deposits in Ningwu area [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 196 (in Chinese) .
- Norman W R, Morton J L, Koski R A, et al. 1983. Active hydrothermal veins and sulfide deposits on the southern Juan de Fuca Ridge [J]. *Geology*, 11 : 158 ~ 163 .
- Pei R F, et al. 1998. Metallogenic preferentiality and exceptional metalotect convergence of giant ore deposits in China[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 416 (in Chinese with English abstract) .
- Qiu H N, Wijbrans J R, Li X H, et al. 2002. New ^{40}Ar - ^{39}Ar evidence for ore-forming process during Jinning-Chenjiang period in Dongchuan type copper deposits, Yunnan Province [J]. *Mineral Deposits*, 21 : 129 ~ 136 (in Chinese with English abstract) .
- Qiu Y and Groves D I. 1999. Late Archean collision and delamination in the southwestern Yilgarn craton: The driving force for Archean orogenic gold mineralization [J]. *Econ. Geol.*, 94 : 115 ~ 122 .
- Ran C Y. 1983. Genetic model of Dongchuan-type stratbound Cu deposit [J]. *Science in China (Series B)*, (3) : 249 ~ 257 (in Chinese) .
- Ren J S, Wang Z X, Chen B W, et al. 2000. View on China tectonics from the globe: brief introduction of the tectonics map of China and adjacent area[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 50 (in Chinese with English abstract) .
- Sato T. 1974. Distribution and geological setting of the Kuroko deposits [J]. *Mining Geology, Special Publication*, 6 : 1 ~ 9 .
- Sawkins F J. 1976. Massive sulfide deposits in relation to geotectonics [A]. In: Strong D F, ed. *Metallogeny and plate tectonics* [M]. Geol. Assoc. Canada Special Publication. 14 : 221 ~ 240 .
- Sawkins F J. 1984. Metal deposits in relation to plate tectonics [M]. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag. 1 ~ 325 .
- Seltmann R, Kampf H and Möller P. 1993. Metallogenesis in collisional orogens[M]. Potsdam: GeoForschungs Zentrum Potsdam. 1 ~ 434 .
- Shanks W C and Bischoff J L. 1977. Ore transport and deposition in the Red Sea geothermal system: A geochemical model[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41 : 1507 ~ 1519 .
- Shu L S and Zhou X M. 2002. Late Mesozoic tectonism of southeast China[J]. *Geological Review*, 48(3) : 249 ~ 260 (in Chinese with English abstract) .
- Shu L S, Zhou X M, Deng P, et al. 2004. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic basins in southeastern China[J]. *Geological Bulletin of China*, 23 : 876 ~ 884 (in Chinese with English abstract) .
- Sillitoe R H. 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view [J]. *Mineralium Deposita*, 38 : 787 ~ 812 .
- Sillitoe R. H. 1972. A plate tectonic model for porphyry copper deposits [J]. *Econ. Geol.*, 67 : 184 ~ 197 .
- Smirnov V I. 1977. Ore deposits of the USSR[M]. London: Pitman .
- Tang Z L, Bai Y L, Xu Z H, et al. 2002. Metallogenic systems and metalotectonic dynamics in the southwest margin (the Longshoushan Mountains and the Qilianshan Mountains) of North China paleocontinent[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 372 (in Chinese with English abstract) .
- Tu G C, et al. 1984. Geochemistry of strata-bound deposits in China(1) [M]. Beijing: Science Press. 1 ~ 354 (in Chinese) .
- Tu G C, et al. 1987. Geochemistry of strata-bound deposits in China(2) [M]. Beijing: Science Press. 1 ~ 388 (in Chinese) .
- Tu G C, et al. 1988. Geochemistry of strata-bound deposits in China(3) [M]. Beijing: Science Press. 1 ~ 299 (in Chinese) .
- Tu G C, et al. 2000. Super large mineral deposits II[M]. Beijing: Science Press. 1 ~ 569 (in Chinese) .
- Turner J S and Gustafson L B. 1978. The flow of hot saline solutions from vents in the sea floor - some implications for exhalative massive sulphide and the other ore deposits [J]. *Econ. Geol.*, 73 : 1082 ~ 1100 .
- Wang D H, Yang J M, Yan S H, et al. 2002. Cenozoic ore concentration areas in the Sanjiang region, SW China: Tectonic setting and exploration[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(2) : 135 ~ 140 (in Chinese with English abstract) .
- Wang J and Li Z X. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: Implications for Rodinia break-up[J]. *Precambrian Research*, 122 : 141 ~ 158 .
- Wang Q, Zhao J, Jian P, et al. 2003a. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Yangfang aegiriteaugite syenite in Wuyi Mountains of South China and its tectonic implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48 : 2241 ~ 2247 .
- Wang Q, Zhao Z H and Xu J F. 2003b. Petrogenesis and metallogenesis of the Yanshanian adakite-like rocks in the eastern Yangtze Block [J]. *Science in China (Series D)*, 46(Supp) : 164 ~ 176 (in Chinese with English abstract) .

