科学通报 2010 年 第 55 卷 第 29 期：2837 ~ 2843
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

从壳幔地震各向异性初探华北地区壳幔耦合关系

高原[①], 吴晶[②], 易桂喜[③], 石玉涛[①]

① 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;
② 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
③ 四川省地震局, 成都 610041
E-mail: gaoyuan@seis.ac.cn

2010-05-04 收稿, 2010-07-07 接受
国家自然科学基金(40674021)和中国地震局地震预测研究所基本科研专项(2007-13)资助

摘要 根据首都圈地震台网、国家地震台网、IRIS 台站资料, 并比较了流动的华北地震台阵部分台站资料的结果, 利用地震各向异性分析, 得到减少局部构造影响后的华北地区(至少是华北地区北部)的地壳背景水平主压应力方向为北东 95.1°±15.4°, 穿透壳幔的 SKS 分裂的快剪切波偏振平均值为北东 110.2°±15.8°. 而台站分析也显示, 地壳内近场资料的快剪切波偏振与 SKS 快剪切波偏振总是相差十几度以上. 不同周期下的 Rayleigh 面波相速度方位各向异性快波优势方向也同样揭示出随深度增加快波优势方向的变化. 这个特征暗示华北地区的壳幔耦合关系可能既不是简单的壳幔解耦型, 也不是壳幔强耦合型, 可能是两种模式共存的不均匀分布, 或者是物理性质介于两者之间的渐变模式. 研究表明, 在分析穿透整个岩石圈的 SKS 分裂和地表的 GPS 观测的基础上, 增加揭示地壳各向异性的近场资料剪切波分裂, 结合面波的方位各向异性, 可以更准确地多方位刻画壳幔各向异性性质, 进而探讨壳幔的耦合关系.

关键词
地震各向异性
壳幔耦合
快剪切波偏振方向
剪切波分裂
地壳主压应力
华北地区

地壳和地幔的耦合关系到深部地球物理过程和深部地质运动, 对现今板块运动和地球动力学模式有关键性的影响. 中国大陆的华北地区从地表看有燕山、太行两个隆起区和华北盆地凹陷区, 从地质上被划分为 3 个不同的新构造单元, 区内存在着许多全新世及晚更新世活动断裂, 属于中国大陆构造活动比较活跃的地区之一[1,2], 无论从地表地质还是深部地质构造, 都具有丰富而复杂的特征. 人工源深部地震探测资料反演得到的东亚地区地壳厚度分布结果表明, 渤海湾盆地的地壳厚度为 28~30 km, 相对周边地带 Moho 界面上隆约 4 km, 被认为在东亚地区复杂的构造格局与深层动力过程背景下, Moho 界面起伏变化必然受到板块碰撞、挤压和深部物质分异、调整及热物质交换等制约的结果[3]. 层析成像和接收函数研究显示, 在华北的渤海湾及其周边地区的地壳速度结构受地表主要构造单元和深大断裂的影响, 速度扰动异常大多为 NE-NNE 向展布, 具有东西分带、南北分块的特点, 发现局部地区存在上地幔隆起[4~7].

从更大的范围看, 作为地球表面最重要的一类构造单元, 华北地区主要以克拉通的形式存在. 一般说来, 由于密度低、温度低和巨厚的岩石圈根, 克拉通是地球上最稳定的地区, 而华北克拉通由被破坏的东部块体和基本稳定的西部块体组成, 与地球上其他地区的克拉通表现出明显的不同[8,9]. 华北克拉通破坏的主要机制可能是化学侵蚀[10]或拆沉作用[8], 华北克拉通岩石圈的主要特征之一是岩石圈减薄. 一个新的看法认为, 华北克拉通岩石圈减薄的主要机制可能是俯冲侵蚀[11]. 地震各向异性的研究显示出华北盆地区的 SKS 剪切波分裂时间延迟比中国大

英文版见: Gao Y, Wu J, Yi G X, et al. Crust-mantle coupling in North China: Preliminary analysis from seismic anisotropy. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-4135-y

陆的隆起区中西部地区要更小一点[12~14], 这个证据从侧面暗示了岩石圈厚度的差异.

