https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.055



# 伸展作用下郯庐断裂带南段及邻区的地壳演化:来自 接收函数的证据

陈 吴<sup>1</sup>,李红星<sup>1\*</sup>,洪德全<sup>2</sup>,韩如冰<sup>3</sup>,王向腾<sup>1</sup>, 邓居智<sup>1</sup>,李 广<sup>1</sup>,宫 猛<sup>1</sup>,黄光南<sup>1</sup>,盛书中<sup>1</sup> 1.东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,江西南昌 330001

2. 安徽省地震局,安徽合肥 230003

3. 清华大学数学科学系,北京 100084

**摘 要:**为了更加深入了解中生代白垩世以后大陆伸展对郯庐断裂带南段地壳结构和演化的影响.利用P波接收函数对郯庐 断裂带南段及其邻区的地壳厚度、泊松比特征进行研究.*H*-*κ*结果显示研究区域内的下扬子板块地壳厚度相对于华北板块更 薄,并且结构变化更加剧烈,大别山造山带和苏鲁造山带之间的郯庐断裂带所在区间的平均泊松比呈现出相对低值特征.P波 接收函数叠后偏移结果显示郯庐断裂带下方的地壳表现为减薄形变,且断裂带两侧地壳向郯庐断裂带处发生减薄的倾角不 同.结合区域地质演化背景,认为"非对称伸展"模型可以解释早白垩世伸展作用下郯庐断裂带南段及其邻区的地壳形变及演 化特征.

关键词:接收函数;地壳形变;郯庐断裂带;白垩世大陆伸展;构造地质.
中图分类号: P315.2
文章编号: 1000-2383(2023)08-2905-10

## Crustal Tectonic Evolution of Tanlu Fault Zone (Southern Segment) and Adjacent Areas under the Background of Extension:Evidences from Teleseismic Receiver Function

**收稿日期:**2022-10-10

Chen Hao<sup>1</sup>, Li Hongxing<sup>1\*</sup>, Hong Dequan<sup>2</sup>, Han Rubing<sup>3</sup>, Wang Xiangteng<sup>1</sup>, Deng Juzhi<sup>1</sup>, Li Guang<sup>1</sup>, Gong Meng<sup>1</sup>, Huang Guangnan<sup>1</sup>, Sheng Shuzhong<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330001, China 2. Anhui Earthquake Administration, Hefei 230003, China

2. Annui Earinquare Aaministration, Hejet 230003, Onina

**Abstract:** For the more thorough understanding of the crustal structure and evolution of Tanlu fault under extension background since early Cretaceous, we completed a study about crustal thickness and Poisson's ratio of Tanlu fault zone (southern segment) and

作者简介:陈昊(1988-),工程师,博士生在读,接收函数及层析成像应用研究.ORCID:0000-0002-1926-4415.E-mail: chenhaohome@vip.qq.com \* 通讯作者:李红星,E-mail: lihongxingniran@163.com

**引用格式:**陈昊,李红星,洪德全,韩如冰,王向腾,邓居智,李广,宫猛,黄光南,盛书中,2023.伸展作用下郯庐断裂带南段及邻区的地壳演化. 地球科学,48(8):2905-2914.

**Citation**: Chen Hao, Li Hongxing, Hong Dequan, Han Rubing, Wang Xiangteng, Deng Juzhi, Li Guang, Gong Meng, Huang Guangnan, Sheng Shuzhong, 2023. Crustal Tectonic Evolution of Tanlu Fault Zone (Southern Segment) and Adjacent Areas under the Background of Extension: Evidences from Teleseismic Receiver Function. *Earth Science*, 48(8):2905-2914.

<sup>3.</sup> Department of Mathematical Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 41764006);江西省自然科学基金(No. 20202BABL201027);"核资源与环境"国家重点实验室自主基金 (No. Z1903);江西省研究生创新专项资金项目(No. YC2021-B159).

adjacent Areas by P-wave receiver function. The results of H- $\kappa$  showed the Lower Yangtze block's crust is relatively thinner and more severe deformation than the North China block's in study area. The average Poisson's ratio beneath Tanlu fault zone exhibited lower value feature. The result of migration revealed a crustal thinning deformation beneath the Tanlu fault zone, and a significant differences on thinning dip angle of Moho toward the Tanlu fault zone on both sides of the fault zone. Furthermore, The model of Asymmetrical extension could well explain the crustal evolution of southern segment of the Tanlu fault zone and its adjacent regions under extension background since early Cretaceous.

Key words: receiver function; crustal deformation; Tanlu fault zone; Cretaceous continental extension; structural geology.

