

构造动力体制与复合造山作用 ——兼论三江复合造山带时空演化*

邓军¹ 葛良胜² 杨立强¹

DENG Jun¹, GE LiangSheng² and YANG LiQiang¹

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

2. 武警黄金地质研究所, 廊坊 065000

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Gold Geological Institute of CAPF, Langfang 065000, China

2012-11-01 收稿, 2013-01-16 改回.

Deng J, Ge LS and Yang LQ. 2013. Tectonic dynamic system and compound orogeny: Additionally discussing the temporal-spatial evolution of Sanjiang orogeny, Southwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4):1099–1114

Abstract The tectonic dynamic system is the base of studying on regional geotectonic evolution and metallogenetic geological environment. As one of the most concentrated regions of the global metal mineral resources and with the best abundant records of the geological tectonic evolution, orogenic belts are the primary objects of studying and explaining different tectonic dynamic system and corresponding metallogenetic environment and mineralization. The plate tectonic derived from the oceans, and it depicts and explains accretion of the continental edge and disappearing of the oceanic plates and corresponding geological phenomena, which are led by the plates tectonic mainly in horizontal action, and the geodynamic system named oceanic dynamic system; The continental tectonic depicts and explains the continental substantial accretion and disappearing and corresponding geological phenomena, which mainly happened in intracontinents and not in continental edge and mainly in vertical actions (the crust and the mantle acts each other), and the dynamic system named continental dynamic system; That the transition of from the ocean to the continent is dynamic system of coupling each other and co-action, which mainly moves in vertical active and horizontal action, and it depicts and explains the ocean switched to the continent and corresponding geological phenomena, and it named transitional dynamic systems. On the earth, different tectonic dynamic systems have the features of succeeding conversion in the same areas and coexist in different areas. Each tectonic dynamic systems can produce orogenics, therefore, at the same time there are all kinds of orogeny and orogenic belts on the earth, which can summarized four types of subduction orogeny (or orogenic belts), collision orogeny (or orogenic belts), extensional orogeny (or orogenic belts) and intracontinental orogeny (or orogenic belts) that completely reflect the orogenetic belts evolution processes. The concepts of compound orogenics scientific explain the complexity of the global orogenetic belts, and it has three means: The first is the like and unlike orogenetic belts compound (or overlaps) in space in different phases, and the second is orogenetic times compound (or stack) of the same orogenetic belts in different geological historical periods and different tectonic dynamic systems, and the third is at the same time with the natures of temporal-spatial compound orogenetic belts. Studing on Sanjiang orogeny shows it is a typical compound orogenetic belts with complex temporal-spatial configuration.

Key words Tectonic dynamic system; Orogeny; Compound; Sanjiang orogeny

摘要 构造动力体制是研究区域大地构造演化和成矿地质环境的基础,而造山带作为全球金属矿产资源集中产出的地带,同时保留了地球地质构造演化最为丰富的记录,因而用来解剖不同构造动力体制及相关成矿环境和成矿作用的主要对象。板块构造源于大洋,描述和解释的是以水平运动为主导的板块构造导致的大陆边缘增生和大洋板块消失及与其相关的地质现象,其动力学体制称为大洋动力体制;大陆构造描述和解释的主要是大陆内部而不是边缘发生的以垂直运动(壳幔相

* 本文受国家重点基础研究规划研究项目(2009CB421008)、北京市优秀博士学位论文指导教师科技项目(20111141501)、教育部长江学者和创新团队(IRT0755)和111计划(B07011)联合资助。

第一作者简介: 邓军,男,1958年生,博士,教授,博士生导师,长期从事矿床学和构造地质学研究, E-mail: djun@cugb.edu.cn

互作用)为主导的大陆物质增生和消失及其相关的地质现象,其动力学体制称为大陆动力体制;而洋陆转换则是水平和垂直运动相互耦合、共同作用的动力学体制,描述和解释的是洋陆转换及其相关的地质现象,可以将其称为转换动力体制。不同构造动力体制在全球范围内具有同区转承和异区并存特点。每一种构造动力体制都可以激发造山作用,因此,地球上同时存在着不同类型的造山作用和造山带,可以归结为俯冲造山(带)、碰撞造山(带)、伸展造山(带)和陆内造山(带)等完整反映造山带演化过程的4种类型。复合造山概念科学地描述了全球不同造山带的复杂性。它具有三种涵义,一是不同时期相同或不同类型造山带在空间上的复合(叠置);二是同一造山带在不同地质历史阶段、不同构造动力体制下造山作用的时间复合(叠加);三是同时具有时空复合特征的复合造山带。对三江造山带时空结构的解析表明,它是具有时空复合特征巨型复合造山带的典型代表。

关键词 构造动力体制;造山带;复合造山;三江

中图分类号 P541

1 引言

矿床或其组合作为一种有经济意义的特殊类型地质体,是一定地质环境的产物。现代地质勘查和找矿越来越依赖于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(毛景文等,2005)。而成矿地质环境形成与演化必须放在构造动力体制的框架中去研究,即构造动力体制是研究区域大地构造演化和成矿地质环境的前提。在过去的十几年中,以地球动力学演化与成矿环境为目标,在全球进行了大量而系统的研究工作,并取得了一系列重要进展。在传统板块构造体系中,人们着重研究的是板块构造演化历史,通过反演板块裂解、洋盆扩张、俯冲和消亡的过程,建立了一套完整且相对成熟的与汇聚(又称俯冲或增生)造山过程有关的成矿环境体系,完好地阐释了增生造山带及板块边缘的成矿系统和成矿机制。尽管在经典板块构造理论基础上的成矿理论日臻成熟,但在大陆成矿方面遇到了一系列重大难题和挑战(侯增谦,2010)。20世纪90年代以来,发展起来的大陆构造和大陆动力学理论为无法用板块构造理论来解释的巨型矿集区的形成提供了理论框架,从而发展出与大陆构造和大陆动力学相适应的大陆成矿理论。由于广布在全球大陆上的各造山带不同程度地记录了板块构造、大陆构造演化的重要过程,因此,在大陆动力学理论指导下,造山带的研究得到空前关注。近10年来,全球造山带的研究已摆脱传统地质学和经典板块观念的束缚,即由单一造山带向复合造山带研究转轨,由造山类型、造山作用向造山动力学研究聚焦,由主要关注造山作用动力学向造山作用、成矿环境与成矿作用研究延伸(邓军等,2010;杨经绥,2010)。基于上述研究,人们提出了许多关于全球构造体系和成矿环境新概念和新思维。马宗晋等(2003)提出了地球整体性构造概念,紧接着又在2004年提出大洋构造(大洋动力学)、大陆构造(大陆动力学)统一于地球整体性构造的新观点(马宗晋和高祥林,2004)。许志琴等(2008)、杨经绥等(2010)则先后关注了复合造山作用问题,提出造山作用可以发生在板块碰撞前的俯冲期(俯冲型山链)、主碰撞期(碰撞型山链)及后碰撞期(陆内型山链)。还有一些学者注意到

在碰撞造山作用后,通常都会发生不同程度的伸展作用,它不同于板内或陆内的造山作用(有关这一问题将在本文第3部分详细讨论)。同时有大量学者将研究焦点集中在造山和成矿上。姚书振等(2002)系统讨论了造山带成矿学的一些基本问题;毛景文等(2005)从海底喷流、大陆边缘和板内三个演化阶段,讨论了大陆动力学条件下的区域成矿环境和成矿作用。侯增谦(2010)通过对青藏高原碰撞造山与成矿作用的详细研究,系统提出了一套全新的大陆碰撞成矿理论,初步阐明了大陆碰撞造山带成矿系统和大型矿床形成的成矿环境和形成机制。邓军等(2012)系统阐述了三江复合造山作用过程中的成矿环境和成矿作用。对中国其他重要造山带(如中央,即秦岭-大别、燕山、江南、兴蒙等)也有许多学者进行了专门的讨论和研究。

上述研究成果极大地丰富了全球大地构造演化与成矿地球动力学环境的研究内容,同时也为解决一系列有关区域成矿,特别是大陆成矿的前沿性问题奠定了基础,推动了大陆动力学乃至全球构造学的向前发展。然而仍有一些重大的基础地质问题,其中有些甚至是基本概念框架范围内的内容尚没有达成一致意见。如从构造动力学的角度看,大洋动力学或者称板块构造学,大陆动力学或称大陆构造学它们研究的基本范围是什么?它们是如何转换的?大陆是如何演化的,它具有像板块构造那样的时间旋回和空间配置特点吗?板内与陆内是什么关系?造山带到底是如何演化的,它有哪些类型和基本过程?板块碰撞和裂谷过程是属于大陆体制还是属于大洋体制?等等。这样一些基础地质问题直接影响到全球构造理论的完整性和系统性,同时对成矿环境和成矿作用研究具有重大理论和指导意义。本文旨在以前人研究成果为基础,对全球构造动力体制和复合造山作用的一些基本问题提出认识,供大家讨论,而有关不同构造动力体制下形成的区域成矿地质环境及其专属的成矿作用将另文再行讨论。

2 全球构造动力体制

2.1 大洋动力体制

全球性的构造动力体制决定全球性的构造体系。自20

世纪50~60年代海底扩张-板块构造学说提出以来,经过几十年的丰富和发展,其理论体系日趋成熟和完善,逐渐成为统一固体地球科学领域全球性构造研究的经典学说。板块构造理论的提出,成功的回答了先前其他构造学说难以解释的一些地学问题,如大陆裂解、大洋扩张、板块俯冲、火山地震和板块(大陆)边缘成矿等。其最大的成功之处就在于解决了这些现象产生的动力来源,认为板块的相互作用是引起大地构造活动的基本原因。有关于板块构造理论的基本观点、基本理论、基本知识及其最新发展已有众多的文献加以报道,此不详述。板块构造源于大洋,描述和解释的是以水平运动为主导(水平运动激发垂直运动)的板块构造导致的大陆边缘增生和大洋板块消失及与其相关的构造、岩浆(火山)、成矿、地震和运动现象。尽管至今还没有完整理论阐明板块运动的驱动力和地幔对流机制,但基于板块运动开启自海底扩张,不妨将板块构造的动力体制称为大洋动力体制,基于大洋动力学体制研究的科学就是大洋动力学(马宗晋和高祥林,2004;李锦轶,2009)。

现代地球上,大西洋、印度洋属于大洋动力体制演化的早期阶段,太平洋中脊及东西两岸地区属于高峰期,而地中海则属于其晚期。而在地球化学的历史上,可能与超大陆旋回一致,许多地区曾经历了大洋构造动力体制的演化。如在青藏高原和西南三江地区,李光明等(2000)论证了夹于班公湖-怒江和雅鲁藏布江两条巨型板块结合带之间的冈底斯构造带,是一个经历有晚古生代-中生代复杂的多岛弧-盆系演化历史;而潘桂棠等(2001)则系统讨论了东特提斯古生代-中生代多岛弧盆系的演化过程。显然其历史上经历了典型的大洋构造动力体制的控制。

2.2 大陆动力体制

“板块构造”并不直接等价于全球构造(马宗晋和高祥林,2004;张旗,2008)。近代大陆岩石圈流变学、地震反射剖面及大陆科学钻探的成果揭示,不同于简单的大洋刚性块体,大陆岩石圈是一个不均一、不连续、具多层结构和复杂流变学特征的复合体(许志琴等,2008)。大陆下面的软流圈也没有全球意义,一些古老大陆的山根深深地插入(可达400km)地幔之中,构成稳定的大陆核心,大陆岩石圈的“壳内流层”使其刚性明显不足,并且其化学边界层和热边界层要比大洋厚得多和老得多,大陆流变学结构和演化过程十分复杂,所以,其动力学过程与大洋岩石圈是不同的。因此人们愈来愈发现运用经典的板块理论很难解释大陆地质,具有复杂流变特征的大陆岩石圈使板块构造理论“登陆”受到很大的阻力。这正如美国大陆动力学计划(1989年)所指出的“大陆物质的增生和消减过程仍然是一个谜”,“板块构造理论并未阐明大多数动力作用,特别是发生在大陆地区的作用”,所以,当20世纪90年代国际岩石圈计划从结构构造演化转向过程与动力学时,大陆动力学作为优先发展的领域就应运而生了,现已迅速成为当代地球科学的重要前沿。近十

