

doi: 10.12029/gc20190406

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[J]. 中国地质, 46(4): 750–758.

Chen Anguo, Lü Qingtian, Du Jianguo, Yan Jiayong. 2019. The Poisson's ratio of the crust-mantle of South China and its geological significance[J]. Geology in China, 46(4): 750–758(in Chinese with English abstract).

华南地壳及壳幔过渡带泊松比及其地质意义

陈安国^{1,2}, 吕庆田³, 杜建国², 严加永³

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 安徽省地质调查院, 安徽合肥 230001;
3. 中国地质调查局-中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037)

摘要:地震波泊松比蕴涵着丰富的地质信息, 根据泊松比可以识别地壳岩石的基性程度, 进而分析地球动力学与成矿背景。本文搜集整理了国家地震科学数据共享中心等数据平台自 20 世纪 80 年代至 2017 年底的天然地震震相资料, 经过数据筛选, 得到华南研究区内 $M \geq 2.0$ 级地震事件 11410 个。通过最小二乘法拟合数据的走时-震中距关系直线方程, 得到 Pg 波平均波速 6.11 km/s, Sg 波平均波速 3.60 km/s, 首波 Pn 波平均波速 8.06 km/s, Sn 波平均波速 4.59 km/s。在此基础上, 求得华南地壳平均波速比 V_p/V_s 为 1.697, 由公式计算得到华南地壳的平均泊松比为 0.234, 壳幔界面附近的平均波速比 V_p/V_s 为 1.756, 计算得到壳幔界面附近的平均泊松比为 0.260。走时反演给出的泊松比结果显示扬子地块、华夏地块以及东南沿海地壳的物性差异。华夏地块与扬子地块之间存在大面积的低泊松比异常区, 与江南造山带存在良好的对应关系; 而东南沿海、钦杭成矿带泊松比明显较高, 解释为幔源物质注入地壳的结果。

关键词: 华南; 天然地震; 地震波速; 波速比; 泊松比; 深部资源工程

中图分类号: P622⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2019)04-0750-09

The Poisson's ratio of the crust-mantle of South China and its geological significance

CHEN Anguo^{1,2}, LÜ Qingtian³, DU Jianguo², YAN Jiayong³

(1. School of Resources and Environmental engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China; 3. China Deep Exploration Center (SinoProbe Center), Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China)

Abstract: Poisson's ratio contains rich geological information, the degree of basic lithology of crustal rock can be identified from the Poisson's ratio, and thus it could be used to analyze geodynamics and metallogenic background. The seismic phase data of local natural earthquakes ranging from the 1980s to the end of 2017 were collected from the data sharing platform such as China Earthquake Data Center in this study. Furthermore, 11410 earthquakes ($M \geq 2.0$) in South China were obtained through screening procedure. According to the linear equations of travel time - epicenter distance relation fitted by least square method, the average velocity of Pg-wave, Sg-wave, Pn-wave and Sn-wave were 6.11 km/s, 3.60 km/s, 8.06 km/s, and 4.59 km/s, respectively. The average velocity ratio (V_p/V_s) of the crust of South China was calculated to be 1.697 and its Poisson's ratio was 0.234; In addition,

收稿日期: 2019-04-08; 改回日期: 2019-07-13

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160082, DD20190012)、合肥市博士后科研项目联合资助。

作者简介: 陈安国, 男, 1979 年生, 博士, 主要从事地震成像和重磁解译工作; E-mail: anguo-chen@163.com。

the calculated average velocity ratio near the crust–mantle boundary of South China was 1.756 and its Poisson's ratio was 0.260. The results of Poisson's ratio using the travel–time tomography method show the petrologic differences among the Yangtze block, Cathaysia Block, and Southeastern coast crust. The large low Poisson's ratio area between the Yangtze block and Cathaysia Block is well correlated with the Jiangnan orogeny belt, and the relatively high Poisson's ratio correlated with Qinhang metallogenic belt and Southeast coast are interpreted as underplating of the mantle derived magma.

Key words: South China; natural earthquakes; seismic wave velocity; V_p/V_s ratio; Poisson's ratio; deep resources engineering

About the first author: CHEN Anguo, male, born in 1979, postdoctoral researcher, mainly engages in the study of seismic tomography, gravity and magnetic interpretation; E–mail: anguo–chen@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Bureau under the geological survey Project (No. DD20160082, No. 20190012) and Hefei Postdoctoral Science Foundation.

1 引言

华南大陆主体由扬子地块和华夏地块构成, NE–NEE走向的软杭结合带被认为是扬子和华夏两个陆块新元古代的碰撞拼合带(杨明桂等, 2009)。华南地区中、新元古代总体是在全球 Rodinia 大陆聚合与裂解的构造背景中发展演化的, 古生代经历了广泛的陆内造山过程, 中生代以来处在全球三大重要板块的汇聚拼合部位, 并经历了印支期的碰撞造山和燕山期的陆内造山过程(张国伟等, 2013)。由于构造演化历史漫长且十分复杂, 扬子地块与华夏地块的接触位置和耦合关系尚有不同的看法(舒良树, 2012), 块体内部组成有待进一步深化。

