

乌海地区剪切波分裂研究¹

魏建民 张晖 赵星 张浩鸣 郝亮 阿那尔

(内蒙古自治区地震局, 呼和浩特 010010)

摘要 根据乌海地区构造环境, 采用 SAM 方法研究乌海地区地壳各向异性特征, 使用乌海地震台 2014 年 1 月至 2020 年 6 月数字地震波形进行分析。根据 65 个有效地震记录, 得到乌海地区剪切波分裂参数, 其中快剪切波平均优势偏振方向为 $NE63.1^\circ \pm 46.4^\circ$, 慢剪切波平均时间延迟为 (1.13 ± 0.66) ms/km。乌海地震台快剪切波偏振显示出 4 个优势偏振方向, 分别为 NE、EW、NNE、NNW 向。将得到的各向异性结果与研究区应力场和地质构造进行分析, 认为研究区周边复杂的剪切波分裂变化是主压应力场、原地主压应力、断裂带分布共同作用的结果。

关键词: 乌海 地壳 剪切波分裂 应力场 地质构造 各向异性

引言

地震各向异性是地震学和地球动力学重要研究内容, 可反映地壳介质变形和构造运动 (Silver 等, 1988, 1991; Kaneshima, 1990)。剪切波分裂方法可用于研究地震各向异性, Crampin 提出 EDA (extensive-dilatancy anisotropy) 理论后 (Crampin, 1978, 1981), 部分学者进行了相关研究。已有研究表明, 在应力作用下, EDA 裂隙面平行于最大主压应力方向, 使地震波呈各向异性 (高原等, 1999), 剪切波进入各向异性介质裂隙中传播时, 会分裂成快剪切波和慢剪切波, 快剪切波优势偏振方向反映区域主压应力方向, 慢剪切波时间延迟反映各向异性程度, 时间延迟变化反映应力变化 (Crampin, 1978, 1981; 高原等, 1999; Crampin 等, 2006)。因此, 通过研究剪切波分裂可揭示研究区复杂的构造背景。

乌海市地处华北地块西北部、青藏高原块体东北部、鄂尔多斯块体西北部、银川地堑北端。银川地堑内存在第四纪以来活动性最强的 NNE、NE 向断裂带, 这些断裂带控制了地堑的形成, 且在青藏高原块体 NE 向挤压应力作用下, 使地堑做右旋剪切运动 (徐锡伟等, 1994), 使盆地内部和边缘发生走滑和正断层型地震 (郭祥云等, 2017)。

近年来, 部分学者使用甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区等地区地震台网连续多年近场地震数字观测资料, 对鄂尔多斯块体西缘及周边地区开展地壳各向异性研究, 分析鄂尔多斯块体西缘南北部剪切波分裂特征和区域主压应力场特征 (张晖等, 2012; 太龄雪等,

1 基金项目 内蒙古自治区地震局局长基金 (2019ZF12、2020JP01)

[收稿日期] 2020-08-25

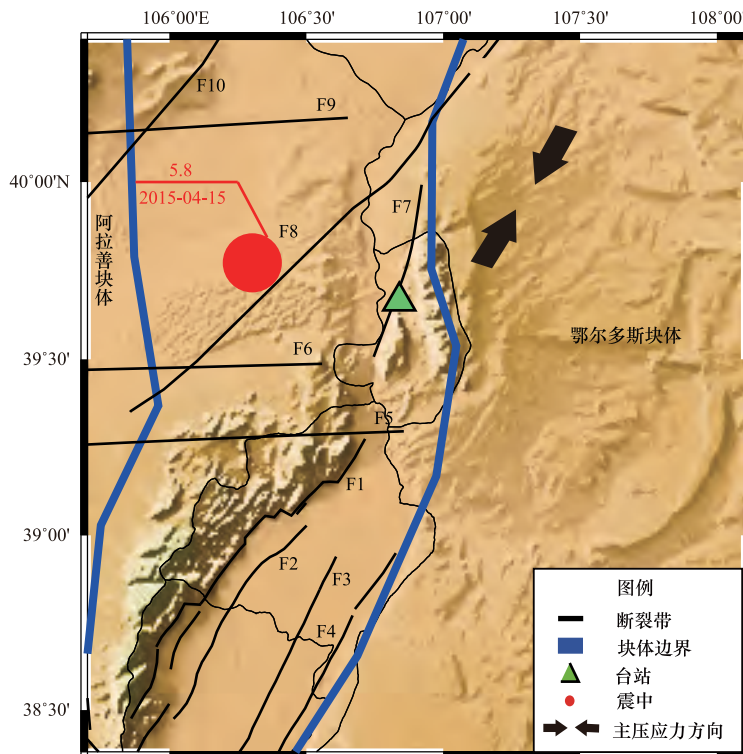
[作者简介] 魏建民, 男, 生于 1980 年。高级工程师。主要从事地震工程、地震安全性评价、地震应急工作。E-mail: nmgdzjwm@126.com