穿透深部介质的地震波是研究深部构造的重要信息来源. 华北地区地壳和地幔是否解耦是研究中国东部地区现今深部动力学形态的关键因素之一, 关系到东亚地区深部介质运动模型的最终建立. 用地震波各向异性特性研究壳幔耦合关系是一种有效的方法[15,16]. 上地幔地震各向异性能够揭示深部岩石圈介质的形变特征, 反映深达上地幔深部介质运移特征和应力环境[14,17,18].

已有的研究采用较低频率的远震资料, 通过 SKS 分裂获得的各向异性结果研究壳幔的耦合关系[15], 但 SKS 反映的是整个岩石圈的平均信息, 如果能增加地壳内的相关信息, 显然对探讨壳幔耦合、准确地揭示壳幔性质有重要意义. 有研究者[19]采用不同深部界面反射地震波和折射地震波震相研究中国东部的地震各向异性特性并与板块运动特性进行对比, 但局限于资料, 得到的初步结论可信度还有待提高. 地壳介质的地震各向异性虽然是与地壳中定向排列的裂隙直接有关, 但实质上是与地壳的应力相关联[20~23]. 地壳各向异性可以通过分析天然地震的波形记录获得[22,24,25], 也可以通过人工地震的方式获得[26,27]. 但在有效运行多年的高密度地震台网地区, 采用天然地震记录是一个好的选择. 不同资料不同方法得到的地震各向异性特征反映的是区域地震各向异性特征的不同侧面[28]. 研究壳幔的耦合关系除了采用较低频率的远震资料各向异性结果比较地表的 GPS 应变测量外, 再增加较高频率的近场地震资料各向异性结果, 显然有益于更深入的讨论. 加入地壳各向异性分析, 结合壳、幔各向异性和地表 GPS 观测, 是壳幔耦合关系研究的重要推进.

1 资料和方法

中国国家地震台网(简称 NSNC)在华北北部主要有 5 个台站, 分别是北京台、太原台、红山台、泰安台和大连台. 由于管理分类, 国家台网的北京台是短周期记录, 北京台(BJT)是属于参与国际交换的 IRIS 宽频带记录台站. 根据研究需要, 本研究采用 IRIS 台站 BJT 的宽频带记录. BJT 台地震计为 STS-2, 太原台(TIY)、红山台(HNS)和大连台(DL2)的地震计为 CTS-1, 泰安台(TIA)的地震计为 JCZ-1, 都是宽频带记录. 本研究收集了上述 5 个台站的远震宽频带记录, 选择标准是震级大于 5.8 级以上、震中距大于 85°的全球地震记录, 对于 4 个 NSNC 台站获得了连续 5 年的记录, 对于 1 个 IRIS 台站 BJT 台, 获得了 1995~2004 年共连续 10 年的记录. 对符合条件的有清晰 SKS 震相的记录进行计算.

国际上目前主要有两种 SKS 分裂计算方法, 一种是 Silver 和 Chan 的计算方法[18], 以下简称 SC 方法; 另一种是 Vinnik 等人[17]提出的方法, 以下简称 Vinnik 方法. 在本研究区域内, 北京台的 SKS 分裂结果最早是通过 Vinnik 计算方法得到的[11]. 随后的一个研究在增加了更多的记录数据后, 采用 SC 计算方法得到的北京台 SKS 分裂结果与前者非常一致[14], 也与其他独立的研究结果一致[13,29,30]. 目前国际上计算 SKS 分裂的通用方法主要是 SC 方法, 本研究也采用 SC 方法, 计算了更多的数据记录以增加结果的可靠性. 在具体计算中, 使用的数据选择、分类和分析技术主要与文献[14]一致, 更详细的介绍可见文献[31,32].

地壳各向异性计算采用的是地壳剪切波分裂的综合分析方法, 称之为 SAM 计算分析技术[33]. SAM 主要是基于偏振分析[20], 加入了相关分析和时间延迟的扣除技术[33], 大量的研究表明[22~24,34~38], 使用这种 SAM 计算技术得到的结果是可靠的.