泊松比是反映地球物质成分极为重要的参数, 测量泊松比是研究地球内部物质成分、构造和物理状态最有效的方法之一(嵇少丞等, 2009a)。地壳泊松比的大小取决于岩石中P波和S波的速度比值, 即波速比。泊松比和波速比的大小呈正相关, 流体的存在能有效地提高岩石的波速比, 从而增加泊松比。前人总结了岩石圈中主要造岩矿物和岩石的泊松比–密度的关系(Ji et al., 2002), 并以华北地区为例, 开展了地壳泊松比异常成因与大地构造意义等有关的研究(嵇少丞等, 2009b; 杨文采等, 2011), 前人研究多数使用了地壳天然地震的P、S波走时成像反演方法。

华南天然地震研究成果近年来逐渐丰富, 主要是通过远震资料研究华南岩石圈–地幔的速度结构(黄海波等, 2014; He et al., 2015, 2016; 张耀阳等, 2018)。通过近震资料研究华南地壳的速度结构、波速比、泊松比等目前还局限在较小范围, 多以单

独省份资料独立研究(黄耘等, 2008; 李红星等, 2015)。

本文以华南为研究区, 系统地搜集、整理了研究区内 10 多个省份的地壳天然地震观测资料, 提取直达Pg、Sg波走时, 以及沿Moho面滑行传播的首波Pn、Sn波走时。通过对走时大数据进行拟合分析, 得到华南地壳的天然地震平均波速和波速比, 并以此值作为地壳三维波速比反演时的初始值, 反演得到全地壳的波速比, 根据公式转换得到华南地壳的泊松比。在此基础上, 分析了华南地壳物质分布、深部岩浆过程及与主要成矿带的关系。

2 华南天然地震数据分析

2.1 近震数据及筛选

本次研究系统地搜集整理了华南天然地震震相数据, 研究数据主要来源于国家地震科学数据共享中心(<http://data.earthquake.cn/index.html>)、地震专业知识服务平台(<http://earthquake.ckcest.cn/index.html>)等数据共享平台, 以及部分省属台网。

首先, 对获取的原始震相报告进行数据结构分析, 提出了编写数据处理程序的算法, 算法主体由两部分组成: ①对包含地震发震时刻、震中参数等起始行进行信息提取; ②对该次地震所有记录台站的到时参数、台站参数进行提取, 同时计算该台站的Pg、Sg走时和Sg–Pg走时差, 如果该台站有Pn、Sn波数据, 同步处理Pn、Sn走时数据。在数据处理过程中, 采取严格的筛选措施, 仅当某一次地震满足4对以上Pg、Sg走时记录的地震震相数据才予以使用。经过大数据分析、提取和筛选, 本次研究得到华南研究区内 $M \geq 2.0$ 级地震事件11410个, 详见图1。

研究区地貌总体以“盆”“岭”相间为特征,西部的江南造山带和东部武夷山地形相对较高,南北向以南岭为界,向两侧逐渐降低。从地震震中空间分布看,东南沿海福建、广东、广西等省份及邻近海域地震活跃,研究区中部的湖南、贵州等省份地震活动较弱,北部的重庆、湖北、江西、安徽等省份地震活动较活跃。钦杭结合带处于研究区中部,自广西北部湾海域的钦州至浙江杭州湾,钦杭结合带西南段总体呈NE向分布,北东段总体呈NEE向分布。华夏地块位于钦杭结合带的东南侧,扬子地块位于钦杭结合带的北西侧。钦杭结合带的北东段出露绍兴—江山—萍乡和东乡—德兴—歙县两条新元古代早期的蛇绿混杂岩带(舒良树,2012),多数研究者认为它们是碰撞结合带的主要边界断裂;钦杭结合带的西南段主要边界断裂分布、产状等还存在较大争议。

2.2 走时数据拟合与射线分布

为了拟合各震相走时数据,首先需要对不同震相的走时数据进行分离,笔者通过编写程序分离出Pg、Sg、Pn和Sn的走时,对各类走时数据计算走时与震中距的关系,分别使用最小二乘法拟合数据点,得到一维拟合直线方程,由拟合斜率即可以求得各震相在地壳或上地幔的平均波速。

首先,笔者对1980—2017年的所有数据进行分

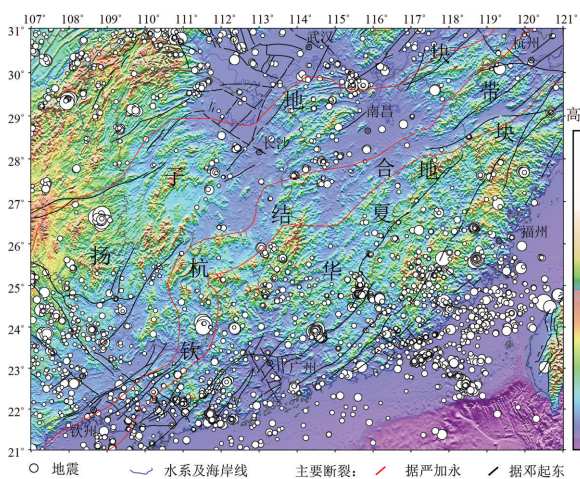


图1 华南研究区内地震震中分布及主要断裂
图中断裂及构造块体边界:红色线条据严加永等(2019);
黑色线条据邓起东等(2003)

Fig.1 Distribution of earthquakes and major faults in South China
Faults and block boundary are adapted: red lines after Yan et al., 2019;
black lines after Deng et al., 2003

析,自2000年以后的数据质量有明显提高,特别是2008年之后由中国地震台网中心统一定位并发布的数据质量很好,走时-震中距关系数据点非常收敛并且离散的飞点数据极少。综合考虑之后,此次研究使用了华南研究区内2000—2017年的 $M \geq 2.0$ 级地震走时数据。