几年来,随着大陆岩石圈流变学、现代大陆变形、热点和地幔柱理论、大陆深俯冲、岩石圈减薄、陆内造山、盆-山耦合以及大陆构造环境与陆内成矿等相互交织或关联领域研究不断取得重要进展,大陆动力学理论正在得到极大的丰富和完善。可以看出,上述有关大陆动力学的研究领域中,除大陆岩石圈流变学、现代大陆变形、盆-山耦合等属于基本原理和表象层次外,其他涉及到的是以壳幔相互作用(垂直运动)为主导的动力体制,描述和解释的也主要是大陆内部(包括大洋板内)而不是边缘发生的大陆(板内)物质增生和消失及与其相关的构造、岩浆(火山)、成矿、地震、运动等现象。相应的,在大洋板内也有类似的以垂直运动为主导(垂直运动激发水平运动)的构造构造现象发生,可能具有与大陆(内部)相应现象相似的动力机制。但由于大洋板块的结构远没有大陆那样复杂,同时又因在深海水下进行而难以观察,因此人们的研究重点自然聚焦到大陆上。很明显,只要大陆内部的问题搞清楚,大洋板内的相应现象也就迎刃而解。基于人们的研究重点放在大陆(内部),因此,不妨将这种体制称为大陆动力体制,基于大陆动力学体制研究的科学就是大陆动力学(马宗晋和高祥林,2004)。

业已证明,中国大陆是由多个规模不等的陆块拼合而成的,并被认为是欧亚板块的重要组成部分。但从岩石圈结构状态看,其深部特征是不均一的。例如中国东部和北部较早结束大洋演化和洋陆转换的历史,目前已进入典型的陆内构造时期,并受大陆构造动力体制控制。由于中国大陆的多陆块拼合历史,造成了中国大陆内部的地质作用和成矿作用更为丰富多彩和复杂;而西南部(青藏高原地区)较晚结束大洋演化过程,目前处于碰撞-伸展造山阶段,其北部和东部(三江地区)已基本与大陆的整体融合,进行陆内阶段,但其主体(印度板块和欧亚板块碰撞带)并未完全实现融合过程,统一的大陆岩石圈并未最终定型。

2.3 转换动力体制

虽然大洋岩石圈与大陆岩石圈有重大差别,大洋板块与大陆板块也明显不同,但两者之间却不是完全独立演化、一成不变的,而是有着复杂的相互关系并可以相互转换。大洋板块向大陆板块下的俯冲,使大陆得以增生,大洋板块物质通过复杂的途径加入到大陆上,解释了一部分大陆的形成,然而,现代相对稳定大陆上占主体地位的岩石组合均为深海沉积物或海相火山岩,似乎表明,大陆的主体是由带有覆盖物的大洋通过某种体制直接抬升形成。此外,大洋板块上,由于持续的火山喷发及后续地质作用可以导致新的大陆形成。另一方面,新的大洋则多是通过大陆裂解形成的。业已表明,地球形成以来,可能发生了若干次超级大陆和泛大洋之间的转换,是谓超大陆旋回;次级大陆和大洋间的转换和相互作用更为广泛和普遍。大洋与大陆间的转换并非一朝一夕形成的,而是经历了漫长的时间,并具有特定的机制。上述表明,板块俯冲导致大陆边缘增生而不形成新的大陆,

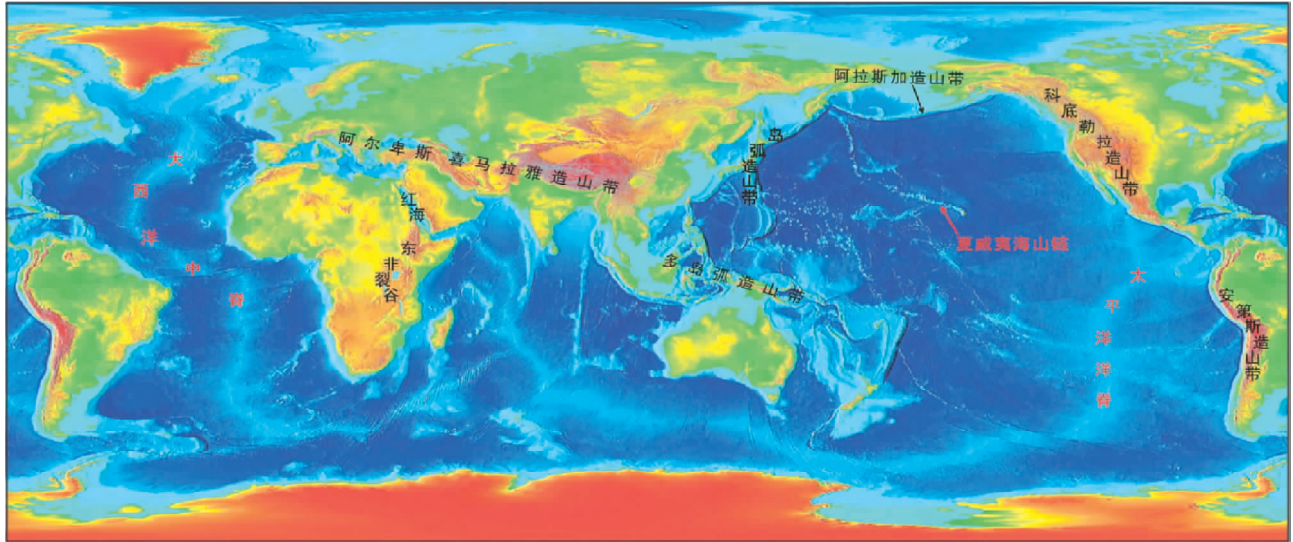


图1 现今全球不同地球动力学背景区(据李锦轶,2009)

Fig.1 Different geodynamic background areas on modern Earth(after Li,2009)

洋底火山活动可以形成小型大陆(陆核)并逐渐发展为新的大陆,只有当板块通过缝合、碰撞、伸展等过程,才能形成真正意义上的大陆(马文璞,1999),而大陆通过更深层次的裂解又形成新的大洋。由此可以看出,碰撞和伸展过程是洋陆得以转换的关键。在这两种过程中,既有地球浅部发生的大规模水平运动,还有地球深部发生的大规模垂直运动,二者之间形成了有效的耦合。因而是水平和垂直运动相互耦合的动力学体制,描述和解释的是洋陆转换及与其相关的构造、岩浆(火山)、成矿、地震、运动等现象。作者将其称为转换动力体制,它与大洋动力体制和大陆动力体制都不能等同,基于转换动力体制研究的科学就是洋陆转换动力学。

现今地球上,阿尔卑斯-喜马拉雅造山带和红海-亚丁湾应是典型的受转换构造动力体制控制的地区,前者正实现由洋到陆的最后转换,后者则相反。应当认识到的是,在喜马拉雅构造带虽然完成了印度板块和欧亚板块的缝合-碰撞,正如上述,转换过程并未结束,具有统一岩石圈结构的完整大陆并未定型,因此尚不能用陆内来描述该地区发生的地质作用。

2.4 构造动力体制的同区转承和异区并存

从板块构造理论的诞生到大陆动力学理论体系的初步形成看,大陆动力学并非与板块构造对立,而是在其基础上发展和深化、从大洋走向大陆的必然产物,转换构造动力学则是联系大洋和大陆最重要的纽带。如果说继板块构造学说之后,大陆动力学一系列理论的提出,使得地球动力学理论得到了全面的丰富和升华,那么,转换构造动力学的加入,人们才真正更为系统和全面理解了地球构造演化的全部历史,有关地球动力学的完整体系和过程才得以初步建立。

从地球上某一局部地区构造演化看,大洋动力学和大陆

动力学体制具有空间上的继承、转化和时间上的连续演进关系,并通过转换构造动力体制实现,表现为从板块俯冲、经缝合-碰撞到成陆的完整过程。但从全球范围内不同地区看,特别是在一个超大陆旋回范围内,不同构造动力体制则是并存的,也就是说,在这里起主导作用的是板块构造动力学机制(如东西太平洋),而在另一地起主导作用的则是大陆动力学机制(如欧亚大陆内部),同时在另外一些地方则正在发生着碰撞或裂谷作用(如地中海-喜马拉雅山和红海-亚丁湾等)。正是这种复杂的时空动力学因素的共同作用,造就了地球上千姿百态的大地构造环境同时出现(图1),并从根本上控制着地球上不同地区和角落发生的地质作用,包括成矿作用的发生、发展和演化。因此,要有效开展区域成矿作用研究,必须搞清楚相关地区在历史和现实上受何种地球动力学支配,并在其间发生了哪些关键性的地质作用,形成了何种类型的成矿构造环境,再在其基础上,分析各种环境内可能发生的成矿作用及其成矿专属性等。要科学地开展矿产资源勘查工作,就有必要首先了解不同动力机制下各种地质环境对于成矿的贡献和具体表现,它们是开展区域成矿学研究的基础。

3 造山带与复合造山

在全球大陆范围内,显生宙以来的巨型造山带面积占30%以上(许志琴等,2008)。造山带既是地球表面最宏伟的地质构造单元,同时也是全球金属矿床集中产出的地带,它保留了地球地质构造演化最为丰富的地质记录,是用来解剖不同构造动力体制的主要对象,又是讨论不同构造动力体制下成矿环境形成及相关成矿作用发生的重要载体,因而成为固体地球科学的研究重心。如果能将造山过程研究清楚,

那么有关不同构造动力体制及相关成矿地质环境和成矿作用的基本问题就迎刃而解。近十几年来关于造山作用与区域成矿的研究取得了重要进展,同时也存在着一些需要继续深入探讨的问题。

3.1 关于造山(带)类型

业已证明,地球上存在着不同类型的造山带(Dewey and Bird, 1970; Mattauer, 1984; Şengör, 1990; Wilson, 1990),但迄今为止,对造山带类型的划分仍不统一,方案繁多。杨巍然(1999)在总结前人分类的基础上,强调造山作用的范畴应限于挤压构造,将造山带划分为俯冲-碰撞造山带、断裂造山带、推覆造山带、断块造山带、增生造山带和转换造山带6种类型。崔盛芹(1999)在讨论全球中-新生代造山带时,注意到大洋和大陆的区别,将大洋内的造山带称为构造带,大陆上的造山带称为造山带。对于前者又划分为洋底张裂型(大洋中脊构造带,具裂谷拉张型,缺裂谷扭张型)、洋底滑移型(火山岛链构造带,即夏威夷群岛型)和洋底挤压型(洋内岩浆弧造山带,又称为西南太平洋俯冲型),对于后者,又划分为陆缘型(板缘型)——环太平洋陆缘型造山带、陆间型(板间型)——特提斯陆间型造山带和陆内型(板内型)——前寒武纪古克拉通基础上发育的陆内造山带和陆内隆升带前中生代陆缘、陆间造山带基础上发育的陆内造山带。张原庆等(2002)提出了造山带板内、俯冲、碰撞三分方案。针对碰撞造山带,又提出陆陆碰撞、碰撞增生、弧陆碰撞和无大陆型碰撞造山带四分法方案,其中无大陆型碰撞造山带是描述陆壳物质形成初期地体拼合聚合过程的新类型。姚书振等(2002)认为造山带按其成因可分为挤压造山(包括洋壳俯冲造山、弧陆拼贴造山、陆陆碰撞造山、陆内俯冲造山等)、剪切造山、伸展造山(断块造山)及复合造山等。可以看出,对造山带概念的理解、造山作用的完整过程以及分类原则的不同是造成造山带类型划分方案繁多的主要原因。

从全球构造动力体制的角度出发,每一种构造动力体制都可以激发造山作用。在大洋动力体制条件下,造山作用发生在板块的边缘,在洋脊扩张区,表现为伸展造山,而在板块俯冲区,主要在大陆板块边缘形成俯冲(汇聚、增生)造山;在大陆动力体制条件下同样也有两类,即陆内隆起造山(即人们常说的陆内造山)和陆内伸展造山(陆内裂谷);在转换动力体制条件下同样也可划分为两类,即碰撞造山和伸展造山。这样,全球的造山带类型从构造动力性质上看,只有两个大类,即挤压型和伸展型。考虑到人们已经习惯使用的名词述语,可以归结为以下几种类型:即俯冲造山(带)、碰撞造山(带)、伸展造山(带)和陆内造山(带)。其他诸如拼贴造山、剪切造山、断块造山、增生造山、转换造山等要么是同一造山带中发生的局部性现象,要么就是同一现象的不同名称。可以注意到,不论是挤压、还是伸展,在各种构造动力体制条件下都可以发生,但作用的程度不相同。

