

复合造山作用和中国中央造山带的科学问题

杨经绥¹ 许志琴¹ 马昌前² 吴才来¹ 张建新¹
王宗起³ 王国灿² 张宏飞² 董云鹏⁴ 赖绍聪⁴

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074;
3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 4. 西北大学, 陕西 西安 710000)

摘要:在全球大陆范围内,广泛分布的造山带纪录了板块汇聚的历史和碰撞造山的过程,因此,造山带的研究一直是地球科学经久不衰的重要领域。研究表明,世界上许多造山带是长期活动(>300 Ma)的复合造山带,活动域的宽度可超过 1000 km,并具有造山前的热结构,是大陆生长的最好见证。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,面临一个新的起点,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。复合造山带长期活动的原因、大陆增生机制、造山带的流变学结构和造山热对造山作用的控制等已成为当前大陆复合造山带研究的关键科学问题,复合造山动力学已成为当今地球科学前沿——大陆动力学研究的重要内容。

中国中央造山带位于北中国板块与南中国板块之间,是中国大陆上一条十分醒目而又极其重要的巨型(长 5000 km)构造带。中央造山带是经历了大致 600 Ma 的活动历史,泥盆纪和三叠纪的两次碰撞造山以及白垩纪以来的陆内造山过程而构筑成的典型“复合造山带”。在全球复合造山带中,中国中央巨型造山带具有结构复杂性、活动长期性和非原地型,造山过程多期性以及造山带拼贴与大陆增生方式特殊性的特点,特别是世界最大规模的中央超高压变质带及其两期超高压变质作用的发现,揭示了中央造山带的形成还经历了板块汇聚边界洋壳/陆壳深俯冲至 100 km 以上的地幔深处的两次壮观地质事件,使中央造山带成为全球造山带中最为精彩和不可多得的典型,与青藏高原一样,被国内外地质学家们誉为当今中国地学研究的“瑰宝”。

中国中央巨型复合造山带可以作为研究复合造山过程与复合造山动力学的重大地学问题的范例,重要的核心科学问题是:中国中央巨型复合造山带的早古生代和三叠纪陆块汇聚、碰撞造山过程以及中生代陆内造山与周缘盆地互馈;两期高压-超高压变质带的时空关系、形成条件和洋壳/陆壳的俯冲-深俯冲与折返动力学机制;揭示和探讨中国中央复合造山带的长期活动性,造山作用的多期性和叠置性,造山热结构以及复合造山过程;洋壳/陆壳深俯冲、复合造山与大陆增生理论的创新。此外,中央复合造山带的研究对于金属矿产资源的开拓、周缘中生代盆地含油气资源的战略前景以及现今南北中国的气候、环境、人文、地理、生态和灾害的制约提供新的科学依据与动力学背景。

关键词:中央造山带;复合造山作用;造山动力学

中图分类号: P542+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)01-0001-11

前 言

中国中部存在一条堪称“中国脊梁”的东西向巨型中央造山带,西起昆仑、阿尔金和祁连山,经秦岭、大别至苏鲁地区,是中国大陆一条十分醒目而又

极其重要的巨型(5000 km)构造带^[1,2](图 1)。该造山带将中国大陆分为南北两大部分,制约了中国的南、北大地构造和表生地球系统的分野。

中央造山带是在众多地学家长期工作和研究的基础上确立的^[1-10]。中央造山带的形成经历了新元

收稿日期:2009-11-16; 改回日期:2009-12-02

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212010711816)资助。

作者简介:杨经绥,男,1950年生,研究员,博士生导师,主要从事造山带蛇绿岩和超高压变质岩研究;

E-mail: yangjingsui@yahoo.com.cn.