此次研究共使用了11410个地震,挑选Pg走时数据140600余条,Sg走时数据164500余条,Pn走时数据64500余条,Sn走时数据27700余条。对不同震相的走时-震中距关系数据点(图2),分别使用最小二乘法进行直线拟合,通过拟合直线方程的斜率得到华南地壳Pg波平均波速为6.11 km/s,Sg波平均波速为3.60 km/s,Pn波平均波速为8.06 km/s,Sn波平均波速为4.59 km/s。

图3是此次研究使用的地震震中、Pg、Sg波射线和观测台站分布。根据数量分布统计,Pg、Sg波射线在东南沿海的福建、广东、广西覆盖最好,其次为研究区西北的重庆、湖北一带,赣东北—皖南—浙西一带以及湖南—贵州交界附近射线覆盖偏少。

3 华南地壳平均波速比与泊松比

3.1 华南地壳平均波速比

通过上一节的工作,得到华南地壳的直达Pg波平均波速为6.11 km/s,直达Sg波平均波速为3.60 km/s,沿壳幔界面滑行的首波Pn波平均波速为8.06 km/s,Sn波平均波速为4.59 km/s。在此基础上,求

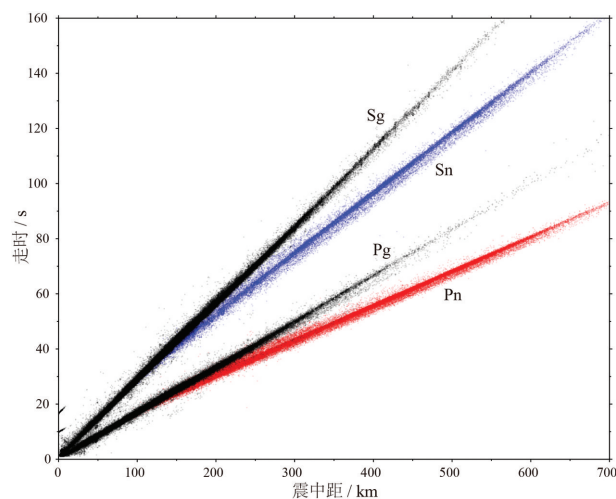


图2 华南研究区内走时-震中距关系曲线
Fig.2 Travel times of different seismic phases observed in
South China

得华南地壳平均波速比 V_p/V_s 为 1.697, 壳幔界面附近的平均波速比 V_p/V_s 为 1.756。

3.2 华南地壳平均泊松比

由 P、S 波的平均波速比, 按照公式(1)可计算平均泊松比 σ :

$$\sigma = 0.5 \left(1 - \left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1} \right) \quad (1)$$

华南地壳的平均泊松比为 0.234, 地幔顶部的平均泊松比为 0.260。研究表明, 虽然泊松比受很多因素的影响, 比如流体/熔体的存在、岩石内部的显微结构等, 但总体上, 泊松比是地壳物质成分的反映。长英质酸性岩组成的地壳其 $\sigma \leq 0.26$; 铁镁质基性岩组成的地壳其 σ 值在 0.28 ~ 0.30; 而中性岩组成的地壳或酸性岩和基性岩按照一定的比例混合组成的地壳其 σ 值在 0.26 ~ 0.28 (Christensen and Mooney, 1995; 刘斌等, 2002; 嵇少丞等, 2009)。华南地壳的平均泊松比 σ 为 0.234, 与花岗岩的泊松比接近, 总体上与华南出露花岗岩总面积 169.7 km², 整个地壳充满长英质酸性物质的事实是吻合的。

4 华南中、上地壳三维泊松比及地质意义

4.1 泊松比的反演计算

由于 Pg、Sg 走时数据的质量和数量差异, 直接使用地震走时 Pg、Sg 分别反演 P 波和 S 波速度结构, 通过简单的 V_p 和 V_s 比值来得到波速比会带来很多问题。Thurber 等(1993)提出了一个好的计算方法, 通过 Pg 走时和 Sg-Pg 走时差来获得可靠的波速比。公式如下:

$$dt_{ij} = \int_{\text{path}} \left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right) - 1 \right] / V_p ds \quad (2)$$

公式(2)中 t_{ij} 表示第 i 个地震事件在第 j 个台站的 Pg 或 Sg 波走时, dt_{ij} 为 Sg-Pg 的走时差。反演计算流程为: 首先通过震源位置和速度结构的联合反演得到三维 P 波速度结构, 以三维 P 波速度结构和预设的 V_p/V_s 波速比初始值作为输入参数, 通过(2)式计算理论的 Sg-Pg 走时差 dt_{ij} , 求取理论走时差和实际观测数据的走时差 dt_{ij}^* 的差值 Δt_{ij} , 以 Δt_{ij} 扰动 V_p/V_s 波速比进行迭代反演, 多次迭代时的震源位置和三维 P 波速度结构为固定值, 当走时残差 Δt_{ij} 满

