

常利军,王椿镛,丁志峰等.青藏高原东北缘上地幔各向异性研究.地球物理学报,2008,51(2):431~438

Chang L J, Wang C Y, Ding Z F, et al. Seismic anisotropy of upper mantle in the northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(2): 431 ~ 438

## 青藏高原东北缘上地幔各向异性研究

常利军<sup>1</sup>, 王椿镛<sup>1</sup>, 丁志峰<sup>1</sup>, 周民都<sup>2</sup>, 杨建思<sup>1</sup>, 徐智强<sup>1</sup>, 姜旭东<sup>1</sup>, 郑秀芬<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

<sup>2</sup> 甘肃省地震局, 兰州 730000

**摘 要** 通过分析位于青藏高原东北缘的区域数字地震台网 30 个台站的远震 SKS 波形资料, 采用最小切向能量的网格搜索法和叠加分析方法求得每一个台站的 SKS 快波偏振方向和快、慢波的时间延迟, 获得了青藏高原东北缘上地幔各向异性图像. 从得到结果看, 青藏高原东北缘的各向异性快波方向基本上呈 NW-SE 方向, 并有一顺时针旋转趋势, 快、慢波时间延迟是 0.70 ~ 1.51 s. 青藏高原东北缘的 SKS 快波偏振方向与区域内主要构造断裂走向基本一致, 各向异性快波偏振方向变化与区域内最小平均主压应力方向变化相似, 也与由 GPS 测量得到的速度场方向变化相似. 研究表明青藏高原东北缘上地幔物质在区域构造应力场的作用下, 发生了顺时针旋转的形变以至流动, 使得上地幔中橄榄岩的晶格排列方向平行于物质形变或流动方向, 上地幔变形和上覆地壳变形可能存在垂直连贯变形特征.

**关键词** 青藏高原, 各向异性, SKS 波, 快波方向, 岩石圈变形

文章编号 0001-5733(2008)02-0431-08

中图分类号 P315

收稿日期 2007-05-11 2007-12-12 收修定稿

## Seismic anisotropy of upper mantle in the northeastern margin of the Tibetan Plateau

CHANG Li-Jun<sup>1</sup>, WANG Chun-Yong<sup>1</sup>, DING Zhi-Feng<sup>1</sup>, ZHOU Min-Du<sup>2</sup>,

YANG Jian-Si<sup>1</sup>, XU Zhi-Qiang<sup>1</sup>, JIANG Xu-Dong<sup>1</sup>, ZHENG Xiu-Fen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

<sup>2</sup> Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China

**Abstract** Based on the polarization analysis of teleseismic SKS waveform data recorded at 30 seismic stations in the regional digital seismograph networks of the northeastern margin of the Tibetan Plateau, the SKS fast-wave direction and the delay time between the fast and slow shear waves at each station were determined by use of the grid searching method of minimum tangent energy and the stacking analysis method, and then we acquired the image of upper mantle anisotropy in the northeastern margin of the Tibetan Plateau. In the study region, the fast-wave polarization direction is basically in NW-SE direction with a clockwise rotation trend, and the delay time falls into the interval from 0.70 to 1.51 s. The fast-wave polarization direction is consistent with the strike of the major faults in the region. The variation of the fast-wave directions is similar to the variation of the minimum average principal compressional stress directions in the northeast margin of the Tibetan Plateau, and to the variation of GPS velocity directions. The research results imply that the regional tectonic stress field has resulted in deformation and flow of upper mantle material with clockwise rotation, and make the alignment of upper mantle peridotite lattice parallel to the direction of material deformation. The deformation of the crust and upper mantle is possibly vertically coherent deformation.

**Keywords** Tibetan Plateau, Anisotropy, SKS wave, Fast-wave direction, Lithospheric deformation

基金项目 国家自然科学基金项目(40334041), 科技部重点国际合作项目(2003DF 000011), 以及中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项(DQJB06B06)联合资助.

作者简介 常利军, 男, 1978 年生, 中国地震局地球物理所实习研究员, 主要从事地球深部构造、地震各向异性等研究. E-mail: ljchang@cea-igp.ac.cn

# 1 引言

1964年, Hess<sup>[1]</sup>发现太平洋中脊存在方位各向异性, 为大洋中脊扩张学说提出了重要的地球物理证据, 揭示了地震波各向异性在地球动力学中的重要性. 自20世纪80年代 Crampin 等<sup>[2]</sup>发现横波分裂现象以来, 地震波各向异性的研究已成为理论地震学、勘探地震学、地球动力学研究以及地震灾害预测中的热点. 研究表明, 上地幔普遍存在各向异性. 上地幔各向异性一般被认为是由于形变导致橄榄岩等矿物晶格的优势排列引起的<sup>[1,3]</sup>. 产生地幔物质形变的原因可能多种多样, 但最为直接的原因是板块运动. 板块运动的速度和方向在很大程度上决定着上地幔各向异性的强度和方向. 在当前的大陆动力学研究中, 我们面对着大陆下方复杂的深部结构和演化过程, 以及大陆下方地壳-地幔耦合变形等方面的重要问题, 而地幔各向异性研究是解决这些问题的有效途径之一<sup>[4,5]</sup>.

长期以来, 许多地球科学家一直关注青藏高原下方的地幔变形问题, 并进行大量与地幔变形有关的介质各向异性研究<sup>[6-12]</sup>. 由于受到观测技术和条件的限制, 对青藏高原东北缘的各向异性研究是初步的. 2000年以来, 中国国家数字地震台网、甘肃和青海等区域数字地震台网相继建成. 这些台站在青藏高原东北缘形成了较密的地震观测台网, 它们的宽频带数字地震记录有助于该地区上地幔各向异性与地球动力学有关问题的地震学研究.

