

晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征

董树文¹⁾ 张岳桥^{1,2)} 陈宣华¹⁾ 龙长兴¹⁾
王涛³⁾ 杨振宇^{1,2)} 胡健民¹⁾

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2) 南京大学地球科学系, 江苏南京 210093;

3) 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘要 板块构造研究成果与同位素精确定年数据的积累,使我们对中国东部的晚侏罗世一早白垩世东亚多向汇聚作用有了深刻的认识。全球三大洋在晚侏罗世(165 ± 5) Ma 近乎同时的开启,以及东亚周边古太平洋、新特提斯洋和蒙古—鄂霍茨克洋的俯冲消亡,在中国中东部和东亚地区形成了多向挤压汇聚的燕山期构造体系,即东亚多向汇聚构造体系(简称东亚汇聚)。东亚汇聚启动了经典的燕山运动,发育了独特的构造变形特征。东亚汇聚构造体系具有两个近乎稳定的刚性陆核,即鄂尔多斯地块和四川(盆地)地块,在它们的周缘形成了晚侏罗世一早白垩世陆内多向挤压变形和似前陆盆地,如大巴山晚侏罗世前陆。此外,东亚多向汇聚构造体系影响了东亚和中亚大部分地区的板内变形作用,在中国大陆及其周边形成了反映南北向挤压的蒙古弧共轭走滑断裂系统、燕山—阴山陆内造山带、大别山—大巴山侏罗纪陆内造山带等典型的燕山期构造带。东亚汇聚具有深刻的全球构造背景与动力来源,是重要的科学研究问题。

关键词 晚侏罗世;东亚多向汇聚;构造体系;动力来源;变形特征

中图分类号: P541; P552

文献标识码: A

文章编号: 1006-3021(2008)03-306-12

The Formation and Deformational Characteristics of East Asia Multi-Direction Convergent Tectonic System in Late Jurassic

DONG Shuwen¹⁾ ZHANG Yueqiao^{1,2)} CHEN Xuanhua¹⁾ LONG Changxing¹⁾
WANG Tao³⁾ YANG Zhenyu^{1,2)} HU Jianmin¹⁾

1) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;

2) Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093;

3) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract The accumulation of new data of plate tectonics and high-resolution isotopic dating brings on the profound understanding of the tectonic events in eastern China during the Late Jurassic to Early Cretaceous. The simultaneous opening of three major global oceans during Late Jurassic (since 165 ± 5 Ma) and subduction of paleo-Pacific, Neo-Tethys and Mongolia-Okhotsk oceans around East Asia, forms Yanshanian multi-direction compressional and convergent tectonic system in eastern China and East Asia, which is named as East Asian multi-direction convergent tectonic system (i. e., East Asia Convergence). The East Asia Convergence initiates the classical Yanshan Movement, resulting in characteristic deformation styles in East China. The stable Ordos and Sichuan blocks compose the two rigid continental cores in the system, with Late Jurassic to Early Cretaceous multi-direction compressional deformation and foreland basins formed around them. Additional-

本文由 973 项目“大陆深俯冲作用”(编号: 199905505),地质大调查项目“亚洲中部及邻区 1:250 万地质图系”(编号: 1212010811064),中石化项目“大巴山前陆演化与油气远景”(编号: 海相勘探—02)和国家自然科学基金项目(编号: 40572120)联合资助。

收稿日期:2008-05-22;改回日期:2008-05-30。责任编辑:刘志强。

第一作者简介:董树文,男,1954 年生,研究员,博士生导师,长期从事动力成岩成矿与碰撞造山带研究;通讯地址:100037,北京市西城区百万庄大街 26 号;电话:010-68999606;E-mail:swdong@cags.net.cn。

ly, the East Asia Convergence affects the intra-plate deformation in east and central Asia during Yanshan movement, forms conjugated N-S compressional Mongolian Arc of strike-slip and thrust fault system, and intracontinental Yanshan-Yinshan and Dabieshan-Dabashan orogenes. The East Asia Convergence, with profound global tectonic settings and dynamic origin, is an important scientific topic.

Key words Late Jurassic; East Asian multi-direction convergent; tectonic system; geodynamics; deformation

亚洲大陆主体是印支期由诸多微陆块碰撞、拼接而成的联合陆块(董树文等,2000,2007;吴根耀,2001,2002)。近年来一系列新的构造地质研究成果与精确同位素定年数据的积累,以及东亚深部探测数据的揭示,使我们对发生在中国东部、甚至亚洲东部的侏罗纪—白垩纪之交的构造变动及其动力学机理有了新的认识。中国中东部三叠纪华南、华北陆块碰撞—拼合后,形成新的中国大陆,近EW向特提斯构造体制控制着大陆的变形,直到中、晚侏罗世各陆块的古地磁动力学趋于统一。随着特提斯洋关闭和东亚大陆形成,晚侏罗世太平洋板块向西俯冲,形成濠西太平洋沟-弧-盆系统和东亚NNE向构造体系(新华夏系)。同时,西伯利亚板块向南运动,蒙古—鄂霍茨克洋关闭;印度大陆脱离澳大利亚板块,向北漂移,拉萨地块拼贴于亚洲大陆,出现了受控于东亚深部动力学过程的多板块向东亚汇聚的运动格局。这种起始于(165±5)Ma的多个板块向东亚的极性运动,以及产生的变形图像与深部响应,被称之为“东亚汇聚”,由此形成以陆内俯冲和陆内造山为特征的晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系。东亚多向汇聚构造体系的变形特征,表现为自中、晚侏罗世((165±5)Ma)以来,我国东南沿海地区出现向W或WN方向的挤压,蒙古地块向南推覆,拉萨地块向N-NE拼贴,发育了大巴山晚侏罗世前陆盆地。鄂尔多斯地块和四川地块可能构成了东亚多向汇聚构造体系北、东、南西“多向挤压”构造变形的两个核心地块。笔者在前人研究基础上,综述了晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系形成的全球构造背景和构造变形特征,分析了该构造体系与燕山运动之间的关系,阐明了东亚汇聚研究的科学意义,并提出了东亚汇聚研究的科学问题。

1 晚侏罗世东亚汇聚的全球构造背景与动力来源

在东亚,构造地质学家通常将焦点集中在东西向的特提斯构造域向NNE向的太平洋构造域的转变的构造变形对比、转变时代和机理之上(赵越等,1994,2002,2004a,2004b;翟明国等,2004)。然而,

从全球构造背景来看,中、晚侏罗世东亚板块多向汇聚作用发生的时期,正是处在大西洋和太平洋中脊拉开、特提斯大洋关闭、印度洋扩张和蒙古—鄂霍茨克洋关闭等全球重大构造事件发生的时期。全球三大洋洋底都是从距今160Ma左右的侏罗纪开始增生(马宗晋等,1998)。大西洋中脊在185Ma打开,至侏罗纪末大西洋的宽度已达到500km并联通直布罗陀海峡与新特提斯洋(Veevers,2004)。南大西洋至少在155Ma也已经开始打开(Jokat et al.,2003)。在冈瓦纳大陆裂解的早期,大约155Ma,Riiser-Larsen海/莫桑比克盆地形成非洲与南极之间的第一块洋壳(Jokat et al.,2003)。因此,有必要从全球构造背景来审视侏罗纪—白垩纪之交的东亚构造变动和多向汇聚作用。

1.1 西伯利亚板块向南运动与蒙古—鄂霍茨克洋关闭

从蒙古杭爱山脉一直延伸到东部鄂霍茨克海乌达海湾、长约3000km的蒙古—鄂霍茨克构造带,形成于中、晚侏罗世—早白垩世(Xu et al.,1997;Zorin,1999;Wang et al.,2004;Liu et al.,2005)。蒙古—鄂霍茨克洋岩石圈向北俯冲,并自西向东关闭,早-中侏罗世外贝加尔东部海相复理石沉积渐变为陆相磨拉石沉积,早白垩世东部完全关闭(Zorin,1999;Davis et al.,2001)。古地磁研究证明,蒙古—鄂霍茨克洋关闭主要是西伯利亚陆块向南运动与蒙古联合地块碰撞的结果。西伯利亚陆块与华北和蒙古联合地块发生对接(Zhao et al.,1992)及蒙古—鄂霍茨克洋消失的时间发生在晚侏罗世,有关的三叠纪—中侏罗世海相地层的发现及其他地质证据,有力地支持了古地磁资料的推论(Nie et al.,1994)。这个时候(侏罗纪—白垩纪),北冰洋地区的美亚(Amerasian)盆地也开始打开(Yakubchuk,2002)。伴随着晚侏罗世西伯利亚板块的向南运动,该时期西伯利亚板块发生了大约50°的顺时针旋转(Schettino et al.,2005)。晚侏罗世以来中亚造山带独特的大陆内部板内压扭性造山作用,形成了一系列走滑与逆冲断裂、伸展构造、断层相关褶皱和(含煤及含油气)盆地(Yakubchuk,2004;Cunnin-

gham, 2005)。地块旋转和走滑作用导致的构造变形在中亚马赛克型地块结构的形成中起到了重要作用(Buslov et al., 2004)。

中亚造山带(也即乌拉尔—蒙古褶皱带),自欧亚交界的乌拉尔山脉,向东经哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦,延伸至我国新疆、甘肃北部、内蒙古西部、俄罗斯南部和蒙古国,东西延伸超过5000 km,主要发育天山、阿尔泰山等山脉和蒙古高原等,是世界上最大的、也是最活动的陆内造山带系统(De Grave et al., 2007)。