3.2 关于碰撞和伸展造山作用

严格地说,造山作用并非一个地质意义上的专有名词,而是一个地理上山脉成山过程的描述(Howell, 1991)。由于其特别形象和生动而被应用到地质上相关的地质作用之中,正因为对造山作用和造山带概念内涵的不清,造成了人们在理解其地质意义上的一些混乱(杨巍然, 1999; 崔盛芹, 1999)。已有研究表明,地球上众多造山带的形成都经历了或短或长的历史。从构造动力体制演化的角度看,造山作用包括俯冲、碰撞、伸展、陆内等类型,但从造山带的演化看,一般前三个类型的造山多是连续进行的,表现为造山作用不同阶段,而陆内造山是否在其基础上连续演化,抑或是经历了一定的时间间隔,目前研究得很少。中国大陆造山带的研究成果似乎表明,虽然很多陆内造山带循古老的俯冲、碰撞、伸展造山带进行,但它们之间经历了较长的时间间隔。基于经典板块构造的不断丰富和完善,国外学者在造山带方面的研究主要集中在俯冲造山带上,而对其他造山过程研究不足。有关俯冲造山的大量研究已形成成熟的理论体系,在此不再讨论。以下重点对碰撞、伸展、陆内造山问题作一讨论。

中国广泛分布不同时期的造山带(图2),如昆仑-秦岭-大别、天山-兴蒙、祁连山、阿尔泰、燕山-太行山以及喜马拉雅等,这些造山带除经历了早期的俯冲造山过程外,还经历了典型的碰撞/伸展造山过程,有些还具有陆内造山的特点,为研究造山作用,特别是碰撞、伸展和陆内造过程提供了绝佳平台。中国科学家在碰撞造山领域的研究也取得世界瞩目的重要成果,已有大量文章发表(Chen, 1998; 李继亮等, 1999; 李兴振等, 2002; 刘俊来等, 2006; 侯增谦, 2010; 许志琴等, 2011; Wang *et al.*, 2010, 2013)。但对碰撞造山带构造演化过程仍有较大分歧。同样,近20年来,一些学者相继在科迪勒拉、阿尔卑斯-喜马拉雅等世界著名的造山带发现大规模伸展构造(Davis and Coney, 1979; Selverstone, 1988; Burchfiel *et al.*, 1992; 李德威, 1995; 崔盛芹, 1999; 王刚和王二七, 2005; 杨经绥, 2010; Deng *et al.*, 2009, 2010b, c, 2011),但在造山过程中是否存在伸展以及造山带伸展构造的发育过程和形成机制也有争议。此外,对碰撞与伸展关系的认识也很模糊。

Jamieson(1991)认为一个完整的碰撞造山过程,往往经历了大陆板片俯冲(A型俯冲)与地壳缩短加厚、岩石圈拆沉与后造山伸展以及造山后崩塌等地质过程。这些过程分别出现于造山期、后造山期和非造山期,马文璞(1999)认为碰撞造山带的演化可划分为4个阶段:即前碰撞或安第斯阶段、碰撞阶段、叠瓦冲断或阿尔卑斯阶段以及坍塌或拆离阶段。显然,前碰撞或安第斯阶段实际上描述的是板块俯冲造山,是碰撞作用发生之前的过程,不应包含在碰撞过程之中;其他三个阶段则准确地描述了从碰撞到陆内的完整过程,特别是他关注到碰撞造山期的伸展作用,并指出这是从碰撞演化到陆内(板内)必经的一个阶段,伸展是在地壳增厚的基础

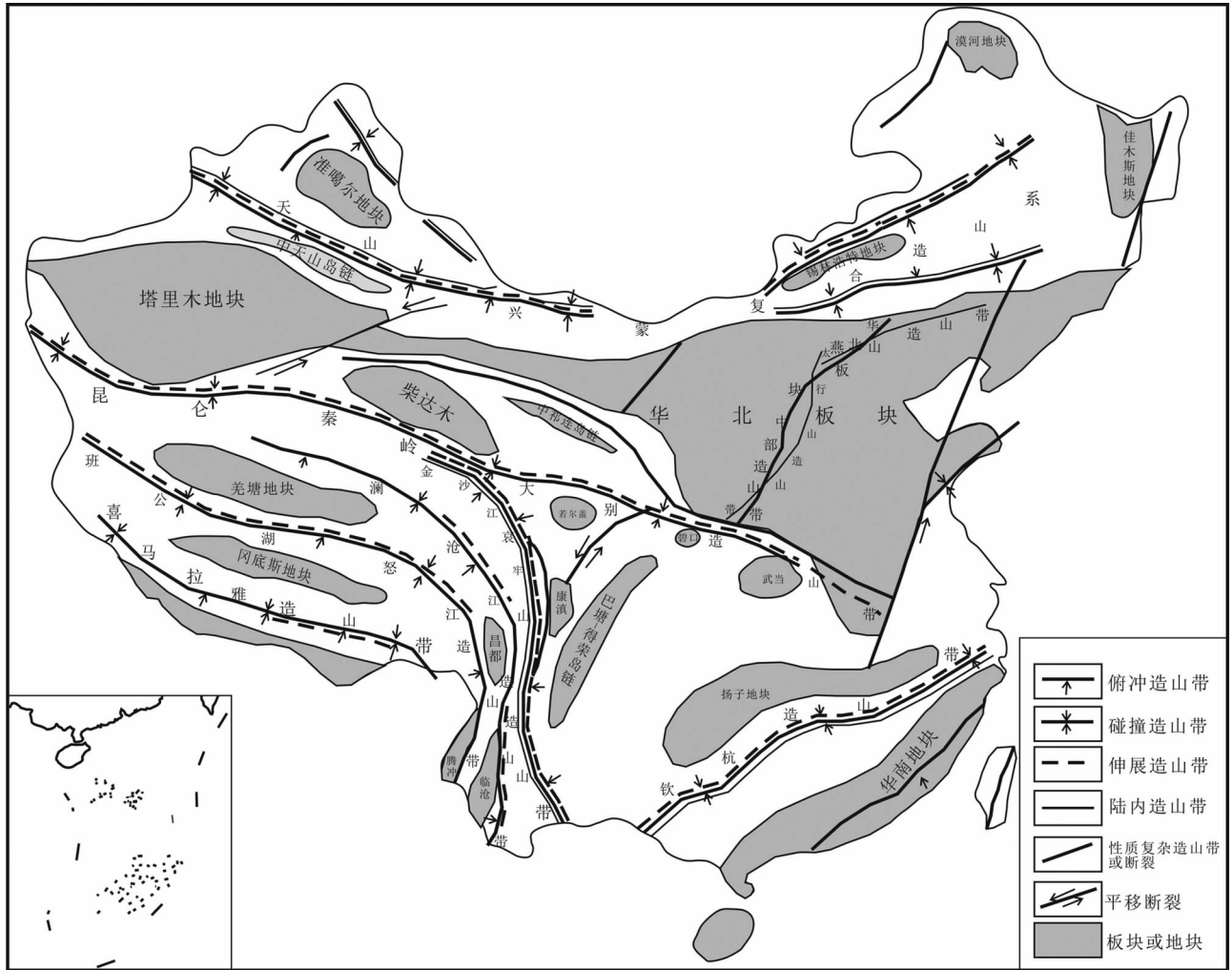


图2 中国主要造山带分布示意图

Fig.2 Sketch map shows the distribution of orogenic zones in China

上发生的。Dewey *et al.* (1989)、Dewey (1998) 提出,碰撞演化后期板块的会聚应力消失以后,造山带会在其自重下发生伸展坍塌,伸展构造取代了挤压,逆冲断层以正断的方式再活动,地表的构造体制发生了反转。其结果趋向于使地壳减薄和山根消失,变质核杂岩及与其伴生的、位于剥离断层上盘的伸展异地体也是本阶段持续发展的产物。然而人们对这一阶段的构造属性及在造山带演化过程中的位置争议较大。例如上述的将坍塌或拆离阶段并入碰撞造山期,但与会聚应力消失的描述矛盾。Liégeois (1998) 将其称为碰撞后阶段,England and Houseman (1989) 称其为造山后阶段,指出它始于板块碰撞后的伸展环境,并伴随强烈的岩浆作用发生;到了板内阶段,岩浆作用减弱,但分布广泛;其他学者在研究青藏高原等造山带时,也普遍注意到这一阶段的存在,但同样存在定性不统一的问题。如张旗等 (1999) 认为代表板块碰撞的喜马拉雅山阶段并没有结束板块构造旋回,其后还有一个造山后的伸展阶段。毛景文等 (2005) 将青藏高原碰撞造山带划分为两个阶段,即同碰撞阶段和后碰撞阶段,其后

碰撞指的就是这一伸展过程;侯增谦 (2010) 将其划分为主碰撞挤压、晚碰撞转换和后碰撞伸展三个阶段,同样注意到伸展阶段的存在,并将其视为碰撞造山过程内的一部分。索书田等 (2000)、王清晨和林伟 (2002) 研究大别山造山带的构造变形时同样注意到伸展变形过程,也将其放在碰撞造山过程中,称为碰撞后伸展。而王义天和毛景文 (2002) 在研究秦岭碰撞造山作用与成矿关系时,指出碰撞造山期后的陆内演化阶段,伸展体制导致在小秦岭地区形成变质核杂岩,明确将其视为陆内演化阶段。

基于对不同构造环境中岩浆岩特征的充分研究,人们发现,富碱(碱性的和碱质的)的花岗岩类及相关的岩石组合可以较好的区分不同构造环境。碱性花岗岩是指那些含有碱性暗色矿物(钠闪石、钠铁闪石、霓石、霓辉石和铁云母等)的过碱质花岗岩,其出现通常指示区域岩石圈处于典型的板内非造山环境(裂谷或裂谷化)(Thompson and Gibson, 1994)。而碱质花岗岩的主要区别在于其碱性程度相对较高且出现碱性暗色矿物,既可以出现在碰撞后的伸展环境,又可以出

现在板内裂谷环境,此时常常与碱性花岗岩共生并具有演化关系(Bonin, 1990; Eby, 1992; Jung *et al.*, 1998)。这两种花岗岩所具有的地球动力学意义既有联系又有区别。相似之处在于它们都是岩石圈伸展背景下的产物,区别在于二者所反映的岩石圈伸展程度可能有所不同,这正是造山期伸展与陆内(非造山期)伸展的主要差异。

与板内非造山阶段的岩浆作用相比,从碰撞作用开始到完全过渡到陆(板)内这一时期形成的花岗岩通常更为复杂和多变,尤其表现在上述的伸展作用阶段。这是因为,该阶段既是碰撞造山过程的延续,又是向板内非造山环境的过渡时期(Sylvester, 1998; Liégeios *et al.*, 1998);因而其岩浆活动不仅在一定程度上仍然继承了碰撞前消减时期和同碰撞时期已经活化的岩浆源区性质,如普通钙碱性、高钾钙碱性岩浆的发育等,同时还表现出因造山带地壳加厚、区域隆升、山根去除、岩石圈伸展减薄、下地壳/岩石圈拆沉及软流圈上涌和幔源基性岩浆底侵等过程诱发的强过铝质淡色花岗岩(Sylvester, 1998)、高钾钙碱性花岗岩(Hadj-Kaddour *et al.*, 1998; Liégeios *et al.*, 1998)、高铝花岗岩和碱质型花岗岩(Jung *et al.*, 1998)的侵位。

刘红涛等(2002)在研究华北北缘造山过程时,从岩浆岩的构造属性角度明确指出,华北克拉通北缘地区中生代重大构造转折应发生在160~150Ma之间,此前的中生代早中期,区域岩石圈仍处于碰撞后前期强烈加厚过程之中,该时期以出现大量高锆花岗岩和少量过铝质淡色花岗岩为特征,150~110Ma期间为碰撞后晚期的区域岩石圈强烈伸展时期,该时期则以高锆花岗岩侵位事件的急剧减少和碱质型花岗岩大量出现为特征,大约在110Ma左右,区域岩石圈基本减薄到正常厚度并进入板内非造山的裂谷阶段,此时以出现碱性花岗岩为特征,李晓勇等(2002)系统讨论了这一时期的岩浆活动特征。这些研究结果趋向于将这一伸展过程独立于碰撞造山作用,明确指出其是在碰撞造山期后发生的,但又非陆内阶段。

