

# 郯庐断裂带中生代构造演化史: 进展与新认识

张岳桥<sup>1</sup>, 董树文<sup>2</sup>

ZHANG Yue-qiao<sup>1</sup>, DONG Shu-wen<sup>2</sup>

1. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

1. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;

2. Institute of Geological Mechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

**摘要:**总结出郯庐断裂带中生代运动学演化的过程与历史, 概括为“两大运动时期、五个发展阶段”。第一运动时期对应于三叠纪—早侏罗世早期的“印支运动”, 以扬子陆块与华北地块之间的拼合和碰撞造山为主导, 郯庐断裂带经历了: ①转换走滑阶段 (240~220 Ma), 其走滑活动局限在大别和苏鲁超高压变质带之间。这个阶段的陆—陆深俯冲作用使苏鲁超高压变质带向西韧性挤出, 导致徐淮弧形构造带的形成和发育。②左旋平移走滑阶段 (220~190 Ma), 徐淮弧形构造带向南错移了约 145 km, 并被大别山以北地区的东西向逆冲系统所吸收。左旋走滑扩展使郯庐断裂带贯穿整个华北和东北地区。第二运动时期对应于中、晚侏罗世至古新世时期的“燕山运动”, 郯庐断裂带的演化与东亚活动陆缘的演化紧密联系在一起, 经历了③中、晚侏罗世至早白垩世早期挤压走滑活动, 伴随着华东北部地区岩石圈、地壳增厚和郯庐左旋走滑断裂系的发育。④早白垩世以地壳伸展和陆内裂谷断陷作用为主, 使早期增厚的华北克拉通岩石圈发生垮塌和减薄。⑤晚白垩世—古新世以右旋走滑为主, 沿断裂带及其两侧发育一系列拉分盆地。系统地阐述了郯庐断裂带中生代发育过程与地质特征, 及其在东亚大陆演化历史中独特的作用。

**关键词:** 郯庐断裂; 郯庐断裂系; 中生代; 基底走滑韧性剪切带; 徐淮弧形构造; 走滑构造; 伸展构造

中图分类号: P542<sup>+</sup>.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2008)09-1371-20

Zhang Y Q, Dong S W. Mesozoic tectonic evolution history of the Tan-Lu fault zone, China: Advances and new understanding. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(9):1371-1390

**Abstract:** The authors put forward a new chronological evolution model of the Mesozoic kinematic history of the Tan-Lu fault zone, which is boiled down to “two movement periods and five development stages”. The first movement period corresponds to the Triassic to earliest Early Jurassic “Indosinian Movement”, characterized by amalgamation between the North China Craton and the Yangtze block and collisional orogeny. During this movement period, the Tan-Lu fault zone experienced two stages, i.e. the first and second stages. The first stage (240–220 Ma) was a transition strike-slip stage, when the strike-slip movement of the fault zone was restricted to a transform zone between two ultra-high pressure (UHP) metamorphic belts. The Xu-Huai orocline on the western side of the Tan-Lu fault zone was formed by westward ductile extrusion of the Sulu UHP metamorphic belt as a consequence of the deep subduction of the Yangtze block beneath the North China Craton. The second stage (220–190 Ma) was a left-lateral strike-slip stage. During this stage, the Xu-Huai orocline was displaced southward about 145 km and then was absorbed an E-W-striking thrust system in the hinterland area of the Dabie orogenic belt. Northward propagation of the left-slip motion made the Tan-Lu fault zone go through the whole of North China and Northeast China. The second movement period corresponded to the Middle-Late Jurassic to Paleocene “Yanshan Movement”, and the tectonic history of the Tan-Lu fault zone was closely associated with the evolution of the active continental margin of East Asia. The fault zone during this movement period underwent three stages, i.e. the third, fourth and fifth stages. The third stage (Middle-Late Jurassic to earliest Early Cretaceous) witnessed compressive strike-slip motion, accompanied

收稿日期: 2008-04-28; 修订日期: 2008-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 40572120) 资助。

作者简介: 张岳桥 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事构造地质、新构造和盆地研究、教学工作。E-mail: yueqiao-zhang@sohu.com

by the lithospheric and crustal thickening of the eastern North China Block and formation and development of the Tan-Lu fault system. The fourth stage (Early Cretaceous) saw crustal extension and intracontinental rifting, resulting in collapse and thinning of the thickened lithosphere of North China. During the fifth stage (Late Cretaceous to Paleocene), dextral strike-slip motion predominated and a number of pull-apart basins formed along and at both sides of the Tan-Lu fault zone. The paper systematically describes the Mesozoic development history and geological features of the Tan-Lu fault zone and its specific role played in the tectonic evolution of the East Asian continent.

**Key words:** Tan-Lu fault zone; Tan-Lu fault system; Mesozoic; basement strike-slip ductile shear zone; Xu-Huai orocline; strike-slip structure; extensional structure

郯庐断裂是亚洲大地构造发展的关键,同时也是东亚最令人困惑的构造要素。对此,前人做了大量的调查和研究工作,取得了丰硕的成果,但存在的问题众多,各家观点相差很大,众说纷纭。

自 20 世纪 50 年代根据航磁异常特征确定了郯庐深大断裂带以来,对该断裂带的空间展布和组成结构特征,取得了许多共识,可以概括为<sup>[1]</sup>(图 1):①郯庐断裂带在航磁异常图上表现为显著的线性构造,对应于陡立的断裂带,在中国境内延伸长达 2400 km。这些断裂带的构造性质复杂,经历了长期的演变历史。②位于山东和江苏境内的中南段是郯庐断裂带的主段,由 4 条边界断裂组成(F1 至 F4),分别控制了白垩纪“两堑夹一垒”的构造格局,其中安邱—莒县断裂(F2)构成了华北地块与扬子陆块的边界。向南至安徽张八岭,几条断裂汇合成 1 条,沿张八岭—肥东陆块西侧发育。再向南,郯庐断裂带沿大别山东缘延伸,在广济终止在长江以北,没有错开扬子前陆地区的近 E—W 向褶皱构造带。③向北延伸至渤海湾海域和下辽河,主要由 3 支断裂组成,分别控制了辽河中、新生代断陷盆地的发育<sup>[2]</sup>。东北地区通常认为有 3 条断裂,由东向西分别为敦化—密山断裂、伊兰—伊通断裂和沈阳—长春—哈尔滨断裂<sup>[3]</sup>。后者隐伏于松辽盆地东侧之下。敦化—密山断裂被认为是一条左旋走滑断裂<sup>[4-5]</sup>。所有这些断裂在白垩纪—早新生代时期强烈伸展复活,控制了白垩纪—早新生代断陷盆地的发育。④地表出露的郯庐断裂带大部分以脆性变形为主,记录了晚中生代—新生代的活动和变形历史<sup>[6-7]</sup>。沿郯庐断裂带两侧的基底岩石中发育了大型韧性走滑剪切带,如大别山东缘、张八岭地块、苏鲁造山带西缘等,它们在空间分布上不连续,受到后期构造的改造。这些基底韧性剪切带记录了郯庐断裂带中生代早期的变形历史<sup>[8-9]</sup>。⑤横穿郯庐断裂带的 2 条地学断面(江苏响水至内蒙古满都拉和安徽灵璧至上海奉贤)揭示了

郯庐断裂带在浅部表现为堑—垒结构的复杂构造带,在深部是一条向下延伸切穿地壳到达上地幔的断裂破碎带与上地幔隆起带<sup>[10]</sup>。

郯庐断裂与三叠纪超高压变质带空间关系密切,人们对此予以关注并做了大量的研究工作,对超高压变质带的岩石矿物学、地球化学、构造地质学、同位素年代学等,大陆深俯冲和超高压变质带的形成时代、折返机理等都取得了举世瞩目的成果<sup>[11-39]</sup>。相比而言,郯庐断裂带的研究程度滞后于超高压变质带的研究,对郯庐断裂带的形成机制和演化历史,尽管提出了众多的模式<sup>[31-39]</sup>,但至今尚没有一个模式为大众所普遍接受。主要分歧涉及到这条大型岩石圈断裂带的形成时代、大地构造属性、演化阶段、区域动力学背景等。总结起来有:①郯庐断裂带是一条古老断裂带,还是一条碰撞造山断裂带,抑或是陆缘走滑断裂带?②断裂带是否有大规模的走滑位移?如何理解郯庐断裂带向南突然终止、向北则延伸至东北地区?如果存在大规模的走滑位移,位移量是多少?是什么时候发生和累积的?走滑位移量是如何沿走向分布的?位移量又是如何被吸收的?③郯庐断裂带与其两侧高压、超高压变质带之间的运动学和动力学的关系如何?它们之间是否存在成生联系?2 个超高压变质带是被郯庐断裂带错开的吗?如果被错开,如何解释郯庐断裂带向南突然终止于超高压变质带一侧?④碰撞造山期郯庐断裂带起到了什么作用?如果是一条走滑断裂,那么同碰撞走滑位移量是多少?如何沿走向分布?⑤后碰撞阶段走滑位移量是多少?如何沿走向分布?

显然,全面述评郯庐断裂带的研究成果和各家观点的分歧超出了笔者的能力。本文的目的是通过梳理这条巨型断裂带涉及到的重大构造问题,对最近 10 年来所获得的新的观察资料和测量数据进行整理,尤其是郯庐断裂带及其两侧基底韧性带的研究、构造年代学测试数据、盆地分析、古构造应力场

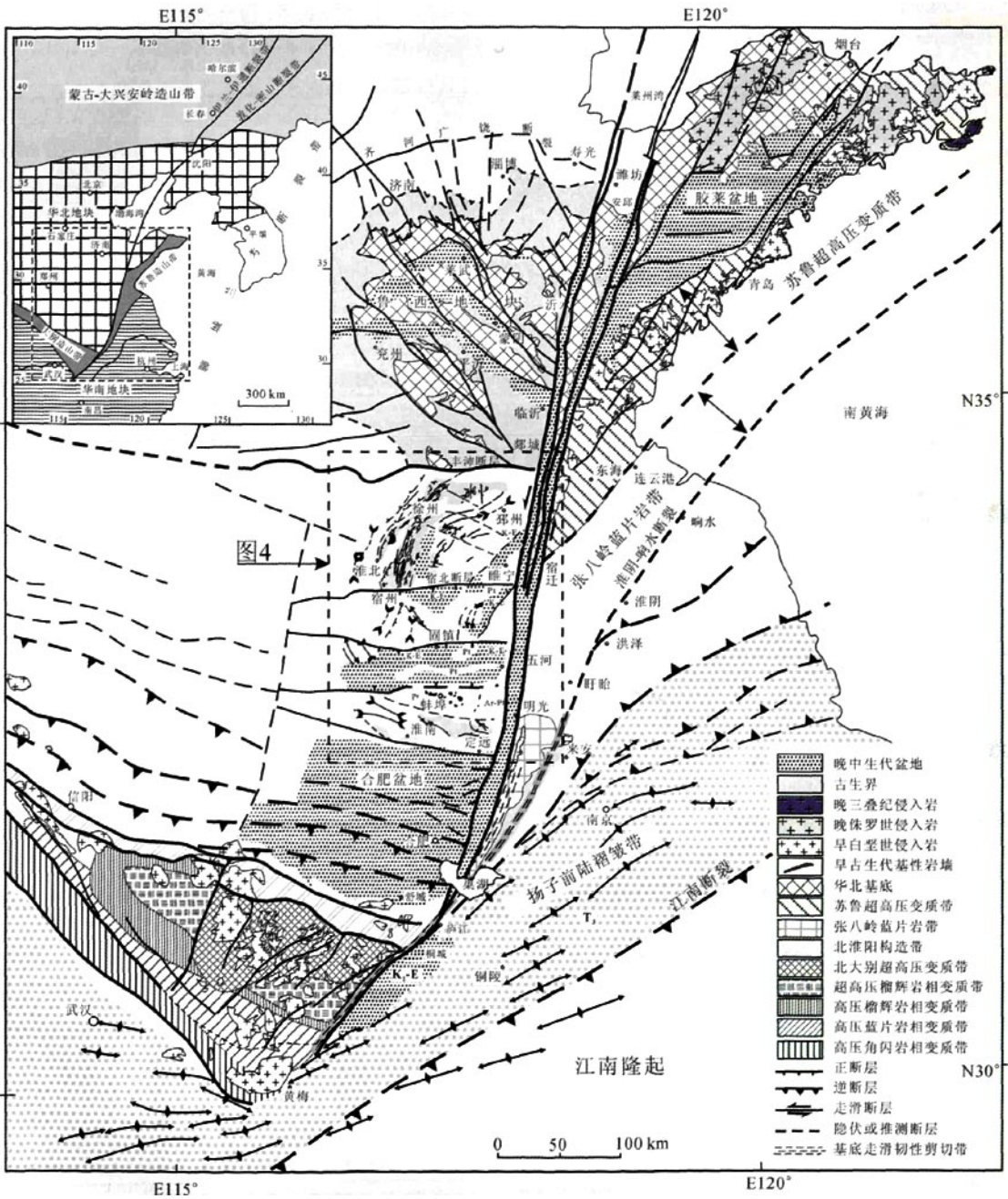


图 1 郯庐断裂带中南段构造纲要图(根据参考文献[39-43]编制)