## 0 引言

郯庐断裂带位于中国东部,是一条北北东走向 且深切岩石圈的深大断裂带,它由多条次级断裂组 成,其演化进程始终影响着华北板块东部和整个下 扬子板块的构造、岩浆活动及成岩成矿.自三叠纪 形成以后, 郯庐断裂带经历了多期应力倒转, 包括 早期的转换走滑和左旋平移走滑运动(240~190 Ma)、中晚侏罗至早白垩世的挤压走滑运动(190~ 135 Ma)、早白垩世的巨型伸展运动(135~90 Ma) 及晚白垩至早古新世的右旋走滑运动(90~50 Ma) (张岳桥和董树文,2008).其中早白垩世的巨型伸展 运动对郯庐断裂带的演化、发展起到了至关重要的 作用.由于伊泽奈崎俯冲板块的后撤,东亚大陆的 应力背景场随之发生转变,强烈的伸展作用不但使 得岩石圈减薄超过120 km(Menzies et al., 1993;朱 日祥等,2012),还导致板块多数深大断裂带发生活 化、拆离,形成正断层,并促使沿断裂带的地垒、地 堑及裂谷盆地的发育.同时这些断裂也为地幔物质 上涌、岩浆上行提供了通道,导致板块内部活动性 增强及地壳内岩性组分变化(郑永飞等,2018).因 此,白垩世郯庐断裂带的演化进程长期被视为热点 地质问题,受到众多学者们的争相关注.前人通过 对华北克拉通东部应力场的反演,指示出早白垩世 区域应力方向为WNW-ESE向拉张.此外,研究表 明白垩世强烈伸展活动与华北克拉通东部破坏峰 期为同一时期(Zhu et al., 2012).来自岩石学的证据 显示白垩世郯庐断裂带及邻区的岩浆活动存在差 异,不同区域内的强烈程度和时间特征差别很大, 指示出区域岩石圈减薄具有非均一性(王薇等, 2017).

近些年,国内相关团队多次利用人工源和天然 地震学方法对郯庐断裂带进行探测,获得了郯庐断 裂带及邻区的地壳结构图像与速度结构特征,例

如: Zhao et al. (2012) 通过体波层析成像技术获得了 中国东部深部速度结构,值得注意的是郯庐断裂带 两侧表现出了明显的高低速分布异常,指示出中生 代以后两大板块由于物质差异,导致对地质事件产 生不同形变响应. Zhang et al. (2020)也发现郯庐断 裂两侧存在明显的地壳速度异常,且断裂带不但控 制区域速度异常,还导致了莫霍面的不连续.顾勤 平等(2020)利用背景噪声技术揭示出郯庐断裂带 与大别一苏鲁造山带的内在联系.Li et al. (2020)通 过密集台站获得了郯庐断裂带及邻区的S波速度结 构,研究进一步说明了郯庐断裂带是深部向地表输 送物质的有利通道.郑洪伟等(2020a,2020b)利用P 波层析成像方法揭示了郯庐断裂带南段南北两端 的长江中下游成矿带和苏鲁造山带深部结构特征. 此外利用接收函数方法对郯庐断裂带的研究同样 取得了丰富的成果(李婷婷等,2020; Wei et al., 2020; Hong et al., 2021), 然而这些研究成果普遍偏 重于对更大尺度区域及断裂带邻区的深部结构进 行研究,并未侧重于讨论特定时期的区域地壳结构 演变,而本文旨在对白垩世大陆伸展作用下,地壳 结构受强烈拉伸所产生的形态变化进行研究,并结 合断裂带区域泊松比特征,解释了早白垩世大陆伸 展背景下郯庐断裂带南段及其邻区的地壳演化 模型.

## 1 数据及处理

利用安徽、江苏地区 37个宽频带地震台站连续 3年观测的地震波形资料开展本次研究,这些地震 台站较好地覆盖了江苏与安徽境内郯庐断裂带南 段及其邻区,如图 1a 所示,研究区域内的主要构造 单元包括华北板块、下扬子板块以及大别山和苏鲁 造山带,沿郯庐断裂带两侧主要发育有合肥盆地苏 北盆地、长江中下游成矿带等拉伸断陷盆地或裂谷



图1 台站及地震事件分布、区域地质构造图

Fig. 1 Station and epicenter distribution, and regional geological structure map a. 宽频带地震台站分布;b.研究区地质构造简图;c.地震事件震中分布;SLOB. 苏鲁造山带;DBOB. 大别山造山带;MLYRMB. 长江中下游成 矿带;NCP. 华北平原;JBB. 苏北盆地;HFB. 合肥盆地;F1. 郯庐断裂带;F2. 江山一绍兴断裂;F3. 淮阴一响水口断裂;F4. 信阳一六安断裂; F5. 襄樊一广济断裂

(图 1b). 筛选震级大于 Ms5级, 震中距为 30°~90°的 地震数据, 图 1c 显示, 地震震中主要位于环太平洋 地震带西部以及喜马拉雅地震带附近.