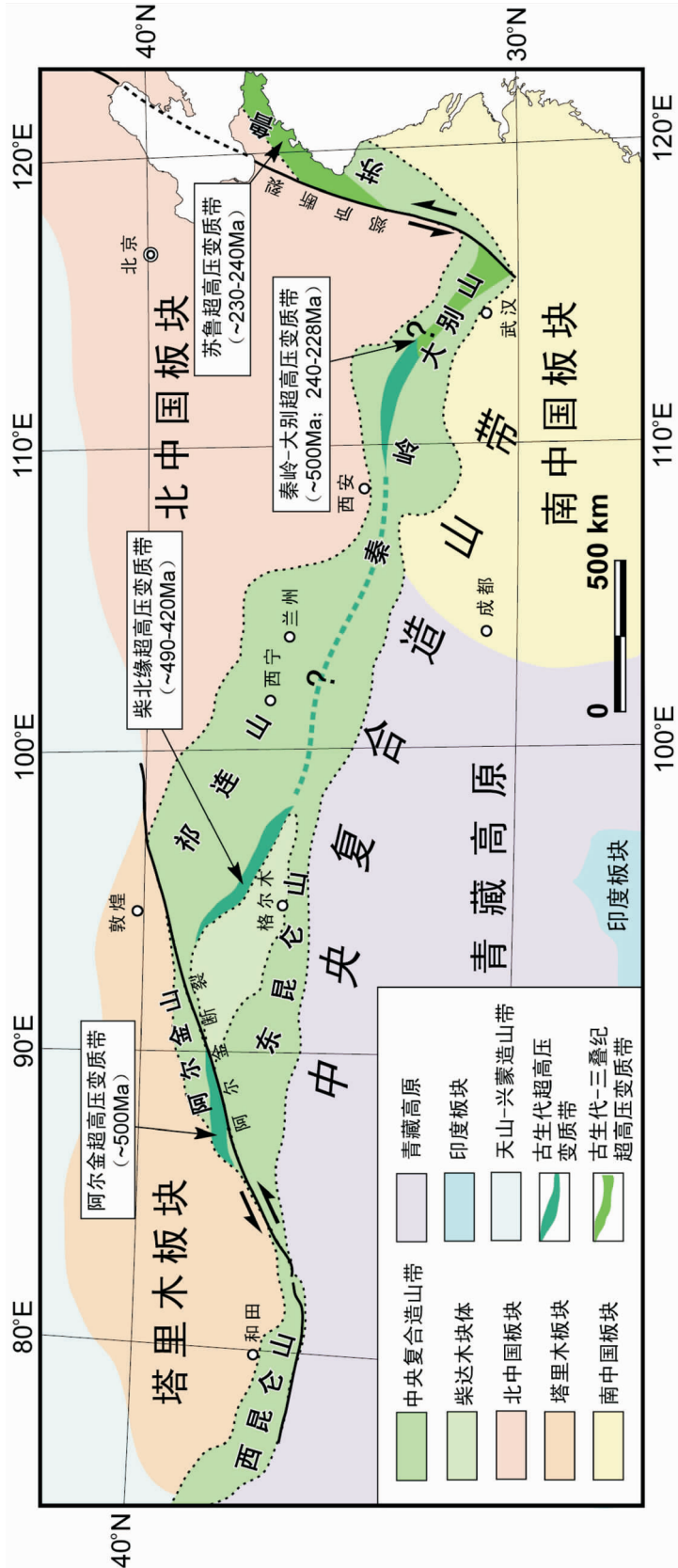


图 1 中央复合造山带区域分布及大地构造分区图

Fig.1 Sketched map of the Central Compound Orogenic Belt of China

古代以来的长期活动和演化历史。现有资料显示,中央造山带的北带(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(包括东昆仑南部、南秦岭、大别山和苏鲁)经历了晚古生代末—三叠纪的俯冲—碰撞过程,碰撞造山作用结束于晚三叠世—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。在中新生代时期,复合造山带又整体不均匀隆升,经历了陆内造山作用的改造,成为今日之构造地貌景观。总的来看,中央造山带是一个长期活动和多期造山的“复合造山带”,有着复杂结构和长期活动以及多期造山作用叠加复合的中国中央造山带是研究复合造山动力学的最佳天然实验室。开展中央造山带复合造山动力学的研究,不仅对于重新认识中国大地构造的演化、古中国大陆的生长及洋—陆转换、现代南北中国的表生地球系统的分野有着重要的科学意义,而且必将对全球造山带研究、大陆增生、大陆深俯冲和折返、复合造山过程和复合造山动力学等大陆动力学的理论创新做出历史性的重要贡献。

1 复合造山理论的创新是地球科学发展的重大需求

人类赖以生存的大陆岩石圈比大洋岩石圈老得多、厚得多以及流变学结构和演化过程复杂得多,它使板块理论的“登陆”受到很大阻力,大陆岩石圈并非刚性块体,变形作用也绝非只发生在板块边界的狭窄地带。人们愈来愈发现运用经典的板块理论很难解释大陆地质,譬如:长期活动的造山带的形成、大陆碰撞造山热的成因、青藏高原的隆升及大陆深俯冲等难题。一个以解决大陆结构、行为、动态演化和驱动力以及发展板块构造理论为目的的大陆动力学研究计划在 20 世纪 90 年代已经开始,大陆动力学理论的完善是一场新的地学变革,是继“板块构造”之后固体地球科学发展的新的里程碑。

在全球大陆范围内,显生宙以来的巨型造山带的面积占 30% 以上。这些巨大的造山带不仅记录了板块汇聚造山的历史,而且由于板块扩张脊(洋脊)物质的加入,也记载了板块裂解、洋盆扩张、俯冲和消亡的过程。100 多年来,研究造山带的专家们一直认为造山作用是构造运动的起源,造山作用过程包括地壳上部的褶皱、逆掩和断裂以及下部的塑型变

形、变质和深成岩浆活动。上世纪板块构造理论赋予“造山作用”新的内涵,把大陆造山带的造山过程看作岩石圈板块相互运动和碰撞作用的表征,板块之间的运动可以通过 3 种类型(离散型、汇聚型和转换型)的狭窄边界进行^[11, 12]。

造山带一直是固体地球科学的研究重心,著名阿尔卑斯造山带经过 100 多年的研究已成为全球造山带的“经典”。许多传统的地质理论、专业术语及一些著名地学大师都出自于此。喜马拉雅山则是正在崛起的、年轻的和活动的造山带,人们对古造山带的许多认识和理论可从这里得到印证或修正。全球造山带的深入研究使地质学家发现,俯冲带上部(活动陆缘)的弧和弧后一侧活动带可以形成“俯冲型”造山带,在俯冲板块(被动陆缘)一侧,伸展盆地中的沉积盖层和变质基底在板块碰撞过程中遭受强烈的变形,形成碰撞型山链;研究还发现在板块碰撞之后可以继续造山(后造山)或者在远离缝合带的地区造山,这种陆内造山活动突出表现为山脉的剧烈隆升,产生新的逆冲、走滑构造、并伴随着强烈的岩浆和变质作用,出现地壳尺度的伸展—剥离以及山体抬升塌陷和盆地的形成。

因此,地质学家通过对大陆造山带的解剖,认识到造山形变不限于汇聚板块边缘的狭长地带内,而可以扩展到板内,达数百乃至上千千米的活动域。地球上许多造山带都是构筑在长期活动(>300Ma)带之上,是长期活动的复合造山带。

国内外研究现状和趋势表明,全球造山带的研究正面临一个新的起点,表现为由单一造山带向复合造山带研究的转向,由造山带浅部结构→深部结构,向浅部与深部过程综合研究的转向,以及由造山带的造山类型和造山作用的研究向造山过程、物理化学机制和造山动力学研究的聚焦。在技术路线上,已由单学科研究向多学科(地质、地球物理、地球化学、地貌、环境、气候、资源等)的系统集成研究扩展。复合造山和复合造山动力学的研究已成为当前地球科学研究的重要前沿,成为大陆动力学理论创新的重要阵地,是地球科学发展的重大需求。

2 造山带与造山类型研究进展

自 20 世纪 70 年代以来,在板块构造理论对大陆造山带的解释中,应用了“大陆碰撞”的概念,对造山过程中地壳缩短和加厚作了很好的解释。然而,地

质学家通过对大陆山链的解剖,认识到造山形变不限于会聚板块边缘的狭长地带内,而可以扩展到板内,达数百乃至上千千米的活动域。因而用简单的刚性板块模型和大陆碰撞模式已不能予以合理的解释。地质学家发现,造山作用涉及到大范围的陆壳变形、变质及花岗质岩浆活动,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)^[13]。

