华南陆块地壳厚度与物质组成: 基于天然地震接收函数研究

陈昌昕^{1,2,3}, 吕庆田^{1,2*}, 陈凌^{4,5,6}, 史大年^{1,2}, 严加永^{1,2}, 艾印双^{6,7}

1. 中国地质科学院, 北京 100037;
2. 自然资源部深地科学与探测技术实验室, 北京 100094;
3. 自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
4. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;
5. 中国科学院深地科学卓越创新中心, 广州 510640;
6. 中国科学院大学, 北京 100049;
7. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院地球与行星物理重点实验室, 北京 100029

* 通讯作者, E-mail: lqt@cags.ac.cn

收稿日期: 2021-04-21; 收修改稿日期: 2021-09-13; 接受日期: 2021-10-21; 网络版发表日期: 2022-01-11

国家自然科学基金项目(批准号: 41630320、92062108)、中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190012)和自然资源部深地动力学重点实验室自主(开放)研究项目(编号: J1901-16)资助

摘要 地壳厚度和物质组成与地壳形成和演化过程密切相关, 研究华南陆块地壳厚度和成分变化对深化华南陆块多期变形和深部动力学过程研究具有重要意义. 文章利用“深部探测技术与实验研究”专项(SinoProbe)在华南布设的135个高密度天然地震流动台站资料, 采用接收函数共转换点(CCP)叠加和 $H-\kappa$ 叠加方法, 开展了华南陆块地壳厚度及波速比研究, 取得如下认识: (1) 华夏地块、江南造山带及扬子地块地壳厚度及纵横波波速比(V_p/V_s)具有显著差异. 华夏地块莫霍面平均深度约为31km, V_p/V_s 比值由内陆地区1.66增加到沿海1.78, 反映其地壳成分由内陆向沿海基性程度增加, 推测与古太平洋板块俯冲影响有关. (2) 江南造山带由东向西地壳厚度由31km加深至42km, 波速比变化范围1.75~1.64, 反映其地壳酸性程度较高, 或与中生代挤压背景地壳增厚及后期伸展背景下地壳减薄作用有关. (3) 扬子地块地壳平均厚度42km, 波速比变化范围1.64~1.84, 地壳厚度与波速比呈正相关, 推测其具有较厚的基性下地壳. 根据地壳结构剖面和 V_p/V_s 差异及前人研究结果, 推测江南造山带中段与华夏地块的边界位于江山-绍兴-衡阳断裂一线, 与扬子地块的边界位于九江-石台-吉首断裂一线. 华夏地块与江南造山带交汇部位莫霍面出现小尺度起伏或与华南中生代发生的挤压-伸展构造体制转换有关.

关键词 P波接收函数, 华南陆块, 地壳厚度, 地壳成分, 块体边界

中文引用格式: 陈昌昕, 吕庆田, 陈凌, 史大年, 严加永, 艾印双. 2022. 华南陆块地壳厚度与物质组成: 基于天然地震接收函数研究. 中国科学: 地球科学, 52(4): 760–776, doi: [10.1360/SSTe-2021-0105](https://doi.org/10.1360/SSTe-2021-0105)

英文引用格式: Chen C, Lü Q, Chen L, Shi D, Yan J, Ai Y. 2022. Crustal thickness and composition in the South China Block: Constraints from earthquake receiver function. Science China Earth Sciences, 65(4): 698–713, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9858-x>

1 引言

莫霍面(莫霍洛维奇间断面)是地壳与地幔的分界面. 岩石学上, 它是中酸性地壳与基性、超基性镁铁质地幔之间的岩性界面(O'Reilly和Griffin, 2013); 地震学上, 它代表着速度与密度不连续界面(Oliver, 1982), 其深度和形态会随着下地壳或上地幔变质作用或物质交换发生变化(Griffin和O'Reilly, 1987). 莫霍面深度及地壳平均泊松比变化反映了地壳厚度及壳内平均物质组成的变化(Christensen和Mooney, 1995; Zhu和Kanamori, 2000), 包含有大陆地壳形成和构造演化信息, 对研究地壳生长及其地球动力学过程具有重要意义. 泊松比(σ)与纵横波波速比(κ)存在正相关关系, $\sigma=0.5[1-1/(\kappa^2-1)]$ (Christensen, 1996). 常见岩石类型的 κ 值从1.63~2.08不等, 其中低(<1.75)、中(1.75~1.81)和高(>1.81)波速比分别反映地壳具有酸性(长英质)、中性和基性(镁铁质)特征(Zandt和Ammon, 1995), 镁铁质成分的增加和(或)长英质成分的减少会造成波速比的增大; 部分熔融、双相介质流体成分增加也会造成波速比增大. 根据地震接收函数穿过莫霍面的一次转换波及多次波的时间和振幅信息, 可以获得莫霍面深度及地壳平均波速比或泊松比, 从而得到地壳厚度及物质组成信息(Langston, 1977; Ligorria和Ammon, 1999; Zhu和Kanamori, 2000).

华南陆块(图1a)由扬子地块和华夏地块及其两者之间的江南造山带组成. 目前, 关于其块体划分以及江南造山带的归属仍有不同认识, 不同学者在岩石学、年代学、地球化学、地球物理及同位素研究的基础上, 提出了不同的块体及边界划分观点(许靖华等, 1987; Guo等, 1989; Hsü等, 1990; Charvet等, 1996; Chen和Jahn, 1998; Shu等, 2011, 2019; Charvet, 2013; 王孝磊等, 2017; Cawood等, 2018; Yao等, 2019a, 2019b). 郭令智等(1980)提出华夏地块沿江山-绍兴断裂向扬子地块俯冲、碰撞并形成江南造山带. 此后, 有学者提出“华夏地体和扬子地体”以板溪群南界江山-绍兴(浙江)和萍乡-玉山(江西)断裂带为界(图1a中②)(许靖华等, 1987; Hsü等, 1990; Chen和Jahn, 1998; Zheng等, 2004, 2011), 也有学者依据钦杭结合带两侧基底结构、区域成矿特征及深部结构推测钦杭结合带为“扬子古陆与华夏古陆的结合带”(图1a中⑥、⑦)(水涛等, 1986; 杨明桂和梅勇文, 1997; 严加永等, 2019;

Yan J等, 2019), 另有学者根据新元古代俯冲增生洋壳痕迹为证据, 以江山-绍兴-萍乡-衡阳-双排(龙胜/桂林)(图1a中③)或者以郴州-临武为界(图1a中④)划分扬子地块和华夏地块(Wang等, 2003, 2013a, 2013b; Shu等, 2011, 2019; 舒良树, 2012; 张国伟等, 2013; Charvet, 2013; Wang等, 2014; Zhao, 2015; Cawood等, 2020). 除此之外, 也有研究者根据地壳结构和物质组成差异提出扬子地块和华夏地块以石台-九江为界(图1a中①)(He等, 2013; Song等, 2017); Guo和Gao(2018)、Guo等(2019)根据壳内重磁及物质组成差异, 推测江南造山带出现叠置双层基底, 江绍断裂为上层扬子地块基底前缘, 九江-石台为下层华夏地块基底前缘(图1a中①和③). 最近, 有研究认为江南造山带是中-新元古代时期由若干不同性质的地体组成(舒良树, 2012), 为扬子地块和华夏地块碰撞增生形成, 因此将华南陆块划分为华夏地块、江南造山带和扬子地块(Xia等, 2018; Cawood等, 2018; Yao等, 2019a, 2019b). 这其中, 江南造山带北段与扬子地块接触边界基本无异议, 以石台-九江隐伏断裂为界, 东侧与华夏地块边界清晰, 基本以江绍断裂为界. 然而, 江南造山带中段因受到沉积覆盖、地表岩浆岩出露较少和深部结构状态探测程度较低等因素, 与扬子地块及华夏地块之间的边界位置仍有较大争议(王孝磊等, 2017; Cawood等, 2018; Xia等, 2018; Yao等, 2019a, 2019b). 哪种块体和边界划分观点及构造模式能够更好的解释华南陆块地质构造演化过程也是华南研究中的热点问题.