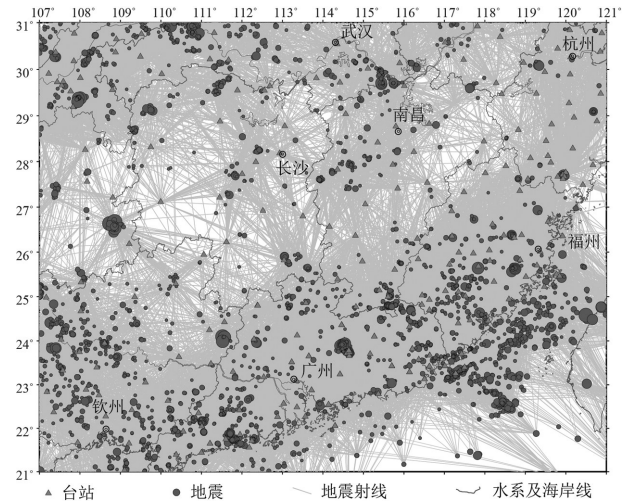


图3 华南 Pg、Sg 波地震射线及台站分布
Fig.3 Distribution of the seismic stations and ray paths of Pg and Sg phases of South China

足收敛条件时终止迭代计算, 得到 V_p/V_s 波速比反演结果。

反演计算使用 Simulps14 软件 (Thurber, 1993; Zhang, 2003)。为保证反演质量, 要求一次地震至少有 4 个以上台站记录到, 并有准确的 Pg 走时和 Sg-Pg 走时差才能入选计算数据。初始波速比通过走时大数据的拟合得到, 地壳初始波速比 V_p/V_s 为 1.697, 壳幔界面附近的初始波速比 V_p/V_s 为 1.756。一维初始地壳速度模型参考黄启勋(2000)、徐涛等(2014)等人工地震剖面成果。反演使用自中心点向四周 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格划分, 图 4 是通过三维波速比反演计算得到的泊松比分布。由于研究区内地震射线主要分布在中、上地壳, 因此反演结果主要揭示中、上地壳泊松比的分布。

4.2 解的可靠性评价

Simulps14 软件对于解的可靠性评价主要采用分辨率对角元素值 (RDE) 和射线分布偏导权重总数 (DWS), 解的可靠性与 RDE 和 DWS 值呈正相关。图 5 分别是 5 km 和 14 km RDE 和 DWS 的分布。

由图 5 可知, 台湾附近海域由于射线没有形成良好的覆盖, 解的可靠性较低。湖南和贵州两省交界区域, 由于地震活动微弱, 台站也比较稀疏, 射线密度和解的可靠性都较低。东南沿海的福建、广东、广西南部射线覆盖比较好, 解的可靠性较高。文中截取的 AA' 和 BB' 两条剖面, 综合考虑了射线

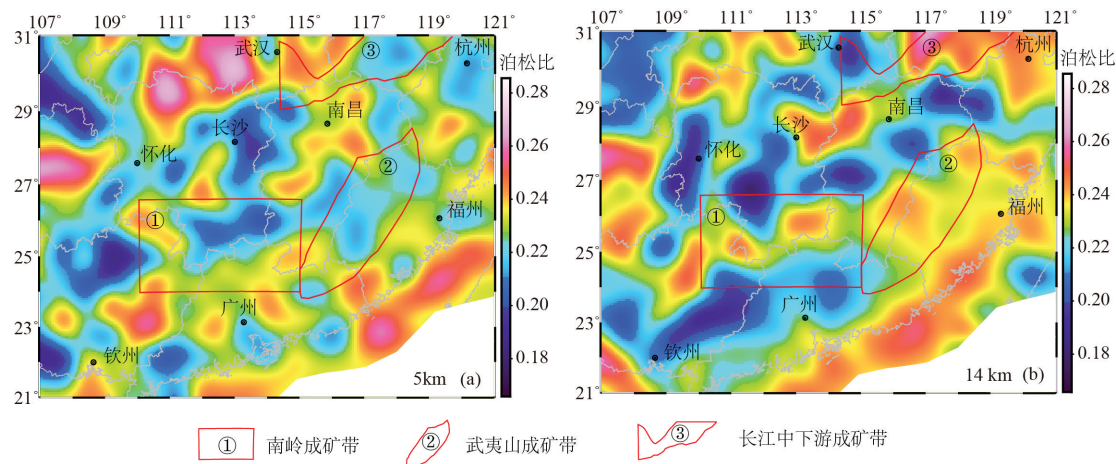


图4 华南中、上地壳5 km(a) 和14 km(b)深度泊松比的分布

Fig.4 Map of the Poisson's ratio of 5 km (a) and 14 km (b) in the mid-upper crust of South China