俯冲型山链:俯冲带上部记录了俯冲加积历史在内的前碰撞期的演化。活动陆缘上不同成因块体的加积作用产生不同的陆缘增生带,增生带的未固结物质对于上部板块的变形及造山带的形成起重要的作用^[14]。因此在板块俯冲上盘的主动(活动)陆缘的弧与弧后一侧的活动带可以形成“俯冲型”山链,如巨型的环太平洋俯冲山链。地质学家还发现,古近纪以来东南亚在经历了小块体与亚洲大陆长时间汇聚和对接,对接过程包括了边缘盆地的不断打开、多岛弧的加积和上部俯冲板片的缩短^[14],形成一种特殊的俯冲型山链。

碰撞型山链:地球上的许多山链还构筑在俯冲板块(被动陆缘)一侧,被动陆缘伸展盆地中的沉积盖层和变质基底在板块碰撞过程中遭受强烈的变形,形成碰撞型山链。典型的例子是位于非洲—意大利板块下部的欧洲俯冲板块一侧的阿尔卑斯山链和位于亚洲板块下部的印度俯冲板块一侧的喜马拉雅山链,是由叠覆逆冲岩片组成的具陆壳增生楔结构特征。研究表明,大陆碰撞型山链的形成还可以通过弧/陆碰撞→陆/陆碰撞的方式进行,喜马拉雅造山带就是印度陆块与冈底斯岛弧最后碰撞的产物。有些弧/陆碰撞引起的造山变形过程本身可能是短暂的,如欧洲英国—爱尔兰加里东造山带的弧/陆碰撞造山作用从大陆边缘俯冲开始到碰撞造山结束持续了 32 Ma^[15]。

陆内型山链:研究还发现在板块碰撞之后可以继续造山(后造山)或者在远离缝合带的地区造山。这种陆内造山活动突出表现为山脉的剧烈隆升,产生新的逆冲、走滑构造并伴随着强烈的岩浆和变质作用,出现地壳尺度的伸展—剥离以及山体抬升和塌陷。

3 复合造山带与长期活动带及大陆增生研究进展

地球上绝大多数造山带是复合造山带,具有长

期活动的历史,近十年来,许多地学家们已注意到造山带的复合性与大陆增生有关,重视复合造山带类型和复合造山带长期活动性的研究,取得如下进展。

3.1 复合造山带类型

(1)两个或两个以上时期形成造山带的拼贴体

例如发育在太平洋东岸、美洲大陆西海岸宽近 1000 km、长度超过 10000 km 的科迪勒拉造山带是晚古生代和早白垩—早渐新世的两条平行造山带构成的复合造山拼贴体。青藏高原也是一个巨大复合造山拼贴体,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长期拼贴过程,有人称其为“造山形成的高原(Orogenic Plateaux)”^[16],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。

(2)造山变形叠置形成的复合造山带

研究表明,阿尔卑斯造山带叠置在欧洲华力西造山带上^[16],现代喜马拉雅造山带的前身可能是泛非—早古生代形成的原始喜马拉雅造山带^[17]。

(3)与大陆俯冲(洋壳俯冲)紧密相关的复合造山带

此类型表现为一次持续造山作用中,同时出现与洋、陆俯冲有关的不同造山作用,即,由于俯冲极性的转变导致一侧为与洋壳俯冲(陆壳俯冲)紧密相关的造山作用。典型例子有欧洲的英国—爱尔兰加里东造山带^[18]、美国西部的 Sierra Nevada 在侏罗纪的造山运动^[19]、太平洋南部的新几内亚群岛在新生代的造山作用^[20]等。

3.2 复合造山带的长期活动

地球上的许多复合造山带都是构筑在长期活动带之上。例如,科迪勒拉造山带变形的地质历史纪录表明,该带从 600 Ma 一直活动到现在^[21]。最近的研究表明,该造山带是位于弧后及现代弧后域的长期活动带上的复合造山带,主要的造山期是晚古生代和早白垩—早渐新世;地球物理探测揭示该造山带的地壳并未加厚,并具有长期弱化、低强度、薄和热的岩石圈特征。由此提出浅的软流圈对流使宽阔的弧后域变热的观点,认为由造山带中造山花岗岩基、高级变质作用和韧性变形所指示的造山热能来自原先的弧后热岩石圈,而不是来自于造山变形过程本身^[22]。

上述表明,复合造山带是大范围、多期和多造山类型相互作用的结果,但是目前对地球上大多数复合造山带和“长寿”活动带的形成原因、动力学作用

过程和机制还不清楚。

4 碰撞造山带中的超高压变质作用与大陆深俯冲

目前全球超高压变质带的研究进展很快,已经在全球大陆碰撞造山带的板块汇聚边界上发现了 20 余条超高压变质带^[23,24],这是地球科学发展史和造山带研究史上的一件重大进展。为高压-超高压变质带记录了洋壳/陆壳深俯冲、碰撞造山及折返的历史过程,揭示了低密度的陆壳物质可以被俯冲到 100 km 以下的地幔深度,然后又快速折返回地壳并出露于地表的壮观事件。这一发现被认为是继板块学说后对传统地球科学理论的新挑战,是当今探索地球深部动力学过程和建立大陆动力学理论的窗口。超高压变质带的发现为造山带和造山动力学研究提出了富有挑战性的前沿科学问题。

20 余年来超高压变质带的研究,还遗留一些关键的难题尚未解决:大陆地壳究竟能俯冲到多大深度?低密度的大陆壳岩石究竟是如何俯冲到地幔深度,又是如何折返到地表?超高压变质与壳-幔相互作用及地球物质再循环的关系?汇聚板块边缘的深部物质组成、结构、流变学及动力学机制?巨量俯冲物质折返后的去处?由于超高压变质作用记录了洋壳/陆壳深俯冲、碰撞造山及折返的历史过程,因此它是造山带研究的一项重要内容。脱离碰撞造山带的大背景和造山作用的长期性、复合性及周缘板块的运动、演化过程^[25],而开展大陆深俯冲和超高压变质岩剥露的研究,很难深入认识超高压变质带深部机理和动力学过程。目前,全球超高压变质带的研究已经从矿物学、岩石学、地球化学为主的研究向流变学、构造学、造山过程及大陆动力学的研究方向靠拢。只有从碰撞造山带的高度来看待超高压变质带的产出,又从超高压变质带的产生和剥露机理切入解剖造山带的动力学,乃是超高压变质带深入研究的趋势。

