



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782

CN 11-2021/P

四川威远地区近震剪切波分裂特征

高瑜 刘莎 郑钰

Shear wave splitting of local earthquakes in Weiyuan area, Sichuan

Gao Yu, Liu Sha, Zheng Yu

引用本文:

高瑜, 刘莎, 郑钰. 2023. 四川威远地区近震剪切波分裂特征. *地震学报*[J], 45(4): 645–657. DOI: 10.11939/jass.20220005

Gao Y, Liu S, Zheng Y. 2023. Shear wave splitting of local earthquakes in Weiyuan area, Sichuan. *Acta Seismologica Sinica*[J], 45(4): 645–657. DOI: 10.11939/jass.20220005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用剪切波分裂研究四川九寨沟 $M_S7.0$ 地震震源区的地壳应力场

Crustal stress field in the focal area of $M_S7.0$ Jiuzhaigou, Sichuan, earthquake by shear wave splitting
地震学报. 2019, 41(1): 46–56 <https://doi.org/10.11939/jass.20180043>

四川锦屏水电站地区的剪切波分裂参数变化

Changes of shear-wave splitting parameters in Jinping hydro-power station, Sichuan
地震学报. 2018, 40(1): 58–66 <https://doi.org/10.11939/jass.20170114>

2019年四川长宁 $M_S6.0$ 地震序列S波分裂变化特征

Variation characteristic of S-wave splitting on the 2019 Changning $M_S6.0$ earthquake sequence, Sichuan
地震学报. 2021, 43(3): 303–320 <https://doi.org/10.11939/jass.20200107>

龙门山断裂带南段横波分裂分析

Shear-wave splitting on southern segment of Longmenshan fault zone
地震学报. 2017, 39(2): 207–219 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.02.004>

盈江 $M_S6.1$ 地震序列近场横波分裂研究

Near-field shear-wave splitting of 2014 Yingjiang $M_S6.1$ earthquake sequence
地震学报. 2017, 39(1): 34–46 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.01.004>

川西地区瑞雷波方位各向异性

Rayleigh wave azimuthal anisotropy in western Sichuan region
地震学报. 2020, 42(3): 293–305 <https://doi.org/10.11939/jass.20190103>

高瑜, 刘莎, 郑钰. 2023. 四川威远地区近震剪切波分裂特征. 地震学报, 45(4): 645–657. doi: 10.11939/jass.20220005.

Gao Y, Liu S, Zheng Y. 2023. Shear wave splitting of local earthquakes in Weiyuan area, Sichuan. *Acta Seismologica Sinica*, 45(4): 645–657. doi: 10.11939/jass.20220005.

四川威远地区近震剪切波分裂特征^{*}

高瑜 刘莎[†] 郑钰

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 基于布设在四川威远地区的流动地震台站 2019 年 11 月至 2020 年 5 月记录的近震波形数据, 利用剪切波分裂分析方法获得了研究区内 23 个地震台站的剪切波分裂参数. 结果显示: 威远地区地震台站快波偏振方向多数为北西向, 与区域主压应力方向一致; 有个别台站可能由于受到局部构造环境的影响, 快波偏振方向为北东向. 而在地壳速度变化明显的威远背斜附近, 有 6 个台站结果显示为两个快波偏振优势方向, 表明该地区快波偏振方向是区域应力场和局部构造环境共同作用的结果, 威远地区慢波延迟时间均值为 4.43 ms/km, 威远背斜南侧区域的慢波延迟时间值普遍大于其北部区域, 表明在威远地区南部区域的各项异性强度强于北部区域.

关键词 剪切波分裂 快波偏振方向 慢波延迟时间 区域主压应力

doi: 10.11939/jass.20220005 中图分类号: P315.3⁺1 文献标识码: A

Shear wave splitting of local earthquakes in Weiyuan area, Sichuan

Gao Yu Liu Sha[†] Zheng Yu

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, the shear wave splitting parameters of 23 seismic stations in Weiyuan area, Sichuan are obtained using the shear wave splitting analysis method, base on the local earthquake waveform data recorded by the temporary seismic stations from November 2019 to May 2020 in the study area. The results show that the polarization directions of fast shear wave at most stations in Weiyuan area are northwest, which is consistent with the direction of regional principal compressive stress. And the polarization directions of a few stations are northeast, which may be affected by the local tectonic environment. Near Weiyuan anticline with obvious differences in crustal velocity, there are six stations with two dominant polarization directions of fast wave, indicating that the polarization direction of fast wave in this area is influenced by the combined effects of regional stress field and local tectonic environment. The average delay time of slow wave in Weiyuan area is 4.43 ms/km. And the delay time of slow wave in the

^{*} 基金项目 国家自然科学基金项目(41904057)、国家重点研发计划(2018YFC1503402)和中国地震局地球物理研究所基本科研业务费重大研究计划(DQJB19A0115)共同资助.

收稿日期 2022-01-11 收到初稿, 2022-03-22 决定采用修改稿.

作者简介 高瑜, 在读博士研究生, 主要从事地震各向异性研究, e-mail: aliceinip@163.com;

[†] 刘莎, 博士, 副研究员, 主要从事地下介质的地震各向异性研究, e-mail: liusha@cea-igp.ac.cn



south of Weiyuan anticline is generally greater than that in the north, suggesting that the anisotropy intensity in the south of Weiyuan area is stronger than that in the north.

Key words: shear wave splitting; polarization direction of fast shear wave; delay time of slow shear wave; regional principal compressive stress

引言

四川地处青藏高原东南缘, 位于我国南北地震带中南段, 由于受青藏高原东向的挤压作用, 历史上曾发生多次破坏性地震. 该地区地质构造复杂多样, 地震活动性强, 宜于我国大陆内部地震成因及其活动规律的探索. 威远位于四川盆地的中西部, 盆地结构相对稳定, 地表构造形态主要受到周边大型构造带活动的影响(Zheng *et al.*, 2013). 威远作为我国长宁-威远国家级页岩气示范区, 历史上地震活动较弱(董大忠等, 2014; 谢军, 2018), 但近年来, 特别是 2015 年以来(图 1), 威远地区地震活动性逐渐增强(易桂喜等, 2019, 2020; Yang *et al.*, 2020). 较强的地震活动性对页岩气开采和平台设施的影响较大, 特别是反复发生的中强地震对其可能会造成严重的破坏. 地壳应力场反映了浅部岩石的受力情况, 是地震学研究的重要内容, 也是探索地震、滑坡等地质灾害的重要手段. 地壳应力场的空间分布和变化特征可以为页岩气开采提供参考, 有效规避由于水力压裂施工注水而诱发强震的潜在风险. 研究区内近年来频繁发生的中小地震为初步探讨地震各向异性和地壳应力场特征提供了丰富的数据资源.