- nese) .
- Wang Y J, Zhang Y, Fan W M, et al. 2002. Numerical modeling of the formation of Indo-Sinian peraluminous granitoids in Hunan Province: Basaltic underplating versus tectonic thickening [J]. Science in China (Series D), 45:1042 ~ 1056 .
- Wang Y J, Liao C L, Fan W M, et al. 2004. Early Mesozoic OIB-type alkaline basalt in central Jiangxi Province and its tectonics implications [J]. Geochimica, 33: 109 ~ 117 (in Chinese with English abstract) .
- Wang Y J, Fan W M, Liang X Q, et al. 2005. SHRIMP zircon U-Pb age for indosinic granite in Hunan Province and its petrogenesis [J]. Chinese Science Bulletin, 50 (in press) .
- White A J R and Chappell B W. 1974. Two contrasting granite types [J]. Pac. Geol., 8:173 ~ 174 .
- Wilson J T. 1968. Static and mobile earth: The current scientific revolution in the earth [J]. Proc. Am. Phil. Soc., 112:309 ~ 320 .
- Xie G Q, Mao J W, Hu R Z, et al. 2005. Jurassic Intra-plate basaltic magmatism in southeast China: Evidence from geological and geochemical characteristics of the Chebu Gabbroite in southern Jiangxi Province [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 79 (in press) .
- Xie X, Xu X S, Zou H B, et al. 2001. Trace element and Nd-Sr-Pb isotope studies of Mesozoic and Cenozoic basalts in coastal area of SE China [J]. Acta Petrologica Sinica, 17:617 ~ 628 (in Chinese with English abstract) .
- Xiong X L, Li X H, Xu J F, et al. 2003. Extremely high-Na adakite-like magmas derived from alkali-rich basaltic underplate, the late Cretaceous Zhangtang andesites in the Huichang basin, SE China [J]. Geochemical Journal, 37:233 ~ 252 .
- Xu B and Qian G S. 1989. Sm-Nd isotopic age and tectonic setting of the late Proterozoic ophiolites in Northeastern Jiangxi province [J]. Journal of Nanjing University (Geosciences), 25(3):108 ~ 114 (in Chinese with English abstract) .
- Xu K Q, Hu S X, Sun M Z, et al. 1982. On the two genetic series of granites in south-eastern China and their metallogenetic characteristics [J]. Mineral Deposits, 1(2):1 ~ 14 (in Chinese with English abstract) .
- Xu S T, Liu Y C, Wang L L, et al. 1994. The tectonic framework and evolution on Daiban Mountains [M]. Beijing: Science Press. 1 ~ 175 (in Chinese with English abstract) .
- Yakubchuk A, Seltmann R, Shatov V V, et al. 2001. The Altaids: Tectonic evolution and metallogeny [J]. SEG Letter, 46(1):1, 7 ~ 14 .
- Yakubchuk A, Seltmann R, Shatov V. 2003. Tectonics and metallogeny of the western part of the Altaid orogenic collage [A]. In: Mao J W, Goldfarb R J, Seltmann R, et al. ed. Tectonic evolution and metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan [M]. 7 ~ 16 .
- Yui T F, Heaman L and Lan C Y. 1996. U-Pb and Sr isotopic studies on granitoids from Taiwan and Chinmen-Lieyu and tectonic implications [J]. Tectonophysics, 263: 61 ~ 76 .
- Zhai Y S, Yao S Z, Lin X D, et al. 1992. Fe-Cu (Au) metallogeny of the Middle-Lower Changjiang region [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 235 (in Chinese) .
- Zhai Y S, Deng J and Li X B. 1999. Essentials of metallogeny [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 287 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang G W, Zhang B R, Yun X C, et al. 2001. Qinling orogenic belt and continental dynamics [M]. Beijing: Science Press. 1 ~ 855 (in Chinese) .
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, et al. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenetic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 17(2):236 ~ 244 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang Q, Wang Y L, Zhang F Q, et al. 2002. Adakite and porphyry copper deposits [J]. Geology and Mineral Resources of South China, (3): 85 ~ 90 (in Chinese with English abstract) .
- Zhao Z H, Bao Z W and Zhang B Y. 1998. Geochemical characteristics of basalt series of Mesozoic from south Hunan province [J]. Science in China (Series D), (Supp.): 7 ~ 14 (in Chinese) .
- Zhao Z H, Tu G C, et al. 2003. Super large mineral deposits II [M]. Beijing: Science Press. 1 ~ 631 (in Chinese) .
- Zhong D L. 1998. Paleotethyan orogenic belt in Yunnan-western Sichuan [M]. Beijing: Science Press. 1 ~ 232 (in Chinese) .
- Zhou J C, Wang X L, Qiu J S, et al. 2003. Lithogeochemistry of Mesozoic and Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks from northern Guangxi [J]. Acta Petrologica Sinica, 19(1): 9 ~ 18 (in Chinese with English abstract) .
- Zhou M F, Yan D, Kennedy A K, et al. 2002a. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. Earth Planet. Sci. Lett, 196: 51 ~ 67 .
- Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, et al. 2002b. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the Northern Margin of South China: Implications for the accretion of Rodinia [J]. Journal of Geology, 110: 611 ~ 618 .
- Zhou X M, Zou H B, Yang J D, et al. 1989. Sm-Nd isochron age of Fuchuan ophiolite suite in Shexian county, Anhui province and its geological significance [J]. Chinese Science Bulletin, 34:1243 ~ 1245 (in Chinese) .
- Zhou X M and Zhu Y H. 1992. Magmatic mixing in Jiangshan-Shaoxin fault and Precambrian geology at its two sides [J]. Science in China (Series B), 3:296 ~ 303 (in Chinese) .
- Zhou X M and Li W X. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rock in SE China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [M]. Tectonophysics, 326:269 ~ 287 .
- Zhou X M. 2003. My thinking about granite genesis of South China [J]. Geological Journal of China Universities, 9(4):556 ~ 565 (in Chinese with English abstract) .

