

李其栋, 谢卓娟. 2024. 基于接收函数方法研究广东地区地壳厚度与泊松比[J]. 地震研究, 47(2): 212–222, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0020.

Li Q D, Xie Z J. 2024. Study of the crustal thickness and Poisson's ratio in Guangdong with receiver function method[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(2): 212–222, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0020.

基于接收函数方法研究广东地区地壳厚度与泊松比^{*}

李其栋^{1,2}, 谢卓娟^{1,2}

(1. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085; 2. 复合链生自然灾害动力学
应急管理部重点实验室, 北京 100085)

摘要: 选取广东地区 49 个固定地震台站记录到的远震资料, 采用时间域迭代反褶积法提取 P 波接收函数, 利用 $H-\kappa$ 叠加法获得台站下方的地壳厚度与泊松比。结果表明: ①广东地区地壳厚度在 24.8 ~ 31.0 km, 平均值为 28.3 km, 自西北往东南减薄, 呈区域性带状分布特征, 可能与研究区内山脉隆起、平原和山地相间的地质构造相关。②研究区泊松比为 0.220 ~ 0.287, 平均值为 0.244, 泊松比北部偏高、南部偏低, 沿海地区高于内陆地区, 具有区域性块状分布特征, 可能与地壳主要深大断裂切割的地质块体有关。③地壳厚度和泊松比分布与断裂的分布有较好的对应关系, 并在断裂附近变化明显。④地壳厚度与泊松比呈负相关, 可能与古太平洋板块在地壳演化过程中向广东大陆方向推进, 幔源物质进入地壳, 在地壳深部存在部分熔融, 从而导致地壳岩石中镁铁成分含量上升引起的泊松比升高有关。

关键词: 广东地区; 接收函数; 地壳厚度; 泊松比

中图分类号: P313 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)02-0212-11
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0020

0 引言

广东地区位于中国东南沿海, 北接南岭山脉, 南临南海, 地势从北向南递减, 形成北部山地、中部丘陵和南部以平原为主的地貌分布特征。魏柏林等(2001)指出, 该地区是欧亚大陆东部边缘框架重要的组成部分, 因受到印度洋板块、菲律宾板块和亚欧板块的碰撞、挤压、拉伸、俯冲以及台湾海峡的近期扩张, 其演化过程伴随着深部物质活动, 进而形成了一系列切割地壳和上地幔的深大断裂, 这些断裂带至今仍有较强的活动性, 因此该地区新构造活动强烈、具有独特的地

壳与上地幔运动的演化历史和地球动力学过程。另外, 广东地区位于扬子地台和华南褶皱带的交界处, 中强地震活跃, 历史地震多发生在断裂带交会的部位。研究地壳厚度与泊松比的分布特征, 一方面可以为分析该区地球内部物质组成结构和地壳板块运动提供参考, 进一步了解岩石圈的物理特性及动力学机制, 揭示该区深大断裂的分布及活动规律, 另一方面对该地区的地震监测预报、工程地震、地震活动性以及构造应力分布等工作也具有理论意义和实用价值。

接收函数方法是目前研究地球内部圈层精细结构的最有效和较常用方法之一, 主要利用远震波入射到台站下方界面上产生的 Ps 或 Sp 转换波来

^{*} 收稿日期: 2022-08-30.

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2021-12).

第一作者简介: 李其栋(1999-), 硕士研究生在读, 主要从事地震学研究. E-mail: 2659404332@qq.com.

通信作者简介: 谢卓娟(1984-), 副研究员, 主要从事地震活动性分析、地震危险性分析、地震区划方法和应用研究.
E-mail: xiezhujuan@sohu.com.

探测台站下方断面形态,该方法能有效提取地球圈层界面结构,具有良好的垂向分辨率,沈玉松等(2013)和黄海波等(2014)使用该方法研究了广东地区的地壳结构。随着数字化观测台站和流动台站数量的增加与观测技术的飞速发展,接收函数及其反演方法得到广泛应用并不断完善(Langston, 1979; Ammon *et al.*, 1990; Yuan *et al.*, 1997; 吴庆举等, 2003, 2007a, b; 邹最红, 陈晓非, 2003; 孙丽等, 2008; 袁丽文, 郑斯华, 2009; 杨中书等, 2010; 许卫卫等, 2011)。本文基于远震P波接收函数方法,利用 $H-\kappa$ 叠加方法反演广东地区49个台站下方的地壳厚度与泊松比,结合区域地质构造条件、深大断裂的分布以及岩性等,分析地壳厚度与泊松比的分布特征以及主要断裂带和地质构造单元的关系,最后采用bootstrap方法(Johnson, 2001)求取研究结果的编差。

1 数据与方法

1.1 数据选取与处理

本文所用远震波形数据来源于布设在广东地区地震台网的49个固定台站(图1),台间距为

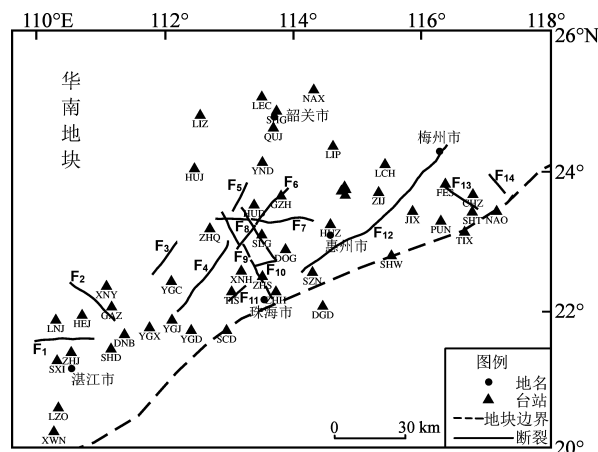


图1 研究区断裂与台站分布
Fig. 1 Distribution of the faults and seismic stations in the study area

100~200 km,基本涵盖了广东所有的地区。选取2014—2015年震中距在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 、 $M > 5.5$ 、震相清晰且波形记录信噪比高的地震事件提取接收函数,最终共选取有效地震397个(图2),这些地震具有较好的方位和震中距覆盖,为获得稳定、可靠的研究结果提供了高质量的数据保障。根据地震发震时间截取原始波形,截取过程中利用PREM模型计算理论到时以协助直达P波的识别,截取P波到达前10 s至之后70 s的波形数据。数据处理过程如下:使用SAC软件对截取的原始三分向(Z 、 N 和 E)地震记录进行预处理,如重采样(0.1 Hz)、去均值、去线性趋势、仪器响应和去倾斜等;使用频率为0.1~2 Hz的带通滤波进行滤波;将地震波 Z 、 N 和 E 三分向旋转到 Z 、 R 和 T 方向。