地壳剪切波分裂使用的近场记录的直达剪切波, 台站记录的地震波形需要符合剪切波窗口的约束, 即是剪切波射线入射角要小于全反射临界角[39]. 本研究中用于地壳剪切波分裂计算的地震震源深度分布在 5~30 km 范围内. 近场记录资料使用首都圈数字地震台网(Capital Area Seismograph Network, CASN)的记录. 根据 CASN 的分布和资料情况, 本研究收集并整理了 CASN 记录的 2002~2005 年的地震数据. 根据首都圈地震目录报告中的地震参数, 严格挑选波形记录, 进行剪切波分裂计算.

2 华北地区壳幔地震各向异性特征

把华北地区的 NSNC 和 IRIS 共 5 个台站的记录进行 SKS 分裂计算, 通过严格的数据选择, 最后得到 81 个高质量波形记录的 SKS 分裂计算结果(表 1). 图 1 显示出这 5 个台站的 SKS 分裂平均快剪切波偏振.

对于地壳剪切波分裂结果, 尽管全部的 CASN 有 107 个台站, 但根据数据筛选计算获得 60 多个台站的结果. 由于快剪切波偏振会受到台站下方或台

表 1　华北地区国家地震台网台站的 SKS 快剪切波偏振方向

地震台站	地震台网	SKS 快剪切波偏振方向/(°)	标准偏/(°)	事件个数
BJT	IRIS	104.5	22.2	46
DL2	NSNC	101.7	11.3	4
HNS	NSNC	94.7	18.1	20
TIA	NSNC	135.3	10.2	5
TIY	NSNC	114.8	2.6	6

站附近断裂的明显影响[22,40,41]，而不规则地表地形也会影响到快剪切波偏振[42]，因此本研究把明显受到地表构造影响的台站结果去掉. 为了数据结果讨论的可靠性，把有效数据≤5 条的台站也删除不用，得到 21 个台站的结果可用于本研究的讨论(图 1)，把每个台站的快剪切波偏振结果按台站计算得到快剪切波偏振平均值(表 2). 在华北, CASN 的 SKS 分裂和中国地震局地球物理研究所布设的华北地震台阵部分台站的 SKS 分裂，常利军等人[29,30]已经根据 SC 计算方法获得. 图 1 显示出位于本研究区域内的共 62 个台站的 SKS 分裂快剪切波偏振结果，平均值计算结果列于表 2.

从图 1 可知，两个独立研究组的 SKS 快剪切波偏振结果非常一致. 而位于华北北部的地壳直达剪切波的快剪切波偏振，较之 SKS 快剪切波偏振也大体一致. 通过表 2 可以看到，本研究得到的穿透壳幔的 SKS 分裂的快剪切波偏振平均值为 110.17°，与文献[29,30]在更多台站上得到的 108.92°平均值相差仅 1.25°. 而地壳直达剪切波的快剪切波偏振平均值为 95.12°，与本研究得到的 SKS 快剪切波偏振平均值相差 15.02°. 这表明地壳主压应变方向(实际也是主压应力方向)与岩石圈内的平均主压应变方向有 15°的差别. 图 2 更直观地显示了 SKS 快波偏振与地壳内剪

表 2　华北地区 SKS 的快剪切波偏振与近场地壳的快剪切波偏振统计结果

华北地区数据	平均值/(°)	标准差/(°)	台站个数
本研究得到的地壳各向异性：快剪切波偏振方向	95.12	15.35	21
本研究得到的 SKS 快剪切波偏振方向	110.17	15.77	5
从常利军等人[29,30]得到的 SKS 快剪切波偏振方向	108.92	10.22	62

