

# 郯庐断裂带古新世—早始新世左旋走滑活动的反射地震证据\*

韩文功<sup>1,2</sup> 季建清<sup>1\*\*</sup> 王金铎<sup>2</sup> 于建国<sup>2</sup> 张新钰<sup>1</sup> 余绍立<sup>1</sup>

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 中国石油化工胜利油田有限公司物探研究院, 山东东营 257022

**摘要** 在渤海南部莱州湾附近, 横过郯庐断裂的反射地震剖面直接显示了郯庐断裂带的延伸、运动性质和活动时限的证据。郯庐断裂带在渤海内几何形态和断裂组合与陆上出露情况基本一致。根据切过断裂带的剖面和平面上断裂系组合特征, 判断其为兼具垂直位移的左旋走滑运动断裂系。由于断裂带活动控制了同构造沉积地层的发育, 可以确定其活动的时限相当于渤海湾盆地孔店组和沙四段沉积期, 即为古新世—早始新世期。此后, 可能由于太平洋板块的俯冲方向的改变, 引起区域性应力场的改变, 北北东向严格意义上的郯庐断裂带不再有明显的活动, 转而被北东向的右旋走滑构造活动所替代。

**关键词** 郯庐断裂带 地震反射 古新世—早始新世 左旋走滑运动 渤海湾盆地

横贯中国东部大陆, 延伸达到 2400 km 以上的郯庐断裂带被称作是世界上最大的大陆走滑断裂带<sup>[1-6]</sup>。该断裂带不仅对中国东部大地构造演化构成重要影响, 而且被认为是渤海湾盆地和松辽盆地边界断裂, 对盆地油气藏形成以及现代地震活动有直接或间接的制约, 长期以来, 一直是地学研究的热点。随着环渤海湾油气资源勘探的加强, 近年来, 作为盆地东部边界的郯庐断裂带对渤海湾盆地形成演化的制约机制成为学术界和产业界并重的科学问题。

从最初根据地磁场确定郯庐断裂带存在的半个世纪里, 围绕郯庐断裂带几何学、运动学性质、活动时限、大地构造意义以及对地震活动和油气聚集的制约研究十分活跃。目前研究者普遍认为, 郯庐断裂带经历了多阶段不同性质构造运动的转换<sup>[1-35]</sup>。在白垩世末到早第三纪时期, 郯庐断裂带是强烈影响渤海湾和松辽等油气资源盆地形成的重要构造制约因素, 但是对这一时期郯庐断裂带活动的性质却存在多种截然不同的认识。Lu 等<sup>[8]</sup>根据应力构造分析推断郯庐断裂带在  $K_2$ -E 时期是压扭性

的左旋走滑运动性质; Lin 等<sup>[24]</sup>依照郯庐断裂带中段的野外观察也认为其左旋走滑活动应该在白垩纪到新第三纪之间; 宗国洪等<sup>[25]</sup>根据济阳拗陷内与郯庐断裂带有关沉积速率和构造样式得出相似的结论。但是, 多数的研究者认为郯庐断裂带在这一时期是以拉张构造背景下正断构造性质为主, 兼具右旋走滑运动性质<sup>[16, 19, 32, 36, 37]</sup>, 进而认为是渤海湾盆地形成的原因; 王小凤等<sup>[30]</sup>还认为郯庐断裂带这一阶段为右旋平移挤压性质。由于地表覆盖, 缺乏能够提供关键性证据的研究手段, 给这一问题的解决带来了困难。

本文利用在渤海湾南部的青东地区新近获得的横切郯庐断裂带中段的石油勘探高精度反射地震剖面资料, 探讨郯庐断裂带在渤海海域内延向和活动的性质, 为揭示郯庐断裂带左旋走滑运动时限及其对盆地形成的制约提供新的资料。

## 1 研究区概况和反射地震作业

传统上, 郯庐断裂带经庐江, 过郯城向北, 在穿

2005-02-06 收稿, 2005-05-09 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40472100)

\*\* 通讯作者, E-mail: grsange@pku.edu.cn

过鲁西和鲁东隆起区之间,分为东西两支,分别由两条断裂构成,因此由东向西,依次为 $F_1-F_4$ ,其中的东支断裂 $F_1$ 是郯庐断裂的主断裂构造.反射地震研究区位于郯庐断裂带渤海段南端的莱州湾海域,济阳坳陷东侧.南部为淮北凸起,西部为青东凹陷,北部为莱州湾凹陷,东部为胶北隆起(图1).