长期以来,人们认为中亚造山带内显著的构造变形(特别是走滑断层作用),其中的一部分形成于新生代,是新生代印度—亚洲陆陆碰撞的结果,而贝加尔裂谷是新生代天体撞击裂谷作用的结果;其中的另一部分,如中亚和哈萨克斯坦境内的构造变形,包括一个2000 km宽的NW走向右行走滑断裂系统(由Talas-Fergana、Jalair-Naiman、中央哈萨克斯坦、Chingiz、Irtysch和Yenisei-Sayan等断裂),累计右行走滑移量在500 km左右,则被认为主要形成于中生代以前(Zaitsev, 1984)。但是,这些断裂中的大部分均切过并错断中侏罗统地层,并被古近纪沉积物所封闭,说明它们形成于晚侏罗世—白垩纪(Yakubchuk, 2004)。

蒙古、横穿贝加尔和我国东北地区,主要发育左行走滑断层系(如蒙古—鄂霍茨克断裂、Hingan断裂等),一般为NE走向,累计总滑移量也在500 km左右。Hingan断裂左行走滑断了侏罗纪—早白垩世大Hingan岩浆弧,滑移量可达400 km。Hingan断裂的东北端分裂为几个左行走滑断裂分支,将Selemdzha、Niman和Kerbi等几个晚古生代含金变质地体错断了大约100~200 km(Yakubchuk et al., 1999)。

西伯利亚南部和蒙古北部,如西伯利亚板块的Stanovoy地盾和Aldan地盾之间,以及从阿尔泰山到北蒙古和蒙古—鄂霍茨克缝合带,还存在一系列显著的向南逆冲推覆的、东西走向中生代逆冲断层系(莫申国等,2005),形成与之相关的侏罗纪—早白垩世含煤沉积盆地。

中亚和哈萨克斯坦地区的右行走滑断裂,与蒙古和我国东北地区的左行走滑断裂,构成了中亚造山带板内共轭走滑断裂系统(即前人所指的蒙古弧),张国伟等(2002)称之为中新生代环西伯利亚陆内构造体系域。共轭走滑断裂系统,连同近EW向的中生代逆冲断层系,以及一系列挤压盆地,都是

晚侏罗世—白垩纪西伯利亚板块向南运动并旋转,蒙古—鄂霍茨克洋关闭,以及西伯利亚大陆板块与中朝板块(复合的华北—蒙古大陆)SN向挤压碰撞所造成的构造变形结果。

1.2 太平洋板块向西运动与濒太平洋构造体系的形成

西太平洋是地球上构造运动最活动、最复杂的地区之一。太平洋板块向西俯冲作用形成了重要的濒西太平洋沟—弧—盆系统、东亚NNE向构造体系(新华夏体系)和地震—火山活动带(董树文等,2007;Maruyama et al., 2007)。在西南日本,侏罗纪—早白垩世是重要的消减和多个地体的拼贴碰撞期(Hada et al., 2001)。太平洋或伊泽奈崎洋板块开始向东亚俯冲的时间为晚侏罗世(Van der Voo et al., 1999, Richards, 1999),尽管有人提出它发生于中侏罗世(水谷伸治郎等,1989;Maruyama et al., 1989;Ichikawa, 1990),但太平洋洋底磁条带仍证实其最老的年代为晚侏罗世(Wallick et al., 1992)。由于180 Ma以来大西洋中脊的开启,东太平洋海沟至今已经向西移动了3000~4000 km(Lithgow-Bertelloni et al., 1998)。

濒太平洋构造体系的形成,造成了我国东部巨型左行走滑断裂——郯庐断裂大约700 km的滑移量。

1.3 印度洋开启与印度板块向北运动

印度洋开启的时间也是在晚侏罗世。印度洋东北部开启的时间为156 Ma,而西印度洋的开启可能在150 Ma(Veevers, 2004)。与之大致同时,在非洲南部与澳大利亚东南部之间发育了火山岩喷发的大火成岩省。

印度板块脱离澳大利亚等冈瓦纳古陆的时间和特提斯洋反时针旋转关闭的起始点、拉萨地块与亚洲大陆拼贴等构造过程都是同步的(160~150 Ma \pm)。140 Ma时,印度地块开始逆时针旋转(Schettino et al., 2005)。120 Ma时,印度地块开始快速北移。在晚白垩世和新生代早期,印度洋拖着印度地块向北运动了约5200 km,并逆时针旋转了大约55°。印度陆块最终与亚洲大陆碰撞(50 \pm 10 Ma)(Chang et al., 1986;Leeder et al., 1988;Yin et al., 1988),并向北进入到欧亚板块约2100 km(Schettino et al., 2005)。

1.4 特提斯洋闭合与西米里造山事件

欧亚板块与冈瓦纳大陆之间特提斯洋不同地域的差异关闭过程,决定了天山地区的中生代演化。中生代早期,一些小的冈瓦纳周边地块从冈瓦纳大

陆裂离出去,向北汇聚在欧亚板块周边。晚三叠世至早白垩世期间,特提斯洋岩石圈俯冲到作为欧亚板块活动南缘一部分的天山南边塔里木板块南缘之下(Garzanti et al., 1999; Yin et al., 2000)。中生代特提斯洋中的这些冈瓦纳周边地块的碎片,通常被称为西米里(Cimmerian)地块(De Grave et al., 2007)。晚三叠世一早白垩世西米里造山事件(基梅里运动)正是指在欧亚板块南缘活动带发生的中生代欧亚板块与前进中的冈瓦纳周边地块之间的多起增生和碰撞事件,在欧亚板块内部造成了深远影响,最终形成大规模的早新生代印度—欧亚陆陆碰撞(De Grave et al., 2007)。

晚三叠世一早白垩世发生在中国大陆西南部的特提斯洋闭合与西米里造山事件,与蒙古—鄂霍茨克洋关闭事件近于同时,它们的影响被记录在我国西部和中亚造山带之中。晚侏罗世一早白垩世,班公湖—怒江特提斯洋向北俯冲关闭,拉萨地体和羌塘地体沿班公湖—怒江缝合带发生挤压碰撞,形成大规模冈底斯岛弧岩浆活动,在班公湖—怒江蛇绿混杂岩两侧平行分布着两条晚侏罗世—白垩纪花岗岩(145~80 Ma)和同生的钙碱性火山岩带;同时,碰撞导致地壳抬升,在羌塘盆地和拉萨地块沉积了一套红色磨拉石建造,白垩系与侏罗系形成明显的角度不整合(贾承造等,2005)。印度河—雅鲁藏布缝合线,早白垩世时发生过大规模的洋盆消减,在滇藏地区形成俯冲型造山带(吴根耀,2002)。

拉萨地体与羌塘板块碰撞形成的构造挤压应力向北呈远距离传递,形成中国中西部区域性挤压构造,在四川、鄂尔多斯盆地内产生相对较强的构造变形,包括造山带隆升与盆地向西倾斜,并在塔里木、准噶尔、柴达木等盆地形成构造雏形(贾承造等,2005)。De Grave等(2007)在吉尔吉斯天山和西伯利亚阿尔泰山进行的磷灰石裂变径迹定年和热历史模拟,也揭示了中生代变形事件的存在。

1.5 东亚汇聚的地球动力学背景与动力来源

东亚汇聚有着深刻的地球动力学背景与动力来源。东亚地区是夹持在西太平洋构造域、古亚洲构造域与特提斯构造域之间的一个三角地带。中国东部微陆块拼接造成岩石圈增厚及其后岩石圈减薄(约50 km)已成为不争的事实(Menzies et al., 1993; 邓晋福等,1994,1996; Menzies et al., 1998)。据Maruyama等(2007)对西太平洋构造域和特提斯构造域的估计,自侏罗纪以来,俯冲到东亚地区地幔之中的岩石圈板块的宽度在10000~20000 km,是

