

# 重庆及周边地区地壳各向异性研究<sup>\*</sup>

董 蕾<sup>1</sup>, 李建有<sup>2</sup>, 姜维松<sup>1</sup>, 李翠平<sup>1</sup>

(1. 重庆市地震局, 重庆 401147; 2. 昆明南方地球物理技术开发有限公司, 云南 昆明 650091)

**摘要:** 根据重庆及周边地区固定地震台站记录的远震资料提取了接收函数, 并利用接收函数 Pms 相到时方差最小方法建立网格搜索, 最终获得该区的地壳各向异性参数。结果表明: 重庆及周边地区的地壳各向异性延迟时间为 0.14 ~ 0.91 s, 平均为 0.4 s; 快波偏振方向主要有 NEE、NNW 和 NWW 向, 并且大部分台站快波方向与所在区域的主压应力方向明显不一致; 重庆地区地壳各向异性具有横向不均匀性及分区特征, 岩石圈形变特征主要来自地幔各向异性。

**关键词:** 接收函数; 地壳各向异性; 重庆及周边地区

**中图分类号:** P313.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2021)02-0145-07

## 0 引言

重庆位于我国四川盆地东部、南北向构造带的东侧, 属于东、西部板块运动的“中间过渡地区”, 以城口断裂、青峰断裂分界, 分属于扬子准地台和秦岭地槽褶皱系两个一级构造单元。重庆断褶构造的形成和地壳的缩短、隆升, 分别与印度板块和太平洋板块碰撞、俯冲挤压相联系, 并且以城口断裂、华蓥山基底断裂西北侧和七曜山—金佛山基底断裂为界分为 4 个地震构造区。研究表明重庆地区呈 NW 向挤压的应变状态, 其中主压应力方向以 NW 向为主, 部分区域呈 NE 向 (丁仁杰, 李克昌, 2004; 陈涛等, 2018), 但不同的形变观测手段研究的该地区内部构造运动的结果并不一致 (陈涛等, 2018)。因此, 该地区的地壳深部应力环境和构造特征有待进行更深入的研究。

地震各向异性与介质结构、区域应力、介质变形及断裂分布等密切相关 (高原等, 2020)。对地壳构造应力特征和地球内部变形机制的探讨均具有重要的科学参考价值。在具有水平对称轴的各向异性水平层状介质中, 接收函数的 Ps 转换波是唯一在 Moho 面生成并对横波分裂敏感的震相, 它的到时与事件入射方位角呈余弦函数特征, 这

一特征是诊断各向异性的工具。由地表观测到的 Pms 剪切波分裂所携带的关于传播介质的各向异性信息全部来自地壳内部, 与地幔无关。使用接收函数研究地壳各向异性的方法已经被广泛应用 (Vinnik, Montagner, 1996; 孙长青等, 2011; Liu, Niu 2012; Chen *et al.*, 2013; Kong *et al.*, 2016), Rumpker 等 (2014) 提出用多地震事件按方位角叠加方法, 并根据径向 Pms 相叠加能量最大原则确定各向异性, 可以弥补事件覆盖不均匀的缺点, 同时可以抑制随机噪声的影响; 韩明等 (2017) 对比了 Pms 相到时方差最小法和 Pms 相叠加振幅最大法, 并进行了合成理论地震图试验, 表明 Pms 相到时方差最小法受噪声影响不明显, 可以得到稳定的结果。本文利用 Pms 相到时方差最小法, 计算重庆及周边地区的地震台站下方地壳各向异性参数, 探讨该地区地壳各向异性特征及其深部构造意义。

## 1 数据和方法

### 1.1 观测数据及处理

本文利用重庆地震台网及邻区固定的地震台站 (图 1), 根据中国地震台网中心提供的地震目录, 从中选取了 2011 年 1 月—2018 年 10 月 M

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-07-05.

基金项目: 地震监测、预测、科研三结合课题 (3JH-202001072) 资助.

第一作者简介: 董蕾 (1986-), 工程师, 主要从事地震监测工作. E-mail: dongleiyue@163.com.