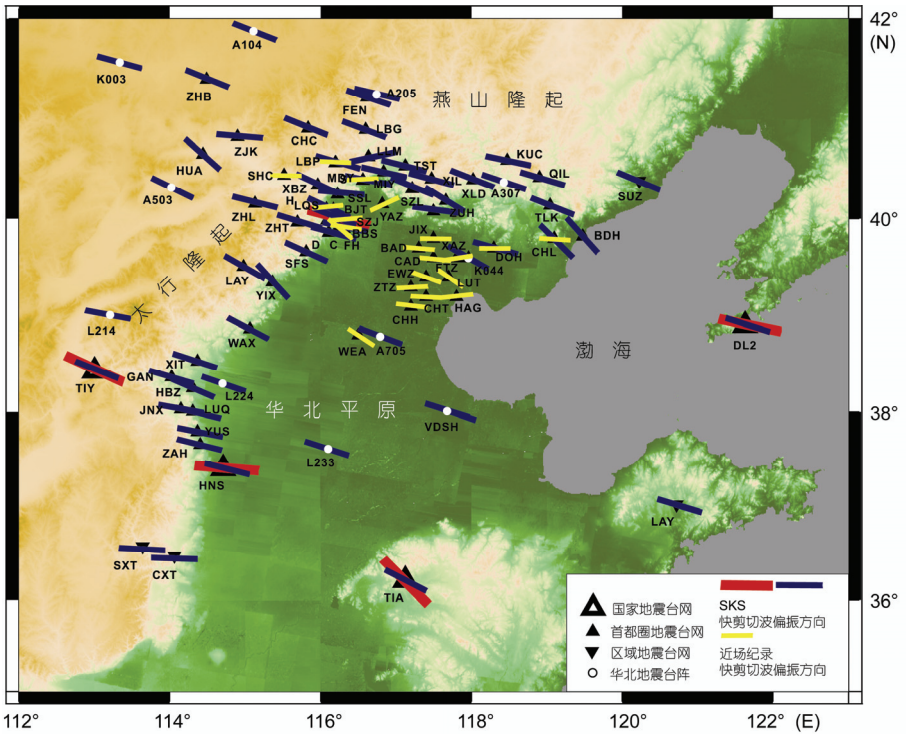


图 1　华北地区地震各向异性快轴分布

黄色线段是地壳快剪切波偏振在每个台站的平均结果，红色线段是本研究得到的 SKS 快剪切波偏振在每个台站的平均结果，蓝色线段是文献[29,30]中得到的 SKS 快剪切波偏振在每个台站的平均结果

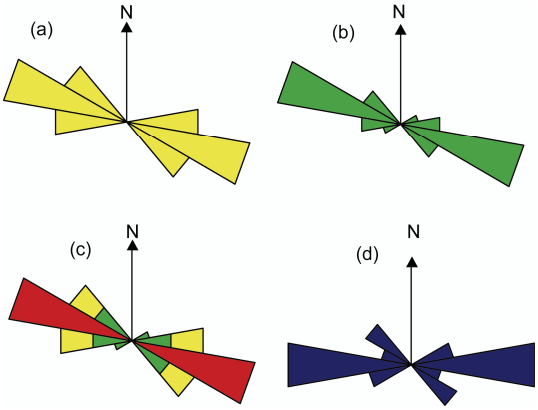


图 2 快剪切波偏振等面积投影玫瑰图

(a) 黄色玫瑰图是本研究得到的 SKS 快剪切波偏振; (b) 绿色玫瑰图是文献[29,30]在华北地区 SKS 快剪切波偏振结果; (c) (a)和(b)图的叠加结果, 黄色部分和绿色部分与前面的意义相同, 而红色显示了两个结果完全重合的部分; (d) 蓝色玫瑰图是地壳快剪切波偏振结果

切波快波偏振的异同.

在华北地区, BJT 台的 SKS 结果由多个研究者计算得出, 文献[43]得到的快波偏振方向为 59°±5°, 结果明显不同. 考虑到采用不同计算方法的文献[12]和采用相同计算方法的文献[13,14,29]结果的一致性很好, 而本文的结果来自 10 年记录的 46 条高质量数据, 因此 BJT 台 SKS 快波偏振方向为 104.5°±22.1°是可信的.