Fig. 1 Tectonic outline of the south-central segment of the Tan-Lu fault zone

K<sub>2</sub>-E—上白垩统-古近系; K-E—白垩统-古近系; T<sub>3</sub>—上三叠统; Pt—元古宇; Ar-Pt—太古宇-元古界

反演等,来检验以前提出的断裂带的形成模式和演化历史,以此建立一个较为系统的关于郯庐断裂带形成

和阶段性演化的模式,进一步提出郯庐断裂带研究的科学问题,推动中国东部大地构造的研究进程。

## 1 郯庐断裂带及其两侧基底韧性剪切带的变形特征

郯庐断裂带中南段近 10 年来研究的一个重要进展是发现了多条基底韧性走滑剪切带,主要有大别造山带东缘走滑韧性剪切带<sup>[8-9,34-35]</sup>、肥东走滑韧性剪切带<sup>[8-9,36]</sup>、张八岭东缘走滑韧性剪切带<sup>[37]</sup>等。另外在苏鲁超高压变质带西缘也发现了平行郯庐断裂带的韧性剪切变形<sup>[38-39]</sup>。通过对这些韧性剪切带的显微组构特征、运动学、变形条件、年代学等详细的野外观察和测试分析,尤其是运用同位素年代学方法对韧性剪切带内全岩和单矿物的年代学测试,获得了郯庐断裂带中生代走滑活动历史的重要信息。

### 1.1 肥东桴槎山基底走滑韧性剪切带

朱光及其研究小组<sup>[8-9,36]</sup>在郯庐断裂带东侧的肥东桴槎山地区,发现了数条 NNE 向基底韧性剪切带,其中以肥东桴槎山走滑韧性剪切带最为典型。该剪切带出露于肥东县境内的龙泉山、桴槎山一带的肥东群(Ar—Pt)片麻岩中,主体由 6 条 NNE 向延伸的次级韧性剪切带相间组成,单条宽度数十米至数百米,累积宽度大于 10 km。对糜棱岩叶理和矿物拉伸线理进行了系统的野外观测和统计分析,北部优势走向为 N35°E,一致向 SEE 陡倾,倾角多为 65~80°,叶理面上矿物拉伸线理一致向 SSW 缓倾,倾角以 10~20°居多;南部糜棱岩叶理走向 NE,以向西陡倾为主,其上矿物拉伸线理向 SSW 缓倾。韧性剪切带从边缘向中心发育了一套完整的糜棱岩系列:糜棱岩化片麻岩、初糜棱岩、糜棱岩、超糜棱岩有规律地分布。糜棱岩中的石英呈波状消光,石英颗粒定向排列且具有缎带构造,主要由动态重结晶的细小颗粒组成,石英颗粒明显拉长,长宽比达 8:1,甚至更大。长石机械双晶和破裂构造发育,有时可见不均匀变形状态下产生的“火焰状”双晶纹,书斜构造、显微破裂构造等则显示出剪切条件下硬矿物粒内的破裂扩展和滑移特征。剪切带的糜棱岩中广泛发育  $\sigma$  型和  $\delta$  型斑晶,斑晶多为长石,尾部有石英颗粒分布。

韧性剪切带糜棱岩中的旋转斑晶与拖尾的几何学特征、S-C 组构、云母鱼构造等,指示该韧性剪切带运动学指向为左旋剪切<sup>[8-9]</sup>。肥东韧性剪切带运动学涡度值估算结果主要集中在 0.87~0.95 之间和 0.74~0.95 之间<sup>[40]</sup>,说明该韧性剪切带的变形以简单剪切为主,同时存在一个垂直剪切带走向的纯剪变

形分量,总体上表现为一条具有压扭性质的走滑剪切带。用动态重结晶颗粒估算的古差异应力为 60~90 MPa 和 145~160 MPa<sup>[36]</sup>。基于韧性剪切带中糜棱岩显微组构特征<sup>[45-46]</sup>的观察,发现石英残斑表现为塑性拉长和定向排列,普遍出现波状消光或带状消光及核-幔构造,而基质中石英为动态重结晶石英,镜下显示亚颗粒旋转(SR)与颗粒边界迁移(GRB)动态重结晶同时出现。这一显微构造特征显示石英的变形温度在 400℃以上。糜棱岩中的长石残斑皆呈现塑性拉长,部分样品中的长石边缘还出现了较明显的动态重结晶,基质中也出现了细粒的长石,这一显微构造特征表明长石的变形温度在 450~500℃之间。另外,糜棱岩中黑云母矿物的出现指示了中绿片岩相的变质条件,相对应的温度范围为 400~450℃。总地说来,肥东韧性剪切带的变形温度范围在 400~500℃之间。

### 1.2 大别造山带东缘走滑韧性剪切带

郯庐断裂带南段沿着大别山东缘边界带发育,该边界带对应于一条东倾的正倾滑断层,控制了东侧晚白垩世—古近纪潜山断陷盆地的发育。沿正断层下盘的隆升部位发现了走滑韧性剪切带,在桐城—牛栏铺一带出露最好,露头宽达 1~1.5 km,对此,朱光等<sup>[9,33]</sup>、王勇生等<sup>[39]</sup>做了详细的野外测量、实验室分析和研究。

野外观察分析显示,大别造山带东缘走滑韧性剪切带内展示了早、晚 2 期韧性剪切变形。早期韧性剪切带残留在晚期剪切带之间断续出现,走向一般为 50~60°,在野外多处露头上见到它们被晚期剪切带所切割、牵引,可见走向上 10~20°的交角关系<sup>[35,39]</sup>。这些早期韧性剪切带内发育糜棱岩,部分为超糜棱岩,糜棱面理陡立,倾角变化于 60~85°之间。矿物拉伸线理平缓,倾角多为 10~20°,向北东或南西倾伏。野外发现,这些早期韧性剪切带一部分是残留下来的,也有一部分在晚期的韧性剪切中被利用而再次发生左行平移。糜棱岩中大量的 S-C 组构、旋转残斑、云母鱼构造、长石旋转碎斑系等显微构造,均指示了左行走滑剪切的变形方式<sup>[9,35,39]</sup>。

晚期剪切带总体走向 NE45°,由数条强韧性走滑剪切亚带相间平行排列组成。剪切带内普遍出现糜棱岩、超糜棱岩、千枚岩等典型糜棱岩类构造岩,其中以富含绿泥石的超糜棱岩为主要类型。糜棱岩叶理陡立,倾角以 70~80°为主,倾向东者占优势。叶

理面上拉伸线理平缓,优势倾角为  $15^{\circ}$ ,主要向 NE 倾。根据剪切带内角闪石、黑云母等暗色矿物广泛为绿泥石所交代可推知,韧性剪切带变形发生在绿片岩相变质条件下。晚期韧性剪切带也以左行走滑剪切活动为主,如野外 S-C 组构、旋转碎斑、牵引构造和显微镜下 S-C 组构、书斜构造、云母鱼构造、石榴子石旋转残斑构造、石英动态重结晶 C 轴组构特征等<sup>[9,49]</sup>。晚期剪切带糜棱岩中的石英动态重结晶颗粒发生了强烈的晶格定向,其 C 轴组构图以点极密和单环带型为主,并且组构图的长轴相对 z 轴向左侧偏转,同样指示了左行走滑剪切的变形方式。

关于韧性剪切带形成的温度,大别山东缘韧性剪切带的 2 期左行走滑变形的温度条件非常接近,总体上在  $350\sim 480^{\circ}\text{C}$  之间。早期韧性剪切带的糜棱岩中,长石残斑既有脆性显微破裂变形,也有塑性拉长变形,这些构造现象指示长石进入了脆韧性变形域,以位错滑动变形机制为主<sup>[9]</sup>,说明其变形温度在  $400^{\circ}\text{C}$  以上。基质中同构造的矿物组合指示造山期高级变质岩在糜棱岩化中发生了绿片岩相退变质作用,其中,同构造结晶黑云母的出现指示糜棱岩形成在中低绿片岩相条件下,相应的变质温度为  $400\sim 450^{\circ}\text{C}$ 。此外,绿泥石+白云母+黑云母的共生组合在低于  $0.6\text{ GPa}$  的压力下形成温度要大于  $450^{\circ}\text{C}$ ;白云母+黑云母温度计显示,两者共生出现的温度一般大于  $440^{\circ}\text{C}$ 。利用白云母—绿泥石矿物温度计所获得的温度范围为  $350\sim 480^{\circ}\text{C}$ <sup>[50]</sup>。

晚期韧性剪切带糜棱岩样品中的矿物组合与早期韧性剪切带的类似。长石矿物多数出现显微破裂与塑性拉长共存的现象,个别以显微破裂为主;多数样品中含有黑云母矿物,这表明其变形温度也在  $400\sim 450^{\circ}\text{C}$  之间<sup>[9]</sup>。通过对糜棱岩中动态重结晶石英颗粒的 C 轴光学组构特征的分析可知,石英颗粒内部的韧性变形机制主要以底面滑移为主,兼有一定的菱面滑移,而少数样品的石英颗粒还发生了柱面滑移,说明石英的变形温度主要在  $300\sim 450^{\circ}\text{C}$  之间,在局部地区可能还达到了近  $500^{\circ}\text{C}$ 。此外,来自晚期韧性剪切带糜棱岩的白云母—绿泥石矿物地质温度计的估算结果为  $410^{\circ}\text{C}$ 。由此,可以推断晚期韧性剪切带的变形温度在  $400\sim 450^{\circ}\text{C}$  之间<sup>[50]</sup>。

在早期韧性剪切带的糜棱岩中获得了新生白云母 Si 原子数在  $3.176\sim 3.288$  之间(平均为  $3.203$ )<sup>[51]</sup>。取早期韧性剪切带的平均形成温度为  $425^{\circ}\text{C}$ ,则由

多硅白云母 Si 原子数地质压力计计算的压力在  $0.25\sim 0.36\text{ GPa}$  之间,指示低压应力环境。在晚期韧性剪切带的糜棱岩中获得的新生白云母的 Si 原子数介于  $3.193\sim 3.266$  之间,平均为  $3.235$ 。取其变形温度为  $410^{\circ}\text{C}$ ,则由多硅白云母 Si 原子数地质压力计可得晚期剪切带的变形压力在  $0.24\sim 0.39\text{ GPa}$  之间,也指示低压应力环境。

### 1.3 张八岭东缘基底走滑韧性剪切带

胡博等<sup>[52]</sup>在张八岭地块东缘的来安地区,发现了一条出露宽度达  $2.5\text{ km}$  的基底走滑韧性剪切带,这是迄今发现的最宽的韧性剪切带。对该剪切带的野外宏观特征、显微组构特征、变形温压条件等详细的测量和研究结果表明,该走滑韧性剪切带由初糜棱岩、糜棱岩和超糜棱岩组成,糜棱岩叶理近直立,叶理面上石英拉伸线理向 SW 缓倾,侧伏角在  $10\sim 30^{\circ}$  之间,S-C 组构和不对称碎斑旋转指示运动指向为左旋剪切。根据石英位错密度估算的差应力值在  $65\sim 75\text{ MPa}$  之间,超糜棱岩矿物成分和显微组构特征指示其变形温度在  $250\sim 400^{\circ}\text{C}$  之间。

### 1.4 郯庐基底走滑韧性剪切带变形的时代问题

综括起来,郯庐断裂带基底韧性剪切变形的基本特征可以归纳为下列几点:①这些基底走滑韧性剪切带组构走向稳定,总体与郯庐断裂带平行,但在空间展布上是不连续的,受到后期构造作用的改造。②剪切带由初糜棱岩、糜棱岩和超糜棱岩组成,出露宽度不一,从几十米到几百米不等,最宽的达到  $2.5\text{ km}$ 。基质中石英动态重结晶作用明显。③剪切带不仅沿郯庐断裂带发育,沿郯庐断裂东侧的地块也很发育,尤其张八岭东缘宽阔的韧性剪切带的发现具有重要的意义,表明基底韧性剪切变形分布在一个很宽的范围内。④在胶北隆起地区,角闪岩相变质岩的叶理走向以 NW—SE 向为主,但靠近大致平行于郯庐断裂带的几条主要断裂,如招平断裂、牟平—即墨断裂带等,基底变质岩的叶理方向与断裂带平行,显示断裂带为走滑剪切变形。⑤剪切带运动学指向(旋转碎斑、S-C 组构、书斜构造、云母鱼构造、石英光轴定向等)一致地指示以左旋走滑剪切为主的变形方式。⑥这些基底韧性剪切带具有大致相同的温压条件:变形温度在  $300\sim 600^{\circ}\text{C}$  之间,平均  $400^{\circ}\text{C}$ ,变形深度位于上下地壳的过渡带( $10\sim 20\text{ km}$ )。

如何确定基底韧性剪切带的变形时代是构造地质学的一个难点。红河剪切带同位素年代学研究结

果显示<sup>[47]</sup>,具有不同封闭温度的矿物的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 年龄代表剪切带的冷却时代,并不代表变形时代。利用较高封闭温度的矿物,如角闪石、多硅白云母等,获得的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 年龄可以帮助确定剪切变形时代的上限。迄今沿郯庐断裂带的基底韧性剪切带已经获得了一些全岩和不同单矿物的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 年龄。