5 造山动力学研究进展

研究表明,大陆造山带的地壳/岩石圈地幔的流变学和深部结构比刚性大洋岩石圈和稳定克拉通、地台复杂得多。近年来大陆造山带地球物理研究揭示了造山带岩石圈的物理状态具有流变学分层结构,壳内、幔内的低速高导层,古造山带无山根,莫霍

面呈水平状,软流圈的巨大起伏,岩石圈地幔的减薄,地壳、地幔的非均一性与各向异性等特征。为此,造山动力学的假说与推断应运而生,如地幔对流、软流圈上侵构造、拆沉作用、底侵作用、下地壳的流变展平作用、大陆地壳的重力扩张作用、岩石圈上下的耦合与非耦合关系等^[26-29],并且提出地壳的非均匀性和流变性可导生不同动力,使人们认识到造山带形成力源的复杂性和多源性。

由此可见,造山带的研究已取得了重大进展,并已经摆脱传统构造地质学和经典板块构造观念的束缚。全球造山带的研究正面临一个由单一造山带向复合造山带研究转向的新起点,复合造山带的造山动力学已成为当前大陆动力学研究的重要前沿,亦成为新的极具有探索性和创造性的研究目标,将使人们重新认识复杂的大陆造山带。

6 中央造山带复合造山动力学研究现状

中央造山带,在欧亚大陆和中国大陆形成和演化进程中占有突出的地位^[1]。

该造山带经历了大致 600 Ma 的活动历史,是泥盆纪、三叠纪的两次碰撞造山以及白垩纪以来的陆内造山过程而构筑成的典型的“复合造山带”。中央造山带所保存的完好的地质记录,显示了结构的复杂性(南北分带、东西分段),造山类型的多样性,活动的长期性,造山过程的多期性,以及造山带拼贴与大陆增生方式的特殊性,它记载了古老特提斯洋盆的兴衰、微陆块的拼合以及和古中国大陆的生长、中国南北板块的汇聚、碰撞及中央造山带的最终崛起和定位的陆内造山的历史进程。特别是揭示洋壳/陆壳深俯冲作用和两期超高压变质作用的巨型超高压变质带的存在,揭示了中央造山带的形成曾经历板块汇聚边界洋壳/陆壳深俯冲至 100 km 以上的地幔深处的两次壮观地质事件,使中国巨型中央复合造山带成为全球造山带大家庭中最为精彩和不可多得的典型。

归纳起来,中央造山带的研究进展已显示其具有以下特征。

6.1 结构的复杂性、造山类型的多样性及活动的长期性

研究表明造山带中保存了大量前寒武纪重大地质历史记录(最显著的是与罗迪尼亚超大陆聚合与

裂解的构造热事件),因此中央造山带的形成经历了新元古代以来的长期活动和演化的历史。现有的资料显示,中央造山带的北带(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(包括东昆仑南部、南秦岭、大别山和苏鲁)经历了晚古生代末—三叠纪的俯冲—碰撞过程,碰撞造山作用结束于晚三叠世—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。在中新生代时期,复合造山带又整体不均匀隆升,经历了陆内造山作用的改造,成为今日之构造地貌景观。总的来看,中央造山带与美洲西部的科迪勒拉造山带相似,是一个长期活动和多期造山的“复合造山带”,但中央造山带较后者更具复杂性和特色,表现于以下三方面:

(1) 早古生代多洋(海)盆、多地体、多岛弧的复杂构造格局

初步研究表明,中央造山带北带的早古生代造山带是由诸多的地体/岛弧组成,愈来愈多的事实表明中央造山带的地体边界蛇绿岩中保留原特提斯洋盆(新元古代—早古生代)的记录。推测现中央造山带北带的地体/岛弧系曾经位于原特提斯洋盆和冈瓦纳大陆之间,是环始特提斯洋地体/岛弧群(活动带)的成员(尽管确切位置尚未锁定)。地体/岛弧相间的离散型边缘海盆的闭合导致地体/岛弧群的拼合与碰撞(弧/陆→陆/陆碰撞),形成了早古生代造山带。这种“三多”的构造格局显示了早古生代造山带形成前的复杂活动带背景。

(2) “非原地”的活动带与造山带

活动大陆与古地磁研究初步揭示位于中央造山带北带的原始早古生代活动带可能位于冈瓦纳大陆和始特提斯洋盆之间,而南带三叠纪造山带形成前的原始活动带位于联合大陆(Pangea)南缘(即阿尔金—祁连—昆仑—北秦岭早古生代早生代造山带的南缘),因此中央造山带可能是两个世代“非原地”活动带和造山带的拼贴、复合和叠置,与科迪勒拉造山带显然不同,这将为全球复合造山带研究树立另一个典例。

(3) 造山类型的多样性

中央复合造山带的形成经过多期复合造山及后造山的历史,不仅涵盖了弧与弧后活动带的造山、被动陆缘的造山及陆内再造山的广阔地域,而

且包含了两个世代的弧/陆碰撞→陆/陆碰撞以及中生代陆内造山过程,造山带的复合性和叠置性以及碰撞运动学所造成的大型走滑构造的影响,使造山类型更为复杂多样。

6.2 早古生代和早中生代两期超高压变质作用及洋/陆深俯冲作用

20世纪80年代以来,中央造山带东段由于发现标志大陆深俯冲作用的大别—苏鲁超高压变质带而闻名于世,成了全球超高压变质作用的研究热点和窗口。近年来,在中央造山带的西段的柴北缘—阿尔金厘定出一条被阿尔金断裂所切割的早古生代超高压变质带^[30-36],并在中央造山带的中段东秦岭又找到了金刚石,确立早古生代超高压变质带的存在^[32]。通过与大别苏鲁超高压变质岩石的对比,提出在横贯中国大陆的中央造山带中可能存在一条西起阿尔金—祁连,东延至秦岭—大别—苏鲁长约4000 km的超大型高压/超高压变质带以及早古生代和三叠纪两期高压/超高压变质作用^[37]。一个造山带中发现如此大规模的和多期的高压/超高压变质岩石为全世界独一无二,这条巨型的高压—超高压变质带的提出,已引起了国际地学界的高度重视。已有的研究表明东部三叠纪超高压变质带是陆壳深俯冲研究的窗口,而西部早古生代的超高压变质带的形成可能与洋壳加陆壳的深俯冲有关^[38,39]。一个复合造山带提供同时研究两期超高压变质作用以及两类深俯冲(洋/陆)作用的机遇实在难得,无疑将对中央造山带复合造山动力学的研究起着重要的作用。

