

吴逸影, 邓斯壮, 钮凤林等. 2021. 秦岭造山带上地幔各向异性及相关的壳幔耦合型式. 地球物理学报, 64(5):1608-1619, doi:10.6038/cjg2021O0390.

Wu Y Y, Deng S Z, Niu F L, et al. 2021. Crust-mantle coupling mechanism beneath the Qinling Orogen Belt revealed by SKS-wave splitting. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 64(5):1608-1619, doi:10.6038/cjg2021O0390.

秦岭造山带上地幔各向异性及相关的壳幔耦合型式

吴逸影^{1,2}, 邓斯壮², 钮凤林², 贺巍^{1,3}, 吴汉宁¹

¹ 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

² 莱斯大学地球科学学院, 美国休斯顿 77005

³ 陕西省地震局, 西安 710068

摘要 秦岭是具有复杂地壳结构、经历长期构造演化的复合型大陆造山带. 本文通过地震资料精细反演上地幔各向异性, 探索秦岭造山带构造演化及成因动力. 采用最小切向能量法、最小特征值法和“叠加”分析法求得覆盖秦岭造山带及周边地区 41 个地震台站的 SKS 横波分裂结果: 快波偏振方向(φ)和快、慢波的时间延迟(δt), 据此绘制了秦岭造山带上地幔各向异性图. 将已发表的地表 GPS 观测结果与上地幔各向异性相结合作上地幔变形因素分析, 发现秦岭造山带自西向东的上地幔变形因素不是单一垂直连贯变形或地幔流动, 而是共存的. 同时, 其上地幔变形的 主控因素有区域性变化. 研究表明秦岭造山带西、中部上地幔变形以壳幔垂直连贯变形为主, 属壳幔强耦合, 东部壳、幔耦合变弱, 上地幔变形以简单地幔流动为主控因素. 同时, SKS 快波偏振方向(φ)于秦岭造山带显示出南缘略向北凸、北缘略向南凸的弧形展布, 反映了造山带两侧刚性较强的扬子地块与鄂尔多斯地块旋转与秦岭造山带南北缘弧形流动有关.

关键词 秦岭造山带; 地震各向异性; 地幔变形; 壳幔耦合

doi:10.6038/cjg2021O0390

中图分类号 P315

收稿日期 2020-10-12, 2021-01-13 收修定稿

Crust-mantle coupling mechanism beneath the Qinling Orogen Belt revealed by SKS-wave splitting

WU YiYing^{1,2}, DENG SiZhuang², NIU FengLin², HE Wei^{1,3}, WU HanNing¹

¹ State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Northern Taibai Str. 229, Xi'an 710069, China

² Department of Earth, Environmental and Planetary Sciences, Rice University, Houston, Texas, TX 77005, USA

³ Shaanxi earthquake Agency, Xi'an 710068, China

Abstract The Qinling Orogenic Belt (QOB) is an east-west extended Proterozoic mountain range located between the Ordos block in the north and the Yangtze block in the south. It is featured by complicated crustal deformation structures due to its long history of tectonic evolution. Measuring the subsurface deformation field beneath the QOB thus becomes essential for deciphering major tectonic events that shaped the belt. Seismic anisotropy is generally believed to be caused by fabric structures that are close related to the subsurface strain field. Seismic anisotropy is often measured with two parameters, the fast polarization direction φ and delay time δt between the fast and slow directions, from splitting or birefringence of shear waves. In this study, we measured

基金项目 国家自然科学基金(91855211, 41674070, 41702233, 41774030)资助.

第一作者简介 吴逸影, 女, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事地球物理学和大陆动力学研究. E-mail: yiyingwu@stumail.nwu.edu.cn

* 通讯作者 吴汉宁, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地球物理学和大陆动力学研究. E-mail: wuhn2506@nwu.edu.cn

(φ , δt) from SKS recorded by 41 broadband stations that cover the QOB and it surrounding areas. We employed a 2-D grid searching method which searches for an optimum (φ , δt) that minimizes the transverse energy or the second eigenvalue of the covariance matrix. Stacking of SKS data from multiple earthquakes provides robust measurements of the two splitting parameters. The measured seismic anisotropy shows an overall E-W fast polarization direction across the QOB with slight variations at its western and eastern ends. The fast polarization direction is consistent with a eastward mantle flow that escapes from the NE margin of the Tibetan plateau and flows between the Ordos and Yangtze blocks. We also compared SKS splitting with GPS measurements and crustal anisotropy, and found that the NE marging of the Tibetan plateau and western part of QOB exhibit a vertically coherent deformation (VCD) across the entire lithosphere. In the eastern part of the QOB, there is a significant difference ($>15^\circ$) in the fast polarization direction measured from SKS and Pms, a P-to-S converted wave at the Moho, indicating some decoupling of deformation between the crust and upper mantle.

Keywords Qinling Orogenic Belt; Seismic anisotropy; Mantle deformation; Crust-mantle coupling

0 引言

秦岭造山带西起青藏高原,向东延伸数千公里,划分了中国南北陆块(孟庆任, 2017),是一条典型的复合型大陆造山带(图 1),具有复杂的地壳组成和结构,在中国大陆岩石圈的形成演化中占有特殊的重要地位(张国伟等, 2001; Huang et al., 1992; 刘建华等, 1995; 袁学诚等, 1997, 2008; Dong et al., 2016). 因此,进一步探索秦岭造山带的形成与演化机制对理解和探讨我国大陆内部各块体间的相互作用和构造的形成有重有意义(王谦身等, 2013). 在板块驱动的假设下,当前流行两个壳幔变形运动学的端元模型:简单软流圈流动(e. g. Vinnik et al., 1992; Silver et al., 1996)和垂直连贯变形(Silver, 1994). 简单软流圈流动意味着板块自驱动,软流圈与岩石圈解耦. 岩石圈垂直连贯变形预示板块强烈地耦合于地幔,地幔变形场和地面变形场相同(Wang et al., 2014). 中外学者先后对秦岭造山带不同区域及整体运用了大量地震资料与不同方法进行了研究:人工地震探测(如袁学诚等, 1994, 2008; 王椿镛等, 1997; Ren et al., 2012; 滕吉文等, 2014b; 李英康等, 2015)、噪声层析成像(如贺伟光等, 2015; 丁文秀等, 2017)和天然地震层析成像(如刘建华等, 1995; 黄耘等, 2011; 黄忠贤, 2011; 李爽等, 2014)等,并取得了重大进展.

地震各向异性作为解释板块运动、软流圈对流以及地震成因等的重要手段,对研究秦岭造山带及周边壳幔变形机制、青藏高原隆升(曾融生等,

1998)、上地幔各向异性(如张洪双等, 2013; 王琼等, 2013)和各个构造单元相互作用的动力学特征有约束意义(如丁志峰和曾融生, 1996; 高原和滕吉文, 2005; 李永华等, 2006; 郑晨等, 2016). 罗艳等(2004)与常利军等(2014)收集了中国及邻区共 1020 个台站的剪切波分裂参数的数据集,对中国大陆上地幔各向异性及其可能的动力学机制做了综合研究:东部各向异性主要来自于地幔流动,西部各向异性主要由于壳幔连贯变形,中部鄂尔多斯到四川盆地区域的各向异性比较复杂. 秦岭造山带是横跨中国大陆东、西,划分鄂尔多斯地块与扬子地块的主要造山带,其壳幔各向异性及变形机制不会只受单一因素控制,研究秦岭造山带上地幔各向异性特征及其与邻域的相互作用模式对探讨中国大陆内其相邻板块的动力学机制有约束作用.