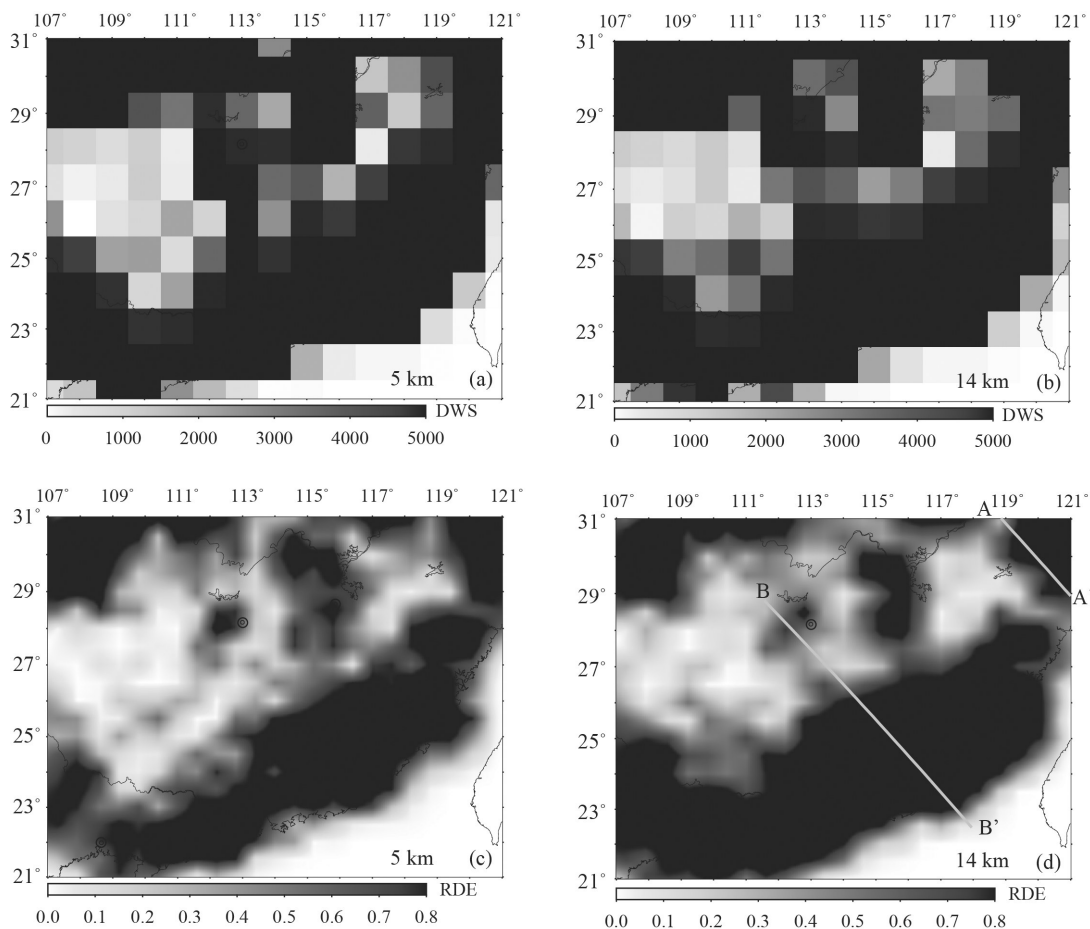


图5 不同深度的走时成像DWS(a,b)和RDE(c,d)分布

Fig.5 DWS (a and b) and RED (c and d) distribution in different depths from the travel-time tomography

分布、解的可靠性和地质问题等因素。

4.3 华南中上地壳平均泊松比及地质意义

图4、图6分别给出了5 km、14 km 深度的地壳

的泊松比和20 km 以浅深度的地壳平均泊松比,由图可见,5 km 深度水平切片上,南岭成矿带、武夷山成矿带下方泊松比未见明显的高值区,随着深度增

加到 14 km 的水平切片上,武夷山成矿带、长江中下游成矿带和南岭成矿带的下方都可见到成片分布的高泊松比异常,而且高泊松比区域与东南沿海火山岩带、华夏地块的对应关系更为明显。高泊松比(局部可达 0.28)指示地壳成分以镁铁质为主,与区内广泛分布的基性火山岩特征一致,指示深部有可能发生过镁铁质岩浆的底侵作用(Li et al.,2018; Lin et al.,2018)。扬子地块中、上地壳的泊松比以高值为主,高值接近 0.29,可能与扬子克拉通的基性物质组成有关,但仍存在局部(西北角的重庆附近)较低的泊松比,反映局部物质的不均匀特征。

江南造山带处在扬子地块和华夏地块之间,是新元古代时期发生在扬子地块东南缘以岛弧地体拼接为主的增生型造山带,目前围绕江南造山带的构造-岩浆演化还存在较大争议(王孝磊等,2017)。扬子地块和华夏地块在新元古代拼合带的位置在研究区内北东段比较清楚,但是在过湖南萍乡之后,地表植被广泛覆盖,缺少关键地质标志,而使得该拼合带的西延界限难以确定(舒良树,2012)。造山过程往往会改变地壳的泊松比,受到构造挤压,处于相同温度、压力条件下的长英质岩石比基性岩石更容易形成褶皱和推覆构造,其结果势必造成地壳泊松比随地壳厚度增加而减少(嵇少丞等,2009)。本次研究发现在华夏地块与扬子地块结合带中间存在与钦杭结合带近乎平行的低泊松比区,该低泊松比异常区在浙江、安徽、江西、湖南等省份的边界与已知的江南造山带的地质边界(张国伟等,2013)基本一致,因此,笔者认为这一低泊松比异常区反映了江南造山带的大致范围,并据此勾勒出了江南造山带的大致边界位置(图6)。He et al.(2015)通过远震接收函数方法得到的地壳平均波速比也有类似的结果。

南岭成矿带主要分布矽卡岩型和石英脉型钨锡矿床,钦杭成矿带(北东段)主要分布斑岩-矽卡岩型钨、铜矿床,武夷山成矿带主要分布斑岩-矽卡岩型铜矿床以及浅成低温热液型金矿床(毛景文等,2018),长江中下游成矿带主要为矽卡岩型、斑岩型、陆相火山岩型的铜、铁、金多金属为特色的矿床(常印佛等,2017)。由图6可知,江南造山带南段整体呈较低的泊松比异常($\sigma < 0.21$),南岭成矿带局部具有相对较高的泊松比异常($\sigma > 0.23$),结