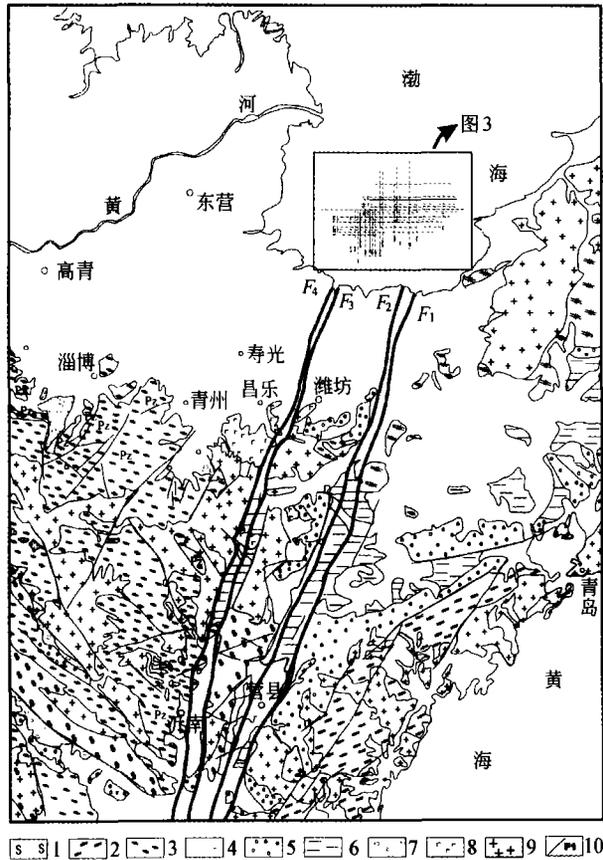


图1 郯庐断裂带在山东半岛的出露及本地震反射剖面工作开展的位置

- 1—太古界花岗质片麻岩; 2—前寒武纪岩组; 3—元古界-古生界; 4—三叠系-侏罗系; 5—早白垩世; 6—晚白垩世; 7—早第三纪沉积; 8—晚第三纪沉积和火山岩; 9—不同时期的花岗岩; 10—断裂构造

郯庐断裂带以东是鲁东隆起区,由太古代的花岗质片麻岩构成.断裂带以西为济阳坳陷、昌潍坳陷,由太古代、古生代、中生代潜山和古新世孔店组、始新世至渐新世沙河街组和东营组、中新世以来馆陶组和明化镇组构成.两支断裂之间有淮北坳陷、青东坳陷及其相间凸起构成,坳陷内沉积为孔店组-沙四段,与凸起一同被馆陶组和明化镇组呈不整合超覆,中间缺失沙三段-东营组沉积.

反射地震工区位于莱州湾沿海地带及北部部分海域.地表绝大部分为海水所覆盖,水深变化在0—25 m不等,西南部为陆地、海滩.陆地为第四系沉积所覆盖,潜水面变化在0—3 m左右,8 m以下以胶泥为主.区内沟壑纵横,从西向东有广利河、小清河、白浪河、虞河、潍河及胶莱河等.地震测线跨度大,过陆地、海上与潮间,大部分测线采用变观放炮.施工测线44条,其中南北测线24条,东西测线20条,资料长度约1800 km.

反射地震采用爆破震源.滩涂和潮间带浅水部分采用井炮,海上部分采用气枪激发地震波,观测系统为3025-75-0-75-3025,采用组合检波器接收,陆上使用20DX速度检波器,水中使用MP-24压电检波器,炮间距100 m,偏移距75 m,最大炮间距3025 m,道距50 m.使用TELSEIS-STAR地震仪,接收道数120道,覆盖次数30次,采样间隔2 ms,记录长度6 s.