对于 BJT 台 SKS 分裂结果差异的问题, 文献[43]使用的数据是 2000~2002 年 3 年的远震共 6 条地震记录[43,14], 数据量较少是可能的原因. 随后的研究使用已经东移了的新的流动台阵记录, 分析推断鄂尔多斯块体和华北造山带的原生代合并造成 SKS 各向异性, 而华北造山带东部到华北克拉通东部一带的 SKS 各向异性可能是中生代到新生代期间岩石圈回复(rejuvenation), 但 BJT 台的结果没有更新[44]. 必须注意到, BJT 台处于盆地和隆起的边界带(见图 1)[23,24], 且也位于可能的近似正交的两个岩石圈拉张区域的边界[44]. 深部复杂结构和射线方位不同也会造成地震记录波形的改变, 但另一个独立研究的结果在 BJT 以北和以西的几个台的结果也有所不同[13,14,43,44], 这个现象还需要更深入的探讨.

为了更好地分析华北地区各向异性的深度分布, 本研究根据双台互相关方法得到 Rayleigh 面波相速度频散资料, 反演 Rayleigh 面波相速度方位各向异性[45,46], 本研究得到了研究区域内 25 ~ 85 s 周期 Rayleigh 面波相速度方位各向异性(图 3). 由图 3 可见, 不同周期下的 Rayleigh 面波相速度方位各向异性快波优势方向也有所不同. 通过分辨核函数特性[45,47]可以知道, 不同周期的面波对应不同的深度分辨区间, 大体上 25~35 s 周期的分辨深度相当于 25~50 km

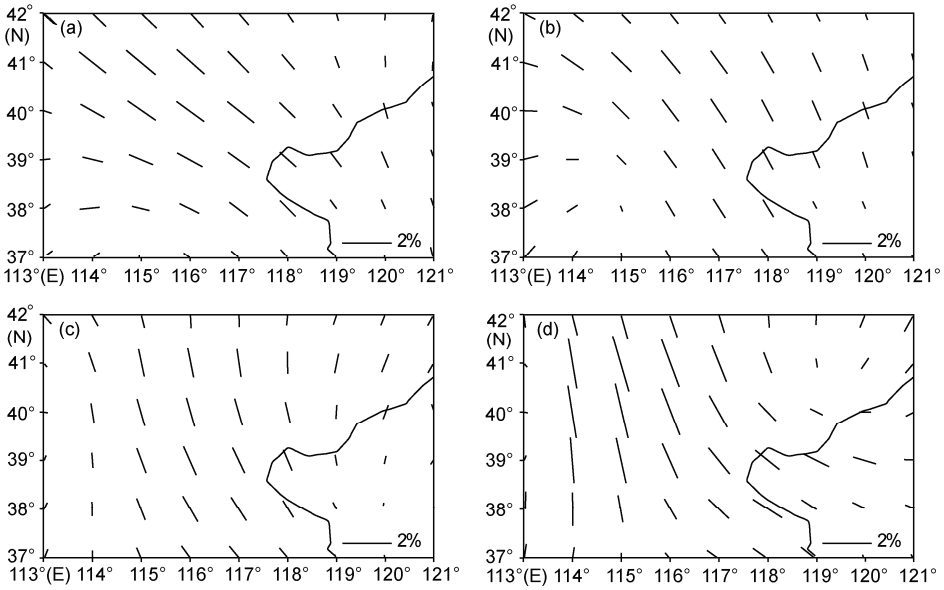


图 3 华北地区不同周期的相速度方位各向异性图像

黑色短线条表示各向异性的强度与快波方向. (a) T=25 s; (b) T=35 s; (c) T=50 s; (d) T=85 s

深度范围, 50~80 s 周期的分辨深度相当于 50~160 km 深度范围. 面波各向异性的结果表明, 不同深部不同尺度的面波相速度方位各向异性有明显的不同.

3 华北地区地震各向异性及壳幔耦合的讨论

壳幔变形的运动学模型主要有两种, 都是基于板块驱动力假设之下, 分别是简单软流圈流动模型(simple asthenospheric flow, SAF 模型)[48]和垂直连贯变形模型(vertical coherent deformation, VCD 模型)[49]. 王椿镛等人[16]根据 SKS 分裂信息和 GPS 地表速度观测, 推断了青藏高原内部的壳幔变形属于 VCD 壳幔强耦合模型, 青藏高原外部的云南地区的壳幔变形方式则属于 SAF 壳幔解耦模型, 有着不同的力学驱动机制. 然而对于华北地区, 特别是华北盆地, 由于地表有厚厚的覆盖沉积层, 地表的 GPS 测量与上地幔的观测进行直接比较显然不太合适, 因此必须增加对地壳特性的观测.