从上述讨论可以明确看出,伸展是造山过程中客观存在且不可忽视的一个重要阶段,也就是说,继以挤压作用为主体的碰撞造山之后,实际上存在着一个以伸展(拉张)为主体的伸展造山过程,且与典型的非造山期(或称陆内阶段)发生的陆内造山或伸展并不相同。而且从时间上看,许多巨型山脉(如中国的秦岭、大别山脉、美国的内华达山等)的主体隆升期都是发生在碰撞后的伸展期,而在碰撞期山脉隆升幅度有限(李晓勇等,2002)。正是经历了这一过程,造山带岩石圈的性状才逐步与毗邻克拉通趋于一致,相互碰撞的大陆才真正完成融合,完成造山带的克拉通化,并走向陆内构造演化阶段。不经历这一阶段,两个大陆实际处在“联而不合”的状态,一个新的大陆并未最终形成。研究表明,这种伸展过程在中国的各大造山带中均存在。从目前的研究成果看,其开始和结束的标志也不很清晰,但从现有造山带的演化看,它可能持续的时间很长,作者以后还要另文讨论,恰是在造

山过程的这一阶段是成矿作用发生的高峰期之一。

3.3 关于陆(板)内造山

在大洋的板内和大陆的陆内也会发生造山作用,人们对大洋板内造山研究还不多(崔盛芹,1999),但中国科学家由于具有得天独厚的条件对陆内造山作用则进行大量卓有成效的研究(赵宗溥,1995;张长厚,1999;崔盛芹,1999,2002;杨志华等,2001)。中国北部的燕山-太行山和南部的江南古造山带被认为在陆内阶段发生了典型的造山过程(葛肖虹,1989;宋鸿林,1999;朱光和刘国生,2000;邵济安等,2005;邓晋福等,2007)。但是,对陆内造山带是否存在,以及它究竟是一种特殊类型的造山带,还是板缘造山带构造演化的一个阶段,尚存明显分歧。目前主要有以下几种不同认识:一是认为是由板块俯冲形成陆缘造山带、两大陆地块碰撞形成陆间造山带后,板块聚合作用继续进行,挤压构造变形带向两侧大陆地块扩展而形成,即从陆(板)间或陆(板)缘造山带继承和发展而来,并与其具有密切的时空及成因联系。它们共同构成了一个完整的造山旋回;二是基于大洋岩石圈与大陆岩石圈的本质差别,认为陆内造山带是完全在大陆岩石圈动力学背景下,起因于不同造山运动而形成。不强调其在时、空两方面与板缘或板间造山带存在成因联系,只强调造山带所处大地构造位置的岩石圈构造性质。而且对主造山期前所经历的地质发展史未予阐释;三是纯粹在陆壳基础上形成的造山带,在其造山带演化当中不曾有过大洋的出现和消减、消亡,造山带中没有洋壳的残余;四是完全否定陆山造山带的存在(张旗,2008)。张长厚(1999)对前人关于陆内造山带的研究进行系统总结后,认为板内造山带是一种特殊类型的造山带,而不是板缘造山带或板间造山带持续发展的结果,强调其形成于相对较老且强硬的岩石圈板块内部。板内造山带构造变形所具有的厚皮构造属性,与整个岩石圈作为应力导层及造山期前业已存在的构造薄弱带在有利的应力作用下复活有关。崔盛芹(2002)将发育在陆内条件下、位于大陆型地壳岩石圈范围内、具有不同于陆缘、陆间型造山带形变建造特征的条带状或线系性的构造变动山岳地貌带,称之为陆内造山带。它既可以发生在古克拉通基础上,又包括在主造山期陆缘、陆间型造山带基础上后期转化而成两类。杨志华等(2001)则认为在板块构造体制下形成的第一类造山带(即俯冲造山带)以后,所形成的造山带统称为陆内造山带。由于对陆(板)内造山带含义理解不一致,在一些具体造山带的归属上出现分歧。如有的学者,把秦岭造山带视为陆(板)内造山带(耿树方和严克明,1991;严克明和耿树方,1993;赵宗溥等,1995),甚至把喜马拉雅造山带也作为陆内造山带(赵宗溥等,1995)。更多的人则认为,秦岭造山带是碰撞造山带,喜马拉雅造山带更是陆间造山带的典型代表。

综上所述,关于陆内造山带的一些基本问题仍在争论之中。根据国内外最新研究成果,作者认为陆内造山作用不仅

存在,而且是大陆动力体制下最重要的地质构造过程之一。正因为如此,它当然与在大洋构造动力体制和转换构造动力体制下发生的俯冲和碰撞造山作用具有不同的特征。首先,它形成在真正的大陆(板块)内部,而碰撞造山作用发生在两个板块(大陆)之间,虽然其间已没有水体存在,但两个没有完成碰撞-伸展造山作用过程的大陆碰撞连接体,统一的大陆岩石圈还未形成,还不能说是典型的大陆(联而未合);其次,陆内造山带具有与其它造山带不同的构造型、变形和变质特征,岩石构造组合及其时空分布也具有明显的差异(张长厚,1999);第三,陆内造山过程因为发育在陆内,因而只能用大陆动力学的机制加以解释。邵济安等(2005)就指出,陆内造山作用受到深部条件的制约是与陆缘造山的主要区别;第四,陆内造山带之所以在某一个大陆内部形成,绝对不是随机的,而是有着其内在的制约因素,统一岩石圈大陆形成以前的构造演化基础不可忽略。虽然现在看来,许多板内造山带形成于相对稳定的大陆板块内部,是在相对较老且强硬的岩石圈基础上发育起来的,但超大陆旋回的研究成果初步表明,在这些相对稳定的大陆的形成实际上也经历了更早的板块汇聚、碰撞和伸展的过程(陆松年等,2002;赵国春等,2002)。因而陆内造山带往往循早期的俯冲或碰撞造山带活动。即使认为陆内造山带不是板缘造山带或板间造山带持续发展结果的学者,也不否认陆内造山期前业已存在的构造薄弱带的复活是陆内造山带形成的重要基础(张长厚,1999);第五,陆内造山活动大多数并不与俯冲或碰撞造山带在时间上连续演化,而往往具有一定的时间间隔。例如,中国北方的燕山-太行和南部的江南陆内造山作用发生在燕山期,而同一区域的俯冲-碰撞-伸展造山过程则在早古生代甚至在此之前就已结束(徐正聪和王振民,1983;胡健民等,2004;朱光和刘国生,2000),中间有很长一段时期的相对稳定阶段。其他陆内造山带也具有相似的经历,只不过这一间隔过程长短不同。前已述及,由于碰撞后的伸展造山过程是大陆岩石圈最终定型的关键时期,经历的时间又长,同时又缺少精确的年代学约束,因此,从伸展造山到陆内造山的过渡是否连续,以及间隔时间是很难准确界定的,因为界定它们的标志性地质事件尚不清楚。

综上所述,可以发现,与不同构造动力体制在全球同区转承和异区并存相对应,全球造山带具有同样的特点。一方面,地球上现在存在着处于不同构造动力体制下的造山带,如东西太平洋边缘是目前正在发生作用的俯冲造山带;中国北部的燕山-太行山和南部的江南地区是在燕山期形成的陆内造山带;阿尔卑斯-喜马拉雅地区是结束了俯冲造山过程,目前正在进行着的碰撞造山带,它是否完成碰撞,或已经进入伸展阶段,还具有争议。地球物理资料并与典型大陆岩石圈状态及结构的对比表明(滕吉文,2008),印度大陆和欧亚大陆形式上虽连到了一起,但从本质上看还没有完全联合,以喜马拉雅山隆起为标志的两大陆间的碰撞还未结束,青藏高原腹地可能步入到伸展造山阶段,但并未进入陆内。但在

高原的东缘(如三江地区)和北缘,岩石圈结构已基本与典型大陆可比,表明那里已经进入陆内阶段,新生代发生的造山作用应属于陆内造山。而横亘中国中部的秦岭-大别造山带继早期的俯冲、碰撞造山之后,燕山期进入伸展造山阶段,目前已完全形成统一的大陆,新生代是否发生典型的陆内造山作用还有争议。另一方面,就同一造山带而言,不同构造动力体制下的造山作用则表现出明显的转承关系,这与造山带的历史密切相关。不排除有些造山带甚至经历了多个完整的造山旋回,正如超大陆旋回演化那样。

3.4 关于造山过程

现在,可以对造山过程进行如下总结。造山作用可以发生在不同的构造动力体制条件下,并形成不同类型的造山带。构造动力体制的转换决定了造山作用的转换。大洋动力体制下的板块俯冲造山、转换动力体制下的碰撞-伸展造山一般表现为连续造山作用过程,经过这一过程,实现从洋到陆的转化和大陆型岩石圈的定型。在每一造山阶段,还可以根据其内部构造运动特点进行进一步的划分,但它们的界限往往并不清晰。在大陆动力体制下的陆内造山多循古老的造山带进行,但其间往往具有较长的地质历史时期间隔。从广义上看,完整的造山过程包括俯冲、碰撞、伸展和陆内4个主要阶段,由于陆内阶段与前几个阶段多不连续,因此,可以将从板块俯冲到碰撞-伸展的造山过程视为一个狭义的完整造山过程,是目前多数学者理解造山过程的应有含义。除非特别强调,一般讲造山过程均为狭义。

理清了造山作用的这一关系,应该对有关造山作用的基本概念进行一下梳理。目前,在有关讨论造山带的相关文献资料中,诸如后碰撞或碰撞后、后造山或造山后以及主碰撞、晚碰撞、同碰撞、同造山、非造山等这样的概念使用较多(Liégeois,1998;李晓勇等,2002;邓晋福等,1999;侯增谦等,2006),含义不统一。前已述及,广义上的完整造山过程包括俯冲、碰撞、伸展和陆内四大阶段,分别发生于不同的构造动力体制之下,其中前三个阶段是连续演化的,构成一个完整的造山过程。主碰撞和晚碰撞是指在碰撞阶段内部的相对先后,而后碰撞和碰撞后则是针对整个碰撞阶段而言的,指碰撞作用完成后,即伸展造山阶段及以后,但通常是指伸展造山阶段,不应将其理解为碰撞过程内部的一部分;后造山或造山后则是针对整个(狭义)造山过程而言的,指造山过程完成后,即是进入板内阶段,不应理解为伸展造山阶段;同碰撞大致相当于主碰撞的含义,而同造山的概念较为模糊,因为俯冲、碰撞、伸展都可以造山,到底与哪一个“同”呢?前人将非造山视为板内或陆内,但正如上述,陆内也是可以造山的,因此将陆内称为非造山也并不合适。现将前人有关造山过程的代表性认识及相关概述及本文的建议对比如图3。根据上述讨论,只有将这些概念的相对时间关系界定清楚并加以正确的运用,才能在相同或不同造山带研究中形成有效的对比,否则会出现问题。基于各概念的基本属性,建议不再