横波分裂现象作为各向异性是在地震波记录中最明显的表现形式,观测到的各向异性参数是研究上地幔地震各向异性最有效的方法之一(e. g. Silver, 1996; Savage, 1999). 各向异性参数中的快波偏振方向(φ)和快、慢波到达时间差(δt)分别代表快波偏振方向和各向异性强度,反映了上地幔各向异性的路径综合效应. 上地幔各向异性普遍被认为是在应变作用下地幔物质变形导致橄榄石晶体的择优取向 a 轴(LPO)引起的(Nicolas et al., 1987),在干燥的、相对高应变率和简单剪切的条件下,橄榄石 a 轴与地幔流动方向大致平行(Zhang and Karato, 1995). 同时,大量对海洋盆地下上地幔各向异性的研究发现板块运动也会引起应变,即板块运动导致地幔流动(e. g. Morris et al., 1969; Shearer and

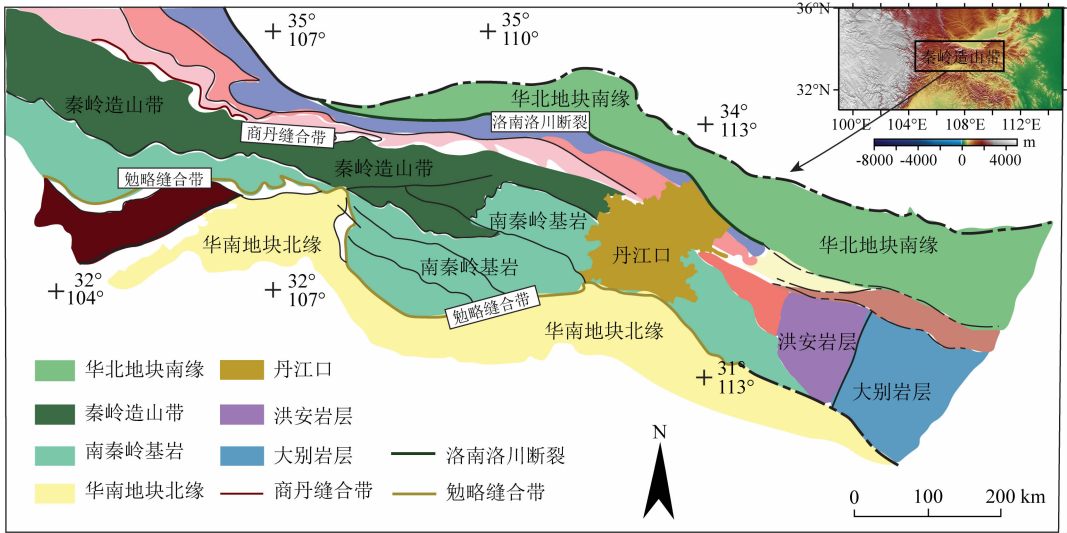


图1 秦岭造山带及周边构造示意图(修改自 Dong et al., 2011)

Fig. 1 Tectonic overview map of the Qinling Orogenic Belt and adjacent region (Modified from Dong et al., 2011)

Orcutt, 1986; Forsyth and Uyedaf, 1975; Tanimoto and Anderson, 1985; Montagner and Tanimoto, 1990). SKS 横波分裂出快波极化方向沿橄榄石 a 轴方向, 快、慢波延迟时间差 δt 可以用于估计各向异性层的厚度 (e. g. Kosarev et al., 1984; Vinnik 1989 et al., 1989; Silver and Chan, 1991; Savage et al., 1990). 因此, SKS 远震横波分裂测量获得的地幔各向异性参数 ($\varphi, \delta t$) 能有效反映上地幔变形类型和几何结构的基本信息.

本文获取覆盖了从青藏高原东缘到秦岭造山带东缘完整地质体的区域地震网络中 41 个台站记录的连续远震 SKS 波形数据 ($32^{\circ}\text{E}-36^{\circ}\text{E}, 102^{\circ}\text{N}-114^{\circ}\text{N}$; 2007—2015 年), 利用最小切向能量法、最小特征值法和“叠加”分析法观测计算得 SKS 分裂参数 ($\varphi, \delta t$). 本文的研究目标不仅使用密集宽频带地震阵列来描述秦岭造山带上地幔的 SKS 分裂模式分析上地幔各向异性特征, 还结合对比前人研究成果与发表的 GPS 信息 (如张静华等, 2004; 王椿镛等, 2007; 常利军等, 2016) 做地壳-地幔耦合变形分析. 据此对秦岭造山带及邻域壳幔耦合类型进行更全面的分析, 进一步对秦岭造山带及邻域演化与成因的研究提供约束与参考.

1 横波分裂测量

1.1 测量方法

本文应用基于信噪比的多事件“叠加”方法获取单个台站的分裂参数, 从不同反方位角有效地平均其分裂变化, 为单层水平横向各向同性模型提供更

好的 ($\varphi, \delta t$). 分别采用最小切向能量法、最小特征值法获得最佳的分裂参数 ($\varphi, \delta t$). 方法一, 最小化横向分量总能量:

$$E_T(\varphi, \delta t) = \left(\sum_{i=1}^N w_i E_{T_i}(\varphi, \delta t) \right) / \sum_{i=1}^N w_i, \quad (1)$$

方法二, 最小特征值 Λ_2 :

$$\Lambda_2(\varphi, \delta t) = \left(\sum_{i=1}^N w_i E_{T_i} \lambda_{2i}(\varphi, \delta t) \right) / \sum_{i=1}^N w_i, \quad (2)$$

这里对第 i 个事件进行了快波偏振方向 φ 和延迟时间 δt 的各向异性校正, 其中 $E_{T_i}(\varphi, \delta t)$ 和 $\lambda_{2i}(\varphi, \delta t)$ 分别表示最小切向能量和最小特征值的协方差矩阵. 取权值 w_i 作为两个水平分量的平均信噪比, 计算信噪比时取 SKS 波信号之前与 SKS 波相同时间窗长度的噪声时间窗. 同时, 本文在计算单个 $E_{T_i}(\varphi, \delta t)$ 之前使用两个水平分量上的 SKS 总能量对两个水平分量进行归一化. 在搜索最小值时, 本文分别选择 1° 和 0.05 s 作为 φ 和 δt 的增量. 利用所获得的 ($\varphi, \delta t$) 进一步计算了每个 SKS 信号的偏振方向, 以确保它们与震源-接收器的几何反方位角一致.

在 Jenkins 和 Watts(1968)的研究基础上, Silver 和 Chan(1991)提出使用以下置信区间来估计 ($\varphi, \delta t$) 中的误差:

$$\frac{E_T(\varphi, \delta t)}{E_T^{\min}} \leq 1 + \frac{k}{n-k} f_{k, n-k}(1-\alpha), \quad (3)$$

这里 n 是自由度的个数, $\alpha=0.05$ 为置信水平, $k=2$ 是参数的个数, f 表示 F 分布. 由式 (3) 估计的不确定性不受数据中噪声水平的影响. 但实际情况中有噪声的数据可能显著低于真实水平, 因为任何低于噪声水平得到的 ($\varphi, \delta t$) 和 $E_T(\varphi, \delta t)$ 都应该被考虑

作为分裂参数的可能解. 因此, 本文用 E^{noise} 代替式 (3) 中的 $E_{\text{T}}^{\text{min}}$ 计算 $(\varphi, \delta t)$ 中的误差:

$$\frac{E_{\text{T}}(\varphi, \delta t)}{E^{\text{noise}}} \leq 1 + \frac{k}{n-k} f_{k, n-k} (1 - \alpha), \quad (3')$$

其中 E^{noise} 是两个水平分量上 SKS 波之前的噪声水平的平均值.

1.2 测量数据

本文收集可利用的区域地震台站 41 个, 包括了 GS, SN, SC, HA, HB 五个台站网, 这 41 个台站形成了覆盖范围约为经度 $12^\circ \times$ 纬度 4° 的一个密集二维矩形地震台阵列 (图 2), 沿秦岭造山带南、北缘自西向东横跨整个秦岭造山带及周边地区. 这个二维阵列可以达到研究秦岭造山带与其周边的南、北地块的地震各向异性的横向变化之目的.

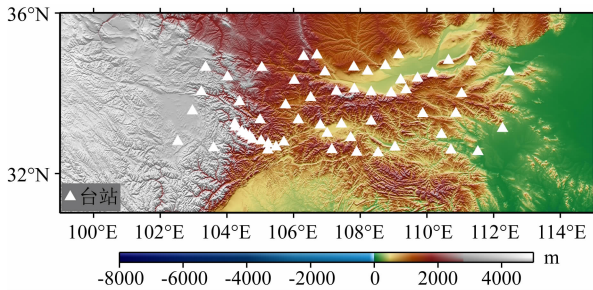


图 2 本研究使用的地震台站分布

白色实心三角形代表观测台站位置; 底图颜色由浅到深海拔位置逐渐降低.