[通讯作者] 张晖, 男, 生于 1982 年。硕士, 高级工程师。主要从事地震监测工作。E-mail: zhanghui218@163.com

2017; 许英才等, 2019; 张晖等, 2020), 但对鄂尔多斯块体西缘银川地堑北部剪切波分裂特征和地壳各向异性特征的研究仍不够深入。多位学者采用单台连续多年数字观测资料对特定地区地壳各向异性进行研究, 取得了一定成果(邓嘉美等, 2015; 吴鹏等, 2017)。本文采用 SAM 方法(高原等, 2008a), 利用乌海地震台(台站代码 WUH, 39.66°N, 106.83°E)记录到的地震波形数据, 对乌海地区地壳各向异性进行研究, 得到乌海地区地壳各向异性特征和应力场特征, 并对该地区剪切波分裂参数空间分布特征进行讨论, 分析乌海地区地壳各向异性与当地应力场和周边断裂带的关系。

1 地质构造背景

研究区位于银川地堑北端(图 1), 银川地堑被阿拉善块体和鄂尔多斯块体所夹, 西边界为 NE 走向贺兰山东麓断裂带, 北边界为 EW 走向宗别立-正谊关断裂带(黄雄南等, 2012)。银川地堑以东地区与鄂尔多斯块体相连, 与吉兰泰盆地、贺兰山隆起共同构成鄂尔多斯块体断陷盆地的一部分。银川地堑受青藏高原块体 NE 向推挤作用, 使银川地堑外侧 NNE 向断层发生了引张, 形成一系列正断层, 从而形成银川地堑。第四纪以来, 由于青藏高原向东滑移, 造成银川地堑南部 NNW 走向断层产生左旋走滑, 形成了新褶皱, 使银川地堑进一步扩张



注: 黑色细曲线表示市级行政边界, F1 为贺兰山东麓断裂带, F2 为崇岗-芦花台断裂带, F3 为银川-平罗隐伏断裂带, F4 为黄河断裂带, F5 为正谊关断裂带, F6 为和屯-本井断裂带, F7 为卓子山断裂带, F8 为磴口-本井断裂带, F9 为磴口-徐力斯特乌拉断裂带。

图 1 研究区域构造背景

Fig. 1 Tectonics background and seismic stations in the study area

(马杏垣, 1989)。银川地堑被三关口-牛首山断裂带划分为南北两个部分, 两部分地质构造条件、地震活动性及应力场明显不同, 南部属于青藏高原块体东北缘, 北部属于华北块体西缘, 北部主压应力方向为 NNE 向, 南部主压应力方向为 NEE 近 EW 向 (马禾青等, 2011; 太龄雪等, 2017; 许英才等, 2019)。

乌海地震台地处多个断裂带交汇地区, 位于 NNE 向桌子山断裂带南端, 西侧为 NE 向磴口-本井断裂带, 地质构造环境较复杂。目前, 对乌海地区地壳各向异性的研究较少, 因此, 对乌海地区剪切波分裂进行研究, 以深入了解该地区地壳各向异性、地质构造和应力场特征。

2 研究数据与方法

收集整理乌海地震台 2014 年 1 月至 2020 年 6 月地震观测资料, 为消除地面剪切波全反射的影响, 并考虑研究区速度结构 (周民都等, 2006; 张永谦等, 2011), 选择地震射线临界角即剪切波窗 $\leq 50^\circ$ 的观测资料进行分析 (Crampin 等, 2006; 张晖等, 2020), 乌海地震台于 2020 年 2 月 19 日 17:47:58 记录到的震源深度 21km、震中距 16km、 $M_L 2.1$ 地震波形带通滤波后的波形如图 2 所示。