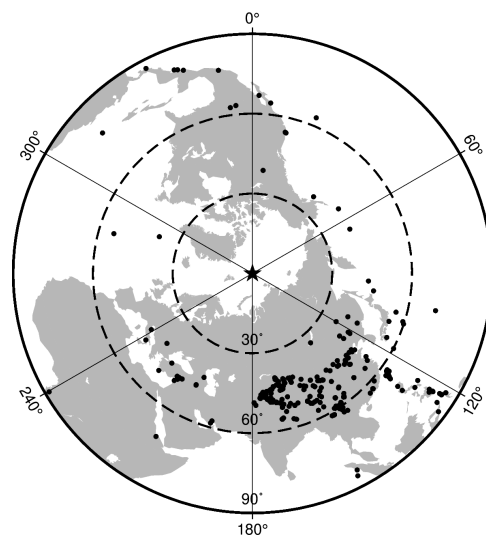


图2 本文计算接收函数选取的远震事件分布
Fig. 2 Distribution of teleseismic events selected for calculating the receiver function

1.2 接收函数的提取

接收函数是通过地震波三分量计算得到的时间序列,它代表了接收区的各种介质对远震P波的脉冲响应。远震P波数据中主要包含震源时间函数、近源结构和台站下方的地壳及上地幔速度间断面产生的 P_s 转换波以及多次反射波等大量地震波信息。因此,研究和分析接收函数是了解地壳结构的重要手段之一(吴庆举等, 2004; 安张辉等, 2004)。时域迭代反褶积法(Zhu, Kanamo-

ri, 2000) 是一种分辨率较高的接收函数提取方法, 该方法能够对计算出的接收函数进行质量评价和分析, 适合大量数据的自动处理。因此, 本文使用高斯滤波系数为 2.5 及水准量为 0.001 的时域迭代反褶积法提取各个台站远震事件的接收函数波形, 为了保证计算结果的精度, 剔除时域迭代中拟合率在 90% 以下的接收函数。对所有的结果进行逐一人工检查, 保证接收函数波形具有较高质量。从图 3 可以清楚地看到, 除了主要的震相 P 波之外, 还可以识别 Ps、PpPs 和 PsPs + PpSs 3 种震相。

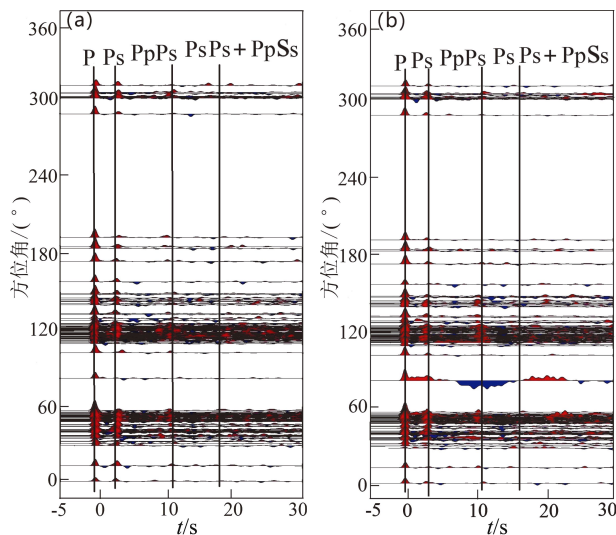


图 3 合江 (HEJ) 台 (a) 和廉江 (LNJ) 台 (b) 的接收函数

Fig. 3 The receiver functions at Hejiang station (a) and Lianjiang station (b)

1.3 $H-\kappa$ 叠加方法

$H-\kappa$ 叠加方法通过对不同的地壳厚度 (H) 和波速比 (κ) 进行组合, 依据设定的地壳平均 P 波速度计算 Ps、多次波 (PpPs、PsPs + PpSs) 的理论到时, 再根据理论到时在接收函数上取对应的振幅加权求和, 极大值对应的地壳厚度和波速比即为 H 和 κ 的最佳估计值 (李海艳等, 2021)。本文 $H-\kappa$ 叠加过程中, 设定地壳平均 P 波速度为 6.2 km/s (郑圻森等, 2003; 蔡学林等, 2003), 参考沈玉松等 (2013) 和黄海波等 (2014) 的研究结果, 设定地壳厚度 H 的搜索区域范围为 20 ~

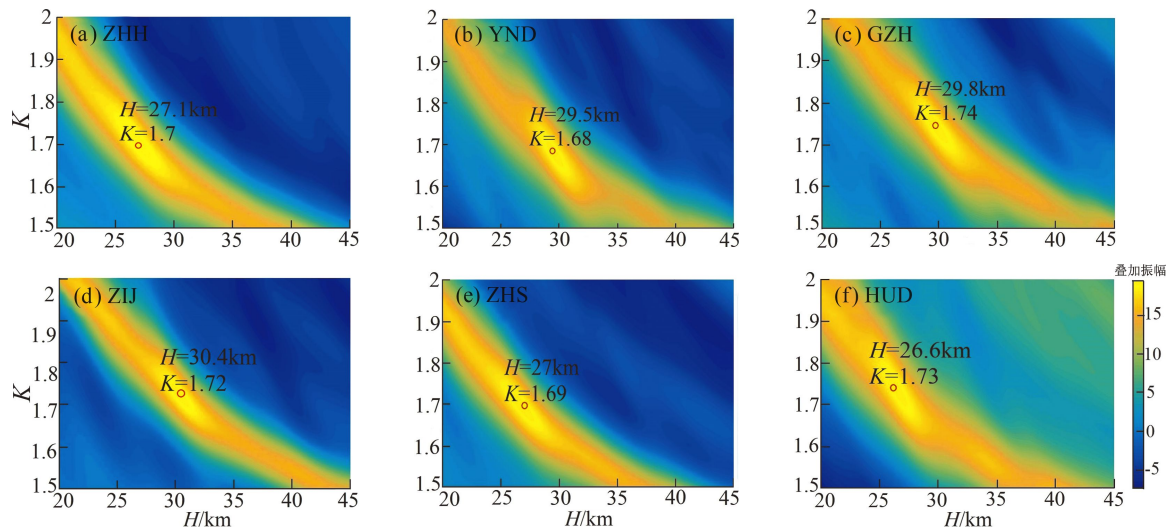
45 km, 间隔为 0.1 km; 波速比 κ 的搜索区域范围为 1.5 ~ 2.0, 间隔为 0.01。设定叠加过程中 Ps、PpPs、PsPs + PpSs 加权系数分别为 0.6、0.3 和 0.1, 依据这 3 个震相的可识别程度赋予叠加权重, 震相的可识别程度高、叠加权重大, 反之, 叠加权重小, 本文中震相的可识别程度较高。利用 $H-\kappa$ 叠加方法可以确定函数 $S(H, \kappa)$ 的最大值以及相应 H 和 κ 。根据波速比与泊松比之间的数学关系式: $\sigma = 0.5[1 - (\kappa^2 - 1)^{-1}]$, 可进一步获得相应地壳介质的泊松比 σ 。