6.3 陆内造山、隆升—剥露与中央造山带的最终“定型”

中央造山带的最后的崛起和隆升剥露过程归根于中生代以来的陆内造山作用,使得早期形成的复合造山带卷入其中。一条造山带在历经了4亿年的活动之后并未安静下来转入克拉通化,在地球上也极为罕见。晚中生代以来中央造山带的周围被大面积分布的陆相盆地所围绕,说明中央造山带耸起和最终“定位”与周缘的盆地呈互馈关系,预示着可以通过这种“盆山”互馈作用的解析来回答山系的隆升、深部物质的抬升剥露与周缘盆地物质堆积这一十分重要的科学问题,即“中央造山带超高压变质岩石从100 km深处折返到地表形成山链之后,遭受剥蚀的巨量山链物质到何处去”?

以上分析显示,目前的研究已对中央造山带的演化历史的多期性、造山带结构的复杂性、造山类型的多样性及不同造山阶段和造山类型的叠置性有了基本的认识,中央造山带既有全球造山带的共性,又有其个性,是一条十分特殊而复杂的复合造山带。然而,正是由于中央造山带具有这些复杂的特性,目前为止,对中央造山带的造山过程特别早古生代和早中生代两个造山旋回的叠置复合造山机制还没有一个清楚的认识。如:早古生代和早中生代两个造山旋回的构造格架和时空叠置如何?早古生代和早中生代两个时期的高压-超高压变质带纵向(东西)和横向(南北)的分布规律和叠置关系如何?中央造山带的长期活动性及造山作用的叠置性的制约机制是什么?等等,这些都是研究中央造山带所面临的重要的科学问题。

以大陆动力学为指导,以解决中央造山带的复合造山过程及动力学为目标,以中央造山带的早古生代和早中生代两个造山旋回的陆块汇聚、碰撞造山过程的研究为主线,以两期高压-超高压变质带的时空关系、形成条件和洋壳/陆壳的深俯冲与折返动力学机制的研究为切入点,在已有研究基础上,通过中央造山带中段不同时期关键地质体的解剖,揭示和探讨中央复合造山带的长期活动性,造山作用的多期性、叠置性,建立复合造山的动力学模型,为全球复合造山带的研究树立新的典例,为复合造山与大陆增生理论的创新以及为解决中国大地构造的关键问题做出重要贡献。为中央复合造山带不同时期、不同类型的金属矿产资源和周缘盆地的能源资源的开拓提供新的科学依据与动力学背景。

7 中央造山带复合造山动力学研究的关键科学问题

关键科学问题之一:中央造山带新元古代—早古生代与晚古生代—三叠纪构造格架的时空叠置。

复合造山带基本构造格架的建立是复合造山动力学研究的基础。中央造山带的基本构造格架是一个复合的构造格架,是新元古代以来长期活动、多期复合造山所奠定的最终产物。必须重塑各个历史阶段的构造格架才能使复合造山动力学的研究具有阶段性和动态演化的实质内容。中央造山带的基本格架主要表现为晚元古代—早古生代构造格架和晚古生代—三叠纪构造格架的复合。现有资料显示,早古生代的微陆块/岛弧群相互作用与晚古生代—三叠纪

较大陆块的相互作用形成的构造格局有很大的差异。中央造山带的新元古代—早古生代与晚古生代—三叠纪的构造格架分别展布在造山带的北带和南带,它们之间在时空上不是简单的拼合、而是体现在不同的动力学条件下两大体制的相互作用和复合的关系。

晚中生代以来,中央造山带的陆内造山作用受到太平洋构造域和新特提斯构造域及青藏高原隆升的影响,中央造山带东、西差异的新的构造格局又叠置在早期形成的复合造山带的构造格局上,譬如中央造山带东段出现巨量的高钾钙碱性花岗岩类岩浆活动的叠加,而西端在新生代以来又明显受到青藏高原隆升事件的改造。因此,分清厘定各个时期形成的格架,重点重塑新元古代—早古生代和晚古生代—三叠纪构造格架及其时空的叠置关系是研究中央造山带的首要关键的科学问题。

关键科学问题之二:两期高压-超高压变质作用的时空关系与洋壳/陆壳深俯冲-折返机制。

中央巨型高压-超高压变质带和两期超高压变质作用是中央造山带最精彩的一幕,标志着中央造山带的形成还经历了板块汇聚边界洋壳/陆壳深俯冲至 100 km 以上的地幔深处的两次壮观地质事件。对大陆深俯冲作用以及快速的折返过程,在国内外已经开展了广泛的研究。对于中央造山带而言,重要的问题是:

位于西部的早古生代的高压-超高压变质带与位于东部的三叠纪高压-超高压变质带在时间和空间上的衔接,二者的分布规律和叠置关系;西秦岭造山带是否存在高压-超高压变质带及其向东向西的延伸。

早古生代高压-超高压的洋壳深俯冲→陆壳深俯冲转换的动力学过程及形成的环境;三叠纪陆壳深俯冲前的历史背景,两期超高压变质岩石深俯冲和折返的时限、过程及动力学条件上的差异及制约因素。