Fig. 2 Simplified map of distributions of the seismic stations
The white triangles point to stations; The background color represents altitude variations.

SKS 远震波形数据是从中国地震局收集的自 2007 年 7 月至 2015 年 12 月的数据, 由于东经 83° 左右震中距的 SKS 波与 S 波震相交替, 不易区分, 而 83° 以后 SKS 波比 S 波超前. 因此选取震中距范围为东经 $85^\circ-135^\circ$ 、震级 $M_s > 5.8$ 、震相清晰的 SKS 波形资料, 保留了具有明显的 SKS 震相的事件. 图 3 表示了台站所在位置和地震事件震中位置, 震中分布范围较广, 主要集中在西太平洋. 原始数据是以每秒 100 或 50 个采样点记录的, 特将原始数据重新采样到每秒 20 个采样点, 并在使用频带宽度为 20 s 到 1 s 的 Butterworth 带通滤波器来消除低频噪声.

1.3 数据处理

为确保测量结果准确, 每次横波分裂测量过程需满足以下检验标准: (1) 横波有明显分裂特征, 即 SKS 波数据在旋转 to 径向和切向坐标轴后, 切向分量明显, 质点运动图为椭圆; (2) 测得的横波分裂参数在进行各向异性校正后, 横波旋转到径向和切向,

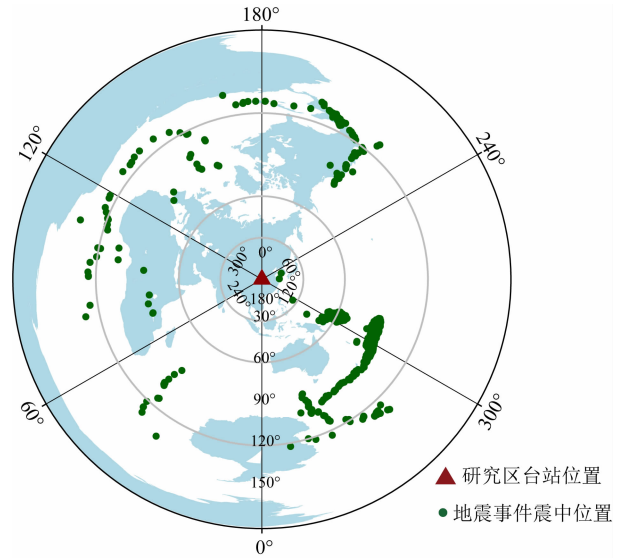


图 3 地震事件位置分布图

绿色实心圆为地震事件震中位置; 红色三角代表秦岭造山带研究区台站的大致位置.

Fig. 3 Distribution of earthquakes in the study region
Green circles point to earthquake events; Red triangle represent the stations location.

切向分量变得很小, 同时质点运动图近直线. (3) 各向异性校正前的快、慢波之间有明显的到时差, 且质点运动图为椭圆; (4) 校正后的快、慢波之间的到时差变得很小, 且质点运动图近似为直线.

图 4 以台站 GS. TSS 记录的一个地震事件为例: 图 4a 左、右两图反映了校正前和校正后的 SKS 波质点运动轨迹, 左图由于有切向能量存在, 质点呈椭圆形运动轨迹, 校正后切向能量消除质点, 右图呈线性运动. 图 4b 举例了单个地震事件的 SKS 信号经过各向异性校正后的径向 (R, 红色) 与横向 (T, 蓝色) 波形的变化, 横向波形 (T, 蓝色) 的振幅在校正后明显减小到了噪声的水平. 图 4c 是各向异性校正前 (上)、校正后 (下) 的快、慢波时间差 (δt) 的变化.

以台站 GS. TSS 为例, 利用 SKS 信号“叠加”方法所得最小特征值和最小切向量绘制加权等值线图 (图 5), 其中白色竖线表示用于测量的入射 SKS 波的后方位角方向.

图 5a 是“叠加”方法计算得到的最小特征值 Λ_2 的加权和, 图 5b 是“叠加”方法计算的的最小切向能量 E_{T} 的加权和. 其中 φ 的加权值为 120° , 呈 NW-SE 向, δt 的加权值为 1.72 s, 远高于平均的 0.8 s, 各向异性十分显著. 图 5a 是最小特征值加权和, 纵轴为 δt 值, 横轴为反方位角大小, 白线表示测量中使用的入射 SKS 波的反方位角方向, 白色十字代表最小值; 图 5b 是最小切向能量加权, 纵轴是 δt 值, 横

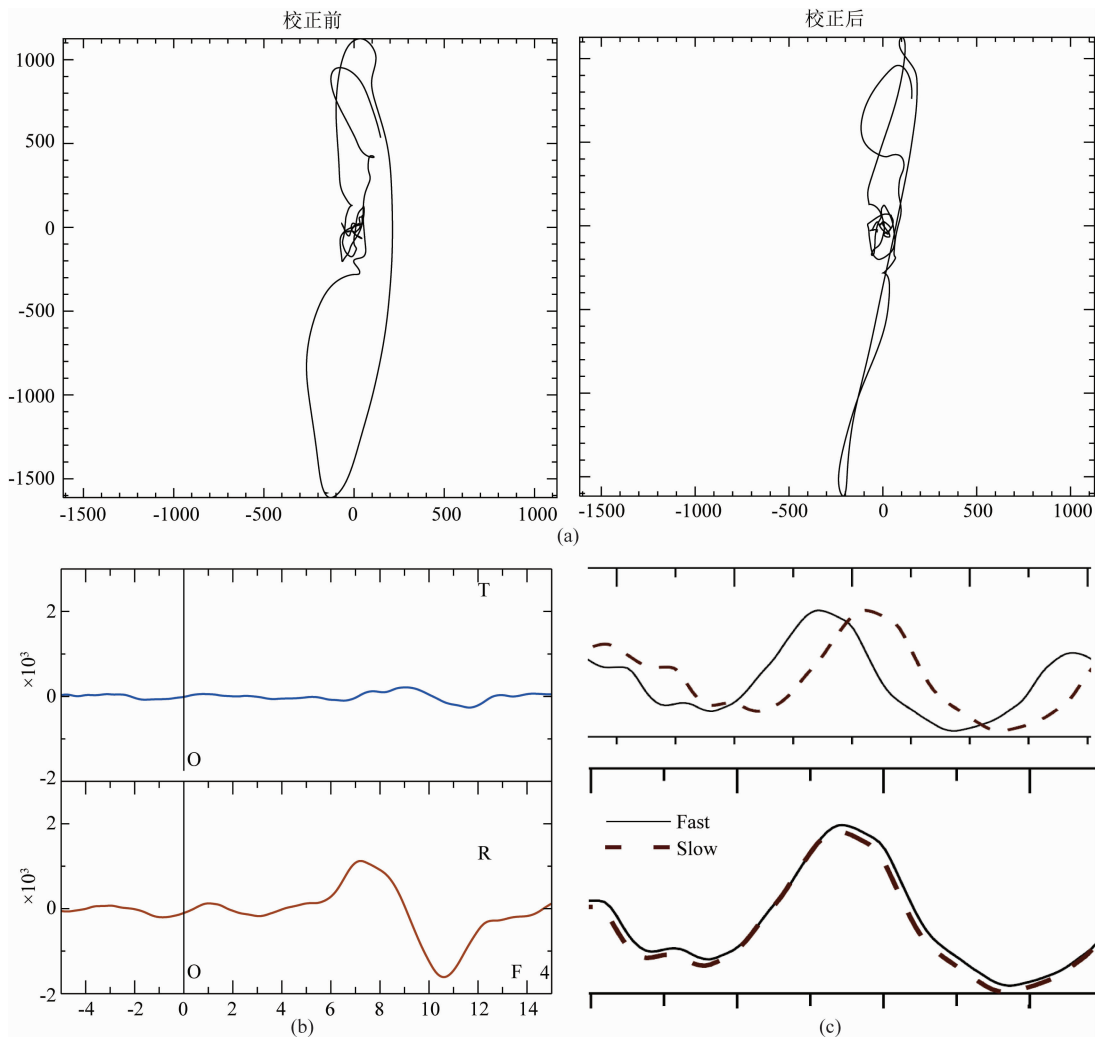


图 4 SKS 分裂的数据分析实例

(a) 质点运动轨迹校正前(图 4a 左)后(图 4a 右)对比图; (b) SKS 波校正后径向(R, 红色)与横向(T, 蓝色)波形的变化; 图 4c 上为快、慢波时间差校正前, 图 4c 下为快、慢波时间差校正后.