2 结果与分析

2.1 $H-\kappa$ 叠加结果

基于上述方法和步骤, 对广东地区每一个地震台站的径向接收函数做 $H-\kappa$ 叠加计算, 求取每个台站下方的地壳厚度、波速比和泊松比。图 4 为珠海 (ZHH) 台、英德 (YND) 台、广州 (GZH) 台、紫金 (ZIJ) 台、中山 (ZHS) 台和花都 (HUD) 台使用 $H-\kappa$ 叠加方法得到的结果, 图中红圈标出了函数 $S(H, \kappa)$ 的最大值。

本文所获得的远震波形数据受到台站周边环境、地壳结构的复杂性和台站记录质量和数量等诸多因素的影响, 存在一定程度的误差, 梅州 (MEZ) 台和南彭岛 (NAP) 台的接收函数波形太过嘈杂或者是太复杂, 不易识别, 因此, 剔除此类数据, 最终获得 49 个台站的接收函数。为使研究结果更加接近真实值, 本文采用 bootstrap 方法对偏差统计分析。该方法从地震单台的数据中随机抽取可重复的接收函数作为样本, 对样本进行 $H-\kappa$ 叠加计算, 得到地壳厚度与波速比, 以上步骤重复进行 200 次, 对得到的结果求取标准差, 即可得到地震单台的偏差范围。由表 1 可见: 广东地区地壳厚度为 24.8 ~ 31 km, 平均地壳厚度为 28.3 km, 地壳厚度误差为 0.4 ~ 0.9 km, 平均地壳厚度误差为 0.6 km; 泊松比为 0.220 ~ 0.287, 平均泊松比为 0.244, 泊松比误差为 0.01 ~ 0.03, 平均泊松比误差为 0.01。各台站的误差估算结果也表明了本文计算结果的可靠性。

图4 不同台站的 $H-\kappa$ 叠加结果Fig. 4 Results from the $H-\kappa$ superposition of the radial receiver functions at 6 seismic stations表1 广东地区49个台站的地壳厚度 H 、波速比 κ 和泊松比 σ Tab. 1 Crustal thickness H , wave velocity ratio κ and Poisson's ratio σ at 49 seismic stations in Guangdong

台站代码	台站名称	台站位置		H/km	波速比 κ	泊松比 σ
		$\lambda_E/(\circ)$	$\varphi_N/(\circ)$			
CHZ	潮州	116.64	23.67	27.80 ± 0.6	1.83 ± 0.01	0.287
DGD	担杆岛	114.30	22.06	28.20 ± 0.7	1.73 ± 0.02	0.249
DNB	电白	111.21	21.65	27.00 ± 0.5	1.70 ± 0.01	0.235
DOG	东莞	113.72	22.88	27.00 ± 0.5	1.70 ± 0.01	0.235
FES	丰顺	116.21	23.82	29.80 ± 0.7	1.72 ± 0.02	0.245
GAZ	高州	111.01	22.05	27.60 ± 0.4	1.71 ± 0.01	0.24
GZH	广州	113.65	23.65	29.80 ± 0.7	1.74 ± 0.02	0.253
HEJ	合江	110.55	21.93	26.80 ± 0.8	1.70 ± 0.01	0.235
HUD	花都	113.23	23.52	26.60 ± 0.5	1.73 ± 0.01	0.249
HUJ	怀集	112.30	24.04	30.20 ± 0.7	1.71 ± 0.01	0.24
HUZ	惠州	114.42	23.24	28.60 ± 0.6	1.73 ± 0.01	0.249
HYJ	湖羊角	114.59	23.72	28.90 ± 0.8	1.76 ± 0.02	0.262
JIX	揭西	115.70	23.43	30.70 ± 0.9	1.72 ± 0.01	0.245
LCH	龙川	115.27	24.10	30.00 ± 0.7	1.69 ± 0.01	0.231
LEC	乐昌	113.35	25.06	29.40 ± 0.6	1.71 ± 0.03	0.24
LIP	连平	114.46	24.36	31.00 ± 0.8	1.69 ± 0.01	0.231
LIZ	连州	112.39	24.8	30.70 ± 0.7	1.76 ± 0.02	0.262
LNJ	廉江	110.14	21.86	26.30 ± 0.4	1.71 ± 0.00	0.24
LTK	龙潭口	114.65	23.66	30.40 ± 0.8	1.67 ± 0.01	0.22
LZO	雷州	110.18	20.58	26.60 ± 0.5	1.71 ± 0.02	0.24
NAO	南澳	117.01	23.43	27.50 ± 0.4	1.79 ± 0.01	0.273
NAX	南雄	114.16	25.16	28.10 ± 0.7	1.76 ± 0.01	0.262
PUN	普宁	116.14	23.29	29.60 ± 0.5	1.76 ± 0.02	0.262
QUJ	曲江	113.53	24.62	28.80 ± 0.5	1.74 ± 0.01	0.253
SCD	上川岛	112.8	21.71	25.90 ± 0.7	1.73 ± 0.01	0.249
SHD	水东	111.00	21.44	27.10 ± 0.5	1.67 ± 0.02	0.22
SHG	韶关	113.58	24.86	28.10 ± 0.7	1.73 ± 0.01	0.249