$\geq 5.5$ 、震中距为  $30^\circ \sim 95^\circ$  的远震记录 (图 2)。再利用远震波形计算 P 波接收函数: 截取 P 波到前 20 s、后 120 s 的三分量波形数据 (图 3a); 将截取后的  $N$ 、 $E$  分量波形旋转至  $R$ 、 $T$  分量 (图 3b); 选取滤波因子 2.5, 利用时间域反褶积方法, 计算  $R$  向接收函数 (图 3c), 从中挑选转换相清楚的接收函数。

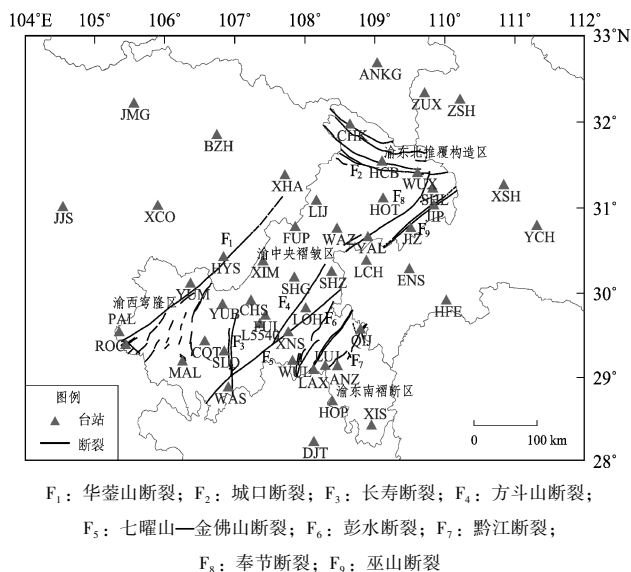


图 1 重庆及周边地区断裂及地震台站分布

Fig. 1 Distribution of faults in Chongqing and its surrounding area and locations of the seismic stations used in study