地球上俯冲岩石圈物质最大量的地区。而中朝与扬子陆块碰撞造成的陆壳深俯冲和超高压变质作用(240~220 Ma),使得中国东部岩石圈厚度曾经达到150~200 km,甚至超过200 km,可能是东亚汇聚的先兆。

中国东部从冀北—辽西至长江中下游地区晚侏罗世一早白垩世大范围、巨量埃达克岩(C型)的形成,可能引发下地壳的拆沉作用,也指示了中国东部高原的存在(张旗等,2001)。岩石圈根沉落于软流圈地幔和下地幔,最终堆积于核幔边界(2700 km)的深部记录,已为全球地震层析资料所揭示(Maruyama et al., 2007),特别是在东亚大陆的壳幔边界附近已经找到冷、重的岩石圈根崩落的高速堆集体;经与西伯利亚和北美的资料对比,推测这些堆积体的时代为晚侏罗世(Van der Voo et al., 1999; Richards, 1999)。

燕山运动的驱动力可能就来自超级冷地幔下降流(邓晋福等,2005)。正是因为随后发生的东亚和中国东部巨厚岩石圈的垮塌、拆沉和断离,导致了超高压岩石的折返(220~180 Ma);而软流圈物质从它的两侧或周边作侧向补偿,牵引了太平洋板块向西俯冲(晚侏罗世),印度洋板块向NE俯冲(156~150 Ma),甚至包括西伯利亚陆块与华北陆块碰撞(中、晚侏罗世—早白垩世),从而引起了东亚大陆多向汇聚构造体系的形成。这种深部物质运动过程,可视为软流圈和岩石圈物质向东亚和中国东部汇流、聚集的主要原因和机制。大西洋中脊(185~155 Ma)和北冰洋地区美亚盆地(侏罗纪—白垩纪)的开启,可作为晚侏罗世东亚汇聚事件的远程效应。因此,东亚地区可能是晚侏罗世全球几个重要汇聚中心之中的一个最重要汇聚中心。

东亚汇聚的影响和后效一直持续到新生代,其最显著的结果是印度洋板块拖着印度地块向EN方向运动,最终与亚洲大陆碰撞,形成世界屋脊青藏高原。

2 东亚汇聚与燕山运动

翁文灏(Wong, 1926, 1927, 1929)提出并定义的“燕山运动”,作为陆内造山的典型记录,已经成为中国地质学家对世界地质科学理论贡献的经典,得到了广泛应用。燕山运动分为A幕、B幕和中间幕。燕山运动A幕以髻髻山组安山岩之下角度不整合为标志,时限为(160±5) Ma前,时期为中侏罗世龙门期—九龙山期,时代推测在175~160 Ma之间;中

间幕以髻髻山组和兰旗组火山岩为代表,时代约在165~156 Ma之间;B幕以张家口组火山岩下的不整合为标志,强烈的冲断形成了土城子组和后城组的粗碎屑堆积,时限在(135±1) Ma前,时代为156~139 Ma(赵越等,2004a,2004b)。燕山运动被认为是东亚构造体制从古亚洲和特提斯构造域汇聚体制向太平洋构造域俯冲消减转变的产物(赵越等,1994,2004a,2004b;任纪舜等,1999),燕山运动A幕是转变的标志(赵越等,2004a,2004b)。翟明国等(2004)则认为华北中生代构造体制转折始于150~140 Ma,终于110~100 Ma,峰期是120~110 Ma。Davis等(2001)认为,从中侏罗世到早白垩世,燕山地区可能同时存在南北向板内缩短与太平洋板块向NW俯冲这两种看似相互矛盾的板块作用模式。张宏仁(2000)提出,中侏罗世天体事件引发燕山运动。

燕山运动以陆源沉积、广泛的岩浆作用(如燕山地区埃达克质髻髻山组火山岩)和强烈的构造变形(包括多期褶皱作用,挤压、伸展及走滑断层作用)为特征(Davis et al., 2001;张旗等,2001;邓晋福等,2005)。燕山运动被认为是在原克拉通背景上的“大陆活化”(吴根耀,2001,2002),不具有典型造山带特征(邓晋福等,2003;翟明国等,2004)。例如,缺乏英云闪长岩、奥长花岗岩,缺乏或有很少量的花岗闪长岩,发育角闪辉长岩、粗面岩和正长岩,火成岩总体上K₂O质量分数高和很高等(邓晋福等,2003)。

燕山陆内造山的构造型式和影响深度还存在争议。一种观点认为是薄皮构造(Davis et al., 1998;郭华等,2002b),另一种认为是基底卷入的厚皮构造(张长厚等,1997;崔盛芹等,2002)。根据大别山前陆反射地震剖面揭示襄樊—广济断裂带深切莫霍面,甚至上地幔,证实大别山段燕山陆内造山属厚皮构造(Dong et al., 2004),而在大巴山一带可能为薄皮构造(董树文等,2006),说明了燕山运动陆内造山构造型式的复杂性。

吴根耀(2002)将燕山运动分为两类:一是印支期拼合大陆外侧的新特提斯洋消减及嗣后的碰撞引起的内硅镁质造山运动,形成滇藏、东南沿海、苏鲁和蒙古—鄂霍次克造山带;二是拼合大陆内部因古缝合线或古深断裂活化发生的内硅铝质陆内造山运动,前者如川黔湘—鄂南、湘赣闽和阴山—燕山褶皱—冲断系,后者如川南—滇东和中扬子褶皱—冲断系及江南冲断—推覆带。

董树文等(2007)关于东亚汇聚事件的研究,对

燕山运动的性质、时限和动力学内涵有了新的诠释。董树文等(2007)将燕山运动分为3个时期:燕山运动主幕强挤压陆内造山期((165±5)~136 Ma),主伸展垮塌与岩石圈减薄期(135~100 Ma),燕山运动晚幕弱挤压变形期(100~83 Ma)。中-晚侏罗世((165±5) Ma)东亚多板块拼贴运动学的重大调整和构造体制的重大转换,启动了以华北地块为中心、来自北、东、南西不同板块向东亚大陆多向汇聚的构造新体制,大陆岩石圈显著增厚,形成以陆内俯冲和陆内造山为特征的东亚汇聚构造体系。紧接着,早白垩世以剧烈的大陆伸展和火山—岩浆活动为特征的岩石圈巨量减薄和克拉通破坏,导致燕辽生物群灭绝和热河生物群兴盛的重大生物群的更替。因此,侏罗纪—白垩纪之交中国大陆和东亚发生的重大构造变革事件,是燕山运动的基本内涵。燕山运动的实质是晚侏罗世围绕华北地块的多向板块汇聚运动,以陆内变形和陆内造山为特征。

3 东亚汇聚构造体系陆内变形特征

3.1 大别山—大巴山侏罗纪陆内造山与东亚汇聚

晚侏罗世变形与运动学分析指示扬子陆块向N—NNE方向挤压和俯冲。扬子陆块向秦岭和华北陆块的俯冲,导致大别山—大巴山造山带及其前陆侏罗系大规模褶皱与缩短,三叠纪变质造山带超高压变质岩系超覆于侏罗纪前陆褶皱带之上(董树文等,2005),北倾的襄樊—广济断裂带深切MOHO与上地幔(Dong et al., 2004;高锐等,2005),对应发育一套完整的同造山、后造山岩浆系列,构成了侏罗纪陆内造山系统(董树文等,2007)。大巴山前陆下侏罗统强烈褶皱,发育在早期NE-近EW向褶皱之上的NW-NNW向叠加褶皱,形成紧密的弧形前陆褶皱带(董树文等,2006)。

晚侏罗世陆内俯冲导致超高压岩石从下地壳抬升到上地壳,暴露造山带深部构造和岩石。大别山超高压岩石折返过程基本确定为两阶段模式,即236~210 Ma期间的同碰撞快速折返下地壳过程(>3mm/a)和(160±10) Ma折返到中地壳过程(1mm/a);侏罗纪陆内造山造成地壳缩短加厚、山脉抬升,使超高压岩石进一步抬升近地表或部分出露地表,所以在大别山北麓合肥盆地晚侏罗世凤凰台组出现含柯石英榴辉岩砾石,这个阶段可能形成中国东部高原(董树文等,2000;张旗等,2001;吴根耀,2001)。从苏皖地区160~140 Ma的燕山早期花岗岩以I型为主、晚侏罗世—早白垩世的粗安岩—安

山岩属安第斯式的大陆边缘弧等事实来看,这一高原应属碰撞高原(吴根耀,2001)。秦岭洋古缝合线和磨子潭断裂向北的冲断活动控制了皖西豫南地区燕山期磨拉石发育,指示中国东部燕山期高原内部有开阔的山间磨拉石盆地发育(吴根耀,2001,2002)。