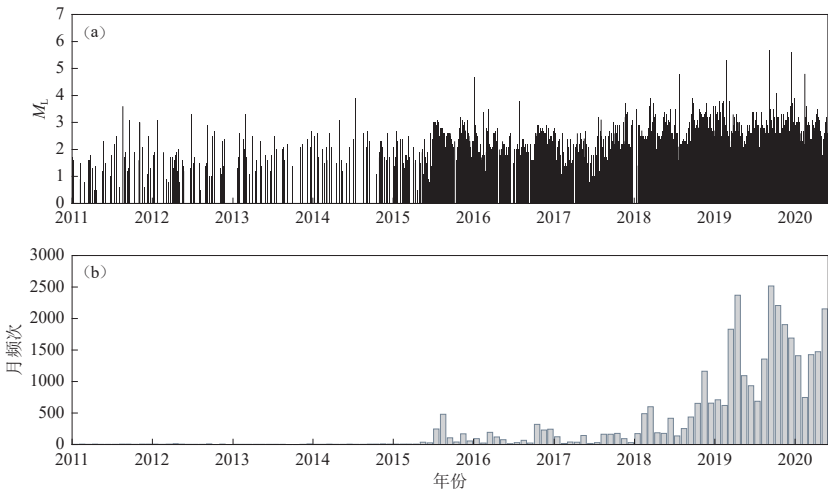


图 1 2010 年以来威远地区地震 $M-t$ 图(a)和月频次(b)图

Fig. 1 $M-t$ (a) and monthly frequency (b) diagrams of the earthquakes in Weiyuan area

剪切波分裂是获得地球内部介质各向异性和地壳应力场特征的重要手段之一(Crampin, 1981; Vinnik *et al.*, 1989; Gao *et al.*, 2011). 理论分析与高压高温实验表明, 低压条件下的地壳浅层的各向异性主要受裂隙定向排列的影响(张国苓等, 2010). 当剪切波在各向异性介质中传播时, 会分裂成快、慢剪切波, 这两列波传播速度不同且偏振方向近似垂直. 进行剪切波分裂计算可获得快波偏振方向和慢波延迟时间两个重要参数, 其中: 快波偏振方向反映了原

地主压应力方向;而慢波延迟时间反映了介质的各向异性程度,对地壳应力场的变化非常敏感(Gao, Crampin, 2004, 2008). 因此,借由剪切波分裂方法可以获得地壳介质各向异性分布,探讨地壳应力场的特征和变化(吴晶等, 2007),从而为页岩气开采提供参考,有效规避地震灾害风险. 目前,针对四川地区的各向异性研究,无论在活动断裂带附近还是水库库区,已取得了一定的成果,例如石玉涛等(2009, 2013)研究了龙门山断裂带附近剪切波分裂参数的区域特征以及与活动断裂之间的关系;张永久等(2008)利用四川区域地震台网数据获得了四川地区的地壳各向异性. 根据剪切波分裂参数的变化还对四川紫坪铺水库库区地壳应力场的特征性变化进行了探讨(张永久等, 2010; 刘莎, 吴朋, 2015). 剪切波分裂方法用于地壳应力场的探索已经发展得较为成熟,现拟将该方法应用于工业开采区,从而获得页岩气开采区的地壳各向异性空间分布特征. 在威远页岩气开采区小尺度范围内密集台阵的地震观测积累了丰富的数据资料(图 2). 本文拟利用威远地区 40 个密集流动地震台站在 2019 年 11 月—2020 年 5 月间记录的地震波形数据,进行剪切波分裂计算并分析剪切波分裂参数的特征,探讨威远地区地壳各向异性的空间分布.

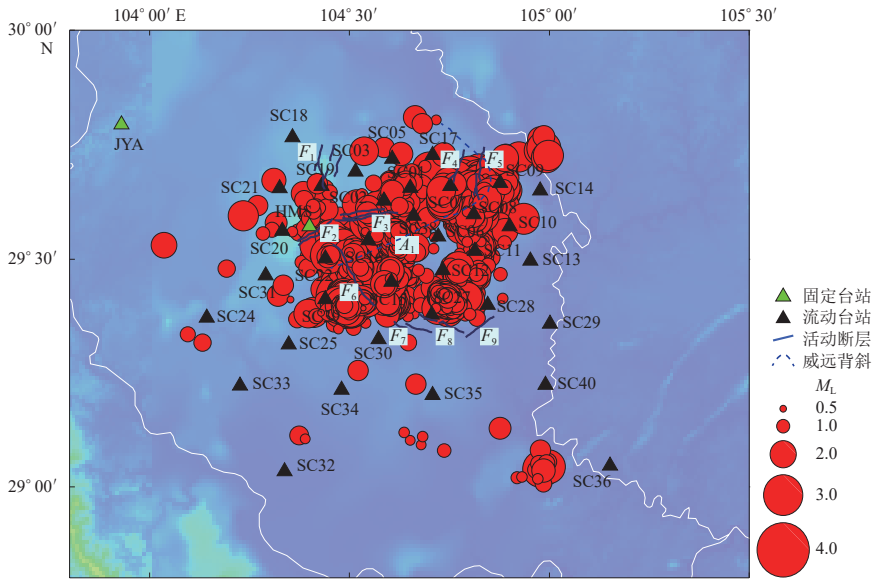


图 2 威远地区构造背景、台站和 2019 年 11 月—2020 年 5 月地震分布

F_1 : 牛颈垭断层; F_2 : 大堰口断层; F_3 : 东兴场断层; F_4 : 高桥断层; F_5 : 资中断层;
 F_6 : 墨林场断层; F_7 : 重滩断层; F_8 : 黄桷坡断层; F_9 : 长岩断层, 下同

Fig. 2 Tectonic settings, the distribution of seismic stations and the epicenters between November 2019 and May 2020 in Weiyuan region

F_1 : Niujing'ao fault; F_2 : Dayakou fault; F_3 : Dongxingchang fault; F_4 : Gaoqiao fault; F_5 : Zizhong fault;
 F_6 : Molinchang fault; F_7 : Chongtan fault; F_8 : Huangjiuepo fault; F_9 : Changyan fault, the same below

1 地震数据与剪切波分裂

1.1 构造背景与地震数据

四川盆地地区的断裂构造方向以北北东或北东方向为主,在北西向的区域主压应力作

用下,活动断裂一直处于正压状态,差异活动不明显(唐荣昌等,1995)。威远地区位于华蓥山断裂西侧,四川盆地低缓构造带的中南部,该区域地势西北高、东南低(何超红等,2015)。横贯威远县西北部,在地质构造上隶属于乐山—龙女寺古隆起的威远背斜为一大型穹隆构造,南陡北缓、西窄紧、东开阔,长轴呈北东向,大体与龙门山一致(朱瑜等,2010)。威远背斜主要形成于新生代,在经历了加里东运动、海西运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动的叠加作用后,形成了现今的大型穹隆构造(刘顺等,2000;喻颐等,2013;曾求等,2020)。威远地区的断裂性质主要以逆冲为主,如大垭口断层、墨林场断层、资中断层、黄桷坡断层、长岩断层、重滩断层等,断层的走向主要呈北西向、北东向和近似东西向(图2)。