新生代期间, 中国大陆东、西部处于两个不同的地球动力学环境, 西部地区受印度-欧亚板块碰撞及印度板块持续挤入作用的影响, 以地壳缩短增厚和强烈的陆内造山作用、地震活动等为主要特征, 而东部华北地区受新生代期间西太平洋板块向欧亚大陆俯冲作用的影响, 形成裂谷盆地和弧后微型扩展, 并伴有强烈火山活动. 青藏高原东北缘是青藏高原块体与鄂尔多斯块体、阿拉善块体的交汇区<sup>[13,14]</sup>, 新生代构造变形和地震活动强烈. 在这一地区开展上地幔各向异性研究, 对揭示青藏高原东北缘和鄂尔多斯块体之间的深部变形特征和研究大陆内部变形和大陆内部强震机制具有重要的意义.

## 2 资料和方法

### 2.1 研究区域、台站分布和地震资料

图1显示了研究区域(32°N~40°N, 96°E~108°

E)的区域地质构造背景和地震台站的分布. 研究区域由三大构造单元组成, 西南部是内部结构复杂、活动强烈、介质强度较低的青藏高原; 西北部是沉积盖层很薄、基底隆起且古老的阿拉善块体; 东部是完整而稳定的鄂尔多斯块体. 青藏高原在研究区域内由甘孜地块、柴达木地块和祁连地块组成. 区内主要的断裂带有西秦岭北缘断裂、东昆仑断裂、门源断裂、海原断裂和青铜峡-固原断裂<sup>[13,15]</sup>. 来自印度洋板块往北的推挤造成了青藏高原东北部的抬升和地壳增厚, 其周边相对坚硬的阿拉善地块和鄂尔多斯地块在一定程度上对高原的运动起到限制和阻挡的作用.

研究区域内共30个地震台站, 其中甘肃数字地震台网20个台站, 青海和四川数字地震台网9个台站, 以及宁夏的银川台(图1). 本文收集了甘肃数字地震台网从2000~2006年, 青海和四川数字地震台网(以及银川台)从2005~2006年记录的远震SKS波形资料. 远震事件选取的标准是: 震级大于5.5级的深源地震(震源深度>150 km)或震级大于6级的浅源地震(震源深度小于<150 km), 震中距在85°~110°范围内. 本研究总共选取了58个远震事件(图2).

### 2.2 方法

本文使用的SKS波分裂分析方法包括两个步骤: 首先用SC方法(即最小切向能量的网格搜索法, Silver and Chan, 1991)<sup>[5]</sup>分析不同方位的单个事件确定的各向异性参数及其误差, 误差估计采用95%的置信度, 然后对一组由远震事件得到的台站下方各向异性参数, 采用类似于Vinnik et al.(1989)提出的分裂参数法<sup>[16]</sup>做“叠加”处理. 实践证明, “叠加”分析是提高台站SKS波分裂测量质量的有效方法<sup>[17]</sup>. 因此, 本文采用“叠加”方法求取各台站记录到的远震SKS波分裂参数.

震中距为85°~110°远震SKS波, 是近垂直入射到地面台站下方的. 在各向同性介质中, SKS波在穿过核幔边界时, 由P波转换为S波时, S波只有径向分量(SV波), 没有切向分量(SH波). 如果地幔中存在各向异性介质, 则SKS波分裂成一对偏振方向正交的快、慢波. 快、慢波在到达地震台站时, 存在到时差(记为 $\delta t$ )和快波偏振方向(记为 $\varphi$ ). 我们用( $\varphi$ ,  $\delta t$ )描述上地幔各向异性. SKS波在进入各向异性层前, 切向能量为零, 如果能找到某对值( $\varphi$ ,  $\delta t$ ), 对观测记录校正, 使切向能量 $E_t(\varphi, \delta t)$ 最小, 则可推断出介质的各向异性参数. SC方法根据切向能量最小