大别山中生代陆内造山作用形成由逆冲推覆构造组成的构造楔形体,尖端指南,多条主干逆掩断层由南向北呈后展式(上叠式)依次扩展,并使基底岩系和沉积盖层同时卷入构造变形,造成地壳缩短量达46.8%(郭华等,2002a)。大别山造山带逆冲推覆构造系统形成于早侏罗世晚期—早白垩世($J_1^3-K_1$),具有薄皮构造特征(郭华等,2002a),根带具有厚皮构造特征(Dong et al., 2004)。

晚侏罗世陆内造山诱发了大别—苏鲁大规模的岩浆作用和火山活动。在大别山和苏鲁地区造山带和前陆带,以及东部广大地域发育早白垩世140~110 Ma的岩浆系列,包括同造山的S型花岗岩,I型花岗岩和A形花岗岩等。其中130~110 Ma的巨量的岩浆岩和火山岩可能为侏罗纪岩石圈根拆沉的记录,对应中国东部燕山期岩石圈减薄和岩浆—成矿大爆发。

3.2 扬子—华北板块东部华南—胶东—辽东侏罗纪走滑—逆冲构造

中国东部沿海区有燕山期内硅镁质的造山运动发生。除东南沿海区的斜交会聚—剪切造山外,中国东部高原的发育是十分醒目的现象(吴根耀,2001)。

燕山运动时期,鲁西地区古生界经历了微弱的SEE-NWW向的两次挤压收缩,表现为大量残存的NNE走向的隔槽式褶皱,向NNE与辽南推覆体相连,向SSE与徐宿推覆体相连,向NW为变形强烈的黄骅拗陷南部的徐黑薄皮推覆带,构成中国东部燕山期纵贯华北板块东部的巨型收缩构造带(刘建忠等,2004)。

位于秦岭大别山带和燕山带中间的太行山的中生代挤压变形形迹为北到北东向,或多或少平行于沿大陆东部边缘发育的俯冲带,并与燕山带的构造形迹高角度相交。

早白垩世的冲断推覆构造见于苏皖及鲁南、胶东等地,是中生代席卷面最广、强度最大的一次变形(常印佛等,1991)。中扬子地区晚侏罗世—早白垩世几乎没有沉积,而英店—青山口断裂以东的豫南地区有粗碎屑岩堆积,东延入安徽的六安—肥西

(郟庐断裂以西),形成了中国东部燕山期高原内的一个开阔的山间磨拉石盆地(吴根耀,2001)。

中扬子褶皱—冲断系构成中国东部燕山期高原的西南边界,主要为一组近NW走向、倾向NE的冲断层(朝南西冲断),如NW走向的英店—青山口断裂,形成了随州箱状背斜褶皱—冲断带、京山梳状背斜褶皱—冲断带和当阳绕曲褶皱带。冲断作用向南西前展式扩展,以通城河断裂与黄陵陆核分界。英店—青山口断裂以东的桐柏变质杂岩带广泛发育燕山期花岗岩,可视作中扬子褶皱—冲断系的根带(吴根耀,2001,2002)。

3.3 燕山—阴山造山带侏罗纪逆冲—推覆构造

燕山—阴山造山带,特别是华北的燕山地区,是中国地质学和燕山运动的摇篮,发育有许多典型的中生代逆冲推覆构造。其中,兴隆、承德、大庙、隆化和围场等5条主干逆掩断层及其上驮的推覆体,组成了一个大型逆冲推覆系统,构造楔形体的尖端指向北。主干断层在同一底界滑动拆离面上由南向北呈前展式扩展,造成的地壳缩短量达44.1%(郭华等,2002b)。从造山带后端至前缘,褶皱形态由以箱状褶皱为主转变成以斜歪褶皱为主;断裂构造性质也从脆性断层转变为韧性断层,在造山带后缘还形成了三角带构造和突起构造(郭华等,2002b)。

燕山—阴山造山带的中生代构造演化可以分为以下几个时期(Davis et al., 2001):

(1) 中侏罗世之前的向南逆冲推覆作用。燕山地区自晚三叠世以来进入了板内造山带形成演化阶段。在早侏罗世伸展盆地(马寅生等,2002)形成之后,早侏罗世末—中侏罗世之前(>180 Ma),从冀北到辽西的广大地区曾经经历了一次向南的强烈逆冲推覆和褶皱作用,如平泉—古北口断层(Davis et al., 2001)和兴隆逆掩断层(郭华等,2002b)。

(2) 中侏罗世—晚侏罗世早期的伸展断层作用。冀北地区在挤压变形之后伴随有中侏罗世或晚侏罗世早期的东西向伸展构造(Davis et al., 2001)和盆地伸展变形(马寅生等,2002)。

(3) 晚侏罗世—早白垩世早期的向北逆冲作用。晚侏罗世—早白垩世是燕山运动的主造山期,强烈逆冲推覆构造、大规模构造热事件及地壳的强烈收缩变形是其特征(崔盛芹等,2000;马寅生等,2002)。该时期主要发育向北推覆的逆冲断层,如内蒙古的大青山逆冲推覆断层(Zheng et al., 1998)和冀北的承德逆冲推覆断层(Davis et al., 2001;郭华等,2002b),均为向NNW方向运动的低角度逆冲

推覆断层。两条逆冲推覆断层均已褶皱,并且由于后期的构造变形现在都与其位于南部的根带相分离(Davis et al., 2001)。

在中蒙边界区传统的海西构造带中,郑亚东等(Zheng et al., 1996)发现侏罗纪特大型推覆构造——中蒙边界亚干推覆体,推覆距离高达120 km以上。

大青山逆冲推覆构造发育在华北板块北缘石拐中生代沉积盆地南侧,由一系列逆冲推覆的构造岩片(包括飞来峰)相互叠置构成复杂逆冲推覆体系,具有多期逆冲推覆变形演化历史。早期为由南向北推覆(刘正宏等,2003),或由北向南逆冲(Zheng et al., 1998),形成一系列EW方向展布的大型逆冲断层和褶皱构造,如被大青山逆冲断层切割的盘羊山断层,推覆距离至少8~9 km(Zheng et al., 1998)。晚期为向NNW方向逆冲推覆(Zheng et al., 1998; 刘正宏等,2003),如大青山逆冲断层,延伸长达155 km以上,推覆距离为22~35 km(Zheng et al., 1998)。根据断层带内同构造黑云母和白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 常规和激光微区测年研究,刘正宏等(2003)获得其中两期逆冲推覆的年龄为(193.7 ± 3.9) Ma和(121.6 ± 1.6) Ma(等时线年龄)。

冀北的承德逆冲推覆断层将元古宙和侏罗系(J_2 - J_3)向北逆冲推覆在中侏罗世—晚侏罗世早期地层(J_2 , 180~161 Ma, 火山岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄)之上,位移量超过40~45 km(Davis et al., 1998)。该断层在西部又被132 Ma的岩体所侵入。在逆冲推覆之后,承德推覆岩片经历了晚侏罗世—早白垩世E-NEE向同斜褶皱作用,形成南翼非常陡或倒转了的不对称大向形构造(Davis et al., 2001)。沉积学分析表明,承德逆冲断层活动时间在髫髻山组沉积之后和土城子组沉积之前(刘少峰等,2004)。

大庙、隆化、围场逆掩断层及其推覆体内部,受影响的最新地层为晚侏罗世末期的张家口组和早白垩世早期的大北沟组,这些逆掩断层的最终形成时代可能为晚侏罗世末期—早白垩世早期(郭华等,2002b)。

北京十三陵逆冲推覆断层,向N-NE逆冲,形成于161~151 Ma之间(Davis et al., 2001)。

北京云蒙山西南存在晚侏罗世褶皱和变质作用(151~143 Ma之间)。云蒙山区存在向南或南东逆冲的、卷入太古宙基底及其盖层的晚侏罗世—早白垩世韧性构造带,包括一个以老基底为核的倾伏背形推覆体,和一个发育在6 km厚的片麻岩剪切带中

的韧性逆冲断层。向南东逆冲的四合堂推覆体,以及它的倒转翼中发育的韧性剪切带和密云水库韧性逆冲推覆断层,可能形成于>143 Ma到127 Ma之后(Davis et al., 2001)。

古北口断裂带(148~132 Ma)为向南逆冲的盆缘逆断层带(Davis et al., 2001),由两条主断裂控制上、下两个推覆体由北向南依次逆冲,原地系统由中生代土城子组及以下地层构成,中生代地层中局部形成脆韧性变形带。张计东等(2002)根据对断裂带中同构造期石英正长岩脉样品的K-Ar法测年,获得同位素年龄为(161.2 ± 2.3) Ma,因此,本区逆冲推覆构造形成时代应在晚侏罗世。