挑选出P波震相清晰的波形数据,截取P波前 10 s至P波后80 s的数据用于P波接收函数的提取. 对筛选后的数据完成去均值、去倾斜等预处理,利 用拐角频率范围0.02~2 Hz的二级Butterworth带 通滤波器对数据进行滤波,并将处理后的ENZ分量 数据旋转至RTZ坐标系中.采用时间域反褶积(Ligorría and Ammon, 1999)提取径向分量的接收函数 (图2),设置Gaussian参数为2.5,迭代次数200次. 再次视检数据,最终筛选1795条径向接收函数参与 后续计算.由图2可见:AH.CHZ按照各自方位角顺 序进行排列(图2b,2c),接收函数数量均足以满足 叠加后结果具有较高的可信度,且从图2b中可以清 晰辨别Ps转换波及PsPs和PpSs+PsPs多次波信 号,保证了叠加后的波形可有效压制噪声干扰,增 强有效信号(图2a,2b).

利用H- $\kappa$ 方法(Zhu et al., 2000)计算了所有地 震台站位置的地壳厚度及纵、横波速比( $\kappa$ ),并进一 步求出泊松比( $\sigma$ =0.5× $\left[1-1/(\kappa^2-1)\right]$ )(Christenswen, 1996). 计算结果如表1所示.采用曲面网 格插值算法绘制了苏皖地区的地壳厚度与泊松比 分布图(图3).H- $\kappa$ 方法的参数设置如下:P波平均速 度被设定 6.0 km/s, Ps, PpPs以及 PpSs+PsPs的权 重分别为 0.7、0.2 和 0.1.

选取6个台站(AH.HNA、AH.DYN、AH.CHZ、 JS.NJ、JS.ZJ、JS.JJ)组成一条近东西向的测线,如图 4a 所示,其方位角为100°,长度约400 km.这条测线 形成的剖面近垂直切过郯庐断裂带南段,从华北板 块淮南地区,经过郯庐断裂带,进入下扬子板块直 至江苏靖江地区,利用基于波动方程的P波接收函 数叠后偏移成像方法(Chen et al., 2005)对测线位 置的莫霍面进行了成像.在偏移成像中,考虑到沉 积层的影响,修正了浅部地壳速度模型,加入了一 层 V<sub>s</sub>=5.8 km/s, V<sub>s</sub>=3.0 km/s 的沉积层, 深部模型 仍然使用 IASP91 速度模型.图 4a 反应的是每个台 站的接收函数在地下35 km处及更深的穿透点投 影,投影点的数量及分布保证了接收函数叠加后可 以有效反应图 4a 剖面(黄线)的地壳结构.为了提高 成像的可靠性,补充了2008~2010年这6个台所接 收到的地震事件,最终共有770条P波径向接收函 数用于叠后偏移成像,并设置每个剖分网格内最少 接收函数为20条(图4b).通过时间域CCP叠加和 深度域波场反向延拓完成叠后偏移成像(图4c),截 止频率设为0.01~1.20 Hz.



Fig.2 The P-RFs from AH.CHZ

a. AH.CHZ平均接收函数;b. AH.CHZ接收函数排列;c. AH.CHZ接收函数对应地震事件反方位角(红色方块)震中距(黑色倒三角)



Fig. 3 The crustal thickness and the regional Poission's ratio feature

#### 表1 每个台站对应的地壳厚度、V<sub>p</sub>/V<sub>s</sub>波速比及平均泊松比

Table 1 Crustal thickness,  $V_{\rm p}/V_{\rm s}$  and average Poisson's ratio under every station By H- $\kappa$ 

构造单元		台站编号	地壳厚度	波速比( $\kappa$ ) $V_{\rm p}/V_{\rm s}$	泊松比(σ)
			(km)		
		JS.PX	32.4	1.77	0.27
华北板块	华北平原	JS.XZ	33.2	1.78	0.26
		JS.PZ	32.8	1.75	0.26
		AH.HBE	34.4	1.78	0.27
		AH.MCG	31.6	1.74	0.25
		AH.HNA	33.6	1.77	0.26
		AH.BEB	31.2	1.72	0.25
		AH.DYN	35.8	1.65	0.21
	合肥盆地	AH.BAS	34.4	1.65	0.21
		AH.SCH	35.4	1.74	0.25
	大别造山带	AH.FZL	36.6	1.77	0.26
		AH.JZA	35.2	1.71	0.24
下扬子板块	苏鲁造山带	JS.DH	31.2	1.71	0.24
		JS.XW	32.2	1.74	0.25
		JS.GUY	25.6	1.86	0.30
		JS.HUA	28.6	1.78	0.27
		JS.SQ	32.2	1.75	0.26
		JS.SH	31.6	1.80	0.28
	苏北盆地	JS.SY	28.8	1.74	0.25
		JS.YC	29.9	1.73	0.25
		JS.DF	32.0	1.73	0.25
		JS.GY	31.6	1.74	0.26
	沿江中下游成矿带	JS.HA	28.8	1.75	0.26
		AH.JAS	30.2	1.77	0.27
		JS.LH	25.0	1.88	0.30
		AH.CHZ	32.2	1.72	0.25
		JS.JJ	36.4	1.64	0.22
		JS.ZJ	33.6	1.72	0.25
		JS.RD	30.9	1.70	0.24
		JS.WX	31.6	1.77	0.27
		JS.GC	30.4	1.77	0.26
		AH.MAS	31.8	1.75	0.26
		JS.NJ	30.9	1.70	0.24
		JS.LIS	30.0	1.78	0.27
		AH.ANQ	33.2	1.74	0.25
		AH.TOL	34.0	1.74	0.25
	华南褶皱系	AH.HUS	35.4	1.75	0.26