近年来, 远震P波接收函数方法被广泛用于研究区域地壳结构和波速比(Langston, 1977; Owens等, 1984; Zandt和Ammon, 1995; Zhu和Kanamori, 2000). 前人利用接收函数方法对华南陆块地壳厚度及物质组成进行了大量研究(Ai等, 2007; Chen等, 2010; 黄晖等, 2010; Li等, 2013; He等, 2014; 于大勇等, 2016; Wei等, 2016; Song等, 2017; 张耀阳等, 2018; 韩如冰等, 2019; Guo等, 2019; Zhang等, 2021). 然而, 固定台站间距较大(一般>100km), 且分布不均; 亦或布设流动台站数量少且剖面较短等因素仍然制约着对华南不同块体组成及边界的认识. 为此, 本文利用SinoProbe专项第二项目由中国科学院地质与地球物理研究所布设于华南陆块内部135个高密度(台站间距10~15km)天然地震台站观测资料(Wei等, 2016; 张耀阳等, 2018), 使用接收函数P-SV-SH向量坐标系旋转分离方法, 进行远震P波接收函数

图1 华南陆块区域地质简图

(a) 华南陆块主要构造单元及台站布设位置图(据Shi等, 2015)。红色和蓝色三角形代表地震台站, 蓝色三角形为图3中典型地震台站。不同标号线为前人推测的江南造山带边界(②据Hsu等, 1990; ④据Zhao, 2015; ⑤~⑦据严加永等, 2019; ①和③据Shu等, 2019); 蓝色A实线为过江南造山带深反射地震剖面; 灰色实线为南北重力梯度带。(b) 本次研究中所用地震震中分布图

H - κ 和CCP叠加成像研究, 利用获得的长约1600km地壳结构图像和 V_p/V_s 分布结果, 探讨华夏地块、江南造山带和扬子地块地壳结构及物质组成, 为该地区的地质块体及边界划分提供新的约束。

2 地质背景

华南陆块(图1a)经过复杂块体聚合及陆内多期次构造演化作用, 最终形成现今基本面貌。西部以龙门山断裂为界与松潘-甘孜相连, 北部分别以襄樊-广济断裂和郯庐断裂与秦岭-大别造山带及华北克拉通相接,

南西以昌宁-马江断裂与东南亚块体相连(舒良树, 2012)。华南陆块由西北侧扬子地块、中部江南造山带及东南部华夏地块组成。扬子地块和华夏地块在新元古代时期发生碰撞拼贴, 沿两者碰撞部位形成了江南造山带(Li等, 2002; Zhao和Cawood, 2012; Cawood等, 2013; Wang等, 2013b, 2019), 在Rodinia超大陆裂解的构造背景下(Wang等, 2003; Zheng等, 2008), 华南陆块于新元古代中晚期形成一系列裂谷盆地和大量北东向双峰式花岗岩带(舒良树, 2012; 张国伟等, 2013)。早古生代受陆内造山作用影响, 表现为在雪峰山及其东部区域广泛分布的弥散性面状构造变形变质活动和褶皱

造山, 并造成上古生界上覆地层出现明显的角度不整合覆盖(舒良树, 2012; Charvet, 2013). 早中生代分别受南北两侧华北克拉通和印支陆块碰撞作用影响, 表现出强烈的挤压作用, 导致大规模变形和不整合发育, 奠定华南陆块构造基本格架基础(张国伟等, 2013; 毛建仁等, 2014); 中生代中晚期, 华南陆块由特提斯构造域向古太平洋构造域转换, 受古太平洋板块西向俯冲作用影响, 华南陆块中东部区域上形成大规模断陷盆地和伸展穹隆构造, 并伴随大规模岩浆作用(Zhou和Li, 2000; Shu等, 2019); 中生代时期, 华南陆块整体上先挤压后伸展松弛, 挤压背景导致地壳缩短和加厚, 伸展环境引发大陆岩石圈伸展和火山-岩浆活动, 引发陆壳物质重建, 奠定了华南陆块陆内构造基本格架和相应的火山-沉积地层组合(Lepvrier等, 2004; Faure等, 2014). 新生代时期, 印度大陆与欧亚大陆发生碰撞, 华南陆块以西隆升形成青藏高原, 华南陆块除周边呈现现代活动地震构造外, 其陆块内部各块体处于相对稳定状态(张国伟等, 2013).

3 数据处理

3.1 数据选取

华南陆块线性流动地震台阵观测剖面(图1a)由中国科学院地质与地球物理研究所布设于华南陆块内部135个台站组成, 观测时间从2009年12月到2011年12月, 剖面走向NW-SE约120°. 由西至东穿过龙门山构造带、四川盆地、川东褶皱带、南北重力梯度带、江南造山带、武夷山构造带, 东至福建泉州(东南沿海火山岩带), 剖面全长约1600km. 台站间距约10~15km, 观测周期均大于12个月. 选用带宽50Hz~30s/60s Guralp CMG-3ESP和50Hz~120s CMG-3T地震计, 数采为Reftek130型及72A两种型号(Wei等, 2016; 张耀阳等, 2018). 由于流动地震台阵分不同期次布设, 时间跨度较大, 需要分别选取不同时间段内的远震事件, 故涉及的地震事件较多. 经过人工挑选除去数据质量较差的事件, 最终, 从所有地震中筛选出震中距在30°~90°范围内, 震级大于6级的远震事件347个, 所有地震事件P波初至震相清晰. 从震中分布图(图1b)来看, 这些地震事件分布于研究区的不同方位, 主要分布在环太平洋地震带和欧亚地震带.

3.2 接收函数提取与计算

接收函数(Receiver Functions)采用反褶积来消除震源效应和震源附近的传播路径影响, 提取的接收函数主要反映台站下方的介质结构. 一般在P波接收函数计算(Langston, 1977)时, 将入射的平面纵波等效为震源, 采用时间域反褶积的方法(Ligorria和Ammon, 1999)来计算接收函数. 为了提高地下结构的分辨率, 我们采用了Reading(2003)提出的向量坐标系旋转分离方法(P-SV-SH坐标系)来分离直达P波和其转换S波, 通过消除地表响应来提高信噪比. 在计算过程中, 参照前人经验(Shi等, 2013)及根据反复试验结果, 选择反褶积正则化(或称“水准”)因子为0.025, 高斯滤波因子为2(Ligorria和Ammon, 1999), 以便保留足够多的高频地震信号. 经过反褶积计算, 共得到高质量接收函数4697条. 图2上图显示了典型台站按照不同后方位角排列的接收函数, 图2下图为所有台站单台叠加接收函数时间剖面.

3.3 CCP叠加成像

我们采用接收函数一次转换波(Pms)及多次转换波(PpPms和PsPms+PpSms)共转换点(CCP)叠加方法沿SE-NW 120°剖面方向对地下结构进行成像(Ducker和Sheehan, 1997), 以便获取地壳内主要速度界面的图像和整个区域内的地壳结构特征. Pms转换波延迟到与转换界面的深度及其界面上部的平均速度有关, 而转换波的振幅则与界面上下的波阻抗紧密相关. 因此, 在成像过程中, 将所有接收函数按照层状速度模型计算射线路径, 偏移到三维空间中的转换点位置并沿剖面法线方向进行叠加, 形成接收函数图像. 由于剖面穿过多个构造块体和构造带, 在接收函数成像过程中, 对不同区域台站我们选择了不同的层状速度模型(参考前人深反射地震结果), 江南造山带及其以东地壳平均速度取 $V_p=6.2\text{km s}^{-1}$ 、 $V_s=3.54\text{km s}^{-1}$, 35km以下的地幔速度取 $V_p=8.1\text{km s}^{-1}$ 、 $V_s=4.47\text{km s}^{-1}$ (Teng等, 2013; 李培等, 2015). 扬子地块地壳平均速度选择 $V_p=6.35\text{km s}^{-1}$ 、 $V_s=3.6\text{km s}^{-1}$; 45km以下选择 $V_p=8.2\text{km s}^{-1}$ 、 $V_s=4.4\text{km s}^{-1}$ (邓阳凡等, 2011; 王海燕等, 2017; 李英康等, 2019). 为了有效压制噪声, 本文在选择叠加像元的水平宽度时, 沿剖面选择叠加单元步长大小为5km, 近似等于转换波震相的第一菲涅尔