辽西地区是燕山—阴山造山带的东段,晚侏罗世—早白垩世逆冲推覆构造由几条向NW和SE方向推覆的逆冲断层组成(Davis et al., 2001)。张长厚等(2002)厘定了6条主干逆冲断层,总体逆冲方向指向SE;其中,分布于西北和东南缘的两条最外缘逆冲断层为ENE走向,居于其间的逆冲断层呈NNE-NE走向,它们具有向EN和SW方向汇合的趋势,总体上构成类似于双重构造的巨型逆冲系统。张长厚等(2002)分析得到该区逆冲断层作用始于中侏罗世之前,于晚侏罗世达到高峰并奠定基本格局。胡健民等(2004)根据辽西凌源太阳沟地区的研究,则认为辽西地区晚三叠世到早侏罗世早期为由东往西逆冲的后展式逆冲推覆、早侏罗世晚期为由西往东逆冲的前展式逆冲推覆,早侏罗世晚期还发育崩塌滑覆构造。

(4) 早白垩世晚期的挤压作用。局部的晚期挤压作用(约115~120 Ma),发育南倾的逆断层(Davis et al., 2001)。

(5) 中白垩世伸展变形。广泛的中白垩世伸展变形(118~115 Ma之后),最重要的伸展构造就是河防口拆离断层,其倾向滑移距离至少有10 km(Davis et al., 2001)。中白垩世也是一个盆地伸展阶段(马寅生等,2002)。

(6) 晚白垩世左行走滑作用。晚白垩世,在燕山地区主要表现为近于垂直造山带走向的NNE向左行走滑断裂系和平行于造山带走向的近EW向正滑或正滑平移断裂系的形成。NNE向走滑断裂中,规模较大的有5条,自西向东分别为大海坨—石岗、七家—平泉、套堡河珞—凌源、中王家—青龙和建昌—台营断裂;近EW向正滑或正滑平移断裂系规模有大有小,并切割了NNE向走滑断裂系(郭华等,2002b)。

3.4 鄂尔多斯周边晚侏罗世变形与东亚汇聚

中、晚侏罗世,鄂尔多斯盆地及其周缘遭受多向挤压应力作用,挤压方向为近 W-E、NW-SE 和 NE-SW,在盆地周缘形成展布方向不一、构造样式不同的边界挤压构造带,包括西缘近 N-S 向逆冲—推覆构造带、东缘及东南缘总体呈“S”形展布的挤压边界带、盆地北侧大青山地区近东西向大型推覆构造(张岳桥等,2007a, 2007b)。鄂尔多斯盆地周缘边界构造带记录了中晚侏罗世强烈的陆内多向挤压作用和大陆地壳增厚过程,反映了东亚多向汇聚的远程效应(张岳桥等,2007a, 2007b)。

晚侏罗世—早白垩世,鄂尔多斯盆地西缘和南缘分别沉积了一套巨厚芬芳河组、宜君组的红色山麓相、山前冲积扇的砾岩(磨拉石建造),成楔状体插入盆地内部(贾承造等,2005)。

3.5 四川盆地周边晚侏罗世变形与东亚汇聚

晚侏罗世—早白垩世东亚汇聚,在四川盆地周缘形成带状的冲断带,如川西龙门山冲断带(吴根耀,2001,2002)和大巴山前陆冲断带(董树文等,2006),以及面状的陆内造山带(如川黔湘—鄂南褶皱—冲断系和川南—滇东褶皱—冲断系)(吴根耀,2001,2002),构成了类似于鄂尔多斯盆地周缘的多向挤压构造体系,反映了东亚多向汇聚的构造应力场特征。

川西龙门山冲断带前,晚侏罗世沉积了巨厚的莲花口组底部砾岩层,早白垩世沉积了巨厚的剑门关组底部砾岩层。砾岩内部含侏罗系钙质砂岩,反映了燕山期龙门山的挤压隆升(贾承造等,2005)。

川黔湘—鄂南褶皱—冲断系,自 ES 向 WN 可分出根带、湘西—黔东南基底褶皱—冲断带、黔北箱状背斜褶皱—冲断带和川东梳状背斜褶皱—冲断带,断层面总体倾向南东,冲断作用自南东前展式地向 NW 扩展,以华蓥山断裂与川中盆地为界(吴根耀,2002)。花岗岩侵入体或底辟体见于根带,以大规模的白云母花岗岩和二云母花岗岩为特征。湘西—黔东南基底褶皱—冲断带西缘的冲断层控制了沅陵—麻阳等前陆磨拉石盆地,典型的磨拉石建造是中侏罗统泸州组(吴根耀,2002)。

川南—滇东褶皱—冲断系,自 SE 向 NW 可分出根带(见有花岗岩)、昆阳基底褶皱—冲断带、会东箱状背斜褶皱—冲断带和马边梳状背斜褶皱—冲断带。主冲断层均倾向南东(朝北西冲断),冲断作用向北西前展式扩展;并叠加了近南北向断层(如磨盘山—绿汁江断裂、小江断裂等)向西的冲断。

发育早白垩世磨拉石建造(吴根耀,2001,2002)。

4 晚侏罗世东亚汇聚研究的意义与科学问题

晚侏罗世在东半球(乃至全球)是一个重大的变革时期,并以软流圈物质和岩石圈向东亚的补偿性汇聚为其主要特点,随之发生中国东部早白垩世巨厚岩石圈崩落。东亚汇聚和燕山运动不仅是中国东部、而且是中国中西部、甚至是亚洲东部侏罗纪—白垩纪时期的重大构造事件,也是晚中生代全球性构造事件,对其大陆动力学研究具有重大科学意义。因此,有必要对东亚汇聚和燕山运动的构造变形式、动力学背景以及产生的深部过程、对中国东部岩石圈厚度的影响,以及对东亚地貌特征、气候与环境的影响、矿产资源(包括油气等)效应,进行深入细致的研究与探讨。

东亚汇聚研究的目的是将亚洲大陆形成及其后(200 Ma 以来)的演化作为一个连续的过程来考虑,在全球尺度上将中国东部与西部的地质作用过程进行统一的分析,通过东亚汇聚的地球物理和地球化学过程的研究和探测、统一构造应力场和应变场的分析、盆山耦合过程的研究、深部过程与地表响应的研究、地质过程的精确定年、环境与资源领域的深入研究,以期获得对亚洲、特别是东亚大陆动力学过程及其资源、环境效应的新认识,建立起东亚汇聚的地质—地球物理—地球化学动力学过程的统一模型。侏罗纪/白垩纪之交的东亚汇聚是一个长期的、多学科联合协作的研究领域,具有广阔的发展前景。

东亚汇聚研究还需要解决以下几方面问题:①汇聚过程的应力状态与变形图像;②汇聚造成岩石圈增厚的机理、过程与响应,包括岩石圈根突发性崩塌机理,是拆沉作用? 断落作用? 还是滑脱? 或兼而有之? 火山—岩浆与壳幔相互作用的记录,以及崩塌体的天然地震层析追踪;③周围大洋俯冲的时限与过程,包括印度洋与印度大陆漂移的时空轨迹、太平洋板块向亚洲大陆俯冲以及西伯利亚与华北—蒙古地块拼合(特别是蒙古—鄂霍次克海关闭过程)的时限与记录;④构造翘变枢纽带的地质描述与成因;⑤侏罗纪—白垩纪生态系统、古气候变化及其突发性生物群更替的地质背景;⑥东亚大陆翘变模型及模拟。

5 结论

晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成,正是

处在全球三大洋(甚至可能是四大洋)开启和洋壳增生的同时。东亚汇聚的不完全证据,包括:①与东亚汇聚(160~145 Ma)同时的地壳或岩石圈层厚火山岩和花岗岩(特别是埃达克岩)的形成;②太平洋洋底磁条带证实太平洋或伊泽奈崎洋板块向东亚的俯冲发生于晚侏罗世;③晚侏罗世西伯利亚陆块与华北和蒙古联合地块的对接及蒙古—鄂霍茨克洋的消失;④晚侏罗世印度板块向北运动与印度洋的开启、特提斯洋向亚洲大陆的俯冲;⑤东亚大陆核幔边界附近探测到的晚侏罗世冷、重岩石圈根崩落的堆积体(高速体);⑥大别山—大巴山晚侏罗世陆内俯冲和造山作用的证据;⑦燕山—阴山构造带侏罗纪逆冲—推覆构造;⑧鄂尔多斯地块和四川盆地构成了东亚汇聚构造体系中两个比较稳定的刚性陆核,在它们的周边发育了晚侏罗世多向挤压变形和似前陆盆地;⑨华北地块东缘中国东部沿海及东亚太平洋带中、晚侏罗世左行走滑—逆冲构造;⑩中、晚侏罗世(159 Ma)华北与扬子陆块在动力学上的完全一致并最后缝合。晚侏罗世东亚多向汇聚作用造成了燕山运动和燕山陆内造山构造体系,形成多个方向向中国大陆合围挤压的构造变形特征。东亚汇聚形成的构造变形特征,可能一直延续到新生代喜马拉雅运动时期。

