

苗春兰, 2014, 山东地区壳幔耦合关系探讨, 中国地震, 30(4), 597~603。

山东地区壳幔耦合关系探讨

苗春兰

中国地震台网中心, 北京市西城区三里河南横街5号 100045

摘要 通过将山东地区 GPS 观测结果与穿透整个岩石圈的 SKS 剪切波分裂及近场资料剪切波分裂的快波方向相比较, 来探讨山东地区壳幔运动的耦合作用。结果发现, 地壳内近场快剪切波偏振与 SKS 快剪切波偏振总是相差十几度以上, 这种差异可能说明, 山东地区壳幔之间构造活动可能有一定程度的解耦, 表明山东地区的壳幔运动耦合作用可能既不是壳幔强耦合型, 也不是简单的壳幔解耦型, 该地区的壳幔运动耦合作用可能是 2 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, 这与早先对华北地区的类似研究获得的结论相同。

关键词: 地震各向异性 壳幔耦合 剪切波分裂 山东地区

[文章编号] 1001-4683(2014)04-0597-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

壳幔运动的耦合关系对板块的活动性和强震的孕育发生等起至关重要的作用, 也对地球动力学模式的建立有关键性的影响。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(Wang et al, 2008; 王椿镛等, 2007), 通过对地震剪切波分裂特征的研究, 可以获得地壳和地幔介质各向异性的分布。通常认为, 地幔各向异性的主要成因是由地幔物质形变导致橄榄石晶轴的定向排列所引起的(Hess, 1964; Nicolas et al, 1987), 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, 但其实质上是与地壳的应力相关联(Crampin, 1978; Crampin et al, 2004; 高原等, 1995、2008a)。研究发现, 剪切波分裂的快波方向与矿物长轴定向排列的优势取向一致, 但对于形成橄榄石晶轴的定向排列的原因目前还没有统一的认识。一种观点认为, 这是由于板块运动所产生的水平剪切作用(Vinnik et al, 1995)的结果, 另一种观点认为, 它与岩石圈下部乃至地幔中的构造形变有关(Silver et al, 1991; Mainprice et al, 1993; Silver, 1996; Plomerova et al, 1996; Vauchez et al, 1996), 二者代表了在岩石圈-地幔变形和构造演化研究方面两种截然不同的观点(任金卫, 2004)。通过地震学方法研究地幔各向异性的分布, 就能以一定的精度确定地幔塑性流动的空间分布图像, 通过对地幔塑性流动和地表的 GPS 应变测量对比分析, 可以建立其空间联系, 这是用来研究壳幔耦合关系的主要方法之一, 若能再顾及地壳内较高频率的近场地震资料各向异性

[收稿日期] 2013-01-03; [修定日期] 2014-12-02

[项目类别] 地震行业科研专项(201208009-06)资助

[作者简介] 苗春兰, 女, 1978年生, 工程师, 主要从事地震编目工作。E-mail: mcl@seis.ac.cn

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,是对壳幔耦合关系研究的重要推进(高原等,2010)。

地震活动是地壳内部应变能释放的一种形式,并且与深部发震断层的活动密切相关,这种能量释放的过程与破裂机制是与地壳和上地幔的物理和化学性质密切相关的,而壳幔运动的耦合作用对强震的孕育发生等具有至关重要的作用。山东地区分布有 3 条大型断裂构造带:NNE 向的沂沭断裂带、NE 向的聊考断裂带和 NW 向的渤海-威海断裂带,地震构造环境较为复杂,地震活动具有强度大、破坏重的特点。对山东地区壳幔运动的耦合关系开展研究,不仅在岩石圈动力学研究、地震活动趋势预测和强震深部力源研究方面有重要的理论意义,也对探究该地区的地壳稳定性、完善其工程地震安全性评价以及防震减灾工作的诸多环节具有重要的应用价值。

1 资料和方法

对山东地区 36 个宽频带地震台站记录的 2000 ~ 2010 年的数字记录进行了筛选,从中选取震中距在 $85 \sim 110^\circ$ 且震级 $M_w > 5.5$ 的地震事件。为提高远震记录中 SKS 震相的信噪比,在计算各向异性参数前对数据进行了带通滤波处理。