资料处理使用OMEGA, PROMAX, GRISYS系统进行精细数据处理:(1)采用振幅补偿及能量均衡技术消除不同测线振幅和能量的差异,包括真振幅恢复、地表一致性振幅补偿、能量均衡等技术;(2)针对随机干扰、面波、多次波干扰等噪声干扰,综合应用规则噪声的剔除、随机干扰的衰减、DDI交互工具人工剔除废道和叠后去噪方法和技术,有效去除资料的噪声和干扰;(3)由于资料分辨率上的不一致,采用地表一致性反褶积、叠后大地吸收补偿等技术,提高分辨率;(4)精细速度分析;(5)剩余静校正,改善资料信噪比、增强同相轴连续性;(6)倾角时差校正(DMO)可以解决倾斜界面非零偏移距射线的反射点的发散问题和动校正的速度与倾角有关问题;(7)去除多次波;(8)叠后去噪、滤波均衡及空变背景压制,消除叠加剖面上的随机干扰,增强地层的连续性,提高资料的信噪比;(9)最终偏移选用对速度变化适应性较好的串联偏移进行叠后时间偏移,通过第一次STOLT偏移使倾角降低到有限差分可精确处理的数值范围,第二次有限差分偏移在此基础上又充分利用其处理速度变化的优势,使整个偏移达到更好的效果.

## 2 结果

从获得的34条剖面(东西向15条,南北向19条)上来看,反射时间在0.5—3.3s左右,有4个地震反射层较为清楚: $T_1$ :上第三系馆陶组上段底,波组为2个相位,能量强。 $T_7$ :下第三系沙四段底,2—3个相位。 $T_8$ :下第三系孔二段下部,2个较强相位。 $T_r$ :中生界底面不整合面反射,2—3个相位,凹陷内近断层处连续性变差。从剖面上看(如图2),层位齐全,反射层可连续追踪,波组特征较明显, $T_1$ ,  $T_7$ ,  $T_8$ ,  $T_r$ 各反射层都能有效追踪。 $T_r$ 埋深为2000—3500m,  $T_7$ ,  $T_8$ 埋深大致为1500—2900m,  $T_1$ 埋深为450—1100m。

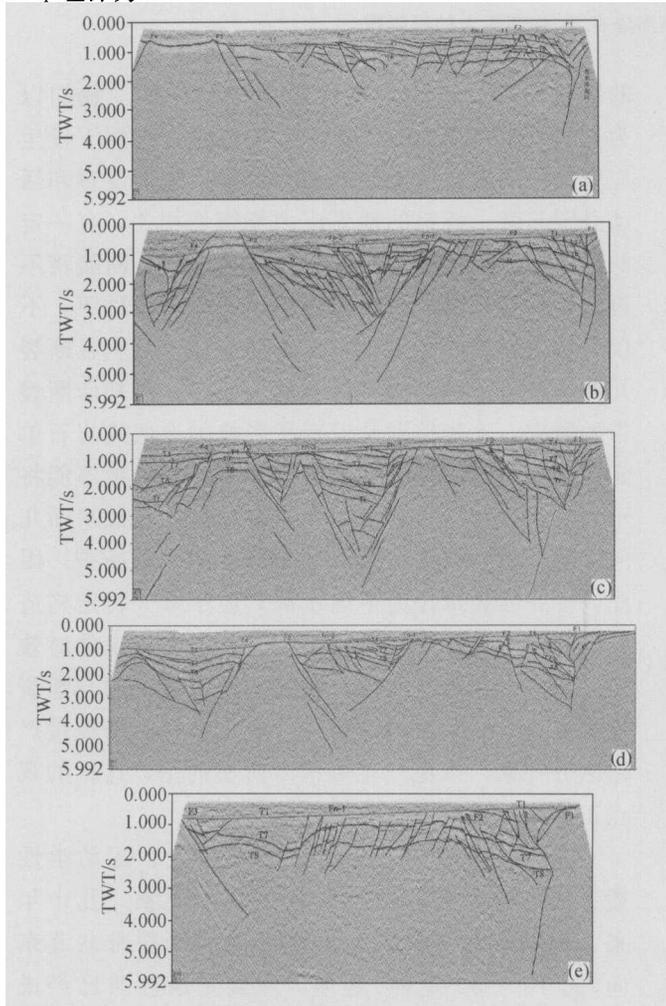


图2 穿过郯庐断裂带两支四条断裂的东西向地震反射剖面, (a) 91.4; (b) 93.8; (c) 96.2; (d) 99.8; (e) 102.1。实际共获得12条剖面穿过郯庐断裂 $F_1$ , 剖面位置参见图3