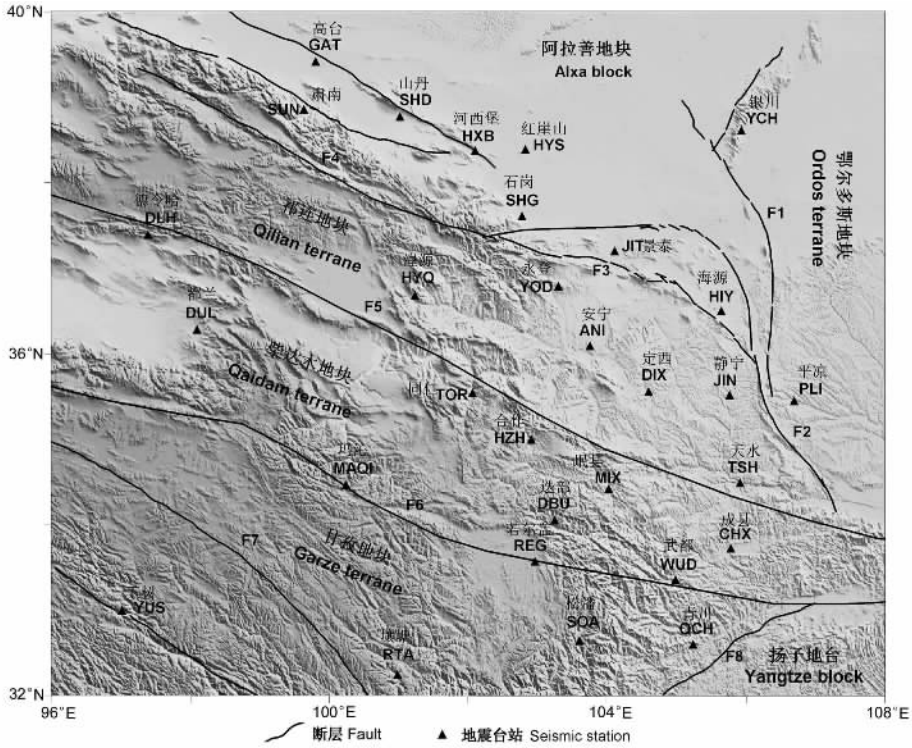


图 1 研究区域地质构造和台站分布

F1 青铜峡-固原断裂, F2 六盘山断裂, F3 海源断裂, F4 门源断裂, F5 西秦岭北缘断裂, F6 东昆仑断裂, F7 主峰断裂, F8 龙门山断裂.

Fig.1 Regional tectonic map of the study region and location of stations

F1 Qingtongxia-Guyuan fault; F2 Liupanshan fault; F3 Haiyuan fault; F4 Menyuan fault; F5 West-Qinling North Margin fault; F6 East-Kunlun fault; F7 Zhufeng fault; F8 Longmenshan fault.

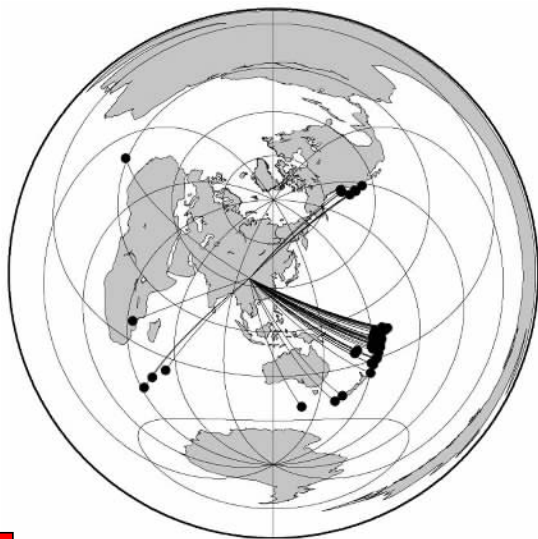


图 2 研究中所用地震事件(黑点)的震中分布

Fig.2 Epicenters of events used in the study (black dots)

原理得到台站下方的各向异性参数( $\varphi, \delta t$ ),其解的误差的估计用  $F$ -试验的置信区域来表示,置信度一般为 95%.在利用 SC 方法分析出不同方位的单

个事件决定的各向异性参数及其误差的基础上,利用“叠加”分析方法处理由一系列远震事件得到的台站下方各向异性参数结果,它类似于 Vinnik 等 (1989)提出的分裂参数法.

假设某一台站有  $N$  个不同反方位的地震事件,对其中的一个事件  $i$ ,在网格搜索过程中,不同的参数对( $\varphi, \delta t$ )对应不同的切向能量  $E_i(\varphi, \delta t)_i$ ,等值线.首先将切向能量  $E_i(\varphi, \delta t)_i$  用其最小切向能量作归一化处理,然后将  $N$  个事件的切向能量  $E_i(\varphi, \delta t)_i$  按照  $E_c(\varphi, \delta t) = \sum E_i(\varphi, \delta t)_i$  进行求和,并用网格搜索  $E_c(\varphi, \delta t)$  中最小的切向能量,与之相对应的那个参数对便是该台站下方最终的各向异性参数,其相应的误差估计也作同样的处理.对于不同信噪比、从不同方位来的远震 SKS 波,这种方法能够提高结果的可靠性.对于干扰背景较大的台站,效果尤为明显.图 3 显示了青藏东北缘的 ANI 台从 2 个远震事件(2002 年 01 月 04 日 19 点 05 分  $M_w 6.2$ ; 2006 年 02 月 24 日 14 点 15 分  $M_w 6.1$ )获得的 SKS 分裂分析结果与使用“叠加”处理后结果的比较,这