附中文参考文献

常印佛, 刘湘培, 吴昌言. 1991. 长江中下游地区铜铁成矿带 [M].

- 北京:地质出版社,1~379.
- 陈衍景,1996.陆内碰撞造山体制的流体作用模式及与成矿的关系——理论推导和东秦岭金矿床的研究结果[J].地学前缘,3(3-4):282~289.
- 陈衍景,陈华勇,刘玉琳,等,1999.碰撞造山过程内生矿床成矿作用的研究历史和进展[J].科学通报,44(16):1681~1689.
- 陈毓川,裴荣富,张宏良,等,1989.南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质[M].北京:地质出版社,1~506.
- 陈毓川,毛景文,邹天人,等,1995.桂北地区矿床成矿系列和成矿历史演化轨迹[M].南宁:广西科学技术出版社,1~433.
- 程海,1993.浙西北晚元古代岛弧火山岩的地球化学研究[J].地球化学,22(1):18~27.
- 葛小月,李献华,周汉文,等,2003.琼南晚白垩世基性岩墙群的年代学、元素地球化学元素和 Sr-Nd 同位素研究[J].地球化学,32:11~19.
- 郭锋,范蔚茗,林舸,等,1997.湘南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨[J].科学通报,42:1661~1664.
- 侯增谦,钟大赉,邓万明,2004.青藏高原东缘斑岩铜钼金成矿带的构造模式[J].中国地质,31:1~14.
- 华仁民,1989.中国元古代裂谷作用及其对层控铜矿床的控制[J].大地构造与成矿学,13(2):150~160.
- 华仁民,毛景文,1999.试论中国东部中生代成矿大爆发[J].矿床地质,18(4):300~308.
- 华仁民,陈培荣,张文兰,等,2003.华南中-新生代与花岗岩类有关的成矿系统[J].中国科学(D辑),33:335~343.
- 黄萱,孙世华,DePaolo D J,等,1986.福建省白垩纪岩浆岩 Nd, Sr 同位素研究[J].岩石学报,2(2):50~63.
- 李华芹,谢才富,常海亮,等,1998.新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学[M].北京:地质出版社,1-264.
- 李献华,周国庆,赵建新,等,1994.赣东北蛇绿岩的离子探针锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J].地球化学,23:125~131.
- 毛景文,宋叔和,陈毓川,1988.桂北地区火成岩系列和锡多金属矿床成矿系列[M].北京:北京科技出版社,1~196.
- 毛景文,华仁民,李晓波,1999.浅议大规模成矿作用与大型矿集区[J].矿床地质,18(4):291~299.
- 毛景文,杜安道,2001.广西宝坛地区铜镍硫化物矿石 982 Ma 铼-钨同素年龄及其地质意义[J].中国科学(D辑),31(12):992~998.
- 毛景文,韩春明,王义天,等,2002.中亚地区南天山大型金矿带的地质特征、成矿模型和勘查准则[J].地质通报,21(12):858~868.
- 毛景文,张作衡,余金杰,等,2003a.华北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[J].中国科学(D辑),33(4):289~300.
- 毛景文,张招崇,杨建民,等,2003b.北祁连山西段铜金铁钨多金属矿床成矿系列和找矿评价[M].北京:地质出版社,1~437.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,等,2004b.华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J].地学前缘,11(2):45~56.