图2展示了工区内切过郯庐断裂带的5个东西向的反射地震剖面。结果显示,平面上的郯庐断裂带在渤海海域内的延向基本与根据重力和航磁资料推定的延伸情况一致,也发育东西两支,共4条断裂,分别对应陆上的 $F_1$ — $F_4$ ;垂向上的郯庐断裂带深部延向在剖面上虽没有清楚的反射层显示,但从反射地震剖面可清晰识别的两侧地质体之间界线,断裂构造面呈近直立的舒缓波状,构造样式与拉张背景下形成的铲状正断层构造截然不同,显示其挤压性走滑运动的特点。所有的剖面一致显示断裂带东盘的鲁东隆起区花岗质片麻岩在断裂带活动时持续上升,与西盘垂向断距达到至少3km以上,并在后期经受了剥蚀作用的改造;根据地震反射界面特点( $T_7$ ,  $T_8$ ,  $T_r$ ),可以确定断裂带西盘断陷盆地沉积的是孔店组-沙四段地层。这种东断西超的地层发育反映了孔店组-沙四段同构造沉积的特点,即沉积凹陷的形成与断裂带活动过程中的垂向运动分量有关系。

为认识断裂带在平面的特性,以二维剖面为基础,编制了所有断裂构造行迹在 $T_1$ 反射层面上的投影图(图3),相当于 $T_1$ 面上断裂分布的平面图。构造图显示了这样的信息:(1)平面上,由东向西的4条断裂 $F_1$ — $F_4$ 与陆上的断裂带分布非常一致;(2)郯庐断裂被后期的北东向断裂右旋错动;(3)在两支断裂之间,发育了一个北西向的裂陷,该裂陷是以高角度( $>60^\circ$ )倾角的正断层为对称的边界( $F_{n-1}$ ,  $F_{n-2}$ ),而且裂陷中沉积了断裂活动相一致的孔店组-沙四段沉积,证明裂陷形成与剖面上显示的郯庐断裂活动是同时的。

此外,在所有的剖面上,以 $T_1$ 地震反射层为标志,馆陶组和明化镇组不整合覆盖在郯庐断裂带及其相关的孔店组-沙四段地层之上,指示郯庐断裂带在馆陶组和明化镇组沉积期以后已经不再具有较明显的活动。

## 3 讨论与结论

尽管反射地震揭示的仅仅是郯庐断裂带在渤海莱州湾较小的一个区段,但图3中 $F_1$ ,  $F_2$ 与 $F_3$ ,  $F_4$ 构成了走滑断裂两支边界与夹持地块内部裂陷之间在孔店-沙四期间活动的完整图案。由于正断层( $F_{n-1}$ ,  $F_{n-2}$ )围限的北西向裂陷内部的沉积地层与郯