使用最小能量法(Silver et al,1991)和旋转相关法(Bowman et al,1987)对单个记录的远震 SKS 震相进行偏振分析,求取其地震各向异性参数 $(\varphi, \delta t)$,其中 φ 表示快波的偏振方向, δt 表示快、慢波的到时差。震中距为 $85 \sim 110^\circ$ 的 SKS 波几乎是垂直入射到地面台站下方,如果存在各向异性介质,则 SKS 波在到达地震台站时,其快波存在偏振 φ ,快、慢波之间存在到时差 δt 。这组参数 $(\varphi, \delta t)$ 用来描述上地幔地震各向异性。图 1 是对 WUL(五莲)台进行 SKS 震相偏振分析的例子(苗庆杰,2011)。由图 1 可看到,同时使用多种方法展开 SKS 波分裂求取的地震各向异性参数,较任何一种单一方法得到的结果更为可靠。

根据 Barruol 等(1997)、Wüstefeldt 等(2007)关于剪切波分裂的判别方法,在进行 SKS 波分裂参数均值计算时仅使用质量一般及以上的有效分裂结果(表 1)。通常认为,在 SKS 波分裂测量方法中,利用最小能量法测得的结果相对更为可靠、稳定(Vecsey et al,2008; Gao et al,2009),故本文采用最小能量法测得的结果。

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(高原等,2008b)。SAM 主要是基于偏振分析,并加入了相关分析和时间延迟的扣除技术,大量的研究表明(高原等,2008b;太龄雪等,2009;石玉涛等,2009),使用 SAM 计算技术得到的结果是可靠的。

地壳地震各向异性计算使用的是近场记录的直达剪切波,地震波形需要符合剪切波窗口的约束条件,即剪切波射线入射角要小于全反射临界角。本研究中用于地壳剪切波分裂计算的近场记录资料使用的是山东地区 2005 ~ 2007 年的数字化地震波形资料,大部分地震震源深度在 $6 \sim 20\text{km}$,且多数集中分布在 $8 \sim 16\text{km}$ 的区间内,波形记录经严格挑选后,进行了剪切波分裂计算^①。

^① 郑建常等,2009,山东地区地壳介质各向异性与剪切波分裂研究(见:山东省 2009 年度地震趋势研究报告)