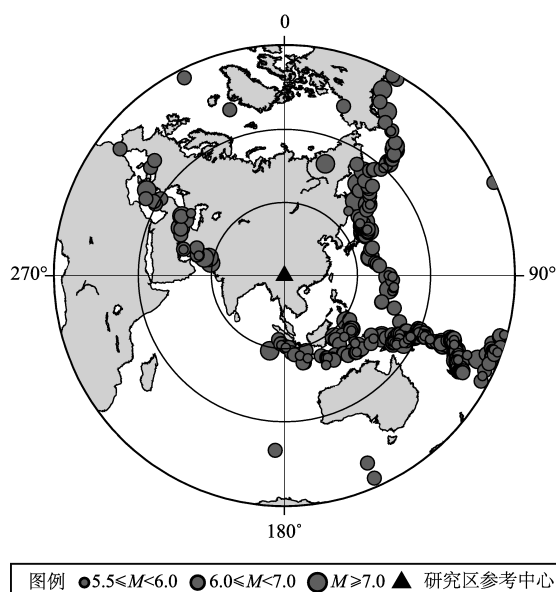


图 2 本文所选取的地震事件分布

Fig. 2 Locations of the earthquakes used in study

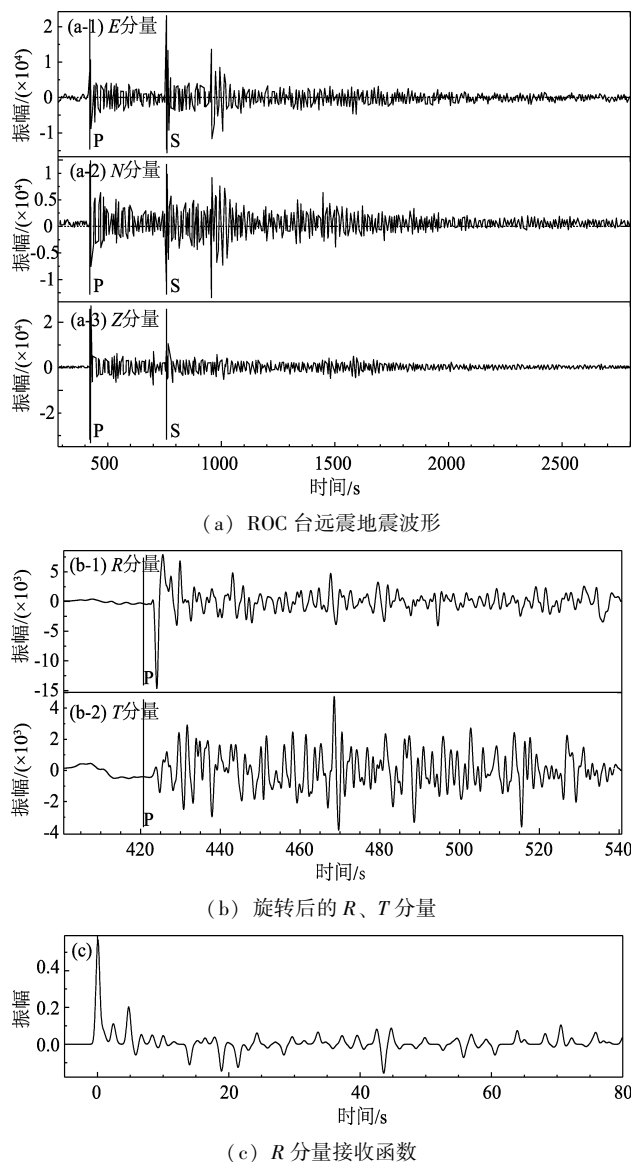


图 3 利用远震波形计算 ROC 台的接收函数

Fig. 3 Calculation of receiver function at ROC station by using teleseismic waveform

由于各个地震事件的射线参数 (或震中距) 不同, 并且  $R$  分量接收函数的  $P_{ms}$  相到时与震中距有关, 所以必须先进行到时校正。将接收函数曲线上的  $P_s$  震相的到时都校正到一条任取的基准曲线上 (本文以 IASP91 模型为参考, 取震中距为  $67^\circ$ )。到时校正后, 按后方位角  $10^\circ$  为间隔, 将这一后方位角范围内的接收函数叠加成一道信号。图 4a 和图 5a 分为 ROC 台和 WAS 台接收函数的后方位角叠加结果。

## 1.2 各向异性参数

在水平各向异性介质中,  $R$  分量接收函数的

Pms 相到时随后方位角呈现  $\pi$  的周期性。Pms 相的到时  $t_{ps}$  与后方位角的关系为:

$$t_{ps} = t_0 + \Delta t = t_0 - \frac{\delta t}{2} \cos(2\text{baz} - 2\varphi) \quad (1)$$

式中:  $t_0$  为各向同性下, Pms 相的到时;  $t_{ps}$  为计算得出的理论到时。本文对  $0 \sim 360^\circ$  后方位角范围内的 36 道叠加信号进行 Pms 相识别, 拾取不同后方位角的 Pms 相观测到时  $t_{ops}$ 。

为了求得稳定的快波方位角 ( $\varphi$ ) 和分裂时间 ( $\delta t$ ), 给定不同的快波方位角和快慢波之间的延时, 以此计算 Ps 震相的理论到时  $t_{ps}$ , 以 Pms 相的观测到时  $t_{ops}$  与理论到时  $t_{ps}$  之差的平方和达到最小为准则, 进行二维网格搜索获取稳定的 Pms 相的分裂参数。如图 4b 所示, 图中黑色圆点代表 Pms 相最大振幅对应的到时, 黑线为 ROC 台 Pms 相理论到时, 最终进行网格搜索得到快波偏振方向为  $71^\circ$ , 延迟时间为 0.39 s (图 4c)。