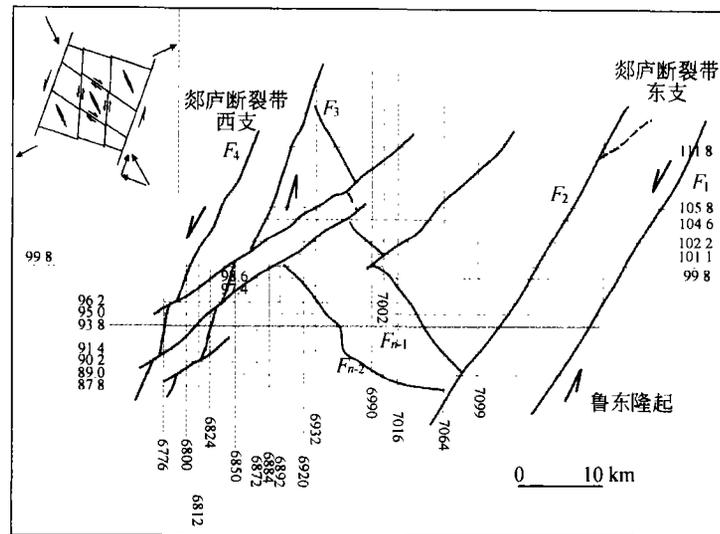


图3 青东东地区第三纪构造形迹在  $T_1$  构造面上的投影图

庐断裂带主断裂活动控制的地层同为孔店组-沙四段沉积,因此图中的断裂  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$ ,  $F_{n-1}$  和  $F_{n-2}$  的活动是等时的。另外,区域资料显示在  $F_1$ ,  $F_2$  以西的济阳拗陷和  $F_3$ ,  $F_4$  以东的鲁东隆起区构造样式与两支断裂夹持中间地块的构造特征截然不同,可以推断夹持地块中北西向裂陷( $F_{n-1}$  和  $F_{n-2}$  所围限)是由郟庐断裂带主断裂带( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$ ) 活动所引起。按照应变椭球分析,主断裂夹持地块中北西向地堑指示了来自南东-北西的最大主应力,那么,该最大主应力在主断裂带上的剪分量应该是左旋剪切力<sup>[38]</sup>,指示郟庐断裂带主断裂左旋走滑的特点(如图3中所示)。在剖面上,主断裂  $F_1$  显示舒缓波状形态,不同于地震反射剖面上铲状断裂相关的拉张构造环境,反映了断裂带压扭构造性质。由于断裂带活动中引起的垂向位错明显控制了箕状拗陷主要为孔店组-沙四段的沉积,断裂带活动的时限可以根据沉积地层时限来限定,为古新世-早始新世。并且,从剖面上断裂带被新第三系沉积层连续覆盖的事实推断,郟庐断裂带在该区晚第三纪以后停止了明显的断裂走滑活动。

过去的研究中,郟庐断裂带曾经被认为是一条“长寿”断裂,最早的活动被追溯到太古代<sup>[4,7]</sup>,近期的绝大多数研究认为郟庐断裂带的左旋走滑断裂活动在中生代<sup>[3,4,5,14-22,27-34,39]</sup>,但争论颇多。许多研究者视郟庐断裂带为一条多变的断裂带,在不同

的地质时期,表现为不同断裂活动性质。我们以为,断裂带,作为地壳在一定构造应力作用下发生应变出现的岩石层破裂或韧变产物,它的发育和活动必定与某一特定的地壳应力场密切相关,有一定的时效性,缺失其对应的构造应力条件,断裂将不再活动。这是因为断裂带在不同的应力条件下,不仅其构造性质已经发生了深刻的变化,甚至在断裂几何学特点上都必然有深刻的变化。针对郟庐断裂带的研究,不能根据其发育所影响的地层或岩石单元的地质时代用来推定断裂的发育时限,更不能将不同时代发育、具有不同性质、却具有相似平面几何学特征的断裂构造行迹简单归并为一条断裂。因此,郟庐断裂带作为中国东部对应于某一特定构造背景和应力条件的地壳破裂构造,也有一定的时效性。特别是在郟庐断裂带穿越的地区发现的与断裂带未必有必然联系构造行迹,应该与郟庐断裂带严格区分开来,以免产生混淆。所幸的是,这样的观点正逐步得到研究者的注意<sup>[3,39]</sup>。

断裂带研究中,几何学展布特点、运动学性质、活动时限是断裂带研究的基本要素。几十年来,根据航磁资料识别出来的郟庐断裂带北东向(北  $10^\circ-30^\circ$  走向)延伸、左旋走滑性质已经成为共识,但郟庐断裂带活动时限的研究一直是关键性问题<sup>[16-23]</sup>。根据已有的资料<sup>[4,30]</sup>,并经最近的野外工作验证,我们发现,郟庐断裂带改造的

最新地层是晚白垩统(如山东的王氏组、安徽的赤山组等),同时,在山东境内圈里-马站附近又被新第三纪的火山岩和相关地层所覆盖,不难判断郯庐断裂带的活动时限应该是白垩世末到新第三纪之间。另外,在断裂带东侧的鲁东隆起区整个缺失了新生代早期的沉积,但在鲁西地区相当于孔店-沙四期的沉积地层发育非常完好,反映了当时沉积环境差异受制于郯庐断裂带活动制约的特点。所有这些,充分地或必要地都印证了青东地区地震反射研究得出的结论。由此,可以推断郯庐断裂带的左旋走滑活动的主要时限应该在古新世-早始新世,为解开郯庐断裂带左旋走滑活动的时限提供了可考的证据。