Fig. 4 SKS wave splitting result of an event

(a) shows a particle trajectory before (left) and after (right) correction; (b) The change of the radial (R, red) and the transverse (T, blue) waveform of an SKS wave after correction; (c) The upper one shows δt before correction and the lower inset shows the δt after correction.

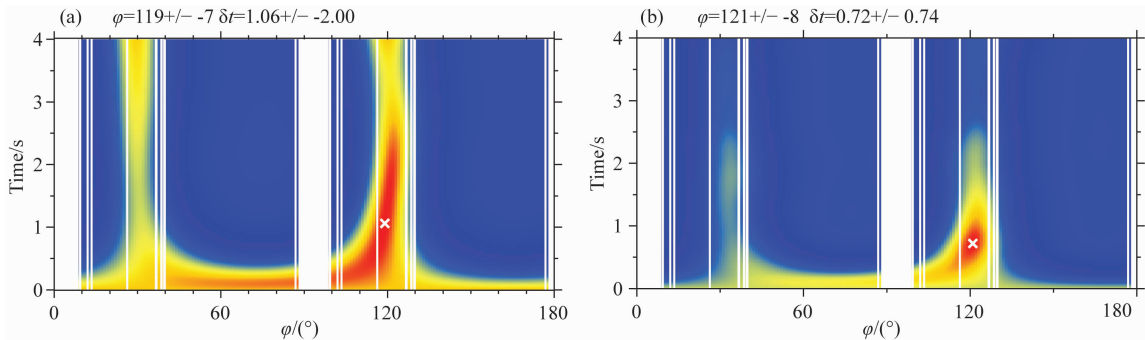


图 5 台站 GS. TSS (a) 最小切向量和 (b) 最小特征值加权等值线图

φ 是快波偏振方向; $\Delta\varphi$ 是快波偏振方向的误差; δt 是快慢波的时间延迟; $\Delta\delta t$ 是时间延迟的误差.

Fig. 5 Weighted summation of the transverse energy E_T and the smaller eigenvalue Δ_2

φ is fast wave polarization direction; $\Delta\varphi$ is the error of φ ; δt is the delay time between fast and slow wave; $\Delta\delta t$ is the error of δt .

轴为反方位角. 从 GS. TSS 台站的两种加权图(图 5a、b)结果对比可知,两种方法计算出的快波偏振方向结果相近,且各向异性强度均在较高各向异性强度范围内,说明两种方法对该台站数据的计算结果可信.

2 横波分裂测量结果

以上节所述的两种方法((1)切向能量最小法;(2)最小特征值法)测量了分布在整个秦岭造山带共 41 个台站 SKS 波分裂参数($\varphi, \delta t$),其中 32 个台站数据质量良好(表 1),两种不同测量方法得出的结果相近,测量结果可信. 由于 SKS 波能量在切向分量上的投影会受到仪器定位错误或倾斜结构引起的偏离一维射线路径的影响,切向能量最小法的结果可能产生偏差,因而我们选择最小特征值方法的测量值作为最终结果. 在此基础上进行“叠加”分析,得到大多数台站 SKS 分裂测量的快波偏振方向(φ)的误差小于 15° ,快、慢波的时间延迟(δt)差的误差小于 0.3 s . 经过叠加之后最终分裂参数的误差明显减小. Hess(1964)提出,地壳的各向异性产生的 SKS 波分裂的延迟时间为 $0.1\sim 0.3\text{ s}$,而上地幔各向异性产生的延迟时间为 $1.0\sim 2.0\text{ s}$,秦岭造山带观测到 SKS 波时间延迟平均约 1.2 s ,减去因地壳各向异性产生的 0.2 s (平均),还有 1 s 对应于地幔各向异性. 王琼等(2016)利用远震接收函数研究青藏高原东北缘地壳各向异性时发现绝大部分秦岭造山带附近台站观测到的地壳各向异性平均小于 0.4 s . 因此本研究中利用 SKS 分裂测量的各向异性的结果可以认为主要由上地幔各向异性引起.

将秦岭造山带上地幔各向异性参数($\varphi, \delta t$)数据质量良好的 32 个台站的分裂结果分为南、北两个亚区(表 1),并绘制成秦岭造山带上地幔各向异性特征图(图 6a). 在方位角覆盖良好的情况下,将分裂时间 δt 大于 0.8 s 的结果划归为地震各向异性较强, δt 小于 0.4 s 时则认为地震各向异性较弱(Li et al., 2011).

2.1 北秦岭横波分裂结果

均匀分布在秦岭造山带北缘的 25 个台站都有良好的 SKS 横波分裂结果,其中 SN. LOXT, SN. SHWA, SN. TABT 三个台站的分裂时间小于 0.4 s (红色线段标记),视为各向异性较弱(图 6a). 将北秦岭自西($102^\circ\text{E}\text{—}106^\circ\text{E}$)—中($106^\circ\text{E}\text{—}111^\circ\text{E}$)—东($111^\circ\text{E}\text{—}114^\circ\text{E}$)划分为三个部分,以对比秦岭北缘 SKS 快波偏振方向变化,其平均快波偏振方向和分

裂时间分别为 110.75° 和 1.01 s (西), 92° 和 0.88 s (中), 83.6° 和 0.83 s (东),自西向东快波偏振方向角度变化明显.

2.2 南秦岭横波分裂结果

南秦岭共 13 个台站,集中分布于造山带西部与东部,中部分布的有效台站较少. 西部平均快波偏振方向和分裂时间为 79.3° 和 1.15 s ,东部的平均快波偏振方向和分裂时间为 92° 和 0.79 s ,快波方向变化明显.

图 6a 中蓝色箭头指示了南秦岭 SKS 波快波偏振方向自西向东沿秦岭造山带走向弧形旋转. 台站 GS. WDT, SN. HZHG, SN. ANKG 的 $\delta t < 0.4\text{ s}$ (红色线段)视为各向异性已经较弱或没有各向异性. 李娟(2011)的结果中 GS. CXT 台站的 $\delta t = 1.9\text{ s}$,大于我们的观测结果: $\delta t = 1\text{ s}$,这种差异可能是由于选取事件数量的不同导致的. 图 6a 所绘红色箭头指示秦岭北缘 SKS 波快波偏振方向 φ 自西向东的弧形变化,图例中 δt 的大小代表各向异性强度,且不随经纬度变化而改变.

3 讨论与结论

岩石圈垂直连贯变形指地幔变形场和地表的变形场相同,预示板块强烈地耦合于地幔(Chang et al., 2017). 据此,本文利用 SKS 横波分裂法研究整个秦岭造山带的上地幔各向异性,并将研究结果与前人在秦岭不同区域和邻域地表变形(GPS)的研究(e. g. Zhang et al., 1996; 王勇等, 2003; Zhang et al., 2004; 嵇少丞等, 2008; 刘庚, 2017)进行比对,分析秦岭造山带不同区域壳幔变形特征与主控因素. 本研究观测到的秦岭造山带西-中部的快波偏振方向沿造山带走势为:西部近 NW-SE、中部近 E-W(图 6a),与常利军等(2016)在秦岭造山带西、中部($102^\circ\text{—}110^\circ\text{N}$)部分台站观测到上地幔快波偏振方向结果相近,揭示青藏高原软流圈物质从鄂尔多斯块体和四川盆地两个古老坚硬块体中间流动挤出的形态,同时快慢波的走时差得到的各向异性大小存在中间大、南北两侧小的特征,也符合青藏高原物质沿秦岭下方的通道向东流动造成中间流速快,两侧流速慢的物理规律.

