

青藏高原西部叶城—狮泉河地区岩石圈各向异性研究

董英君¹, 姜枚², 钱辉³, 宿和平², 薛光琦¹

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国地质科学院 地质研究所 大陆动力学实验室, 北京 100037;
3. 中国矿业大学, 北京 100083)

摘要: 对青藏高原西部新疆叶城—西藏狮泉河地区宽频地震探测记录到的剪切波进行了各向异性分析, 计算结果给出了该地区上地幔各向异性的特征: 西昆仑地区各向异性大都沿北东方向分布, 总体方向变化不大, 各向异性整体走向与青藏高原和塔里木盆地北缘各向异性空间分布一致。由此得出: 印度板块向北推进的构造运动是形成本区岩石圈剪切波各向异性的主要原因, 青藏高原各地体的各向异性在较大的东西向范围内保持稳定, 各地体岩石圈固有的各向异性方向为北东向; 作为羌塘地体和拉萨地体的分界线, 班公—怒江断裂带是主要的地表分界位置, 在深部, 无论西部剖面还是中部剖面, 印度板块岩石圈各向异性在该断裂带上均没有变化。

关键词: 青藏高原; 岩石圈; 各向异性; 剪切波; 叶城—狮泉河地区

中图分类号: P315.3; P542

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)05-0418-07

Anisotropy of lithosphere in Yecheng-Shiquanhe area, western Tibetan Plateau

DONG Yingjun¹, JIANG Mei², QIAN Hui³, SU Heiping² and XUE Guangqi¹

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. China University of Mining, Beijing 100037, China)

Abstract: The authors made an anisotropic analysis of shear waves obtained from broadband seismic experiments along the Yecheng (Xinjiang)-Ali (Tibet) profile. The result reveals the anisotropic characteristics in the upper mantle of western Tibet. The anisotropy is generally in NE direction and the orientation only varies insignificantly, being identical with the anisotropic direction in Tibetan Plateau and northern Tarim. The northward movement of Indian plate plays a key role in forming the shear wave anisotropy within the lithosphere of this region. The anisotropy in all blocks of Tibetan Plateau remains stable in a large EW-trending area. The original anisotropy in the lithosphere of each block stretches northeastward. Bangong-Nujiang faulted belt, as the boundary between Qiangtang block and Lhasa block, is mainly a boundary at the surface. In depth, the anisotropy in Indian lithosphere remains unchanged over Bangong-Nujiang fault belt, both in the western segment and in the central segment of Tibetan Plateau.

Key words: Tibetan Plateau; lithosphere; anisotropy; shear wave; Yecheng-Shiquanhe area

以往的研究已表明, 自燕山—喜马拉雅期以来的印度板块与欧亚板块的碰撞造就了青藏高原, 其构造活动的前锋位于帕米尔高原区, 这是青藏高原平均海拔最高(约 5 000 m)、南北跨度最狭窄(400~500 km)的地段。高原西南端为兴都库什深震区(王盛泽, 1994), 东南为西昆仑地震带, 北东面对天山和塔里木盆地, 这里盆山相间, 活动断层纵横, 地质构造非常复杂。长期以来, 国内外科学界对这一地区的深部构造进行了不同角度的研究, 其中中国地质科学院与国家地震局(1996)及中国地质科学院与台湾省中研院(1997)分别对这一地区进行了深地震探测、深地震反射和宽频地震探测, 为研究

这一地区深部构造提供了诸多信息和新的论点。2001 年笔者参加了中法合作在新疆叶城—西藏狮泉河地区进行的宽频地震探测。该项目是目前在本地区已进行的惟一次宽频地震探测。探测剖面分为两段, 其中西段北起塔里木盆地西南缘的叶城, 经库地断裂、康西瓦断裂穿越昆仑地体进入甜水海地体; 东段北起和田, 穿过上述地体与断裂后, 又经空喀山断裂进入羌塘地体, 再经班公—怒江断裂到达位于冈底斯地体的狮泉河, 剖面全长约 700 km(图 1)。在长达 8 个月的探测中记录到了清晰的剪切波(SKS)分裂, 提供了该地区上地幔各向异性的特征, 为探讨本区的构造应力活动提供了新的依据。

收稿日期: 2005-07-08; 修订日期: 2005-08-03

基金项目: 国土资源部青藏高原研究基金专项资助项目(20001010206); 法国国家科研中心合作项目(CNRS)