图2 接收函数计算结果

上图为典型台站(图1a中蓝色三角形)按照后方位角排列接收函数。下图为全部台站(图1a中三角形)单台叠加接收函数时间剖面,剖面方向为 120° ,台站号由左侧向右逐次递减,最左侧为139台站,最右侧为003台站

带的宽度。试验表明,这种选择可以最大程度地保留有用信息。对于地下倾斜或垂直错断结构,沿结构近

垂直方向叠加,能够获得较好的成像效果(Shi等, 2013)。

3.4 H - κ 叠加方法

H - κ 叠加成像方法(Zhu和Kanamori, 2000)是利用接收函数获取地壳厚度及地壳平均波速比的常用方法. 其基本原理为: 入射地壳的远震P波, 在Moho处会产生一次转换震相Pms和壳内多次反射和转换震相PpPms、PsPms+PpPms, 根据一次及多次转换震相之间的到时差关系, 即可计算层状介质的地壳厚度及壳内波速比. H - κ 扫描叠加方法, 通过定义振幅叠加函数:

$$S(H, \kappa) = w_1 RF(T_{Pms}) + w_2 RF(T_{PpPms}) - w_3 RF(T_{PsPms+PpPms}),$$

式中, H 和 κ 分别为假定的Moho深度与地壳平均 V_p/V_s 波速比, T_{Pms} 、 T_{PpPms} 和 $T_{PsPms+PpPms}$ 分别为对应的Moho转换震相的延迟时间, $w_i (i=1, 2, 3)$ 转换震相相应权重系数, 使用不同的权重因子来增强叠加结果的清晰度(Shi等, 2013). H - κ 扫描叠加方法, 通过搜索所有可能 H 和 κ 组合, 使叠加振幅 $S(H, \kappa)$ 最大化, 从而得到地壳厚度 H 及壳内波速比 κ 的最佳估计值. 本次研究中, 我们选择地壳厚度搜索范围为15~60km; 搜索步长0.5km; 壳内平均波速比搜索范围1.5~2, 步长0.01; 搜索得到的参数精度依靠Bootstrap自助重采样法获得. 图3显示了不同地质构造单元典型台站按震中距排列接收函数及 H - κ 叠加结果.

图3 典型台站不同震中距接收函数和 H - κ 叠加扫描结果

上图中黑色竖线为不同震相理论到时; 下图为对应的振幅归一化扫描叠加结果, 十字指示最佳估计值的位置

4 结果

4.1 CCP叠加结果

图4和图5分别为利用一次转换波(Pms)及多次转换波(PpPms和PsPms+PpSms)CCP叠加方法获得的观测剖面接收函数图像。从图中可以看出,地壳厚度沿剖面自东向西由华夏地块31km加厚到扬子地块约42km。华夏地块范围内莫霍面近水平展布,地壳厚度变化不明显,稳定在约31km;值得关注的是,在江南造山带下方壳内结构复杂,地壳厚度由31km逐步加深至约42km;扬子地块莫霍面较稳定,厚度约42km,与前人附近人工地震结果较为一致(图4c和4d, Li等, 2006; 熊

小松等, 2009, 2015; 邓阳凡等, 2011; Teng等, 2013; 李培等, 2015; 王海燕等, 2017; 李英康等, 2019; Dong等, 2020; Zhu等, 2020)。在江山-绍兴-萍乡断裂一线(衡阳)和九江-石台隐伏断裂一线(吉首)附近,东西两侧莫霍面出现明显起伏。衡阳以东莫霍面近水平展布,以西地壳逐渐加厚;吉首以西莫霍面出现了约5km的隆起,之后莫霍面近水平展布,厚度稳定在42km,吉首向东出现了莫霍深度减小。在四川盆地中部遂宁地区莫霍面陡然加深至约50km左右深度,且在莫霍面下方观测到一个倾向南东强震相带S(图4b),与盆地西部Moho相连,这一结构在Sinoprobe深地震反射结果中同样明显(Gao等, 2016),并被解释为新元古代俯冲遗迹;在

图4 CCP叠加成像方法获得的地壳结构结果图像

(a) 沿剖面的地形起伏,红色三角形代表地震台站。(b) Pms波接收函数成像结果(0.01~1Hz)。黑色实线代表地震莫霍面,虚线H指示四川盆地壳内强振幅信号,S代表上地幔正信号;横轴表示沿剖面的水平距离,以台站070为中心,SE方向为正。(c)和(d)分别是李英康等(2019)和Deng等(2014)给出的宽角反射/折射地震研究结果

图 5 多次波CCP叠加成像方法获得的地壳结构结果图像

(a) 地形起伏剖面; (b) PpPms接收函数成像结果(0.03~0.4Hz); (c) PpSms+PsPms接收函数成像结果(0.01~0.4Hz)

盆地下方25km处, 观测到一个可连续追踪的强信号带H(图4b), 张建勇等(2019)利用接收函数主成分分析方法研究川中台站时认为这一强振幅信号为一真实倾斜界面; 范军等(2015)在利用接收函数研究四川盆地地壳结构时也发现此强信号, 并解释为下地壳上界面. 图5b和5c为不同频带多次转换波PpPms波和PpSms+PsPms波成像结果, 其中的莫霍结构特征与图4b中一次转换波Pms成像得出的结果十分一致, 说明我们对莫霍面的解释是可靠的. 多次波成像结果显示莫霍面在雪峰山一带信号较弱且不连续, 推测与该地区出现

渐变莫霍面以及界面起伏变化大、叠加过程中相干性较差有关.

4.2 H - κ 叠加结果

图6为采用 H - κ 叠加方法(Zhu和Kanamori, 2000)获得的沿剖面地壳厚度和 V_p/V_s 速度比. 整体来看, 从东南至西北, 地壳厚度及 V_p/V_s 速度比变化显著: 华夏地块地壳厚度32km左右, 地壳厚度变化较小, V_p/V_s 速度比由东部福建沿海地区1.78向西逐渐减小至约1.66, 但在政和-大埔断裂带附近波速比出现小幅变化, 数

图 6 $H-k$ 叠加结果

(a) 台站分布及地形剖面. 红色三角形代表台站位置; (b) $H-k$ 叠加波速比(V_p/V_s)趋势图; (c) 各个台站地壳厚度结果, 红色虚线为上文CCP叠加结果. 两条竖虚线分别对应九江-石台隐伏断裂和绍兴-江山-萍乡断裂. (b)和(c)中横轴表示沿剖面的水平距离, 以台站070为中心, SE方向为正. 图中黑色圆圈表示Pms和转换震相PpPms、PsPms+PpSms叠加能量搜索获得地壳厚度, 绿色菱形表示Pms和转换震相PpPms获得地壳厚度, 蓝色倒三角形表示Pms和转换震相PsPms+PpSms获得地壳厚度

值超过1.8, 江南造山带东界衡阳地区地壳厚度及波速比存在小尺度变化; 江南造山带由东向西, 地壳厚度逐渐增加, 由31km增加至约42km, V_p/V_s 比值1.7上下波动, 江南造山带西界吉首地区莫霍面出现起伏, V_p/V_s 变化剧烈, 由1.75减小至1.64; 扬子地块地壳厚度约42km, 四川盆地中部地区地壳厚度变化剧烈, 莫霍面加深至50km, 向西至龙门山地区抬升至约42km, V_p/V_s 由东部1.64增大至山前地区1.84左右, 后逐渐减小至1.72.

图6c红色虚线为CCP叠加剖面结果, 从图中可以

清晰地发现, 两种方法获得的地壳厚度结果较为一致, 可以相互印证.