Shi 等(2020)研究发现秦岭西侧海原断裂两侧上地壳各向异性特征差异很大,推断该地区地壳存在双层各向异性,上地壳各向异性主要受海原断裂影响,秦岭西侧上地幔快波偏振方向的观测结果(φ)

表 1 秦岭造山带 SKS 分裂参数
Table 1 SKS splitting parameters for stations beneath Qinling orogenic belt

台站名	最小切向能量				最小特征值			
	φ	$\Delta\varphi$	δt	$\Delta\delta t$	φ	$\Delta\varphi$	δt	$\Delta\delta t$
GS. CXT	121	6	1	1.02	125	7	0.7	0.42
GS. DBT	99	8	0.9	0.32	112	6	1.2	0.24
GS. LTT	86	22	0.7	0.34	75	22	0.62	0.24
GS. MXT	121	5	1.88	0.72	120	6	1.72	0.34
GS. SFT	49	22	0.84	0.74	147	22	0.16	0.32
GS. WDT	62	22	0.44	0.26	85	22	0.4	0.18
GS. WSH	125	5	1.18	0.44	128	6	1.1	0.46
GS. WXT	113	8	2.22	1.6	109	9	1.9	0.6
GS. ZHC	125	6	1.18	0.62	129	10	0.58	0.6
GS. ZHQ	108	7	2.42	1.12	116	22	0.36	0.4
HA. DA	64	16	1.44	0.72	112	22	0.92	0.3
HA. LS	96	21	0.6	0.3	92	22	0.58	0.24
HA. LYN	84	22	0.44	0.18	86	22	0.44	0.16
HA. NY	146	12	2	2	159	22	0.16	0.28
HB. DJI	95	11	1.16	0.32	84	14	0.96	0.36
HB. YXI	93	22	0.38	0.28	79	22	0.3	0.24
SC. REG	122	5	1.62	0.48	124	6	0.74	0.18
SC. SPA	51	12	1.3	0.52	59	12	1.22	0.44
SN. ANKG	86	22	0.28	0.18	95	22	0.34	0.18
SN. FUPI	163	22	0.14	0.16	136	19	0.3	0.24
SN. HUAX	86	17	0.66	0.2	96	12	0.74	0.18
SN. HUYT	98	12	1.2	0.6	48	14	0.76	0.36
SN. HZHG	98	19	0.42	0.24	101	13	0.46	0.22
SN. JYAT	48	22	0.28	0.48	66	22	0.16	0.28
SN. LANT	78	13	0.84	0.26	82	7	0.9	0.16
SN. LINT	94	12	1.14	0.32	104	14	1.2	0.24
SN. LIYO	91	8	0.76	0.16	99	9	0.86	0.16
SN. LOXT	120	12	0.76	1.32	121	9	1.12	0.92
SN. LUYA	121	6	1.36	0.8	120	10	0.46	0.54
SN. MEIX	98	5	1	0.18	104	5	1.1	0.14
SN. MIAX	63	22	0.38	0.22	69	22	0.36	0.2
SN. NSHT	59	17	1.16	0.72	88	16	0.64	0.28
SN. QLIT	81	9	1.04	0.24	91	14	1.08	0.24
SN. SHAZ	97	22	0.24	0.2	79	22	0.16	0.14
SN. SHNA	96	10	1.04	0.3	97	12	1.06	0.24
SN. XAN	87	8	1.18	0.24	94	11	1.24	0.22
SN. XANT	93	11	1.28	0.48	87	22	1.28	0.52
SN. XIXI	55	7	0.74	0.16	64	11	0.64	0.14
SN. ZOZI	85	22	0.88	0.88	91	14	1.08	0.36
SN. ZOZT	96	8	1.08	0.24	108	7	1.34	0.22
SX. YJI	85	22	1.1	0.7	35	11	0.76	0.24

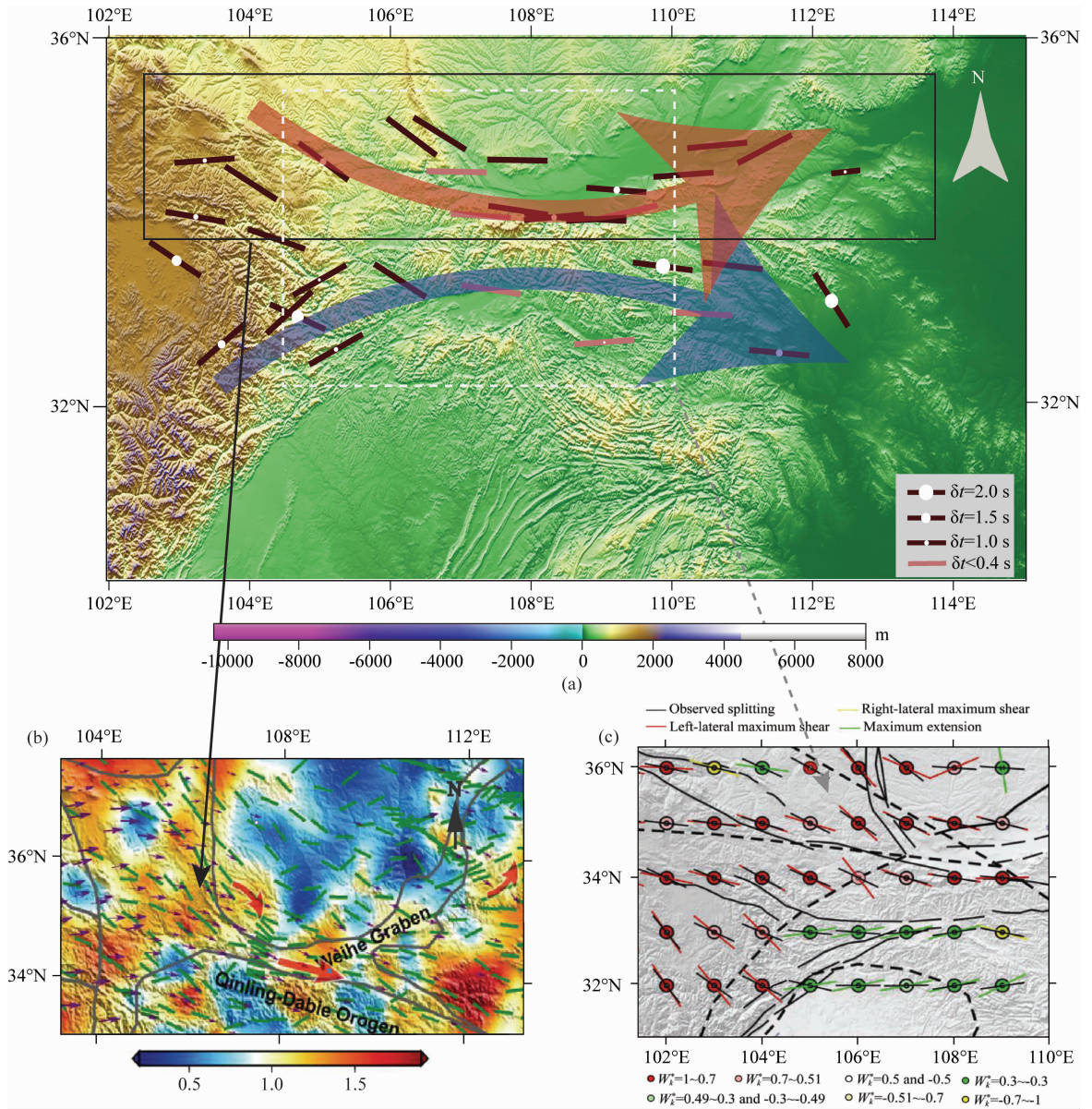


图 6 SKS 横波分裂结果对比图

(a) 秦岭及周边的 32 个台站的 SKS 横波分裂结果, 红色箭头与蓝色箭头分别指示秦岭北、南缘自西向东上地幔快波偏振方向变化趋势; 线段方向指示快波偏振方向, 黑色线段为有效观测结果, 红色线段为无效观测结果; 白色圆形指示 δt 大小. (b) 鄂尔多斯地块 SKS 快波偏振方向 (绿色线段) 示意图 (修改自于勇等, 2016). (c) 横波分裂测量的 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格平均快波方向 φ 与地表变形场预测的快波方向 φ_c 比较 (修改自常利军等, 2016).