近场记录的剪切波分裂主要使用地壳内地震的直达剪切波, 其剪切波分裂反映的各向异性是地壳内的特性. 尽管震源机制资料和深井钻探资料给出华北地区的平均最大主压应力方向大致为北东 71.6°, 但华北块区的区域主压应力方向总体上呈现近 E-W 方向特征[50], 来自 GPS 华北最大主压应变北东 85°方向的结果显示出与地震资料得到的最大主压应力较好的相关性[51]. 首都圈地区近场地震资料的剪切波分裂研究得到的快剪切波平均偏振方向为北东 85.7°±41.0°, 表明华北中部和北部地区的主压应力场就是北东东近 E-W 方向, 与 GPS 最大主压应变北东 85°方向的结果有极好的一致性[23]. 为了减少断裂和不规则构造的影响, 并去掉可靠性较差的较少数据样本的台站, 本研究从64个台站中选取了21个台站, 根据地壳直达剪切波的快剪切波偏振方向为 95.1°±15.4°, 这个方向也就是华北地区(至少是华北北部)的地壳水平主压应力的背景方向. 穿透地壳和上地幔的 SKS 分裂的快剪切波偏振平均值为 110.2° ±15.8°. 最近的研究认为, 中国东部的 SKS 分裂更可能的范围不仅仅是岩石圈内, 而是包括岩石圈底部的上地幔范围, 快剪切波偏振与下插的太平桥板块相对欧亚板块向西的运动一致, 主要起因是地幔流[14].

为了更准确地分析地壳中近场资料的快波偏振方向和壳幔 SKS 分裂的快剪切波偏振的异同, 把同时得到 SKS 分裂和近场剪切波分裂两个结果的台站进行直接的比较(表 3). 通过表 3 可以看到, 在全部 6 个台站上得到的两个结果都是明显不同的, 快剪切波偏振平均方向相差在 13°以上.

不同周期下的 Rayleigh 面波相速度方位各向异性快波优势方向也同样显示出不同, 揭示出随深度增加快波优势方向也逐渐由 NW 方向转向 NNW 方向. 这个特征表明, 华北地区的壳幔耦合关系可能既不是简单的壳幔解耦型的 SAF 方式, 也不是壳幔强耦合型的 VCD 方式. 由于华北地区壳幔结构的不均匀特征[3~7], 该地区的耦合关系可能是两种模式共存的不均匀分布或者是物理性质介于两者之间的渐变模式. 考虑到上地壳和岩石圈快剪切波偏振平均约 15°的差异, 假如上地壳和其下部物质的变形产生于不同地质历史时期, 则也可能造成这种观测结果, 但这种解释能否成立还需要进一步的验证. 由于华北地区壳幔耦合模式对东亚乃至全球地球动力学和深部构造的重要性, 还需要更多研究者的深入研究.

表 3 穿过地幔的 SKS 的快剪切波偏振与近场地壳的快剪切波偏振对比

地震台站	穿过地幔的 SKS 的快剪切波偏振/(°)	事件个数	近场地壳剪切波分裂的快剪切波偏振/(°)	事件个数
BBS	102.0	20	129.17	6
CHL	134.8	6	93.33	6
DOH	105.7	6	90.12	121
LBP	106.1	14	92.75	8
LQS	114.9	12	84.50	20
MDY	100.7	16	87.47	17

致谢 美国 Missouri University of Science and Technology 的 Kelly Liu 教授和 Stephan Gao 教授提供了部分 IRIS 数据并在 SKS 分裂资料分析上有多次讨论和帮助, 刘瑞丰帮助提供了国家台网的数据, 在此一并表示感谢.