5 分析和讨论

5.1 华夏地块地壳结构与物质组成

构造运动会强烈改造地壳结构和物质组成, 挤压环境引发褶皱和逆冲推覆会导致地壳缩短和增厚; 伸展作用会引发大量岩浆活动并产生断陷盆地. 在图4~6剖面上我们可以看到, 绍兴-江山-萍乡断裂一线

(衡阳)以东整体地壳厚度约31km, 与全球陆壳平均厚度41.1km有较大差异, 与伸展地区地壳厚度30.5km较为接近(Christensen和Mooney, 1995). 新元古代, 华夏与扬子地块沿江南造山带发生碰撞; 华南陆块早古生代受陆内造山作用影响; 中生代以来, 华夏地块东部受到古太平洋板块俯冲影响, 南部受到印支陆块俯冲作用影响, 北部受到了扬子地块与华北地块俯冲碰撞的影响, 西部新生代受到了印度与欧亚大陆碰撞远程效应的影响; 华夏地块处在多板块汇聚中心, 这些构造运动也不同程度活化新元古代碰撞拼贴部位, 并导致地壳多次隆升缩短(董树文等, 2007; 毛建仁等, 2014). 华夏地块于中生代(约175Ma)由古特提斯构造域与向古太平洋构造域转换(董树文等, 2007), 受太平洋俯冲角度和(或)方向变化的影响, 地表广泛分布中生代不同时期褶皱变形、推覆体、NW向断陷盆地和不同构造背景岩浆岩, 表明华夏地块多次发生挤压-伸展构造背景转换(Sun等, 2007; 舒良树, 2012; 毛建仁等, 2014; Shi等, 2015; Dong等, 2020; Li等, 2020). Li等(2018, 2020)通过对华夏地区地球物理和地质综合研究推测古太平洋板块分别于晚侏罗-早白垩纪、白垩纪晚期发生回撤, 在华南陆块形成伸展构造背景; 而有学者则认为是俯冲方向发生改变, 形成伸展构造背景(Sun等, 2007; 李培等, 2015). 广泛共识是伸展构造背景环境下, 软流圈上涌引发上覆大陆岩石圈地幔部分熔融, 热物质向上运动, 在华夏地块下地壳发生底侵作用, 且在伸展减压背景下造成下地壳减薄(毛建仁等, 2014; Dong等, 2020; Zhang等, 2021). Lü等(2015)利用反射地震曾揭示长江中下游地区于中生代时期发生拆沉作用, 最终造成地壳减薄. 底侵作用造成镁铁质下地壳增厚, 镁铁质成分的增加会造成波速比增大; 拆沉作用导致基性下地壳减薄, 并造成波速比降低(Zandt和Ammon, 1995; Christensen, 1996). 然而, 华夏地块(图4~6)Moho面近水平展布, V_p/V_s 波速比在福建东部沿海地区约1.78, 由东向西逐渐减小, 衡阳地区降低到约1.66左右, 表现出从内陆偏酸性地壳向沿海偏基性地壳过渡的特征(Li等, 2013; Wei等, 2016), 根据Ji等(2009)的研究, 波速比增大与长英质上地壳减薄或镁铁质下地壳增厚有关, 本文剖面显示华夏地块莫霍面近水平展布, 剖面附近最新宽角反射/折射地震也显示长英质上地壳近水平展布, 在中下地壳出现高速异常(Lin等, 2021). 因此, 我们推测波速比增加是由于下

地壳的基性程度增加引起. 中生代时期, 古太平洋板块俯冲板片东浅西深, 对地壳的改造作用由沿海向内陆减弱, 造成华夏地块下地壳由沿海向内陆基性程度降低. 衡阳地区东部Moho面呈小尺度起伏, 熊绍柏(1993)利用深反射地震曾证实这一现象, 我们认为这与中生代古太平洋多次俯冲角度变化或回撤造成挤压与伸展背景转换有关.

政和-大埔断裂带走向NE-SW, 是华夏地块内一条重要的高角度逆冲断裂带(舒良树, 2012), 关于政和-大埔断裂是不是华夏地块内部中生代拼贴碰撞带具有较大争议. Chen和Jahn(1998)通过对华夏地块内一系列花岗岩片麻岩和高级变质岩Nd模式年龄研究发现断裂以东相较于西部较年轻, 因此大致沿政和-大埔断裂划分华夏地块为东华夏和西华夏. 有学者研究发现, 中生代燕山运动早期(180~140Ma)岩浆活动主要发生在西华夏; 燕山运动晚期(140~90Ma)主要出露在东华夏(Zhou和Li, 2000; Zheng等, 2004; Xu和Xie, 2005). 之后, Xu等(2007)利用东华夏和西华夏不同地区锆石进行年代学和Hf同位素模式年龄研究地壳演化过程, 推测东华夏和西华夏代表着独立的微陆块, 于中生代燕山运动发生走滑运动沿政和-大埔断裂拼贴在一起. 然而, Shu等(2011)对断裂带内大量基性和超基性岩石进行年代学研究, 发现其年龄范围为860~800Ma, 认为政和-大埔断裂或为新元古代南华裂谷带的一部分. 大量研究发现断裂带两侧具有相似的元古代变质岩基底(福建省地质矿产局, 1985; Yu等, 2010; Wang等, 2013a, 2013b). 通过本文图4~6中的剖面可以观察到, 在断裂附近出现 V_p/V_s 大于1.8的高异常. 理论上, V_p/V_s 增大与上覆沉积层具有较低的S波速度或者上地幔部分熔融造成双相介质流体成分增加有关(Walck, 1988; Ji等, 2009), 然而断裂带附近被大面积中生代火成岩覆盖, 并无厚的沉积地层分布(Shu等, 2019), 因此我们推测造成该地区地壳基性程度增高、 V_p/V_s 增大的可能原因与超量玄武岩底侵有关. Dong等(2020)对深反射数据进行研究, 认为政和-大埔断裂带倾向北西, 宽约4~7km, 且切穿莫霍面. 如果这一结论正确, 中生代时期, 挤压-构造背景转换导致幔源热物质上涌, 在断裂带附近形成较厚基性中下地壳, 并沿着断裂带上涌, 则会造成断裂带附近形成大量基岩墙及可探测物理场特征. 然而, 韩松等(2016)根据大地电磁研究结果提出断裂由一系列近平行分布、倾向南东高角度陡倾断裂组

成, 在壳内深部没有明显的低阻破碎带; Zhang等(2020)对三条横穿政和-大埔断裂大地电磁剖面进行研究, 仅在断裂带以西约100km处发现有明显低阻破碎带存在. 除此之外, 前人大量天然地震研究表明断裂附近并无大范围波速异常区出现(Li等, 2013; Ai等, 2007; 黄晖等, 2010; 陈安国等, 2019), 因此我们推断政和-大埔断裂并不是一条切穿地壳断裂, 断裂带附近出现波速比高异常与上地幔局部熔融增加了下地壳基性程度有关. 根据本文CCP叠加地壳结构图像显示断裂带正下方Moho略微起伏且有明显增厚现象也佐证了这一结论. 既然政和-大埔断裂不是一条切穿地壳断裂, 那么以政和-大埔断裂作为中生代东西华夏走滑拼贴边界便不成立.

5.2 扬子地块地壳结构与物质组成

九江-石台隐伏断裂一线(吉首)出现莫霍面起伏, V_p/V_s 变化剧烈, 且东西两侧地壳厚度及波速比横向变化显著. 朱介寿等(1997)通过深地震反射剖面揭示雪峰山以西地壳厚度38km, 以东莫霍面厚度仅有32km, 与本文得到地壳厚度横向变化较为一致. 根据图4和5结果, 我们可以看到吉首地区西部梵净山地壳厚度出现明显隆起, 扬子地块与华夏地块沿江南造山带在新元古代发生碰撞, 早古生代及中生代发生陆内造山已被广泛接受(张国伟等, 2013; Wang等, 2014), 挤压构造造成地壳缩短隆升. 李英康等(2019)则通过对宽角反射/折射和深地震反射资料联合解释, 推测梵净山地区受到东扬子块体下地壳俯冲作用影响发生明显抬升(图4d). 四川盆地位于扬子克拉通西北方向, 是中国西南地区唯一的大型中生代前陆叠合盆地, 以其周缘广泛分布的复杂褶皱带著称, 是中国陆内汇聚构造体系的重要组成部分(图1). P波接收函数 $H\text{-}\kappa$ 和CCP偏移成像结果(图4~6)显示, 四川盆地下方莫霍面较为稳定, 深度保持在约42km, 波速比变化范围1.64~1.84; 四川盆地中部遂宁地区Moho加深至约50km, 且波速比增大至1.82. 遂宁以东波速比由东向西逐渐增大, 以西波速比逐渐减小. 在横跨四川盆地人工地震剖面中, Moho面具有相似特征(李英康等, 2019). Wang等(2018)同样发现与龙门山断裂带周缘相比, 盆地内部波速比较大, 而靠近断裂带处波速比较小, 与我们结果相互印证. 盆地中部遂宁波速比较大与稳定克拉通内存在较厚的镁铁质下地壳(Christensen和Mooney,

1995)及上覆较厚沉积层(熊小松等, 2015)具有较低的S波速度有关. 扬子地块地壳厚度与波速比呈现出正相关, 亦反映了扬子地块由克拉通边缘向内部稳定性逐渐增加的趋势.