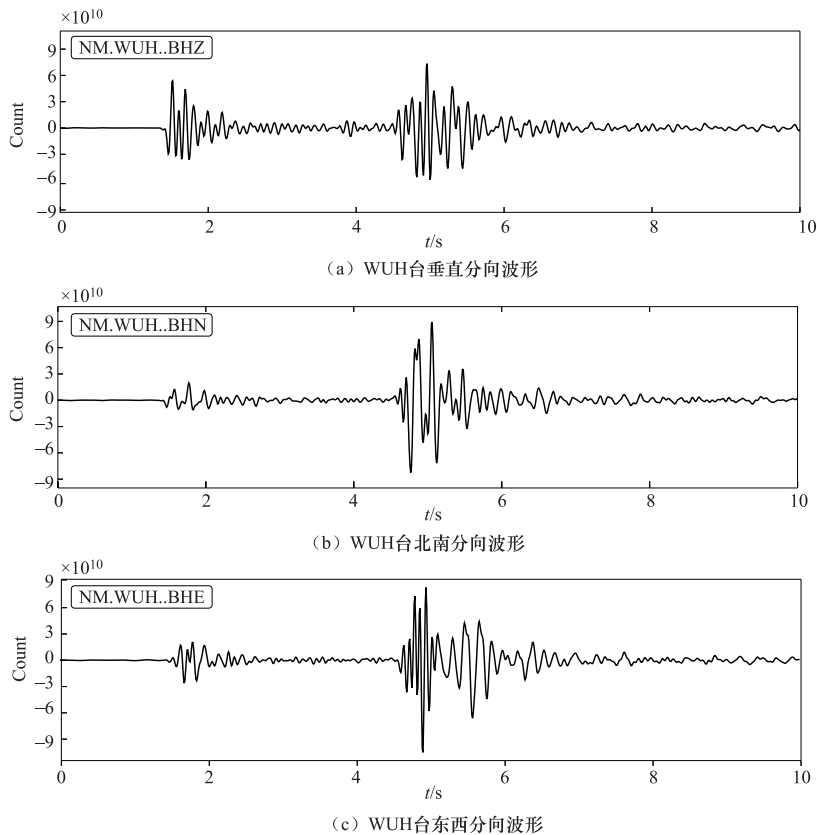


图 2 带通滤波后的地震波形

Fig. 2 Bandpass filtered seismic waveform

研究方法为剪切波分裂系统分析方法, 即 SAM 方法 (高原等, 2008a), 研究形态地壳

介质各向异性特征。SAM 方法主要包括相关函数计算、时间延迟校正和偏振分析功能。该方法首先旋转 2 个水平分量, 并进行相关函数计算, 得到快剪切波优势偏振方向和慢剪切波时间延迟初值, 然后依次分离快、慢剪切波, 并对快、慢剪切波进行时间延迟校正, 校正后的偏振图呈线性, 乌海地震台于 2020 年 2 月 19 日 17:47:58 记录的震源深度 21km、震中距 16km、 $M_L 2.1$ 地震波形剪切波分裂过程如图 3 所示, 图中 S1 和 S2 分别表示快、慢波位置。对乌海地区地震资料进行剪切波窗挑选, 剔除断记、干扰和无显著剪切波分裂特征的事件, 最后得到 65 条地震波有效剪切波分裂计算结果, 得到有效计算结果的地震事件震源深度主要分布在 15—32km, 震级范围为 $M_L 0.1—2.9$ 。