在渤海湾盆地南部,夹持于郯庐断裂带两条分支断裂之间的凹陷,如潍北凹陷等,与断裂带西侧的济阳拗陷、黄骅拗陷、渤中凹陷等沉积历史有显著不同,即在青东东和潍北拗陷内沉积了孔店组-沙四段后,缺失了沙三段-沙一段和东营组沉积。这种缺失可能与区域性的构造变革有联系,指示了断裂带两个分支之间的一系列凹陷在沙三段-东营沉积期可能已经脱离了古新世-早始新世时期的压扭左旋走滑断裂的构造应力背景,为一个新的地壳构造应力状态所替代,图3中显示应变构造已经被北东向的右旋走滑构造行迹所替代,其时限与沙三段下部的T<sub>1</sub>地震反射层下部的不整合构造面的形成时限大致相当。如果这种构造背景的转变受制于太平洋构造域,与洋壳的扩张和俯冲作用有关,那么,这一构造转变与皇帝海岭与夏威夷海岭之间的拐点事件非常吻合<sup>[40]</sup>,时代也相当,约为43 Ma。不难理解,这是中国东部重要的构造转换期。在此以后,中国东部的构造应力场发生了重要转变,郯庐断裂带不再有明显的走滑活动,为新的北东向断裂构造系统所置换。这一认识已经获得了地震资料和野外工作的证实(将另文发表)。

郯庐断裂带左旋走滑活动过程兼具较大幅度的垂向运动分量,使得郯庐断裂为西边界的鲁东隆起区快速抬升,与当时的济阳拗陷区形成千米以上的地形高差。这一古高程差异一直延续至沙河街组沉积期,是济阳拗陷在早第三纪前后一直是较为稳定的湖相沉积区的原因,并且至少在孔店组、沙河街组沉积期,鲁东隆起区是济阳拗陷最主要的物源

区,是东营凹陷沙三期巨型三角洲由东向西发育的原因,成就了渤海湾盆地最大规模的油气聚集层位的形成。这也是鲁东(胶东地区)没有早新生代地层发育,鲁西有遍布全区的下新生界发育的原因。所有这些是郯庐断裂带活动在沉积格局上体现。无论如何,认识到郯庐断裂带的活动在古新世-早始新世期间兼具逆冲的左旋走滑运动,对中国东部大地构造演化、盆地的形成演化以及油气资源评价有非常重要的意义。

### 参 考 文 献

- 1 徐嘉炜. 郯城-庐江断裂带的平移运动. 华东地质, 1964, 5: 15—20
- 2 徐嘉炜. 郯庐断裂带巨大的左行平移运动. 合肥工业大学, 1980, 1: 1—12
- 3 徐嘉炜, 马国锋. 郯庐断裂带研究的十年回顾. 地质论评, 1992, 38(4): 316—324
- 4 国家地震局地质研究所. 郯庐断裂. 北京: 地震出版社, 1987, 1—210
- 5 Xu J, Zhu G. Tectonic models of the Tan-Lu fault zone, eastern China. *Int Geol Rev*, 1994, 36, 771—784
- 6 Xu J, Zhu G, Tong W X, et al. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 1987, 134: 273—310
- 7 张家声. 沂沭断裂带中段基底韧性剪切带. 地震地质, 1983, 5(2): 11—24
- 8 Lu H F, Yu H N, Ding Y W, et al. Changing stress field in the middle segment of the Tan-Lu fault zone, eastern China. *Tectonophysics*, 1983, 98: 253—270
- 9 Chen W P, Nabelek J. Seismological strike-slip faulting and the development of north China basin. *Tectonics*, 1988, 7: 975—989
- 10 陈丕基. 郯庐断裂的巨大平移的时代与格局. 科学通报, 1989, (4): 289—293
- 11 Lin J L, Fuller M. Paleomagnetism, North China and South China collision, and the Tan-Lu fault. *Phil Trans R Soc Lond*, 1990, A(331): 589—598
- 12 Yin A Nie S. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, east Asia. *Tectonics*, 1993, 12: 801—813
- 13 Li Z X. Collision between the north and south China blocks: A crust-detachment model for suturing in the region east of the Tan-Lu fault. *Geology*, 1994, 22: 739—742
- 14 Uchimura H Kono M, Tsunakawa H, et al. Geological and isotopic constraints on the timing of movement in the Tan-Lu Fault