续表 1

台站代码	台站名称	台站位置		H/km	波速比 κ	泊松比 σ
		$\lambda_{\text{E}}/(\text{^\circ})$	$\varphi_{\text{N}}/(\text{^\circ})$			
SHT	汕头	116. 63	23. 42	$28. 60 \pm 0. 5$	$1. 76 \pm 0. 00$	0. 262
SHW	汕尾	115. 37	22. 79	$27. 80 \pm 0. 5$	$1. 74 \pm 0. 01$	0. 253
SLG	石榴岗	113. 35	23. 09	$26. 90 \pm 0. 6$	$1. 74 \pm 0. 02$	0. 253
SXI	遂溪	110. 16	21. 27	$24. 80 \pm 0. 4$	$1. 76 \pm 0. 03$	0. 262
SZN	深圳	114. 14	22. 55	$28. 90 \pm 0. 7$	$1. 75 \pm 0. 01$	0. 258
TIS	台山	112. 88	22. 27	$27. 30 \pm 0. 6$	$1. 72 \pm 0. 01$	0. 245
TIX	田心	116. 51	23. 13	$29. 60 \pm 0. 5$	$1. 75 \pm 0. 02$	0. 258
XFJ	新丰江	114. 66	23. 74	$30. 00 \pm 0. 7$	$1. 74 \pm 0. 01$	0. 253
XIG	新港	114. 64	23. 78	$29. 70 \pm 0. 6$	$1. 73 \pm 0. 01$	0. 249
XNH	新会	113. 03	22. 57	$26. 80 \pm 0. 6$	$1. 71 \pm 0. 01$	0. 24
XNY	信宜	110. 93	22. 35	$29. 60 \pm 0. 5$	$1. 69 \pm 0. 02$	0. 231
XWN	徐闻	110. 11	20. 23	$26. 70 \pm 0. 8$	$1. 71 \pm 0. 02$	0. 24
YGC	阳春	111. 94	22. 42	$29. 40 \pm 0. 8$	$1. 70 \pm 0. 01$	0. 235
YGD	阳东	112. 25	21. 71	$27. 90 \pm 0. 5$	$1. 67 \pm 0. 01$	0. 22
YGJ	阳江	111. 95	21. 86	$30. 00 \pm 0. 5$	$1. 68 \pm 0. 00$	0. 226
YGX	阳西	111. 60	21. 75	$28. 20 \pm 0. 7$	$1. 71 \pm 0. 01$	0. 24
YND	英德	113. 36	24. 13	$29. 50 \pm 0. 7$	$1. 68 \pm 0. 01$	0. 226
ZHH	珠海	113. 57	22. 27	$27. 10 \pm 0. 4$	$1. 70 \pm 0. 01$	0. 235
ZHJ	湛江	110. 38	21. 39	$26. 50 \pm 0. 7$	$1. 68 \pm 0. 01$	0. 226
ZHQ	肇庆	112. 54	23. 18	$27. 10 \pm 0. 5$	$1. 69 \pm 0. 01$	0. 231
ZHS	中山	113. 36	22. 49	$27. 00 \pm 0. 3$	$1. 69 \pm 0. 01$	0. 231
ZIJ	紫金	115. 17	23. 70	$30. 40 \pm 0. 5$	$1. 72 \pm 0. 02$	0. 245

2.2 与前人研究结果对比分析

将本文结果与沈玉松等（2013）和黄海波等（2014）研究结果进行对比，三者所采用相同台站共计 41 个（表 2）。由表 2 可见，3 种结果有一定的差异，本文得到广东地区平均地壳厚度为 28.3 km，平均波速比为 1.72；沈玉松等（2013）得到平均地壳厚度为 29 km，平均波速比为 1.72；黄海波等（2014）得到的平均地壳厚度为 28.6 km，平均波速比为 1.73。3 种结果均在合理的误差范围之内，数据变化趋势基本一致（图 5a - 1、5b - 1），表明本文结果的准确性。

为了进一步分析本文结果与其他学者结果的可靠性和差异性，再对三者得出的地壳厚度和波速比进行一致性分析（图 5a - 2、5b - 2），图中蓝色实线表示本文结果同前人结果完全一致；图 5a - 2 中红色实线内的区域表示本文结果同其它两种结果地壳厚度的偏差不超过 1.5 km；图 5b - 2 中红色实线内的区域表示本文结果同其它两种结果波速比的偏差不超过 0.06。

表 2 3 种研究得出的广东地区地壳厚度 H 、波速比 κ 对比

Tab. 2 The thickness of the Earth's crust H and the wave velocity ratio κ in Guangdong obtained in this paper and from other sources							
台站代码	本文		黄海波等（2014）		沈玉松等（2013）		
	H/km	κ 波速比	H/km	κ 波速比	H/km	κ 波速比	
CHZ	27. 8	1. 83	28. 5	1. 78	28. 4	1. 81	
DGD	28. 2	1. 73	27. 5	1. 74	28. 1	1. 73	
DNB	27	1. 70	26. 8	1. 73	27. 9	1. 69	
DOG	27	1. 70	26. 7	1. 72	27. 4	1. 70	
FES	29. 8	1. 72	30. 2	1. 71	30. 4	1. 72	
GAZ	27. 6	1. 71	28	1. 71	28. 4	1. 70	
GZH	29. 8	1. 74	30. 2	1. 73	30. 5	1. 73	
HEJ	26. 8	1. 70	27. 0	1. 70	27. 5	1. 72	
HUD	26. 6	1. 73	26. 7	1. 71	27. 5	1. 7	
HUJ	30. 2	1. 71	30. 0	1. 73	30. 4	1. 72	
HUZ	28. 6	1. 73	28. 3	1. 74	28. 8	1. 73	
HYJ	28. 9	1. 76	29. 2	1. 76	29. 6	1. 76	
JIX	30. 7	1. 72	30. 9	1. 73	30. 7	1. 76	
LCH	30	1. 69	29. 5	1. 72	31. 0	1. 66	
LIP	31	1. 69	31. 7	1. 69	31. 0	1. 73	

续表 2													
台站代码	本文		黄海波等 (2014)		沈玉松等 (2013)		台站代码	本文		黄海波等 (2014)		沈玉松等 (2013)	
	<i>H</i> /km	κ 波速比	<i>H</i> /km	κ 波速比	<i>H</i> /km	κ 波速比		<i>H</i> /km	κ 波速比	<i>H</i> /km	κ 波速比	<i>H</i> /km	κ 波速比
LIZ	30.7	1.76	31.8	1.72	31.2	1.77	XFJ	30.0	1.74	29.8	1.76	30.2	1.75
LTK	30.4	1.67	29.7	1.70	30.0	1.71	XIG	29.7	1.73	30.0	1.75	30.8	1.72
NAO	27.5	1.79	27.7	1.79	27.5	1.81	XNH	26.8	1.71	26.9	1.72	27.4	1.71
PUN	29.6	1.76	29.7	1.78	29.7	1.78	XNY	29.6	1.69	29.3	1.71	29.9	1.69
SCD	25.9	1.73	26	1.73	26.5	1.72	YGC	29.4	1.70	30.0	1.68	30.4	1.69
SHD	27.1	1.67	26.9	1.70	27.6	1.68	YGD	27.9	1.67	27.5	1.71	28.5	1.69
SHG	28.1	1.73	28.5	1.73	29.0	1.71	YGJ	30.0	1.68	29.4	1.72	30.1	1.7
SHT	28.6	1.76	28.7	1.75	28.9	1.76	YGX	28.2	1.71	28.0	1.73	28.7	1.7
SHW	27.8	1.74	27.8	1.75	29.0	1.72	ZHS	27.0	1.69	27.0	1.71	27.1	1.71
SLG	26.9	1.74	27	1.75	27.4	1.73	ZIJ	30.4	1.72	30.2	1.72	30.8	1.72
SZN	28.9	1.75	29.2	1.73	29.3	1.73	ZHQ	27.1	1.69	27.0	1.71	27.9	1.69
TIS	27.3	1.72	27.3	1.73	27.4	1.73	YND	29.5	1.68	29.5	1.69	29.2	1.71
TIX	29.6	1.75	28.5	1.78	29.5	1.75	ZHJ	26.5	1.68	26.3	1.70	26.8	1.68