5.3 江南造山带中段地壳结构、物质组成及其边界

江南造山带处于扬子地块和华夏地块之间, 呈线性隆起, 为一套新元古代沟-弧-盆体系, 是扬子地块和华夏地块碰撞拼贴的产物(王孝磊等, 2017). 造山带主体呈现为走向NEE的大型逆冲断层-褶皱弧形构造体系, 陆内变形核部为元古界构造隆升带, 自印支中晚期至燕山期呈不对称扇形分布(张国伟等, 2013). 目前, 对于江南造山带的范围仍有不同认识. 江南造山带北段与华夏地块以江绍断裂为界, 与扬子地块以九江-石台隐伏断裂为界已被广为接受(王孝磊等, 2017). 然而, 江南造山带中段因受到沉积覆盖、地表岩浆岩出露较少和深部结构状态探测程度较低等因素制约, 与扬子地块及华夏地块边界如何界定, 仍具有较大争议. 从本文高精度接收函数结果(图4和6)可以发现块体间地壳厚度和物质组成存在差异. 衡阳及吉首东西两侧莫霍面厚度及地壳泊松比具有较大差异. 与华夏地块和扬子地块相比, 江南造山带具有较低的波速比, 在地壳厚度方面, 江南造山带表现出过渡性质, 由华夏30km地壳厚度过渡到扬子地块42km地壳厚度. 因此, 我们推测江南造山带中段东西两侧与华夏地块和扬子地块分别位于江山-绍兴-衡阳断裂和九江-石台-吉首断裂一线为界.

南北重力梯度带(图1a灰色实线)与本文中剖面交于扬子地块和江南造山带交汇部位, 前人研究发现南北重力梯度带东西两侧在地形起伏、地表热流值、地壳厚度、莫霍温度和岩石圈厚度存在巨大差异现象(Chen等, 2010; Sun等, 2013; Li等, 2014; Deng和Levandowski, 2018), 是什么原因造成东西两侧具有如此大的差异仍是一个有待研究的问题. 本文研究发现重力梯度带东西两侧莫霍面深度存在差异, 重力梯级带以东地壳厚度小于40km且逐渐减薄稳定至约31km, 以西扬子地块莫霍面近水平展布, 地壳厚度约42km, 然而, 重力梯度带西部邻区莫霍出现约5km隆起, 因此仅仅以地壳厚度差异作为梯度带存在依据略显牵强. 由于坚硬扬子地块阻挡, 江南造山带强烈挤压作用导

致重力梯度带西部邻区莫霍出现隆起(图4b), 同时, 可以发现梯度带以东华南陆块受古太平洋俯冲作用及其远程效应影响(Zhou和Li, 2000; Li等, 2018, 2020; Dong等, 2020), 因此, 在伸展构造背景下, 造成重力梯度带以东地区地壳减薄明显, 在重力梯度带两侧形成了莫霍面深度迥异的地壳结构。

在不同的构造背景下, 地壳厚度与波速比呈现出不同的对应关系。如上文所述, 波速比与镁铁质含量成正比, 与长英质成分含量高低成反比(Zandt和Ammon, 1995; Ji等, 2009)。在挤压环境下, 相比于铁镁质下地壳, 长英质上地壳软弱带易发生变形, 形成褶皱及推覆构造, 地壳增厚, 从而造成地壳波速比降低; 在伸展构造背景下, 波速比会随伸展作用不同阶段发生变化, 伸展环境容易发生下地壳底侵作用, 使地壳基性程度增加, 造成波速比增大且地壳增厚(Christensen和Mooney, 1995; Ji等, 2009)。本文结果显示江南造山带莫霍面变化幅度较大, 波速比变化幅度较小(图4~6), 我们推测江南造山带曾发生下地壳减薄或上地壳增厚过程。黄晖等(2010)对本文剖面北部的长江中下游地区进行研究, 发现江南断裂和江绍断裂之间江南造山带地壳厚度和波速比均异于东部华夏地块和西部扬子地块, 横波分裂结果也显示出三个块体的各向异性结构具有显著差异。前人利用卫星重力(Guo和Gao, 2018), 天然地震接收函数(He等, 2013; Zhang等, 2021)对华南陆块地壳结构和物质组成进行研究, 并提出中生代陆内造山运动使得地壳缩短增厚, 且增厚作用主要发生在上地壳, 多期次的构造作用使得江南造山带具有较厚的上地壳及较低的地壳波速比。尽管如此, 是何原因造成了江南造山带出现相较于扬子地块和华夏地块较低波速比以及由东向西逐步加厚地壳目前还没有解释。Lü等(2015)利用深反射地震对江南造山带北段长江中下游地区进行研究, 发现了上下地壳拆离形成的巨型“鳄鱼嘴”构造, 该构造由两组巨型逆冲断裂组成, 一直延伸到中地壳脆韧转换带。“鳄鱼嘴”构造作为一种典型的构造模式, 世界范围内出现在欧洲的华力西(Variscan)造山带、阿尔卑斯(Alps)造山带以及比利牛斯(Pyrenees)造山带中。已有研究表明, “鳄鱼嘴”构造在壳内拆离带发生破裂形成, 与大陆地壳的挤压环境相关, 但是在造山伸展垮塌阶段, Moho结构的平衡和再调整会造成“下颚”构造的破坏或改造。颜丹平等(2018)对江南造山带及其东西部

扬子地块和华夏地块不同构造单元进行综合研究发现, 江南造山带中生代逆冲断层-褶皱构造体系具有典型造山带构造变形样式, 且变形时间为中生代中晚期。本文剖面附近, 前人深反射地震剖面(图1a中A)研究结果(Dong等, 2020)显示, 江南造山带西部侏罗纪、三叠纪地层出现了明显的褶皱变形, 且深反射剖面显示在江南造山带下出现大型拆离断层, 西部最远端到达齐岳山(Li等, 2019)。在衡阳以西开始出现下地壳增厚, Moho面反射形态较复杂, 且在中下地壳(约21km)出现大的拆离构造(图7), 向西延伸。根据本文结果及前人研究, 本文认为江南造山带拆离现象由若干深断裂组成, 形成于中生代侏罗纪挤压背景, 可能与古太平洋板块挤压应力的远程效应有关(舒良树, 2012; 毛建仁等, 2014; Li等, 2018)。

本文观测结果表明, 江南造山带、华夏地块和扬子地块在地壳厚度及物质组成方面都存在着显著差异, 这种变化可能反映了华南陆块东部不同地块不同构造演化阶段具有不同的构造变形机制。据此, 我们提出华南陆块东部晚中生代陆内伸展变形构造模式(图8)如下。

在中生代晚期, 随着古太平洋板块的回撤, 华南陆块构造背景由挤压向伸展状态转换(Zheng等, 2004; Li等, 2019; Dong等, 2020)。在华南陆块东部, 板片回撤东向移动, 伸展作用造成地壳厚度大幅减薄, 伴随地幔物质上涌, 华夏地块东部地区发生强烈底侵作用, 导致下地壳基性程度增加。华夏地块西部受地幔物质上涌强烈影响, 引发陆壳大尺度的伸展作用和广泛的岩浆活动, 造成地壳明显减薄, 形成大量高分异花岗岩。华南陆块中西部的江南造山带开始垮塌, 受地幔上涌作用影响, 增厚的“山根”发生减薄, 江南造山带内Moho面的深度自东向西逐渐加深, 指示了地幔上涌的影响由东向西减弱。此外, 华南陆块在中生代晚期强烈伸展之前经历了多期挤压变形, 江南造山带的上地壳发生逆冲堆垛并不断增厚, 致使江南造山带波速比较华夏地块和扬子地块低。