- Zone, northeastern China. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1995, 11(1): 15—22
- 15 Grimmer J C, Jonckheere R, Enkelmann E, et al. Transpressional basin—a case study of Mid-Late Triassic Basin around Yangtze River, lower Yangtze. *Chinese Science Abstracts Series (B)*, 1995, 14(4): 55—56
- 16 朱光, 宋传中. 郟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. *中国科学, D辑*, 2001, 31(3): 250—256
- 17 朱光, 徐嘉炜, 孙世群, 等. 郟庐断裂带平移时代的同位素年龄证据. *地质评论*, 1995, 41(5): 452—456
- 18 朱光, 刘国生, Dunlap W J, 等. 郟庐断裂带同造山走滑运动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学证据. *科学通报*, 2004, 49(2): 190—198
- 19 万天丰, 朱鸿. 郟庐断裂带的最大左行走滑断层及其形成时期. *高校地质学报*, 1996, 2(1): 14—27
- 20 万天丰, 朱鸿. 郟庐断裂带的形成与演化: 综述. *现代地质*, 1996, 10(2): 159—168
- 21 王瑜, 窦立荣. 郟庐断裂带北段的形成时间及其动力学特征. *地震地质*, 1997, 19(2): 185—192
- 22 万京林, 王庆隆. 郟庐断裂活动年龄及热历史的裂变径迹研究. *地球学报: 中国地质科学院院报*, 1997, 18(A): 74—77
- 23 Wang X F, Li Z J, Chen B L, et al. Evolution of Tan-Lu strike-slip fault system and its geological implication. *Proc 30th Int Geol Congr*, 1997, No 14. Beijing: Geological Publishing House, 229—250
- 24 Lin A, Miyata T, Wan T F. Tectonic characteristics of the central segment of the Tancheng-Lujiang fault zone, Shandong Peninsula, eastern China. *Tectonophysics*, 1998, 293: 85—104
- 25 宗国洪, 肖焕钦, 李常保. 济阳坳陷构造演化及其大地构造意义. *高校地质学报*, 1999, 5(3): 275—282
- 26 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 Geophys Res*, 1999, 104: 15365—15390
- 27 Hong J P, Miyata T. Strike-slip origin of Cretaceous Mazhan basin, Tan-Lu fault zone, Shandong, east China. *The Island Arc*, 1999, 8: 80—91
- 28 Zhou J P, Miyata T, Wang L, et al. An early Cretaceous pull-apart basin in the middle section of the Tan-Lu fault zone. *Seismol Geol*, 1999, 21(2): 185—192
- 29 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 Tanlu fault. *J Geophys Res*, 2000, 105: 13303—13338
- 30 王小凤, 李中坚, 陈柏林, 等. 郟庐断裂带. 2000. 北京: 地质出版社, 1—222
- 31 陈宣华, 王小凤, 张青, 等. 郟庐断裂带形成演化的年代学研究. *长春科技大学学报*, 2000, 30(3): 215—220
- 32 蔡东升, 罗毓晖, 姚长华. 渤海莱州湾走滑拉分凹陷的构造研究及其石油勘探意义. *石油学报*, 2001, 22(2): 19—25
- 33 刘国生, 宋传中, 王道轩, 等. 郟庐断裂( $K_2-E$ )的伸展活动及其对合肥盆地的控制. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2002, 25(5): 672—677
- 34 刘国生, 朱光. 郟庐断裂带张八岭隆起段走滑运动与合肥盆地的沉积响应. *沉积学报*, 2002b, 20(2): 267—273
- 35 Zhang Y, Dong S, Shi W. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, eastern China. *Tectonophysics*, 2003, 363(3—4): 243—258
- 36 许志琴. 郟庐裂谷系概述. *构造地质论丛*, 1984, 3: 39—46
- 37 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(6): 845—851
- 38 Ramsay J G, Lisie R J. *The techniques of modern structural geology (Vol. 3: Applications of Continuum Mechanics in Structural Geology)*. New York: Academic Press, 2002, 846
- 39 赵越, 徐守礼, 杨振宇. 沿大型走滑断裂系的隆升. *地质科学*, 1996, 31(1): 1—14
- 40 Steinberger B, Richard R S, O'Connell J. Prediction of Emperor-Hawaii seamount locations from a revised model of global plate motion and mantle flow. *Nature*, 2004, 430(6996): 167—173