参考文献

1 丁国瑜. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社, 1991. 1—600
2 徐锡伟, 吴为民, 张先康, 等. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震. 北京: 科学出版社, 2002. 1—376
3 滕吉文, 曾融生, 闫雅芬, 等. 东亚大陆及周边海域 Moho 界面深度分布和基本构造格局. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32: 89—100
4 张岭, 刘劲松, 郝天珧, 等. 渤海湾盆地及其邻域地区地壳与上地幔层析成像. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 1444—1455
5 张成科, 张先康, 赵金仁, 等. 渤海湾及其邻区壳幔速度结构研究与综述. 地震学报, 2002, 24: 428—435
6 Ai Y, Zheng T. The upper mantle discontinuity structure beneath eastern China. Geophys Res Lett, 2003, 30: 2089, doi: 10.1029/2003GL017678
7 Ai Y, Zheng T, Xu W, et al. Small scale hot upwelling near the North Yellow Sea of eastern China. Geophys Res Lett, 2008, 35: L20305, doi: 10.1029/2008GL035269
8 高山, 章军峰, 许文良, 等. 拆沉作用与华北克拉通破快. 科学通报, 2009, 54: 1962—1973
9 朱日祥, 郑天愉. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系. 科学通报, 2009, 54: 1950—1961
10 Menzies M A, Xu Y G, Zhang H F, et al. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. Lithos, 2007, 96: 1—21
11 郑永飞, 吴福元. 克拉通岩石圈的生长和再造. 科学通报, 2009, 54: 1945—1949
12 郑斯华, 高原. 中国大陆岩石层的方位各向异性. 地震学报, 1994, 15: 131—140
13 罗艳, 黄忠贤, 彭艳菊, 等. 中国大陆及邻区 SKS 波分裂研究. 地球物理学报, 2004, 47: 812—821
14 Liu K H, Gao S S, Gao Y, et al. Shear-wave splitting and mantle flow associated with the deflected Pacific slab beneath northeast Asia. J Geophys Res, 2008, 133: B01305, doi: 10.1029/2007JB005178
15 Wang C Y, Flesch L M, Silver P G, et al. Evidence for mechanically coupled lithosphere in central Asia and resulting implications. Geology, 2008, 36: 363—366
16 王椿镛, 常利军, 吕智勇, 等. 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 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 495—503
17 Vinnik L P, Farra V, Romanowicz B. Azimuthal anisotropy in the Earth from observations of SKS at GEOSCOPE and NARS broadband stations. Bull Seism Soc Am, 1989, 79: 1542—1558
18 Silver P G, Chan W W. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. J Geophys Res, 1991, 96: 16429—16454
19 Iidaka T, Niu F. Mantle and crust anisotropy in the eastern China region inferred from waveform splitting of SKS and PpSms. Earth Planet Space, 2002, 53: 159—168
20 Crampin S. Seismic wave propagation through a cracked solid: Polarization as a possible dilatancy diagnostic. Geophys J R Astron Soc, 1978, 53: 467—496
21 Crampin S, Peacock S, Gao Y, et al. The scatter of time-delays in shear-wave splitting above small earthquakes. Geophys J Int, 2004, 156: 39—44
22 高原, 郑斯华, 孙勇. 唐山地区地壳裂隙各向异性. 地震学报, 1995, 17: 283—293
23 高原, 吴晶. 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, 2008, 53: 2933—2939
24 吴晶, 高原, 陈运泰, 等. 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, 2007, 50: 209—220
25 Wu J, Gao Y, Chen Y T. Shear-wave splitting in the crust beneath the southeast Capital area of North China. J Seism, 2009, 13: 277—286
26 Zhang Z J, Li Y K, Lu D Y, et al. Velocity and anisotropy structure of the crust in the Dabieshan orogenic belt from wide-angle seismic data. Phys Earth Planet Inter, 2000, 122: 115—131
27 Zhang Z, Teng J, Badal J, et al. Construction of regional and local seismic anisotropic structures from wide-angle seismic data: Crustal deformation in the southeast of China. J Seism, 2009, 13: 241—252
28 高原, 滕吉文. 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, 2005, 20: 180—185
29 常利军, 王椿镛, 丁志峰. 首都圈地区 SKS 波分裂研究. 地震学报, 2008, 30: 551—559
30 常利军, 王椿镛, 丁志峰. 中国东部上地幔各向异性研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 1169—1178
31 Liu K H. NA-SWS-1.1: A uniform database of teleseismic shear-wave splitting measurements for North America. Geochem Geophys Geosys, 2009, 10: Q05011, doi:10.1029/2009GC002440
32 Gao S S, Liu K H. Significant seismic anisotropy beneath the southern Lhasa Terrane, Tibetan Plateau. Geochem Geophys Geosys, 2009, 10: Q02008, doi:10.1029/2008GC002227
33 高原, 石玉涛, 梁维, 等. 剪切波分裂分析系统 SAM(2007)——软件系统. 中国地震, 2008, 24: 345—353
34 太龄雪, 高原, 石玉涛, 等. 辽宁区域地震台网的地壳剪切波分裂研究. 地震地质, 2009, 31: 401—414