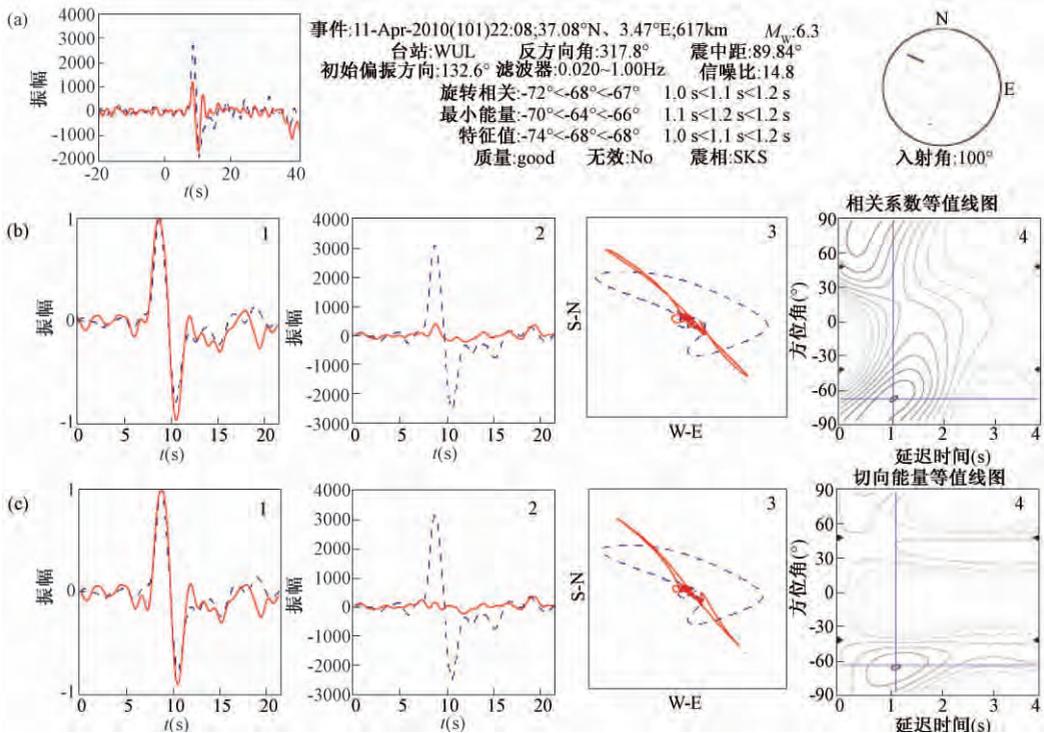


图 1 对 WUL(五莲)台 SKS 震相展开偏振分析的实例

图(a)左侧为观测到的地震波形(图中径向、切向分量分别用虚线和红实线表示,阴影部分表示用于 SKS 波分裂计算的时间窗);中间部分为波形数据信息及用 3 种方法的计算结果,其中(101)为 2010 年第 101 天,617km 为震源深度;右侧为 SKS 波分裂结果的立体投影。图(b)、(c)分别表示采用旋转相关法和最小切向能量法开展 SKS 波分裂测量的例子。从左到右,1 为表示经时移校正后的快波(虚线)、慢波(红实线)分量;2 为各向异性校正后的径向(虚线)、切向(红实线)分量;3 为各向异性校正前(虚线)、后(红实线)的质点运动轨迹;4 为各向异性参数分布等值线图

2 山东地区壳幔地震各向异性特征

把山东地区数字地震台网 36 个宽频带地震台站的远震 SKS 波形进行 SKS 分裂计算,通过严格的数据选择,最后得到 159 个高质量波形记录的 SKS 分裂计算结果(表 1)。图 2 展示出这 36 个台站的 SKS 分裂平均快剪切波偏振。

常利军等(2009)给出了泰安台、苍山台、莱阳台的 SKS 波分裂参数,其快波偏振方向分别为 117.2° 、 95.5° 和 106.7° ,与本文采用的结果相似。

对于地壳剪切波分裂结果,通过数据筛选计算获得 14 个台站的结果。由于快剪切波偏振会受到台站下方或台站附近断裂的明显影响,因此本研究中把明显受到地表构造影响的台站的结果剔除。为了保证讨论的可靠性,将有效数据 ≤ 5 条的台站数据也舍弃,最后将 7 个台站的结果用于本研究的讨论中(图 2),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)^①。