沿苏鲁造山带西侧发现的断续出露的基底韧性剪切带,对从糜棱岩中分离出的6个多硅白云母进行了 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 测年,其中2个样品分别给出了 $209.9\text{ Ma} \pm 1.5\text{ Ma}$ 和 $214.3\text{ Ma} \pm 1.4\text{ Ma}$ 的年龄,指示了三叠纪碰撞造山作用晚期阶段郯庐断裂带左旋走滑剪切变形的冷却年龄<sup>[38-39]</sup>。对大别山东缘韧性剪切带糜棱岩内的单矿物(白云母、黑云母)和全岩进行 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 测年,给出了2个年龄段:早期糜棱岩年龄为 $189\sim 193\text{ Ma}$ ,相当于早侏罗世,晚期糜棱岩年龄为 $110\sim 130\text{ Ma}$ ,相当于早白垩世中晚期<sup>[8-9]</sup>。早期糜棱岩的测年结果与苏鲁造山带西侧发育的走滑韧性剪切带的冷却时代接近,可能代表了该韧性剪切变形时代的上限。另外,Wang<sup>[40]</sup>对大别山东缘的韧性剪切带也进行了 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 测年分析,获得的白云母 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 坪年龄在 $160\sim 150\text{ Ma}$ 之间,认为这个年龄代表了郯庐断裂带的起始时间。

最近,笔者在张八岭东缘剪切带的超糜棱岩(样品号 TL21-1,样品位置见胡博等<sup>[47]</sup>的文献)中选出黑云母矿物,进行了 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 测年,获得的坪年龄为 $135.3\text{ Ma} \pm 1.5\text{ Ma}$ ,反等时年龄为 $135.9\text{ Ma} \pm 1.8\text{ Ma}$ 。尽管结果很一致,但这个年龄并不代表基底剪切带的形成时代,而是剪切带的一次快速冷却事件的时代,与沿断裂带发育的花岗岩的侵入年龄一致,与早白垩世的伸展作用和大量花岗岩的侵入活动有关。

为了系统地分析郯庐断裂带基底韧性剪切变形的时代,笔者收集了各种不同矿物的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 测年结果和郯庐断裂带两侧中生代侵入岩的年龄数据,并进行了对比分析(图2和图3)。由图2和图3可以看出,无论是全岩还是其他不同封闭温度的单矿物(黑云母、白云母、多硅白云母、角闪石等),所获得的年龄数据都归为3组:①较老的一组年龄为晚三叠世晚期至早侏罗世早期, $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 坪年龄集中在 $180\sim 200\text{ Ma}$ 和 $210\sim 215\text{ Ma}$ 两个时段,分别分布在大别和苏鲁2个超高压变质带的一侧。 $180\sim 200\text{ Ma}$ 时段对应于岩浆活动相对平静期,与造山作

用有关的岩浆活动的年龄主要集中在 $205\sim 225\text{ Ma}$ 之间,仅在郯庐断裂带西侧的徐淮弧型构造带发育早侏罗世侵入杂岩,时代约为 $190\text{ Ma}$ <sup>[49-50]</sup>。多硅白云母 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 年龄代表了造山作用后期郯庐断裂剪切变形的时间上限。②韧性剪切带较年轻的一组年龄主要是通过黑云母和全岩测定的,数量较多,年龄集中在 $110\sim 135\text{ Ma}$ 之间,这个时段对应于郯庐断裂带两侧强烈的A型花岗岩侵入活动的时期,反映了早白垩世地壳伸展体制下的构造-热事件。少量多硅白云母和角闪石坪年龄在 $137\sim 143\text{ Ma}$ 之间,对应于岩浆活动的相对平静期,这组年龄可能记录了早白垩世早期郯庐断裂带的一次走滑剪切活动。③中间一组年龄数据相对较少,集中在 $165\sim 150\text{ Ma}$ 之间,与郯庐断裂带两侧(胶北隆起区和蚌埠隆起区)晚侏罗世S型花岗岩同期,代表了晚侏罗世郯庐断裂带挤压走滑活动的时代。

从上述分析可知,基底韧性走滑剪切带同位素年代学分析结果记录了郯庐断裂带3次重要的走滑剪切变形:碰撞造山晚期( $180\sim 215\text{ Ma}$ )的左旋走滑剪切、晚侏罗世( $155\sim 165\text{ Ma}$ )左旋走滑活动和早白垩世早期(约 $140\text{ Ma}$ )左旋走滑活动。

## 2 碰撞造山时期郯庐断裂带的“两阶段”运动学模式

### 2.1 事实与困境

同碰撞期郯庐断裂带的构造性质和走滑位移量是争议最大的问题,也是研究郯庐断裂带的核心问题。许多研究者认为郯庐断裂带是一条碰撞造山断裂带<sup>[51-59]</sup>,但对碰撞造山断裂的形成机制和构造属性则提出了各种不同的模式(对不同模式的述评见文献[31-33]),如转换断裂(transform fault)模型<sup>[9-20]</sup>、块体楔入模型<sup>[60]</sup>、剪刀状撕裂运动模式<sup>[51]</sup>等。另外一部分学者<sup>[60-61]</sup>反对郯庐断裂带大规模平移的认识,汤加富等<sup>[62]</sup>强调这是一条晚侏罗世以来形成的正断层,大别和苏鲁造山带现今的空间位置关系主要与华北地块南缘的不规则形态有关,并非郯庐断裂带平移所致。

基于古地磁研究建立的块体顺时针旋转碰撞模式或旋转缝合线模式<sup>[52,54,57,63]</sup>得到许多学者的认同。该模式认为郯庐断裂带起源于扬子板块顺时针旋转与华北板块发生斜向碰撞,是一条斜向俯冲边界,扬子板块俯冲到华北板块之下。赞同此观点的学者将



大别-郯庐-苏鲁构造带作为一个整体的造山带来看待<sup>[9]</sup>。这个碰撞模式强调郯庐断裂带没有大规模的走滑运动, 2 个超高压变质带也不是被错开的, 强调了不规则边界和块体旋转的主导性。

在讨论同碰撞期郯庐断裂带的构造性质和走滑位移量之前, 让我们先来检视下列几个基本事实。

(1) 郯庐断裂带终止在大别山南侧, 向南没有切错扬子前陆构造带。这个不争的事实表明, 2 个超高压变质带之间的视位错 (apparent offset) 并非是郯庐断裂带走滑活动造成的, 超高压变质带之间的视位移量 (约 550 km) 也不代表郯庐断裂带的走滑位移量。任何一个同碰撞造山构造模式, 如果没有合理解释这个基本事实, 那么模式的合理性就缺乏基础。

(2) 近 10 年来沿郯庐断裂带及其两侧发现多条基底韧性剪切带, 详细的构造学和同位素年代学分析表明, 该断裂带在碰撞造山期间发生显著的左旋走滑剪切变形。这个事实又清楚地表明, 郯庐断裂带是一条大型的碰撞造山走滑边界带, 而非碰撞边界带。

(3) 在碰撞造山带前陆地区 (合肥盆地、下扬子地区), 古生代和早中生代盖层均发生褶皱冲断变形, 但变形样式和构造线的方向是不同的 (图 1)。位于大别山后陆的合肥盆地, 于侏罗系底部不整合面之下发育一组向北逆冲的 WE 向冲断系, 与郯庐断裂带近于直交, 断裂构造线在靠近郯庐断裂带时没有发生弯曲或方向偏转<sup>[42-43, 64]</sup>。相反, 在下扬子地区, 盖层褶皱-逆冲断裂构造整体呈弧形分布, 远离郯庐断裂带, 构造线方向为近东西向, 靠近郯庐断裂则转为 NE 至 NNE 向, 与郯庐断裂走向趋于平行。这种构造变形样式的差异反映了郯庐断裂带两侧块体运动型式和变形机理的差别, 无法用单一的块体斜向碰撞模型来解释。

上述基本事实说明 2 点: 第一, 郯庐断裂带确实是一条碰撞造山断裂带, 而且在

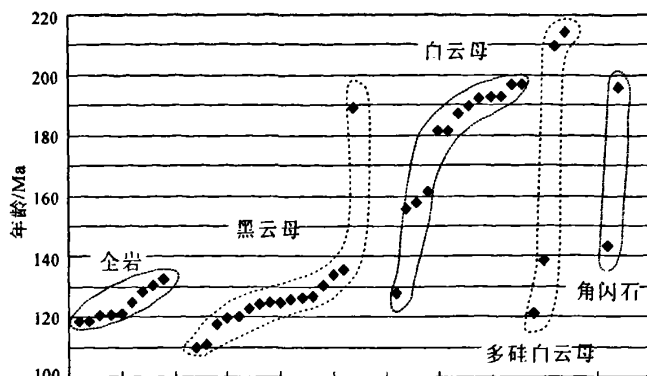


图 2 郯庐断裂带基底韧性走滑剪切带  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  测年数据散点图  
(据参考文献[8-9, 35-36, 38-39, 48])

Fig. 2 Scatter plot of  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  dating data from the basement ductile strike-slip shear zones along the Tan-Lu fault zone

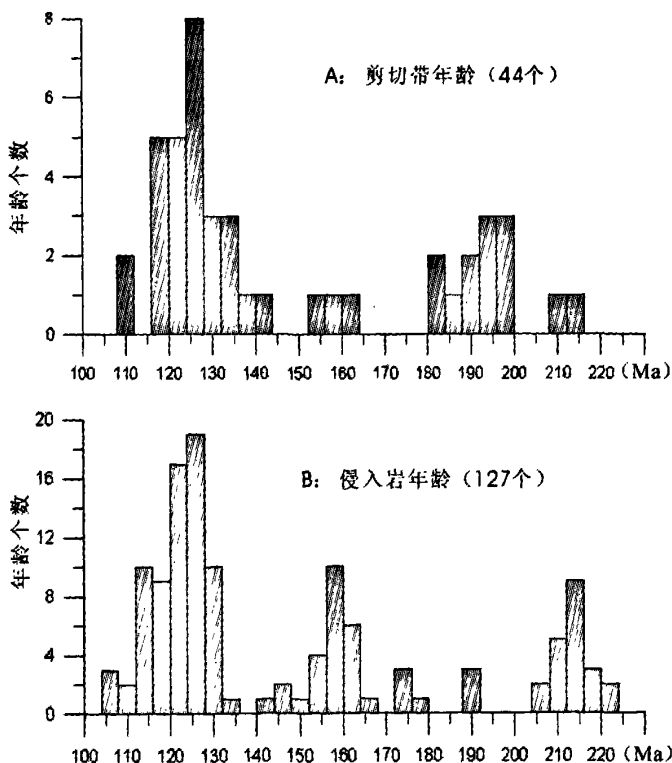


图 3 郯庐断裂带基底韧性剪切带  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  测年数据直方图 (A) 和断裂带两侧中生代侵入岩体同位素年龄数据直方图 (B)  
(据参考文献[8-9, 35-36, 38-39, 48])

Fig. 3 Histograms of  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  dating data from the basement ductile shear zones (A) and isotopic dating data of Mesozoic intrusive rocks (B) along the Tan-Lu fault zone and on its both sides

碰撞造山时期发生强烈的左旋走滑剪切变形;第二,断裂带两侧的大别和苏鲁超高压变质带的视位错不是断裂走滑运动的结果。这个两难推理的逻辑命题告诉我们,碰撞造山时期郯庐断裂带的走滑运动和2个超高压变质带之间的错位没有必然的联系。那么如何确定碰撞造山时期郯庐断裂带的走滑位移量及其可能的运动学吸收机制就成为不可回避的问题。

一个值得关注的现象是,沿郯庐断裂带西侧的徐淮地区发育一个特殊的构造组合,即徐淮弧型逆冲构造带。前人的野外调查和研究结果表明,这个弧型构造形成于印支期同碰撞造山时期,其中侵入的早侏罗世杂岩体没有卷入变形。下面笔者从徐淮弧型构造的起源及其与苏鲁超高压变质带之间的位置关系,探讨同碰撞时期郯庐断裂带的走滑历史和演化阶段。

## 2.2 徐淮弧型构造带形成的侧向韧性挤出模式

徐淮弧是郯庐断裂带中南段西侧的一个特殊的构造(图1),许多研究者对其进行了详细的研究<sup>[40-41, 65-66]</sup>。王桂梁等<sup>[65]</sup>将这个弧顶向西突出的冲断带看作是一个向腹地扩展的逆冲双重构造,其前锋带是一个背驮式的叠瓦扇。徐树桐等<sup>[41]</sup>将其看作是半圆形的造山带,其根带位于郯庐断裂带。这个弧型带在构造上由北、中、南3段组成,其间被EW向断裂所分隔(图4)。北段由一组向东倾的逆冲断裂组成,卷入了元古宙变质基底和下古生界海相地层。所推测的深部滑脱面位于元古宙基底中。基于剖面平衡的估算指示NW—SEE向地壳缩短量达140 km,缩短率约70%<sup>[66]</sup>。中间段隐伏在侏罗纪至古新世沉积物之下。南段对应于蚌埠隆起,出露太古宇、元古宇和侏罗纪—白垩纪花岗岩体。在隆起带南侧发育一组走向NW—SEE、卷入古生界地层的褶皱构造。

侵入到徐淮弧逆冲构造带中的侏罗纪—白垩纪岩体包含3个序列:早侏罗世二长花岗岩至花岗斑岩,年龄为188~190 Ma,沿着弧型带的北段发育<sup>[49]</sup>;晚侏罗世片麻状花岗岩(150~160 Ma)出露于蚌埠隆起<sup>[67]</sup>;早白垩世壳幔混合型花岗岩(135~110 Ma)<sup>[68-69]</sup>在整个弧型带均有分布。

作为郯庐断裂带西侧的一个特殊的构造现象,徐淮弧型构造带的形成、演化与苏鲁超高压变质带的形成历史密切相关。对此,笔者提出这样一种解释,即徐淮弧型构造带起源于扬子地块向华北地块