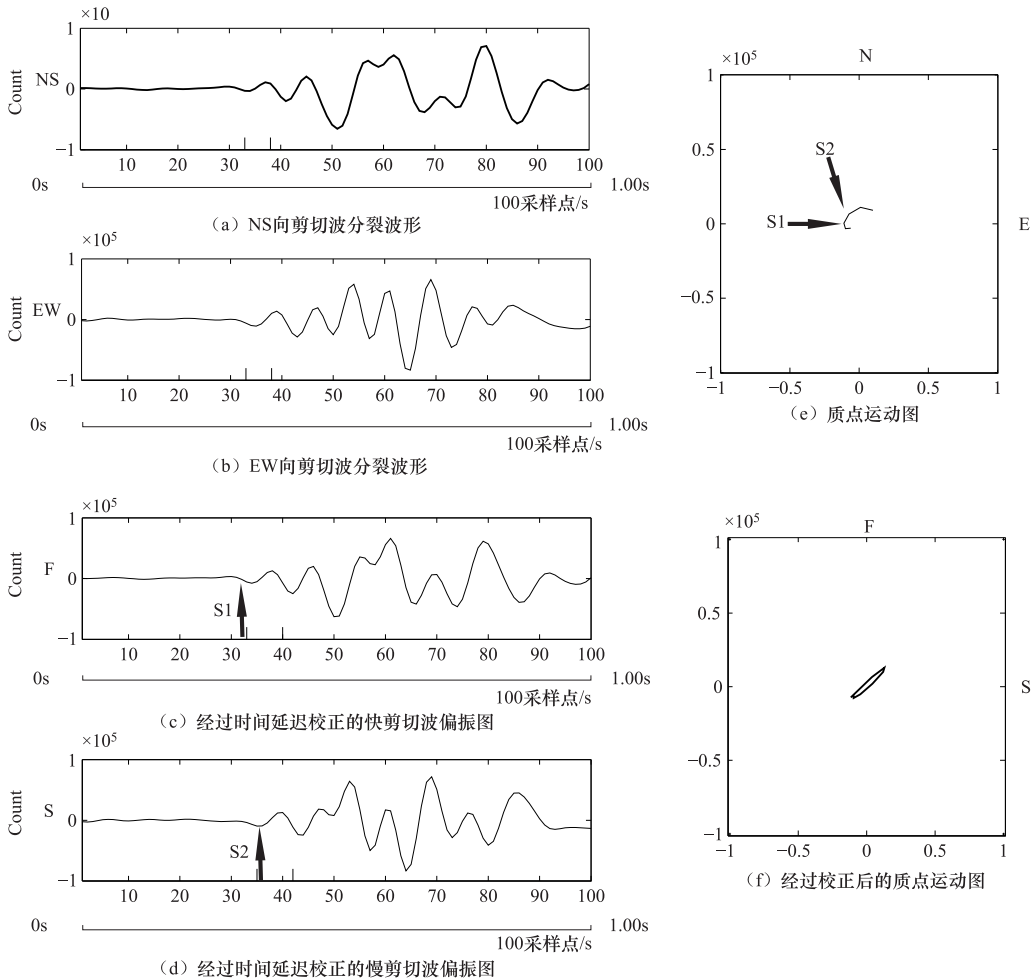


图 3 地震波形剪切波分裂过程

Fig. 3 Shear-waves splitting analysis of seismic wave recorded at WUH station

3 研究结果与分析

3.1 剪切波分裂结果

研究得到乌海地区剪切波分裂参数, 其中快剪切波平均优势偏振方向为 $NE63.1^\circ \pm 46.4^\circ$,

慢剪切波平均时间延迟为 (1.13 ± 0.66) ms/km，如图 4 所示。快剪切波平均优势偏振方向与鄂尔多斯块体西缘构造带走向一致（马禾青等，2011），与银川地堑北部主压应力方向一致，说明银川地堑北部应属于华北块体，与鄂尔多斯块体共同构成华北块体西缘。银川地堑主压应力方向主要与青藏高原块体 NE 向挤压作用有关（徐纪人等，2006），受始新世以来青藏高原 NE 向挤压作用，使鄂尔多斯块体西缘发生裂陷，燕山运动又导致古贺兰山解体（王美芳等，2008；刘建辉等，2010），从而使陷落区域形成银川地堑。

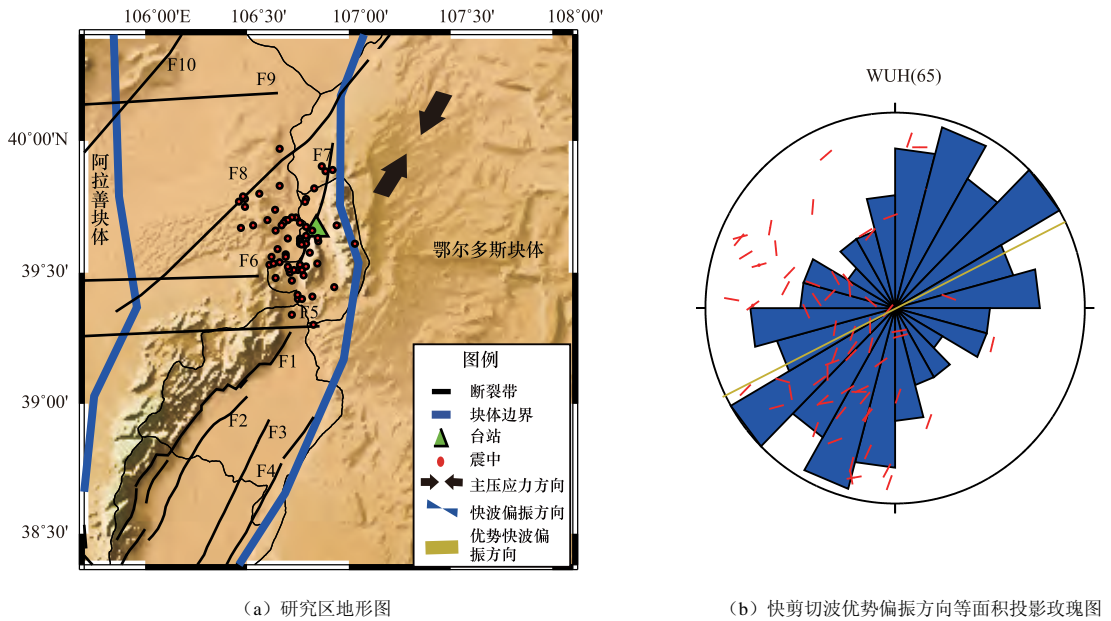


图 4 快剪切波优势偏振方向等面积投影玫瑰图及地震分布图

Fig. 4 WUH station fast wave polarization direction equal area projection rose diagram and earthquake distribution diagram

由图 4 可知，乌海地震台快剪切波优势偏振方向表现出复杂的特征，基本存在 4 个优势偏振方向，分别为 NE、EW、NNE、NNW 向。为进一步分析快剪切波优势偏振方向与断裂带和地质构造的关系，分别对 4 个优势偏振方向进行分析，结果见表 1。由表 1 可知，乌海地震台快剪切波平均优势偏振方向标准差较大，这主要因为存在多个优势偏振方向。

表 1 快剪切波优势偏振方向分析结果

Table 1 Statistics of different fast wave polarization directions at WUH station

项目	地震波条数	快剪切波平均优势偏振方向/ $^{\circ}$	标准差	慢剪切波平均时间延迟 /ms \cdot km $^{-1}$	标准差
NE 向	24	51.50	10.88	1.23	0.71
EW 向	13	88.08	13.23	1.04	0.53
NNE 向	19	16.32	8.15	0.92	0.54
NNW 向	9	156.56	15.51	1.40	0.75

3.2 快剪切波优势偏振方向与断裂带

乌海地震台共有 19 条地震波快剪切波优势偏振方向为 NNE 向, 对应的 19 个地震事件中分布如图 5 所示。由图 5 可知, 地震主要集中在 NNE 向卓子山断裂带周边和 NE 向磴口-本井断裂带东侧, 乌海地震台 NNE 向快剪切波优势偏振方向主要受卓子山断裂带和磴口-本井断裂带的影响。