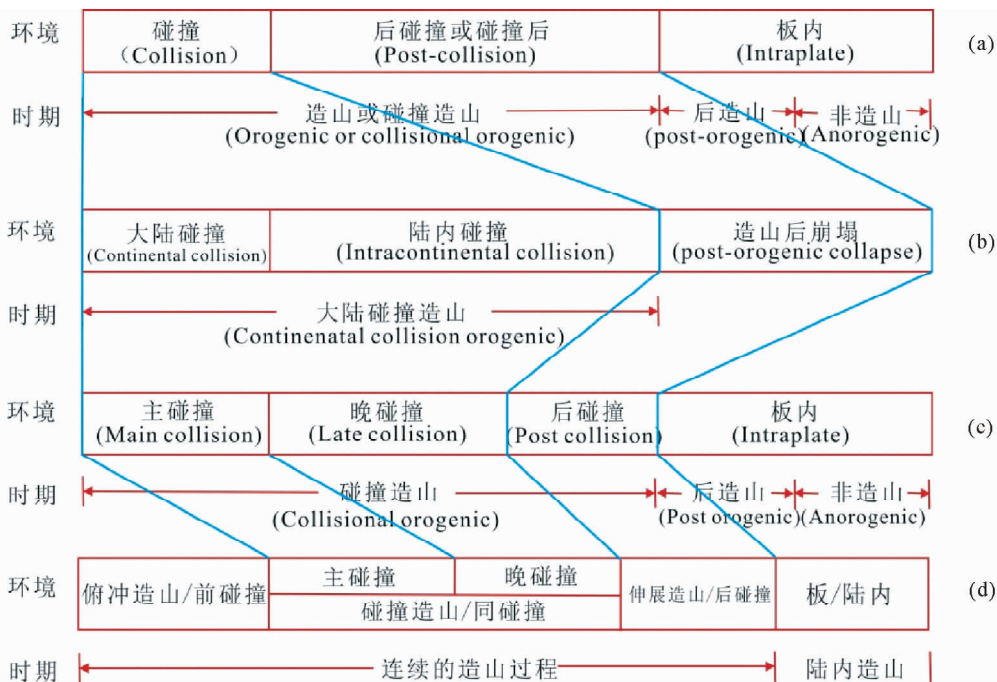


图3 造山过程划分和对比

(a)据 Liègeois (1998);(b)据邓晋福等(1999);(c)据侯增谦等(2006);(d)本文

Fig.3 Partition and correlation of orogenic process

使用同造山、同碰撞和非造山,少用碰撞后或后碰撞、造山后或后造山的概念,以使表述的时间关系更为清晰,既使如此,诸概念之间的时间界线点仍是不明确的。

3.5 关于复合造山

随着对造山作用研究的不断深入,人们提出复合造山作用的概念(许志琴等,2008;邓军等,2010;杨经绥等,2010)。许志琴等(2008)认为,发育在太平洋东岸、美洲大陆西海岸宽近 1000km、长度超过 10000km 的科迪勒拉造山带就是长期活动的复合造山带的典型代表。它包括奥陶纪(425Ma)的两次俯冲(增生)造山和泥盆纪-晚古生代的两次碰撞造山运动。中国的青藏高原也是一个巨型复合造山拼贴体,它的形成经历了早古生代、三叠纪、晚中生代和新生代造山带的多期拼贴过程,有人称其为“造山形成的高原”(Dewey, 2005),它明显地指示了亚洲大陆自北往南的增生过程。喜马拉雅只是其中最后形成的一条造山带。李兴振等(1999)在三江地区识别出 6 条不同规模和不同类型的造山带,提出了“横断山”式造山带的时空结构与造山模式。邓军等(2010)提出三江特提斯复合造山带并描述其演化历史,指出从晚前寒武纪-早古生代泛大陆解体和原特提斯洋形成,经古特提斯多岛弧盆系发育及古生代-中生代增生造山/盆山转换,到新生代印度-亚洲大陆碰撞和叠加改造,经历了超级大陆裂解-增生-碰撞的叠加转换和复合叠加过程。杨经绥等(2010)则对中国中部的中央造山带复合造山作用进行了详细讨论。指出它经历了新元古代以来的长期活动和演化历

史。其北带(包括西昆仑、阿尔金山、祁连山、东昆仑山和北秦岭)为早古生代造山带,碰撞造山作用结束于泥盆纪;南带(位括东昆仑南部、南秦岭、大别山和苏鲁)经历了晚古生代末-二叠纪的俯冲-碰撞过程,碰撞造山作用结束于晚二叠世-早侏罗世。中央造山带的主体是由上述两个不同时期形成的造山带拼合组成的复合造山带。从学者们对复合造山的描述看,多将复合造山理解为区域上不同时代形成的造山带在空间上拼贴在一起,强调的是空间复合。

从上述有关造山带类型和造山过程的讨论中可以看出,造山带的地质演化历史决定了其复杂性。对于同一个造山带而言,尽管从俯冲、碰撞、伸展造山表现为连续的演化过程,但它们却是在不同构造动力体制下进行的,因而其动力学条件、造山样式、地质作用、形成的地质构造和相应岩浆活动、成矿作用均不相同,每一次造山都有其相对独立的过程。因此,虽然地球上现在存在着在单一构造动力体制下形成的造山带,但大多数造山带都经历了两种或以上的造山过程,因此在时间和构造动力体制上也表现出复合性。例如,许志琴等(2005)研究也提及,现代喜马拉雅造山带的前身是泛非-早古生代形成的原始喜马拉雅造山带。同样,杨经绥等(2010)关注到中央复合造山带在中新生代时期,又整体不均匀隆升,经历了陆内造山作用的改造。同时提出复合造山带的三种类型,即两个或两个以上时期形成造山带的拼贴体、造山变形叠置形成复合造山带和与大陆俯冲(洋壳俯冲)紧密相关的复合造山带。

因此,对复合造山带的理解应该包括三个方面的含义。

一是不同时期不同类型造山带在空间上的复合,表现为不同时期形成的造山带拼贴在一起,形成更大的造山带(叠置);二是同一造山带在不同地质历史阶段、不同构造动力体制下造山作用的时间复合,形成更复杂的造山带或山系(叠加);三是同时具有时空复合特征的复合造山带。地质学家通过对各类造山带的解剖,认识到每一类型造山作用的影响范围并不是仅仅局限在造山带主体所在的狭长地带内,而是可以扩展到其两侧达数百乃至上千千米的活动域。例如就喜马拉雅造山带而言,强烈的碰撞致使喜马拉雅强烈隆升,同时的应力传递到较早结束碰撞作用的其它造山带,形成复合造山。此外,造山带发育地区古构造格局的巨大差异,也是直接影响到复合造山的重要因素。例如,有资料研究表明,三江古特提斯在早古生代具有多岛洋构造格局,由一系列相对稳定的地块和洋岛及其间的洋盆和支洋盆组成,以弧后盆地消减及其洋壳俯冲为动力,通过弧弧碰撞、弧陆碰撞、陆块陆块碰撞等多岛造山过程,在中生代实现了类似“东南亚”式的造山过程(潘桂棠等,2003)。同样,中央造山带早古生代也具有多洋(海)盆、多地体、多岛弧的复杂构造格局(杨经绥等,2010),位于华北北部兴蒙造山带在古生代也是一个由多个地块分隔的多个洋盆的构造系统(Ren *et al.*, 1996)。这种局面的存在,为在时空上形成性质复杂的复合造山带提供了得天独厚的条件。而具有东太平洋边缘那的洋陆构造系统地区,则通常形成时间上的复合造山带。

4 三江复合造山带的时空演化

中国西南三江及邻区是全球特提斯构造域的重要组成部分,同时也是全球最壮观的造山带之一,是研究构造动力体制演化和复合造山过程的理想地区。自1893年奥地利地质学家休斯提出特提斯(Tethys)概念以来(Suess, 1893),对特提斯构造的研究一直没有中断,尽管在许多具体问题上还存在着激烈的争论,但有关特提斯构造演化和造山带形成所取得的一系列重要进展,为进一步探讨该区构造动力体制演化与复合造山过程奠定了基础。

4.1 三江复合造山带的基本结构

在空间上,在三江及其邻区,已识别出甘孜-理塘、金沙江-哀牢山、澜沧江、昌宁-孟连、班公湖-丁青-怒江和雅鲁藏布江等蛇绿混杂岩带,它们代表了历史上曾经存在的不同规模和性质的洋盆;夹杂在这些洋盆之间的则是一系列规模不等的陆块,如中咱-中甸、兰坪-思茅、保山、左贡、冈底斯-拉萨等,与此同时,还厘定出德格-乡城(义敦)、江达-维西-绿春、杂多-景洪、类乌齐-勐海以及波密-腾冲和冈底斯(南缘)等岩浆弧,它们要么是位于一些陆块边缘的陆缘弧,要么就是在洋盆之上直接形成的岛弧(图3)。潘桂棠等(2003)指出,三江地区一系列共存的多条弧链(前锋弧、岛弧、火山弧等)和相间分布的洋盆及(微)陆块,在古生代时期构成复杂的“多

岛弧盆”构造系统。从蛇绿混杂岩带和岩浆弧的区域配置上看,该系统内可以划分出甘孜-理塘混杂岩带和义敦岛弧、金沙江-哀牢山混杂岩带和江达-维西-绿春陆缘弧、澜沧江-昌宁-孟连混杂岩带和类乌齐-临沧-勐海岩浆弧、班公湖-怒江混杂岩带和波密-腾冲弧以及雅鲁藏布江混杂岩带和冈底斯陆缘弧等组成的多个造山系统。

4.2 造山过程的构造动力体制控制与空间复合

李兴振等(2002)研究表明,上述每个造山系统均先后不同程度经历了不同构造动力体制下的造山作用。岩浆弧的存在反映了在早期洋陆相互作用过程中,发生了板块俯冲作用。以弧后盆地消减及其洋壳俯冲为动力,随着各洋盆的逐渐闭合,最终造成了弧弧、弧陆或陆块与陆块之间的拼贴,完成了大洋动力体制之下的多岛造山过程。洋壳的消失、俯冲造山作用的结束并没有终结相应地区的构造演化。各个俯冲造山带都不同程度经历了碰撞-伸展造山过程,最终实现转换构造动力体制之下的洋陆转换,并依转换作用完成为标志,先后进入陆内阶段,转而受大陆动力体制控制。有资料表明,部分造山带发生了典型的陆内造山作用。如就甘孜-理塘和义敦造山带而言,标志俯冲造山作用的产物包括蛇绿混杂带、火山弧花岗岩带、主火山弧安山岩带、弧间裂谷盆地火山岩带、弧后“双峰式”岩石组合带和弧后火山-岩浆岩带等的形成,它们横跨造山带自东而西依次分布。标志碰撞造山作用存在的标志主要为同碰撞型花岗岩和造山隆起及晚期花岗岩的相继发育,并伴有岛弧地壳挤压收缩和剪切应变形成的复杂变形构造。标志伸展造山作用发生的典型岩浆产物为燕山晚期的A型花岗岩。如在义敦岛弧带上分布于柯鹿洞-乡城断裂与矮拉-日雨断裂带夹持的狭长区域的高贡-措莫隆花岗岩带。而陆内造山活动存在的主要标志包括喜马拉雅期发生的大规模逆冲-推覆和走滑平移活动,并形成规模不等的拉分盆地和相应山系,同时伴有喜马拉雅期花岗岩侵位。虽然此套花岗岩亦属A花岗岩,但显示为板内拉张环境花岗岩特征,与伸展造山期A型花岗岩的地球化学差异性明显。如义敦带的巴塘格聂、中甸楚良岩体等。几乎相同的造山过程也发生在金沙江-哀牢山造山带的造山过程中。然而更西部的澜沧江及昌宁-孟连以及班公湖-怒江(丁青-三台山)造山带仅在局部地区识别出了伸展造山的岩浆记录,如在腾冲地区发现的新近纪钙碱性火山活动等,可能标志着伸展造山过程或已开始,但没有发育典型的陆内造山过程。最西部的雅鲁藏布-喜马拉雅造山带则尚处于碰撞阶段,还没有进入伸展造山过程,因此还不能完全用大陆构造动力体制去阐释这里发生的构造-岩浆作用。

由上讨论可以看出,三江特提斯构造主要由多条近于平行的造山带组成的,依其在空间上发育的顺序,各自分别经历了不同构造动力体制控制的造山过程,具有明显的空间叠置特征。

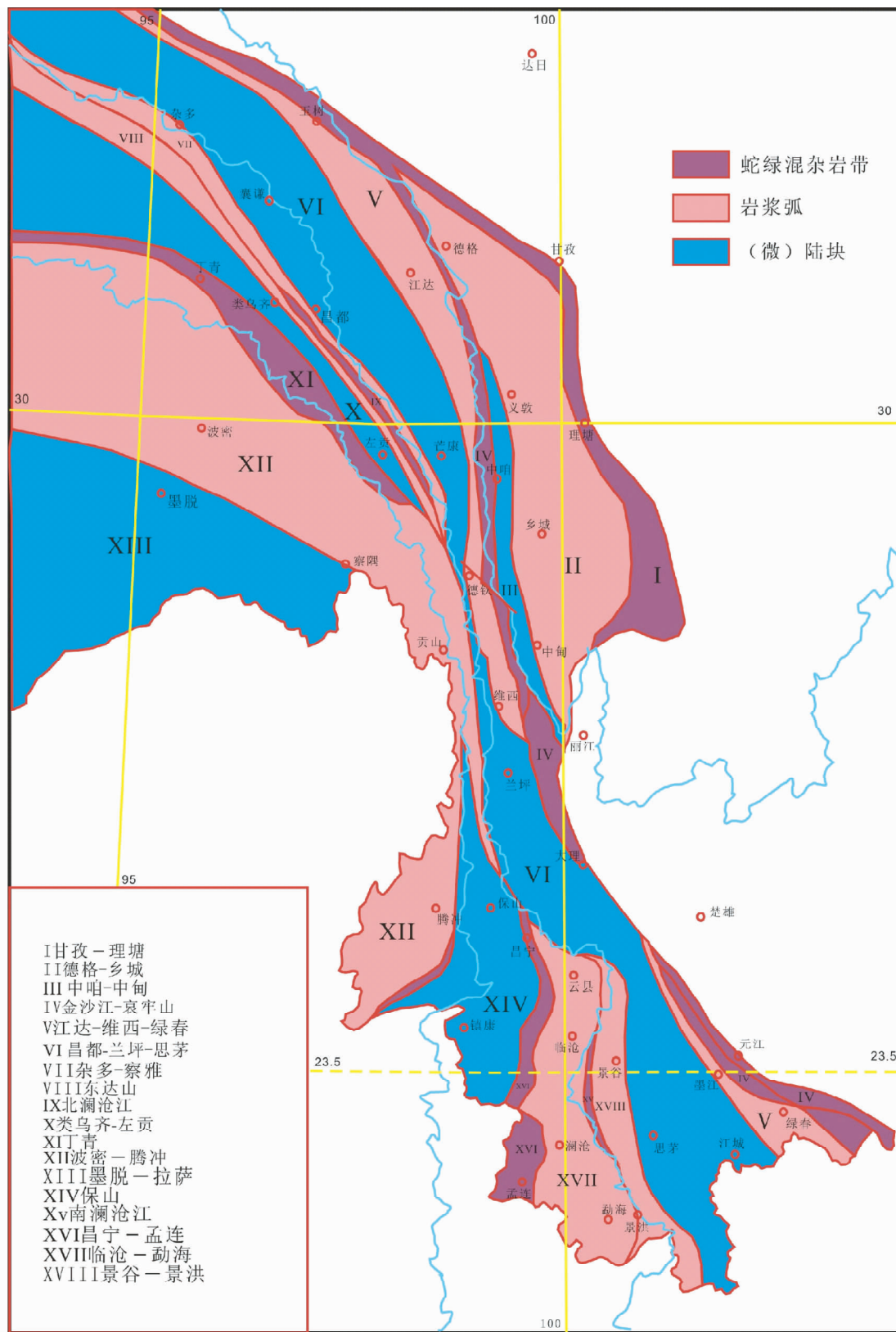


图4 三江复合造山带的空间结构(据邓军等,2012 修编)