以往的研究结果显示威远地区快剪切波偏振方向为北西向,并推测该区内的地壳应力场在长时间内保持稳定状态(陈安国等,2019);基于地震背景噪声得到的威远地区浅层速度结构成像结果表明剪切波速度具有与威远背斜相对应的横向不均匀性分布特征(曾求等,2020)。地震震源机制解是确定构造变形特征和震源区应力场特征的基础性资料。利用震源机制解结果推断威远地区构造应力环境相对简单,区域最大主压应力方向为北西向(易桂喜等,2020);威远地区地震重定位结果显示地震多集中发生在P波和S波的高低速异常转换带(杜广宝等,2021);基于四川地区GPS水平运动速度场数据对四川地壳应变场特征的分析结果表明,威远一带地壳运动速度场方向为南东方向(白卓立等,2020)。

四川盆地页岩气资源丰富,特别是威远一带有良好的页岩气开发前景(石强等,2017)。近五年来,威远一带频繁发生中小地震,地震活动性逐步增强,特别是2019年9月8日连续发生了 $M_s5.4$ 和 $M_s4.3$ 中强地震。该地区的地震定位和震源机制解等研究指出威远地区中强地震可能与页岩气水力压裂施工有关,是由孔隙压力变化诱发所致(Yang et al., 2020)。易桂喜等(2020)的震源机制解研究结果认为威远中强地震发震构造可能是威远背斜南翼的一系列缓倾角盲冲断层,威远地区的构造活动主要受区域应力场控制。为了进一步探讨威远地区的结构特征,2019年中国地震局地球物理研究所在四川威远一带布设了40个流动地震台站进行地震活动性监测,这些台站均匀地分布在威远震区,平均台间距为10 km(图2)。各地震台站均使用三分向地震计,采样率为100 Hz。由于上地壳的近震剪切波主要频段为3—10 Hz,因此在进行剪切波分裂数据处理过程中,使用2—20 Hz的带通滤波。

1.2 数据的选择与处理

本文利用威远地区流动密集台阵在2019年11月至2020年6月记录的近震波形资料进行剪切波分裂研究。剪切波分裂计算需要对地震波形数据进行严格的筛选。首先,为了保证地震台站记录到的地震波形与入射波相类似,需要选取位于剪切波窗口内的地震波形数据。理论上,对于泊松比为0.25的介质,其剪切波窗口约为 35° 。实际上,由于地表低速层的影响,剪切波窗口可有效地扩大至 45° — 50° (Crampin, Peacock, 2005)。根据荣县—威远—资中地区一维速度模型(易桂喜等,2020),本文选取的剪切波窗口为 50° 。在此基础上,挑选出剪切波波波形清晰且信噪比较高的地震数据。本文最终选用了研究区内23个流动地震台站的波形数据。之后采用偏振分析法获得剪切波分裂参数,截取剪切波到时前20个采样点和后40个采样点的数据进行偏振分析(图3)。根据剪切波质点偏振图的变化来确定快波偏振方向和慢波延迟时间。由于地壳各向异性介质的存在,剪切波质点偏振图的方向会突然呈近垂直向的偏转,据此来获得快剪切波和慢剪切波的到时(刘莎等,2015)。

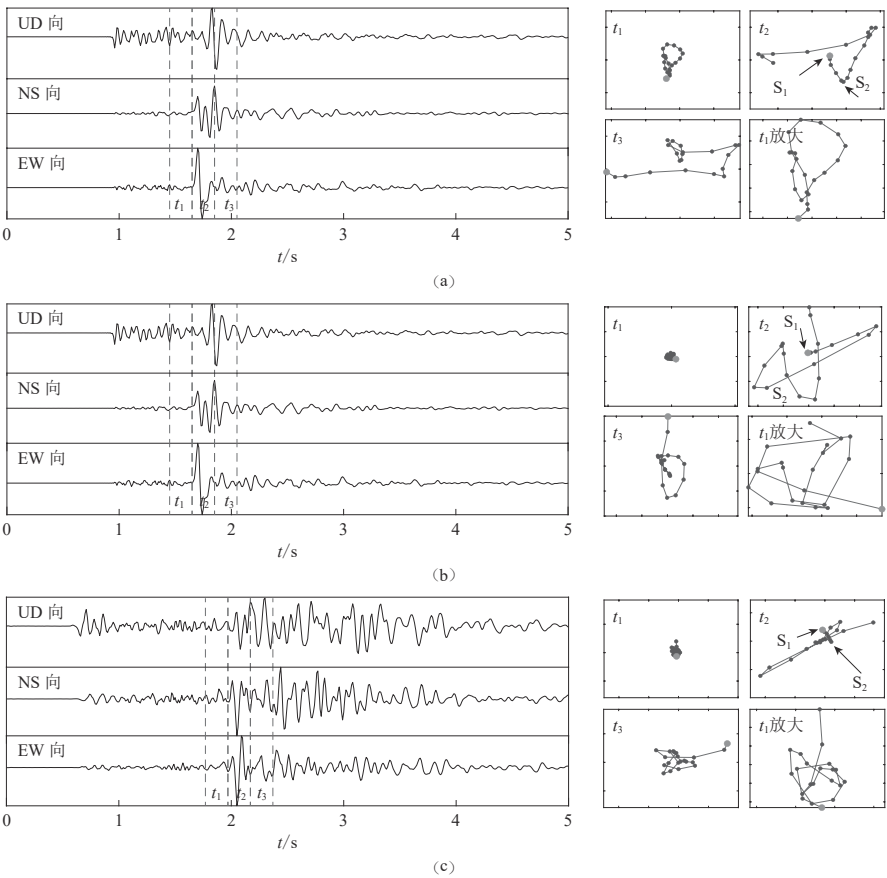


图 3 地震波形及偏振分析示例

(a) 台站 SC38 记录的 2020-12-06 17:05:08 发生的 M_L 2.1 地震波形; (b) 台站 SC12 记录的 2021-05-11 21:40:46 发生的 M_L 1.5 地震波形; (c) 台站 SC06 记录的 2021-04-07 11:26:42 发生的 M_L 1.9 地震波形. 左图为三分量地震波形, t_1 , t_2 , t_3 为用于偏振分析的剪切波时间段; 右图为三个时段剪切波质点偏振图, S_1 和 S_2 分别为快剪切波和慢剪切波的到时

Fig. 3 Seismic waveforms and diagrams of the polarization analysis

(a) Seismic waves of the M_L 2.1 earthquake at 17:05:08 on December 6, 2020 recorded by the station SC38; (b) Seismic waves of the M_L 1.5 earthquake at 21:40:46 on May 11, 2021 recorded by the station SC12; ; (c) Seismic waves of the M_L 1.9 earthquake at 11:26:42 on April 7, 2021 recorded by the station SC06 ; and the left panels are the three-component records of seismic waveform. t_1 , t_2 and t_3 are the time periods of shear wave for polarization analysis, respectively. The right panels are the particle trails of the shear waves in three time periods. S_1 and S_2 are the arrival times of fast and slow shear waves, respectively.