之下深俯冲阶段苏鲁超高压变质带向NW—W方向的韧性挤出。这种解释得到下列证据的支持。

从构造带的展布形态特征来看,弧型构造带靠近郯庐断裂带的南北长约200 km,与苏鲁超高压变质带出露的南北宽是相近的,这种相近性暗示弧型构造带曾是苏鲁超高压变质的西延部分,它们曾经是一个整体。构造学研究显示,在高压、超高压变质岩带中,如张八岭地块、苏鲁造山带等中,早期大陆深俯冲形成的矿物拉伸线理呈南北向,上盘剪切运动的指向从南向北;而折返过程中形成的矿物拉伸线理(通常是退变质作用的产物)是变化的,在张八岭隆起带,拉伸线理方向为NNE至NNW方向,在苏鲁造山带,拉伸线理方向主体为NW—SE至NW—W—SEE向,剪切方向从ESE—WNW<sup>[70]</sup>;大别山主体为NW—SE向。这表明不同地段深俯冲陆块的折返机理是有差别的,但一个共同的特点是,深俯冲块体折返路径是斜向的。大陆俯冲和相继的斜向折返必然伴随着下地壳的侧向韧性流动。徐淮弧型构造带的冲断方向与苏鲁超高压变质带拉伸线理的近似性暗示它是苏鲁超高压变质带向西构造挤出的产物。最近,在徐淮弧型构造带中发育的早侏罗世和早白垩世侵入杂岩体中发现了含榴辉岩捕虏体<sup>[71]</sup>,对其中的榴辉岩进行了Sm—Nd全岩等时年龄和锆石U—Pb年龄测定,给出的年龄为220 Ma,指示位于弧型构造带之下的华北地块经历了与苏鲁造山带相同的构造变质历史。侵入于蚌埠隆起中的晚侏罗世片麻状花岗岩中的继承锆石U—Pb SHRIMP测年给出了平均217 Ma的年龄,同样指示了该带变质基底的三叠纪构造事件<sup>[72]</sup>。

## 2.3 碰撞造山时期郯庐断裂左旋走滑及其向南位移的吸收机制

据上述证据可以推测,徐淮弧型构造带与苏鲁超高压变质带之间存在动力学的内在联系。笔者推断,徐淮弧型构造带是苏鲁超高压变质带的西延。但该弧型构造带现今的位置相对于苏鲁超高压变质带发生向南错移,指示了郯庐断裂的左旋走滑运动。基于这种构造解释和粗略的复原重建,获得了弧型构造带错动的位移量约为145 km(图5-a)。

这个走滑运动向南扩展被隐伏于合肥盆地之下的EW向冲断系统所吸收。地震剖面解释揭示,合肥盆地中、新生代沉积地层之下发育强烈的缩短变形构造,于侏罗系底部形成明显的地层不整合面,即



印支运动面。剖面平衡和粗略的复原结果给出了合肥盆地前侏罗纪地壳缩短量达 117 km<sup>[42-43]</sup>。基于这个结果, 笔者推测, 另外 28 km 的走滑运动被转移到合肥盆地以南的北淮扬构造带, 沿该带地壳缩短变形非常强烈。因此, 徐淮弧型构造带约 145 km 的向南错移被合肥盆地之下和北淮扬构造带的地壳冲断变形所吸收。这就解释了郯庐断裂带向南延伸终止在大别超高压变质带的东侧, 而不需要错断扬子前陆褶皱构造带(图 6)。Dong 等<sup>[24]</sup>认为, 华北陆块沿郯庐断裂向南俯冲的“反向加楔”机制导致原向北俯冲形成的超高压岩石快速折返, 向南俯冲于北淮阳带之下, 垂向吸收了部分平移分量, 而下扬子前陆带没有明显位错。

值得提及的是, 关于广济断裂的指向问题, 尽管该断裂后期(侏罗纪)发生了逆冲复活(反转), 但有迹象表明, 其在印支造山作用时期为由北向南逆冲(图 6)。

## 2.4 碰撞造山时期“两阶段”运动学模式

研究表明, 扬子陆壳向北沿苏鲁造山带之下的深俯冲, 在约 240 Ma 达到变质高峰期<sup>[13-16]</sup>, 并在 220~200 Ma 时期俯冲的超高压变质岩片发生快速折返<sup>[73-75]</sup>。综合造山带超高压变质的时代, 笔者提出一个碰撞造山期郯庐断裂带两阶段运动学模型。在早期阶段(240~220 Ma), 伴随扬子陆块向华北地块之下快速俯冲, 郯庐断裂带表现为一条转换断裂, 左旋走滑运动主要发生在 2 个超高压变质带之间。受到苏鲁超高压变质带向西的韧性挤出作用, 徐淮弧型冲断构造带在这个阶段形成。在晚期阶段(220~190 Ma), 扬子陆块向华北地块之下的深俯冲作用似乎已经停止, 郯庐断裂发生强烈的左旋走滑运动, 基底韧性糜棱岩带记录了这次剪切变形的时限。郯庐断裂西侧的华北地块向南运动, 导致徐淮弧型构造向南错移和大别山以北地区的地壳发生逆冲变形, 南华北地块向南俯冲于大别山超高压变质带之下, 加速了超高压变质带的快速折返。这个时期的走滑运动超越了早期阶段郯庐断裂的范围, 向

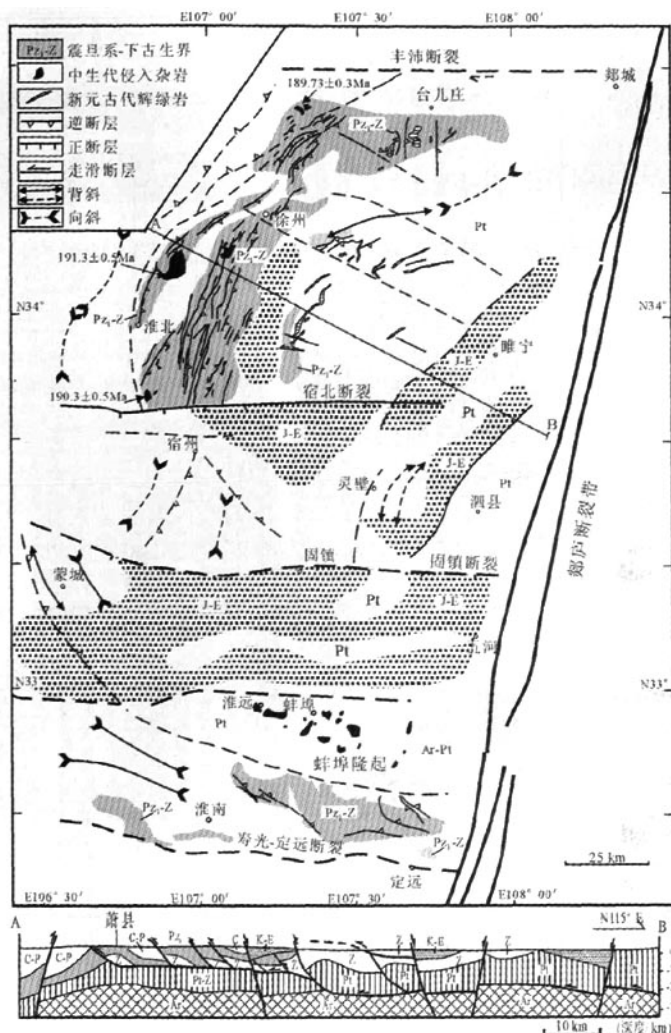


图 4 徐淮弧型构造简图(位置见图 1)

Fig. 4 Simplified structural map of the Xu-Huai orocline

K-E—白垩系-古近系; J-E—侏罗系-古近系; C-P—石炭系-二叠系;

C—石炭系; P<sub>2</sub>—下古生界; Z—震旦系; Pt-Z—元古宇-震旦系;

Pt—元古宇; Ar-Pt—太古宇-元古宇; Ar—太古宇

北已扩展到整个华北和东北地区, 徐淮弧型构造带被断裂带向南错移约 145 km。

在上述两阶段运动学模式中, 郯庐断裂带的运动学行为不仅与扬子和华北地块之间的碰撞俯冲作用密切相关, 而且受到地块俯冲极性的控制。早期阶段郯庐断裂表现为一条具有转换性质的边界带, 调节了下扬子地块沿苏鲁造山带向华北地块之下的深

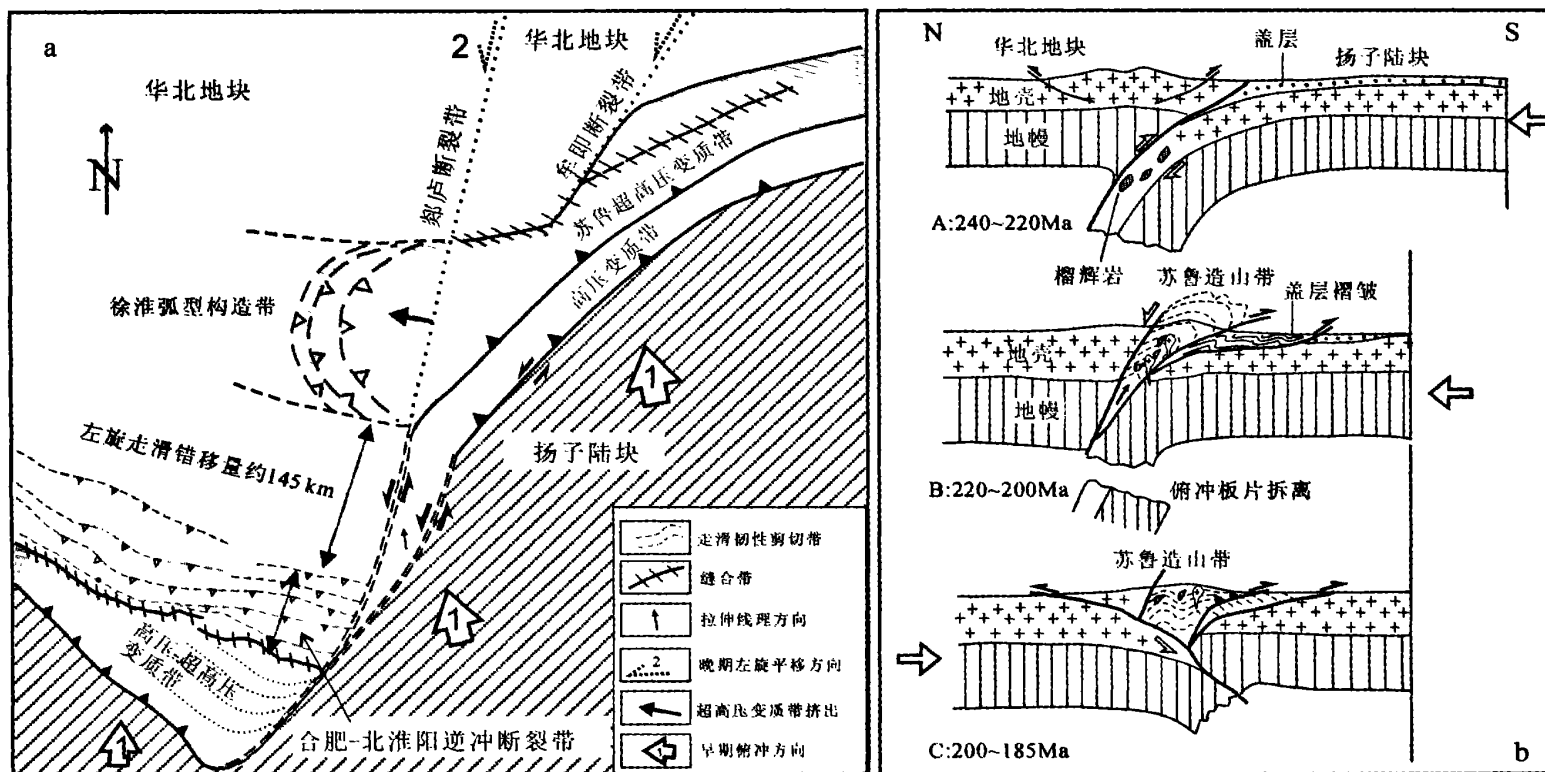


图5 郯庐断裂带西侧徐淮左旋走滑复原图(a)和两侧超高压碰撞造山带运动学模式图(b)(据参考文献[73]改编)

Fig. 5 Reconstruction of the sinistral strike-slip Xuhuai orocline at the western side of the Tan-Lu fault zone (a)

and kinematics model of the UHP metamorphic collisional orogens at both sides (b)

J-E—侏罗系-古近系; P<sub>z</sub>-Z—下古生界-震旦系; Pt—元古宇

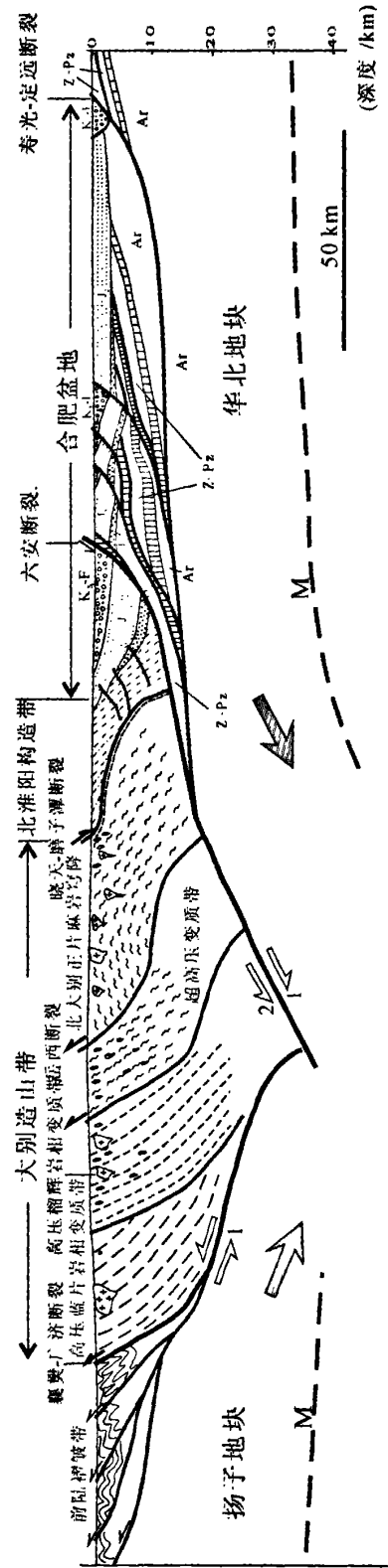


图 6 横穿大别造山带的构造剖面示意图(据参考文献[12,43]编制)