从洋壳/陆壳俯冲到陆陆碰撞和深俯冲物质折返过程中,洋壳/大陆物质所经历的物理化学过程、流变学响应、地球物理壳幔组构和深部地质作用。

关键科学问题之三:中央造山带隆升-剥露过程及巨量物质堆积。

在板块构造威尔逊旋回的最后阶段,一个大的造山幕的结束通常是以造山带深部岩石隆升-剥露、巨量岩浆侵入以及巨量山带物质堆积于周邻盆地为标志的。新的研究发现,巨量花岗质岩浆活动、

山带抬升和盆地中巨量物质的充填,是在相当短的时间里同步进行的^[40]。Nie et al^[41]研究认为,大别山高压-超高压变质岩的剥露导致了其上部巨厚的地壳被抬升剥蚀,所剥蚀的物质的量与厚度达 10~15 km,面积与 200000 km² 的三叠纪松潘—甘孜复理石相当,由此他推测松潘—甘孜复理石是大别山超高压岩剥露的沉积响应。但此观点并未得到科学的论证。探讨深俯冲与折返的巨量物质的去处是一个十分重要的问题。中央造山带周缘分布广泛的中新生代陆相盆地提供了已经剥蚀的山体上部的物质记录,因而通过造山带 P-T-t 轨迹及热年代学研究和周邻盆地碎屑沉积岩的岩石学、矿物学、地球化学和年代学研究,揭示大规模的地壳剥蚀及其沉积响应是中央造山带造山动力学研究的关键科学问题。

关键科学问题之四:复合造山过程与复合造山机制。

在全球范围内,有很多复合造山带经历了长期活动的历史,而且造山作用本身具有多期、叠置的特点。中央造山带经历了早古生代的洋壳俯冲、微陆块的拼合和碰撞,三叠纪南、北中国大陆的最后汇聚和碰撞造山以及白垩纪以来的隆升、剥露和陆内造山等复杂过程,而且两期高压-超高压带说明板块相互作用曾导致中央造山带地壳的显著加厚和两次深俯冲作用,高压-超高压变质岩石的快速折返到地表、中生代碱性岩侵入和盆地的形成说明陆内造山过程曾发生山体的崩塌和岩石圈结构的转型。

为什么中央造山带会经历如此长时期的活动性?不同期的造山作用是否存在成因上的联系?为了回答上述问题,达到最终研究复合造山动力学的科学目标,解析复合造山过程和揭示复合造山机制十分关键。

中央造山带每个时期的造山作用可以包含了从俯冲开始的弧-陆碰撞造山→陆-陆碰撞造山→陆内造山的全过程,这个全过程受到造山时限的制约。造山作用的内涵是构造变形、变质演化、岩浆活动和变质基底的活化,强烈的造山作用可以使十分广阔三维空间的物质卷入强烈的变形之中。包括主动陆缘和被动陆缘在内的地壳/岩石圈热结构和流变学结构的演化,为碰撞造山作用提供了前提。譬如中央造山带西部与高压-超高压变质带平行的早古生代双岩浆带的发育,说明北缘的早古生代俯冲造山作用与南缘的大陆伸展存在着联系,而南缘伸展裂隙

带的发育又成为三叠纪碰撞造山作用的前提。

复合造山作用是不同时期造山作用的复合,造山带的长期活动性是复合造山作用的根源。因此通过造山热、深部物质循环、流变学的演化以及伴随的物理化学作用响应的研究,探索中央造山带长期活动的原因以及长期活动对造山作用的时空复合与叠置的影响;在复合构造体制、复合造山作用、深俯冲与折返机制以及中央造山带隆升-剥露过程及巨量物质堆积的综合研究基础上,通过深部地壳-上地幔的速度、密度等地球物理参数的分布特征,探讨地壳/岩石圈流变学组构和地壳-上地幔地球物理组构对复合造山的响应,及造山热-力学过程的数值和实验模拟,揭示复合造山机制和科学建立复合造山动力学模型。

此外,造山后的隆升剥露历程使得早期形成的丰富的深成金属矿产抬升地表,使中央造山带包含了多个人类得以利用的巨型金属矿床密集区带(如铜、铁、铅锌、钨、镍、金等)。尤其,中央造山带周缘盆地是中国战略性油气资源分布的重要基地。中生代以来的陆内造山使山体隆升、剥蚀,形成了一系列陆相沉积盆地,如酒泉盆地、柴达木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、南阳盆地、合肥盆地和苏北盆地等。因此,开展中央造山带造山动力学的研究将为本区金属矿产资源及能源资源形成规律和成因提供关于大地构造和动力学机制方面的新的科学背景,为战略找矿、开拓新的资源前景提供了理论支撑。

综上所述,笔者认为中央造山带是全球造山带中研究复合造山机制的最理想的野外实验室之一。

致谢:徐向珍、李金阳、郜源红协助论文的完成,在此表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 姜春发,杨经绥,冯秉贵,等. 昆仑开合构造[M]. 北京:地质出版社,1992:1-217.
Jiang Chunfa, Yang Jingsui, Feng Bingui, et al. Opening Closing Tectonics of Kunlun Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992:1-217(in Chinese).
- [2] 姜春发,王宗起,李锦轶,等. 中央造山带开合构造 [M]. 北京:地质出版社,2000:154.
Jiang Chunfa, Wang Zongqi, Li Jinyi, et al. Opening Closing Tectonics of Central Orogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000:154(in Chinese).
- [3] 肖序常,陈国铭,朱志直. 祁连山古蛇绿岩的地质构造意义[J]. 地质学报,1978,54(1):287-295.