Fig.4 Space structure of Sanjiang compound orogenic zone (after Deng *et al.* , 2012)

4.3 复合造山作用的时间演化

在时间上,上述各造山带内的各造山过程并不是同时进行的。根据前人大量研究(李兴振等,1999,2002;钟大赉,1998;潘桂棠等,2003)所积累的丰富资料,可以将三江地区主要造山带演化的时间序列整理如下(图4)。

甘孜-理塘洋盆的形成时代确定为晚二叠世-晚二叠世早期,晚三叠世早期是甘孜-理塘洋盆扩展的鼎盛时期,洋盆宽度约为480km,洋壳在晚三叠世中期开始向西俯冲消减于中咱-中甸微陆块之下,西侧形成典型的义敦(德格-乡城)岛弧-弧后盆地系的配套格局,洋盆闭合消亡于晚三叠世末。对义敦岛弧上构造-沉积和岩浆活动序列的解析表明,该带俯冲造山作用的时限为238~210Ma,与晚三叠世弧火山岩的时间相当;碰撞造山作用的时限为208~138Ma,与晚三叠世火山弧花岗岩密切交生或相依分布;伸展造山作用的时限为139~75Ma,相当于燕山晚期的A型花岗岩;陆内造山作用发生的时限为65~15Ma,与板内拉张环境花岗岩活动时代一致,如格聂岩体侵位于三叠系砂板岩系和哈裕拉岩体(81~39Ma)中,主体为似斑状中细粒钾长花岗岩, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄值为15Ma。茨林措岩体侵位于上三叠统喇嘛亚组砂板岩系中,主要岩石类型为似斑状细粒二长花岗岩和角闪石黑云母二长花岗岩。茨林措岩体于65Ma形成。

金沙江-哀牢山洋盆形成时代为早石炭世,但可能在中泥盆世就已启动,石炭世-早二叠世早期是金沙江弧后洋盆扩展的高峰时期,洋盆宽度可达1800km(莫宣学等,1993)。洋壳于早二叠世晚期开始向西俯冲消减于昌都-兰坪-思茅陆块之下,并在陆块边缘形成了江达-德钦-维西(北段)和墨江-绿春(南段)陆缘弧。晚二叠世末期洋盆消减闭合,洋壳消亡,结束金沙江-哀牢山古特提斯洋演化历史。早中三叠世开始斜向碰撞,进入转换构造阶段。随着碰撞造山作用的进行,大部分地区开始隆升,缺失早中三叠世地层。该造山带同样经历了碰撞后的伸展造山过程。中三叠世末到晚三叠世早期,随着残留海盆消亡,江达-德钦-维西岛弧造山带由挤压转为拉张,在原火山弧及其边缘带上拉张、裂离形成以晚三叠世早期为主体时段的上叠裂谷盆地,以发育次深海相的火山浊积岩、凝灰质浊积岩、凝灰质-硅质浊积岩及砂泥质复理石,以及玄武岩、流纹岩组合构成的“双峰式”火山岩和辉长辉绿岩墙、岩脉群为特征,火山岩地球化学特征显示为拉张背景下的裂谷盆地环境。到晚三叠世末期变成挤压环境,以中性-中酸性火山岩的出现为终结标志,并发育大量的膏盐沉积。此后,全面转入陆内阶段。有资料表明,新生代金沙江-哀牢山带也发生了以大规模的冲断推覆和局域性伸展为代表的构造活动,一些早期形成的古构造还可能在这一阶段重新复活(葛良胜等,1999),并伴有不同性质和规模的岩浆活动(如滇西新生代的富碱岩浆活动等,葛良胜等,2003),反映了陆内造山作用的存在。Ge *et al.* (2009)、葛良胜等(2012)研究表明,在哀牢山地区,强烈的壳幔相互作用导致

的软流层上涌是激发该区陆内造山作用发生的重要深部构造背景。

澜沧江构造带的空间结构相对于前两者较为复杂。从走向上,它可分为南带和北带,而南带的洋盆又包括澜沧江和昌宁-孟连两支。李兴振等(1999)认为其具双洋、双弧的发展模式。东支澜沧江洋的演化历史几乎与哀牢山洋完全相似,二者相向俯冲共用昌都-思茅陆块。西支昌宁-孟连洋打开于早石炭世,至石炭纪末-早二叠世初,达到最大规模,同时洋壳发生向东的俯冲并逐渐加剧,于早二叠纪末结束,导致东部的临沧-勐海弧与西部的保山陆块缝合,并转而进入碰撞造山过程之中。在临沧块体上形成同碰撞型壳熔二长花岗岩岩基。晚三叠世,在保山地块东缘形成后造山的水寨木厂晚期地槽前陆盆地和地块轴部保山-施甸的前陆隆起。前陆盆地中木厂碱性花岗岩的侵入,似乎标志着晚三叠世末期,本区曾经历了短暂的伸展造山过程,意味着碰撞造山阶段已结束。但晚燕山期本区又发生了较大规模的碰撞型壳熔二长花岗岩的侵入,表明区域上的碰撞作用仍在延续,上述的伸展可能只是碰撞期内挤压应力间歇期的局部伸展过程。有研究认为,直到喜马拉雅期,本区可能受喜马拉雅碰撞造山影响,还处于碰撞造山的晚期阶段。真正的伸展造山过程并未启动。

李兴振等(2002)认为,从班公湖-怒江洋南侧念青唐古拉岩浆弧带中发育印支期岛弧型花岗岩,及在古米一带可能发育晚二叠世弧火山岩推断,班公湖-怒江洋于晚三叠世即已开始向南俯冲,因此,洋盆形成的时间可能早于三叠纪。在丁青一带中侏罗世沉积不整合在结合带的混杂岩带之上,表明班公湖-怒江洋东段在中侏罗世已经闭合,进入碰撞造山阶段,而西段可能闭合稍晚。碰撞作用在南侧班戈-波密-腾冲一带形成燕山期碰撞型中酸性花岗岩带,在其北/东侧也形成一个木戛冈日-聂荣岩带(两部)和嘉玉桥-潞西壳熔型花岗岩带。值得注意的是,同时在东部较早形成的造山带内,也有该期的岩浆活动,如类乌齐-耿马花岗岩带、措莫隆-格聂花岗岩带、昌台-乡城岩浆岩带等,但正如前述,其岩石化学特征和构造背景却并不相同,有些表征的是伸展造山环境,有些则已是陆内构造环境。

雅鲁藏布江洋是环球特提斯构造域最晚形成、最晚闭合的洋,它的形成一般认为是在二叠纪,即与冈底斯北侧的班公湖-怒江洋形成时间基本同期,并于晚三叠世或中生代早期开始向北俯冲。在其北面形成冈底斯岩浆弧,三江地区西部的下察隅苏典岩浆弧带可看作是岩浆弧带在东部的延伸。洋盆闭合时间则比北侧洋盆要晚,大体在晚白垩世-古近纪,随后进入印度板块和欧亚板块的碰撞造山阶段,并逐渐形成著名的喜马拉雅山碰撞造山带。业已证明,在青藏高原的冈底斯期和喜马拉雅地区发生分别了平行造山带和垂直造山带不同规模的伸展构造,但正如本文前面所讨论的,喜马拉雅造山带目前是否结束碰撞进入伸展造山阶段,还存在不同认识。可以肯定的是,地球物理资料证明,在喜马拉雅

地区,岩石圈结构不同于典型的大陆岩石圈,陆块间的融合并未完全结束,因此本区并未结束转换构造动力体制的控制,进入大陆动力体制阶段。同样,印度板块与欧亚板块的强烈碰撞对早先形成的各类造山带也会产生不同程度的影响,表现为随距离变化的远程效应,正如上述,在三江地区的其他造山带内均有不同的构造-岩浆反映。

上述讨论表明,三江造山带实际上是由多条次一级造山带在空间上紧密叠置形成的,这与特提斯大洋的原始状态及在区域构造演化过程的应力结构密切相关。而其中的每一条造山带在历史上不同程度经历了大洋、转换、大陆三种构造动力体制的控制,在时间上先后表现为板块俯冲、弧陆或陆陆碰撞和伸展或陆内造山等不同造山过程的叠加。不同造山过程有各具特色的地质表现。造山过程完整性与洋陆相互作用发生的时间、强度、方式等密切相关。造山带的演化在时空上呈现出有序演进的特点。较早完成俯冲造山过程的造山带一般也会较早进入后续造山阶段,但各造山过程发育的时间、强度等则受区域上邻近造山作用的发生和发展影响。可以看出,三江造山带是一个典型的具有时空复合特征的巨型复合造山带,其空间结构和演化过程充分展示了不同构造动力体制同区转承和异区并存特点。这种特点是三江地区大规模成矿作用多样性和有序性并存的根本原因,对造山带时空结构的详细解析是认识该区成矿环境和成矿作用、探索并理解区域成矿规律的前提和基础。

5 结论

(1) 构造动力体制是研究区域大地构造演化和成矿地质环境的前提,造山带是解剖不同构造动力体制及相关成矿环境和成矿作用的主要对象;

(2) 全球构造动力学体制可以划分大洋、大陆和转换三种,不同构造动力体制在全球范围内具有同区转承和异区并存特点;

(3) 每一种构造动力体制都可以激发造山作用,地球上同时存在着不同类型的造山作用和造山带,可以归结为俯冲造山(带)、碰撞造山(带)、伸展造山(带)和陆内造山(带)等完整反映造山带演化过程的4种类型;

(4) 复合造山具有三种涵义,一是不同时期不同类型造山带在空间上的复合(叠置);二是同一造山带在不同地质历史阶段、不同构造动力体制下造山作用的时间复合(叠加);三是同时具有时空复合特征的复合造山带;