Fig. 6 Schematic structural sections across the Dabie orogenic belt

K<sub>2</sub>-E—上白垩统-古近系;J<sub>1</sub>—中侏罗统;J<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>—震旦系-古生界;A<sub>1</sub>—太古宇

俯冲作用;而晚期阶段的郯庐断裂带左旋走滑运动调节了华北地块向南的运动,在大别山北侧俯冲于超高压造山带之下。

2.5 关于郯庐断裂带两侧超高压变质带视错位

问题的进一步讨论

前人的研究结果显示<sup>[76-78]</sup>,郯庐断裂带两侧的地质体或沉积相带有规律地被左旋错移,如鲁西地区和辽东地区新元古界至下古生界沉积凹陷被错移约 700 km;蚌埠隆起和胶北隆起的基底也被错开约 550 km;北淮阳构造带与苏鲁造山带北带可以对比,错距约 550 km;2 个超高压变质带也被错开 550 km,等等。因此,许多学者认为郯庐断裂带是一条大型的走滑平移断裂带。朱光等<sup>[64]</sup>认为,沿郯庐断裂带 550 km 的平移量有一部分是在碰撞造山期发生的,另一部分是对古太平洋向东亚大陆斜向俯冲的变形响应。

本文提出的郯庐断裂带碰撞造山时期(晚三叠世晚期至早侏罗世早期)两阶段演化模式,可以较好地解释该断裂带的运动学行为。郯庐断裂带既表现为具有转换性质的边界带(早期阶段),又表现为平移性质的走滑断裂带(晚期阶段)。笔者认为,沿郯庐断裂带发育的 2 个超高压变质带的错位,并不是郯庐断裂带碰撞走滑运动的结果,在碰撞造山晚期阶段,郯庐断裂带走滑运动导致徐淮弧型构造带向南错移了约 145 km,但这个平移运动向南被大别山北部的北淮阳和合肥盆地之下的逆冲作用所吸收,没有导致 2 个超高压变质带之间的平移错动。在碰撞造山早期阶段,苏鲁超高压变质带向西构造挤出,导致徐淮弧型构造带的形成,这个时期的郯庐断裂带的平移活动没有超越 2 个超高压变质带之间的范围,它属于转换性质的边界带,2 个超高压变质带的错位关系已经存在,所以徐淮弧型构造带作为苏鲁碰撞带的西侧挤出构造的空间对比不存在问题。笔者认为,郯庐断裂带两侧不同时代的地质体有规则地大规模左旋错位,不是三叠纪华南-华北地块碰撞造山时期沿郯庐断裂带左旋走滑错移的结果。碰撞时期平移运动是存在的,但走滑平移位移量可能有限(<200 km)。笔者对这个问题的认识是,沿郯庐断裂带两侧地质体或构造带大规模的左旋位错只限于华北陆块内部,而且均发生在三叠纪碰撞造山作用之前,即郯庐断裂带是一条古老的断裂带,三叠纪特提斯洋关闭之前,在华北陆块上该断裂带已经发

育,并曾发生了左旋走滑运动,使华北地块南缘形成不规则的边界形态,成为三叠纪华北与扬子陆块碰撞造山的先存边界条件。

### 3 晚中生代郯庐断裂带“三阶段”演化历史

区域构造演化历史研究表明,在早、中侏罗世时期,华南—华北地块的碰撞—拼合作用已经停止,华北地壳处于弱伸展状态<sup>[79-80]</sup>,沿华北地块北缘的阴山—燕山构造带形成伸展断陷盆地,华北地块内部发生区域性沉降,形成大型含煤盆地。中、晚侏罗世至早白垩世早期,全球板块运动体制调整,东亚构造动力环境发生重大变革,中国大陆进入了强烈的陆内造山与燕山变形期<sup>[80]</sup>,郯庐断裂带作为中国东部一条重要的构造边界带,其演化历史与整个东亚活动陆缘构造的演化历史密切相关<sup>[76-77]</sup>。基于最新的研究成果,笔者将中—晚中生代郯庐断裂带的演化过程划为3个阶段:①中、晚侏罗世的陆内造山挤压变形、地壳增厚和郯庐走滑断裂系的形成;②早白垩世岩石圈伸展、减薄和古郯庐裂谷系的形成;③晚白垩世—古新世右旋走滑活动和拉分盆地形成。

#### 3.1 中、晚侏罗世—早白垩世早期挤压变形与岩浆活动:地壳增厚事件和郯庐断裂系的形成

中、晚侏罗世—早白垩世早期是重要的板内构造变革时期,著名的燕山运动就是指这个时期发生的构造变动与陆内造山事件。郯庐断裂带在这个板内变革时期起到什么样的作用?是否发生了大规模的左旋走滑运动?前述的基底韧性剪切带糜棱岩同位素年代学分析结果清楚地告诉我们,郯庐断裂带在晚侏罗世—早白垩世早期发生了重要的左旋剪切变形。但变形量有多少则存在不同的认识。基于徐淮弧型构造的错位关系和2个超高压变质带的错位距离,朱光等<sup>[84]</sup>推断,晚侏罗世至早白垩世走滑平移量至少在350 km左右,并将这个走滑位移量看作是对古太平洋板块向亚洲大陆斜向俯冲的变形响应。万天丰等<sup>[82]</sup>则认为,郯庐断裂带在侏罗纪时期不可能有大规模的走滑运动,这个时期形成的褶皱构造方向为NE—NNE向,与郯庐断裂带大致平行,显示区域挤压应力方向为NWW—SEE,郯庐断裂以挤压逆冲为主。笔者的研究表明,中、晚侏罗世时期,东亚大陆周邻的板块——北部西伯利亚板块、东部古太平洋板块、西部拉萨地块,大致同时向东亚大陆汇聚,在东亚大陆内部产生多向

挤压应力场,导致不同方向构造体系的强烈复活,形成东亚特有的多向汇聚构造和多向造山系统<sup>[79-81]</sup>(图7)。郯庐断裂系正是在这种地球动力学体制下于东亚活动陆缘诞生的,与古太平洋板块向亚洲大陆俯冲密切相关。

郯庐断裂系也称为郯庐扭动断裂系<sup>[76]</sup>,是指NNE—SSW走向、近平行于郯庐断裂带、不同规模的断层或断裂带组合的总称。除了郯庐断裂带以外,其他重要的断裂包括:纵切胶辽半岛的鸭绿江—青岛断裂带、纵切华北平原的仓东断裂、太行山断裂带等,它们构成了东亚大陆东部的巨型陆缘断裂系,成为中国东部新华夏构造体系的重要组成部分。该断裂系中的主要断裂形成于印支运动时期,在中、晚侏罗世—早白垩世早期发生强烈的挤压复活。沿大别山东缘发育的韧性剪切糜棱岩带中,角闪石、多硅白云母的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar测年所获得的冷却年龄(162 Ma±1 Ma~156 Ma±2 Ma)<sup>[85]</sup>,记录了郯庐断裂带在晚侏罗世的一次构造剪切热事件。在辽东半岛的丹东地区,杨进辉等<sup>[83]</sup>利用激光<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar测年技术,对晚侏罗世侵入岩的挤压变形时代进行了测试,获得的结果显示岩体韧性变形发生在约143 Ma,早于早白垩世伸展作用(128 Ma)。李三忠等<sup>[86]</sup>根据野外构造的交切关系和晚侏罗世侵入岩体内NNE走向的近水平韧性剪切变形带和褶皱构造,并依据中生代花岗岩体的侵入年龄和韧性剪切带内获得的白云母<sup>40</sup>Ar—<sup>39</sup>Ar年龄,将晚侏罗世变形时代限制在153~145 Ma之间。在牡丹江地区,平行敦密断裂带出露了一条含蓝片岩的混杂岩带,蓝片岩中青铝闪石的<sup>40</sup>Ar—<sup>39</sup>Ar坪年龄为154.7 Ma±0.7 Ma<sup>[85]</sup>,可能暗示了沿敦密断裂带及其附近地区在晚侏罗世有一期走滑剪切活动。所有这些研究成果和测年结果均表明,晚侏罗世—早白垩世早期,郯庐断裂带表现为挤压走滑变形。另外,在胶辽地块中广泛发育的晚侏罗世S型花岗岩体侵位时代在165~150 Ma之间<sup>[86-89]</sup>,其特殊的片麻理构造指示了晚侏罗世花岗岩体侵位过程中的韧性变形。晚侏罗世花岗岩体侵位后期的脆性变形在胶北隆起区十分明显,以一系列NW倾向的低角度逆冲断层和走滑断层为特征,时代限定在150~135 Ma之间。大别山南缘高压蓝片岩逆冲在早、中侏罗世地层之上和北淮阳地区的侏罗纪推覆构造均为这个阶段的产物<sup>[89]</sup>。

郯庐断裂系的发育与古太平洋板块的低角度俯

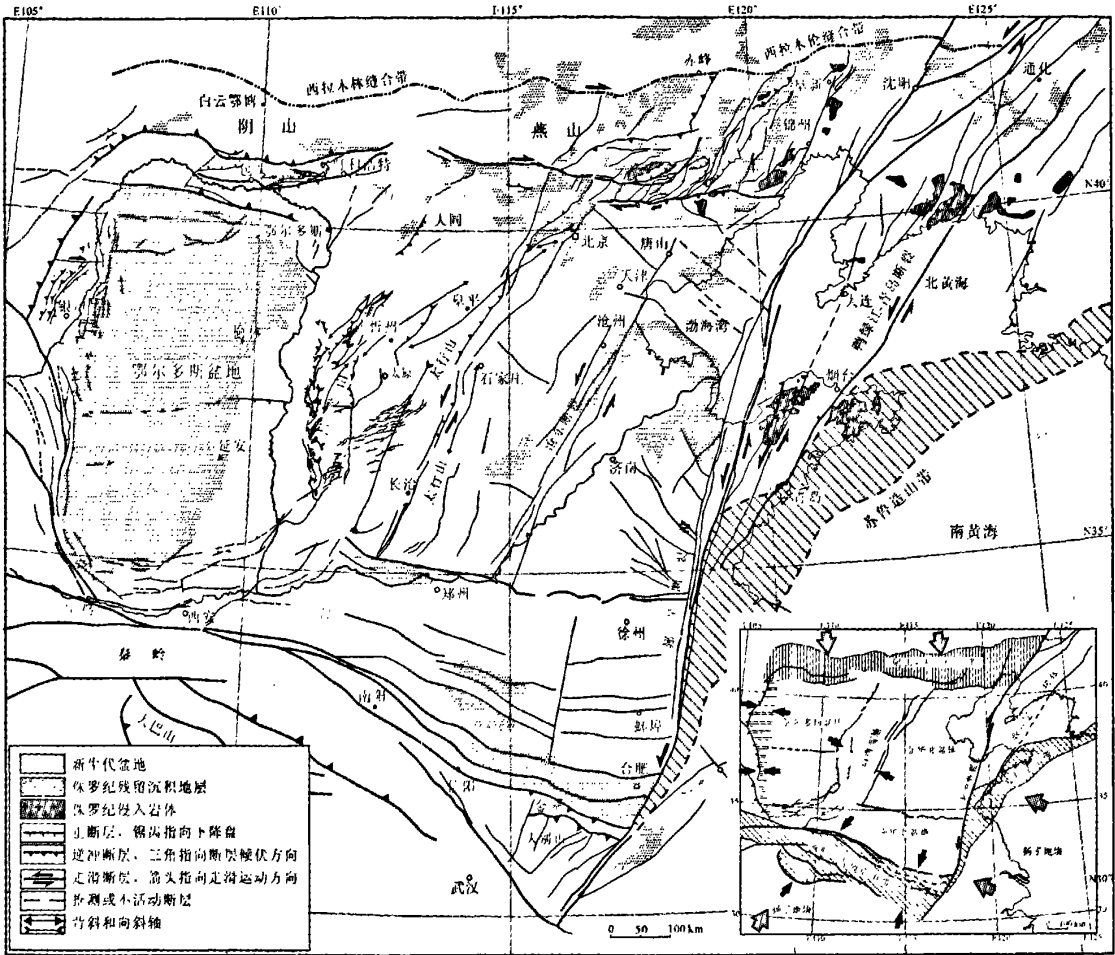


图 7 华北侏罗纪构造纲要图  
Fig. 7 Outline map of Jurassic tectonics of North China  
右下角插图:华北侏罗纪主要构造单元与多向挤压