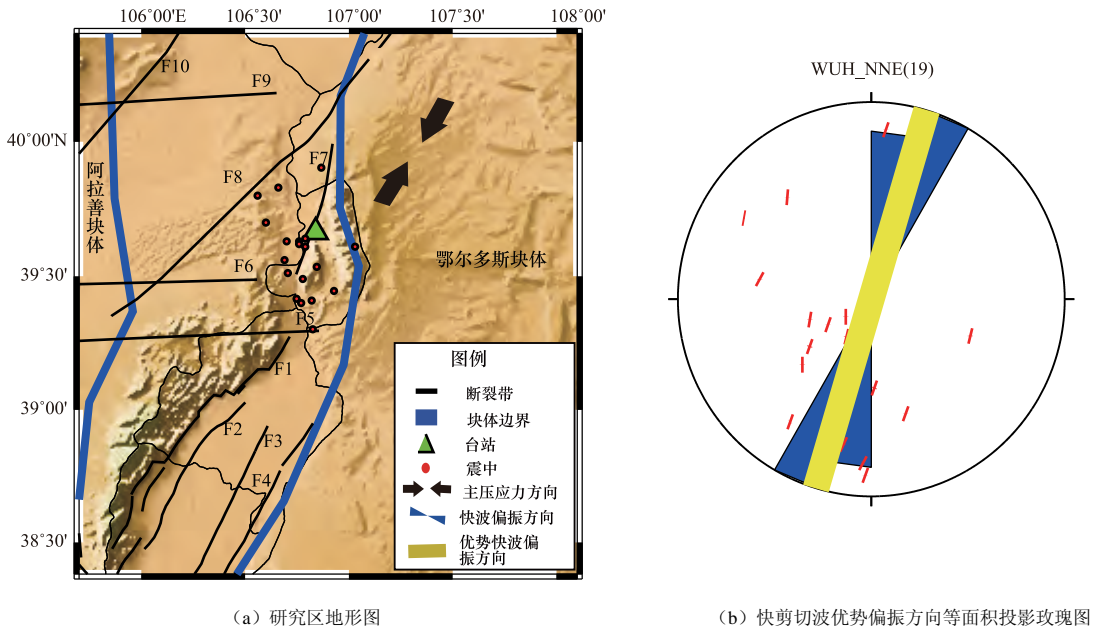


图 5 NNE 向快剪切波优势偏振方向等面积投影玫瑰图及地震分布图

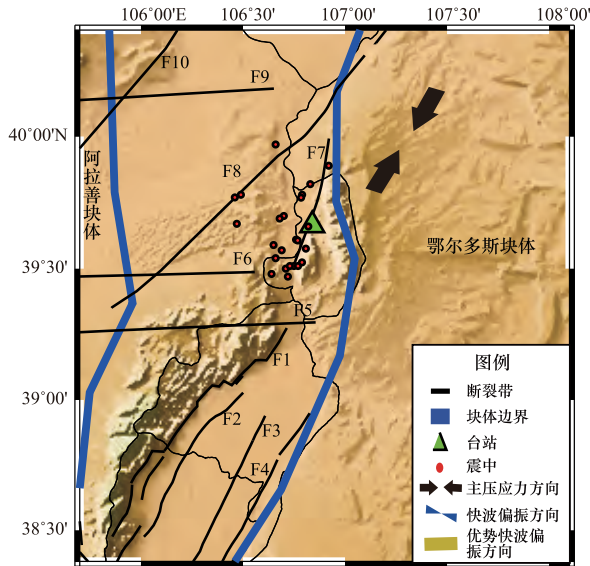
Fig. 5 WUH station NNE direction fast wave polarization direction equal area projection rose diagram and earthquake distribution diagram

乌海地震台 NE 向快剪切波优势偏振方向等面积投影玫瑰图及地震分布图如图 6 所示, 由图 6 可知, 地震主要分布在卓子山断裂带, 但磴口-本井断裂带周边地震显著增多, NE 向作为优势偏振方向, 同时受卓子山断裂带和磴口-本井断裂带的影响。

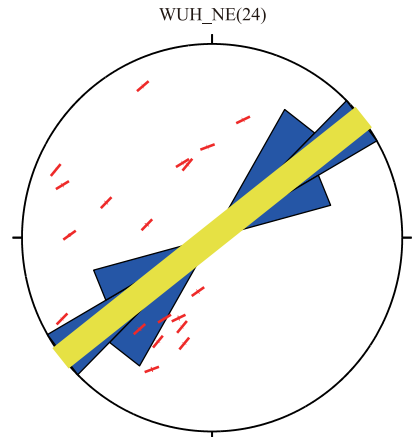
磴口-本井断裂带和卓子山断裂带均位于银川地堑北部, 为乌海地区主要断裂带, 其中磴口-本井断裂带是晚更新世隐伏正断裂带, 走向 NE, 倾向 NW (邓起东等, 1994, 1999); 卓子山断裂带是燕山期断裂带, 位于卓子山东麓地区, 走向近 NS, 长约 40km, 断面倾向西, 倾角约 45° — 65° , 为高角度逆冲断层 (卓鱼周, 2015), 被正谊关断裂带右行错开, 分为南北两段 (赵红格, 2003)。由图 5、图 6 可知, NNE 向和 NE 向快剪切波优势偏振方向与断裂带分布及特征关系密切, 这主要是因为局部构造和断裂带特性引起区域应力发生变化 (高原等, 1999, 2010, 2008b; 吴晶等, 2007)。