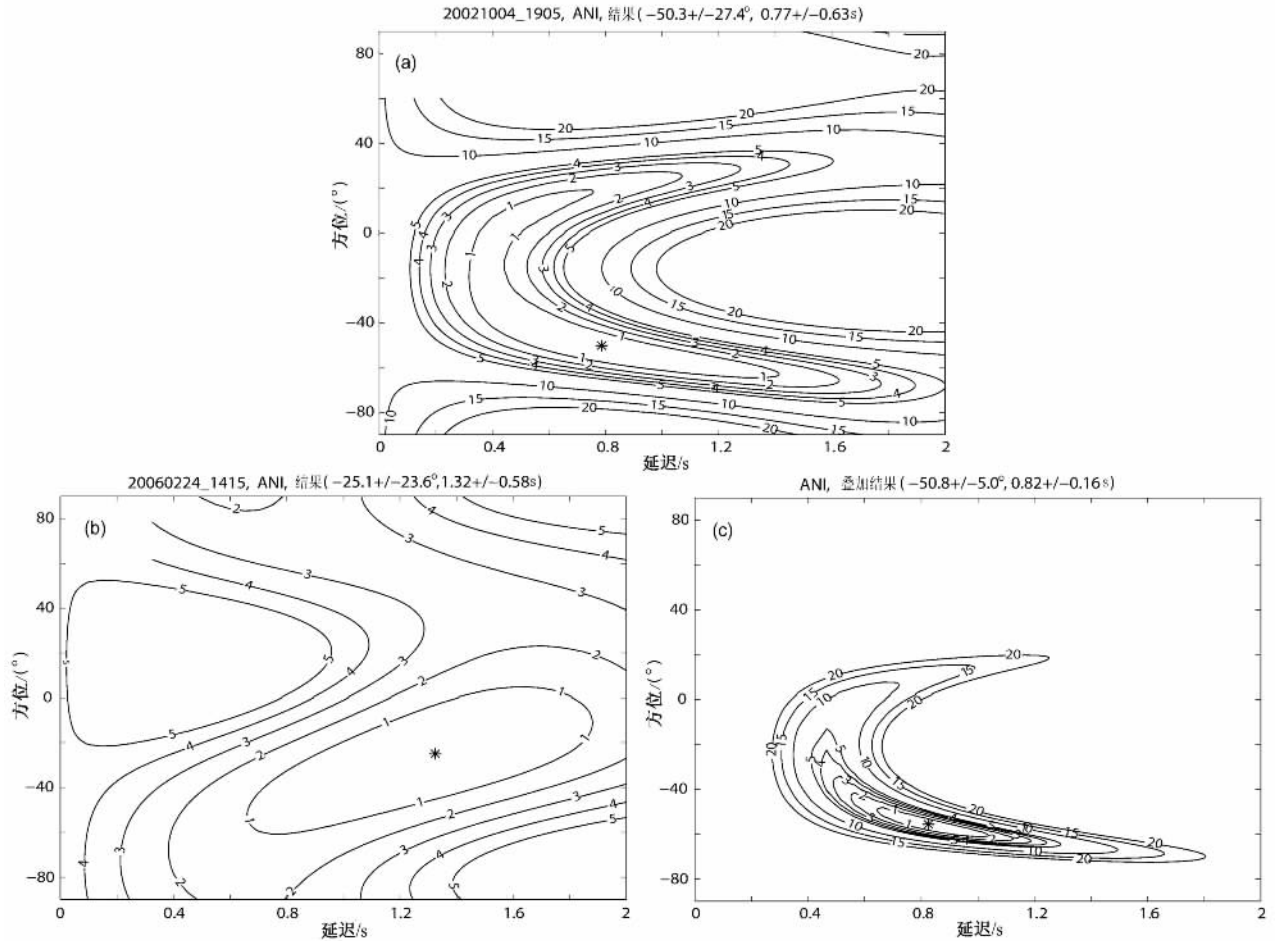


图3 青藏高原东北缘 ANI 台单个远震事件 SKS 分裂分析的切向能量等值线图 (a) 和 (b) 以及由这两个事件叠加得到的切向能量等值线图 (c), 图中星号表示最佳分裂参数的位置

Fig.3 Tangent energy contour of SKS splitting analysis of ANI in Northeastern Tibet from two teleseismic events (a) and (b), and the tangent energy contour of the result after stacking (c), where the asterisk denotes the position of optimal parameter pair

两个分裂参数误差较大的事件, 经过叠加之后最终分裂参数的误差明显减小。

### 3 研究结果与分析

根据上节所述的分析方法, 得到了青藏高原东北缘 30 个台站下方的 SKS 波分裂参数及误差 (表 1)。图 4 显示了每个台站的分裂参数的离散情况。总体而言, 除短周期台站外, 绝大多数台站的测量结果都比较好, 其方位误差在  $10^\circ$  以内, 时间延迟的误差在  $0.2\text{ s}$  以内。我们选用的 58 个地震事件的方位分布比较均匀 (图 2)。在 SKS 波分裂测量中, 在单个事件分析的基础上进行“叠加”分析, 从而提高了 SKS 波分裂测量质量。

一般认为, 地壳和上地幔都普遍存在介质的各向异性。参照 McNamara et al. (1994)<sup>[6]</sup> 分析青藏高原莫霍界面的 PS 转换波的分裂求得地壳的延迟时

间为  $0.17 \sim 0.26\text{ s}$ , 而本文由 SKS 波研究得到的各台站快、慢波时间延迟范围是  $0.70 \sim 1.51\text{ s}$ , 只占 SKS 波分裂的延迟时间总量的  $1/5$  左右。因此, 用 SKS 波分裂测量获得的各向异性可以认为主要是由上地幔各向异性所引起的。图 5 显示了青藏高原东北缘地震台站的远震 SKS 波形资料的偏振分析结果。总体看, 青藏高原东北缘 SKS 波分裂的快波方向呈 NW-SE 向, 从该区西部的近 EW 向顺时针转到中北部的 NWW-SEE 向, 再到东南部边缘的 NNW-SSE 向, 与该区域内主要断裂走向 (图 1) 基本一致。

在该区的西部接近青藏高原内部 (DLH) 快波方向为  $S85^\circ\text{E}$  向, 这与前人在该台附近的格尔木台站得到的结果<sup>[8-10]</sup> 一致。在柴达木地块中部的 TOR, 其快波方向为  $N55^\circ\text{E}$ , 表现出与其他台站的快波方向的不同。在祁连地块和柴达木地块的中东部沿南北向从 YOD 到 WUD (包括 YOD、ANI、DIX、MIX、WUD), 它们的时间延迟都比较小 ( $< 1\text{ s}$ )。位于研究区域东