- 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和相应的地球动力学环境[J].岩石学报,21:169~188.
- 毛景文,李晓峰,李厚民,等,2005b.中国造山带内生金属矿床类型、特点和成矿过程探讨[J].地质学报,79(3):342~372.
- 莫宜学,沈上越,朱文勤,等,1998.三江中段火山岩-蛇绿岩与成矿[M].北京:地质出版社,1~130.
- 莫柱孙,叶伯丹,潘维祖,等,1980.南岭花岗岩地质学[M].北京:地质出版社,1~363.
- 南京大学地质系,1981.华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系[M].北京:科学出版社,1~395.
- 宁芜玢岩铁矿编写小组,1978.宁芜玢岩铁矿[M].北京:地质出版社,1~196.
- 裴荣富,等,中国特大型矿床成矿偏在性与异常成矿构造聚敛场[M].北京:地质出版社,1~418.
- 邱华宁, Wijbrans J R, 李献华,等,2002.东川式层状铜矿⁴⁰Ar-³⁹Ar 成矿年龄研究:华南地区晋宁-澄江期成矿作用新证据[J].矿床地质,21:129~136.
- 冉崇英,1983.东川式层控铜矿的成矿模式[J].中国科学(B辑), (3):249~257.
- 任纪舜,王作勋,陈炳蔚,等,2000.从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明[M].北京:地质出版社,1~50.
- 舒良树,周新民,2002.中国东南部晚中生代构造格架[J].地质论评,48(3):249~260.
- 舒良树,周新民,邓平,等,2004.中国东南部中-新生代盆地特征与构造演化[J].地质通报,23:876~884.
- 汤中立,白云来,徐章华,等,2002.华北古陆西南缘(龙首山-祁连山)成矿系统及成矿构造动力学[M].北京:地质出版社,1~372.
- 涂光炽,等,1984.中国层控矿床地球化学(第一卷)[M].北京:科学出版社,1~354.
- 涂光炽,等,1987.中国层控矿床地球化学(第二卷)[M].北京:科学出版社,1~388.
- 涂光炽,等,1988.中国层控矿床地球化学(第三卷)[M].北京:科学出版社,1~299.
- 涂光炽,等,2000.中国超大型矿床 II[M].北京:科学出版社,1~569.
- 王登红,杨建民,阎升好,等,2002.西南三江新生代矿集区的分布格局及找矿前景[J].地球学报,23(2):135~140.
- 王岳军,廖超林,范蔚茗,等,2004.赣中地区早中生代 OIB 碱性玄武岩的厘定及构造意义[J].地球化学,33:109~117.
- 王岳军,范蔚茗,梁新权,等,2005.湖南印支期花岗岩 SHRI MP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示[J].科学通报,50(印刷中).
- 谢昕,徐夕生,邹海波,等,2001.中国东南沿海中-新生代微量元素和 Nd-Sr-Pb 同位素研究[J].岩石学报,17:617~628.
- 徐备,乔广生,1989.赣东北晚元古代蛇绿岩套的 Sm-Nd 同位素年龄及原始构造环境[J].南京大学学报,25(3):108~114.
- 徐克勤,胡受奚,孙明志,等,1982.华南两个成因系列花岗岩类及其成矿特征[J].矿床地质,1(2):1~14.
- 徐树桐,刘贻灿,江来利,等,1994.大别山的构造格局和演化[M].北京:科学出版社,1~175.
- 翟裕生,姚书振,林新多,等,1992.长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M].北京:地质出版社,1~235.
- 翟裕生,邓军,李晓波,1999.区域成矿学[M].北京:地质出版