(5) 西南三江造山带是具有时空复合特征的巨型复合造山带的典型代表,其空间结构和演化过程充分展示了不同构造动力体制控制及其同区转承和异区并存特点。

References

Bonin B. 1990. From orogenic to anorogenic settings: Evolution of

- granitoid suites after a major orogenesis. *Geological Journal*, 25(3-4): 261-270
- Burchfiel BC, Chen ZL, Hodges KV, Liu Y and Royden LH. 1992. The South Tibetan Detachment System, Himalayan Orogen: Extension Contemporaneous with and Parallel to Shortening in a Collisional Mountain Belt. *Geological Society Special Publication*, 1-41
- Chen YJ. 1998. Fluidization model for continental collision in special reference to study ore-forming fluid of gold deposits in the eastern Qinling Mountains, China. *Progress in Natural Sciences*, 8(4): 385-393
- Cui SQ. 1999. On global meso-cenozoic intracontinental orogenesis and orogenic belts. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 283-293 (in Chinese with English abstract)
- Cui SQ. 2002. Meso-Cenozoic Intracontinental Orogenesis in Yanshan Region. Beijing: Geological Publishing House, 1-209 (in Chinese with English abstract)
- Davis GH and Coney PJ. 1979. Geologic development of the Cordilleran metamorphic core complexes. *Geology*, 7(3): 120-124
- Deng J, Yang LQ, Gao BF, Sun ZS, Guo CY, Wang QF and Wang JP. 2009. Fluid evolution and metallogenic dynamics during tectonic regime transition: Example from the Jiapigou gold belt in Northeast China. *Resource Geology*, 59(2): 140-152
- Deng J, Wang QF, Yang SJ, Liu XF, Zhang QZ, Yang LQ and Yang YH. 2010a. Genetic relationship between the Emeishan plume and the Bauxite deposits in western Guangxi, China: Constraints from U-Pb and Lu-Hf isotopes of the detrital zircons in bauxite ores. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(5-6): 412-424
- Deng J, Xiao CH, Wang QF, Zhou XZ, Yang LQ, Zhang J and Zhao Y. 2010b. Influence of the Chuxiong Yao' an earthquake on the mineralization of hot springs in the Tengchong geothermal area, southwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 1391-1400
- Deng J, Hou ZQ, Mo XX, Yang LQ, Wang QF and Wang CM. 2010. Superimposed orogenesis and metallogenesis in Sanjiang Tethys. *Mineral Deposits*, 29(1): 37-42 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Wang QF, Xiao CH, Yang LQ, Liu H, Gong QJ and Zhang J. 2011. Tectonic-magmatic-metallogenic system, Tongling ore cluster region, Anhui Province, China. *International Geology Review*, 53(5-6): 449-476
- Deng J, Wang CM and Li GJ. 2012. Style and process of the superimposed mineralization in the Sanjiang Tethys. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1349-361 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Mo XX, Luo ZH, Zhao HL, Zhao GC, Cao YQ and Yu XZ. 1999. Igneous petro-tectonic assemblage and crust mantle metallogenic system. *Earth Science Frontiers*, 6(2): 259-270 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Su SG, Liu C, Zhao GC, Zhao XG, Zhou S, Xiao QH, Wu ZS and Geng K. 2007. Yanshanian (Jura-Cretaceous) orogenic processes and metallogenesis of the Taihangshan-Yanshan-West Liaoning orogenic belt, North China. *Geoscience*, 21(2): 232-240 (in Chinese with English abstract)
- Dewey JF and Bird JM. 1970. Mountain belts and the new global tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 75(14): 2625-2647
- Dewey JF, Cande S and Pitman WC. 1989. Tectonic evolution of the India/Eurasia collision zone. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 82(3): 717-734
- Dewey JF. 1998. Extensional collapse of orogens. *Tectonics*, 7(6): 1123-1139
- Dewey JF. 2005. Orogeny can be very short. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(43): 15286-15293
- Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641-644
- England P and Houseman G. 1989. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 94(B12): 17561-17579
- Ge LS, Yang JH, Guo XD, Zuo YL, Chen SX and Zhang XH. 1999. The hidden EW-structure existing northwestern Yunnan and the

- evidence. *Yunnan Geology*, 18(2): 155–167 (in Chinese)
- Ge LS, Guo XD, Zou YL, Li ZH and Xing JB. 2003. Genesis and geochemical characteristics of alkali-rich rock bodies (dykes) in the Northwest Yunnan Province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 18(Suppl.): 36–42 (in Chinese with English abstract)
- Ge LS, Deng J, Gou XD, Zou YL and Liu YC. 2009. Deep-seated structure and metallogenic dynamics of the Ailaoshan polymetallic mineralization concentration area, Yunnan Province, China. *Science in China (Series D)*, 52(10): 1624–1640
- Ge LS, Deng J, Yang LQ, Wang ZH, Guo XD and Yuan SS. 2012. Characteristics of deep-seated structure and its control action for magmatic activity and mineralization in western Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1387–1400 (in Chinese with English abstract)
- Ge XH. 1989. The history of formation of intraplate orogenic belts in the North China Paleoplate. *Geological Review*, 35(3): 254–261 (in Chinese with English abstract)
- Geng SF and Yan KM. 1991. The Yangtze platform and the North China Platform as of the same lithospheric plate. *Regional Geology of China*, (2): 97–112 (in Chinese with English abstract)
- Hadj-Kaddour Z, Liégeois LP, Demaiffe D and Cabry R. 1998. The alkaline-peralkaline granitic post-collisional Tin Zebane dyke swarm (Pan-African belt, Tuareg Shield, Algeria): Prevalent mantle signature and late apatitic differentiation. *Lithos*, 45(1–4): 223–243
- Hou ZQ, Pan GT, Wang AJ, Mo XX, Tian SH, Sun XM, Ding L, Wang RC, Gao YF, Xie YL, Zeng PS, Qin KZ, Xu JF, Qu XM, Yang ZM, Yang ZS, Fei HC, Meng XQ and Li ZQ. 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt; II. Mineralization in late-collisional transformation setting. *Mineral Deposits*, 25(5): 521–543 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ. 2010. Metallogenesis of continental collision. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 30–58 (in Chinese with English abstract)
- Howell DG. 1991. Terranes Tectonics: Mountain Building and Continental Growth. In: Wang CS *et al.* (Translate). Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1–154 (in Chinese with English abstract)
- Hu JM, Liu XW, Zhao Y, Xu G, Liu J and Zhang XH. 2004. On Yanshan intraplate orogene: An example from Taiyanggou area, Lingyuan, western Liaoning Province, Northeast China. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 255–271 (in Chinese with English abstract)
- Jamieson RA. 1991. *P-T-t* paths of collisional orogens. *Geologische Rundschau*, 80(2): 321–332
- Jung S, Mezger K and Hoernes S. 1998. Petrology and geochemistry of syn- to post-collisional metaluminous A-type granites; A major and trace element and Nd-Sr-Pb-O-isotope study from the Proterozoic Damara Belt, Namibia. *Lithos*, 45(1–4): 147–176
- Li DW. 1995. Some important directions of continental tectonics and dynamics. *Earth Science Frontiers*, 2(1–2): 141–146 (in Chinese with English abstract)
- Li GM, Feng XL, Huang ZY and Gao DF. 2000. The multiple island arc-basin systems and their evolution in the Gangdise tectonic belt, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 20(4): 38–46 (in Chinese with English abstract)
- Li JL, Sun S, Hao J, Chen HH, Hou QL, Xiao WJ and Wu JM. 1999. Time limit of collision event of collision orogens. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 315–320 (in Chinese with English abstract)
- Li JY. 2009. Cycles and stages of geological history of China mainland. *Geology in China*, 36(3): 504–527 (in Chinese with English abstract)
- Li XY, Guo F and Wang YJ. 2002. Post-orogenic tectono-magmatism and its implications for evolution of orogenic belts. *Geological Journal of China Universities*, 8(1): 68–78 (in Chinese with English abstract)
- Li XZ, Liu WJ, Wang YZ, Zhu QW, Du DS, Shen GF, Liu CJ, Jue MY, Yang SH, Li DM and Feng QL. 1999. Tectonic Evolution of the Tethys and Mineralization in the Sanjiang Region S. W. China. Beijing: Geological Publishing House, 1–276 (in Chinese)
- Li XZ, Jiang XS, Sun ZM, Shen GF and Du DX. 2002. The Collisional Orogenic Processes of the Lancangjiang-Jinshajiang Nujiang-Area, Southwestern China. Beijing: Geological Publishing House, 1–213 (in Chinese with English abstract)
- Liégeois LP. 1998. Preface: Some words on the post-collisional magmatism. *Lithos*, 45: 15–17
- Liégeois LP, Navez J, Hertogen J and Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids; The use of sliding normalization. *Lithos*, 45(1–4): 1–28
- Liu HT, Zhai MG, Liu JM and Sun SH. 2002. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Evolution from post-collisional to anorogenic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 433–448 (in Chinese with English abstract)
- Liu JL, Song ZJ, Cao SY, Zhai YF, Wang AJ, Gao L, Xiu QY and Cao DH. 2006. The dynamic setting and processes of tectonic and magmatic evolution of the oblique collision zone between Indian and Eurasian plates; Exemplified by the tectonic evolution of the Three River region, eastern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 775–786 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Yang CL, Li HK and Chen ZH. 2002. North China continent and Columbia supercontinent. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 223–233 (in Chinese with English abstract)
- Ma WP. 1999. Some important problems on current orogen researching. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 103–111 (in Chinese with English abstract)
- Ma ZJ, Du PR and Gao XL. 2003. Thinking on the research of global tectonics. *Earth Science Frontiers*, 10(Suppl. 1): 1–4 (in Chinese with English abstract)
- Ma ZJ and Gao XL. 2004. Some thoughts on the research on continental tectonics, oceanic tectonics and earth tectonics. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 9–14 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Li XF, Zhang ZH, Wang YT, Wang ZL, Zhao CS, Yang FQ and Li HM. 2005. 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. *Mineral Deposits*, 24(3): 193–205 (in Chinese with English abstract)
- Mattauer M. 1984. Crustal deformation. In: Sun T and Zhang DA (Translate). Beijing: Geological Publishing House, 1–334 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX, Lu FX, Shen SY, Zhu QW, Hou ZQ, Yang KH, Deng JF, Liu XP, He CX, Lin PY, Zhang BM, Tai DQ, Chen MH, Hu HS, Ye S, Xue YX, Tan J, Wei QR and Fan L. 1993. Volcanism and Metallogenesis of Sanjiang Tethy. Beijing: Geological Publishing House, 1–267 (in Chinese)
- Pan GT, Wang LQ, Li XZ, Wang JM and Xu Q. 2001. The tectonic framework and spatial allocation of the archipelagic arc basin systems on the Qinghai-Xizang Plateau. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21(3): 1–26 (in Chinese with English abstract)
- Pan GT, Xu Q, Hou ZQ, Wang LQ, Du DX, Mo XX, Li DM, Wang MJ, Li XZ, Jiang XS and Hu YZ. 2003. Arcipelagic Orogenesis Metallogenic Systems and Assessment of the Mineral Resources Along the Nujiang-Lanchangjiang-Jinshajiang Area in Southwestern China. Beijing: Geological Publishing House, 278–420 (in Chinese)
- Ren JS, Niu BG and Liu ZG. 1996. Microcontinents, soft collision and polycyclic suturing. *Continental Dynamics*, 1(1): 1–9
- Selverstone J. 1988. Evidence for east-west crustal extension in the Eastern Alps: Implications for the unroofing history of the Tauern Window. *Tectonics*, 7(1): 87–105
- Şengör AMC. 1990. Plate tectonics and orogenic research after 25 years: A Tethyan perspective. *Earth-Science Reviews*, 27(1–2): 1–201
- Shao JA, He GQ and Zhang LQ. 2005. Deep-seated factors controlling the intracontinental orogeny of Yanshan Mountains. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 137–148 (in Chinese with English abstract)
- Song HL. 1999. Characteristics of Yanshan type intraplate orogenic belts