作者简介: 董英君(1951-), 女, 副研究员, 主要从事深部地球物理和找矿预测研究。

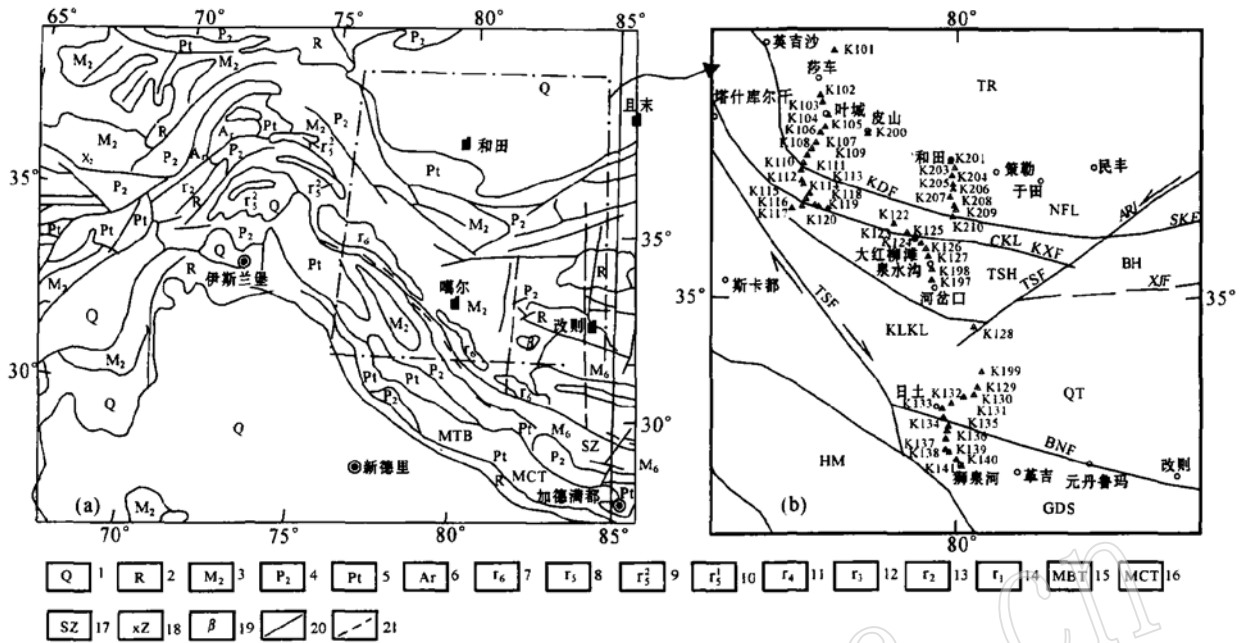


图 1 叶城—狮泉河地震探测剖面的构造地质与台站位置

Fig. 1 Stations along the Yecheng-shiquanhe survey line and geological structures in and around the study zone (a) 探测区地质构造图[据欧亚地质图缩编(吴良士, 待发表)]; (b) 台站位置及构造图

(a) Map showing the local structure near the exploration line (after Wu Liangshi, in press); (b) Structure and seismic stations