表 1 山东地区各台站 SKS 波分裂参数

编号	代码	台站名	$\varphi(^{\circ})$	$E_{\varphi}(^{\circ})$	$\delta t(s)$	$E_{\delta t}(s)$	事件数
1	ANQ	安丘	107.7	8.5	1.13	0.18	5
2	BHC	北隍城	85.3	0.6	1.70	0.64	2
3	CSH	苍山	78.0	6.7	1.16	0.27	9
4	DSD	独山岛	98.4	1.6	1.55	0.15	3
5	DSH	大山	96.3	25.4	1.34	1.24	4
6	HAY	海阳	67.40	1.0	0.87	0.25	3
7	JIN	济南	87.0	18.6	0.78	0.14	6
8	JIX	嘉祥	109.3	6.5	1.02	0.35	6
9	JUN	莒南	96.1	10.0	1.27	0.24	6
10	JUX	莒县	78.8	5.2	1.23	0.22	7
11	LAS	岚山	100.4	9.5	1.35	0.31	5
12	LAY	莱阳	106.1	14.5	1.13	0.38	6
13	LIS	临沭	81.7	4.6	1.44	0.32	7
14	LOK	龙口	107.0	7.9	1.19	0.31	6
15	LQU	临朐	103.2	9.3	0.96	0.31	3
16	LSH	梁山	111.9	6.6	1.62	0.27	8
17	LZH	莱州	115.5	9.2	1.25	0.41	5
18	MEY	蒙阴	80.8	2.2	1.27	0.13	4
19	NLA	牛岚	80.6	6.3	0.84	0.14	4
20	QID	青岛	70.0	3.8	1.59	0.71	3
21	QUF	曲阜	95.3	19.5	1.08	0.45	3
22	RCH	荣城	106.0	6.3	1.18	0.53	5
23	RSH	乳山	79.1	5.4	1.12	0.30	4
24	RZH	日照	72.7	11.8	0.93	0.53	3
25	SSH	泗水	69.1	8.4	1.56	0.12	4
26	TCH	郯城	84.2	12.2	1.03	0.38	3
27	TIA	泰安	123.2	9.4	1.02	0.28	7
28	TZH	陶庄	81.9	1.5	1.19	0.13	3
29	WED	文登	107.3	18.0	0.94	0.54	2
30	WLS	五龙山	102.7	14.1	1.03	0.15	4
31	WSH	汶上	110.7	12.3	1.67	0.16	4
32	WUL	五莲	100.4	13.7	1.11	0.10	4
33	XIT	新泰	110.8	20.1	1.71	0.67	2
34	YSH	沂水	104.7	0.8	0.73	0.11	2
35	ZCH	邹城	84.2	1.2	1.16	0.13	3
36	ZHY	招远	116.0	5.4	0.96	0.28	4

注:表 1 中 φ 和 E_{φ} 是快波偏振方向和相应的误差, δt 和 $E_{\delta t}$ 是快、慢波的时间延迟和相应的误差

表 2 山东地区 SKS 快剪切波偏振与近场地壳快剪切波偏振统计结果

山东地区数据	平均值($^{\circ}$)	标准差($^{\circ}$)	台站个数
地壳快剪切波偏振方向	117.1	14.1	7
SKS 快剪切波偏振方向	94.7	15.3	36

通过表 2 可以看到, 穿透壳幔的 SKS 分裂的快剪切波偏振平均值为 94.7° , 而地壳直达剪切波的快剪切波偏振平均值为 117.1° , 与 SKS 快剪切波偏振平均值相差 22.4° 。这表明

地壳主压应力方向与岩石圈内的平均主压应力方向有 22° 的差别。

3 山东地区地震各向异性及壳幔耦合作用的讨论

地壳中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。根据现代中小地震震源机制解得知(周翠英等,2005),山东地区目前处于 NEE 向(80° 左右)主压应力作用中,山东地壳运动 GPS 观测资料计算的位移场分析结果显示(殷海涛等,2008),山东地区的主应变场呈 NEE-SWW 向挤压, NWW-SEE 向拉张,与地震资料得到的最大主压应力有较好的相关性。为了减少断裂的影响,并去掉可靠性较差的较少数据样本的台站,本研究选取了 7 个台站,地壳直达剪切波的快剪切波偏振方向为 $117.1^\circ \pm 14.1^\circ$, 穿透地壳和上地幔的 SKS 分裂的快剪切波偏振平均值为 $94.7^\circ \pm 15.3^\circ$ 。