## 2 结果

由表1,图3可知,以郯庐断裂带南段为界,华北 板块一侧安徽西北部的华北平原和中部的合肥盆 地的地壳厚度基本一致,定远丘陵山地(AH.DYN) 及附近的淮北(AH.HBE)、淮南(AH.HNA)的地壳 厚度相对略厚,达到33.5~36.0 km.大别山造山带 所在的两个台站(AH.FZL、AH.JZA)位置的地壳厚 度大于35km,由于大别山地区两个台站靠近造山 带北缘,因此其结果不能等同于大别山最深的地壳 厚度.除大别造山带外,郯庐断裂带西侧华北板块 内各台站对应的地壳厚度(标准差为1.64)差别较 小.位于大别造山带和华南褶皱系之间的长江中下







游成矿带(AH.ANQ、AH.TOL)地壳厚度为33~34 km, 芜宁盆地及周边(AH.MAS、JS.NJ、JS.LIS、JS. GC)的地壳厚度为30~32 km.苏鲁造山带与苏北盆 地交汇的区域(JS.GUY、JS.HUA、JS.SY)地壳厚度 显著变薄,最薄只有25km,位于下扬子前陆的苏南 中部地区(JS.JJ)存在一个地壳明显增厚的区域 (36.4 km),该厚度值与前人利用重力场反演得到的 结果相近(Zhao et al., 2020),同样计算研究区域内 下扬子板块地壳厚度标准差为2.48,表明其具有更 明显的形变特征. 泊松比特征总体表现为与地壳厚 度具有一定的对应关系,且扬子板块的平均泊松比 (0.258) 略大于华北板块(0.249), 总体呈现出中酸 性特征.江苏地区除了东部靠近黄海的区域表现为 低值特征,其他地方以高值特征为主,且苏北盆地 是研究区域内地壳最薄且泊松比最大的区域.安徽 地区除了存在一个覆盖于郯庐断裂带南段的非等 轴椭球型的低值区外,其他地方以高值分布特征为 主(图3).

从图 4c 可以看出,接收函数偏移测线对应的剖 面中(图 4c),莫霍面表现为清晰且强烈的正振幅震 相界面,分布在 25~40 km 深度范围内.华北平原安 徽淮南地区(AH.HNA)莫霍面埋深相对较深,剖面 向东延伸,莫霍面埋深逐渐变浅(AH.DYN),经过 郯庐断裂带进入扬子板块(AH.CHZ、JS.NJ、JS. ZJ),莫霍面呈现出过渡带特征,且其深度又由浅逐 渐变深直至靖江地区(JS.JJ).整体来看,以郯庐断 裂带两侧的莫霍面深度在断裂带经过处的都表现 为变浅,区别在于华北板块一侧莫霍面变浅的倾角 较大,扬子板块一侧莫霍面变浅的倾角较小,具有 明显的非对称形态.

将*H*-κ得到的地壳结果投影到图4c中,莫霍面 深度的数值整体略微大于偏移得到的成像结果,反 映出*H*-κ得到的是壳幔过渡带的底界面,但在形态 特征上都具有较好的对应关系.值得注意的是这条 测线避开了苏鲁一大别两个高压一超高压变质带, 尽管演化过程中,测线所经区域也曾出现过近垂直

于断裂带方向的挤压运动,但郯庐断裂带形成后, 挤压作用对垂直于测线方向上的影响相对于伸展 运动造成的影响较小,因而剖面的成像结果可以较 好的体现出剧烈的伸展作用遗留的演化痕迹.

#### 3 讨论

#### 3.1 郯庐断裂带南段两侧板块地壳结构差异特征

造成下扬子板块江苏地区地壳厚度变化剧烈 的可能原因主要有3个方面:首先,下白垩世中后 期, 郑庐断裂带的左行走滑与弱伸展活动相继发生 (徐曦等, 2015; Zhu et al., 2017), 新生代开始, 郑庐 断裂带又经历了多期反复的挤压、伸展、走滑, 这种 应力作用,导致地壳叠加或递进变形; 其次, 苏鲁造 山带高压变质带的折返及去山根作用对地壳的破 坏(Li et al., 2013); 最后, 华北板块与扬子板块存在 不同的冷却模式. 有证据显示, 扬子板块冷却时间 更长(Wang et al., 2014), 关于新生代岩浆源区和近 地表玄武岩分布的记录可以反映(邱志力, 2009), 白垩世之后郯庐断裂带东侧的下扬子板块具有剧 烈的岩浆活动, 并引发地壳物质组分和物理性质 改造.