35 石玉涛, 高原, 赵翠萍, 等. 汶川地震余震序列的地震各向异性. 地球物理学报, 2009, 52: 398—407
36 郑秀芬, 陈朝辉, 张春贺. 1999 年台湾集集地震余震区——嘉义地区地震的剪切波分裂参数随时间变化的研究. 地球物理学报, 2008, 51: 149—157
37 Gao Y, Wang P D, Zheng S H, et al. Temporal changes in shear-wave splitting at an isolated swarm of small earthquakes in 1992 near Dongfang, Hainan Island, southern China. Geophys J Inter, 1998, 135: 102—112
38 Gao Y, Crampin S. Temporal variations of shear-wave splitting in field and laboratory in China. J Appl Geophys, 2003, 54: 279—287
39 Crampin S, Peacock S. A review of shear-wave splitting in the compliant crack-critical anisotropic Earth. Wave Motion, 2005, 41: 59—77
40 Tadokoro K, Ando M. Evidence for rapid fault healing derived from temporal changes in S wave splitting. Geophys Res Lett, 2002, 29: 1047, doi: 10.1029/2001GL013644
41 Cochran E S, Li Y G, Vidale J E. Anisotropy in the shallow crust observed around the San Andreas fault before and after the 2004 *M*6.0 Parkfield earthquake. Bull Seism Soc Am, 2006, 96: 364—375, doi: 10.1785/0120050804
42 Gao Y, Crampin S. A further stress-forecast earthquake (with hindsight), where migration of source earthquakes causes anomalies in shear-wave polarizations. Tectonophysics, 2006, 426: 253—262
43 Zhao L, Zheng T Y. Using shear wave splitting measurements to investigate the upper mantle anisotropy beneath the North Craton. Geophys Res Lett, 2005, 32: L10309, doi:10.1029/2005GL022585
44 Zhao L, Zheng T Y, Lü G. Insight into craton evolution: Constraints from shear wave splitting in the North China Craton. Phys Earth Planet Inter, 2008, 168: 153—162
45 易桂喜, 姚华建, 朱介寿, 等. 中国大陆及邻区 Rayleigh 面波相速度分布特征. 地球物理学报, 2008, 51: 402—411
46 易桂喜, 姚华建, 朱介寿, 等. 用 Rayleigh 面波方位各向异性研究中国大陆岩石圈形变特征. 地球物理学报, 2010, 53: 256—268
47 徐果明, 姚华建, 朱良保, 等. 中国西部及其邻域地壳上地幔横波速度结构. 地球物理学报, 2007, 50: 193—208
48 Richardson R M. Ridge forces, absolute plate motions, and the intraplate stress field. J Geophys Res, 1992, 97: 11739—11748
49 Lithgow N C, Ricards M A. The dynamics of Cenozoic and Mesozoic plate motions. Rev Geophys, 1998, 36: 27—78
50 许忠淮. 东亚地区现今构造应力图的编制. 地震学报, 2001, 23: 492—501
51 张国民, 马宏生, 王辉, 等. 中国大陆活动地块与强震活动关系. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34: 591—599