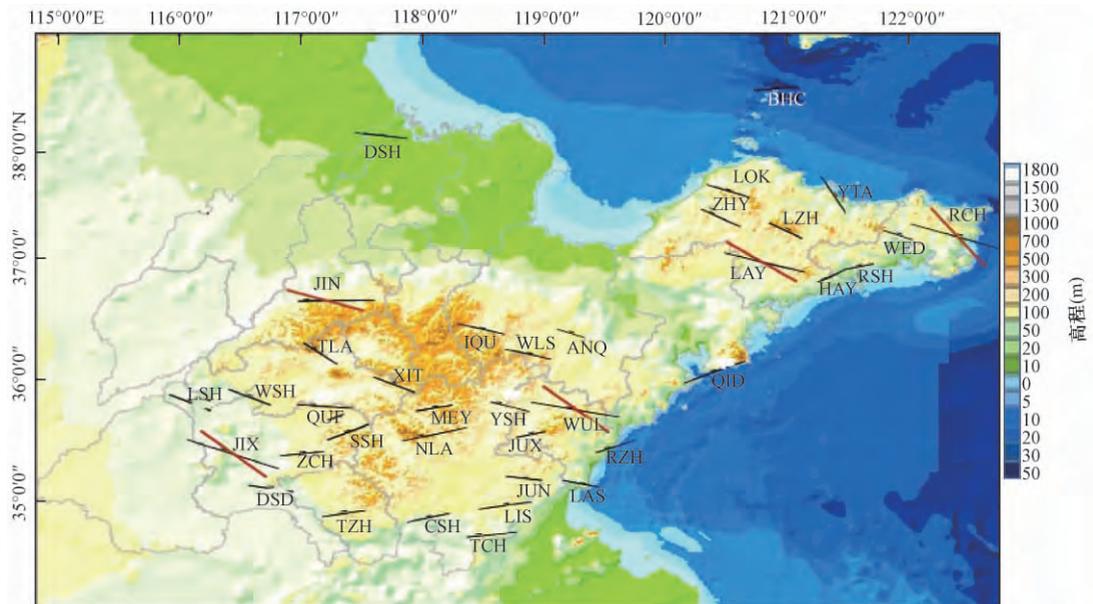


图 2 快剪切波偏振方向

红色线段代表近场地壳的快剪切波偏振方向,黑色线段代表穿过地幔的 SKS 的快剪切波偏振方向。图中代码含义见表 1

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的对比

地震台站	穿过地幔的 SKS 的快剪切波偏振($^\circ$)	事件个数	近场地壳的快剪切波偏振($^\circ$)	事件个数
JIX	109.3	6	125.3	17
WUL	100.4	4	125.1	30
LAY	106.1	6	119.6	34
JIN	87.0	6	105.2	25
RCH	106.0	5	137.1	22

为了更准确地对比分析地壳中近场快剪切波偏振与壳幔 SKS 分裂的快剪切波偏振的异同,把同时获得的 SKS 分裂和近场剪切波分裂结果的台站进行直接比较(表 3)。通过表

3 可以看到,在 5 个台站上获得的二个结果都明显不同,2 种快剪切波偏振方向都相差在 13.5° 以上。这种差异可能说明,山东地区壳幔之间构造活动可能有一定程度的解耦,表明山东地区的壳幔运动耦合作用可能既不属于壳幔强耦合型,也不属于简单的壳幔解耦型,该地区的壳幔运动耦合作用可能是 2 种模式共存的不均匀分布或者是物理性质介于二者之间的渐变模式,这与高原等(2010)对华北地区的相似研究获得的结论一致。

致谢:对匿名审稿专家在本文修改过程中提出的中肯意见及耐心指教,深表感谢!