乌海地震台 EW 向快剪切波优势偏振方向等面积投影玫瑰图及地震分布图如图 7 所示, 由图 7 可知, 地震主要分布在卓子山断裂带和磴口-本井断裂带南部、和屯-本井断裂带和正谊关断裂带北部。和屯-本井断裂带和正谊关断裂带均呈近 EW 走向 (邓起东等, 1994, 1999), 且正谊关断裂带横切了卓子山断裂带, 将卓子山断裂带分为南北两部分, 同时, 已有研究认

为卓子山断裂带逐渐由 NS 向转变为 EW 向（赵红格，2003），与乌海地震台快剪切波 EW 向优势偏振方向吻合，表明乌海地震台 EW 向优势偏振方向应受断裂带走向和局部构造共同影响。



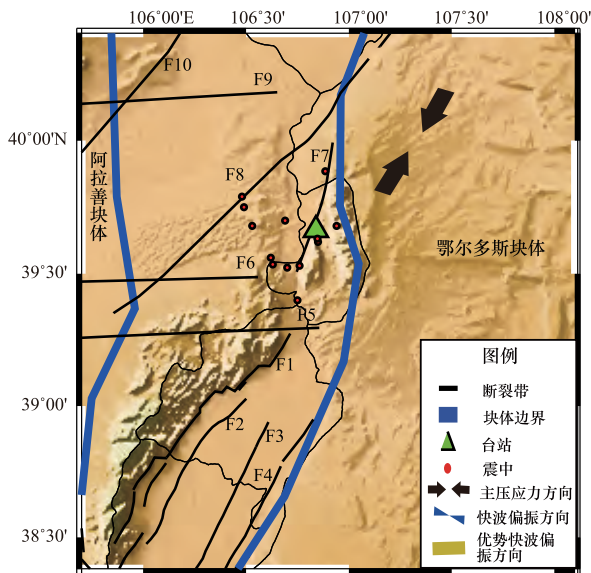
(a) 研究区地形图



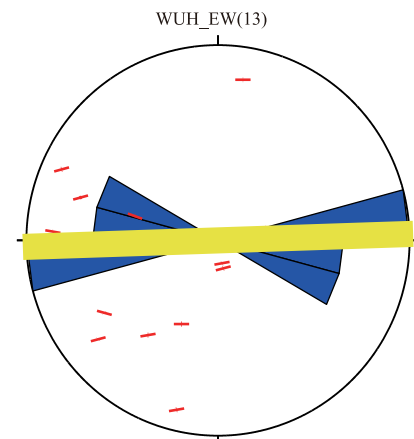
(b) 快剪切波优势偏振方向等面积投影玫瑰图

图 6 NE 向快剪切波优势偏振方向等面积投影玫瑰图及地震分布图

Fig. 6 WUH station NE direction fast wave polarization direction equal area projection rose diagram and earthquake distribution diagram



(a) 研究区地形图



(b) 快剪切波优势偏振方向等面积投影玫瑰图

图 7 EW 向快剪切波优势偏振方向等面积投影玫瑰图及地震分布图

Fig. 7 WUH station EW direction fast wave polarization direction equal area projection rose diagram and earthquake distribution diagram

乌海地震台 NNW 向快剪切波优势偏振方向等面积投影玫瑰图及地震分布图如图 8 所示, 由图 8 可知, 地震主要分布在桌子山断裂带西侧、正谊关断裂带和贺兰山东麓断裂带东北侧。此优势偏振方向与周边断裂带走向不一致, 也与主压应力方向不一致, 部分已有研究得出类似结果(许英才等, 2019)。贺兰山东麓断裂带东北方向延长线经乌海地震台附近, 因此乌海地震台快剪切波优势偏振方向可能受贺兰山东麓断裂带构造局部应力的影响(张晖等, 2020), 已有研究表明在垂直运动大于水平运动的高倾角正断层所夹区域及逆冲断裂带均对剪切波分裂结果产生影响, 造成剪切波分裂结果变化复杂(石玉涛等, 2009; 张晖等, 2020), 进而反映出研究区原地主压应力复杂的变化特征。