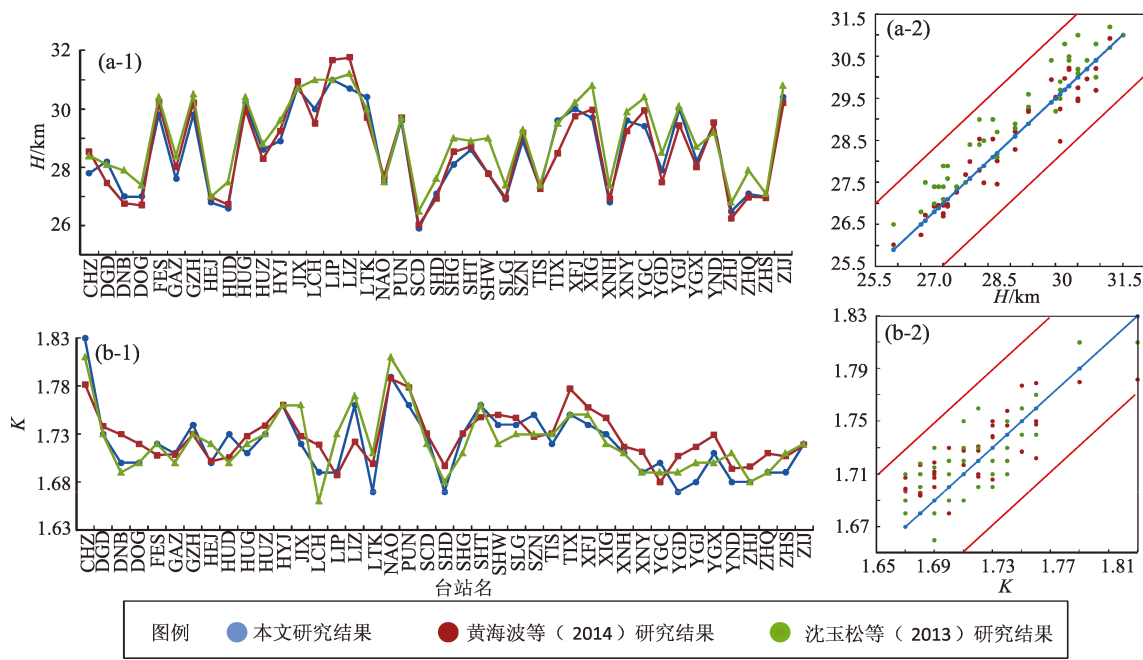


图5 3种研究得出的广东地区地壳厚度 (a) 和波速比 (b) 对比及一致性分析

Fig. 5 Consistency of the crustal thickness (a) and the wave velocity ratio (b) in Guangdong obtained in this paper and from other sources

3 讨论

3.1 地壳厚度

广东地区地壳厚度分布图 (图 6a) 显示:
①地壳厚度由北向南、自西向东减薄, 整体上变化范围较小, 与该地区具有内陆区域向大洋区域过渡的地壳—上地幔结构特征相一致 (赵明辉

等, 2007; 夏少红等, 2010), 也与华南地区地壳厚度变化的趋势相一致。②广东地区地壳厚度呈区域性带状分布, 与研究区内山脉隆起、平原和山地相间的地质构造相关。该地区的主要断裂呈 NE 和 NW 走向, 且一部分断裂相互交错, 在断裂交会地区地壳厚度较大, 出现较明显的区域性带状分布特征。该地区东南部、沿海地区的地壳厚度较薄, 东北部地壳厚度较大, 地壳厚度沿

主要断裂带突变明显。③揭西、龙潭口、连平和紫金等周边地区地壳厚度较厚,为 30.0 ~ 31.0 km; 韶关、南澳、潮州和肇庆等周边地区地壳厚度较薄,为 27.0 ~ 30.0 km; 湛江、遂溪、上川岛和珠海等周边地区地壳厚度较薄,为 24.8 ~ 27.0 km。

3.2 泊松比

图 6b 显示: ①广东地区泊松比呈区域性块状分布,从整体上来分析,泊松比呈区域性带状分布,与断裂的分布对应较好。因此,本文推测泊松比呈区域性块状分布与地壳中主要的深大断裂切割的地质块体有一定的关联性,这也与李海艳等 (2021) 的研究结果相吻合。②泊松比横向不均匀性明显,北部整体偏高,南部整体偏低,且

沿着主要断裂带的突变明显。③Zandt 和 Ammon (1995) 研究发现: 对于下地壳岩石而言,当泊松比小于 0.26 时,表明地壳介质中含有长英质; 当泊松比介于 0.26 ~ 0.28 时,表明地壳介质中长英质向铁镁质的过渡阶段; 当泊松比大于 0.28 时,表明地壳介质中含有铁镁质。广东地区的泊松比为 0.220 ~ 0.287, 平均泊松比为 0.244, 表明该区地壳介质中铁镁质含量很少。潮州、南澳和遂溪等周边地区泊松比高,为 0.262 ~ 0.287, 表明此区域为地壳介质中长英质向铁镁质的过渡阶段; 韶关、广州、深圳和南雄等周边地区泊松比较低,为 0.249 ~ 0.262, 龙川、阳江、肇庆和珠海等周边地区泊松比低,为 0.220 ~ 0.249, 表明此区域地壳介质中长英质含量居多。