参考文献

- 常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京:地质出版社,1~379.
- 崔盛芹,李锦蓉,孙家树,王建平,吴珍汉,朱大岗. 2000. 华北陆块边缘构造运动序列及区域构造格局[M]. 北京:地质出版社,1~326.
- 崔盛芹,李锦蓉,吴珍汉,易明初,沈淑敏,尹华仁,马寅生. 2002. 燕山地区中新世陆内造山[M]. 北京:地质出版社,1~386.
- 邓晋福,莫宣学,赵海玲,罗照华,杜杨松. 1994. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”——东亚型大陆动力学模式研究计划[J]. 现代地质,8(3):349~356.
- 邓晋福,刘厚祥,赵海玲,罗照华,郭正府,李玉文. 1996. 燕辽地区燕山期火成岩与造山模型[J]. 现代地质,10(2):137~148.
- 邓晋福,苏尚国,赵海玲,莫宣学,肖庆辉,周肃,刘翠,赵国春. 2003. 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程[J]. 地学前缘,10(3):41~50.
- 邓晋福,赵国春,苏尚国,刘翠,陈亦寒,李芳凝,赵兴国. 2005. 燕山造山带燕山期构造叠加及其大地构造背景[J]. 大地构造与成矿学,29(2):157~165.
- 董树文,吴锡浩,吴珍汉,邓晋福,高锐,王成善. 2000. 论东亚大陆的构造翘变—燕山运动的全球意义[J]. 地质论评,46(1):8~13.
- 董树文,胡健民,李三忠,施炜,高锐,刘晓春,薛怀民. 2005. 大别山侏罗纪变形及其构造意义[J]. 岩石学报,21(4):1189~1194.
- 董树文,胡健民,施炜,张忠义,刘刚. 2006. 大巴山侏罗纪叠加褶皱与侏罗纪前陆[J]. 地球学报,27(5):403~410.
- 董树文,张岳桥,龙长兴,杨振宇,季强,王涛,胡健民,陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报,81(11):1449~1461.
- 高锐,董树文,贺日政,刘晓春,李秋生,管焯,白金,李朋武,黄东定,钱桂华,匡朝阳. 2005. 莫霍面地震反射图像揭示扬子地块深俯冲过程[J]. 地学前缘,11(3):430~449.
- 郭华,吴正文,柴育成,冯明. 2002a. 大别山造山带中生代逆冲推覆构造系统[J]. 现代地质,16(2):121~129.
- 郭华,吴正文,刘红旭,王润红. 2002b. 燕山板内造山带逆冲推覆构造格局[J]. 现代地质,16(4):339~346.
- 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[J]. 地学前缘,11(3):256~271.
- 贾承造,魏国齐,李本亮. 2005. 中国中西部燕山期构造特征及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质,26(1):9~15.
- 刘建忠,李三忠,周立宏,高振平,郭晓玉. 2004. 华北板块东部中生代构造变形与盆地格局[J]. 海洋地质与第四纪地质,24(4):45~54.
- 刘少峰,张金芳,李忠,王清晨. 2004. 燕山承德地区晚侏罗世盆地充填记录及对盆缘构造作用的指示[J]. 地学前缘,11(3):245~254.
- 刘正宏,徐仲元,杨振升. 2003. 大青山逆冲推覆构造形成时代的⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄证据[J]. 科学通报,48(20):2193~2197.
- 马寅生,崔盛芹,曾庆利,吴满路. 2002. 燕山地区燕山期的挤压与伸展作用[J]. 地质通报,21(4~5):218~223.
- 马宗晋,李存梯,高祥林. 1998. 全球洋底增生构造及其演化[J]. 中国科学(D辑),28(2):157~165.
- 莫中图,韩美莲,李锦轶. 2005. 蒙古—鄂霍茨克造山带的组成及造山过程[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),24(3):50~52,64.
- 任纪舜,王作勋,陈炳蔚,姜春发,牛宝贵,李锦轶,谢广连,和政军,刘志刚. 1999. 中国及邻区大地构造图(1/500万)及简要说明书——从全球看中国大地构造[M]. 北京:地质出版社,1~25.
- 水谷伸治郎,邵济安,张庆龙. 1989. 那丹哈达地体与东亚大陆边缘中生代构造的关系[J]. 地质学报,60(3):204~216.
- 吴根耀. 2001. 古深断裂活化与燕山期陆内造山运动——以川南—滇东和中扬子褶皱—冲断系为例[J]. 大地构造与成矿学,25(3):246~253.
- 吴根耀. 2002. 燕山运动和中国大陆晚中生代的活化[J]. 地质科学,37(4):453~461.
- 翟明国,孟庆任,刘建明,侯泉林,胡圣标,李忠,张宏福,刘伟,邵济安,朱日祥. 2004. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨[J]. 地学前缘,11(3):285~297.
- 张长厚,宋鸿林. 1997. 燕山板内造山带中生代逆冲推覆构造及其与前陆褶冲带的对比研究[J]. 地质科学,22(1):33~36.
- 张长厚,王根厚,王果胜,吴正文,张路锁,孙卫华. 2002. 辽西地区燕山板内造山带东段逆冲推覆构造[J]. 地质学报,76(1):64~76.
- 张国伟,董云鹏,裴先治,姚安平. 2002. 关于中生代环西伯利亚陆内构造体系域问题[J]. 地质通报,21(4~5):198~201.
- 张宏仁. 2000. 燕山事件[J]. 地质学报,72(2):103~111.
- 张计东,李翔,李广栋. 2002. 古北口逆冲推覆构造及土城子组脆韧性变形带特征[J]. 中国地质,29(4):392~396.
- 张旗,王焰,钱青,杨进辉,王元龙,赵太平,郭光军. 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

(2):236~244.

张岳桥,董树文,赵越,张田. 2007a. 华北侏罗纪大地构造:综评与新认识[J]. 地质学报,81(11):1462~1480.

张岳桥,廖昌珍,施炜,张田,郭芳芳. 2007b. 论鄂尔多斯盆地及其周围侏罗纪变形[J]. 地学前缘,14(2):182~196.

赵越,杨振宇,马醒华. 1994. 东亚大地构造发展中的重要转折[J]. 地质科学,29(2):105~128.

赵越,崔盛芹,郭涛,徐刚. 2002. 北京西山侏罗纪盆地演化及其构造意义[J]. 地质通报,21(4~5):211~217.

赵越,徐刚,张拴宏,杨振宇,张岳桥,胡健民. 2004a. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. 地学前缘,11(3):319~328.

赵越,张拴宏,徐刚,杨振宇,胡健民. 2004b. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件[J]. 地质通报,23(9~10):854~863.