- 社. 1~287.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 2001. 秦岭造山带造山过程与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社. 1~855.
- 张旗, 王焰, 钱青, 等. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 17: 236~244.
- 张旗, 王元龙, 张福勤, 等. 2002. 埃达克岩与斑岩铜矿[J]. 华南地质与矿产, (3): 85~90.
- 赵振华, 包志伟, 张伯友. 1998. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J]. 中国科学(D辑), 增刊: 7~14.
- 赵振华, 涂光炽, 等. 2003. 中国超大型矿床 II [M]. 北京: 科学出版社. 1~631.
- 中国科学院贵阳地球化学研究所. 1979. 华南花岗岩类的地球化学 [M]. 北京: 科学出版社. 1~421.
- 钟大赉, 等. 1998. 滇川西部古特提斯造山带 [M]. 北京: 科学出版社. 1~232.
- 周金城, 王孝磊, 邱检生, 等. 2003. 桂北中-新元古代镁铁质-超镁铁质岩的岩石地球化学[J]. 岩石学报, 19(1): 9~18.
- 周新民, 邹海波, 杨杰东, 等. 1989. 安徽歙县伏川蛇绿岩套的 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 34: 1243~1245.
- 周新民, 朱云鹤. 1992. 江绍断裂带岩浆混合作用及两侧的前寒武纪地质[J]. 中国科学(B辑), 3: 296~303.
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 9(4): 556~565.

Geodynamic process and metallogeny: History and present research trend, with a special discussion on continental accretion and related metallogeny throughout geological history in South China

MAO Jing-wen, XIE Gui-qing, LI Xiao-feng, ZHANG Zuo-heng, WANG Yi-tian, WANG Zhi-liang, ZHAO Cai-sheng, YANG Fu-quan and LI Hou-min
(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

Geodynamic process and metallogeny constitute an important research field all over the world. Studying the tectonic evolution process we can get to know why some groups of ore deposits occur in some specific geological settings and why large amounts of metals are accumulated in some specific places of the metallogenic belts or regions. In this paper, a review is given concerning the research work conducted in this field since 1960's. Four important periods of researches have been proposed, i.e., the observation of the submarine exhalative ore system and the study of the similarities in the geological history in the present continents, the metallogeny along the mobile continental margins, the intra-continental orogenic and extensional processes, and the continent convergence or even terrain accessory and related metallogeny throughout the geological history. Exemplified by South China comprising Cathynian and Yangtze blocks, a world-class nonferrous metallic province, the authors propose three important lateral or vertical continental accessories and ore-forming processes throughout the geological history. They include Neoproterozoic Rodinia assembly and breaking up and related Sn-Cu-Ni mineralization, E-meishan mantle plume and related Cu-Ni-Pt-Pd-V-Ti mineralization, and Late Triassic assembly of Indo-China, South China and North China cratons and related Late Jurassic-Early Cretaceous large-scale non-metallic mineralization.

Key words: geology, regional metallogenic process, geodynamic process, marine exhalative ore system, metallogeny in intra-continent, continental accretion, South China, comprehensive