表 1 研究区域内各台站 SKS 波分裂参数

Table 1 Splitting parameters for SKS phase in the study region

编号	代码	台站名	$\varphi(^{\circ})$	$\Delta\varphi(^{\circ})$	$\delta t(s)$	$\Delta\delta t(s)$	事件数
1	ANI	安宁	128.2	3.7	0.92	0.15	8
2	CHX	成县	121.9	1.8	1.33	0.16	5
3	DBU	迭部	114.5	3.1	1.16	0.13	10
4	DXI	定西	101.2	4.1	0.71	0.07	7
5	GTA	高台	127.2	3.5	0.76	0.14	13
6	HXB	河西堡	122.1	1.7	1.36	0.10	13
7	HYQ	湟源	115.7	1.6	1.15	0.08	18
8	HYS	红崖山	120.2	1.5	1.45	0.13	12
9	HZH	合作	112.3	1.6	1.51	0.09	13
10	JIN	静宁	142.3	2.1	1.33	0.05	16
11	JTA	景泰	127.7	2.6	1.23	0.16	10
12	PIL	平凉	128.6	2.4	1.21	0.11	16
13	SHD	山丹	114.9	5.1	1.01	0.19	4
14	SHG	石岗	127.5	1.3	1.21	0.05	20
15	TSH	天水	121.3	3.3	1.12	0.24	5
16	WUD	武都	94.5	9.4	0.85	0.19	6
17	YOD	永登	101.1	5.8	0.74	0.12	4
18	HAY	海原	120.5	10.2	1.15	0.32	2
19	MIX	岷县	119.7	3.4	0.70	0.13	3
20	SUN	肃南	134.7	2.2	1.13	0.11	3
21	DLH	德令哈	95.2	3.1	0.70	0.08	6
22	DUL	都兰	112.2	4.1	1.26	0.21	4
23	MAQI	玛沁	131.8	3.0	0.82	0.10	4
24	TOR	同仁	55.4	4.6	0.72	0.05	5
25	YUS	玉树	111.3	2.9	1.33	0.24	3
26	QCH	青川	127.5	9.3	1.04	0.15	1
27	REG	若尔盖	129.2	3.2	1.35	0.18	4
28	RTA	壤塘	147.2	3.7	1.31	0.07	7
29	SOA	松潘	135.3	3.8	1.46	0.27	3
30	YCH	银川	139.1	1.5	1.33	0.05	21

注： $\varphi$  和  $\Delta\varphi$  是快波偏振方向及其误差， $\delta t$  和  $\Delta\delta t$  是时间延迟及其误差。

部六盘山一带的 JIN 台的快波方向为  $S38^{\circ}E$ ，PLI 台的快波方向为  $S52^{\circ}E$ ，与王良书等<sup>[18]</sup>的研究结果一致。

根据上地幔橄榄石及其他矿物的含量和实验室的测量结果，推测青藏高原地区快、慢波  $1s$  的到时差相当于  $115\text{ km}$  厚度的各向异性层<sup>[6]</sup>。根据该区得到的 SKS 分裂时间延迟范围是  $0.70 \sim 1.51\text{ s}$ ，估算青藏高原东北缘的各向异性层厚度范围是  $81 \sim 174\text{ km}$ 。在该地区得到的各向异性层厚度存在较大的变化，说明青藏高原东北缘内部变形是不均匀的。其他的地球物理研究结果也表明<sup>[19-22]</sup>，该区地壳上地幔结构呈明显的横向不均匀性。

## 4 讨论与结论

上地幔各向异性一般被认为是由于形变导致地

幔橄榄岩中的晶格优势排列引起的，反映了过去和现在的构造运动产生的大陆下岩石层中的内部变形，因此通过各向异性的研究可以推测地球内部物质运动模式<sup>[4,5]</sup>。对于稳定大陆地区，各向异性被认为是该区最近一次大规模构造运动遗留在岩石圈中的“化石”各向异性；对于构造运动活跃的大陆地区，各向异性反映了正在进行着的地质构造运动。当前对青藏高原演化解释方面，一些研究者提出了下地壳的韧性流动<sup>[23]</sup>和垂直连贯变形机制<sup>[24,25]</sup>，并且得到了一些研究支持<sup>[26-28]</sup>，解释了高原物质围绕喜马拉雅构造结顺时针向东南被挤出的观点。下地壳的韧性流动暗示了上地壳和产生各向异性的岩石圈地幔有着不同的运动模式；而垂直连贯变形则预示着壳幔变形是连贯的，各向异性快波方向可能与地表形变的速度方向一致。