2 计算结果

通过对威远地区流动地震台站剪切波窗口数据的筛选并进行剪切波分裂计算, 得到了 23 个地震台站的快波偏振方向和慢波延迟时间, 剪切波分裂参数共 813 对(表 1). 多数台站获得了 10 对以上的剪切波分裂参数, 特别是 SC08, SC15, SC16, SC27 和 SC38 台站均获得了 50 对以上的剪切波分裂参数结果, 保证了数据结果的可靠性. SC03, SC20, SC21 和 SC30 台站虽然有较少的剪切波分裂参数结果, 但是这些台站剪切波分裂参数结果与其它台站具有

表 1 威远地区各台站剪切波分裂参数结果

Table 1 The results of shear wave splitting parameters at the seismic stations in Weiyuan area

台站 代码	有效事件 个数	优势方向 个数	快波偏振 方向/ $^{\circ}$	慢波延迟时间 $/(\text{ms}\cdot\text{km}^{-1})$	台站 代码	有效事件 个数	优势方向 个数	快波偏振 方向/ $^{\circ}$	慢波延迟时间 $/(\text{ms}\cdot\text{km}^{-1})$
SC01	34	1	-39 ± 17.8	4.85 ± 1.21	SC15	78	1	-42 ± 18.3	5.23 ± 1.72
SC02	32	1	-34 ± 30.1	5.12 ± 1.04	SC16	43	1	-46 ± 15.7	4.66 ± 1.38
SC03	5	1	-55 ± 4.0	3.74 ± 0.85		46	2	51 ± 13.2	4.73 ± 1.19
SC05	17	1	-46 ± 20.8	3.98 ± 1.01	SC17	35	1	-41 ± 16.8	4.49 ± 1.54
SC06	38	1	-49 ± 10.9	4.13 ± 1.28	SC19	15	1	-17 ± 23.7	3.31 ± 0.36
	11	2	37 ± 18.3	3.99 ± 1.06	SC20	7	1	-39 ± 11.7	3.41 ± 0.71
SC07	36	1	20 ± 14.6	4.35 ± 1.13	SC21	6	1	-36 ± 12.9	3.48 ± 0.76
SC08	41	1	-46 ± 15.3	4.76 ± 1.42	SC22	31	1	-33 ± 25.6	3.65 ± 1.03
	12	2	15 ± 9.9	4.21 ± 1.16	SC27	67	1	-48 ± 14.1	4.87 ± 1.20
SC09	16	1	-39 ± 11.6	4.40 ± 1.02	SC28	48	1	-44 ± 18.2	4.34 ± 0.68
	7	2	25 ± 17.5	3.89 ± 0.88	SC30	5	1	-57 ± 13.5	4.92 ± 1.38
SC10	13	1	-43 ± 16.1	3.37 ± 1.18	SC38	53	1	-45 ± 14.7	4.52 ± 1.15
SC11	15	1	-31 ± 20.5	4.24 ± 1.61		14	2	56 ± 11.8	4.33 ± 1.07
SC12	24	1	-42 ± 15.8	5.06 ± 1.80	SC39	47	1	-36 ± 22.3	4.37 ± 1.06
	17	2	44 ± 13.2	4.62 ± 1.21					

较好的一致性.

研究区域内 23 个台站快波偏振方向等面积投影玫瑰图如图 4 所示,可以看出多数台站快波偏振优势方向较为明显,有部分台站的剪切波分裂参数结果显示出了两个快波偏振优势方向.而慢波延迟时间值代表了震源到台站整个射线路径上慢剪切波相对于快剪切波的时间差,反映了整个射线路径上的各向异性强度.考虑到不同地震事件的震源距差别较大,为了便于分析比较,采用归一化慢波延迟时间来反映地壳介质的各向异性程度,即单位射线路径长度的慢波延迟时间,归一化的慢波延迟时间单位为 ms/km . 本文获得的威远地区慢波

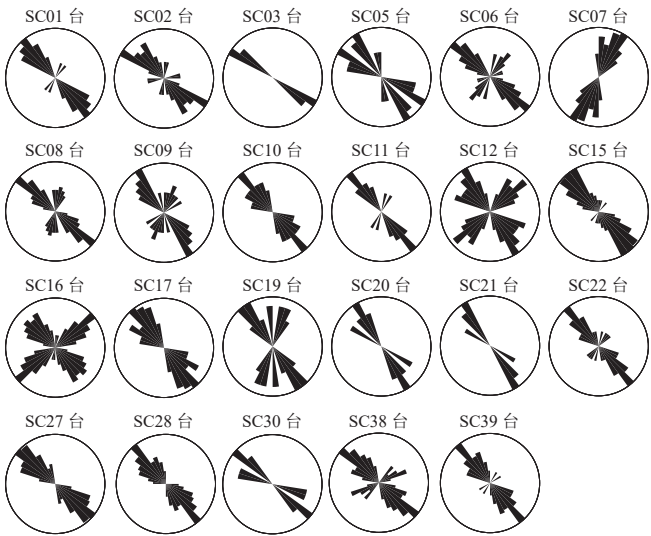


图 4 研究区域内 23 个地震台站的快波偏振方向等面积投影玫瑰图

Fig. 4 The homolographic projection rose diagrams of the polarization directions of the fast shear wave splitting for the 23 seismic stations in the studied region

延迟时间均值为 (4.43 ± 1.15) ms/km. SC19 台站慢波延迟时间最小, 为 3.31 ms/km; SC15 台站最大, 为 5.23 ms/km.

各台站快波偏振方向等面积投影玫瑰图显示, 威远地区台站的快波偏振方向一致性较好, 其中: SC01, SC02, SC03, SC05, SC10, SC11, SC15, SC17, SC20, SC21, SC22, SC27, SC28, SC30 和 SC39 等 15 个台站具有单一的快波偏振优势方向且显示为北西向; SC19 台站的快波偏振方向结果较为零散, 误差较大, 其单一的快波偏振优势方向为北北西向; SC07 台站快波偏振优势方向只有一个, 为北北东向; SC06, SC12, SC16, SC38 台站快波偏振优势方向有两个, 为北西向和北东向; SC08 和 SC09 台站也有两个快波偏振优势方向, 为北西向和北北东向.

3 地壳各向异性特征

3.1 快波偏振方向的空间分布

快波偏振方向反映了地壳中微裂隙的走向, 而区域应力场控制着地壳微裂隙的排列方向, 使其平行于最大主压应力的方向, 最终使得地壳各向异性介质的快波偏振方向平行于最大主压应力方向(王雪鹤等, 2021). 快波偏振方向是剪切波在地下传播路径上对各向异性介质的综合表现, 定性地反映了地壳应力场的方向(陈安国等, 2019). 但是在许多构造复杂的区域, 地壳剪切波分裂观测研究结果显示: 部分台站的快波偏振方向出现了两个或多个优势方向, 这通常是因为除了受到区域应力的控制之外, 还受到附近活动断裂、不规则地表地形等因素的影响(陈安国等, 2019; Gao et al, 2011).