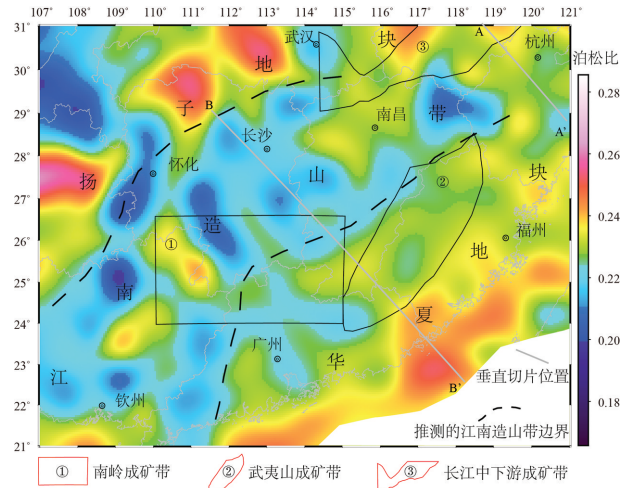


图6 华南中、上地壳平均泊松比异常水平分布与解释
Fig.6 Map of the average Poisson's ration in the mid-upper crust of South China and its interpretation

合地质资料分析,相对高泊松比异常可能与南岭成矿带燕山期大规模花岗岩侵位相关,燕山期成矿花岗岩具有幔源信息(周永章等,2017)。武夷成矿带和钦杭成矿带(北东段)地理位置上毗邻,都是重要的斑岩型铜(钼)矿带,带内的斑岩型矿床具有元古宙+中生代双峰年龄,地球化学特征上带有岛弧俯冲的基因(周永章等,2017),泊松比异常背景值约为 0.23,未见到显著的高泊松比异常区。长江中下游成矿带泊松比异常背景值也约为 0.23,高泊松比异常主要沿西北侧边界郟庐断裂带附近分布。

为便于从剖面上分析,笔者沿钦杭结合带截取了 2 条泊松比剖面,分别揭示钦杭结合带及两侧不同地质块体之间的相互关系(图7)。

AA'剖面与钦杭结合带北段实施的地球物理廊带剖面之一的宁国—嵊州剖面位置一致,有所延长(中国地质科学院,2018^①)。AA'剖面揭示了,在以钦杭结合带为中心的西北(A方向)和东南(A'方向)两翼的中、上地壳泊松比异常迥然不同,西北侧对应的扬子地块具有相对高的泊松比异常,而东南侧对应的华夏地块具有相对低的泊松比异常。垂向上,从浅到深,泊松比明显增高,显示基底(10 km)以深基性物质成分明显增加,笔者解释为扬子与华夏地块碰撞拼贴过程中,幔源物质不断注入改造地壳成分的结果。

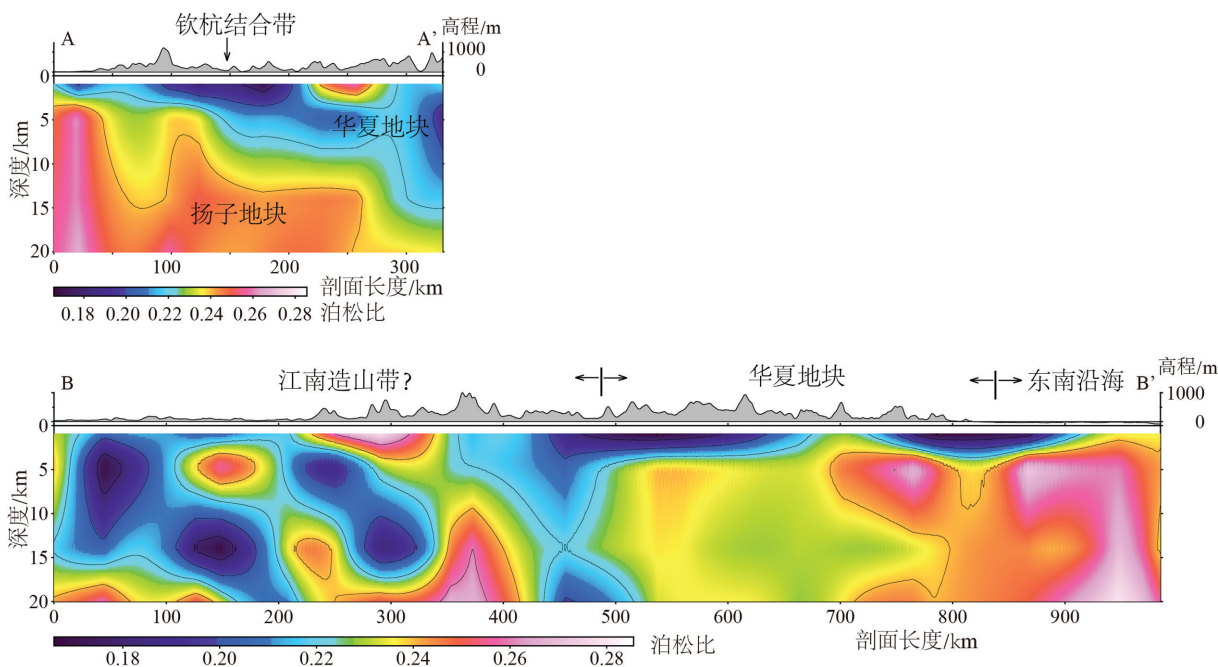


图7 AA'和BB'剖面泊松比垂直切片图
Fig.7 Vertical slices of Poisson's ratio along AA' and BB' profiles