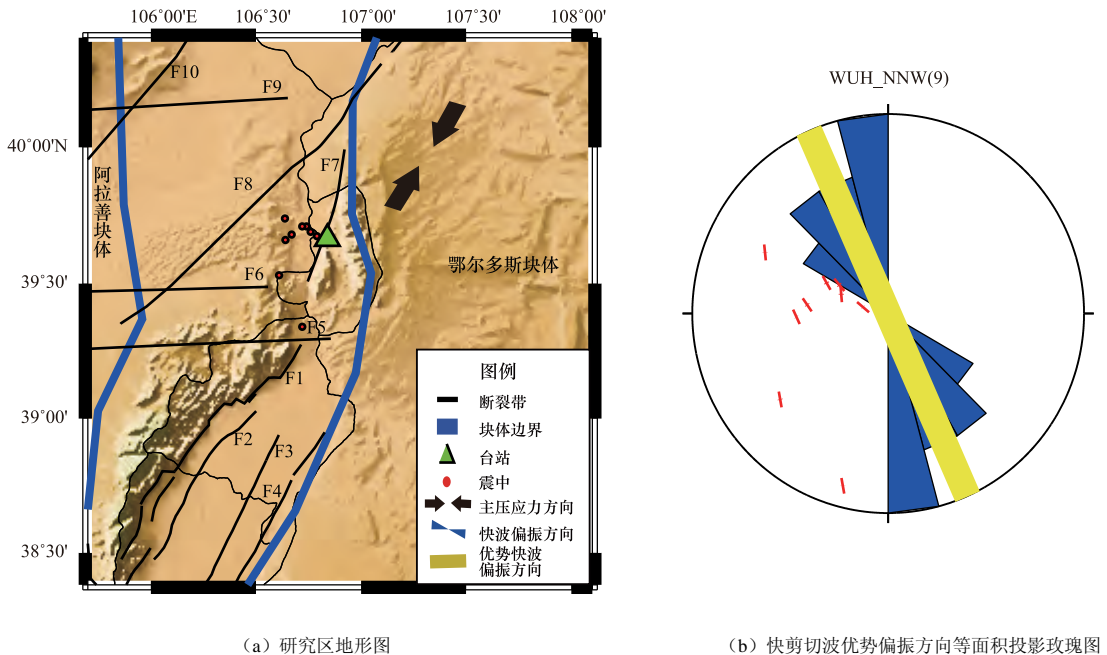


图 8 NNW 向快剪切波优势偏振方向等面积投影玫瑰图及地震分布图

Fig. 8 WUH station NNW direction fast wave polarization direction equal area projection rose diagram and earthquake distribution diagram

4 结论与讨论

基于内蒙古自治区乌海地震台 2014 年 1 月至 2020 年 6 月地震观测资料, 采用 SAM 方法进行剪切波分裂研究。研究表明, 乌海地区快剪切波平均优势偏振方向为 $NE63.1^\circ \pm 46.4^\circ$, 慢剪切波平均时间延迟为 (1.13 ± 0.66) ms/km。乌海地震台快剪切波偏振存在 4 个优势偏振方向, 分别为 NE、EW、NNE、NNW 向。由快剪切波优势偏振方向等面积投影玫瑰图及地震分布图可知, 优势偏振方向 NE 和 NNE 向主要受主压应力场和磴口-本井断裂带及桌子山断裂带的影响, 与 NE 向磴口-本井断裂带和 NNE 向桌子山断裂带走向一致; 优势偏振方向 EW 向与桌子山断裂带南端被正谊关断裂带右旋所切有关, 可能受桌子山和近 EW 向正谊关断裂带及和屯-本井断裂带共同影响; 优势偏振方向 NNW 向与贺兰山东麓断裂带拉张

方向一致, 受贺兰山东麓断裂带第四纪以来抬升作用的影响, 造成乌海地区复杂的原地主压应力特征, 使乌海地震台剪切波分裂结果变化复杂。

乌海地区应力场主要受青藏高原块体 NE 向推挤作用的影响, 同时还受磴口-本井断裂带、卓子山断裂带、和屯-本井断裂带、正谊关断裂带及贺兰山东麓断裂带的影响, 因此, 乌海地震台快剪切波优势偏振方向结果是主压应力场、断裂带、地质构造、原地主压应力共同作用的结果, 显示出乌海地区复杂的地质构造和应力场特征。