为了更好地分析威远地区的地壳各向异性和区域应力分布情况, 将每个台站的快波偏振优势方向结果展示在空间分布图上, 得到了威远地区快波偏振方向空间分布特征, 如图 5 所示.

位于牛颈垭断层附近的台站 SC19 快波偏振方向呈北北西向, 与断裂走向近似平行. 位于该断层西侧的台站 SC21 和东侧的台站 SC03 快波偏振方向均为北西向, 与断层走向斜交, 但是与区域主压应力方向平行. 台站 SC20 快波偏振方向为北西向, 其东侧的固定台站 HMS 在以往的剪切波分裂研究中的快波偏振方向显示为北西向(陈安国等, 2019), 这两个台站快波偏振方向一致. 但是台站 HMS 附近的大垭口断层走向为北东东向, 与附近台站的快波偏振方向斜交. 东兴场断层走向近似为东西向, 其东侧的台站 SC02 快波偏振方向呈北西向, 表明该台站快波偏振方向受断层的影响不大. 台站 SC07 位于高桥断层南段, 快波偏振方向与断层的走向一致, 均为北北东向; 而位于 SC07 附近的台站 SC01 快波偏振方向为北西向, 与台站 SC07 结果不一致, 这表明台站 SC07 快波偏

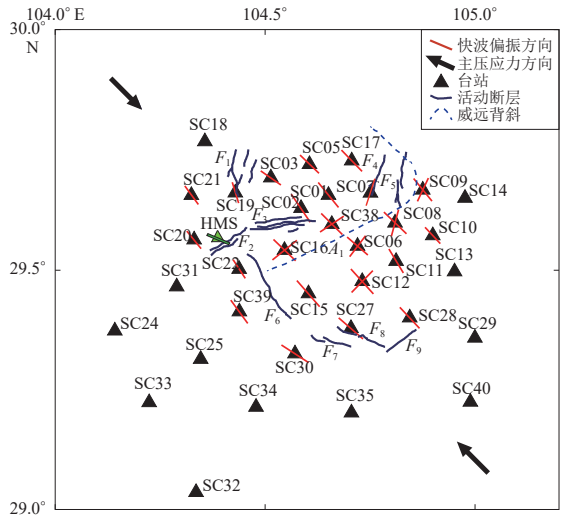


图 5 各台站平均快波偏振方向空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of polarization directions of fast shear wave at seismic stations

振方向受断层的影响不大. 台站 SC07 位于高桥断层南段, 快波偏振方向与断层的走向一致, 均为北北东向; 而位于 SC07 附近的台站 SC01 快波偏振方向为北西向, 与台站 SC07 结果不一致, 这表明台站 SC07 快波偏

振方向受断层的影响较大,而其西侧的台站 SC01 则主要受区域应力场的控制.台站 SC17 快波偏振方向呈北西向,与区域主压应力的方向一致.位于威远背斜附近的台站 SC16, SC06, SC38, SC08 和 SC09 均表现出两个快波偏振优势方向,北西向的快波偏振方向与区域主压应力的方向一致,北东向的快波偏振方向与主压应力方向近似垂直,这可能与局部断裂构造有关.位于墨林场断层以西的台站 SC22 和 SC39,其快波偏振优势方向都显示为北西向,与断层走向和主压应力方向均一致.重滩断层西南侧的台站 SC30 快波偏振方向与断层走向一致,为北西向.北西向的黄桷坡断层和北东向的长岩断层斜交,位于黄桷坡断层北侧的台站 SC27 和 SC28 快波偏振优势方向显示为北西方向,快波偏振方向受断层影响较小,与区域主压应力方向平行.台站 SC15 快波偏振方向表现为北西向,与西侧的墨林场断层方向一致.台站 SC12 快波偏振优势方向显示为北西向和北东向.其东侧的台站 SC11 和 SC10 快波偏振方向为单一的北西向,与区域主压应力方向平行.由此可见,威远地区台站快波偏振优势方向多表现为北西向,也有个别结果为北东向.该地区主压应力方向为北西向,区域应力场对快波偏振方向的作用较为明显.部分台站表现出的北东向的快波偏振优势方向多是受到了局部断裂构造的影响.当地震台站位于断裂上或距离断裂足够近,地震波射线路径穿过断层,那么快波偏振方向多平行于断裂;随着地震台站远离断裂位置,快波偏振方向则可能与断裂走向不同(郭铁龙,高原,2020).在构造环境复杂的地区,快波偏振方向往往较为复杂,通常是应力场与局部构造双重作用的结果.威远地区地壳各向异性的空间分布除了受到区域应力场的影响,还受到复杂的局部构造作用的影响.

威远位于四川盆地中西部,而四川盆地属于扬子地块,位于青藏高原东南缘.青藏高原东南缘地处青藏高原侧向挤出变形的前缘,在高原的边缘过渡带地壳应力场以挤压为主,主压应力方向为北西—南东(李长军等,2019; Han *et al.*, 2019; 黄周传等,2021).威远地区的快波偏振方向多呈北西方向,与青藏高原东南缘向东推挤的构造特征相一致(黄周传等,2021).对比四川地区中下地壳各向异性研究结果中得到的 Pms 波分裂的快波偏振方向为近似北西向(杨妍,2019),本文获得的上地壳各向异性研究结果与其近似.这说明在研究区域内上下地壳的各向异性快波偏振方向相近,威远地区的地壳内部变形特征一致.上地幔远震 SKS 波分裂结果显示威远地区上地幔各向异性方向为北西向(常利军等,2008),这与本文得到的上地壳各向异性方向相似.综上分析,威远地区岩石圈变形可能是遵循壳幔耦合的垂直连贯变形模式.

从快波偏振优势方向空间分布可以看出围绕威远背斜构造单元的地震台站快波偏振方向较为复杂,多数台站显示有两个快波偏振优势方向.威远背斜是研究区域的主要构造单元,主要的构造运动是较为强烈的挤压褶皱,使古老沉积地层弯曲(徐炳高,1997),从而使威远背斜区域的沉积层起伏变化较大(刘顺,2001).背景噪声三维成像结果显示以威远背斜为分界线,其两侧的横波波速变化趋势具有很明显的差异,西北部高于东南(曾求等,2020).本文中已获得具有两个快波偏振优势方向的台站集中于威远背斜的两侧,可见在波速变化分界的区域快波偏振方向较为零散,北东向的快波偏振方向受到局部构造环境的影响,表现出与区域主压应力不一致的各向异性方向.