#### 3.2 白垩世伸展作用下郯庐断裂带南段泊松比特征

大别-苏鲁两个造山带之间存在一个明显的 近南北走向、非等轴区域泊松比值低区(σ<0.24), 空间上对应郯庐断裂带(南段)所在区间(图3,表 1).相关研究表明,低泊松比区域内的侵入岩侵位时 间发生在127~103 Ma之间(牛漫兰等,2008),在此 期间,岩浆的地球化学性质发生了显著的改变.早 期和中早期侵入岩表现为埃达克岩的性质(图5a), 这类岩石指示出其来自深部的石榴子石稳定残留 相源区.中晚期和晚期,侵入岩逐渐过渡成A型花 岗岩类,这种类型花岗岩的形成具有"非造山""碱 性"和"无水"的特征,通常可用来指示出岩浆源区 深度较浅,其最可能的形成来源是下地壳源区的部 分熔融(Bonin,2007;Castillo,2012).这种侵入岩由 前期的埃达克质岩石过渡到后期的A型花岗岩,说 明岩浆源区是逐渐变浅的,暗示在古太平洋板块回 撤产生的岩石圈的强烈伸展效应下,岩石圈在大型 的断裂处持续减薄,使软流圈顶面不断抬升.地壳 在这种强烈的拉伸作用下,使得岩浆源区对应的等 温面也持续上升(图5b)(牛漫兰等,2010).与之同 时,地壳结构也发生显著变化,下地壳相对于上地 壳和上地幔经常表现为塑性变形,随着地壳整体厚 度的减小,铁镁质下地壳将比长英质的上地壳发生 了更加显著的减薄,最终造成了断裂带下方的地壳 平均泊松比相较邻区表现为低值.

#### 3.3 白垩世伸展作用下郯庐断裂带南段地壳减薄特征

早白垩世随着伊泽奈崎板块的回撤,之前增厚 的东亚大陆岩石圈发生破坏、减薄.当华北克拉通 东部减薄达到峰值时,郯庐断裂带也转变为强烈的 伸展活动,在拉张及减压环境下,深大断裂作为地 壳的薄弱带,易成为深部物质运移和壳幔相互作用 的核心地带.伸展机制可能导致断裂带内及附近软 流圈不断抬升,致使等温线也随之升高,其进而加 剧壳幔作用.有研究表明,这种由于强烈拉伸造成 的等温面抬升现象不仅仅存在于郯庐断裂带南段, 郯庐断裂带沂沭段在该时期也呈现出同样的表现, 并对后期的成矿作用产生影响(石文杰,2014).

研究表明, 郯庐断裂带两侧的华北板块与扬子 板块在地震波速度(Sun and Kennett, 2016; Lei *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020)、重磁异常(Zhao *et al.*, 2020)等其它地球物特征上都具有明显的差异.此 外,前人通过反演白垩世中国东部地区应力方向发现, 早白垩世中早期郯庐断裂带的主应力伸展方向 为WNW-ESE, 该方向近乎垂直于郯庐断裂带走



#### 图5 非对称伸展模型

Fig. 5 The model named Isothermal surface raising and Asymmetrical extension a. 挤压走滑阶段;b. 巨型伸展阶段;依据嵇少丞等(2009)及牛漫兰等(2010)的地壳演化模型修改

向,表现为强烈的地壳伸展作用,之后伸展方向逐 渐发生顺时针旋转,至晚白垩世一古近纪,主应力 方向已经旋转至N-S向,并表现为相对较弱的地壳 伸展作用(朱光等,2018),本文认为,华北和扬子板 块在这种伸展应力方向和大小的改变中,由于不同 板块间的物性差异,造成了对应力的响应也不尽相 同,这极有可能是导致白垩世沿郯庐断裂带南段地 壳发生非对称伸展的最直接原因.

#### 3.4 非对称伸展模型

综合本次郯庐断裂带南段地壳结构成像结果 与地质学信息,本文认为,白垩世伸展作用下郯庐 断裂带及其邻区的地壳薄化过程可以很好的被嵇 少丞提出的"非对称伸展模型"(嵇少丞等,2009)解 释(图5).在大陆伸展背景下,郯庐断裂带作为岩浆 上行通道和地壳薄化的核心地带,断裂带下方的地 壳也在断裂带处发生减薄.随着减薄形变和等温线 的抬升,导致断裂带下方地壳内铁镁质含量持续降 低,最终沿断裂带区间的地壳逐渐表现为泊松比低 值分布的特征.同时,由于伸展应力的方向和大小 发生转变,以及两侧地壳在物理性质上存在差异, 最终使得断裂两侧地壳演化出了非对称的伸展的 结构.这些特征很好被本次研究得到的泊松比和偏 移成像结果所反应(图3,图4c).