由于本次研究仅使用了 1 个台站数据, 数据量较少, 因此, 本文研究结果还需通过更多有效资料进行验证。

参考文献

- 邓嘉美, 金明培, 高琼等, 2015. 洱源地震台数字地震记录 S 波分裂研究. 地震地磁观测与研究, **36** (5): 30—35.
- 邓起东, 徐锡伟, 于贵华, 1994. 中国大陆活动断裂的分区特征及其成因. 见: 国地震学会地震地质专业委员会主编, 中国活动断层研究. 北京: 地震出版社, 1—14.
- 邓起东, 程绍平, 闵伟等, 1999. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论. 地质力学学报, **5** (3): 13—21.
- 高原, 郑斯华, 周蕙兰, 1999. 唐山地区快剪切波偏振图像及其变化. 地球物理学报, **42** (2): 228—232.
- 高原, 石玉涛, 梁维等, 2008a. 剪切波分裂分析系统 SAM (2007)-软件系统. 中国地震, **24** (4): 345—353.
- 高原, 吴晶, 2008b. 利用剪切波各向异性推断地壳主压应力场: 以首都圈地区为例. 科学通报, **53** (23): 2933—2939.
- 高原, 吴晶, 易桂喜等, 2010. 从壳幔地震各向异性初探华北地区壳幔耦合关系. 科学通报, **55** (29): 2837—2843.
- 郭祥云, 蒋长胜, 王晓山等, 2017. 鄂尔多斯块体周缘中小地震震源机制及应力场特征. 大地测量与地球动力学, **37** (7): 675—685.
- 黄雄南, 张家声, 李天斌等, 2012. 南北地震带北段与蒙古中部活动断裂构造特征. 地震地质, **34** (4): 637—658.
- 刘建辉, 张培震, 郑德文等, 2010. 贺兰山晚新生代隆升的剥露特征及其隆升模式. 中国科学: 地球科学, **40** (1): 50—60.
- 马禾青, 丁志峰, 常利军等, 2011. 宁夏地区地壳介质地震各向异性特征. 地球物理学进展, **26** (1): 61—70.
- 马杏垣, 1989. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社, 56.
- 石玉涛, 高原, 赵翠萍等, 2009. 汶川地震余震序列的地震各向异性. 地球物理学报, **52** (2): 398—407.
- 太龄雪, 高原, 2017. 鄂尔多斯块体西侧地壳各向异性初步研究. 地震, **37** (1): 82—91.
- 王美芳, 李慧勤, 2008. 宁夏银川盆地地质构造演化特征. 科技咨询, (3): 148—149.
- 吴晶, 高原, 陈运泰等, 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. 地球物理学报, **50** (1): 209—220.
- 吴鹏, 李相平, 高原等, 2017. 邢台地区地壳各向异性特征初步研究. 地震, **37** (1): 73—81.
- 徐纪人, 赵志新, 2006. 中国岩石圈应力场与构造运动区域特征. 中国地质, **33** (4): 782—792.
- 徐锡伟, 程国良, 马杏垣等, 1994. 华北及其邻区块体转动模式和动力来源. 地球科学——中国地质大学学报

- 报, **19** (2): 129—138.
- 许英才, 高原, 石玉涛等, 2019. 鄂尔多斯块体西缘地壳介质各向异性: 从银川地堑到海原断裂带. 地球物理学报, **62** (11): 4239—4258.
- 张辉, 高原, 石玉涛等, 2012. 基于地壳介质各向异性分析青藏高原东北缘构造应力特征. 地球物理学报, **55** (1): 95—104.
- 张晖, 高原, 石玉涛等, 2020. 鄂尔多斯块体北缘与西缘地区地壳各向异性特征. 地球物理学报, **63** (6): 2230—2247.
- 张永谦, 滕吉文, 王夫运等, 2011. 阴山造山带及鄂尔多斯盆地北部地区上地壳的地震波属性结构及岩性推断. 地球物理学报, **54** (1): 87—97.
- 赵红格, 2003. 鄂尔多斯盆地西部构造特征及演化. 西安: 西北大学.
- 周民都, 张元生, 石雅鏐等, 2006. 青藏高原东北缘地壳三维速度结构. 地球物理学进展, **21** (1): 127—134.
- 卓鱼周, 2015. 鄂尔多斯盆地西北部桌子山地区中-新生代隆升事件的确定及其构造意义. 西安: 西北大学.
- Crampin S., 1978. Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **53**(3): 467—496.
- Crampin S., 1981. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic-media. *Wave Motion*, **3**(4): 343—391.
- Crampin S., Gao Y., 2006. A review of techniques for measuring shear-wave splitting above small earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **159**(1—2): 1—14.
- Kaneshima S., 1990. Origin of crustal anisotropy: shear Wave splitting studies in Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **95**(B7): 11121—11133.
- Silver P G, Chan W W, 1988. Implications for continental structure and evolution from seismic anisotropy. *Nature*, **335**(6185): 34—39.
- Silver P. G., Chan W. W., 1991. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **96**(B10): 16429—16454.

Study on Shear Wave Splitting in Wuhai Area Based on Wuhai Seismic Station

Wei Jianmin, Zhang Hui, Zhao Xing, Zhang Haoming, Hao Liang and A Naer

(Seismological Bureau of Inner Mogolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China)

Abstract According to the tectonic environment of Wuhai area, this study uses the SAM method to study the crustal anisotropy characteristics of Wuhai area, and uses the digital seismic waveforms of Wuhai Seismic Station from January 2014 to June 2020 for analysis. According to the 65 data obtained According to the results of effective seismic records, the shear wave splitting parameters of Wuhai area are initially obtained. The average polarization direction of fast shear waves is $NE63.1^{\circ} \pm 46.4^{\circ}$, and the average time delay of slow shear waves is (1.13 ± 0.66) ms/km. The polarization of fast shear waves at Wuhai Station shows four dominant directions, one is NE direction, one is EW direction, one is NNE direction, and the other is NNW direction. Analyzing the obtained anisotropy results with the stress field and geological structure of the study area, it is believed that the complex changes in shear wave splitting around the study area are the result of the combined action of the principal compressive stress field, the in-situ principal compressive stress, and the distribution of fractures.

Keywords: Wuhai; Seismic anisotropy; Shear-wave splitting