- and a discussion on its dynamics. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 309–316 (in Chinese with English abstract)
- Suess E. 1893. Are great ocean depths permanent? In: Sonnenfeld P (ed.). *Tethys: The Ancestral Mediterranean*. Hutchinson Ross Publishing Company, 180–187
- Suo ST, Zhong ZQ and You ZD. 2000. Post-metamorphism extension of the Dabie block and exhumation of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks. *Science in China (Series D)*, 30(1): 9–17 (in Chinese)
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1–4): 29–44
- Teng JW. 2008. My understand and ponder for few important kernel problems in and great achievements for first time and developmental direction of geophysical research in Tibetan Plateau of China. *Progress in Geophysics*, 23(2): 301–318 (in Chinese with English abstract)
- Thompson RN and Gibson SA. 1994. Magmatic expression of lithospheric thinning across continental rifts. *Tectonophysics*, 233(1–2): 41–68
- Wang CM, Deng J, Zhang ST and Yang LQ. 2010. Metallogenic province and large scale mineralization of volcanogenic massive sulfide deposits in China. *Resource Geology*, 60(4): 404–413
- Wang CM, Carranza EJM, Zhang ST, Zhang J, Liu XJ, Zhang D, Sun X and Duan CJ. 2013. Characterization of primary geochemical haloes for gold exploration at the Huanxiangwa gold deposit, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 124: 40–58
- Wang G and Wang EQ. 2005. Extensional structures within the compressional orogenic belt and its mechanism: A case study for the Late Cenozoic deformation in central Yunnan. *Seismology and Geology*, 27(2): 188–199 (in Chinese with English abstract)
- Wang QC and Lin W. 2002. Geodynamics of the Dabieshan collisional orogenic belt. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 257–265 (in Chinese with English abstract)
- Wang YT and Mao JW. 2002. Mineralization in the post-collisional orogenic extensional regime: A case study of the Xiaoqinling gold deposit clustering area. *Geological Bulletin of China*, 21(8–9): 562–566 (in Chinese with English abstract)
- Wilson JT. 1990. On the building and classification of mountains. *Journal of Geophysical Research*, 95(B5): 6611–6628
- Xu ZC and Wang ZM. 1983. Basic characteristics of the geological structures of the Yanshan area, Hebei Province. *Regional Geology of China*, (3): 39–55 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Liang FH, Qi XX, Liu FL, Zeng LS, Liu DY, Li HB, Wu CL, Shi RD and Chen SY. 2005. Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya terrane: Inference from SHRIMP U-Pb zircon ages. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Li TD, Yang JS, Ji SC, Wang ZQ and Zhang ZM. 2008. Advances and perspectives of continental dynamics: Theory and application. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1433–1444 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Li HB, Ji SC, Zhang ZM and Liu Y. 2011. On the tectonics of the India-Asia collision. *Acta Geologica Sinica*, 85(1): 1–33 (in Chinese with English abstract)
- Yan KM and Geng SF. 1993. New progress and new recognition in the tectonic study of the Qinling-Daba Mountains and their adjacent areas. *Regional Geology of China*, (4): 289–301 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Xu ZQ, Ma CQ, Wu CL, Zhang JX, Wang CQ, Wang GZ, Zhang YF, Dong YP and Lai SC. 2010. Compound orogeny and scientific problems concerning the Central Orogenic Belt of China. *Geology in China*, 37(1): 1–11 (in Chinese with English abstract)
- Yang WR. 1999. On orogeny and orogenic belt. *Geological Review*, 45(1): 10–14 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZH, Li Y, Su SR and Zhou Y. 2001. On the intracontinental orogenic process and intracontinental orogenic belt. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 21(3): 169–172 (in Chinese with English abstract)
- Yao SZ, Ding ZJ and Zhou ZG. 2002. Primary discussion on orogenic metallogeny. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 1–6 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CH. 1999. A primary discussion on the intraplate orogenic belt. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 295–308 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Qian Q and Wang Y. 1999. Geochemical study on igneous rocks of orogenic belts. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 113–120 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q. 2008. “Blue storm” and “Red revolution”: On developing new continent tectonics theory. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 77–86 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Qian XL and Li JL. 2002. The modern implications of orogeny and classification of orogenic belts. *Geological Review*, 48(2): 193–197 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Sun M and Wilde SA. 2003. Major tectonic units of the North China craton and their Paleoproterozoic assembly. *Chinese Science Bulletin*, 46(1): 23–38
- Zhao ZP. 1995. An intracontinental-type orogeny: Evidence from Qinling-Dabie Orogenic Belt, China. *Scientia Geologica Sinica*, 30(1): 19–28 (in Chinese)
- Zhong DL. 1998. *Paleoteyan Orogenic Belt in Western Yunnan and Sichuan*. Beijing: Science Press, 1–231 (in Chinese)
- Zhu G and Liu GS. 2000. Basic characteristics and Mesozoic orogenic process of the Jiangnan intracontinental orogenic belt in southern Anhui. *Geotectonica et Metallogenia*, 24(2): 103–111 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- Howell DG. 1991. 地体构造学——山脉形成与大陆生长. 见:王成善等译. 成都:四川科学技术出版社, 1–154
- Mattauer M. 1984. 地壳变形. 见:孙坦,张道安译. 北京:地质出版社, 1–334
- 崔盛芹. 1999. 论全球性中-新生代陆内造山作用与造山带. *地学前缘*, 6(4): 283–293
- 崔盛芹. 2002. 燕山地区中新生代陆内造山作用. 北京:地质出版社, 1–209
- 邓军, 侯增谦, 莫宣学, 杨立强, 王庆飞, 王长明. 2010. 三江特提斯复合造山与成矿作用. *矿床地质*, 29(1): 37–42
- 邓军, 王长明, 李龚健. 2012. 三江特提斯叠加成矿作用样式及过程. *岩石学报*, 28(5): 1349–1361
- 邓晋福, 莫宣学, 罗照华, 赵海玲, 赵国春, 曹永清, 于学政. 1999. 火成岩构造组合与壳-幔成矿系统. *地学前缘*, 6(2): 259–270
- 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 赵国春, 赵兴国, 周肃, 肖庆辉, 吴宗黎, 耿科. 2007. 华北太行-燕山-辽西地区燕山期(J-K)造山过程与成矿作用. *现代地质*, 21(2): 232–240
- 葛良胜, 杨嘉禾, 郭晓东, 邹依林, 陈树新, 张晓辉. 1999. 滇西北地区(近)东西向隐伏构造带的存在及证据. *云南地质*, 18(2): 155–167
- 葛良胜, 郭晓东, 邹依林, 李振化, 邢俊兵. 2003. 滇西北地区富碱岩体(脉)地球化学特征及成因. *地质找矿论丛*, 18(增): 36–42
- 葛良胜, 邓军, 杨立强, 王治华, 郭晓东, 袁士松. 2012. 滇西地区深部构造特征及其对成岩-成矿的控制作用. *岩石学报*, 28(5): 1387–1400
- 葛肖虹. 1989. 华北板内造山带的形成史. *地质论评*, 35(3): 254–261
- 耿树方, 严克明. 1991. 论扬子地台与华北地台属同一个岩石圈板

- 块. 中国区域地质, (2): 97-112
- 侯增谦, 潘桂棠, 王建安, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 2006. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用. 矿床地质, 25(5): 521-543
- 侯增谦. 2010. 大陆碰撞成矿论. 地质学报, 84(1): 30-58
- 胡健民, 刘晓文, 赵越, 徐刚, 刘健, 张拴宏. 2004. 燕山板内造山带早期构造变形演化——以辽西凌源太阳沟地区为例. 地学前缘, 11(3): 255-271
- 李德威. 1995. 大陆构造与动力学研究的若干重要方向. 地学前缘, 2(1-2): 141-146
- 李光明, 冯孝良, 黄志英, 高大发. 2000. 西藏冈底斯构造带中段多岛弧-盆系及其演化. 沉积与特提期地质, 20(4): 38-46
- 李继亮, 孙枢, 郝杰, 陈海泓, 侯泉林, 肖文交, 吴继敏. 1999. 碰撞造山带的碰撞事件时限的确定. 岩石学报, 15(2): 315-320
- 李锦铁. 2009. 中国大陆地质历史的旋回与阶段. 中国地质, 36(3): 504-527
- 李晓勇, 郭锋, 王岳军. 2002. 造山后构造岩浆作用研究评述. 高校地质学报, 8(1): 68-78
- 李兴振, 刘文均, 王义昭, 朱勤文, 杜德勋, 沈致富, 刘朝基, 阙梅英, 杨时惠, 李定谋, 冯庆来. 1999. 西南三江地区特提斯构造演化与成矿(总论). 北京: 地质出版社, 1-276
- 李兴振, 江新胜, 孙志明, 沈致富, 杜德勋. 2002. 西南三江地区碰撞造山过程. 北京: 地质出版社, 1-213
- 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 孙世华. 2002. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山. 岩石学报, 48(4): 433-448
- 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 翟云峰, 王建安, 高兰, 修群业, 曹殿华. 2006. 印度-欧亚侧向碰撞带构造: 岩浆演化的动力学背景与过程——以藏东三江地区构造演化为例. 岩石学报, 22(4): 775-786
- 陆松年, 杨春亮, 李怀坤, 陈志宏. 2002. 华北古大陆与哥伦比亚超大陆. 地学前缘, 9(4): 225-233
- 马文璞. 1999. 当前造山带研究的几个重要问题. 地学前缘, 6(3): 103-111
- 马宗晋, 杜品仁, 高祥林. 2003. 全球构造研究的思考. 地学前缘, 10(S1): 1-4
- 马宗晋, 高祥林. 2004. 大陆构造、大洋构造和地球构造研究构想. 地学前缘, 11(3): 9-14
- 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. 2005. 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. 矿床地质, 24(3): 193-205
- 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 朱勤文, 侯增谦, 杨开辉, 邓晋福, 刘祥品, 何昌祥, 林培英, 张保民, 邵道乾, 陈美华, 胡亨生, 叶松, 薛迎喜, 谭劲, 魏启荣, 范例. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿. 北京: 地质出版社, 1-267
- 潘桂棠, 王立全, 李兴振, 王吉民, 徐强. 2001. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置. 沉积与特提斯地质, 21(3): 1-26
- 潘桂棠, 徐强, 侯增谦, 王立全, 杜德勋, 莫宣学, 李定谋, 汪名杰, 李兴振, 江新胜, 胡云中. 2003. 西南“三江”多岛弧造山过程、成矿系统与资源评价. 北京: 地质出版社, 278-420
- 邵吉安, 何国琦, 张履桥. 2005. 燕山陆内造山作用的深部制约因素. 地学前缘, 13(3): 137-148
- 宋鸿林. 1999. 燕山式板内造山带基本特征与动力学探讨. 地学前缘, 6(4): 309-316
- 索书田, 钟增球, 游振东. 2000. 大别地块超高压变质期后伸展变形及超高压变质岩石折返过程. 中国科学(D辑), 30(1): 9-17
- 滕吉文. 2008. 中国青藏高原地球物理研究的第一批重大成果其发展导向与核心科学问题的认识和思考. 地球物理学进展, 23(2): 301-318
- 王刚, 王二七. 2005. 挤压造山带中的伸展构造及其成因——以滇中地区晚新生代构造为例. 地震地质, 27(2): 188-199
- 王清晨, 林伟. 2002. 大别山碰撞造山带的地球动力学. 地学前缘, 9(4): 257-265
- 王义天, 毛景文. 2002. 碰撞造山作用期后伸展体制下的成矿作用——以小秦岭金矿集中区为例. 地质通报, 21(8-9): 562-566
- 徐正聪, 王振民. 1983. 河北燕山地区地质构造基本特征. 中国区域地质, (3): 39-55
- 许志琴, 杨经绥, 梁风华, 戚学祥, 刘福来, 曾令森, 刘敦一, 李海兵, 吴才来, 史仁灯, 陈松永. 2005. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代造山事件年龄记录. 岩石学报, 21(1): 1-12
- 许志琴, 李廷栋, 杨经绥, 稽少丞, 王宗起, 张泽明. 2008. 大陆动力学的过去、现在和未来: 理论与应用. 岩石学报, 24(7): 1433-1444
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 稽少丞, 张泽明, 刘焰. 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造. 地质学报, 85(1): 1-33
- 严克明, 耿树方. 1993. 秦巴及邻区构造研究的新进展和新认识. 中国区域地质, (4): 289-301
- 杨经绥, 许志琴, 马昌前, 吴才来, 张建新, 王宗起, 王国灿, 张云飞, 董云鹏, 赖绍聪. 2010. 复合造山作用和中国中央造山带的科学问题. 中国地质, 37(1): 1-11
- 杨巍然. 1999. 论造山作用和造山带. 地质论评, 45(1): 10-14
- 杨志华, 李勇, 苏生瑞, 周义. 2001. 论陆内造山作用和陆内造山带. 矿物岩石, 21(3): 169-172
- 姚书振, 丁振举, 周宗桂. 2002. 初论造山带成矿学. 地质科技情报, 21(4): 1-6
- 张长厚. 1999. 初论板内造山带. 地学前缘, 6(4): 295-308
- 张旗, 钱青, 王焰. 1999. 造山带火成岩地球化学研究. 地学前缘, 6(3): 113-120
- 张旗. 2008. “蓝色风暴”与“红色革命”: 论创建新的“大陆构造学说”. 岩石学报, 24(1): 77-86
- 张原庆, 钱祥麟, 李继亮. 2002. 造山作用概念和分类. 地质论评, 48(2): 193-197
- 赵国春, 孙敏, Wilde SA. 2002. 早-中元古代 Columbia 超级大陆研究进展. 科学通报, 47(18): 1361-1364
- 赵宗溥. 1995. 试论陆内型造山作用——以秦岭-大别山造山带为例. 地质科学, 30(1): 19-28
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社, 1-231
- 朱光, 刘国生. 2000. 皖南江南陆内造山带的基本特征与中生代造山过程. 大地构造与成矿学, 24(2): 103-111