参考文献

- 常利军、王椿镛、丁志峰, 2009, 中国东部上地幔各向异性研究, 中国科学 D 辑, **39** (9), 1169 ~ 1178。
- 高原、郑斯华、孙勇, 1995, 唐山地区地壳裂隙各向异性, 地震学报, **17** (3), 283 ~ 293。
- 高原、吴晶, 2008a, 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、石玉涛等, 2008b, 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、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。
- 太龄雪、高原、石玉涛等, 2009, 辽宁区域地震台网的地壳剪切波分裂研究, 地震地质, **31** (3), 401 ~ 414。
- 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。
- 苗庆杰、刘希强、李永华等, 2011, 山东地区上地幔各向异性研究, 地震学报, **33** (6), 746 ~ 754。
- 任金卫, 2004, 中国大陆壳幔运动耦合作用分析, 地震地质, **26** (4), 566 ~ 575。
- 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 D 辑: 地球科学, **37** (4), 495 ~ 503。
- 殷海涛、李杰、张玲等, 基于 GPS 观测网的山东地区地壳运动特征分析, 西北地震学报, **30** (3), 276 ~ 281。
- 周翠英、王铮铮、蒋海昆等, 2005, 华东地区现代地壳应力场及地震断层错动性质, 地震地质, **27** (2), 273 ~ 288。
- Bowman J R, Ando M, 1987, Shear-wave splitting in the upper-mantle wedge above the Tonga subduction zone, *Geophys J R Astron Soc*, **88** (1), 25 ~ 41。
- Barrauol G, Silver P G, Vauchez A, 1997, Seismic anisotropy in the eastern US: deep structure of a complex continental plate, *Geophys Res*, **102** (B4), 8329 ~ 8348。
- Crampin S, 1978, Seismic wave propagation through a cracked solid: Polarization as a possible dilatancy diagnostic, *Geophys J R Astron Soc*, **53** (3), 467 ~ 496。
- Crampin S, Peacock S, Gao Y et al, 2004, The scatter of time-delays in shear-wave splitting above small earthquakes, *Geophys J Int*, **156** (1), 39 ~ 44。
- Gao S S, Liu K H, 2009, Significant seismic anisotropy beneath the southern Lhasa Terrane, Tibetan Plateau, *Geochem Geophys Geosyst*, **10**, Q02008, doi:10. 1029 /2008GC002227。
- Hess H H, 1964, Seismic anisotropy of the upper most mantle under oceans, *Nature*, **203** (9), 629 ~ 631。
- Mainprice D, Silver P G, 1993, Interpretation of SKS wave using samples from the subcontinental lithosphere, *Phys Earth Planet Sci*, **78** (3-4), 257 ~ 280。
- Nicolas A, Christensen N I, 1987, Formation of anisotropy in upper mantle peridotites: a review in composition structure and dynamics of the lithosphere-asthenosphere system, *Geodyn Ser*, 111 ~ 123。
- Plomerova J, Sileny J, Babuska V, 1996, Joint interpretation of upper-mantle anisotropy based on teleseismic P-travel time delays and inversion of shear2wave splitting parameters, *Phys Earth Planet Int*, **95** (3-4), 293 ~ 309。
- Silver P G, Chan W W, 1991, Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation, *Jour Geophys Res*, **96** (B10), 16429 ~ 16454。
- Silver P G, 1996, Seismic anisotropy beneath the continents: Probing the depths of geology, *Jour Annu Rev Earth Planet Sci*, **24**, 385 ~ 432, doi:10. 1146/annurev. earth. 24. 1. 385。

- Vinnik L P, Green R W E, Nicolaysen L O, 1995, Recent deformation of the deep continental root beneath South Africa, *Nature*, **375**, 50 ~ 52, doi:10.1038/375050a0.
- Vauchez A, Barruol G, 1996, Shear-wave splitting in the Appalachians and the Pyrenees: Importance of the inherited tectonic fabric of the lithosphere, *Phys Earth Planet Int*, **95** (3-4), 127 ~ 138.
- Vecsey L, Plomerova J, Babuska V, 2008, Shear-wave splitting measurements—Problems and solutions, *Tectonophysics*, **462** (1-4), 178 ~ 196.
- Wang C Y, Flesch L M, Silver P G, et al, 2008, Evidence for mechanically coupled lithosphere in central Asia and resulting implications, *Geology*, **36** (5), 363 ~ 366.
- Wüstefeld A, Bokelmann G H R, 2007, Null detection in shear-wave splitting measurements, *Bull Seismol Soc Am*, **97** (4), 1204 ~ 1211.

Study on crust-mantle coupling beneath the Shandong region

Miao Chunlan

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract GPS observation comparing with the SKS fast-wave polarization through the crust-mantle and seismic anisotropy of the crust was used in this paper to study the coupling relationship between the crustal movement and the mantle deformation. We found that the fast-wave polarization in the crust is always a few degrees above ten with the SKS fast-wave. This difference may show the decoupling of crustal movement and mantle deformation in the Shandong region. The characteristic of Shandong region is that the crust-mantle coupling is not simply crust-mantle decoupling, nor a strong coupling. There may be an uneven distribution caused by two kinds of coexistent modes or a gradual change of physical property between the two modes. The finding is consistent with the previous conclusions by the similar studies of North China.

Key words: Anisotropy Crust-mantle coupling Shearing wave splitting
Shandong region