Fig. 6 The measured fast directions and splitting times at the 32 stations compared with the measurements estimated by Yu et al. (2016) and Chang (2016)

(a) The red arrow and the blue arrow indicate the upper mantle azimuth anisotropy variation tendency from west to east beneath the northern and southern Qinling; line directions point to fast wave polarization direction, the black lines for effective observation, the red lines as invalid observations; the white circles indicate the δt size, the bigger the circle area the bigger the δt . (b) SKS fast wave polarization direction (green lines) at Ordos block (modified from Yu et al., 2016). (c) Comparison between $1^\circ \times 1^\circ$ grid average fast-wave direction from splitting observations and predicted fast axis orientation φ_c calculated from the surface deformation field (modified from Chang et al., 2016).

与板块运动方向 (嵇少丞等, 2008) 一致, 快波偏振方向与造山带走向一致可作为板块运动导致地幔流动的 证据, 结合本研究 SKS 横波分裂结果, 推断秦岭

西侧上地壳受海原断裂影响, 上地幔与中下地壳垂直 连贯变形, 属壳幔耦合型. 秦岭造山带中部上地幔 快波偏振方向 φ 与地表变形场预测的快波方向 φ_c

比,相差较小(图 6c),推测秦岭西-中部主要受到壳幔垂直连贯变形作用影响,属壳幔强耦合型.高原等(2018)几个台站的结果显示,发现秦岭及南侧与龙门山断裂北端交汇区的上地壳各向异性变化很大,上地壳各向异性受到龙门山断裂的影响较大,而其快波偏振方向与我们 SKS 的快波方向一致,可见秦岭及南侧与龙门山断裂北端交汇区的地壳可能也存在双层各向异性,其中下地壳与上地幔各向异性主要受控于壳幔垂直连贯变形,属壳幔耦合.

利用更多台站的数据进一步观测了秦岭东缘 SKS 分裂结果(图 6a),虽然趋势和于勇等(2016)利用 SKS 分裂观测到鄂尔多斯盆地东南缘的快波偏振方向一致(图 6b):北秦岭造山带东部观测快波偏振方向(φ)沿秦岭造山带东部北缘有弧形旋转,但由于这部分台站观测到的快波偏振方向和秦岭造山带走势角度相差较大,且快波偏振方向(φ)与该研究区相邻鄂尔多斯地块旋转方向一致,反映了软流圈被相邻岩石圈板块拖拽产生了旋转(图 6a,红色箭头),主控因素是板块运动.同理,秦岭造山带南缘东部观测到的弧形转动(图 6a,蓝色箭头)受到扬子地块转动(朱日祥等,1998;范俊喜等,2003)对秦岭南缘上地幔软流圈的拖拽作用.秦岭造山带东部上地幔快波偏振方向 φ 与造山带走向一致性弱,可以作为壳幔耦合不强的证据,推测秦岭造山带东部上地幔各向异性的主控因素为地幔流动.

通过 SKS 横波分裂结果建立秦岭造山带上地幔变形的模型(图 7),如图 7 所示分裂参数在秦岭南北两侧 E-W 向的变化(红、蓝箭头)对应了地下壳幔耦合型的转变,推断秦岭造山带上地幔变形及与下地壳的耦合型式沿造山带走向存在自西向东的区域性变化:秦岭西-中部上地幔与下地壳保持较好

的耦合状态,逐渐过渡到秦岭东部时,其上地幔与下地壳解耦,显示出与秦岭西-中部明显不同的变形特征.将模型(图 7)与讨论相结合,推断秦岭造山带上地幔存在两种变形模式:壳幔连贯变形与地幔流动.经分析造山带不同区域的上地幔变形主控因素不同:西-中部上地幔变形主要受控于岩石圈连贯变形,属壳幔强耦合;秦岭造山带东部上地幔变形主要受控于地幔流动,鄂尔多斯地块与扬子地块的转动对地幔流的拖拽影响该区域上地幔变形.秦岭造山带是否存在壳、幔解耦的原因和精确位置有待进一步研究.

致谢 衷心感谢中国地震局提供的地震波形数据,感谢朱日祥院士的全力帮助.感谢两位匿名评审专家,给本文提供了有益帮助和提出的宝贵意见,在此一并致谢.

References

- Chang L J, Ding Z F, Wang C Y, et al. 2016. Upper mantle anisotropy beneath the northern segment of the north-south tectonic belt in China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(11): 4035-4047.
- Chang L J, Ding Z F, Wang C Y, et al. 2017. Vertical coherence of deformation in lithosphere in the NE margin of the Tibetan plateau using GPS and shear-wave splitting data. *Tectonophysics*, 699: 93-101, doi: 10.1016/j.tecto.2017.01.025.
- Chen H, Hu J M, Qu H J, et al. 2011. Early Mesozoic structural deformation in the Chuandian N-S Tectonic Belt, China. *Science China Earth Sciences*, 54(11): 1651-1664.
- Chen J H, Liu Q Y, Li S C, et al. 2005. Crust and upper mantle S-wave velocity structure across Northeastern Tibetan Plateau and Ordos block. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 48(2): 333-342.
- Ding W X, Fu Y Y, Gao Y, et al. 2017. Phase velocity tomography of Rayleigh in Qinling-Dabie and its adjacent areas using ambient seismic noise. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(8): 2959-2968, doi: 10.6038/cjg20170805.
- Ding Z F, Zeng R S. 1996. Observation and study of shear wave anisotropy in Tibetan Plateau. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 39(2): 211-220.
- Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. 2011. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 213-237.
- Dong Y P, Safonova I, Wang T. 2016. Tectonic evolution of the Qinling orogen and adjacent orogenic belts. *Gondwana Research*, 30: 1-5.
- Fan J X, Ma J, Gan W J. 2003. Movement of Ordos block and alternation of activity along its boundaries. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(2): 168-180.