References

- BUSLOV M M, FUJIWARA Y, IWATA K, SEMAKOV N N. 2004. Late Paleozoic-Early Mesozoic geodynamics of central Asia [J]. *Gondwana Research*, 7: 791~808.
- CHANG Chengfa, CHEN Nansheng, COWARD M P, DENG Wanming, DEWEY J F, GANSSER A, HARRIS N B W, JIN Chengwei, KIDD W S F, LEEDER M R, LI Huan, LIN Jinlu, LIU Chengjie, MEI Houjun, MOLNAR P, PAN Yun, PAN Yusheng, PEARCE J A, SHACKLETON R M, SMITH A B, SUN Yiyin, WARD M, WATTS D R, XU Juntao, XU Ronghua, YIN Jixiang, ZHANG Yuncan. 1986. Preliminary conclusions of the Royal Society and Academia Sinica 1985 geotraverse of Tibet [J]. *Nature*, 323: 501~507.
- CHANG Yinfo, LIU Xiangpei, WU Yanchang. 1991. The Copper-Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~379.
- CUI Shengqin, LI Jinrong, SUN Jiashu, WANG Jianping, WU Zhenhan, ZHU Dagang. 2000. Tectonic sequence and framework in northern margin of the North China continental block [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~326 (in Chinese).
- CUI Shengqin, LI Jinrong, WU Zhenhan, YI Mingchu, SHEN Shumin, YING Huaren, MA Yinsheng. 2002. Mesozoic and Cenozoic intracontinental orogenesis of the Yanshan area, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~386 (in Chinese with English abstract).
- CUNNINGHAM D. 2005. Active intracontinental transpressional mountain building in the Mongolian Altai: Defining a new class of orogen [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 240: 436~444.
- DAVIS G A, WANG C, ZHENG Y D, ZHANG C H. 1998. The enigmatic Yinshan fold-and-thrust belt of northern China: new views on its intraplate contractional styles [J]. *Geology*, 26:43~46.
- DAVIS G A, ZHENG Y D, WANG Z, DARBY B J, ZHANG C H, GEHRELS G. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. In: Hendrix M S and Davis G A. eds. Paleozoic and Mesozoic evolution of central Asia: From continental assembly to intracontinental deformation. Boulder, Colorado [J]. *Geological Society of American Memoir*, 194: 171~197.
- DE GRAVE J, BUSLOV M M, VAN DEN Haute P. 2007. Distant effects of India-Eurasia convergence and Mesozoic intracontinental deformation in Central Asia: Constraints from apatite fission-track thermochronology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29: 188~204.
- DENG Jinfu, MO Xuanxue, ZHAO Hailing, LUO Zhaohua, DU Yangsong. 1994. Lithosphere root / de-rooting and activation of the East China continent [J]. *Geoscience*, 8 (3): 349~356 (in Chinese with English abstract).
- DENG Jinfu, LIU Houxiang, ZHAO Hailing, LUO Zhaohua, GUO Zhengfu, LI Yuwen. 1996. Yanshanian igneous rocks and orogeny model in Yanshan-Liaoning area [J]. *Geoscience*, 10 (2): 137~148 (in Chinese with English abstract).
- DENG Jinfu, SU Shangguo, ZHAO Hailing, MO Xuanxue, XIAO Qinghui, ZHOU Su, LIU Cui, ZHAO Guochun. 2003. Deep processes of Mesozoic Yanshanian lithosphere thinning in North China [J]. *Earth Science Frontiers*, 10 (3): 41~50 (in Chinese with English abstract).
- DENG Jinfu, ZHAO Guochun, SU Shangguo, LIU Cui, CHEN Yihan, LI Fangning, ZHAO Xingguo. 2005. Structure overlap and tectonic setting of Yanshan orogenic belt in Yanshan era [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29 (2): 157~165 (in Chinese with English abstract).
- DONG Shuwen, WU Xihao, WU Zhenhan, DENG Jinfu, GAO Rui, WANG Chengshan. 2000. On tectonic seesawing of the East Asia continent—Global implication of the Yanshanian Movement [J]. *Geological Review*, 46 (1): 8~13 (in Chinese with English abstract).
- DONG S W, GAO R, CONG B, ZHAO Z Y, LIU X C, LI S Z, LI Q S, HUANG D D. 2004. Crustal structure of the southern Dabie ultrahigh-pressure orogeny and Yangtze foreland from deep seismic reflection profiling [J]. *Terra Nova*, 16(6):319~324.
- DONG Shuwen, HU Jianmin, LI Sanzhong, SHI Wei, GAO Rui, LIU Xiaochun, XUE Huaimin. 2005. The Jurassic deformation in the Dabie Mountains and its tectonic significances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (4): 1189~1194 (in Chinese with English abstract).
- DONG Shuwen, HU Jianmin, SHI Wei, ZHANG Zhongyi, LIU Gang. 2006. Jurassic superposed folding and Jurassic foreland in the Daba Mountain, central China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 27 (5): 403~410 (in Chinese with English abstract).
- DONG Shuwen, ZHANG Yueqiao, LONG Changxing, YANG Zhenyu, JI qiang, WANG Tao, HU Jianmin, CHEN Xuanhua. 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1449~1461 (in Chinese with English abstract).
- GAO Rui, DONG Shuwen, HE Rizheng, LIU Xiaochun, LI Qisheng, GUAN Ye, BAI Jin, LI Pengwu, HUANG Dongding, QIAN Guihua, KUANG Zhaoyang. 2005. Subduction process of the Yangtze continental block from Moho reflection image, South China [J]. *Earth Science Frontier*, 11 (3): 430~449 (in Chinese with English abstract).
- GARZANTI E, LE Fort P, SCIUNACH D. 1999. First report of Lower Permian basalts in south Tibet; tholeiitic magmatism during breakup and incipient opening of Neotethys [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* 17, 533~546.
- GUO Hua, WU Zhengwen, CHAI Yucheng, FENG Ming. 2002a. Mesozoic overthrust - nappe tectonic system in the Dabieshan orogenic belt [J]. *Geoscience*, 16 (2): 121~129 (in Chinese with English

- abstract).
- GUO Hua, WU Zhengwen, LIU Hongxu, WANG Runhong. 2002b. The overthrust - nappe tectonic frame work of Yanshan intraplate orogenic belt[J]. *Geoscience*, 16 (4): 339 ~ 346 (in Chinese with English abstract).
- HADA S, ISHII K, LANDIS C A, AITCHISON J, YOSHIKURA S. 2001. Kurosegawa Terrane in southwest Japan: disrupted remnants of a Gondwana-derived terrane[J]. *Gondwana Research*, 4 (1): 27 ~ 38.
- HU Jianmin, LIU Xiaowen, ZHAO Yue, XU Gang, LIU Jian, ZHANG Shuanhong. 2004. On Yanshan intraplate orogene: an example from Taiyanggou area, Lingyuan, western Liaoning Province, Northeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11 (3): 256 ~ 271 (in Chinese with English abstract).
- ICHIKAWA K. 1990. Regional extent of Akiyoshi Movement in eastern Asia. In: Ichikawa Koichiro. ed. *Proceedings of the Fourth international symposium on Pre-Jurassic evolution of eastern Asia*[J]. IGC Project 224, 5: 111 ~ 113.
- JIA Chengzao, WEI Guoqi, LI Benliang. 2005. Yanshanian tectonic features in west-central China and their petroleum geological significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 26 (1): 9 ~ 15 (in Chinese with English abstract).
- JOKAT W, BOEBEL T, KÖNIG M, MEYER U. 2003. Timing and geometry of early Gondwana breakup[J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (B9), 2428, doi:10.1029/2002JB001802.
- LEEDER M R, SMITH A B, YIN J. 1988. Sedimentology, palaeoecology and palaeoenvironmental evolution of the 1985 Lhasa to Golmud geotraverse[J]. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 327: 107 ~ 143.
- LITHGOW-BERTELLONI C, RICHARDS M A. 1998. The dynamics of Cenozoic and Mesozoic plate motions[J]. *Reviews of Geophysics*, 36: 27 ~ 78.
- LIU Jianzhong, LI Sanzhong, ZHOU Lihong, GAO Zhenping, GUO Xiaoyu. 2004. Mesozoic tectonics and basin distribution in the eastern North China Plate[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 24 (4): 45 ~ 54 (in Chinese with English abstract).
- LIU Shaofeng, ZHANG Jinfang, LI Zhong, WANG Qingchen. 2004. Late Jurassic basin-fill record and its implication for basin margin tectonism, Chengde, Yanshan Mountains, North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11 (3): 245 ~ 254 (in Chinese with English abstract).
- LIU W, SIEBEL W, LI X J, PAN X F. 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: constraints on basaltic underplating[J]. *Chemical Geology*, 219: 5 ~ 35.
- LIU Zhenghong, XU Zhongyuan, YANG Zhensheng. 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Daqingshan thrust [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48 (24): 2734 ~ 2738.
- MA Yinsheng, CUI Shengqin, ZENG Qingli, WU Manlu. 2002. Yanshanian compression and extension in the Yanshan area[J]. *Geological Bulletin of China*, 21 (4 ~ 5): 218 ~ 223 (in Chinese with English abstract).
- MA Zongjin, LI Cunti, GAO Xianglin. 1998. Accretion tectonics of the global seafloor and its evolution[J]. *Science in China (Series D)*, 41 (6): 616 ~ 625.
- MARUYAMA S, LIU J G, SENO T. 1989. Mesozoic and Cenozoic evolution of Asia. In: Ben-Avraham Z ed. *The evolution of the Pacific Ocean margins*[M]. Oxford University Press, 75 ~ 99.
- MARUYAMA S, SANTOSH M, ZHAO D. 2007. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the Core-Mantle Boundary[J]. *Gondwana Research*, 11: 7 ~ 37.
- MENZIES A, FAN W M, ZHANG M. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard H M, Alabaster H M, Harris T, et al, eds. *Magmatic Processes and Plate Tectonics*[M]. London: Geol. Soc. London, 73 ~ 81.
- MENZIES M A, XU Y. 1998. Geodynamics of the North China Craton. In: Flower M, Chung S-L, Lo C-H, Lee T-Y. Eds. *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia*[J]. *American Geophysical Union Monograph*, 27: 155 ~ 165.
- MO Shenguo, HAN Meilian, LI Jinyi. 2005. Compositions and orogenic processes of Mongolia - Okhotsk orogen [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 24 (3): 50 ~ 52, 64 (in Chinese with English abstract).
- NIE S, ROWLEY D B. 1994. Comment on "Paleomagmatic constraints on the geodynamic history of the major blocks of China from the Permian to the Present" by R J Enkin et al. [J]. *Geophys. Res.*, 99: 8035 ~ 8042.
- REN Jishun, WANG Zuoxun, CHEN Bingwei, JIANG Chunfa, NIU Baogui, LI Jinrong, XIE Guanglian, HE Zhengjun, LIU Zhigang. 1999. The tectonics of China from a global view - a guide to the tectonic map of China and adjacent regions —view geotectonics of China from globe[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 25.
- RICHARDS M S. 1999. Prospecting for Jurassic slabs [J]. *Nature*, 397: 203 ~ 204.
- SCHETTINO A, SCOTESE C R. 2005. Apparent polar wander paths for the major continents (200 Ma to the present day): a palaeomagnetic reference frame for global plate tectonic reconstructions[J]. *Geophys. J. Int.*, 163: 727 ~ 759.
- SHINJIRO Mizutani, SHAO Ji'an, ZHANG Qinglong. 1989. The Nandan terrane in relation to Mesozoic tectonics on continental margins of east Asia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 60 (3): 204 ~ 216.
- VAN DER VOO R, SPAKMAN W, BIJWAARD H. 1999. Mesozoic subducted slabs under Siberia[J]. *Nature*, 397: 246 ~ 249.
- VEEVERS J J. 2004. Gondwanaland from 650 ~ 500 Ma assembly through 320 Ma merger in Pangea to 185 ~ 100 Ma breakup: supercontinental tectonics via stratigraphy and radiometric dating [J]. *Earth-Science Reviews*, 68: 1 ~ 132.
- WALLICK B P, STEINER M B. 1992. Paleomagnetic and rock magnetic properties of Jurassic Quiet Zone Basalts, hole 801c in Proceeding of Ocean Drilling Program[J]. *Sci. Results*, 129.
- WANG T, ZHENG Y, LI T, GAO Y. 2004. Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and its implications for crustal growth [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 715 ~ 729.
- WONG W H. 1926. Crust movement in eastern China [J]. *Proceedings of 3th Pan-Pacific Science Congress, Tokyo*, 642 ~ 685.
- WONG W H. 1927. Crustal movement and igneous activities in eastern China since Mesozoic time [J]. *Bulletin of Geological Society of China*, 6 (1): 9 ~ 36.