- Xiao Xuchang, Chen Guoming, Zhu Zhizhi. Geological tectonic implications of ophiolite in Qilian Mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1978, 54 (1):287-295(in Chinese with English abstract).
- [4] 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆, 等. 东秦岭复合山链的形成——变形、演化及板块动力学[M]. 北京:环境科学出版社, 1988:137-149.
- Xu Zhiqin, Lu Yilun, Tang Yaoqing, et al. Formation of the Composite Eastern Qinglin Chains [M]. Beijing:Environmental Science Press, 1988:137-149(in Chinese).
- [5] 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 祁连-秦岭山系海相火山岩[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1991.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Ren Youxiang, et al. Marine Facies Volcanic Rocks in the Qilian and Qinling Mountains [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991(in Chinese).
- [6] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京:科学出版社, 2001,1-805.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics[M]. Beijing:Science Press, 2001:1-805(in Chinese).
- [7] 张本仁, 张宏飞, 赵志丹, 等. 东秦岭及邻区壳幔地球化学分区和演化及大地构造意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 1996, 26:201-208.
- Zhang Benren, Zhang Hongfei, Zhao Zhidan, et al. Geochemistry division of crust and mantle in the East Qinling and adjacent region [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26:201-208(in Chinese).
- [8] 张本仁. 秦岭地幔柱源岩浆活动及其动力学意义 [J]. *地学前缘*, 2001, 8(3):57-66.
- Zhang Benren. Magmatic activities from plume-source in the Qinling orogenic belt and its dynamic significance [J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(3):57-66(in Chinese with English abstract).
- [9] 袁学诚, 徐名才, 唐文榜, 等. 东秦岭地壳反射地震剖面 [J]. *地球物理学报*, 1994, 37:749-758.
- Yuan Xuecheng, Xu Mingcai, Tang Wenbang, et al. Eastern Qinling seismic reflection profiling [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1994, 37: 749-758(in Chinese with English abstract).
- [10] 杨巍然, 杨森楠. 造山带结构与演化的现代理论和研究方法——东秦岭造山带剖析[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1991:1-191.
- Yang Weiran, Yang Sennan. Current Theory and Study Method on Structure and Evolution of Orogen: Example from East Qinling orogen [M]. China University of Geosciences Press, 1991: 1-191(in Chinese).
- [11] Wilson J T. A new class of faults and their bearing on continental drift[J]. *Nature*, 1965, 207:343.
- [12] Wilson J T. Convection and continental drift in the southwest Pacific[J]. *Tectonophysics*, 1966, 3:69.
- [13] Mattauer, M. La formation des chaines de montagnes. *Science edition francaise de scientific american N*, 1981,46:40-56.
- [14] Pubellier M, Ego F, Chamot-Rooke C, et al. The building of pericratonic mountain ranges: structural and kinematic constraints applied to GIS-based reconstructions of SE Asia [J]. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 2003, 174:561-584.
- [15] Dewey J F. Orogeny can be very short [J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 2005, 102:15286-15293.
- [16] Matte P. Accretionary history and crustal evolution of the Variscan belt in western Europe[J]. *Tectonophysics*, 1991, 196:309-337.
- [17] 许志琴, 杨经绥, 梁凤华, 等. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代造山事件年龄记录[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1):1-12.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Liang Fenghua, et al. Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya terrane: inference from SHRIMP U-Pb zircon ages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 1-12(in Chinese with English abstract).
- [18] Dewey J F, Strachan R A. Changing Silurian - Devonian relative plate motion in the Caledonides: sinistral transpression to sinistral transtension [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 2003, 160: 219-229.
- [19] Day H W, Bickford M E. Tectonic setting of the Jurassic smartville and slate creek complexes, northern Sierra Nevada, California [J]. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 2004, 116:1515-1528.
- [20] Aitchison J C, Clarke G L, Meffre S, et al. Eocene arc-continent collision in New -Caledonia and implications for regional Southwest Pacific tectonic evolution [J]. *Geology*, 1995, 23:161-164.
- [21] Burchfiel B C, Cowan D S, Davis G A. Tectonic overview of the Cordilleran orogen in the western United States [C]// Burchfiel B C, Lipman P W, Zoback M L (eds.). *The Cordilleran Orogen: Conterminous U.S.: Boulder, Colorado, Geological Society of America, The Geology of North America*, 1992, G-3:407 - 479.
- [22] Hyndman R D, Currie C A, Mazzotti S P. Subduction zone backarcs, mobile belts, and orogenic heat. *GSA Today*, 2005, 15 (2): 10:1130/1052-5173.
- [23] Chopin C. Ultrahigh-pressure metamorphism: tracing continental crust into the mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 212:1-14.
- [24] Liou J G, Hacker B R, Zhang R Y. Into the forbidden zone [J]. *Science*, 2000, 287:1215-1216.
- [25] 杨振宇, 董树文, Jean B. 华南、华北地块中生代构造演化与超高压变质岩的折返机制[J]. *地质论评*, 2001, 47(6):568-576.
- Yang Zhenyu, Dong Shuwen, Jean B. Mesozoic tectonic evolution of the north and south China blocks and exhumation mechanism of the ultra-high pressure metamorphic rocks [J]. *Geological Review*, 2001, 47(6):568-576(in Chinese with English abstract).
- [26] Bird P. Lateral extrusion of lower crust from under high topography, in the isostatic limit [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 6: 10275-10286.
- [27] Molnar P, Lyon-Caen H. Some simple physical aspects of the support, structure, and evolution of mountain belts [C]//Clark, Sydney P Jr, et al (eds.). *Processes in continental lithospheric deformation. Geological Society of America Special Paper*, 1988, 218:179-207.
- [28] Platt J P, Vissers R L M. Extensional collapse of thickened continental lithosphere: A working hypothesis for the Alboran Sea and Gibraltar Arc[J]. *Geology*, 1989, 17:540-543.