BB'剖面显示在剖面中心约500 km以西的中、上地壳以低泊松比异常为主,间或夹有局部高泊松比异常,在其以东的中、上地壳主体为相对高的泊松比异常,东南沿海的地壳具有相对高的泊松比异常(0.26~0.28),笔者解释为地壳铁镁质含量增加,与幔源物质底侵过程有关。BB'剖面左侧的低泊松比异常区域(0.17~0.22),反映中上地壳长英质成分为主,推测与江南造山带地壳增厚有关,该异常与扬子地块也有显著不同。从图6泊松比平面图和AA'剖面图可知扬子地块相对华夏地块具有更高的泊松比,而这一夹在扬子地块与华夏地块之间的江南造山带具有显著的低泊松比异常,笔者认为江南造山带西段,由于造山过程是中上地壳物质变形增厚,总体降低了地壳平均泊松比;而造山带东段出现的相对高的泊松比,解释为燕山期陆内造山阶段大量幔源物质的注入,改变了地壳的基性程度。

5 结论

(1)华南地壳及上地幔顶部平均波速:Pg波6.11 km/s, Sg波3.60 km/s, Pn波8.06 km/s, Sn波4.59 km/s。华南地壳平均波速比 V_p/V_s 为1.697,壳

幔界面附近的平均波速比 V_p/V_s 为1.756。

(2)华南地壳平均泊松比为0.234,指示地壳中长英质矿物含量较高,地幔顶部的平均泊松比为0.260。

(3)东南沿海和武夷山具有相对高的地壳泊松比,认为与幔源基性物质的底侵有关。

(4)江南造山带处于扬子地块与华夏地块之间,具有显著的低泊松比异常,与造山过程导致中上地壳增厚有关。

致谢:感谢国家地震科学数据共享中心、地震专业知识服务平台的数据支持!文中图件主要使用Wessel and Smith开发的免费制图软件GMT绘制。

注释

①中国地质科学院.2018.钦杭结合带及邻区深部地质调查成果报告[R].

References

- Chang Yinfa, Zhou Taofa, Fan Yu.2017. Review of exploration and geological research progress in the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(11):3333-3352 (in Chinese with English abstract).
- Christensen N I, Mooney W D.1995. Seismic velocity structure and

- composition of the continental crust: A global view[J]. *J. Geophys. Res.*,100: 9761–9788.
- Deng Qidong, Zhang Peizhen, Ran Yongkang, Yang Xiaoping, Min Wei, Chen Lichun.2003. Active tectonics and earthquake activities in China[J]. *Earth Science Frontiers*,10: 66–73(in Chinese with English abstract).
- He Chuansong, Santosh M, Dong Shuwen. 2015. Continental dynamics of Eastern China: Insights from tectonic history and receiver function analysis[J]. *Earth–Science Reviews*,145: 9–24.
- He Chuansong, Santosh M.2016. Crustal evolution and metallogeny in relation to mantle dynamics: A perspective from P– wave tomography of the South China Block[J]. *Lithos*,263: 3–14.
- Huang Haibo, GuoXingwei, Xia Shaohong, Qiu Xuelin.2014. Crustal thickness and Poisson’s ratio in the coastal areas of South China[J]. *Chinese J. Geophys*,57(12):3896–3906(in Chinese with English abstract).
- Huang Yun, Li Qinghe, Zhang Yuansheng, Sun Yejun, Shen Honghui, Jin Shumei.2008. Relocation of earthquakes in Jiangsu and neighboring areas, China and analysis of structural features[J]. *Chinese J. Geophys*,51(1):175–185(in Chinese with English abstract).
- Huang Qixun. 2000. The characteristics of some important basic geology in Guangxi[J]. *Guangxi Geology*,13(3):3–12(in Chinese with English abstract).
- Ji Shaochen, Wang Qian, Xia Bin.2002. Handbook of Seismic Properties of Minerals, Rocks and Ores[M]. Montreal: Polytechnic International Press, 630.
- Ji Shaochen, Wang Qian, Sun Shengsi.2009a. Seismic properties of crystalline rocks and geological and geophysical implications[J]. *Chinese Journal of Geology*,44(4):1113–1135(in Chinese with English abstract).
- Ji Shaochen, Wang Qian, Yang Wencai. 2009b. Correlation between crustal thickness and Poisson’s ratio in the North China craton and its implication for lithospheric thinning[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(3):324–330(in Chinese with English abstract).
- Li Hongxing, Zhao Fengfan, Mao Yong.2015. Three dimensional velocity structure seismic tomography of up– crust in Jiangxi province[J]. *Progress in Geophysics*,30(3):1049–1055(in Chinese with English abstract).
- Li Jianhua, Dong Shuwen, Peter A. Cawood, Zhao Guochun, Stephen T. Johnston, Zhang Yueqiao, Xin Yujia.2018. An Andean– type retro–arc foreland system beneath northwest South China revealed by SINOPROBE profiling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 490:170–179.
- Lin Shoufa, Xing Guangfu, Donald W.davis, Yin Changqing, Wu Meiling, Li Longming, Jiang Yang, Chen Zhihong.2018. Appalachian– style multi– terrane Wilson cycle model for the assembly of South China[J]. *Geology*,46(4):319–322.
- Liu Bin, Xi Daoying, Ge Ningjie, Wang Baoshan, Kern H, Popp T.2002. Anisotropy of Poisson’s ratio in rock samples under confining pressures[J]. *Chinese J. Geophys*,45(6):880–890(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Yuan Shunda, Liu Peng, Meng Xuyang, Zhou Zhenhua, Zheng Wei.2018. Current research progress and future trends of porphyry– skarn copper and granite– related tin polymetallic deposits in the Circum Pacific metallogenic belts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(9):2501–2517.
- Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Wan Yusheng, Kitajima K, Wang Di, Bonamici C, Qiu Jiansheng, Sun Tao.2013. Magmatic evolution and crustal recycling for Neoproterozoic strongly peraluminous granitoids from southern China: Hf and O isotopes in zircon[J]. *Earth and Planetary Science Letters*,366: 71–82.
- Pei Rongfu, Wang Yonglei, Li li, Wang Haolin.2008. South China great granite province and its metallogenic series of Tungsten– Tin poly– metallics[J]. *China Tungsten Industry*,23(1): 10–13(in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu.2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. *Geological Bulletin of China*,31(7):1035–1053(in Chinese with English abstract).
- Thurber C H, Atré S R.1993.Three– dimensional Vp/Vs variations along the Loma Prieta rupture zone[J].*Bull. Seism. Soc. Am.*, 83: 717–736.
- Xu Tao, Zhang Zhongjie, TianXiaobo, Liu Baofeng, Bai Zhiming, Lü Qingtian, Teng Jiwen.2014. Crustal structure beneath the Middle– Lower Yangtze metallogenic belt and its surrounding areas: Constraints from active source seismic experiment along the Lixin to Yixing profile in East China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 918–930(in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui, Huang Shuibao, Lou Fasheng, Tang Weixin, Mao Subin.2009. Lithospheric structure and large– scale metallogenic process in Southeast China continental area[J]. *Geology in China*, 36(3): 528–543(in Chinese with English abstract).
- Yang Wencai, Qu Chen, Yu Changqing.2011. High Poisson’s ratio anomalies in the crust of the eastern part of North China and its origin[J]. *Earth Science Frontiers*,2011,18(3):13–21(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, GuoAnlin, Wang Yuejun, Li Sanzhong, Dong Yunpeng, Liu Shaofeng, He Dengfeng, Cheng Shunyou, Lu Rukui, Yao Anping. 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China: Earth Sciences*, 43(10): 1553–1582 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haijiang, Thurber C H. 2003. Double– difference tomography: the method and its application to the Hayward fault, California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(5):1875–1889.
- Zhang Yaoyang, Chen Lin, Ai Yinshuang, Jiang Mingming, Xu Weiwei, Shen Zhongyin.2018. Lithospheric structure of the South China Block from S– receiver function[J]. *Chinese J. Geophys*61