冲有关,正是大洋板块的低角度俯冲作用,在东亚大陆边缘形成了安底斯型的陆弧构造,地壳和岩石圈发生强烈的挤压增厚,郯庐断裂系不仅发生逆冲变形,同时兼具左旋走滑活动。以郯庐断裂带为界,以东和以西地区的郯庐断裂系存在明显的差别。以东地区,大型断裂发育,如鸭绿江—青岛断裂,斜切整个中国东部地区,且变形强烈,地壳增厚作用明显。在胶东—辽东半岛地区,有大量晚侏罗世 S 型花岗岩发育,如胶北隆起区的玲珑岩体、昆侖山岩体,辽东半岛丹东地区的黑沟岩体等,它们是典型的大陆地壳增厚发生的地壳深融作用的产物。位于郯庐断裂以西的广大地区,以地壳型断裂为主,有的切割了

巨型秦岭、阴山纬向构造带,但多数断裂构造受到纬向构造带的制约,限于华北地台内部,或与纬向构造带联合,山西台褶带便是典型的例子。

3.2 早白垩世伸展裂谷作用与岩浆活动:郯庐古裂谷系的形成与中国东部岩石圈减薄

自早白垩世早期(约 135 Ma)以来,中国东部构造应力体制再次发生重大变化,引张应力场占据主导地位,大陆地壳和岩石圈发生伸展变形<sup>[1]</sup>,沿郯庐断裂带及其两侧地区发生广泛的裂陷作用,形成裂陷盆地,古郯庐裂谷系由此形成。古郯庐裂谷系最早由许志琴<sup>[2]</sup>提出,并进行了详细的论述和对比研究工作。古郯庐裂谷系涵盖了郯庐断裂带发育的白垩

纪与新生代形成的裂谷盆地,自北到南有:伊兰-伊通裂谷、密山-敦化裂谷、下辽河-渤海湾裂谷、沂沭裂谷、苏皖裂谷等,包括 2 类伸展断陷盆地:一类是受郯庐断裂带直接控制的裂谷盆地,如沂沭裂谷系、沿敦化-密山断裂带发育的断陷小盆地、沿伊兰-伊通断裂带发育的断陷盆地;另一类为沿断裂带两侧发育的、呈树枝状展布的裂谷盆地,如胶莱盆地、鲁西断陷盆地群、北黄海盆地、合肥盆地等<sup>[3]</sup>。

胶莱盆地和沂沭裂谷系是发育在郯庐断裂带中段典型的白垩纪断陷盆地。构造地层学和构造应力场分析结果表明<sup>[4-6]</sup>,该盆地早白垩世经历了 2 个伸展阶段(表 1):早期阶段(135~120 Ma)伸展方向为 NW—SE 向,它控制了胶莱盆地中莱阳群的河湖相沉积,地壳伸展导致的正断作用和快速沉降主要沿着苏鲁造山带发展,构造线方向为 NE—SW 向,

这个伸展阶段的火山作用相对较弱。晚期阶段(120~100Ma)伸展方向转为 WE 向,伸展作用表现为狭窄裂谷的模式;正断层、快速沉降和双峰式火山作用集中于平行郯庐带的断裂构造带中,两堑夹一垒的沂沭裂谷系、东北地区的伊兰-伊通裂谷带和密山-敦化裂谷带就在这个阶段形成。

对应于早白垩世的 2 期伸展作用,在胶东地区相继发生了 2 期岩浆侵入活动:早期(郭家岭期)年龄在 125~135 Ma 之间,沿郯庐断裂带两侧均有出露,如张八岭隆起、胶北隆起、辽东半岛、鲁西地块等;晚期(崂山期)年龄在 125~105Ma 之间,大量分布在郯庐断裂以东的胶东地区和辽东地区,伴随这期岩浆活动有大量岩脉发育,岩脉总体走向 N30°E,与郯庐断裂带平行,与早白垩世晚期的伸展应力方向近垂直,岩脉形成时代约为 120 Ma,与胶东地区金

表 1 郯庐断裂中段胶莱盆地及其邻区沉积-构造演化序列

Table 1 Tectono-sedimentary evolution sequence in the Jiaolai basin and contiguous areas in the central segment of the Tan-Lu fault zone

年龄 /Ma	地 层			盆地沉积记录			成盆阶段 与原型特征	裂陷旋回与 构造反转事件	构造应力方向
	系	统	阶	沂沭裂谷 莱州湾盆地	胶莱盆地	北黄海盆地			
45	古近系	始新统						挤压反转事件	
50									
55		古新统	坦尼特阶 塞兰特阶 丹尼阶					NNE向断层右旋走滑活动,拉分盆地张开	
60									
65	白垩系	上白垩统	马斯特里赫特阶				车轴山断层的右旋走滑拉分作用阶段,红土崖期拉分盆地形成		
70			坎潘阶						
80			二叠阶						
90			康尼亚克阶						
95			土伦阶				NW-SE向挤压,郯庐断裂左旋走滑活动,断陷盆地构造反转		
100			塞诺曼阶						
110		下白垩统	阿尔布阶				裂谷作用与大规模火山作用	郯庐断裂带左旋走滑作用	
120			阿普特阶						
130			巴雷姆阶						
140			欧特里大阶						
150			凡来吟阶						
160			贝利阿斯阶						
170	侏罗系	上侏罗统	提塘阶				莱阳期断陷盆地成盆阶段	晚侏罗世挤压,陆内变形作用	
180			基末利阶						
190			牛津阶						
200			卡洛夫阶						



矿床的成矿时期大致同时<sup>[97-99]</sup>。

有些研究者将郯庐断裂带及其两侧发育的早白垩世盆地看作是拉分盆地<sup>[100-101]</sup>, 与郯庐断裂带的左旋走滑活动有关。根据笔者的研究, 郯庐断裂带乃至整个东亚陆缘地区在早白垩世(135 Ma 以来)处于强烈的伸展应力场体制之下, 裂陷作用沿郯庐断裂带及其两侧地区最为强烈, 并影响到整个华北和东北地区<sup>[9]</sup>。沿郯庐断裂带发育的侵入岩体是整个华北地区广泛发育的岩浆作用的组成部分。因此, 这个时期, 华北东部地区早期增厚的地壳发生重力垮塌, 岩石圈发生强烈的薄化, 软流圈物质上涌, 沿郯庐断裂带及其两侧形成 NNE 向展布的巨型陆内裂谷带。

早白垩世末期(90 Ma $\pm$ 5 Ma), 一次区域性的挤压事件(NW—SE 向挤压)导致早白垩世裂谷盆地的挤压变形和盆地轻微反转, 靠近断裂带的地方变形强烈, 地层近直立。沿沂沭裂谷带, 早白垩世地层发生褶皱, 其上被晚白垩世王氏组地层不整合超覆<sup>[99]</sup>。在东北地区沿依舒断裂带盆地反转很强烈, 早白垩世地层大量被剥蚀而缺失<sup>[9]</sup>。这次挤压事件沿郯庐断裂带有广泛的变形记录<sup>[6-7]</sup>, 但其持续的时间相对较短, 可以看作是郯庐断裂带晚中生代构造演化中的一个小插曲。

### 3.3 晚白垩世—古新世右旋走滑活动、拉分盆地形成和幔源火山活动

晚白垩世郯庐断裂进入了一个新的构造演化时期。对于晚白垩世郯庐断裂带的运动性质和转换时代, 笔者及同事们<sup>[94-96, 102]</sup>通过对沂沭裂谷系和胶莱盆地的构造变形和古应力反演, 认为在晚白垩世(相当于胶莱盆地内王氏组沉积时期), 郯庐断裂带及相关的断裂, 如牟—即断裂, 以右旋走滑活动为主, 盆地内的应力机制为近 NS 向的伸展机制, 这种伸展控制了胶莱盆地近 EW 向的拉分断陷盆地的发育(表 1)。沿郯庐断裂带本身右旋拉分作用很显著, 沿断裂带及其两侧发育一系列拉分盆地。在莱州湾, 右旋拉分作用控制了王氏组和孔店组的沉积, 其中有基性火山岩侵入; 在胶东地区, 郯庐断裂带和牟—即断裂带的右旋拉分作用联合控制了胶莱盆地近东西向的正断层作用和断陷盆地内王氏组、金岗口组的沉积; 在安徽地区郯庐带南段控制了张桥组的沉积。沿鸭绿江—青岛断裂带的右旋伸展活动控制了局部地区拉分盆地的发育。这期右旋走滑拉分作用影响

到上地幔, 沿安丘—直县裂谷带发育大量的基性、超基性岩脉, 它们沿近东西向的裂隙灌入; 在胶莱盆地形成幔源性、超基性岩脉。在胶东地区, 胶县大王庄的橄榄玄武岩  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄为 73.5 Ma<sup>[103]</sup>, 属于晚白垩世。在东北地区, 沿伊兰—伊通、敦化—密山断裂带, 右旋走滑活动控制了一系列拉分盆地的发育, 盆地中充填了晚白垩世—古近纪沉积。这个过程持续到古新世时期。在拉分盆地中, 晚白垩世沉积与古新世沉积是基本连续的。在胶莱盆地的高密凹陷和莱阳凹陷中, 胶州组和金岗口组的时代属于古新世, 与下伏王氏组为整合接触, 说明沿沂沭断裂带和胶莱盆地, 晚白垩世和古新世之间没有发生重要的构造运动。

古新世末期或始新世初期, 中国东部地区又发生了一次区域性挤压变形, 这次变形结束了晚白垩世—古新世的伸展断陷过程, 使盆地发生构造反转, 整个华北地区处于隆升剥蚀状态。这次构造事件在华北盆地中有良好的地层记录, 表现为沙河街组与孔店组之间的地层不整合面<sup>[104]</sup>, 有些研究者将此不整合面命名为“济阳运动”。根据对白垩系地层断层滑动矢量的测量和古构造应力的反演结果, 这次挤压应力方向为 NE—SW 向, 郯庐断裂系发生右旋走滑活动。

## 4 讨论与结论

图 8 总结了郯庐断裂带在不同时期的演化阶段。由图 8 可以看出, 郯庐断裂是一条长寿断裂, 在不同的构造运动时期或同一构造运动时期的不同阶段、同一阶段的不同地段, 其大地构造属性、运动性质和运动方向是变化的, 它的运动学演变历史记录了华东北部乃至中国东部地区中生代的构造演化。

(1) 关于古郯庐断裂带。在三叠纪碰撞造山作用之前, 郯庐断裂带可能已经存在, 并发生强烈的剪切变形。笔者将发生在华北陆块内部的前三叠纪形成的郯庐断裂通称为古郯庐断裂。目前对古郯庐断裂的运动学历史知之甚少, 只在其中段的沂沭地区出露的基底韧性剪切带中获得了前寒武纪剪切变形的地层学和年代学证据。张家声<sup>[105]</sup>最早研究了沂沭裂谷系的贡旦山地垒中发现的前寒武纪基底韧性剪切带, 推断这是一条古老的断裂。周建波等<sup>[106-107]</sup>通过 1:5 万区域地质填图, 对贡旦山地垒中的基底剪切带

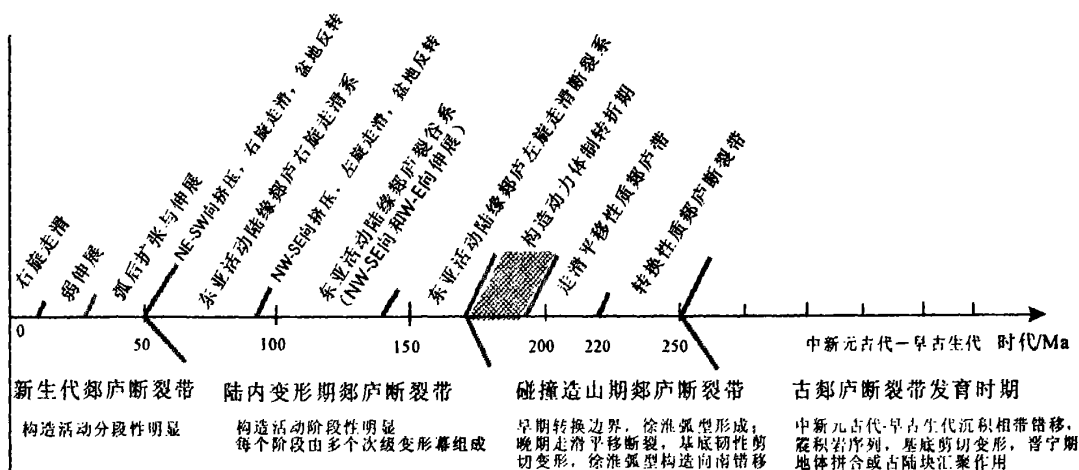


图 8 郯庐断裂带构造演化阶段划分示意图

Fig. 8 Diagram showing the stages of the tectonic evolution of the Tan-Lu fault zone

进行了较详细的野外观察和分析,根据地层的接触关系和糜棱岩的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素测试分析,认为该剪切带以左旋走滑剪切变形为主,形成于941 Ma之前的晋宁构造期。乔秀夫等<sup>[108-110]</sup>对华北地区震旦纪—早古生代地层中典型的古地震灾变事件的震积岩序列进行了研究,获得了丰富的有关古郯庐断裂带活动的信息,认为郯庐断裂带在中新元古代至早古生代时期是一条非常活跃的古地震—构造带,其出现与元古宙超大陆形成之前的陆块汇聚有关。本文的分析结果表明,郯庐断裂带两侧华北陆块内的元古宙—早古生代沉积相带和东西向构造带的左行错位关系主要形成于三叠纪华北与扬子陆—陆碰撞造山之前的古郯庐构造发展时期,但具体构造演化历史有待深入研究。