- (a): 1—第四系; 2—第三系; 3—中生界; 4—古生界; 5—元古宇; 6—太古宇; 7—喜马拉雅期花岗岩类; 8—燕山晚期花岗岩类; 9—燕山早期花岗岩类; 10—印支期花岗岩类; 11—华力西期花岗岩类; 12—加里东期花岗岩类; 13—元古宙花岗岩类; 14—太古宙花岗岩类; 15—主边界逆掩断裂; 16—主中央逆掩断裂; 17—印度雅鲁藏布江缝合带; 18—兴度库什—帕米尔缝合带; 19—蛇绿岩、超基性—基性岩和第四纪玄武岩; 20—断裂; 21—卫星影像解释断裂; (b): TR—塔里木盆地; NKL—北昆仑地体; CKL—中昆仑地体; TSH—甜水海地体; BH—巴颜喀拉地体; KKKL—喀拉昆仑地体; QT—羌塘地体; GDS—冈底斯地体; HM—喜马拉雅块体; KDF—库地断裂; KXF—康西瓦断裂; ARF—阿尔金断裂; ART—东昆仑断裂带; XJF—金沙江断裂; BNF—班公—怒江断裂; TSF—喀拉昆仑断裂; KKF—空喀山断裂
- (a): 1—Quaternary; 2—Tertiary; 3—Mesozoic; 4—Paleozoic; 5—Proterozoic; 6—Archean; 7—Himalayan granite; 8—Late Yanshanian granite; 9—Early Yanshanian granite; 10—Indosinian granite; 11—Variscian granite; 12—Caledonia granite; 13—Late Paleozoic granite; 14—Archean metamorphic granite; 15—main boundary thrust; 16—main central thrust; 17—Indo_Yaluzangbu suture; 18—Xingdukushi_Pamier suture; 19—ophiolite, ultrabasic_basic rock and Quaternary basalt; 20—fault; 21—interpreted fault from satellite image; (b): TR—Tarim basin; NKL—north Kunlun terrain; CKL—central Kunlun terrain; TSH—Tianshuihai terrain; BH—Bayankala terrain; KKKL—Kalakunlun terrain; QT—Qiangtang terrain; GDS—Gangdise terrain; HM—Himalaya terrain; KDF—Kudi fault; KXF—Kangxiwa fault; ARF—Altyn Tagh fault; ART—East kunlun fault; XJF—Jinsha River fault; BNF—Bangong_Nujiang fault; TSF—Kalakunlun fault; KKF—Kongkashan fault

1 研究方法

剪切波(SKS)是穿过地核的横波,它从震源出发以S波传播到地核,并转换成P波穿过地核,当再次通过核幔边界时又由P波转换成径向偏振的S波传播至记录台站。横波穿过各向异性介质传播会产生分裂现象,分裂成两个偏振方向互相垂直的子波,并以不同的速度传播,速度较快的子波称为快波,其偏振方向平行于各向异性介质速度最快的方向,传播速度较慢的波称为慢波。研究SKS的分裂特征实际上就是通过计算找出快波偏振方向(Ψ)和快慢波相差时间(δt),这对于认识岩石圈、上地幔有重要意义。

此次研究首先据SKS理论到时找出SKS震相,SKS到时依据来自专门网站提供的震中初定(PDE)的震源参数和Jeffrey-Bullen表直接计算。研究SKS波的最佳震中距是在 $70^\circ \sim 90^\circ$ 之间,在 82° 左右,SKS波开始先于S波到达;当震中距小于 95° 左右时,SKS波通常较S波弱,但震中距大于 95° 时,SKS波的振幅通常是很大的(Ota, 1992)。

介质的各向异性与介质的非球对称性所引起的SKS震相切向能量可以通过水平面内的质点的振动轨迹来加以区分:对各向异性介质水平面内质点的运动轨迹为椭圆,而对一般不存在各向异性的非球对称性介质,水平面内质点振动轨迹仍应为直线,虽然其线性偏振方向可能偏离原来的径向方向。另外切向分量与径向分量呈明显的时间偏导数关系。

利用剪切波分裂研究地震各向异性,主要是通过快波的偏振方向(φ)和快慢波到时差(δt)来实现的。 φ 和 δt 的计算方法很多,本文采用最大相关法(Silver and Chan, 1988; 史大年等, 1996)分析计算了各台站的各向异性参数。该方法就是通过逐步旋转两个水平分量,以求最大互相关系数时的旋转角度(φ)。求出 φ 后,再通过前后平移慢波,当相关系数再次达最大时的平移量即为快慢波到时差(δt)。按照上述方法对每一事件-台站对进行计算,在一个台站下则得到多对(φ , δt),选出其中结果接近的将其平均便得到该台站下的平均各向异性参数。

2 计算结果

自2001年6月至2001年11月,布设在西昆仑的53个台站共接收到5.0级以上SKS波事件209次,其中5.5级以上事件66次,震源分布见图2。但由于大多数事件的SKS震相不清晰,信噪比较低,因此本研究仅从中挑选出16次事件。表1为所用事件震源参数表,表中震源位置大都集中在东经 $120^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 北纬 $0^{\circ} \sim -30^{\circ}$ 的范围内。