6 结论

本文利用改进后的接收函数向量坐标系旋转分离方法, 处理了华南陆块135个流动台站资料, 采用接收函数 $H-\kappa$ 叠加及CCP叠加成像两种方法, 对华南区域莫

图7 隆回-衡阳深反射地震剖面
据Dong等(2020)修改

图8 华南东部晚中生代陆内伸展变形构造模式图

霍面结构及不同块体壳内平均物质组成进行了探讨,取得以下认识:

(1) 华南陆块地壳厚度由东至西阶梯状加深,波速比具有显著差异。华夏地块莫霍面平均深度约为31km,纵横波波速比(V_p/V_s)由陆内衡阳地区1.66增加到沿海1.78,推测地壳基性程度向海洋方向增加与古太平洋板块俯冲影响范围有关。江南造山带由东向西莫霍面深度缓慢增加,地壳厚度由31km过渡至42km,波速比变化范围1.75~1.64,较低的波速比反映其地壳酸性程度较高,或与中生代挤压背景下发生上下地壳拆离增厚及后期伸展减薄作用有关。扬子板块地壳平均厚度42km,波速比变化范围1.64~1.84,地壳厚度与波速比呈正相关,与其具有较厚基性下地壳有关。

(2) 我们推测江南造山带中段与扬子地块的边界位于九江-石台-吉首断裂一线,与华夏地块的边界位于江山-绍兴-衡阳断裂一线。华夏地块与江南造山带交汇部位莫霍面出现小尺度起伏或与华南中生代发生的挤压-伸展构造转换有关。

(3) 华南陆块各块体不同构造演化阶段具有不同演化机制及构造特征说明早期构造运动对江南造山带及其周缘地壳后期构造变形具有重要影响。

致谢 中国科学院地质与地球物理研究所地震阵列实验室的同行参与野外数据采集,中国地质科学院陈宣华和李秋生研究员、张耀阳和李春麟博士关于本文进行多次有益交流,在此一并表示感谢。本文的部分图件由GMT软件绘制。

参考文献

- 陈安国, 吕庆田, 杜建国, 严加永. 2019. 华南地壳及壳幔过渡带泊松比及其地质意义. *中国地质*, 46: 750–758
- 邓阳凡, 李守林, 范蔚茗, 刘佳. 2011. 深地震测深揭示的华南地区地壳结构及其动力学意义. *地球物理学报*, 54: 2560–2574
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. *地质学报*, 81: 1449–1461
- 范军, 朱介寿, 江晓涛, 吴朋. 2015. 利用接收函数方法研究四川地区地壳结构. *地震*, 35: 65–76
- 福建省地质矿产局. 1985. 福建省区域地质志. 北京: 地质出版社. 610
- 郭令智, 施央申, 马瑞士. 1980. 华南大地构造格架和地壳演化. 国际交流地质文集(1). 北京: 地质出版社. 109–116
- 韩如冰, 李秋生, 徐义贤, 张洪双, 陈昊, 郎超, 吴庆宇, 王晓冉. 2019. 南岭-武夷交汇区的深部背景及地壳泊松比. *地球物理学报*, 62: 2477–2489
- 韩松, 刘国兴, 韩江涛. 2016. 华南地区进贤-柘荣剖面深部电性结构. *吉林大学学报(地球科学版)*, 46: 1837–1846
- 黄晖, 米宁, 徐鸣洁, 王良书, 李华, 于大勇. 2010. 福建地区地壳上地幔S波速度结构与泊松比. *高校地质学报*, 16: 465–474
- 李英康, 高建伟, 韩健, 杨予鄂. 2019. 扬子块体两侧造山带地壳推覆的地球物理证据及其地质意义. *中国科学: 地球科学*, 49: 687–705
- 李培, 金星, 王善雄, 蔡辉腾. 2015. 福建邵武-南平-平潭深地震测深剖面的地壳速度结构及其构造意义. *中国科学: 地球科学*, 45: 1757–1767
- 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏. 2014. 华南中生代构造-岩浆活动研究: 现状与前景. *中国科学: 地球科学*, 44: 2593–2617
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. *地质通报*, 31: 1035–1053
- 水涛, 徐步台, 梁如华, 邱郁双. 1986. 绍兴-江山古陆对接带. *科学通报*, 31: 444–448
- 王海燕, 高锐, 卢占武, 李文辉, 郭华, 熊小松, 鄧少英, 李洪强, 赵玉莲. 2017. 四川盆地深部地壳结构-深地震反射剖面探测. *地球物理学报*, 60: 2913–2923
- 王孝磊, 周金城, 陈昕, 张凤凤, 孙梓铭. 2017. 江南造山带的形成与演化. *矿物岩石地球化学通报*, 36: 714–735
- 熊绍柏. 1993. 中国东南地区地幔上涌的地球物理证据//1993年中国地球物理学会第九届学术年会. 中国湖南长沙. 1
- 熊小松, 高锐, 李秋生, 卢占武, 王海燕, 李文辉, 管焯. 2009. 深地震探测揭示的华南地区莫霍面深度. *地球学报*, 30: 774–786
- 熊小松, 高锐, 张季生, 王海燕, 郭良辉. 2015. 四川盆地东西陆块中下地壳结构存在差异. *地球物理学报*, 58: 2413–2423
- 许靖华, 孙枢, 李继亮. 1987. 是华南造山带而不是华南地台. *中国科学B辑*, 10: 1107
- 严加永, 吕庆田, 罗凡, 陈安国, 叶高峰, 张永谦, 张昆, 赵金花, 张冲, 刘振东. 2019. 钦杭何在? 来自综合地球物理探测的认识. *中国地质*, 46: 690–703
- 颜丹平, 邱亮, 陈峰, 李林, 赵磊, 杨文心, 张翼西. 2018. 华南地块雪峰山中生代板内造山带构造样式及其形成机制. *地学前缘*, 25: 1–13
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征. *华南地质与矿产*, 3: 52–59
- 于大勇, 米宁, 黄晖, 黄周传, 李华, 王良书, 徐鸣洁. 2016. 华南壳幔结构与动力学的宽频地震观测研究. *地质科学*: 99–115
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 李三忠, 董云鹏, 刘少峰, 何登发, 程顺有, 鲁如魁, 姚安平. 2013. 中国华南大陆构造与问题. *中国科学: 地球科学*, 43: 1553–1582
- 张建勇, 陈凌, 王旭. 2019. 基于接收函数主成分分析法的地壳结构研究. *中国科学: 地球科学*, 49: 822–837
- 张耀阳, 陈凌, 艾印双, 姜明明, 许卫卫, 申中寅. 2018. 利用S波接收函数研究华南块体的岩石圈结构. *地球物理学报*, 61: 138–149
- 朱介寿, 曹家敏, 李显贵, 周兵. 1997. 中国及其邻区地球三维结构初始模型的建立. *地球物理学报*, 40: 627–648
- Ai Y, Chen Q, Zeng F, Hong X, Ye W. 2007. The crust and upper mantle structure beneath Southeastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 260: 549–563
- Cawood P A, Wang Y, Xu Y, Zhao G. 2013. Locating South China in Rodinia and Gondwana: A fragment of greater India lithosphere? *Geology*, 41: 903–906
- Cawood P A, Zhao G, Yao J, Wang W, Xu Y, Wang Y. 2018. Reconstructing South China in Phanerozoic and Precambrian supercontinents. *Earth-Sci Rev*, 186: 173–194
- Cawood P A, Wang W, Zhao T, Xu Y, Mulder J A, Pisarevsky S A, Zhang L, Gan C, He H, Liu H, Qi L, Wang Y, Yao J, Zhao G, Zhou M F, Zi J W. 2020. Deconstructing South China and consequences for reconstructing Nuna and Rodinia. *Earth-Sci Rev*, 204: 103169
- Charvet J, Shu L, Shi Y, Guo L, Faure M. 1996. The building of south China: Collision of Yangzi and Cathaysia blocks, problems and tentative answers. *J Southeast Asian Earth Sci*, 13: 223–235
- Charvet J. 2013. The Neoproterozoic-Early Paleozoic tectonic evolution of the South China Block: An overview. *J Asian Earth Sci*, 74: 198–209
- Chen J, Jahn B. 1998. Crustal evolution of Southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284: 101–133
- Chen Y, Niu F, Liu R, Huang Z, Tkalčić H, Sun L, Chan W. 2010. Crustal structure beneath China from receiver function analysis. *J Geophys Res*, 115: B03307
- Christensen N I. 1996. Poisson's ratio and crustal seismology. *J Geophys Res*, 101: 3139–3156
- Christensen N I, Mooney W D. 1995. Seismic velocity structure and