3.2 慢波延迟时间分布

威远地区慢波延迟时间的空间分布有一定的区域特征(图 6).本文中所获得的有两个快波偏振优势方向的台站有 6 个,其中 SC06, SC16 和 SC38 台站在两个快波偏振优势方向上的

慢波延迟时间值基本一致, 相差很小; 而 SC08, SC09 和 SC12 台站在两个快波偏振优势方向上的慢波延迟时间有一定的差距, 其中 SC08 和 SC09 台站位于威远背斜褶皱拱起的位置. 慢波延迟时间对台站下方地壳中微裂隙的几何形态变化较为敏感, 反映了该处的各向异性强度(刘莎等, 2015). 在两个不同的快波偏振优势方向上慢波延迟时间的差异表明了各向异性强弱不同, 推测该台站下方地壳各向异性的复杂性. 整个研究区域内, 慢波延迟时间最大值出现在台站 SC15, 该台站位于威远背斜南段南侧. 在空间分布上, 威远背斜周围及其以南区域的各台站慢波延迟时间普遍大于研究区域北部地区的各台站, 如 SC19, SC20 以及 SC21 台站的慢波延迟时间值相对较小. 慢波延迟时间的空间分布表明研究区域内地壳各向异性强度有所差异, 威远背斜以南区域的地壳各向异性强于北部区域.

4 讨论与结论

四川威远地区是我国页岩气开采的主要区域之一. 近年来, 特别是 2015 年以来, 威远地区地震活动性显著增强. 较高的地震活动性以及不断发生的中小地震对页岩气开采和平台设施存在较大的安全隐患. 本文对威远地区流动密集台阵在 2019 年 11 月至 2020 年 5 月期间记录的近震波形数据经过剪切波窗口数据的筛选和剪切波分裂计算, 共获得了威远地区 23 个台站的剪切波分裂参数. 根据快波偏振方向和慢波延迟时间的空间分布, 探讨了该区域地壳各向异性的区域性特征.

研究区域内多数台站快波偏振优势方向明显, 其中 6 个台站有两个快波偏振优势方向. 整体上看, 威远地区地震台站快波偏振方向表现得较为一致, 多数台站快波偏振优势方向呈北西向, 与区域主压应力方向一致, 只有个别台站快波偏振优势方向显示为北东向. 快波偏振方向的空间分布结果表明, 有两个快波偏振优势方向的台站集中分布在威远背斜周围. 在构造复杂的区域, 个别台站的快波偏振方向出现两个或多个优势方向, 通常是因为快波偏振方向除了受到区域应力场的控制之外, 还受到附近活动断裂、不规则地表地形等因素的影响. 威远背斜是研究区域的主要构造单元, 其主要的构造运动是较为强烈的挤压褶皱(曾求等, 2020). 而且在威远背斜两侧剪切波速度有明显差异, 所以在威远背斜这一复杂的构造单元周围地壳介质的各向异性程度较为复杂.

威远地区慢波延迟时间主要分布在 3.31—5.23 ms/km 范围内, 均值为 4.43 ms/km. 慢波延迟时间最小值出现在 SC19 台站, 位于研究区域北部的牛颈垭断层南端. 慢波延迟时间最大值出现在 SC15 台站, 该台站位于威远背斜南段南侧. 从慢波延迟时间的空间分布可以看出, 威远背斜南侧区域的慢波延迟时间普遍大于北侧区域, 反映出研究区域南侧地壳各向异

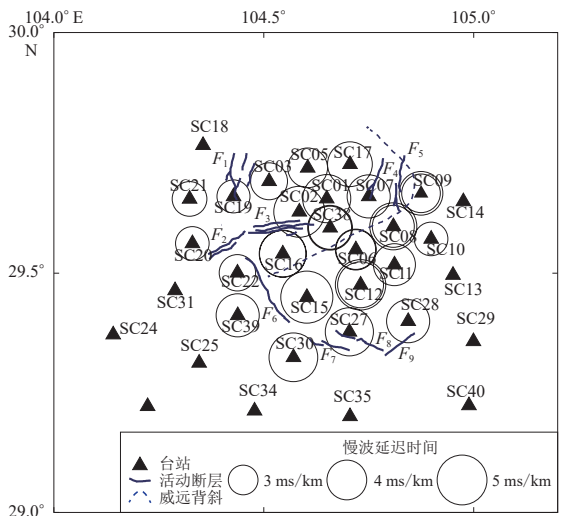


图 6 威远地区慢波延迟时间空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of delay time of slow shear wave in Weiyuan area

性强度要高于北侧地区。在威远背斜褶皱拱起的位置上,具有两个快波偏振优势方向的台站在两个偏振优势方向上的慢波延迟时间值差异较大。该结果进一步说明了威远背斜周围地壳介质的各向异性特征较为复杂。

在威远页岩气开采区,地震分布较为密集。已有研究表明,页岩气水力压裂的工业流体注入能显著改变当地的构造应力环境。在一定条件下,流体的注入可能使过去不活动的老断层重新活化或者不成熟的断层发生破裂,从而诱发大量地震(Lei *et al.*, 2019a, b; 易桂喜等, 2020)。地震重定位的结果显示在威远地区多数地震事件的空间位置与地表已知断层无明显对应关系,但是中小地震活动与地壳速度结构变化具有一定的相关性(杜广宝等, 2021)。本文中获得的快波偏振方向在地壳速度结构显著变化的威远背斜区域表现出复杂的特征,而且慢波延迟时间基本以威远背斜为界,呈现出南高北低的各向异性强度。剪切波分裂参数复杂的区域对应于中小地震发生的聚集区。而该区域也是水力压裂施工活动区域,因此,威远地区快波偏振方向的复杂性与水力压裂施工可能有一定相关性。但是,由于本文数据有限,此方面的研究还需要后期结合其它资料进行进一步论证。