图3给出了K135台站的计算分析过程。如图所示,当

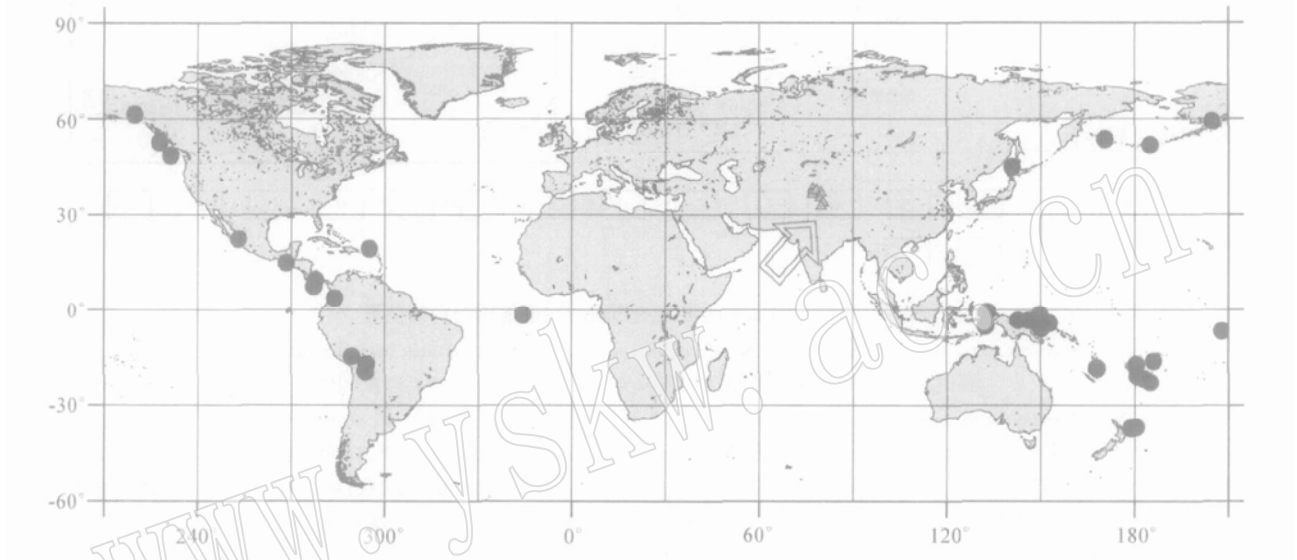


图2 SKS震相的震源分布图

Fig. 2 Map of epicenter distribution used in this anisotropic analysis

黑色圆点为震源位置,空箭头所指三角形为探测台站位置

Black dots show the epicenters, and blank arrows show the stations

表1 各向异性分析中所用事件震源参数

Table 1 Event epicenter parameters used in anisotropic analysis

No.	经度(E°)	纬度(N°)	震级	震源深度/km	方位角/°	震中距/km	震中位置
1	152.108	-6.663	6.2	10	105	82	新不列颠岛
2	185.324	-16.971	5.9	226.6	94	114	汤加群岛
3	132.338	-5.147	6	33	119	67	印度尼西亚阿鲁群岛
4	167.106	-14.7	5.8	82	102	99	瓦努阿图群岛
5	180.425	-36.813	7.2	33	115	121	新西兰北岛东
6	149.919	-4.597	5.0	574	104	79	俾斯麦海
7	169.787	-22.928	5.9	10	109	102	洛亚蒂群岛
8	180.891	-20.993	6.5	608.1	100	113	斐济群岛
9	153.116	-4.677	5.2	33	102	82	瓦努阿图群岛
10	184.990	22.393	6.1	10	101	116	汤加群岛
11	178.158	-26.559	5.9	631.1	109	114	斐济南群岛
12	168.159	-18.503	6.4	33	104	102	瓦努阿图群岛
13	168.121	-18.419	6.2	33	105	102	瓦努阿图群岛
14	168.108	-18.494	6.1	33	104	102	瓦努阿图群岛
15	150.196	-5.912	6.9	33	104	102	新不列颠岛
16	150.207	-6.56	5.3	33	105	80	新不列颠岛

SKS 波在传播路径遇到各向异性层时, 其切向分量的质点轨迹由原来的线性偏振变成了椭圆偏振(图 3k)。使用上述方法对各向异性的影响进行改正, 即在所计算出的多对延迟时间(δt)和快波偏振方向(Ψ)中找到最小的一对(图 3o 等值线中极小点), 改正后其切向分量已变的很小(图 3i), 而质点轨