(2)三叠纪至早侏罗世早期相当于印支运动时期,郯庐断裂带运动学演化经历了“两阶段”。沿郯庐断裂带两侧发育的基底韧性走滑剪切带的几何学、运动学和构造年代学的研究结果充分表明,该断裂带在三叠纪华南—华北地块拼合和大陆深俯冲作用时期,表现为一条转换边界,而不是斜向碰撞边界。碰撞造山期该边界经历了从早期转换性质演变为晚期平移性质的过程。发育于断裂带西侧、向西凸出的徐淮弧形逆冲构造带是该断裂同碰撞期运动的独特记录。该弧形带形成于扬子陆块向华北地块之下的深俯冲阶段(240~220 Ma),大陆的深俯冲作用和相继的构造折返不仅导致超高压变质带的形成,同时

使苏鲁变质带向北西西方向构造韧性挤出,挤出的结果导致徐淮弧形逆冲构造带的形成,也将超高压变质带的物质侧向“流入”到徐淮弧形构造带之下的华北地块中,并通过早侏罗世和早白垩世地壳深溶作用被带到地表。从而较合理地解释了为什么会在徐淮构造弧地带发现三叠纪含榴辉岩捕虏体<sup>[7]</sup>。如果这种解释是正确的话,那么可以进一步推断,在扬子陆块向华北地块之下深俯冲和相继的构造折返阶段,郯庐断裂带作为一条具有转换性质的走滑边界,其向北延伸的范围没有超越苏鲁超高压变质带。可以说,狭义的郯庐断裂带的范畴对应于这个时期形成的具有转换性质的走滑边界断裂。

郯庐断裂在碰撞造山作用的晚期阶段(220~190 Ma)因扬子陆块持续的作用而向北扩展,广义的郯庐断裂带即在这个阶段贯穿整个华北与东北地区,基底韧性剪切带主要记录了这个阶段的走滑变形,沿断裂带的左旋走滑量在华北和东北地区具有同一数量级。在华北地区,该阶段是一个岩浆活动平静期,大部分地区处于隆升剥蚀状态。郯庐断裂带的左旋走滑运动使早期阶段形成的徐淮弧形构造带向南错移,错距约145 km;在华北北缘,将公认的中朝板块北缘的缝合带切割成东西2段,视平移距离达到150 km<sup>[7]</sup>。在东北地区,左旋走滑活动主要发生于敦化—密山断裂带,王凯红等<sup>[9]</sup>报道了在敦—密断裂带青茶馆附近发育的糜棱岩 K-Ar 年龄为183 Ma。郭孟习等<sup>[111]</sup>认为沿敦化—密山断裂发生

的左旋走滑运动使古吉黑造山带发生约 100 km 的左行错移, 开原—桦甸一带重磁梯度带的强烈左行扭折达 150 km。李碧乐等<sup>[14]</sup>提出敦—密断裂左旋平移距离约在 150~240 km 之间。值得指出的是, 这个走滑位移量并没有影响到大别山以南的扬子前陆褶皱构造带, 表明该断裂走滑运动终止于大别山的东侧, 郯庐断裂西侧所发生的左旋走滑位移量被大别山以北的地壳逆冲推覆构造所吸收。

(3) 侏罗纪至古新世是燕山运动时期, 这个时期郯庐断裂带的演化经历了从挤压到伸展到右旋拉分作用“三阶段”的演化历史。

①中、晚侏罗世期间, 郯庐断裂带作为东亚大陆东缘一条重要的岩石圈不连续带, 其运动学过程主要与太平洋板块向东亚大陆之下俯冲的过程紧密相关, 同时与华北北部的燕山构造带、南部秦岭—大别山构造带的多向陆内造山作用息息相关。这个时期周邻板块从不同方向向东亚大陆的汇聚, 主导了郯庐断裂带复杂的变形历史。郯庐断裂带总体表现为挤压走滑性质, 在大别山东缘发育的基底韧性剪切带有良好的记录。这个时期走滑变形具有弥散特征, 与郯庐断裂系的发育、华北东部地区地壳和岩石圈的显著增厚、陆缘弧的发育密切地联系在一起。由于缺乏可靠的地质不变点, 郯庐断裂带的走滑位移量尚难以确定。

②早白垩世期间, 郯庐断裂带经历了从早白垩世(135~100 Ma)以伸展裂陷作用为主、至早白垩世晚期(100~90 Ma)转换为以挤压走滑为主、再到晚白垩世—古新世以右旋走滑拉分作用为主的运动学转换历史, 这种运动学转换记录了东亚陆缘构造边界条件和深部动力过程的变化。研究结果表明, 早白垩世沿郯庐断裂带裂陷盆地的形成、发育与华北东部增厚的克拉通岩石圈垮塌、减薄过程紧密地联系在一起, 尽管对岩石圈减薄的机理还存在不同的认识和理解, 并成为近年来中国东部大地构造研究中的热点主题之一。迄今所提出的岩石圈减薄动力学模型大致可归为下列 2 类: 一种为机械(物理)减薄, 主要通过岩石圈内部因比重差异而发生的拆沉作用<sup>[112]</sup>或去根作用<sup>[113]</sup>, 或三叠纪陆—陆碰撞和晚侏罗世陆内造山导致岩石圈增厚而发生的重力垮塌<sup>[114~115]</sup>; 另一种为岩石圈地幔的热—化学侵蚀减薄, 主要受控于太平洋板块向亚洲大陆之下俯冲诱发的地幔对流或弧后扩张伸展作用<sup>[9], 116~117</sup>。晚中生代岩

浆和成矿作用的高精度同位素年代学测试数据显示, 减薄的峰期是早白垩世(130~100 Ma)<sup>[98, 117~119]</sup>。郯庐断裂带在这个岩石圈减薄的过程中起着重要的作用。作为东亚陆缘一条重要的岩石圈破裂带, 郯庐断裂带成为岩石圈薄化和软流圈上涌的中心地带, 沿该带及其两侧地壳厚度最薄、软流圈最浅, 不仅有中基性火山岩发育, 也有基性火山岩发育。发生在早白垩世晚期的挤压走滑事件, 可以看作是华北东部地区白垩纪伸展构造变形历史中的一个“小插曲”, 反映了大洋俯冲板块边界力作用在大陆内部引起的挤压走滑变形。

③晚白垩世—古新世期间(90~45 Ma), 郯庐断裂右旋走滑与拉分作用标志着东亚陆缘构造演化进入了新的演化阶段。根据太平洋板内海底火山链和年代学的记录, 这个时期太平洋板块向 NNW 方向运动, 这种运动必然沿东亚陆缘产生一个左旋走滑运动分量。但郯庐断裂带的运动学分析结果告诉我们, 这个时期东亚陆缘以右旋走滑伸展变形占主导地位, 出现这种运动学不一致性的机制尚不是很清楚, 是今后对郯庐断裂的研究中值得关注的一个科学问题。

致谢: 在酝酿和成文过程中, 与石油大学漆家福教授、合肥工业大学朱光教授和南京大学舒良树教授、贾东教授等进行了有益的讨论, 胡博同学参加了部分年代学数据资料的整理, 在此谨致以衷心的感谢!

#### 参考文献:

- [1] 王小凤, 李中坚, 陈柏林, 等. 郯庐断裂带[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [2] 漆家福, 杨桥, 陆克政, 等. 渤海湾盆地基岩地质图及其所包含的构造运动信息[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 300~307.
- [3] 张庆龙, 王良书, 解国爱, 等. 郯庐断裂带北延及中生代构造体制转换问题的探讨[J]. 高校地质学报, 2005, (4): 577~584.
- [4] 李碧乐, 孙丰月, 姚凤良. 中生代敦化—密山断裂大规模左旋平移及其对金矿床形成的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26(4): 390~395.
- [5] 王凯红, 纪春华, 王秀萍. 敦密断裂带的地质特征及演化[J]. 吉林地质, 2004, 23(4): 23~27.
- [6] 陈宜华, 王小凤, 张青, 等. 郯庐断裂带形成演化的年代学研究[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(3): 215~220.
- [7] 窦立荣, 宋建国, 王瑜. 郯庐断裂带北段形成的年代学及其意义[J]. 地质论评, 1996, 42(6): 508~512.
- [8] 朱光, 宋传中, 王道轩, 等. 郯庐断裂带走滑时代的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代学研究及其构造意义[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(3): 250~256.
- [9] Zhu G, Wang Y S, Liu G S, et al.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of strike-slip mo-

- tion on the Tan-Lu fault zone, East China[J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27: 1379-1398.
- [10] 滕吉文, 闫雅芬, 王光杰, 等. 大别造山带与郑庐断裂带壳、幔结构和陆内“俯冲”的耦合效应[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(2): 449-457.
- [11] Cong B L, Zhai M G, Carswell D A, et al. Petrogenesis of the ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabieshan, central China[J]. *European Journal of Mineralogy*, 1995, 7: 119-138.
- [12] Dong S W, Gao R, Cong B, et al. Crustal structure of the southern Dabie ultrahigh-pressure orogeny and Yangtze foreland from deep seismic reflection profiling[J]. *Terra Nova*, 2004, 16 (6): 319-324.
- [13] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh pressure Qinling-Dabie orogen, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161: 215-230.
- [14] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B6): 13339-13364.
- [15] 李曙光, 刘德良, 陈移之, 等. 大别山南麓含柯石英石榴辉岩的 Sm-Nd 同位素年龄[J]. *科学通报*, 1992, (4): 346-349.
- [16] Li S G, Li H M, Chen Y Z, et al. Chronology of ultrahigh pressure metamorphism of the Dabieshan-Sulu terrain-zircon U-Pb isotopic system[J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 27 (3): 200-206.
- [17] Liou J G, Zhang R Y, Wang X M, et al. Metamorphism and tectonics of high-p and ultrahigh-p belts in the Dabie-Sulu region, eastern central China [M]//Harrison M T, Yin A. *Tectonic Department of Asia*. London: Cambridge University Press, 1996: 300-344.
- [18] Liou J G, Banno W, Ernst W G. Ultrahigh-pressure metamorphism and tectonics[J]. *The Island Arc*, 1995, 4: 233-383.
- [19] Okay A I, Sengor A M C. Evidence for intracontinental thrust related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China[J]. *Geology*, 1992, 20: 411-414.
- [20] Okay A I, Sengor A M C, Satir M. Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrain: The Dabie Shan/Tongbai Shan orogen, China[J]. *Tectonics*, 1993, 12: 1320-1334.
- [21] Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, et al. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault zone[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B6): 13303-13338.
- [22] Rowley D B, Xue F, Tucker R D, et al. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 151: 191-203.
- [23] Wang Q C, Cong B L. Tectonic implication of UHP rocks from the Dabie Mountains[J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 39: 311-318.
- [24] Wang Q C, Cong B L. Exhumation of UHP terranes: a case study from the Dabie Mountains, eastern China[J]. *International Geology Review*, 1999, 41: 994-1004.
- [25] Wang X M, Liou J G, Mao H K. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China[J]. *Geology*, 1989, 17: 1085-1088.
- [26] 许志琴. 陆内俯冲及滑脱构造——以我国几个山链的地壳变形研究为例[J]. *地质论评*, 1986, 32 (1): 79-88.
- [27] 许志琴. 扬子板块北缘的大型深层滑脱构造及动力学分析[J]. *中国区域地质*, 1987, (4): 289-300.
- [28] 许志琴, 张建新, 徐惠芬, 等. 中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-282.
- [29] Xu S T, Okay A I, Ji S, et al. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting [J]. *Science*, 1992, 256: 80-82.
- [30] Yang W C. Geophysical profiling across the Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, eastern China[J]. *Tectonophysics*, 2002, 354: 277-288.
- [31] 徐嘉炜, 朱光. 中国东部郑庐断裂带构造模式讨论[J]. *华北地质矿产杂志*, 1995, 10(2): 121-134.
- [32] 朱光, 刘国生, 牛漫兰, 等. 郑庐断裂带的平移运动与成因[J]. *地质通报*, 2003, 22(3): 200-207.
- [33] 朱光, 王勇生, 牛漫兰, 等. 郑庐断裂带的同造山运动[J]. *地质前缘*, 2004, 11(3): 169-182.
- [34] 王勇生, 朱光. 大别山东缘郑庐断裂带早期韧性剪切带的形成温度[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2004, 27(8): 855-859.
- [35] 王勇生, 朱光, 王道轩, 等. 大别山东缘郑庐两期走滑剪切带形成的温压条件与造山带折返的关系[J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(3): 228-238.
- [36] 宋传中, 朱光, 刘洋, 等. 郑庐断裂带肥东韧性剪切带的变形规律、同位素年龄及其构造意义[J]. *地质论评*, 2003, 49(1): 10-17.
- [37] 胡博, 张岳桥. 安徽张八岭隆起东缘基底走滑韧性剪切带的发现及其构造意义[J]. *地质通报*, 2007, 26(3): 256-265.
- [38] 朱光, 刘国生, Dunlap W J, 等. 郑庐断裂带同造山走滑运动的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代学证据[J]. *科学通报*, 2004, 49(2): 190-198.
- [39] 朱光, 谢成龙, 王勇生, 等. 郑庐高压走滑韧性剪切带特征及其  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  定年[J]. *岩石学报*, 2005, 21(6): 1687-1702.
- [40] 徐树桐, 陈冠宝, 周海洲, 等. 徐-淮推覆体[J]. *科学通报*, 1987, 32(14): 1091-1095.
- [41] 徐树桐, 陶正, 陈冠宝. 再论徐(州)—淮(南)推覆体[J]. *地质论评*, 1993, 39(5): 395-403.
- [42] 周进高, 赵宗举, 邓红婴. 合肥盆地构造演化及其含油气性分析[J]. *地质学报*, 1999, 3(1): 15-23.
- [43] 赵宗举, 杨树锋, 陈汉林, 等. 合肥盆地基底构造属性[J]. *地质科学*, 2000, 35(3): 288-296.
- [44] 王勇生, 朱光, 宋传中, 等. 郑庐断裂带南段晚期韧性剪切带温度分析及其构造意义[J]. *地质论评*, 2006, 52(5): 591-600.
- [45] 刘德良, 杨晓勇, 杨海涛, 等. 郑庐断裂带南段辉绿山韧性剪切带糜棱岩的变形条件和组分迁移[J]. *岩石学报*, 1996, 12(4): 573-588.
- [46] 刘德良, 曹高社, 李振生, 等. 郑庐断裂带南段主断裂韧性剪切带形成历时时限的探索[J]. *地质前缘*, 2002, 9(2): 475-482.
- [47] Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, et al. New constraints on the structure, thermochronology and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106:

- , 6683-6732.
- [48] Wang Y. The onset of the Tan-Lu fault movement in eastern China: constraints from zircon (SHRIMP) and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating [J]. *Terra Nova*, 2006, 18(6): 423-431.
- [49] 林景仟, 谭东娟, 厉建华, 等. 华北陆块南缘带早侏罗世徐州斑并侵入杂岩体 [J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(3): 209-214.
- [50] Xu W L, Wang D Y, Liu X C, et al. Discovery of eclogite inclusions and its geological significance in early Jurassic intrusive complex in Xuzhou, northern Anhui, eastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(14): 1212-1217.
- [51] Chang E Z. Collisional orogene between north and south China and its eastern extension in the Korean Peninsula [J]. *Journal of South-east Asian Earth Sciences*, 1996, 13 (3): 267-277.
- [52] Gilder S A, Leloup P H, Courtillot V, et al. Tectonic evolution of the Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) fault via middle Triassic to Early Cenozoic paleomagnetic data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B7): 15365-15390.
- [53] Li Z X. Collision between the north and south blocks: A crust-detachment model for suturing in the region east of the Tan-Lu fault [J]. *Geology*, 1994, 22: 739-742.
- [54] Lin J L, Fuller M. Palaeomagnetism, North China and South China collision, and the Tan-Lu fault [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series a, Mathematical and Physical Science*, 1990, 331 (1620): 589-598.
- [55] Wang E C, Meng Q R, Burchfiel B C, et al. Mesozoic large-scale lateral extrusion, rotation, and uplift of the Tongbai-Dabie Shan belt in east China [J]. *Geology*, 2003, 31(4): 307-310.
- [56] Wang X F, Li Z J, Chen B L, et al. Formation and evolution of the Tan-Lu strike-slip fault system and its geological significance [C]// Zheng Y Z. *Proceedings of 30th International Geological Congress*, Geological Publishing House, Beijing, 1998: 176-196.
- [57] 肖文交, 周桃秀, 杨振宇, 等. 大别-郯庐-苏鲁造山带复合旋转折贴作用 [J]. 地球科学进展, 2000, 15(2): 147-153.
- [58] Yin A, Nie S Y. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault system, eastern Asia [J]. *Tectonics*, 1993, 12 (4): 801-813.
- [59] Zhang K J. North and south China collision along the eastern and southern north China margins [J]. *Tectonophysics*, 1997, 270: 145-156.
- [60] 乔秀夫. 对郯-庐断裂巨大平移之质疑 [J]. 地质论评, 1981, 27(3): 222-223.
- [61] 汤加富, 许卫. 郯庐断裂带南段并无巨大平移 [J]. 地质论评, 2002, 48(5): 449-456.
- [62] 汤加富, 李怀坤, 姜清. 郯庐断裂南段研究进展与断裂性质讨论 [J]. 地质通报, 2003, 22(6): 426-436.
- [63] Zhao X X, Robert S C. Palaeomagnetic constraints on the collision and rotation of North and South China [J]. *Nature*, 1987, 327(14): 141-144.
- [64] 朱光, 王勇生, 王道轩, 等. 前陆沉积与变形对郯庐断裂带同造山运动的制约 [J]. 地质科学, 2006, 41(1): 102-121.
- [65] 王桂梁, 姜波, 曹代勇, 等. 徐州-宿州弧形双冲叠-瓦扇逆冲断层系统 [J]. 地质学报, 1998, 72(3): 228-236.
- [66] 舒良树, 吴俊奇, Brewer R C. 徐州-宿州地区平衡剖面研究 [J]. 中国区域地质, 1996, (4): 373-378.
- [67] Xu W L, Wang Q H, Yang D B, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating in Jingshan "migmatitic granite", Bengbu and its geological significance [J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48: 185-191.
- [68] 林景仟, 谭东娟, 金焯. 鲁西地区中生代火成活动的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄 [J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(3): 213-220.
- [69] 许文良, 王冬艳, 王清海, 等. 华北地块中东部中生代侵入杂岩中角闪石和黑云母的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年: 对岩石圈减薄时间的制约 [J]. 地球化学, 2004, 33(3): 221-231.
- [70] Faure M, Lin W, Scharer U, et al. Continental subduction and exhumation of UHP rocks: Structural and geochronological insights from the Dabie Shan (east China) [J]. *Lithos*, 2003, 70: 213-241.
- [71] Xu W L, Gao S, Wang Q H, et al. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China Craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications [J]. *Geology*, 2006, 34(9): 721-724.
- [72] Dong S W, Chen J F, Huang D Z. Differential exhumation of tectonic units and ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie Mountain, China [J]. *The Islands Arc*, 1998, 7: 174-183.
- [73] 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制 [J]. 地质学报, 2003, 77 (4): 433-452.
- [74] 刘福来, 许志琴, 宋彪. 苏鲁地体超高压和退变质时代的厘定: 来自片麻岩锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年的证据 [J]. 地质学报, 2003, 77(2): 229-239.
- [75] Webb L E, Hacker B R, Ratschbacher L, et al. Thermochronologic constraints on deformation and cooling history of high and ultrahigh-pressure rocks in the Qinling-Dabie orogen, eastern China [J]. *Tectonics*, 1999, 18: 621-637.
- [76] Xu J W, Zhu G, Tong W X, et al. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: a major shear system to the north of the Pacific Ocean [J]. *Tectonophysics*, 1987, 134: 273-310.
- [77] Xu J W, Ma G F, Tong W X, et al. Displacement of the Tancheng-Lujiang wrench fault system and its geodynamic setting in the northwestern circum-Pacific [C]// Xu J W. *The Tancheng-Lujiang Wrench Fault System*, Wiley, Chichester, UK, 1993, 51-76.
- [78] Xu J W, Zhu G. Tectonic models of the Tan-Lu fault zone, eastern China [J]. *International Geology Review*, 1994, 36: 771-784.
- [79] 张岳桥, 廖昌珍, 施伟, 等. 论鄂尔多斯盆地及其周缘侏罗纪变形 [J]. 地学前缘, 2007, 14(2): 182-196.
- [80] 张岳桥, 董树文, 赵越, 等. 华北侏罗纪大地构造: 综述与新认识 [J]. 地质学报, 2007, (11): 1462-1480.
- [81] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释 [J]. 地质学报, 2007, (11), 1449-1461.
- [82] 万天丰, 朱鸿. 郯庐断裂带的最大左行走滑断距及其形成时期 [J]. 高校地质学报, 1996, 2(1): 14-27.
- [83] 杨进辉, 吴福元, 罗清华, 等. 辽宁丹东地区侏罗纪花岗岩变形  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年代学制约 [J]. 岩石学报, 2004, 20(5): 1205-1214.
- [84] 李三忠, 刘建中, 赵国春, 等. 华北克拉通东部地块中生代变形的关

- 键时限及其对构造的制约——以胶辽地区为例[J].岩石学报,2004,20(3):633-646.
- [85]叶慧文,张兴洲,周裕文.牡丹江地区蓝片岩中脉状青铝闪石<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar年龄及其地质意义[J].长春地质学院学报,1994,24(4):369-372.
- [86]苗来成,罗镇宽,关康,等.玲珑花岗岩中锆石的离子质谱U-Pb年龄及其岩石学意义[J].岩石学报,1998,14(2):198-206.
- [87]关康,罗镇宽,苗来成,等.胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究[J].地质科学,1998,33(3):318-328.
- [88]郭敬辉,陈福坤,张小曼,等.苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞—碰撞后构造过程:锆石 U-Pb 年代学[J].岩石学报,2005,21(4):1281-1301.
- [89]张田,张岳桥.胶东半岛中生代侵入岩浆活动序列及其构造制约[J].高校地质学报,2007,13(2):323-336.
- [90]董树文,胡健民,高锐,等.大别山造山带侏罗纪变形及其意义[J].岩石学报,2005,21(4):1189-1194.
- [91]Ren J Y, Tamaki K, Li Sitian, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas [J]. Tectonophysics, 2002, 344:175-205.
- [92]许志琴.郯庐裂谷系概述[M].北京:地质出版社,1984:39-46.
- [93]张岳桥,赵越,董树文,等.中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段[J].地质学前沿,2004,11(3):123-133.
- [94]Zhang Y, Dong S, Shi W. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, eastern China [J]. Tectonophysics, 2003, 363: 243-258.
- [95]张岳桥,李金良,张田,等.胶东半岛阜平—即墨断裂带晚中生代运动学转换历史[J].地质评论,2007,53(3):289-300.
- [96]张岳桥,李金良,张田,等.胶莱盆地及其邻区白垩纪—古新世沉积构造演化历史及其区域动力学意义[J].地质学报,2008(送审中).
- [97]杨进辉,周新华,陈立辉.胶东地区破碎带蚀变岩型金矿时代的测定及其地质意义[J].岩石学报,2000,16(3):454-458.
- [98]Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Wilde S A. Geodynamic setting of large scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: an association with lithospheric thinning [J]. Ore Geology Review, 2003, 23: 125-152.
- [99]Zhang Lianchang, Shen Yuanchao, Liu Tiebing, et al. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar and Rb-Sr isochron dating of the gold deposits on northern margin of the Jiaolai basin, Shandong, China [J]. Science in China (Series D), 2003, 46(7): 708-718.
- [100]周建波,胡克,申宁华,等.郯庐断裂带中段石场—中楼拉分盆地的确定[J].地质科学,1999,34(1):18-28.
- [101]周建波,程日辉,刘建辉.郯庐断裂带中段管帅拉分盆地的确定及其构造意义[J].地质科学,2005,40(4):486-498.
- [102]施炜,张岳桥,董树文,等.山东胶莱盆地构造变形及形成演化——以王氏群和大盛群变形分析为例[J].地质通报,2003,22(5):325-334.
- [103]闫峻,陈江峰,谢智,等.鲁东晚白垩世玄武岩中的幔源捕虏体:对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据[J].科学通报,2003,48(14):1570-1574.
- [104]任建业.渤海湾盆地东营凹陷 S6' 界面的构造变革意义[J].地球科学,2004,29(1):69-76.
- [105]张家声.沂沭断裂带中段基底韧性剪切带[J].地震地质,1983,(4):293-303.
- [106]周建波,胡克,孙家鹏.郯庐断裂中段鲁中基底韧性变形带的形成时代[J].中国区域地质,1998,17(2):163-167.
- [107]周建波,胡克.沂沭断裂带新期的构造活动及性质[J].地震地质,1998,20(3):208-212.
- [108]乔秀夫,李海兵,高林志.华北地台震旦纪—早古生代地震节律[J].地学前缘,1997,4(3/4):155-160.
- [109]乔秀夫,高林志.华北中新元古代及早古生代地震灾变事件及与 Rodinia 的关系[J].科学通报,1999,44(16):1753-1757.
- [110]乔秀夫,高林志,彭阳,等.古郯庐带沧浪铺阶地震事件、序列及其意义[J].中国科学(D 辑),2001,31(11):911-918.
- [111]郭孟习,孙伟,尹国义,等.古吉黑造山带拼接地带地球物理特征线[J].吉林地质,2001,20(1):27-34.
- [112]Gao Shan, Rudnick R L, Yuan Honglin, et al. Recycling lower continental crust in the North China Craton [J]. Nature, 2004, 432: 892-897.
- [113]Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing, et al. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: 'continental roots-plume tectonics' [J]. Earth-Science Review, 2005, 65: 223-275.
- [114]郑亚东, Davis G A, 王琮, 等.燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题[J].地质学报,2000,74(4):289-302.
- [115]Meng Qingren. What drove Late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract [J]. Tectonophysics, 2003, 369: 155-174.
- [116]Xu Yigang. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath eastern China: evidence, timing and mechanism [J]. Current Contents, Physical, Chemical & Earth Sciences Journal Subject Category, 2001, 26: 747-757.
- [117]Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233: 103-119.
- [118]Zhai Mingguo, Zhu Rixiang, Liu Jianming, et al. Time range of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China Block [J]. Science in China (Series D), 2003, 33(10): 913-920.
- [119]Zhou Xinhua, Yang Jinhui, Zhang Lianchang. Metallogenesis of superlarge gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath north China craton in Mesozoic [J]. Science in China (series D), 2002, 32 (suppl): 11-20.