喜马拉雅运动以来，青藏高原向北推挤的过程



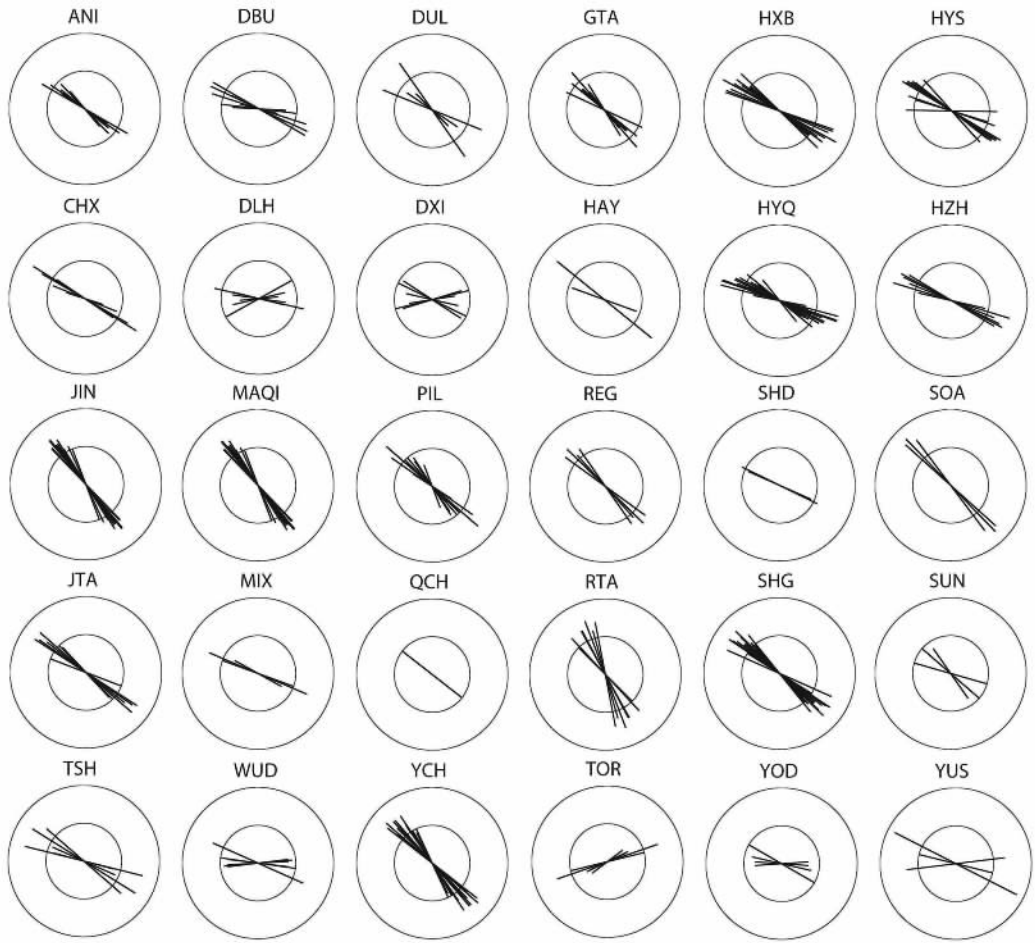


图 4 各台站 SKS 波分裂测量结果

同心圆的半径表示快、慢波的时间延迟,内圈为 1 s,外圈为 2 s.

线段方向代表快波偏振方向,线段长度代表各向异性强度.

Fig. 4 Results of anisotropy measurements of SKS splitting by stations

Radius of concentric circle denotes the delay time between fast and slow waves. Radius of the inner circle is 1 s, outward circle is 2 s. The line direction denotes the fast-wave direction, the line length denotes anisotropic intensity.

中,由于高原东北缘受到鄂尔多斯和阿拉善两个坚硬块体在北部和东部的阻挡作用,在较软的祁连褶皱系的北部形成了一系列弧形断裂带.在这一背景下,青藏高原东北缘的条状块体向东或南东方向滑动,区域内断裂走向主要为 NW 和 NWW 方向,其地壳厚度由东向西、由北向南呈逐渐加厚的趋势<sup>[29]</sup>.我们在青藏高原东北缘各台站得到的各向异性快波方向总体上与主要构造断裂走向平行(如图 1 和图 5)表明上地幔变形和上覆地壳变形可能存在垂直连贯变形特征.少数台站如同仁(TOR)台和若尔盖(REG)台表现出的不一致性,有可能是台站附近的局部地区遗留在岩石圈的“化石”各向异性造成的(例如文献[5]).许忠淮等研究了中国乃至东亚的现今构造应力场变化特征<sup>[30,31]</sup>,在青藏高原东北缘得

到的最小平均主压应力方向主要是北西方向,并有顺时针旋转的趋势,与我们在该地区得到的 SKS 分裂的快波偏振方向变化趋势相似.

根据我们得到的青藏高原东北缘上地幔各向异性图像,快波偏振方向的变化与地壳运动速度场的方向变化<sup>[28,32,33]</sup>相似,但是它们在研究区西北部存在一定的交角.虽然局部地区存在一定交角,但总的趋势是一致的,这反映了青藏高原东北缘受到北东向的挤压和南东向拉张过程中,地壳和上地幔的物质运动方式相似.对于它们之间的交角,可以用 GPS 测量结果反映了当前上地壳的变形,而各向异性快波方向是长期以来岩石层变形的综合反映来解释.