#### 4 结论

本文利用提取自37个宽频固定台的接收函数 获得了郯庐断裂带南段及邻区地壳结构与泊松比. Η-κ结果显示郯庐断裂带两侧的地壳结构具有明显 差异性,断裂带东侧的下扬子板块地壳厚度更薄, 但厚度变化更剧烈.本文将造成这种差异性质的原 因归结为多期的应力叠加作用,苏鲁造山带的去山 根作用以及板块间的不同冷却模式.此外,H-κ结果 还显示出位于苏鲁一大别造山带之间的郯庐断裂 带区间内存在一个覆盖断裂带的南北走向、非等轴 泊松比低值区.该低值区与接收函数偏移成像中郯 庐断裂带地壳减薄特征相对应,这两方面证据共同 支撑了白垩世大陆伸展背景下,区域地壳沿巨型断 裂带发生减薄.由于这种减薄特征在偏塑形的下地 壳体现得更加明显,导致地壳内铁镁质含量的降 低,使得沿着断裂带处的地壳平均泊松比相较于邻 区表现为低值特征.

偏移成像的结果同时还揭示郯庐断裂带两侧 的莫霍面以不同的倾角向郯庐断裂带发生减薄,且 结构上表现为明显的不对称性.本文认为这种非对称性主要由白垩世地壳伸展应力发生顺时针旋转, 不同板块由于物性差异造成自身对应力的响应不同导致.

据此,本文认为"非对称伸展模型"可以解释了 早白垩世伸展作用下郯庐断裂带南段及其邻区的 地壳演化,并对进一步理解郯庐断裂带的形成、演 化及其对矿产资源分布的控制作用具有重要意义.

致谢:本次研究所使用程序为圣路易斯大学朱 露培教授与中国科学院地质与地球物理研究所陈 凌教授的hk和PSDM程序.感谢安徽省地震局提供 研究数据.同时感谢崇美艺术工作室邵思文女士为 本文制作精美模型图件.感谢审稿专家为本文提出 的宝贵意见.

#### References

- Bonin, B., 2007. A-Type Granites and Related Rocks: Evolution of a Concept, Problems and Prospects. *Lithos*, 97(1/2): 1— 29. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.12.007
- Castillo, P. R., 2012. Adakite Petrogenesis. *Lithos*, 134–135 (52): 304–316. https://doi.org/10.1016/j.lithos. 2011. 09.013
- Chen, L., Wen, L. X., Zheng, T. Y., 2005. A Wave Equation Migration Method for Receiver Function Imaging: 2. Application to the Japan Subduction Zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B11). https://doi.org/ 10.1029/2005jb003666
- Christensen, N. I., 1996. Poisson's Ratio and Crustal Seismology. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 101 (B2): 3139-3156. https://doi.org/10.1029/95jb03446
- Gu, Q. P., Ding, Z. F., Kang, Q. Q., et al., 2020.Group Velocity Tomography of Rayleigh Wave in the Middle-Southern Segment of the Tan-Lu Fault Zone and Adjacent Regions Using Ambient Seismic Noise. *Chinese J. Geophys.*, 63(4):1505-1522(in Chinese with English abstract).
- Hong, D. Q., Huang, X. L., Yang, Y., et al., 2021. Lateral Variation in Moho Depth around the Southern Tanlu Fault Zone and its Adjacent Area. *Earthquake Science*, 34(1): 77-87. https://doi.org/10.29382/eqs-2020-0063
- Ji, S. C., Wang, X., Yang, W. C., 2009. Correlation between Crustal Thickness and Poisson's Ratio in the North China Craton and Its Implication for Lithospheric Thinning. *Acta Geologica Sinica*, 83(3):324-330(in Chinese with English Abstract).
- Lei, J. S., Zhao, D. P., Xu, X. W., et al., 2020. P-Wave Upper -Mantle Tomography of the Tanlu Fault Zone in Eastern

China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 299 (2): 106402. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.106402