- composition of the continental crust: A global view. *J Geophys Res*, 100: 9761–9788
- Deng Y, Levandowski W. 2018. Lithospheric alteration, intraplate crustal deformation, and topography in Eastern China. *Tectonics*, 37: 4120–4134
- Deng Y, Zhang Z, Badal J, Fan W. 2014. 3-D density structure under South China constrained by seismic velocity and gravity data. *Tectonophysics*, 627: 159–170
- Dong S, Li J, Cawood P A, Gao R, Zhang Y, Xin Y. 2020. Mantle influx compensates crustal thinning beneath the Cathaysia Block, South China: Evidence from SINOPROBE reflection profiling. *Earth Planet Sci Lett*, 544: 116360
- Dueker K G, Sheehan A F. 1997. Mantle discontinuity structure from midpoint stacks of converted P to S waves across the Yellowstone hotspot track. *J Geophys Res*, 102: 8313–8327
- Faure M, Lepvrier C, Nguyen V V, Vu T V, Lin W, Chen Z. 2014. The South China block-Indochina collision: Where, when, and how? *J Asian Earth Sci*, 79: 260–274
- Gao R, Chen C, Wang H, Lu Z, Brown L, Dong S, Feng S, Li Q, Li W, Wen Z, Li F. 2016. SINOPROBE deep reflection profile reveals a Neo-Proterozoic subduction zone beneath Sichuan Basin. *Earth Planet Sci Lett*, 454: 86–91
- Griffin W L, O'Reilly S Y. 1987. Is the continental Moho the crust-mantle boundary? *Geology*, 15: 241
- Guo L, Gao R, Shi L, Huang Z, Ma Y. 2019. Crustal thickness and Poisson's ratios of South China revealed from joint inversion of receiver function and gravity data. *Earth Planet Sci Lett*, 510: 142–152
- Guo L, Gao R. 2018. Potential-field evidence for the tectonic boundaries of the central and western Jiangnan belt in South China. *Precambrian Res*, 309: 45–55
- Guo L, Shi Y, Lu H, Ma R, Dong H, Yang S. 1989. The pre-Devonian tectonic patterns and evolution of South China. *J Southeast Asian Earth Sci*, 3: 87–93
- He C, Dong S, Santosh M, Chen X. 2013. Seismic evidence for a geosuture between the Yangtze and Cathaysia Blocks, South China. *Sci Rep*, 3: 2200
- He R, Shang X, Yu C, Zhang H, Van der Hilst R D. 2014. A unified map of Moho depth and Vp/Vs ratio of continental China by receiver function analysis. *Geophys J Int*, 199: 1910–1918
- Hsü K J, Li J, Chen H, Wang Q, Sun S, Şengör A M C. 1990. Tectonics of South China: Key to understanding West Pacific geology. *Tectonophysics*, 183: 9–39
- Ji S, Wang Q, Salisbury M H. 2009. Composition and tectonic evolution of the Chinese continental crust constrained by Poisson's ratio. *Tectonophysics*, 463: 15–30
- Langston C A. 1977. Corvallis, Oregon, crustal and upper mantle receiver structure from teleseismic P and S waves. *Bull Seismol Soc Am*, 67: 713–724
- Lepvrier C, Maluski H, Van Tich V, Leyreloup A, Truong Thi P, Van Vuong N. 2004. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son Belt and Kontum Massif); implications for the geodynamic evolution of Indochina. *Tectonophysics*, 393: 87–118
- Li J, Cawood P A, Ratschbacher L, Zhang Y, Dong S, Xin Y, Yang H, Zhang P. 2020. Building Southeast China in the late Mesozoic: Insights from alternating episodes of shortening and extension along the Lianhuashan fault zone. *Earth-Sci Rev*, 201: 103056
- Li J, Dong S, Cawood P A, Zhao G, Johnston S T, Zhang Y, Xin Y. 2018. An Andean-type retro-arc foreland system beneath northwest South China revealed by SINOPROBE profiling. *Earth Planet Sci Lett*, 490: 170–179
- Li J, Dong S, Zhang Y, Zhao G, Johnston S T, Cui J, Xin Y. 2016. New insights into Phanerozoic tectonics of south China: Part 1, polyphase deformation in the Jiuling and Lianyunshan domains of the central Jiangnan Orogen. *J Geophys Res-Solid Earth*, 121: 3048–3080
- Li P, Li H. 2015. Geochronological, sedimentary, structural, and metallogenic characteristics of Southeast China during the Mesozoic: A general review. *Int J Geosci*, 06: 1032–1047
- Li Q, Gao R, Wu F T, Guan Y, Ye Z, Liu Q, Kuo-Chen H, He R, Li W, Shen X. 2013. Seismic structure in the Southeastern China using teleseismic receiver functions. *Tectonophysics*, 606: 24–35
- Li S, Mooney W D, Fan J. 2006. Crustal structure of mainland China from deep seismic sounding data. *Tectonophysics*, 420: 239–252
- Li S, Suo Y, Li X, Zhou J, Santosh M, Wang P, Wang G, Guo L, Yu S, Lan H, Dai L, Zhou Z, Cao X, Zhu J, Liu B, Jiang S, Wang G, Zhang G. 2019. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Earth-Sci Rev*, 192: 91–137
- Li Y, Gao M, Wu Q. 2014. Crustal thickness map of the Chinese mainland from teleseismic receiver functions. *Tectonophysics*, 611: 51–60
- Li Z X, Li X, Zhou H, Kinny P D. 2002. Grenvillian continental collision in south China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. *Geology*, 30: 163–166
- Ligorria J P, Ammon C J. 1999. Iterative deconvolution and receiver-function estimation. *Bull Seismol Soc Am*, 89: 1395–1400
- Lin J, Xu T, Cai H, Lü Q, Bai Z, Deng Y, Zhang Y, Huang M, Badal J, Jin X. 2021. Crustal velocity structure of Cathaysia Block from an active-source seismic profile between Wanzai and Hui'an in SE China. *Tectonophysics*, 811: 228874
- Lü Q, Shi D, Liu Z, Zhang Y, Dong S, Zhao J. 2015. Crustal structure