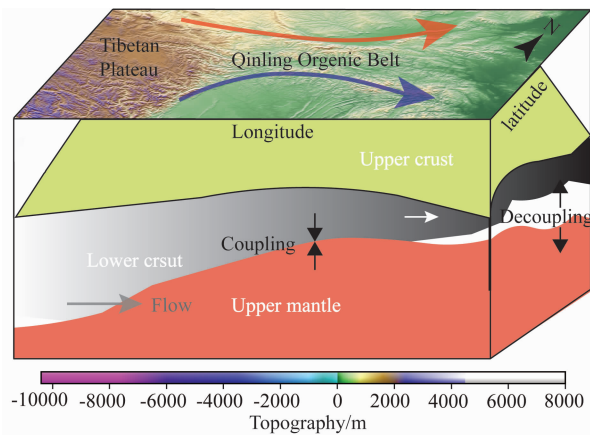


图 7 秦岭造山带上地幔变形示意图

Fig. 7 Simple model of Upper mantle deformation in QOB

- Forsyth D, Uyedaf S. 1975. On the relative importance of the driving forces of plate motion. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 43(1): 163-200.
- Gao Y, Teng J W. 2005. Studies on seismic anisotropy in the crust and mantle on Chinese mainland. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 20(1): 180-185.
- Gao Y, Shi Y T, Chen A G. 2018. Crustal seismic anisotropy and compressive stress in the eastern margin of the Tibetan Plateau and the influence of the $M_{S8.0}$ Wenchuan earthquake. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 63(19): 1934-1948.
- He W G, Chen Y S, Ye Q D, et al. 2015. Ambient noise Love-wave tomography in Qinling orogeny and surrounding area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 30(1): 47-56, doi: 10.6038/pg20150108.
- Hess H H. 1964. Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans. *Nature*, 203: 629-631.
- Hu Y X, Cui D X, Ji L Y, et al. 2011. Seismic anisotropy of upper mantle in Ordos block and adjacent regions. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(6): 1549-1558, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.014.
- Huang W, Wu Z W. 1992. evolution of the qinling orogenic belt. *Tectonics*, 11(2): 371-380.
- Huang Y, Li Q H, Zhang Y S, et al. 2011. Crustal velocity structure beneath the Shandong-Jiangsu-Anhui segment of the Tancheng-Lujiang Fault Zone and adjacent areas. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(10): 2549-2559, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.10.012.
- Huang Z X. 2011. Velocity anisotropy in the crust and upper mantle of North China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(3): 681-691, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.007.
- Jenkins G M, Watts D G. 1968. *Spectral Analysis and Its Applications*. San Francisco: Holden-Day, 136-139.
- Ji S C, Wang Q, Sun S S, et al. 2008. Continental extrusion and seismicity in China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 82(12): 1644-1667.
- Kosarev G L, Makeyeva L I, Vinnik L P. 1984. Anisotropy of the mantle inferred from observations of P to S converted waves. *76(1): 209-220*.
- Li J et al. 2011. Seismic anisotropy and implications for mantle deformation beneath the NE margin of the Tibet plateau and Ordos plateau. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 189, 157-170.
- Li S, Feng M, An J M, et al. 2014. Azimuthal anisotropy of Rayleigh wave in Qinling and its adjacent areas. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 36(4): 531-545.
- Li T, Ni S B. 1997. Element abundances of the continental lithosphere in China. *Geology and Prospecting* (in Chinese), 33(1): 31-37.
- Li Y H, Wu Q J, An Z H, et al. 2006. The Poisson ratio and crustal structure across the NE Tibetan Plateau determined from receiver functions. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 49(5): 1359-1368.
- Li Y K, Gao R, Gao J W, et al. 2015. Characteristics of crustal velocity structure along Qingling orogenic belt. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 30(3): 1056-1069, doi: 10.6038/pg20150309.
- Liu G, Gao Y, Shi Y T. 2017. Shear-wave splitting in Qinling Orogen and its both sides. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(6): 2326-2337, doi: 10.6038/cjg20170624.
- Liu J H, Liu F T, Sun Y M, et al. 1995. Seismic tomography beneath the qinlingdabie orogenic belts and both the northern and southern fringes. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 38(1): 46-54.
- Liu M J, Fan J C, Han Y J, et al. 2011. Relationship between the movements of Ordos and Tarim blocks and strong earthquakes in China continent. *Earthquake* (in Chinese), 31(1): 127-134.
- Liu Y Y, Yang W R, Sen Y S N, et al. 1993. Some paleomagnetic results on North China, Qinling and Yangtze blocks. *Earth Science Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 18: 635-641, +672.
- Luo Y, Huang Z X, Peng Y J, et al. 2004. A study on sks wave splitting beneath the China mainland and adjacent regions. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 47(5): 812-821.
- Meng Q R. 2017. Origin of the Qinling mountains. *Scientia Sinica Terrae* (in Chinese), 47(4): 412-420.
- Montagner J P, Tanimoto T. 1990. Global anisotropy in the upper mantle inferred from the regionalization of phase velocities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B4): 4797-4819.
- Morris G B, Raitt R W, Shor G G Jr. 1969. Velocity anisotropy and delay-time maps of the mantle near Hawaii. *Journal of Geophysical Research*, 74(17): 4300-4316.
- Nicolas A, Christensen N I, Nicolas A, et al. 1987. Formation of anisotropy in upper mantle peridotites—a review. // Fuchs K, Froidevaux C eds. *Composition, Structure and Dynamics of the Lithosphere-Asthenosphere System*. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 111-123.
- Ren J, Peng J B, Wang F Y, et al. 2012. The research of deep structural features of Weihe basin and adjacent areas. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(9): 2939-2949.
- Savage M K. 1999. Seismic anisotropy and mantle deformation; what have we learned from shear wave splitting. *Reviews of Geophysics*, 37(1): 65-106, doi: 10.1029/98RG02075.
- Shao H C, Su G. 1999. Analysis on the seismicity trend around the ordos block. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 21(4): 395-398.
- Shearer P M, Orcutt J A. 1986. Compressional and shear wave anisotropy in the oceanic lithosphere—the Ngendei seismic refraction experiment. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 87(3): 967-1003.
- Shi Y T, Gao Y, Shen X Z, et al. 2020. Multiscale spatial distribution of crustal seismic anisotropy beneath the northeastern margin of the Tibetan plateau and tectonic implications of the Haiyuan fault. *Tectonophysics*, 774: 228274.
- Silver P G, Chan W W. 1991. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B10): 16429-16454.
- Silver P G, Martha K. Savage. 1994. The interpretation of shear-wave splitting parameters in the presence of two anisotropic layers. *Geophysical Journal International*, 119(3): 949-963,

- https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb04027.x.
- Silver P G. 1996. Seismic anisotropy beneath the continents: Probing the depths of geology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24: 385-432.
- Savage, J. C. 1990. Equivalent strike-slip earthquake cycles in half-space and lithosphere-asthenosphere earth models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B4):4873.
- Sun L S, Huang B C. 2009. New paleomagnetic result for Ordovician rocks from the Tarim Block, Northwest China and its tectonic implications. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(7): 168-180, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.018.
- Tang W, Chen Z L, Liu Y P, et al. 2005. Present-day tectonics activity in the intersection area of the Xianshuihe fault and Longmenshan fault on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 24(12): 1169-1172.
- Tanimoto T, Anderson D L. 1985. Lateral heterogeneity and azimuthal anisotropy of the upper mantle-Love and Rayleigh waves 100~250 s. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B2): 1842-1858.
- Teng J W, Xiong S B, Zhang Z J. 1997. Review and prospects for geophysical study of the deep lithosphere structure and tectonics in Qinghai-Xizang (Tibet). *Plateau Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 40(S1): 121-139.
- Teng J W, Ruan X M, Zhang Y Q, et al. 2012. The stratifical velocity structure of crust and covering strata of upper mantle and the orbit of deep interaquer substance locus of movement for Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 28(12): 4077-4100.
- Teng J W, Li S L, Zhang Y Q, et al. 2014a. Fine velocity structures and deep processes in crust and mantle of the Qinling orogenic belt and the adjacent North China craton and Yangtze craton. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(10): 3154-3175, doi: 10.6038/cjg20141006.
- Teng J W, Li S L, Zhang Y Q, et al. 2014b. Seismic wave fields and dynamical response for Qinling orogen and sedimentary basins and crystalline basement. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(3): 770-788, doi: 10.6038/cjg20140308.
- Vinnik L P, Farra V, Romanowicz B. 1989. Azimuthal anisotropy in the earth from observations of SKS at GEOSCOPE and NARS broadband stations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79(5): 1542-1558.
- Vinnik L P, Makeyeva L I, Milev A, et al. 1992. Global patterns of azimuthal anisotropy and deformations in the continental mantle. *Blackwell Publishing Ltd*, 111(3):433-447.
- Wang C Y, Ding Z F, Song J L, et al. 1997. Shear wave velocity structure in Dabieshan orogenic belt. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 40(3): 337-346.
- Wang C Y, et al. 2007. Seismic anisotropy of upper mantle in eastern Tibetan Plateau and related crust-mantle coupling pattern. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(8): 1150-1160.
- Wang C Y, Chang L J, Ding Z F, et al. 2014. Upper mantle anisotropy and crust-mantle deformation pattern beneath the Chinese mainland. *Science China Earth Sciences*, 57(1): 132-143.
- Wang Q, Gao Y, Shi Y T, et al. 2013. Seismic anisotropy in the uppermost mantle beneath the northeastern margin of Qinghai-Tibet plateau: evidence from shear wave splitting of SKS, PKS and SKKS. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(3): 892-905, doi: 10.6038/cjg20130318.
- Wang Q S, Teng J W, Zhang Y Q, et al. 2013. Discussion on the special gravity field across the north part of Middle Qinling Mt. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(3):792-798, doi: 10.6038/cjg20130308.
- Wang Y, Xu H Z. 2003. A study on convergence rate of the India plate to Eurasia subduction beneath Qinghai-Xizang plateau-inversion results from GPS observational data. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 46(2): 185-190.
- Yu Y, Chen Y S, Jian H C, et al. 2016. SKS wave splitting study of the transition zone at the central portion of the North China Craton. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(1): 141-151, doi: 10.6038/cjg20160111.
- Yuan X C, Xu M C, Tang W B, et al. 1994. Eastern qinling seismic reflection profiling. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 37(6): 749-758.
- Yuan X C. 1997. The crustal structure of the qinling orogen and wedging mountain building. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 71(3): 227-235.
- Yuan X C, Li S F, Hua J R. 2008. Lithospheric structure of the Qinling intracontinental orogen. *Geology in China* (in Chinese), 35(1): 1-17.
- Zeng R S, Ding Z F, Wu Q J. 1998. The crustal structures from himalaya to qilian and its implications for continent continent collision process. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 40(1): 49-60.
- Zhang G W. 1991. A discussion on basic features of tectonic development of lithosphere of the Qinling Belt. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)* (in Chinese), 21(2): 77-87.
- Zhang G W, Guo A L, Liu F T, et al. 1996. Three-dimensional architecture and dynamic analysis of the Qinling orogenic belt. *Science in China (Series D)*, 39(S1): 1-9.
- Zhang H S, Teng J W, Tian X B, et al. 2013. Lithospheric thickness and upper mantle anisotropy beneath the northeastern Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(2): 459-471, doi: 10.6038/cjg20130210.
- Zhang J H, Li Y X, Guo L Q, et al. 2004. Study on present-day deformation and strain field in north china by use of gps data. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 24(3): 40-46.
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 32(9): 809-812.
- Zhang S Q, Karato S I. 1995. Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear. *Nature*, 375(6534): 774-777.
- Zheng C, Ding Z F, Song X D. 2016. Joint inversion of surface wave dispersion and receiver functions for crustal and uppermost mantle structure in Southeast Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(9): 3223-3236, doi: 10.6038/

cjg20160908.