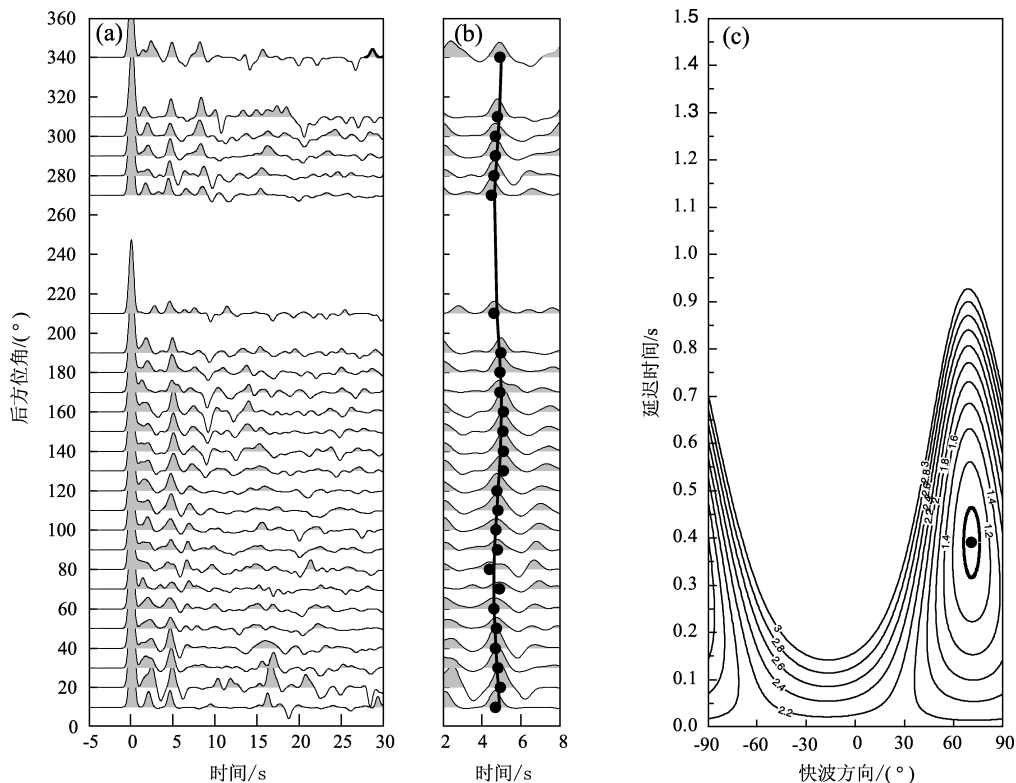


图4 ROC 台 Pms 震相到时拟合结果

Fig. 4 The fitting result of arrival time of Pms phase at ROC station

## 2 研究结果

由于观测原因等, 需剔除接收函数质量较差或后方位角覆盖较差的台站, 本文对重庆及周边地区 44 个台站的接收函数进行叠加, 其中有一些台站的周期性不明显, 如 WAS 台接收函数质量较好, 但到时随方位角变化周期性不明显 (图 5b), 因此认为这些台站地壳弱各向异性。PAL 台、SHG 台、BZH 台、CHS 台存在同样的情况, 一并剔除这些台站的结果。

本文最终对周期性明显的 39 个台站进行各向异性参数计算, 获得 39 组 Pms 相分裂结果 (表 1)。由表 1 可见, 研究区延迟时间为 0.14 ~ 0.91 s, 平均为 0.4 s。如图 6 所示, 快波偏振方向主要有 NE、NNW 和 NWW 向, 主要受断裂分布的影响。华蓥山断裂两侧的各向异性特征差异较大, 断裂附近的 ROC、YUM、HYS 台偏振方向为 NE 向, 与断裂走向一致, 延迟时间平均为 0.36 s; 而其东南部的 YUB、XIM 台延迟时间较小, 各向异性较弱。七曜山—金佛山断裂西南侧的 SLO、FUL、L5540、XNS 台延迟时间为 0.39 ~ 0.62 s, 偏振方

向为 NE 向, 与该断裂走向一致。七曜山—金佛山断裂西北侧、方斗山断裂东侧的 LOH、SHZ 台偏振方向为 NNW 向。

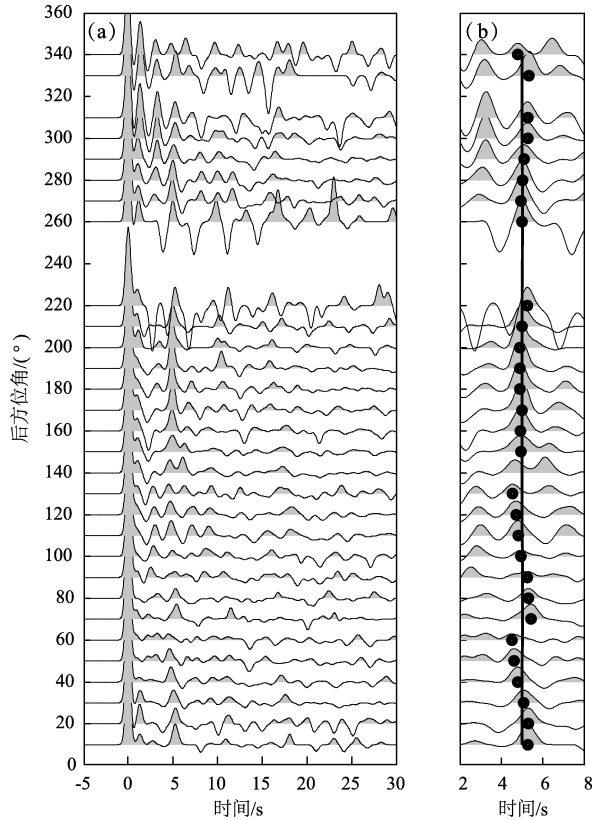


图 5 WAS 台 Pms 相到时拟合结果  
Fig. 5 The fitting result of arrival time of Pms phase at ROC station