- and geodynamics of the Middle and Lower reaches of Yangtze metallogenic belt and neighboring areas: Insights from deep seismic reflection profiling. *J Asian Earth Sci*, 114: 704–716
- Oliver J. 1982. Changes at the crust-mantle boundary. *Nature*, 299: 398–399
- O'Reilly S Y, Griffin W L. 2013. Moho vs crust-mantle boundary: Evolution of an idea. *Tectonophysics*, 609: 535–546
- Owens T J, Zandt G, Taylor S R. 1984. Seismic evidence for an ancient rift beneath the Cumberland Plateau, Tennessee: A detailed analysis of broadband teleseismic P waveforms. *J Geophys Res*, 89: 7783–7795
- Reading A. 2003. Improved inversion for seismic structure using transformed, S-wavevector receiver functions: Removing the effect of the free surface. *Geophys Res Lett*, 30, doi: 10.1029/2003GL018090
- Shi D, Lü Q, Xu W, Yan J, Zhao J, Dong S, Chang Y. 2013. Crustal structure beneath the middle-lower Yangtze metallogenic belt in East China: Constraints from passive source seismic experiment on the Mesozoic intra-continental mineralization. *Tectonophysics*, 606: 48–59
- Shi W, Dong S, Zhang Y, Huang S. 2015. The typical large-scale superposed folds in the central South China: Implications for Mesozoic intracontinental deformation of the South China Block. *Tectonophysics*, 664: 50–66
- Shu L S, Faure M, Yu J H, Jahn B M. 2011. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia. *Precambrian Res*, 187: 263–276
- Shu L, Wang B, Cawood P A, Santosh M, Xu Z. 2015. Early Paleozoic and Early Mesozoic intraplate tectonic and magmatic events in the Cathaysia Block, South China. *Tectonics*, 34: 1600–1621
- Shu L, Wang J, Yao J. 2019. Tectonic evolution of the eastern Jiangnan region, South China: New findings and implications on the assembly of the Rodinia supercontinent. *Precambrian Res*, 322: 42–65
- Song P, Zhang X, Liu Y, Teng J. 2017. Moho imaging based on receiver function analysis with teleseismic wavefield reconstruction: Application to South China. *Tectonophysics*, 718: 118–131
- Sun W, Ding X, Hu Y H, Li X H. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth Planet Sci Lett*, 262: 533–542
- Sun Y, Dong S, Zhang H, Li H, Shi Y. 2013. 3D thermal structure of the continental lithosphere beneath China and adjacent regions. *J Asian Earth Sci*, 62: 697–704
- Teng J, Zhang Z, Zhang X, Wang C, Gao R, Yang B, Qiao Y, Deng Y. 2013. Investigation of the Moho discontinuity beneath the Chinese mainland using deep seismic sounding profiles. *Tectonophysics*, 609: 202–216
- Walck M C. 1988. Three-dimensional V_p/V_s variations for the Coso Region, California. *J Geophys Res*, 93: 2047–2052
- Wang J, Li Z W. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: Implications for Rodinia break-up. *Precambrian Res*, 122: 141–158
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, Zhao G, Yu J H, Qiu J S, Zhang Y J, Xing G F. 2014. Geochemical zonation across a Neoproterozoic orogenic belt: Isotopic evidence from granitoids and metasedimentary rocks of the Jiangnan orogen, China. *Precambrian Res*, 242: 154–171
- Wang X, Chen L, Ai Y, Xu T, Jiang M, Ling Y, Gao Y. 2018. Crustal structure and deformation beneath eastern and northeastern Tibet revealed by P-wave receiver functions. *Earth Planet Sci Lett*, 497: 69–79
- Wang X L, Zhao G, Zhou J C, Liu Y, Hu J. 2008. Geochronology and Hf isotopes of zircon from volcanic rocks of the Shuangqiaoshan Group, South China: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the eastern Jiangnan orogen. *Gondwana Res*, 14: 355–367
- Wang Y, Fan W, Guo F, Peng T, Li C. 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou-Linwu fault, South China: Implications for the lithospheric boundary between the Yangtze and Cathaysia Blocks. *Int Geol Rev*, 45: 263–286
- Wang Y, Fan W, Zhang G, Zhang Y. 2013a. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies. *Gondwana Res*, 23: 1273–1305
- Wang Y, Zhang A, Cawood P A, Fan W, Xu J, Zhang G, Zhang Y. 2013b. Geochronological, geochemical and Nd-Hf-Os isotopic fingerprinting of an early Neoproterozoic arc-back-arc system in South China and its accretionary assembly along the margin of Rodinia. *Precambrian Res*, 231: 343–371
- Wang Y, Zhang Y, Cawood P A, Zhou Y, Zhang F, Yang X, Cui X. 2019. Early Neoproterozoic assembly and subsequent rifting in South China: Revealed from mafic and ultramafic rocks, central Jiangnan Orogen. *Precambrian Res*, 331: 105367
- Wei Z, Chen L, Li Z, Ling Y, Li J. 2016. Regional variation in Moho depth and Poisson's ratio beneath Eastern China and its tectonic implications. *J Asian Earth Sci*, 115: 308–320
- Xia Y, Xu X, Niu Y, Liu L. 2018. Neoproterozoic amalgamation between Yangtze and Cathaysia blocks: The magmatism in various tectonic settings and continent-arc-continent collision. *Precambrian Res*, 309: 56–87
- Xu X, O'Reilly S Y, Griffin W L, Wang X, Pearson N J, He Z. 2007. The crust of Cathaysia: Age, assembly and reworking of two

- terraces. *Precambrian Res*, 158: 51–78
- Xu X, Xie X. 2005. Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks and crust-mantle interaction, SE China. *Geol J China Uni*, 11: 318
- Yan C, Shu L, Faure M, Chen Y, Huang R. 2019. Time constraints on the closure of the Paleo-South China Ocean and the Neoproterozoic assembly of the Yangtze and Cathaysia blocks: Insight from new detrital zircon analyses. *Gondwana Res*, 73: 175–189
- Yan J, Zhang K, Fu G, Luo F, Wang H, Qi G. 2019. Identification and determination of the boundary between the Cathaysian and Yangtze blocks: A preliminary understanding of gravity and magnetic fields. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 93: 222–225
- Yao J, Cawood P A, Shu L, Zhao G. 2019a. Jiangnan Orogen, South China: A ~970–820 Ma Rodinia margin accretionary belt. *Earth-Sci Rev*, 196
- Yao J, Shu L, Cawood P A, Zhao G. 2019b. Differentiating continental and oceanic arc systems and retro-arc basins in the Jiangnan orogenic belt, South China. *Geol Mag*, 156: 2001–2016
- Yu J H, O'Reilly S Y, Wang L, Griffin W L, Zhou M F, Zhang M, Shu L. 2010. Components and episodic growth of Precambrian crust in the Cathaysia Block, South China: Evidence from U-Pb ages and Hf isotopes of zircons in Neoproterozoic sediments. *Precambrian Res*, 181: 97–114
- Zandt G, Ammon C J. 1995. Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio. *Nature*, 374: 152–154
- Zhang J, Ye T, Dai Y, Chen J, Zhang H, Dai C, Yuan G, Jiang K. 2019. Provenance and tectonic setting transition as recorded in the Neoproterozoic strata, western Jiangnan Orogen: Implications for South China within Rodinia. *Geosci Front*, 10: 1823–1839
- Zhang K, Lü Q, Zhao J, Yan J, Hu H, Luo F, Fu G, Tao X. 2020. Magnetotelluric evidence for the multi-microcontinental composition of eastern South China and its tectonic evolution. *Sci Rep*, 10: 13105
- Zhang Y, Shi D, Lü Q, Xu Y, Xu Z, Yan J, Chen C, Xu T. 2021. The crustal thickness and composition in the eastern South China Block constrained by receiver functions: Implications for the geological setting and metallogenesis. *Ore Geol Rev*, 130: 103988
- Zhao G, Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China. *Precambrian Res*, 222–223: 13–54
- Zhao G. 2015. Jiangnan Orogen in South China: Developing from divergent double subduction. *Gondwana Res*, 27: 1173–1180
- Zheng J P, Griffin W L, Li L S, O'Reilly S Y, Pearson N J, Tang H Y, Liu G L, Zhao J H, Yu C M, Su Y P. 2011. Highly evolved Archean basement beneath the western Cathaysia Block, South China. *Geochim Cosmochim Acta*, 75: 242–255
- Zheng J, O'Reilly S Y, Griffin W L, Zhang M, Lu F, Liu G. 2004. Nature and evolution of Mesozoic-Cenozoic lithospheric mantle beneath the Cathaysia block, SE China. *Lithos*, 74: 41–65
- Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, Zhang S B, Yuan H, Wu F Y. 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Res*, 163: 351–383
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269–287
- Zhu L, Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *J Geophys Res*, 105: 2969–2980
- Zhu X, Zheng H, Lu M, Zhang Y. 2020. Lithospheric structure of the xuefengshan belt, South China: Evidence from a seismic reflection profile. *J Geodyn*, 134: 101688

(责任编辑: 姚华建)