- Li, C., Yao, H. J., Yang, Y., et al., 2020. 3-D Shear Wave Velocity Structure in the Shallow Crust of the Tanlu Fault Zone in Lujiang, Anhui, and Adjacent Areas, and its Tectonic Implications. *Earth and Planetary Physics*, 4(2): 1-12. https://doi.org/10.26464/epp2020026
- Li, T. T., Liu, L., Fan, W. H., et al., 2020. Crustal Thickness and Ratio of Poisson in Jiangsu Area by Teleseismic Receiver Function. *Journal of seismological research*, 196(4), 82-90(in Chinese with English Abstract).
- Li, S. G., He, Y. S., Wang, S. J., 2013. Process and Mechanism of Mountain-Root Removal of the Dabie Orogen: Constraints from Geochronology and Geochemistry of Post -Collisional Igneous Rocks. *Chinese Science Bulletin*, 58 (35): 4411-4417. https://doi.org/10.1007/s11434-013-6065-y
- Ligorría, J. P., Ammon, C. J., 1999. Iterative Deconvolution and Receiver-Function Estimation. Bulletin of the Seismological Society of America, 89(5): 1395-1400. https:// doi.org/10.1785/bssa0890051395
- Menzies, M. A., Fan, W. M., Zhang, M., 1993. Palaeozoic and Cenozoic Lithoprobes and the Loss of >120 km of Archaean Lithosphere, Sino - Korean Craton, China. *Geological Society*, London, Special Publications, 76(1): 71-81. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1993.076.01.04
- Niu, M. L., Zhu, G., Xie C. L., et al., 2008. LA-ICP MS Zircon U-Pb Ages of the Granites from the Southern Segment of the Zhangbaling Uplift Along the Tan-Lu Fault Zone and their Tectonic Significances. Acta Petrologica Sinica, 24(8): 1839-1847(in Chinese with English Abstract).
- Niu, M. L., Zhu, G., Xie, C. L., et al., 2010. Geochemistry of Late Mesozoic Intrusions from the Southern Segment of Zhangbaling Uplift Along the Tan-Lu Fault Zone and Its Implications for the Lithospheric Thinning. Acta Petrologica Sinica, 26(9):2783-2804(in Chinese with English Abstract).
- Qiu, Z. L., 2009. Geochemistry and Hf Isotopes of Zircon Megacrysts in Cenozoic Basalts along Eastern China and Its Implications for Crust - Mantle Nteraction beneath Subcontinental Lithosphere Mantle Geochemistry and Hf Isotopes of Zircon Megacrysts in Cenozoic Basalts along Eastern China and Its Implications for Crust - Mantle Nteraction beneath Subcontinental Lithosphere Mantle (Dissertation). Zhejiang University, Hangzhou (in Chinese with English abstract).
- Sun, W. J., Kennett, B. L. N., 2016. Uppermost Mantle

Structure beneath Eastern China and its Surroundings from Pn and Sn Tomography. *Geophysical Research Letters*, 43 (7): 3143-3149. https://doi.org/10.1002/2016gl068618

- Shi, W. J., Wei, J. H., Tan, J., et al., 2014. Late Early Cretaceous Gold Mineralization in Tan-Lu Fault Zone: Evidence from Rb - Sr Isotopic Dating of Pyrite from Longquanzhan Gold Deposit. *Earth Science*, 39(3):325-340(in Chinese with English Abstract).
- Wang, F., Wang, Q., Lin, W., et al., 2014.<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar Geochronology of the North China and Yangtze Cratons: New Constraints on Mesozoic Cooling and Cratonic Destruction Under East Asia. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 119(4):3700-3721.https://doi.org/org/10.1002/ 2013JB010708
- Wang, W., Zhu, G., Zhang. S., et al., 2017. Detrital Zircon Evidence for Depositional Time and Provenance of Mesozoic Sediments in the Hefei Basin. *Geol. Rev.*, 63:956– 977 (in Chinese with English Abstract).
- Wei, Z. G., Chu, R. S., Chen, L., et al., 2020. Crustal Structure in the Middle-Southern Segments of the Tanlu Fault Zone and Adjacent Regions Constrained by Multifrequency Receiver Function and Surface Wave Data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 301(4): 106470. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106470
- Xu X., Gao S.L., Wang X.J., et al., 2015. Cenozoic Deformation of Extensional Tectonics in the Lower Yangtze Region and Its Tectonic Significance. *Earth Science*, 40(12): 1968-1986(in Chinese with English Abstract).
- Zhang, Y.Q., Dong, S.W., 2008.Mesozoic Tectonic Evolution History of the Tan-Lu Fault Zone, China: Advances and new under standing. *Geological Bulletin China*, 27(9): 1371-1390 (in Chinese with English Abstract).
- Zhang, Y. P., Wang, B. S., Xu, T., et al., 2020. Three-Dimensional Crustal V<sub>p</sub> and V<sub>s</sub> Structures beneath the Southern Segment of the Tan-Lu Fault Revealed by Active Source and Earthquake Data. *Geophysical Journal International*, 223(3): 2148-2165. https://doi.org/10.1093/ gji/ggaa314
- Zhao, F. Y., Jiang, S. H., An, S., et al., 2020. Correlation of Lithospheric "De-Rooting" of the Sulu-Dabie Orogen to Tectonic-Sedimentary Process of the Hefei Basin: Constraints from Mesozoic Coupling of Basin and Orogen. *Geological Journal*, 55(1): 694-711. https://doi.org/ 10.1002/gj.3431
- Zhao, L., Allen, R. M., Zheng, T. Y., et al., 2012. High-Resolution Body Wave Tomography Models of the Upper Mantle beneath Eastern China and the Adjacent Areas. *Geochemistry*, *Geophysics*, *Geosystems*, 13(6): Q06007.