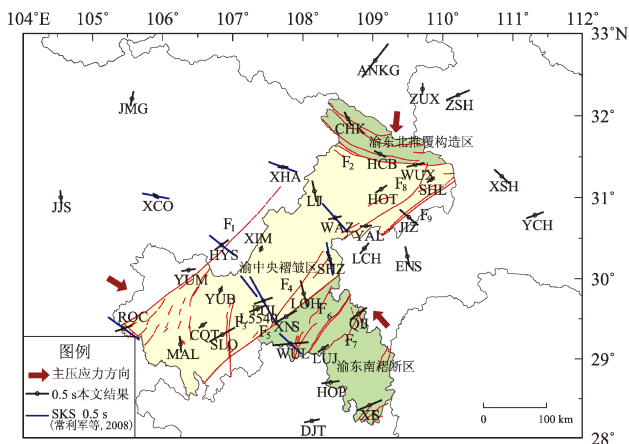


图 6 重庆及周边地区地壳各向异性和 SKS 分裂获取的各向异性结果对比 (断裂同图 1)

Fig. 6 Crustal anisotropy in Chongqing and its surrounding area and anisotropic results obtained by SKS phase splitting (faults is same as in Fig. 1)

表 1 重庆及周边地区地震台站下方地壳各向异性计算结果  
Tab. 1 Calculated results of crustal anisotropy beneath seismic stations in Chongqing and its surrounding area

序号	台站代码	台站名称	偏振方向/ (°)	延迟时间/ s	接收函数 条目数
1	CHK	城口台	153 ± 6	0.33 ± 0.07	305
2	CQT	重庆台	53 ± 9	0.21 ± 0.07	269
3	FUL	涪陵台	71 ± 4	0.42 ± 0.08	352
4	HCB	红池坝台	119 ± 8	0.28 ± 0.06	168
5	HOP	后坪台	82 ± 5	0.39 ± 0.07	235
6	HOT	奉节红土台	57 ± 6	0.3 ± 0.07	149
7	JJZ	奉节荆竹台	131 ± 4	0.52 ± 0.07	243
8	L5540	流动台 5540	68 ± 5	0.39 ± 0.08	54
9	LIJ	开县临江台	169 ± 4	0.47 ± 0.08	248
10	LOH	丰都龙河台	166 ± 3	0.57 ± 0.08	122
11	LUJ	鹿角台	55 ± 7	0.28 ± 0.07	163
12	MAL	江津麻柳台	174 ± 6	0.35 ± 0.07	340
13	QIJ	黔江台	53 ± 5	0.44 ± 0.07	299
14	ROC	荣昌台	71 ± 5	0.39 ± 0.07	357
15	SHL	巫山双龙台	53 ± 9	0.2 ± 0.07	273
16	SHZ	奉节荆竹台	157 ± 4	0.35 ± 0.08	338
17	SLO	巴南石龙台	61 ± 3	0.62 ± 0.08	270
18	WAZ	万州台	77 ± 6	0.29 ± 0.07	344
19	WUL	武隆台	85 ± 3	0.77 ± 0.09	353
20	WUX	巫溪台	77 ± 5	0.39 ± 0.08	271
21	XIM	垫江新民台	22 ± 15	0.14 ± 0.06	233
22	XIS	秀山台	67 ± 4	0.58 ± 0.08	213
23	XNS	仙女山台	60 ± 4	0.52 ± 0.08	135
24	YAL	云阳耀灵台	86 ± 7	0.25 ± 0.07	261
25	YUB	渝北台	23 ± 12	0.16 ± 0.06	350
26	YUM	合川云门台	81 ± 6	0.31 ± 0.07	317
27	ANKG	安康台	38 ± 3	0.91 ± 0.09	227
28	ENS	恩施台	168 ± 4	0.43 ± 0.08	118
29	LCH	利川台	39 ± 7	0.3 ± 0.07	319
30	XSH	新山台	133 ± 5	0.44 ± 0.07	319
31	YCH	宜昌台	70 ± 4	0.4 ± 0.08	326
32	ZSH	竹山台	67 ± 4	0.54 ± 0.08	335
33	ZUX	竹溪台	2 ± 8	0.26 ± 0.07	315
34	DJT	德江台	78 ± 5	0.34 ± 0.08	237
35	HYS	华蓥山台	53 ± 5	0.37 ± 0.07	256
36	XCO	西充台	135 ± 5	0.17 ± 0.07	254
37	XHA	宣汉台	88 ± 6	0.23 ± 0.07	201
38	JMG	剑门关台	12 ± 6	0.33 ± 0.07	320
39	JJS	金鸡寺台	175 ± 6	0.3 ± 0.07	242