综上所述,青藏高原东北缘的各向异性层主要分布在上地幔.各向异性的快波偏振方向与主要构

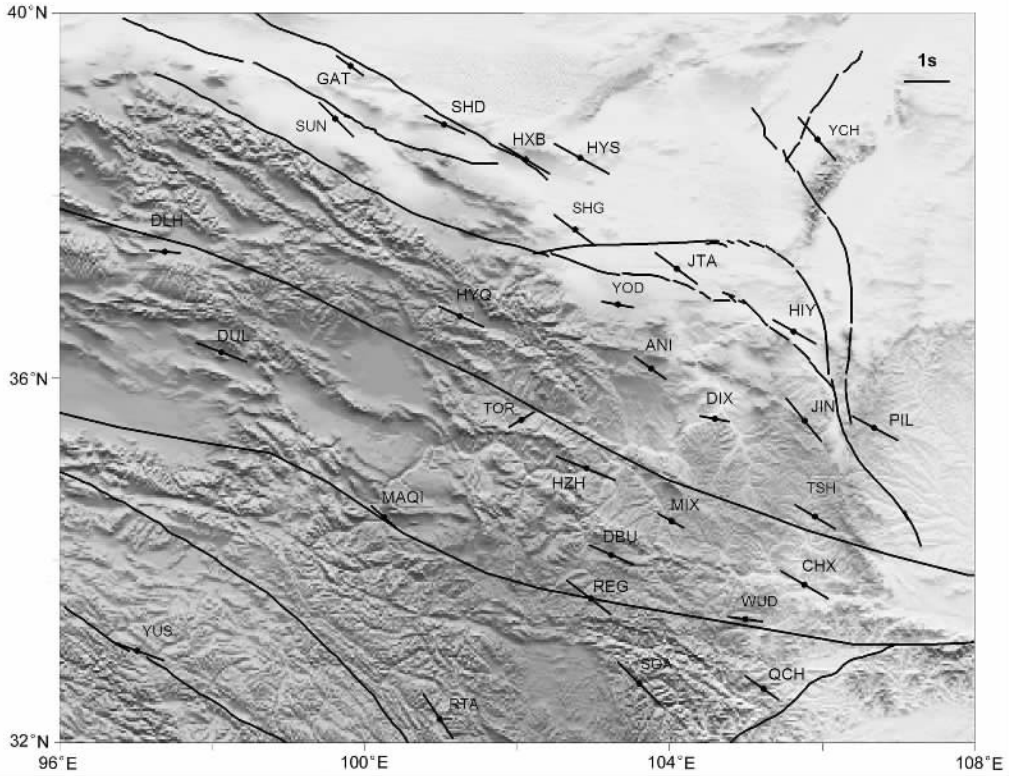


图5 青藏高原东北缘上地幔各向异性图像

Fig.5 Anisotropic image of upper mantle beneath the northeastern margin of the Tibetan Plateau

造断裂走向基本一致,与区域内最小平均主压应力方向相近。青藏高原东北缘向北和北北东推挤过程中,在北部和东部受到鄂尔多斯和阿拉善两个坚硬块体的阻挡,上地幔物质在区域构造应力场的作用下,沿北西-南东方向发生了旋转的形变以至流动,它使上地幔中橄榄岩的晶格排列方向平行于物质形变或流动的方向,上地幔变形和上覆地壳变形可能存在垂直连贯变形特征。

致谢 甘肃、青海、四川区域地震台网和南北地震带地震监测台网提供了宽频带地震资料,Paul Silver, Lucy Fleisch, 许忠淮, 唐方头在方法和解释上给予了帮助。

#### 参考文献(References)

[ 1 ] Hess H H. Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans. *Nature*, 1964, **203**: 629 ~ 631

[ 2 ] Crampin S, Booth D C. Shear-wave polarization near the North Anatolian Fault, II. Interpretation in Terms of Crack-induced Anisotropy. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1985, **83**: 75 ~ 92

[ 3 ] Nicolas A, Christensen N I. Formation of anisotropy in upper mantle peridotites: A review in composition structure and dynamics of the lithosphere-asthenosphere system. *Geodyn. Ser.*, 1987, **16**: 111 ~ 123

[ 4 ] Silver P G, Chan W W. Implication for continental structure and evolution from seismic anisotropy. *Nature*, 1988, **335**: 34 ~ 39

[ 5 ] Silver P G, Chan W W. Share-wave splitting and subcontinental mantle deformation. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**: 16429 ~ 16454

[ 6 ] McNamara D, Owens T, Silver P G, et al. Shear-wave anisotropy beneath the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 13655 ~ 13665

[ 7 ] Hirn A, Jiang M, Sapin M, et al. Seismic anisotropy as an indicator of mantle flow beneath Himalayas and Tibet. *Nature*, 1995, **375**: 571 ~ 574

[ 8 ] 丁志峰, 曾融生. 青藏高原横波分裂的观测研究. *地球物理学报*, 1996, **39**(2): 211 ~ 219  
Ding Z F, Zeng R S. Observation and study of shear wave anisotropy in Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1996, **39**(2): 211 ~ 219

[ 9 ] 姜枚, 许志琴, Hirn A 等. 青藏高原及其部分邻区地震各向异性和上地幔特征. *地球学报*, 2001, **22**(2): 111 ~ 116  
Jiang M, Xu Z Q, Hirn A, et al. Eleseismic anisotropy and correspondig features of upper mantle in Tibetan Plateau and its neighboring areas. *Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese), 2001, **22**(2): 111 ~ 116

[ 10 ] 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)*, 2007, **37**(4): 495 ~ 503  
Wang C Y, Chang L J, Lü Z Y, et al. Seismic anisotropy of upper mantle in eastern Tibetan Plateau and related crust-mantle coupling