中国地震局地球物理研究所地震科学数据中心为本研究提供波形数据服务,三位审稿专家为本文提出了非常有益的意见,作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 白卓立, 张学刚, 薛二峰, 张希, 李瑞莎, 秦珊兰. 2020. 基于 GPS 速度场的四川地区 1999—2018 年应变场特征演化分析[J]. *地质科学*, **55**(4): 1315–1326.
- Bai Z L, Zhang X G, Xue E F, Zhang X, Li R S, Qin S L. 2020. The characteristic evolution analysis of scale strain field in Sichuan area from 1999–2018 based on GPS velocity field[J]. *Chinese Journal of Geology*, **55**(4): 1315–1326 (in Chinese).
- 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: D 辑*, **28**(12): 1589–1599.
- Chang L J, Wang C Y, Ding Z F. 2008. Study on upper mantle anisotropy in Sichuan and its adjacent areas[J]. *Science in China: Series D*, **28**(12): 1589–1599 (in Chinese).
- 陈安国, 高原, 石玉涛. 2019. 龙门山断裂带域上地壳各向异性及其变化[J]. *地球物理学报*, **62**(8): 2959–2981.
- Chen A G, Gao Y, Shi Y T. 2019. Seismic anisotropy and its variation in the upper crust beneath the Longmenshan fault zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **62**(8): 2959–2981 (in Chinese).
- 董大忠, 高世葵, 黄金亮, 管全中, 王淑芳, 王玉满. 2014. 论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J]. *天然气工业*, **34**(12): 1–15.
- Dong D Z, Gao S K, Huang J L, Guan Q Z, Wang S F, Wang Y M. 2014. A discussion on the shale gas exploration & development prospect in the Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, **34**(12): 1–15 (in Chinese).
- 杜广宝, 吴庆举, 张雪梅, 张瑞青. 2021. 四川威远及邻区中小地震活动特征及地壳精细结构研究[J]. *地球物理学报*, **64**(11): 3983–3996.
- Du G B, Wu Q J, Zhang X M, Zhang R Q. 2021. Activity characteristics of moderate and small earthquakes and fine crustal feature beneath Weiyuan, Sichuan and adjacent areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **64**(11): 3983–3996 (in Chinese).
- 郭铁龙, 高原. 2020. 剪切波分裂揭示的青藏高原上地壳地震各向异性基本特征[J]. *地球物理学报*, **63**(3): 1085–1103.
- Guo T L, Gao Y. 2020. Seismic anisotropy in the upper crust within Tibetan Plateau revealed by shear-wave splitting[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **63**(3): 1085–1103 (in Chinese).
- 何超红, 谭孝成, 黄成智. 2015. 威远县地质灾害发育规律及成因分析[J]. *防灾科技学院学报*, **17**(1): 7–11.
- He C H, Tan X C, Huang C Z. 2015. Development patterns and formation mechanisms of geological hazards in Weiyuan

- county[J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, **17**(1): 7–11 (in Chinese).
- 黄周传, 吉聪, 吴寒婷, 石宇通, 耿嘉琪, 徐弥坚, 韩存瑞, 徐鸣洁, 王良书. 2021. 青藏高原东南缘地壳结构与变形机制研究进展[J]. *地球与行星物理理论评*, **52**(3): 291–307.
- Huang Z C, Ji C, Wu H T, Shi Y T, Geng J Q, Xu M J, Han C R, Xu M J, Wang L S. 2021. Review on the crustal structures and deformations in the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, **52**(3): 291–307 (in Chinese).
- 李长军, 甘卫军, 秦姗兰, 郝明, 梁诗明, 杨帆. 2019. 青藏高原东南缘南段现今变形特征研究[J]. *地球物理学报*, **62**(12): 4540–4553.
- Li Z J, Gan W J, Qin S L, Hao M, Liang S M, Yang F. 2019. Present-day deformation characteristics of the southeast borderland of the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **62**(12): 4540–4553 (in Chinese).
- 刘莎, 吴朋. 2015. 紫坪铺水库水位变化对剪切波分裂参数的影响[J]. *地球物理学报*, **58**(11): 4106–4114.
- Liu S, Wu P. 2015. The effect of water level changes in Zipingpu reservoir on the parameters of shear wave splitting[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(11): 4106–4114 (in Chinese).
- 刘莎, 吴朋, 杨建思, 苏金蓉. 2015. 2012年6月24日宁蒗—盐源 $M_s5.7$ 地震的剪切波分裂探讨[J]. *地震学报*, **37**(5): 787–795.
- Liu S, Wu P, Yang J S, Su J R. 2015. Discussion on shear-wave splitting of the June 24, 2012 Ninglang–Yanyuan $M_s5.7$ earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **37**(5): 787–795 (in Chinese).
- 刘顺, 罗志立, 熊荣国, 宋颖辉. 2000. 从实验岩石变形过程探讨四川盆地加里东古隆起的形成机制[J]. *成都理工学院学报*, **27**(4): 343–347.
- Liu S, Luo Z L, Xiong R G, Song Y H. 2000. On formation mechanism of Caledonian Paleoswell in Sichuan basin from experimental rocks deformational process[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, **27**(4): 343–347 (in Chinese).
- 刘顺. 2001. 四川盆地威远背斜的形成时代及形成机制[J]. *成都理工学院学报*, **28**(4): 340–343.
- Liu S. 2001. Formation time and formation mechanism of the Weiyuan anticline in Sichuan basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, **28**(4): 340–343 (in Chinese).
- 石强, 陈鹏, 王秀芹, 刘凤新. 2017. 页岩气水平井高产层段判别方法及其应用: 以四川盆地威远页岩气示范区下志留统龙马溪组为例[J]. *天然气工业*, **37**(1): 60–65.
- Shi Q, Chen P, Wang X Q, Liu F X. 2017. A method for identifying high-productivity intervals in a horizontal shale gas well and its application: A case study of the Lower Silurian Longmaxi Fm in Weiyuan-shale gas demonstration area, Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, **37**(1): 60–65 (in Chinese).
- 石玉涛, 高原, 赵翠萍, 姚志祥, 太龄雪, 张永久. 2009. 汶川地震余震序列的地震各向异性[J]. *地球物理学报*, **52**(2): 398–407.
- Shi Y T, Gao Y, Zhao C P, Yao Z X, Tai L X, Zhang Y J. 2009. A study of seismic anisotropy of Wenchuan earthquake sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(2): 398–407 (in Chinese).
- 石玉涛, 高原, 张永久, 王辉, 姚志祥. 2013. 松潘—甘孜地块东部、川滇地块北部与四川盆地西部的地壳剪切波分裂[J]. *地球物理学报*, **56**(2): 481–494.
- Shi Y T, Gao Y, Zhang Y J, Wang H, Yao Z X. 2013. Shear-wave splitting in the crust in eastern Songpan–Garzê block, Sichuan–Yunnan block and western Sichuan basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(2): 481–494 (in Chinese).
- 唐荣昌, 黄祖智, 马声浩, 龚宇, 周荣军. 1995. 四川活动断裂带的基本特征[J]. *地震地质*, **17**(4): 390–396.
- Tang R C, Huang Z Z, Ma S H, Gong Y, Zhou R J. 1995. Basic characteristics of active fault zones in Sichuan Province[J]. *Seismology and Geology*, **17**(4): 390–396 (in Chinese).
- 王雪鹤, 李永华, 呼楠. 2021. 腾冲地区近震S波分裂研究[J]. *地球物理学报*, **64**(1): 131–145.
- Wang X H, Li Y H, Hu N. 2021. Shear wave splitting analysis of local earthquakes at Tengchong[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **64**(1): 131–145 (in Chinese).
- 吴晶, 高原, 陈运泰, 黄金莉. 2007. 首都圈西北部地区地壳介质地震各向异性特征初步研究[J]. *地球物理学报*, **50**(1): 209–220.
- Wu J, Gao Y, Chen Y T, Huang J L. 2007. Seismic anisotropy in the crust in northwestern capital area of China[J]. *Chinese*