### 3 讨论

上地壳各向异性主要是由 EDA (extensive dilatancy anisotropy, 各向异性) 微裂隙定向排列造成 (Crampin, Atkinson, 1985; Crampin, Peacock, 2005; Crampin, Gao, 2014), 一般情况下, 快波方向与裂隙优势排列方向和最大水平主压应力方向一致 (Crampin, Peacock, 2005; 高原等, 2020)。而在中下地壳裂隙闭合, 各向异性成因主要与下地壳造岩矿物晶格的定向排列或物质流动引起的层理优势排列有关 (韩明等, 2017; 高原等, 2020)。韩明等 (2017) 根据 Pms 震相计算得到的青藏高原东南缘平均延迟时间为 0.54 s 左右, 认为该区 Pms 震相分裂主要由下地壳引起; 邵若潼等 (2019) 同样根据各向异性延迟时间, 认为青藏高原东北缘地壳各向异性主要由下地壳各向异性引起。本文计算得到的平均分裂时间为 0.4 s, 因此认为研究区地壳的各向异性主要为中下地壳的各向异性。

丁仁杰和李克昌 (2004) 依据断层力学性质和现代地震震源机制解 P 轴轴向等综合分析得出, 重庆新生代构造应力场具有由渝西向渝东地区, 构造应力场主压应力方向从 NWW 向逐渐转变为 NNE 向的变化 (图 6); 贺曼秋等 (2008) 利用 SAM 方法对 ROC 台进行 S 波分裂研究, 认为 S 波快波优势分布方向为 NW 向, 与荣昌地区区域应力场方向 (陈涛等, 2018) 大体一致, 与该区的主要基底断裂走向接近垂直。本文计算得到的 ROC 台快波方向为 NE 向, 平行于华蓥山断裂, 与上地

壳的各向异性快波方向基本垂直, ROC 台地壳各向异性延迟时间为 0.39 s, 大于上地壳 S 波分裂延迟时间 0.11 s。孙长青等 (2013) 发现云南地区地壳各向异性快波方向与研究区内断裂带走向一致, 与最大主压应力方向存在较大差异, 认为其各向异性可能主要与矿物晶格定向排列或者熔体的定向排列有关; 强正阳等 (2016) 认为韧性的中下地壳与地幔在受到主压应力挤压后, 矿物晶体发生定向排列, 形成垂直于主压应力方向的各向异性。本文计算得到的研究区大部分台站快波方向与台站附近的断裂走向较一致, 而与主压应力方向明显不一致 (图 6), 进一步说明研究区地壳各向异性主要由中下地壳引起。

重庆地区地壳各向异性具有横向不均匀性, 且具有分区特征。城口断裂、巫溪断裂以北的渝东北推覆构造区 (主要有 CHK、HCB 和 WUX 台) 内的断裂以逆冲性质为主, 与倒转褶皱构造构成强烈挤压的推覆构造区。从该区等面积玫瑰投影图 (图 7a) 可以看出, 延迟时间平均为 0.33 s, 快波方向由 NNW 向转至 EW 向, 与断裂走向基本一致, 该区的地壳各向异性快波方向应该与 NNE 方向的主压应力挤压作用及推覆构造带有关。在华蓥山基底断裂东南, 七曜山—金佛山、方斗山断裂西北地区为渝中央褶皱区, 主要有 15 个台站 (SHL、HOT、LIJ、WAZ、YAL、XIM、FUL、L5540、YUB、CQT、SLO、MAL、XNS、LOH、SHZ); 该区主要有两个快波方向, NNW 向和 NE 向 (图 7b), NNW 向的台站有 LIJ、SHZ、LOH, 其余台站为 NE 向, 垂直于该区主压应力方向, 平行于七曜山—金佛山断裂; 该区中部 (主要有