- pattern. *Science in China (Series D)* 2007 **37**(4): 495 ~ 503
- [ 11 ] 常利军,王椿镛,丁志峰. 云南地区 SKS 波分裂研究. *地球物理学报* 2006 **49**(1): 197 ~ 204  
Chang L J, Wang C Y, Ding Z F. A study on SKS splitting beneath the Yunnan region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006 **49**(1): 197 ~ 204
- [ 12 ] 吕庆田,马开义,姜枚. 青藏高原南部下的横波各向异性. *地震学报* 1996 **18**(2): 215 ~ 223  
Lü Q T, Ma K Y, Jiang M. Sismic anisotropy beneath Southern Tibet. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1996 **18**(2): 215 ~ 223
- [ 13 ] 黄汲清,任纪舜,姜春发等. 中国大陆构造及其演化. 北京: 科学出版社, 1980  
Huang J Q, Ren J S, Jiang C F, et al. The Tectonic Evolution in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980
- [ 14 ] 田勤俭,丁国瑜. 青藏高原东北隅似三联点构造特征. *中国地震* 1998 **14**(4): 17 ~ 35  
Tian Q J, Ding G Y. The tectonic feature of a quasi trijunction in the northeastern corner of Qinghai Xizang Plateau. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1998 **14**(4): 17 ~ 35
- [ 15 ] 周民都,吕太乙,张元生等. 青藏高原东北缘地质构造背景及地壳结构研究. *地震学报* 2000 **22**(6): 645 ~ 653  
Zhou M D, Lü T Y, Zhang Y S, et al. The geological structure background and the crustal structure in northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2000 **22**(6): 645 ~ 653
- [ 16 ] Vinnik L P, Farra V, Romanowicz B. Azimuthal anisotropy in the Earth from observations of SKS at Geoscope and NARS broadband stations. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1989 **79**: 1542 ~ 1558
- [ 17 ] Wolfe C J, Silver P G. Seismic anisotropy of oceanic upper mantle: Shear wave splitting methodologies and observations. *J. Geophys. Res.*, 1998 **103**(B1): 749 ~ 771
- [ 18 ] 王良书,米宁,童蔚蔚等. 鄂尔多斯西缘岩石圈结构和上地幔各向异性. *中国地球物理学会第 22 届年会年刊* 2006. 589  
Wang L S, Mi N, Tong W W, et al. Lithospheric structure and upper mantle anisotropy of the western Ordos. Chinese Geophysical Society 22 Annual Meeting 2006. 589
- [ 19 ] 陈九辉,刘启元,李顺成等. 青藏高原东北缘—鄂尔多斯地块地壳上地幔 S 波速度结构. *地球物理学报* 2005 **48**(2): 333 ~ 342  
Chen J H, Liu Q Y, Li S C, et al. Crust and upper mantle S wave velocity structure across northeastern Tibetan plateau and Ordos block. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005 **48**(2): 333 ~ 342
- [ 20 ] 李松林,张先康,张成科等. 玛沁—兰州—靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究. *地球物理学报* 2002 **45**(2): 210 ~ 217  
Li S L, Zhang X K, Zhang C K, et al. A preliminary study on the crustal velocity structure of Maqin-Lanzhou-Jingbian by means of deep seismic sounding profile. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002 **45**(2): 210 ~ 217
- [ 21 ] 李永华,吴庆举,安张辉. 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* 2006 **49**(5): 1359 ~ 1368  
Li Y H, Wu Q J, An Z H. The Poisson ratio and crustal structure across the NE Tibetan Plateau determined from receiver functions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006 **49**(5): 1359 ~ 1368
- [ 22 ] Zhang Z J, Klemperer S L. West-east variation in crustal thickness in north Lhasa block, central Tibet from deep seismic sounding data. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 2005 **110**(B9), Art No. B09403
- [ 23 ] Royden L, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 1997 **276**: 788 ~ 790
- [ 24 ] Ricard Y, Ricards M A, Lithgow-Nertelloni C, et al. A geodynamic model of mantle density heterogeneity. *J. Geophys. Res.*, 1993 **98**: 21895 ~ 21909
- [ 25 ] Lithgow-Nertelloni C, Ricards M A. The dynamics of Cenozoic and Mesozoic plate motions. *Rev. Geophys.*, 1998 **36**: 27 ~ 78
- [ 26 ] 吴庆举,曾融生,赵文津. 喜马拉雅—青藏高原的上地幔倾斜构造与陆—陆碰撞过程. *中国科学(D 辑)* 2004 **34**(10): 919 ~ 925  
Wu Q J, Zeng R S, Zhao W J. The upper mantle structure of Tibetan Plateau and implication for continent-continent collision. *Science in China (Ser D)* (in Chinese), 2004 **34**(10): 919 ~ 925
- [ 27 ] Chen Z, Burchfiel B C, Liu Y, et al. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *J. Geophys. Res.* 2000 **105**: 16215 ~ 16228
- [ 28 ] Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology* 2004 **32**(9): 809 ~ 812
- [ 29 ] 丁国瑜. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社, 1991. 438 ~ 445  
Ding G Y. Lithospheres Dynamics of China. Beijing: Seismological Press, 1991. 438 ~ 445
- [ 30 ] 许忠淮,汪素云,黄雨蕊等. 由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征. *地球物理学报* 1987 **30**: 476 ~ 486  
Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, et al. Directions of mean stress axes in southwestern China deduced from microearthquake data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1987 **30**: 476 ~ 486
- [ 31 ] 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  
Xu Z H. A present-day tectonic stress map for eastern Asia region. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001 **23**: 492 ~ 501
- [ 32 ] Wang Q, Zhang P Z, Frevmuller J T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by global positional system measurements. *Science* 2001 **294**: 574 ~ 577
- [ 33 ] 甘卫军,沈正康,张培震等. 青藏高原地壳水平差异运动的观测研究. *大地测量与地球动力学* 2004 **24**(1): 29 ~ 35  
Gan W J, Shen Z K, Zhang P Z, et al. Horizontal crustal movement of Tibetan from GPS measurements. *J. Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2004 **24**(1): 29 ~ 35