- WONG W H. 1929. The Mesozoic orogenic movement in eastern China [J]. *Bulletin of Geological Society of China*, 8: 33 ~ 44.
- WU Genyao. 2001. Rejuvenation of fossil deep fractures and related Yanshanian intracontinental orogenics: examples from south Sichuan-east Yunnan and middle Yangtze areas [J]. *Geotectonic et Metallogenia*, 25 (3): 246 ~ 253 (in Chinese with English abstract).
- WU Genyao. 2002. The Yanshanian orogeny and late Mesozoic activation in China continent [J]. *Chinese Journal of Geology*, 37 (4): 453 ~ 461 (in Chinese with English abstract).
- XU X, HARBERT W, DRIL S, KRAVCHINSKY V. 1997. New paleomagnetic data from the Mongol-Okhotsk collision zone, Chita region, southcentral Russia: implications for Paleozoic paleogeography of the Mongol-Okhotsk Ocean [J]. *Tectonophysics*, 269: 113 ~ 129.
- YAKUBCHUK A S, EDWARDS A. 1999. Auriferous Paleozoic accretionary terranes within the Mongol-Okhotsk suture zone, Russian Far East. In: *Proceedings of Pacrim'99, 10-13 October 1999, Bali, Indonesi* [M], The Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series No. 4/99, 347 ~ 358.
- YAKUBCHUK A. 2002. The Baikaside-Altaid, Transbaikal-Mongolian and North Pacific orogenic collages: similarity and diversity of structural patterns and metallogenic zoning. In: *Blundell D, Neubauer F, von Quadt A. Eds. The Timing and Location of Major Ore Deposits in an Evolving Orogen* [M]. Geological Society London Special Publication, 206: 273 ~ 297.
- YAKUBCHUK A. 2004. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage: a revised model [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 761 ~ 779.
- YIN A, HARRISON T M. 2000. Geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Annual Review in Earth and Planetary Sciences*, 28: 211 ~ 280.
- YIN Jixiang, XU Juntao, LIU Chengjie, LI Huan. 1988. The Tibetan plateau: regional stratigraphic context and previous work [J]. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 327: 5 ~ 52.
- ZAITSEV Y A. 1984. Evolution of Geosynclines [J]. *Nedra, Moscow* (in Russian).
- ZHAI Mingguo, MENG Qingren, LIU Jianming, HOU Quanlin, HU Shengbiao, LI Zhong, ZHANG Hongfu, LIU Wei, SHAO Jian, ZHU Rixiang. 2004. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in Eastern North China and implication for geodynamics [J]. *Earth Science Frontiers*, 11 (3): 285 ~ 297 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Changhou, SONG Honglin. 1997. Mesozoic thrust tectonics in Yanshan intraplate orogen and the differences between them and those of foreland fold-and-thrust belt [J]. *Earth Science*, 22 (1): 33 ~ 36 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Changhou, WANG Genhou, WANG Guosheng, WU Zhengwen, ZHANG Lusuo, SUN Weihua. Thrust tectonics in the eastern segment of the intraplate Yanshan Orogenic Belt, western Liaoning Province, North China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 76 (1): 64 ~ 76 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guowei, DONG Yunpeng, PEI Xianzhi, YAO Anping. 2002. On the Meso-Cenozoic circum-Siberian intracontinental tectonic system [J]. *Geological Bulletin of China*, 21 (4 ~ 5): 198 ~ 201 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hongren. 2000. Yanshan event [J]. *Acta Geologica Sinica*, 72 (2): 103 ~ 111 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jidong, LI Xiang, LI Guangdong. 2002. Gubeikou thrust nappe structure and brittle-ductile deformation belt of the Tuchengze Formation [J]. *Geology in China*, 29 (4): 392 ~ 396 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Q, WANG Y, QIAN Q, YANG J H, WANG Y L, ZHAO T P, GUO G J. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (2): 236 ~ 244 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yueqiao, DONG Shuwen, ZHAO Yue, ZHANG Tian. 2007a. Jurassic tectonics of north China: a synthetic view [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81 (11): 1462 ~ 1480 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yueqiao, LIAO Changzhen, SHI Wei, ZHANG Tian, GUO Fangfang. 2007b. On the Jurassic tectonics in and around the Ordos basin, north China [J]. *Earth Science Frontier*, 14 (2): 182 ~ 196 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO X X, COE R, LIU C. 1992. New Cambrian and Ordovician paleomagnetic poles for the north China block and their paleogeographic implication [J]. *J. Geophys. Res.*, 97: 1767 ~ 1788.
- ZHAO Yue, YANG Zhenyu, MA Xinghua. 1994. Geotectonic transition from paleoasian system and paleotethyan system to paleopacific active margin system in eastern Asia [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 29 (2): 105 ~ 128 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yue, CUI Shengqin, GUO Tao, XU Gang. 2002. Evolution of a Jurassic basin of the Western Hills, Beijing, North China and its tectonic implication [J]. *Geological Bulletin of China*, 21 (4 ~ 5): 211 ~ 217 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yue, XU Gang, ZHANG Shuanhong, YANG Zhenyu, ZHANG Yueqiao, HU Jianmin. 2004a. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia [J]. *Earth Science Frontiers*, 11 (3): 319 ~ 328 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yue, ZHANG Shuanhong, XU Gang, YANG Zhenyu, HU Jianmin. 2004b. The Jurassic major tectonic events of the Yanshanian intraplate deformation belt [J]. *Geological Bulletin of China*, 23 (9 ~ 10): 854 ~ 863 (in Chinese with English abstract).
- ZHENG Y D, ZHANG Q, WANG Y, LKAASUREN B, BADARCH G, BADAMGLALV Z. 1996. Great Jurassic thrust sheets in Beishan (North Mountain)—Gobi areas of China and southern Mongolia [J]. *Journal of Structural Geology*, 18: 1111 ~ 1126.
- ZHENG Y D, DAVIS G A, WANG C, DARBY B J, HUA Y G. 1998. Major thrust sheet in the Daqingshan Mountains, Inner Mongolia, China [J]. *Science in China (Series D)*, 41: 553 ~ 560.
- ZORIN Yu A. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia [J]. *Tectonophysics*, 306: 33 ~ 56.