- Journal of Geophysics*, **50**(1): 209–220 (in Chinese).
- 谢军. 2018. 长宁—威远国家级页岩气示范区建设实践与成效[J]. *天然气工业*, **38**(2): 1–7.
- Xie J. 2018. Practices and achievements of the Changning-Weiyuan shale gas national demonstration project construction[J]. *Natural Gas Industry*, **38**(2): 1–7 (in Chinese).
- 徐炳高. 1997. 四川省威远地区燕山早期的构造反转及威远背斜锥形的形成[J]. *四川地质学报*, **17**(2): 96–102.
- Xu B G. 1997. Tectonic inversion in Weiyuan region, Sichuan in early Yanshanian epoch and formation of Weiyuan anticline embryo[J]. *Acta Geologica Sichuan*, **17**(2): 96–102 (in Chinese).
- 杨妍. 2019. 川滇地区地壳速度结构及方位各向异性的联合反演研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学: 29–47.
- Yang Y. 2019. *Joint Inversion for Crustal Structure and Azimuthal Anisotropy: Application to the Sichuan-Yunnan Region, SW China*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China: 29–47 (in Chinese).
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 赵敏, 王思维. 2020. 四川盆地荣县—威远—资中地区发震构造几何结构与构造变形特征: 基于震源机制解的认识和启示[J]. *地球物理学报*, **63**(9): 3275–3291.
- Yi G X, Long F, Liang M J, Zhao M, Wang S W. 2020. Geometry and tectonic deformation of seismogenic structures in the Rongxian-Weiyuan-Zizhong region, Sichuan basin: Insights from focal mechanism solutions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **63**(9): 3275–3291 (in Chinese).
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 赵敏, 王思维, 宫悦, 乔慧珍, 苏金蓉. 2019. 2019年6月17日四川长宁 $M_s 6.0$ 地震序列震源机制解与发震构造分析[J]. *地球物理学报*, **62**(9): 3432–3447.
- Yi G X, Long F, Liang M J, Zhao M, Wang S W, Gong Y, Qiao H Z, Su J R. 2019. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 17 June 2019 $M_s 6.0$ Sichuan Changning earthquake sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **62**(9): 3432–3447 (in Chinese).
- 喻颐, 李忠权, 杨渊宇, 应文峰, 杭文艳. 2013. 四川盆地威远地区构造演化特征及其对下古生界油气富集的控制作用[J]. *天然气勘探与开发*, **36**(2): 1–4.
- Yu Y, Li Z Q, Yang Y Y, Ying W F, Hang W Y. 2013. Characteristics of tectonic evolution of Weiyuan area in Sichuan basin and its effect on lower Paleozoic oil and gas reservoirs[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, **36**(2): 1–4 (in Chinese).
- 曾求, 储日升, 盛敏汉, 危自根. 2020. 基于地震背景噪声的四川威远地区浅层速度结构成像研究[J]. *地球物理学报*, **63**(3): 944–955.
- Zeng Q, Chu R S, Sheng M H, Wei Z G. 2020. Seismic ambient noise tomography for shallow velocity structures beneath Weiyuan, Sichuan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **63**(3): 944–955 (in Chinese).
- 张国苓, 杨晓松, 陈建业, 闫小兵. 2010. 中下地壳岩石弹性波各向异性的影响因素[J]. *地震地质*, **32**(2): 327–337.
- Zhang G L, Yang X S, Chen J Y, Yan X B. 2010. The influencing factor of elastic anisotropy in middle to lower continental crust[J]. *Seismology and Geology*, **32**(2): 327–337 (in Chinese).
- 张永久, 高原, 石玉涛, 程万正. 2008. 四川区域地震台网的剪切波分裂研究[J]. *地震学报*, **30**(2): 123–134.
- Zhang Y J, Gao Y, Shi Y T, Cheng W Z. 2008. A study on S wave splitting using waveform data from Sichuan regional seismic network[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **30**(2): 123–134 (in Chinese).
- 张永久, 高原, 石玉涛, 太龄雪. 2010. 四川紫坪铺水库库区地震剪切波分裂研究[J]. *地球物理学报*, **53**(9): 2091–2101.
- Zhang Y J, Gao Y, Shi Y T, Tai L X. 2010. The shear-wave splitting study of Sichuan Zipingpu reservoir region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(9): 2091–2101 (in Chinese).
- 朱瑜, 桑琴, 吴昌龙, 杨通水. 2010. 威远气田震旦系灯影组储层特征研究[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, **12**(5): 11–13.
- Zhu Y, Sang Q, Wu C L, Yang T S. 2010. Reservoir characteristics of the Sinian Dengying formation in the Weiyuan gasfield, Sichuan[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, **12**(5): 11–13 (in Chinese).
- Crampin S. 1981. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic-media[J]. *Wave Motion*, **3**(4): 343–391.
- 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.

- Gao Y, Crampin S. 2004. Observations of stress relaxation before earthquakes[J]. *Geophys J Int*, **157**(2): 578–582.
- Gao Y, Crampin S. 2008. Shear wave splitting and earthquake forecasting[J]. *Terra Nova*, **20**(6): 440–448.
- Gao Y, Wu J, Fukao Y, Shi Y T, Zhu A L. 2011. Shear wave splitting in the crust in North China: Stress, faults and tectonic implications[J]. *Geophys J Int*, **187**(2): 642–654.
- Han C R, Huang Z C, Xu M J, Wang L S, Mi N, Yu D Y, Li H. 2019. Focal mechanism and stress field in the northeastern Tibetan Plateau: Insight into layered crustal deformations[J]. *Geophys J Int*, **218**(3): 2066–2078.
- Lei X L, Wang Z W, Su J R. 2019a. The December 2018 M_L 5.7 and January 2019 M_L 5.3 earthquakes in south Sichuan basin induced by shale gas hydraulic fracturing[J]. *Seismol Res Lett*, **90**(3): 1099–1110.
- Lei X L, Wang Z W, Su J R. 2019b. Possible link between long-term and short-term water injections and earthquakes in salt mine and shale gas site in Changning, south Sichuan basin, China[J]. *Earth Planet Phys*, **3**(6): 510–525.
- Vinnik L P, Kind R, Makeyeva L I, Kosarev G L. 1989. Azimuthal anisotropy in the lithosphere from observations of long-period S-waves[J]. *Geophys J Int*, **99**(3): 549–559.
- Yang H F, Zhou P C, Fang N, Zhu G H, Xu W B, Su J R, Meng F B, Chu R S. 2020. A shallow shock: The 25 February 2019 M_L 4.9 earthquake in the Weiyuan shale gas field in Sichuan, China[J]. *Seismol Res Lett*, **91**(6): 3182–3194.
- Zheng Y, Ge C, Xie Z J, Yang Y J, Xiong X, Hsu H T. 2013. Crustal and upper mantle structure and the deep seismogenic environment in the source regions of the Lushan earthquake and the Wenchuan earthquake[J]. *Science China Earth Sciences*, **56**(7): 1158–1168.