https://doi.org/10.1029/2012gc004119

- Zheng, H. W., Li, T. D., Su G., 2020a. Tomography Images of Crustal and Upper Mantle Structure beneath Sulu Orogenic Belt. *Earth Science*, 45(7): 2485-2494(in Chinese with English abstract).
- Zheng, H. W., Li, T. D., He R. Z., 2020b. Southeastward Subduction of North China Block: Insights from Tomographyic Image of the Middle and Lower Yangtze River Metallogenic Belt. *Earth Science*, 45(11): 4187-4197(in Chinese with English Abstract).
- Zheng, Y. F., Xu, Z., Zhao, Z. F., et al., 2018. Mesozoic Mafic Magmatism in North China: Implications for Thinning and Destruction of Cratonic Lithosphere. *Science China Earth Sciences*, 61:353-385(in Chinese).
- Zhu, G., Jiang, D. Z., Zhang, B. L., et al., 2012. Destruction of the Eastern North China Craton in a Backarc Setting: Evidence from Crustal Deformation Kinematics. *Gond-wana Research*, 22(1): 86–103. https://doi.org/10.1016/ j.gr.2011.08.005
- Zhu, G., Liu, C., Gu, C. C., et al., 2018. Oceanic Plate Subduction History in the Western Pacific Ocean: Constraint From Late Mesozoic Evolution of the Tan-Lu Fault Zone. Science China Earth Sciences, 61: 386-405(in Chinese).
- Zhu, G., Wang, Y. S., Wang, W., et al., 2017. An Accreted Micro-Continent in the North of the Dabie Orogen, East China: Evidence from Detrital Zircon Dating. *Tectonophysics*, 698(2): 47-64. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.01.004
- Zhu, L. P., Kanamori, H., 2000. Moho Depth Variation in Southern California from Teleseismic Receiver Functions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B2): 2969-2980. https://doi.org/10.1029/1999jb900322
- Zhu, R. X., Xu, Y. G., Zhu, G., et al., 2012. Destruction of the North China Craton. Sci China Earth Sci., 42(8), 1135-1159(in Chinese).

#### 附中文参考文献

- 顾勤平,丁志峰,康清清,等,2020. 郑庐断裂带中南段及邻区基于背景噪声的瑞利波群速度层析成像.地球物理学报, 63(4):1505-1522.
- 李婷婷,刘利,范文华,等,2020.基于远震p波接收函数研究江 苏地区地壳厚度和泊松比.地震研究,196(4):82-90.
- 嵇少丞,王茜,杨文采,2009.华北克拉通泊松比与地壳厚度的 关系及其大地构造意义.地质学报,83(3):324—330.
- 邱志力,2009.中国东部新生代碱性玄武岩有关锆石巨晶地球 化学和Hf同位素:成因及其与大陆岩石圈壳一幔作用研 究(博士毕业论文).杭州:浙江大学,156-160.
- 石文杰,魏俊浩,谭俊,等,2014. 郯庐断裂带晚白垩世金成矿 作用:来自龙泉站金矿床黄铁矿 Rb-Sr年代学证据.地球 科学,39(3):325-340.
- 牛漫兰,朱光,谢成龙,等,2008. 郑庐断裂带张八岭隆起南段 花岗岩 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 岩石 学报,24(08):1839-1847.
- 牛漫兰,朱光,谢成龙,等,2010. 郯庐断裂带张八岭隆起南段 晚中生代侵入岩地球化学及其对岩石圈.岩石学报,26 (9):2783-2804.
- 徐曦,高顺莉,王兴建,等,2015.下扬子区新生代伸展构造变 形及其区域构造意义.地球科学,40(12):1968-1986.
- 王薇,朱光,张帅,等,2017.合肥盆地中生代地层时代与源区的碎屑锆石证据.地质论评,63(4):956-977.
- 张岳桥,董树文,2008. 郑庐断裂带中生代构造演化史:进展与 新认识.地质通报,27(9):1371-1390.
- 郑洪伟,李廷栋,苏刚,2020a.苏鲁造山带地壳上地幔结构层 析成像研究.地球科学,45(7):2485-2494.
- 郑洪伟,李廷栋,贺日政,2020b.长江中下游成矿带深部结构 层析成像图像揭示华北板块的东南向俯冲.地球科学, 45(11):4187-4197.
- 郑永飞,徐峥,赵子福,等,2018.华北中生代镁铁质岩浆作用 与克拉通减薄和破坏.中国科学:地球科学,48(4):379-414.
- 朱光,刘程,顾承串,等,2018. 郯庐断裂带晚中生代演化对西 太平洋俯冲历史的指示.中国科学:地球科学,48:415-435.
- 朱日祥,徐义刚,朱光,等,2012.华北克拉通破坏.中国科学: 地球科学,42(8):1135-1159.