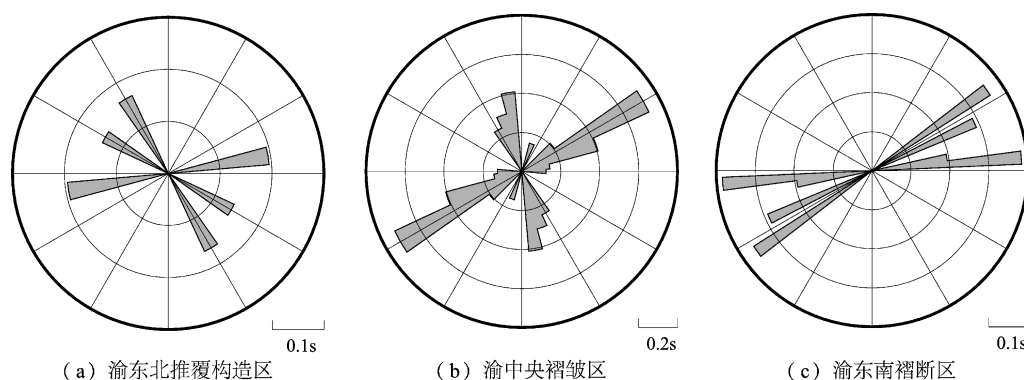


图7 重庆不同构造分区快波方向等面积玫瑰投影图

Fig. 7 Equal-area rose projection of fast wave's direction of Chongqing structural block

XIM、YUB、CQT 台)各向异性较弱,延迟时间最小为 0.14 s。渝东南褶皱断区(主要有 WUL、LUJ、QIJ、HOP、XIS 台)的地壳各向异性等面积玫瑰投影图如图 7c 所示。从图中可以看出,平均延迟时间为 0.49 s,各向异性较强烈,快波方向为 NEE 至 EW 向,与断裂 NE 走向有一定差异;该区主压应力方向为 NW 向,基本垂直于该区的主压应力方向;该区 NE 走向断裂力学性质以逆冲为主,但也发育少量的正断层,其中 2017 年武隆 5.0 级地震的发震断层被认为是张性断裂(李翠平等, 2019)。该区构造应力环境较复杂,这可能是造成快波方向与断裂走向不太一致的原因。

由于 SKS 波分裂垂向分辨率较差,SKS 波相各向异性包含了上、下地壳和上地幔的各向异性特征。本文收集了重庆及周边地区的 SKS 计算结果,与本文获取的地壳各向异性参数进行对比。结果表明,除 SHZ 台的偏振方向与常利军等(2008)计算的上地幔快波方向较一致外,其余台站(ROC、XCO、HYS、XHA、WAZ、YUB、CHS、FUL、WUL)与上地幔快波方向相差较大,并且地壳各向异性弱于上地幔各向异性,说明研究区岩石圈形变特征主要来自地幔各向异性。佐佳卉和钮凤林(2019)在接收函数地壳各向异性研究结果(Sun *et al.*, 2012)的基础上,利用剥去法对 SKS 波分裂进行了分层计算,认为四川盆地中部(包括 ROC)上地幔的各向异性特征一致,主要是地幔各向异性的贡献。SKS 波分裂受上地壳裂隙各向异性的影响(姚陈等, 2016),虽然笔者认为研究区地壳的各向异性主要为中下地壳的各向异性,但不可忽略的是 Pms 分裂应该也包含上地壳各向异性,如何分离上、下地壳的各向异性有待进一步研究。

## 4 结论

本文利用重庆地震台网及邻区固定台站的远震波形资料计算 P 波接收函数,经到时校正后按方位角 10°为间隔将接收函数叠加,最后利用 Pms 相到时方差最小法获取研究区地壳各向异性参数,得出以下主要结论:

(1) 重庆及周边地区的地壳各向异性延迟时间为 0.14 ~ 0.91 s,平均为 0.4 s;研究区的快波

方向与该区的主压应力方向明显不一致,大部分台站的快波方向垂直于主压应力方向。

(2) 本文计算得到的地壳各向异性主要为中下地壳的各向异性;重庆地区地壳各向异性具有横向不均匀性及分区特征,渝东北构造区的地壳各向异性与主压应力挤压作用及推覆构造带有关。将本文研究结果与研究区其他上地幔各向异性研究结果进行对比,认为重庆及周边岩石圈形变特征主要来自地幔各向异性。