Zhang G W, Zhang B R, Yuan X C, et al. 2001. Qinling Orogenic belt and continental dynamics. Beijing: Science Press (in Chinese).

Zhu R X, Yang Z Y, Ma X H et al. 1998. Paleomagnetic constraints on the tectonic history of the major blocks of China during the Phanerozoic. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 41 (2): 1-19.

附中文参考文献

常利军, 丁志峰, 王椿镛. 2016. 南北构造带北段上地幔各向异性特征. *地球物理学报*, 59(11): 4035-4035.

丁文秀, 付媛媛, 高原等. 2017. 秦岭一大别及邻区背景噪声的瑞利波层析成像. *地球物理学报*, 60(8): 2959-2968, doi: 10. 6038/cjg20170805.

丁志峰, 曾融生. 1996. 青藏高原横波分裂的观测研究. *地球物理学报*, 39(2): 211-220.

范俊喜, 马瑾, 甘卫军. 2003. 鄂尔多斯地块运动的整体性与不同方向边界活动的交替性. *中国科学 (D辑)*, 33(S1): 119-128.

高原, 滕吉文. 2005. 中国大陆地壳与上地幔地震各向异性研究. *地球物理学进展*, 20(1): 180-185.

高原, 石玉涛, 陈安国. 2018. 青藏高原东缘地震各向异性、应力及汶川地震影响. *科学通报*, 63(19): 1934-1948.

贺伟光, 陈永顺, 叶庆东等. 2015. 秦岭及周边地区背景噪声 love 波层析成像. *地球物理学进展*, 30(1): 47-56, doi: 10. 6038/pg20150108.

黄耘, 李清河, 张元生等. 2011. 郯庐断裂带鲁苏皖段及邻区地壳速度结构. *地球物理学报*, 54(10): 2549-2559, doi: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 10. 012.

黄忠贤. 2011. 华北地区地壳上地幔速度各向异性研究. *地球物理学报*, 54(3): 681-691, doi: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 03. 007.

嵇少丞, 王茜, 孙圣思等. 2008. 亚洲大陆逃逸构造与现今中国地震活动. *地质学报*, 82(12): 1644-1667.

李爽, 冯梅, 安美建等. 2014. 秦岭及周边地区瑞雷波方位各向异性. *地震学报*, 36(4): 531-545.

黎彤, 倪守斌. 1997. 中国大陆岩石圈的化学元素丰度. *地质与勘探*, 33(1): 31-37.

李永华, 吴庆举, 安张辉等. 2006. 青藏高原东北缘地壳 S 波速度结构与泊松比及其意义. *地球物理学报*, 49(5): 1359-1368.

李英康, 高锐, 高建伟等. 2015. 秦岭造山带的东西向地壳速度结构特征. *地球物理学进展*, 30(3): 1056-1069, doi: 10. 6038/pg20150309.

刘庚, 高原, 石玉涛. 2017. 秦岭造山带及其两侧区域地壳剪切波分裂. *地球物理学报*, 60(6): 2326-2337, doi: 10. 6038/cjg20170624.

刘建华, 刘福田, 孙若昧等. 1995. 秦岭一大别造山带及其南北缘地震层析成像. *地球物理学报*, 38(1): 46-54.

罗艳, 黄忠贤, 彭艳菊等. 2004. 中国大陆及邻区 SKS 波分裂研究.

地球物理学报, 47(5): 812-821.

孟庆任. 2017. 秦岭的由来. *中国科学: 地球科学*, 47(4): 412-420. 任隽, 彭建兵, 王夫运等. 渭河盆地及邻区地壳深部结构特征研究. *地球物理学报*, 2012, 55(9): 2939-2947.

滕吉文, 李松岭, 张永谦等. 2014a. 秦岭造山带与邻域华北克拉通和扬子克拉通的壳、幔精细速度结构与深层过程. *地球物理学报*, 57(10): 3154-3175, doi: 10. 6038/cjg20141006.

滕吉文, 李松岭, 张永谦等. 2014b. 秦岭造山带与沉积盆地和结晶基底地震波场及动力学响应. *地球物理学报*, 57(3): 770-788, doi: 10. 6038/cjg20140308.

王椿镛, 丁志峰, 宋建立等. 1997. 大别造山带地壳 S 波速度结构. *地球物理学报*, 40(3): 337-346.

王椿镛, 常利军, 吕智勇, 等. 2007. 青藏高原东部上地幔各向异性及相关的壳幔耦合型式. *中国科学: 地球科学*, 37(4): 495-503.

王椿镛, 常利军, 丁志峰, 等. 2014. 中国大陆上地幔各向异性及壳幔变形模式. *中国科学: 地球科学*, 44(1): 98-110.

王琼, 高原, 石玉涛等. 2013. 青藏高原东北缘上地幔地震各向异性: 来自 SKS、PKS 和 SKKS 震相分裂的证据. *地球物理学报*, 56(3): 892-905, doi: 10. 6038/cjg20130318.

王琼, 高原, 钮凤林等. 2016. 利用接收函数计算地壳各向异性的可靠性分析及倾斜界面的影响. *地震*, 36(2): 14-25.

王谦身, 滕吉文, 张永谦等. 2013. 中秦岭北侧特异重力场及其探榷. *地球物理学报*, 56(3): 792-798, doi: 10. 6038/cjg20130308.

王勇, 许厚泽. 2003. 青藏高原印度板块向欧亚大陆俯冲速率的研究-GPS 观测资料的反演结果. *地球物理学报*, 46(2): 185-190.

于勇, 陈永顺, 菅汉超等. 2016. 华北克拉通中部过渡带 SKS 波分裂研究: 鄂尔多斯东南角的局部软流圈绕流. *地球物理学报*, 59(1): 141-151, doi: 10. 6038/cjg20160111.

袁学诚, 徐明才, 唐文榜等. 1994. 东秦岭陆壳反射地震剖面. *地球物理学报*, 37(6): 749-758.

袁学诚. 1997. 秦岭造山带地壳构造与楔入成山. *地质学报*, 71(3): 227-235.

袁学诚, 李善芳, 华九如. 2008. 秦岭陆内造山带岩石圈结构. *中国地质*, 35(1): 1-17.

曾融生, 丁志峰, 吴庆举. 1998. 喜马拉雅——祁连山地壳构造与大陆—大陆碰撞过程. *地球物理学报*, 40(1): 49-60.

张国伟, 张本仁, 袁学诚等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社.

张洪双, 滕吉文, 田小波等. 2013. 青藏高原东北缘岩石圈厚度与上地幔各向异性. *地球物理学报*, 56(2): 459-471, doi: 10. 6038/cjg20130210.

张静华, 李延兴, 郭良迁等. 2004. 用 GPS 测量结果研究华北现今构造形变场. *大地测量与地球动力学*, 24(3): 40-46.

郑晨, 丁志峰, 宋晓东. 2016. 利用面波频散与接收函数联合反演青藏高原东南缘地壳上地幔速度结构. *地球物理学报*, 59(9): 3223-3236, doi: 10. 6038/cjg20160908.

朱日祥, 杨振宇, 马醒华等. 1998. 中国主要地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动. *中国科学(D辑)*, 28(S1): 1-16.

(本文编辑 胡素芳)