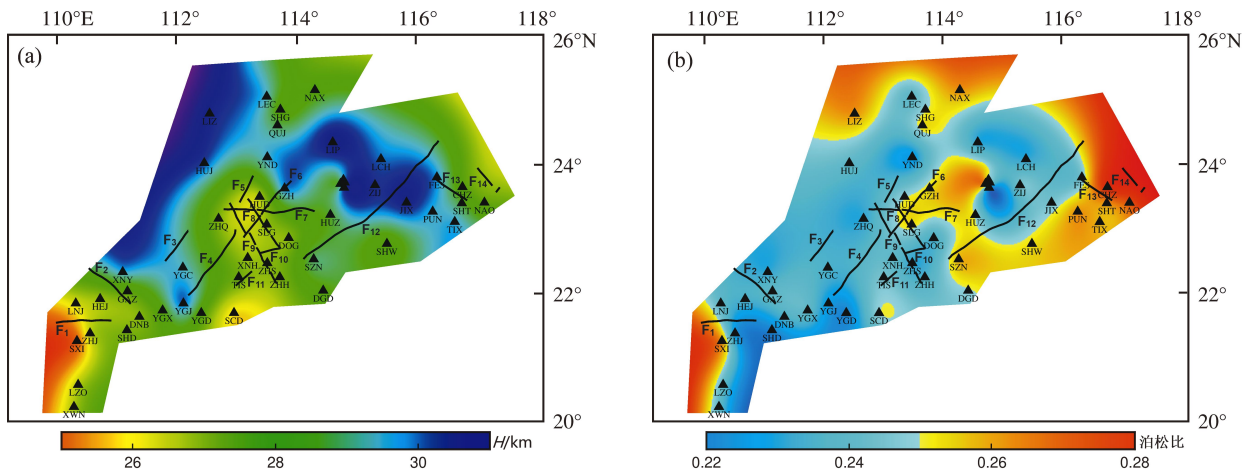


图 6 广东地区地壳厚度 (a) 和泊松比 (b) 分布

Fig. 6 Distribution of crustal thickness (a) and Poisson's ratio (b) in Guangdong Area

3.3 地壳厚度和泊松比分布与断裂的关联

广东地区主要发育 NE 向、NW 向和近 EW 向断裂 (图 1), 这些断裂是地貌单元的主要分界, 形成平原山地、断陷盆地及褶皱隆起等构造地貌特征, 本文分别在这 3 种走向断裂中各选取一条与地貌特征进行对比。①五华—深圳断裂为 NW 走向, 所经过的地区地壳厚度成条带状减薄, 从北部的 30 km 减至滨海地区的 29 km 左右, 推测可能受到断裂的影响。泊松比表现出相反的变化趋势, 即由内陆地区的 0.24 向沿海地区增至 0.26 左右, 表明地壳中镁铁物质的增加。②西江断裂为 NE 走向, 与广州—从化断裂相交, 地壳

厚度自北向东变化幅度不大, 但断裂两侧有较明显的变化, 可能是由于断裂两侧地块经历了不同的地质年代, 分属不同年代的地层, 导致断裂两侧的莫霍面深度不同。泊松比自北部向海滨地区减小, 推测北部地区可能存在破碎带或者流体活动, 从而导致泊松比的增加。③罗浮山—瘦狗岭断裂为近 EW 走向, 与广州—从化断裂、西江断裂和白泥—沙湾断裂相交, 泊松比由西向东增大, 揭示了地壳中镁铁物质的增加, 地壳厚度也由西向东增厚。分析其原因为, 断裂交会区域岩石松散破碎, 易成为岩浆上侵或喷出的通道, 导致地壳活动活跃, 而且部分断裂今仍具有活动性, 使

得地壳厚度与泊松比由西向东增大。

综上,地壳厚度和泊松比分布与断裂的分布有较好的对应关系,地壳厚度与泊松比在断裂附近变化明显。广东地区断裂主要分布在中南部,地壳厚度自西北往东南减薄,地壳厚度与地貌特征有明显的对应关系,沿海地区泊松比高于内陆地区,中南部的断裂交会处地壳岩石中镁铁成分明显增加,导致泊松比升高。

3.4 地壳厚度与泊松比的关系

地壳厚度与泊松比之间的关系反映出大陆地壳形成和构造演化进程情况。大陆地壳岩石组成在水平方向上是不均匀的,所以当其增厚或变薄时,地壳厚度与泊松比之间会呈现出某种线性关系(嵇少丞等,2009)。

广东地区地壳厚度与泊松比的相关性如图7所示,图7a显示:地壳厚度与泊松比呈负相关性,即泊松比随着地壳厚度的增大而减小,对该现象分析认为:古太平洋板块在大洋地壳演化过程中向广东

大陆方向推进,大量的幔源物质流入地壳内,在地壳深部存在部分熔融,导致地壳岩石中镁铁成分的含量上升,从而引起广东地区泊松比的升高。为了进一步验证地壳厚度与泊松比的相关性,将本文结果与沈玉松等(2013)和黄海波等(2014)的结果进行对比分析,如图7b、c所示。本文与黄海波等(2014)得出的地壳厚度与泊松比的相关性一致,与沈玉松等(2013)得到的相关性相反。针对以上现象,分析认为:①在接收函数反演中,存在极大的不唯一性,反演结果的好坏对数据的选取有一定的依赖性。数据的选取受场地条件、台站记录质量和数量等诸多因素的影响。因此,本文与沈玉松等(2013)的地壳厚度与泊松比相关性呈现相反结果。②以萍乡—广丰断裂为界,华夏地块的泊松比与地壳厚度呈负相关趋势,扬子块体的泊松比与地壳厚度呈正相关趋势(赵延娜等,2017)。由于广东地区位于华夏板块(王雅迪等,2021),因此该地区地壳厚度与泊松比呈负相关。

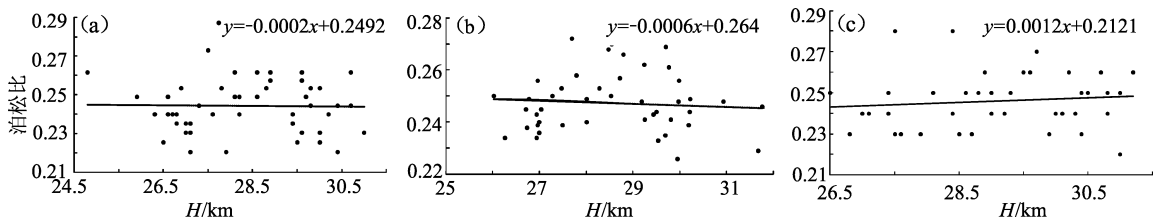


图7 本文(a)、黄海波等(2014)(b)和沈玉松等(2013)(c)得出的广东地区地壳厚度与泊松比的相关性

Fig. 7 The crustal thickness and Poisson's ratio in Guangdong area obtained in this paper (a), from Huang *et al* (2014) (b) and Shen *et al* (2013) (c) and their correlation

4 结论

本文对广东地震台网的49个固定台站的远震波形资料进行处理,得到每一个台站下方的接收函数波形。采用 $H-\kappa$ 叠加方法获取了台站下方的地壳厚度与泊松比,揭示了广东地区地壳厚度与泊松比的变化特征,得出了以下主要结论:

(1) 广东地区整体上地壳厚度较薄,为24.8~31.0 km,平均地壳厚度为28.3 km,地壳厚度总体上变化不大(地壳厚度之差为6.2 km),整体上呈现出自西北往东南减薄的趋势。广东地区地壳厚度

呈区域性带状分布特征,一是与研究区内山脉隆起、平原和山地相间的地质构造相关,二是该地区的主要断裂呈NE走向和NW走向,且一部分断裂相互交错,与在断裂交会地区地壳厚度较大相关。按照地壳厚度的变化特征,该地区整体上形成了沿海的滨海断裂、粤西、珠江和粤东等块体。

(2) 广东地区泊松比为0.220~0.287,平均泊松比为0.244,小于0.29,表明地壳中主要包含中、酸性岩石,地壳介质中长英质含量居多。总体来看,泊松比北部偏高,南部偏低,沿海地区高于内陆地区。广东地区泊松比呈区域性块状分布,与地壳中主要的深大断裂切割的地质块体有一定的关联性,

但从整体上看,泊松比呈区域性带状分布,与断裂存在的地区有很好的对应关系。沿海的高泊松比区域与断裂带交会区域有一定的关联性,也与该区域热流值普遍偏高、温泉分布较广泛(熊绍柏等,1991)的现象较为一致。

(3) 地壳厚度和泊松比分布与断裂的分布有较好的对应关系。地壳厚度与泊松比在断裂带附近变化明显,其原因可能为部分断裂带至今仍具有活动性,在这些地质构造活动剧烈的区域地壳地幔间可能存在物质和能量的交换。从广东地区历史地震分布来看,泊松比较高地区的地震活跃性明显要高。

(4) 地壳厚度与泊松比呈负相关,即泊松比随着地壳厚度的增大而减小。分析该现象认为:古太平洋板块在大洋地壳演化过程中向广东大陆方向推进,大量的幔源物质流入地壳内,在地壳深部存在部分熔融,导致地壳岩石中镁铁成分的含量上升,从而引起广东地区泊松比的升高。

本文所获得的地壳厚度与泊松比只是广东地区地壳结构的估计结果,不能用来研究该地区更为详细的地壳结构。为更好地约束地下结构,下一步将接收函数与面波进行联合反演,提高分辨能力,为研究该地区更为精细的地壳结构特征奠定基础。

特别感谢防灾科技学院谭萍副教授在资料处理过程中的帮助及提供的 $H-\kappa$ 叠加程序,本文大部分图件由 GMT6 软件绘制而成。

参考文献:

- 安张辉,周民都,吴庆举,等. 2004. 接收函数方法研究进展[J]. 西北地震学报,26(4):362-365.
- An Z H, Zhou M D, Wu Q J, et al. 2004. Progress in the study of receiver function methods[J]. Northwestern Seismological Journal, 26(4):362-365. (in Chinese)
- 蔡学林,朱介寿,曹家敏,等. 2003. 华南地区岩石圈三维结构类型与演化动力学[J]. 大地构造与成矿学,27(4):301-312.
- Cai X L, Zhu J S, Cao J M, et al. 2003. Three-dimensional structural types and evolutionary dynamics of the lithosphere in South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 27(4):301-312. (in Chinese)
- 黄海波,郭兴伟,夏少红,等. 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.
- Huang H B, Guo X W, Xia S H, et al. 2014. Study on crustal thickness and Poisson's ratio in coastal areas of South China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(12):3896-3906. (in Chinese)
- 稽少丞,王茜,杨文采,等. 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[J]. 地质学报,83(3):324-330.
- Ji S C, Wang X, Yang W C, et al. 2009. Relationship between Poisson's ratio and crustal thickness in the North China Craton and its geotectonic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 83(3):324-330.
- 李海艳,蔡辉腾,金星,等. 2021. 利用远震 P 波接收函数研究中国福建地区地壳厚度与泊松比[J]. 地球物理学报,64(3):805-822.
- Li H Y, Cai H T, Jin X, et al. 2021. Study of crustal thickness and Poisson's ratio in Fujian, China, using the teleseismic P-wave reception function[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(3):805-822. (in Chinese)
- 沈玉松,康英,徐果明. 2013. 广东及其邻域的地壳厚度和泊松比分布[J]. 中国地震,29(2):210-218.
- Shen Y S, Kang Y, Xu G M. 2013. Crustal thickness and Poisson's ratio distribution in Guangdong and its neighboring areas[J]. Earthquake Research in China, 29(2):210-218. (in Chinese)
- 孙丽,刘瑞丰,黄志斌,等. 2008. 用接收函数研究川滇地区国家地震台下地壳厚度及波速比[J]. 中国地震,24(4):362-369.
- Sun L, Liu R F, Huang Z B, et al. 2008. Study of crustal thickness and wave velocity ratio under national seismic stations in Sichuan and Yunnan regions using reception functions[J]. Earthquake Research in China, 24(4):362-369. (in Chinese)
- 王雅迪,于津海,李晓玲,等. 2021. 扬子地块与华夏地块的西段界限:来自桂北和桂东新元古界—寒武系沉积岩的证据[J]. 地质学报,95(6):1712-1726.
- Wang Y D, Yu J H, Li X L, et al. 2021. Western boundary of the Yangzi Massif and the Huaxia Massif: Evidence from Neogene—Cambrian sedimentary rocks in northern and eastern Guizhou[J]. Chinese Journal of Geology, 95(6):1712-1726. (in Chinese)
- 魏柏林,冯绚敏,陈定国,等. 2001. 东南沿海地震活动特征[M]. 北京:地震出版社.
- Wei B L, Feng X M, Chen D G, et al. 2001. Characteristics of seismic activity along the southeast coast[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 吴庆举,李永华,张瑞青,等. 2007a. 接收函数的克希霍夫 2D 偏移方法[J]. 地球物理学报,50(2):539-545.
- Wu Q J, Li Y H, Zhang R Q, et al. 2007a. The Kirschhoff 2D offset method for the receiver function[J]. Chinese Journal of Geophysics, 50(2):539-545. (in Chinese)
- 吴庆举,李永华,张瑞青,等. 2007b. 用多道反褶积方法测定台站接收函数[J]. 地球物理学报,50(3):791-796.
- Wu Q J, Li Y H, Zhang R Q, et al. 2007b. Determination of station reception functions by multi-channel inverse fold method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 50(3):791-796. (in Chinese)