(1):138-149(in Chinese with English abstract).
Zhou Yongzhang, Li Xingyuan, Zheng Yi, Shen Wenjie, He Junguo, Yu Pengpeng, NiuJia, Zeng Changyu.2017. Geological settings and metallogenesis of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay orogenic juncture belt, South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(3):667-681 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常印佛,周涛发,范裕.2017.长江中下游成矿带矿产勘查-科研工作回顾和展望[J].岩石学报,33(11):3333-3352.
- 邓起东,张培震,冉永康,杨晓平,闵伟,陈立春.2003.中国活动构造与地震活动[J].地学前缘,10:66-73.
- 黄海波,郭兴伟,夏少红,丘学林.2014.华南沿海地区地壳厚度与泊松比研究[J].地球物理学报,57(12):3896-3906.
- 黄耘,李清河,张元生,孙业君,沈红会,金淑梅.2008.江苏及邻区地震重新定位和构造特征分析[J].地球物理学报,51(1):175-185.
- 黄启勋.2000.广西若干重大基础地质特征[J].广西地质,13(3):3-12.
- 嵇少丞,王茜,孙圣思.2009a.晶质岩石的地震波性质及其地质、地壳物理意义[J].地质科学,44(4):1113-1135.
- 嵇少丞,王茜,杨文采.2009b.华北克拉通泊松比与地壳厚度的关系及其大地构造意义[J].地质学报,83(3):324-330.
- 李红星,赵烽帆,毛勇.2015.江西上地壳三维速度结构地震层析成像[J].地球物理学进展,30(3):1049-1055.
- 刘斌,席道瑛,葛宁洁,王宝善,Kern H, Popp T.2002.不同围压下岩石中泊松比的各向异性[J].地球物理学报,45(6):880-890.
- 毛景文,谢桂青,袁顺达,刘鹏,孟旭阳,周振华,郑伟.2018.环太平洋成矿带斑岩-矽卡岩型铜矿和花岗岩有关的锡多金属矿研究现状与展望[J].岩石学报,34(9):2501-2517.
- 舒良树.2012.华南构造演化的基本特征[J].地质通报,31(7):1035-1053.
- 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[J].矿物岩石地球化学通报,36(5):714-735.
- 徐涛,张忠杰,田小波,刘宝峰,白志明,吕庆田,滕吉文.2014.长江中下游成矿带及邻区地壳速度结构:来自利辛-宜兴宽角地震资料的约束[J].岩石学报,30(4):918-930.
- 杨明桂,黄水保,楼法生,唐维新,毛素斌.2009.中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J].中国地质,36(3):528-543.
- 杨文采,瞿辰,于常青.2011.华北东部地区地壳泊松比异常及其成因[J].地学前缘,18(3):13-21.
- 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[J].中国科学:地球科学,43(10):1553-1582.
- 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[J].地球物理学报,61(1):138-149.
- 周永章,李兴远,郑义,沈文杰,何俊国,虞鹏鹏,牛佳,曾长育.2017.钦杭结合带成矿地质背景及成矿规律[J].岩石学报,33(3):667-681.