## 参考文献:

- 常利军,王椿镛,丁志峰. 2008. 四川及邻区上地幔各向异性研究[J]. 中国科学,38(12):1589-1599.
- 陈涛,张锐,黄世源. 2018. 三峡重庆地区形变场及构造应力场研究[J]. 大地测量与地球动力学,38(2):129-132.
- 丁仁杰,李克昌. 2004. 重庆地震研究[M]. 北京:地震出版社.
- 高原,石玉涛,王琼. 2020. 青藏高原东南缘地震各向异性及其深部构造意义[J]. 地球物理学报,63(3):802-816.
- 韩明,李建有,徐晓雅,等. 2017. 按方位叠加接收函数分析青藏高原东南缘的地壳各向异性[J]. 地球物理学报,60(12):4537-4556.
- 贺曼秋,魏红梅,章静,等. 2008. 荣昌台 S 波分裂研究[J]. 内陆地震,22(1):84-88.
- 李翠平,唐茂云,郭卫英,等. 2019. 2017 年 11 月 23 日重庆武隆 M<sub>s</sub>5.0 地震序列重定位及发震断层分析[J]. 地震地质,41(3):603-618.
- 强正阳,吴庆举,李永华,等. 2016. 蒙古中南部地区地壳各向异性及其动力学意义[J]. 地球物理学报,59(5):1616-1628.
- 邵若潼,沈旭章,张元生. 2019. 青藏高原东北缘甘东南地区地壳各向异性特征及构造意义[J]. 地球物理学报,62(9):3340-3353.
- 孙长青,陈震,高尔根. 2011. 青藏高原东缘强烈盆山相互作用区的地壳各向异性特征及其动力学意义探讨[J]. 地球物理学报,54(5):1205-1214.
- 孙长青,雷建设,李聪,等. 2013. 云南地区地壳各向异性及其动力学意义[J]. 地球物理学报,56(12):4095-4105.
- 姚陈,郝重涛,张广利. 2016. SKS 波对地壳裂隙各向异性的响应——理论地震图研究[J]. 地球物理学报,59(7):2498-2509.
- 佐佳卉,钮凤林. 2019. 利用多层横波各向异性测量方法计算两层介质的分裂参数[J]. 地球物理学报,62(8):2885-2898.
- Chen Y, Zhang Z, Sun C, *et al.* 2013. Crustal anisotropy from Moho converted Ps wave splitting analysis and geodynamic implications beneath the eastern margin of Tibet and surrounding regions[J]. Gondwana Research, 24(3-4):946-957.
- Crampton S, Atkinson B K. 1985. Microcracks in the Earth's crust[J]. First Break, 3(3):16-20.

- Crampin S, Gao Y. 2014. Two species of microcracks [J]. *Applied Geophysics*, 11(1): 1–8.
- Crampin S, Peacock S. 2005. A review of shear – wave splitting in the compliant crack – critical anisotropic Earth [J]. *Wave Motion*, 41(1): 59–77.
- Kong F S, Wu J, Liu K H, *et al.* 2016. Crustal anisotropy and ductile flow beneath the eastern Tibetan Plateau and adjacent areas [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 442(10): 72–79.
- Liu H, Niu F, 2012. Estimating crustal seismic anisotropy with a joint analysis of radial and transverse receiver function data [J]. *Geophys J Int*, 188(1): 144–164.
- Rumpker G, Kaviani A, Latifi K. 2014. Ps – splitting analysis for multilayered anisotropic media by azimuthal stacking and layer stripping [J]. *Geophys J Int*, 199(1): 146–163.
- Sun Y, Niu F, Liu H, *et al.* 2012. Crustal structure and deformation of the SE Tibet an plateau revealed by receiver function data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 349–350(17): 186–197.
- Vinnik L P, Montagner J P. 1996. Shear wave splitting in the mantle Ps phases [J]. *Geophysical Research Letters*, 23(18): 2449–2452.

## Study of the Crustal Anisotropy beneath Chongqing and Its Surrounding Area

DONG Lei<sup>1</sup>, LI Jianyou<sup>2</sup>, JIANG Weisong<sup>1</sup>, LI Cuiping<sup>1</sup>

(1. *Chongqing Earthquake Agency, Chongqing 401147, China*)

(2. *Kunming Southern Geophysical Technology Development Inc., Kunming 650091, Yunnan, China*)

### Abstract

In this paper, a receiver function is extracted from the teleseismic data recorded by the seismic network and earthquake stations in Chongqing and its surrounding areas, and a grid search is established by using the minimum variance of arrival time of Pms phase of the receiver function. Finally anisotropic parameters of the crust are obtained. The results indicate that the delay time of the crustal anisotropic in Chongqing and its surrounding areas is ranges within 0.14 ~ 0.91 s, with an average of 0.4 s; The fast wave mainly polarizes in NEE, NNW, and NWW directions, and the direction of the fast wave at most of the stations is obviously different from the direction of the main compressive stress in the study area. And in this area the anisotropy of the crust features transverse heterogeneity and zoning; the characteristics of lithospheric deformation are mainly derived from mantle anisotropy.

**Keywords:** receiver function; crustal anisotropy; Chongqing area