- 吴庆举,田小波,张乃铃,等.2003.用Wiener滤波方法提取台站接收函数[J].中国地震,19(1):41-47.
- Wu Q J,Tian X B,Zhang N L,*et al.* 2003. Extraction of station reception functions by Wiener filtering method[J]. Earthquake Research China,19(1):41-47. (in Chinese)
- 吴庆举,曾融生,赵文津.2004.喜马拉雅—青藏高原的上地幔倾斜构造与陆—陆碰撞过程[J].中国科学:地球科学,34(10):919-925.
- Wu Q J,Zeng R S,Zhao W J. 2004. Upper mantle tilting tectonics and land-land collision processes in the Himalayan-Tibetan Plateau[J]. Science China:Earth Sciences,34(10):919-925. (in Chinese)
- 夏少红,丘学林,赵明辉,等.2010.南海北部海陆过渡带地壳平均速度及莫霍面深度分析[J].热带海洋学报,29(4):63-70.
- Xia S H,Qiu X L,Zhao M H,*et al.* 2010. Analysis of mean crustal velocities and Moho surface depths in the sea-land transition zone of the northern South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography,29(4):63-70. (in Chinese)
- 熊邵柏,金东敏,孙克忠,等.1991.福建漳州地热田及其邻近地区的地壳深部构造特征[J].地球物理学报,34(1):55-63.
- Xiong S B,Jin D M,Sun K Z,*et al.* 1991. Deep tectonic features of the crust in the Zhangzhou geothermal field and its adjacent areas in Fujian[J]. Chinese Journal of Geophysics,34(1):55-63. (in Chinese)
- 许卫卫,郑天愉,赵亮.2011.华北地区410km间断面和660km间断面结构——克拉通活化的地幔动力学状态探测[J].中国科学:地球科学,41(5):678-685.
- Xu W W,Zheng T Y,Zhao L. 2011. Mantle dynamical state detection of 410 km intermittent surface and 660 km intermittent surface structure: Kraton activation in North China[J]. Science China:Earth Sciences,41(5):678-685. (in Chinese)
- 杨中书,崇加军,倪四道,等.2010.利用远震下方接收函数研究江西省地震台站莫霍面深度及泊松比分布[J].华南地震,30(1):47-55.
- Yang Z S,Chong J J,Ni S D,*et al.* 2010. Study of Moho surface depth and Poisson's ratio distribution at seismic stations in Jiangxi Province using the reception function below the far seismic[J]. South China Journal of Seismology,30(1):47-55. (in Chinese)
- 袁丽文,郑斯华.2009.用远震接收函数反演福建地区宽频带台站下方莫霍界面深度[J].华南地震,29(3):85-97.
- Yuan L W,Zheng S H. 2009. Inversion of Moho interface depth below broadband stations in Fujian area using teleseismic reception function [J]. South China Journal of Seismology,29(3):85-97. (in Chinese)
- 赵明辉,丘学林,徐辉龙,等.2007.南海北部沉积层和地壳内低速层的分布和识别[J].自然科学进展,17(4):471-479.
- Zhao M H,Qiu X L,Xu H L,*et al.* 2007. Distribution and identification of sedimentary layers and low-velocity layers within the crust in the northern South China Sea[J]. Advances in Natural Sciences,17(4):471-479. (in Chinese)
- 赵延娜,段永红,魏运浩,等.2017.华南大陆东部赣闽地区地壳厚度与泊松比研究[J].大地测量与地球动力学,37(3):261-266.
- Zhao Y N,Duan Y H,Wei Y H,*et al.* 2017. Study of crustal thickness and Poisson's ratio in the Gan and Min region, eastern mainland China [J]. Geodesy and Geodynamics,37(3):261-266. (in Chinese)
- 郑圻森,朱介寿,宣瑞卿,等.2003.华南地区地壳速度结构分析[J].沉积与特提斯地质,23(4):9-13.
- Zheng Q S,Zhu J S,Xuan R Q,*et al.* 2003. Analysis of crustal velocity structure in South China[J]. Sedimentary Geology and Tethys Geology,23(4):9-13. (in Chinese)
- 邹最红,陈晓非.2003.利用SV分量接收函数反演地壳横波速度结构[J].地震学报,25(1):15-23.
- Zou Z H,Chen X F. 2003. Inversion of crustal transverse velocity structure using SV component receiver function[J]. Acta Seismologica Sinica,25(1):15-23. (in Chinese)
- Ammon C J,Randall G E,Zandt G. 1990. On the non-uniqueness of receiver function inversions[J]. Journal of Geophysic Research Atmospheres,95(B10):303-315.
- Johnson R W. 2001. An introduction to the Bootstrap[J]. Teaching Statistics,23(2):49-54.
- Langston C A. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth,84(B9):4749-4762.
- Yuan X,Kind R,Mechie J,*et al.* 1997. Lithospheric and upper mantle structure of southern Tibet from a seismological passive source experiment [J]. Journal of Geophysical Research,102(B12):27491-27500.
- Zandt G,Ammon C J. 1995. Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio[J]. Nature,374(6518):152-154.
- Zhu L P,Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth,105(B2):2969-2980.

Study of the Crustal Thickness and Poisson's Ratio in Guangdong with Receiver Function Method

LI Qidong^{1,2}, XIE Zhuojuan^{1,2}

(1. *National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China*)

(2. *Key Laboratory of Compound and Chained Natural Hazards Dynamics, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China*)

Abstract

The teleseismic data recorded at 49 seismic stations in Guangdong were selected, and the P-wave receiver function was extracted using the iterative deconvolution method in the time domain. The crustal thickness and Poisson's ratio below the stations were obtained by the $H-\kappa$ superposition method. The results show that: ①In Guangdong region, the crustal thickness ranges from 24.8 to 31.0 km, with an average of 28.3 km, and becomes thinner and thinner from northwest to southeast, showing a regional zonal distribution. This may be related to the geological structure of the uplifted mountains, plains and high land in the study area. ②In Guangdong region, Poisson's ratio ranges from 0.220 to 0.287, with a mean value of 0.244. Poisson's ratio is higher in the north and lower in the south, and is higher in coastal areas than inland areas; Poisson's ratio distributes in regional blocks. This may be related to the geological blocks cut by deep major faults in the Crust. ③The distribution of the Crustal thickness and Poisson's ratio correspond well with the distribution of the faults and they vary significantly near the faults. ④The Crustal thickness and Poisson's ratio are negatively correlated, because during the evolution of the Crust, the ancient Pacific plate extruded toward the Guangdong continent, then the mantle-sourced materials got into the Crust, and partially melted in the deep Crust. This led to the increase of the contents of magnesium and iron in the rocks, thus causing the increase of Poisson's ratio.

Keywords: Guangdong region; receiver function; crustal thickness; the Poisson's ratio