- [29] Pysklywec R N, Beaumont C. Intraplate tectonics: feedback between radioactive thermal weakening and crustal deformation driven by mantle lithosphere instabilities [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 221: 275–292.
- [30] 刘良, 车自成, 罗金海, 等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及地质意义[J]. *科学通报*, 1996, 41(14): 1485–1488.
Liu Liang, Che Zicheng, Luo Jinhai, et al. Recognition of the eclogite in west segment of Altun [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(14): 1485–1488(in Chinese).
- [31] 刘良, 孙勇, 车自成, 等. 阿尔金发现超高压(>3.8GPa)石榴二辉橄榄岩[J]. *科学通报*, 2002, 47 (9): 657–662.
Liu Liang, Sun Yong, Che Zicheng, et al. Ultrahigh pressure (> 3.8GPa) garnet lherzolite iscovered in Altun [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47 (9): 657–662(in Chinese).
- [32] 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 柴北缘早古生代高压–超高压变质带发现典型超高压矿物—柯石英 [J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 175–179.
Yang Jingsui, Song Shuguang, Xu Zhiqin, et al. Discovery of Coesite in the North Qaidam Early Paleozoic Ultrahigh –high Pressure (UHP–HP) Metamorphic Belt, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 175–179(in Chinese with English abstract).
- [33] 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 柴北缘地区榴辉岩的发现及潜在的地质意义[J]. *科学通报*, 1998, 43(14): 1544–1549.
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Li Haibing, et al. Eclogite discovered in North Qaidam mountain and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(14): 1544–1549(in Chinese).
- [34] 杨经绥, 许志琴, 宋述光, 等. 青海都兰地区榴辉岩的发现及对中央造山带高压–超高压变质带研究的意义 [J]. *地质学报*, 2000, 74 (2): 156–168.
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Song Shuguang, et al. Discovery of eclogite in Dulan, Qinghai Province and its significance for studying the HP –UHP metamorphic belt along the central orogenic belt of China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74 (2): 156–168(in Chinese with English abstract).
- [35] 张建新, 张泽明, 许志琴, 等. 阿尔金构造带西段榴辉岩的 Sm–Nd 及 U–Pb 年龄–阿尔金中加里东期山根存在的证据[J]. *科学通报*, 1999, 44(10): 1109–1112.
Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Xu Zhiqin, et al. Sm–Nd and U–Pb ages of the eclogite in west part of the Altun orogenic belt– Evidence of mountain root of Caledonian period [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(10): 1109–1112(in Chinese).
- [36] 张建新, 孟繁聪, 戚学祥. 柴达木盆地北缘大柴旦和锡铁山榴辉岩中石榴子石环带对比及地质意义 [J]. *地质通报*, 2002, 21(3): 123–129.
Zhang Jianxin, Meng Fancong, Qi Xuexiang. Comparison of garnet zoning between eclogites in Da Qaidam and Xitieshan on the northern margin of the Qaidam basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(3): 123–129(in Chinese with English abstract).
- [37] 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 等. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别[J]. *地质学报*, 2002, 76(4): 484–495.
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Pei Xianzhi, et al. Discovery of diamond in North Qinling: Evidence for a giant UHPM Belt across Central China and recognition of Paleozoic and Mesozoic Dual deep Subduction between North China and Yangtze plates [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76 (4): 484–495 (in Chinese with English abstract).
- [38] 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 等. 柴达木北缘超高压变质带中的岛弧火山岩[J]. *地质学报*, 2004, 78(1): 52–64.
Shi Rendeng, Yang Jingsui, Wu Cailai, et al. Island arc volcanic rocks in the North Qaidam UHP metamorphic belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78 (1): 52–64 (in Chinese with English abstract).
- [39] Yang Jingsui, Wu Cailai, Zhang Jianxin, et al. Protolith of eclogites in the north Qaidam and Altun UHP terrane, NW China: Earlier oceanic crust? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 28: 185–204.
- [40] Kimbrough D L, Smith D P, Mahoney J B, et al. Forearc basin sedimentary response to rapid Late Cretaceous batholith emplacement in the Peninsular Ranges of southern and Baja California[J]. *Geology*, 2001, 29: 491–494.
- [41] Nie S Y, Yin A, Rowley D B, et al. Exhumation of the Dabie Shan ultra–high–pressure rocks and accumulation of the Songpan – Ganzi flysch sequence, central China [J]. *Geology*, 1994, 22(11): 999–1002[DOI].

Compound orogeny and scientific problems concerning the Central Orogenic Belt of China

YANG Jing-sui¹, XU Zhi-qin¹, MA Chang-qian², WU Cai-lai¹, ZHANG Jian-xin¹,
WANG Zhong-qi³, WANG Guo-can², ZHANG Hong-fei², DONG Yun-peng⁴, LAI Shao-cong⁴

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Northwest University, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract: Orogenic belts widely distributed in the Earth have recorded the history of plate convergence and orogenic processes during the collision. Many of these belts are long-lived (>300 Ma) compound belts, which are more than 1000 km wide with a pre-orogenic thermal structure that provides evidence for continental growth. In the past decade, research has begun to focus on the long-term dynamics of such belts as well as their tectonic features and processes. A number of critical problems remain existent, which include the origins of the long-term activities, the mechanism of continental accretion, and the rheological and thermal structure of such orogens. The Central Orogenic Belt of China (COB) is a huge compound orogen, which extends more than 5000 km across central China and marks the boundary between the North China Block and the South China Block. The COB has been active for ~600 Ma, and during this time it underwent two major collisions, one in the Devonian and the other in the Triassic. In addition, the region has become tectonically active since the Cretaceous. The COB differs from other compound orogens in having a very complex structure, multiple long-term orogenic events, convergence of orogens and accretion of continents. The recent discovery of a large high- and ultrahigh-pressure metamorphic belt (HP-UHP) in the orogen and the recognition of two HP-UHP metamorphic events indicate the subduction of both oceanic and continental crust to the depth greater than 100 km. Thus, the COB is as important in the tectonic evolution of Asia as the Qinghai-Tibetan Plateau.

Some of the critical unanswered questions regarding the COB include the nature of the continental convergence, collision and orogeny in the Devonian and Triassic and the formation of intracontinental sedimentary basins during the Mesozoic and Cenozoic. Also unclear are the temporal and spatial relationships of the HP-UHP metamorphic belts and the conditions under which deep subduction and exhumation of oceanic/continental crust took place. Likewise, the processes responsible for the long-term tectonic activity, the multiple and overlapping orogenies, and the thermal structure of the region are unclear. In addition, little is known about the genesis of the mineral deposits in the region and the oil and gas potential of adjacent Mesozoic and Cenozoic basins.

Key words: central orogenic belt; compound orogeny; orogenic dynamics

About the first author: YANG Jing-sui, male, born in 1950, senior researcher, supervisor of doctor candidates, engages in the study of ophiolite of the orogenic zone and ultrahigh-pressure metamorphic rocks; E-mail: yangjingsui@yahoo.com.cn.