迹也由椭圆变成了直线(图 3n), 改正后的快慢波起始相位也变成基本一致(图 3g)。这说明各向异性的影响得到了很好的改正, 所计算出的分裂参数具有较高的可靠性。在本项研究中各台站平均延迟时间和快波偏振方向误差变化分别在 0.15~0.44 s 和 4.5°~11°之间。

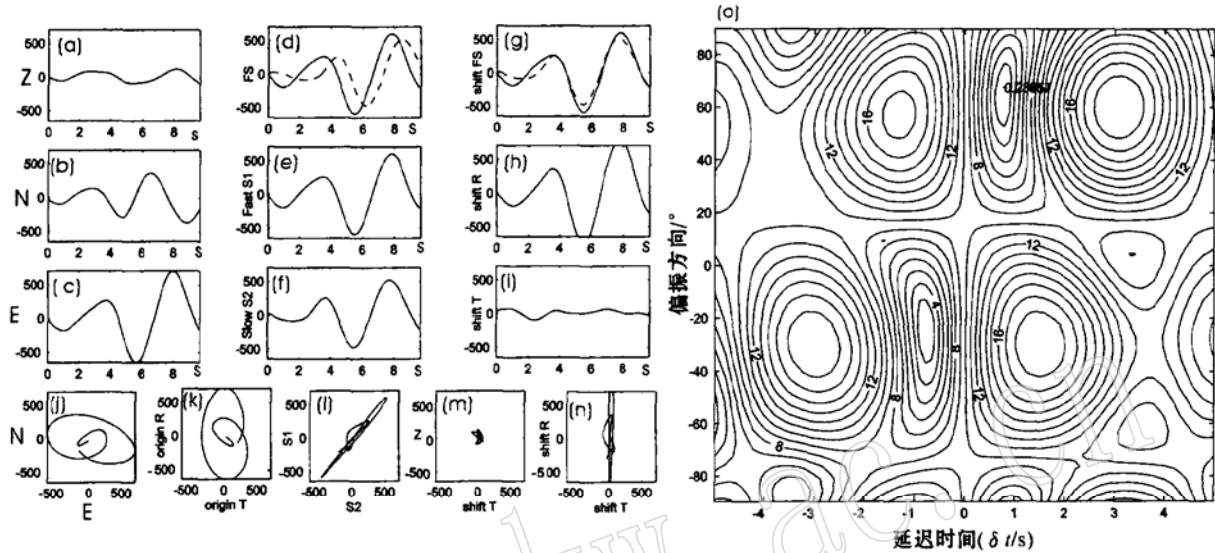


图 3 K135 台站 SKS 波分析流程图

Fig. 3 Flow chart of SKS wave analysis (Station K135)

a—Z 分量; b—N 分量; c—E 分量; d—快波和慢波; e—快波; f—慢波; g—旋转后快波和慢波; h—旋转后径向分量(R); i—旋转后切向分量(T); j—E 波 N 波质点运动轨迹; k—原始径向分量和切向分量质点运动轨迹; l—快波(S1)和慢波(S2)质点运动轨迹; m—Z 分量和切向分量质点运动轨迹; n—旋转后径向分量和切向分量质点运动轨迹; o—分裂参数及误差估计

a—Z; b—N; c—E; d—fast_wave and slow_wave (FS); e—fast_wave (S1); f—slow_wave (S2); g—rotated fast_wave and slow_wave (FS); h—rotated radial component (R); i—rotated transverse component (T); j—E and N particle movement track; k—Originality radial component (R) and component (T) particle movement track; l—fast_wave (S1) and slow_wave (S2) particle movement track; m—Z component and component (T) particle movement track; n—rotated radial component (R) and transverse component (T) particle movement track; o—split parameters and estimated error

图 4 为部分台站计算结果玫瑰图。从图中可见各台站各向异性具有北东向的优势取向。在分析计算过程中, 有的地震事件接收到的台站虽然不少, 但因接收的信号弱或因各种因素干扰得到的波型很不理想。有些台站在某次事件中虽然有较好的 SKS 波到时, 但由于其 N 分量信号很弱, 这样的结果最终均未被采纳, 因此只留下可靠的计算结果(图 5)。

从图 5 可以看出研究区各向异性的空间分布特点如下: ①地区各向异性大都沿北东方向分布, 方向变化不大, 各向异性受断裂影响不明显, 这是青藏高原的主要构造运动方向。②K128 台站各向异性方向与空喀山断裂(阿尔金断裂向西南延续的部分)方向相近, 这与青海茫崖—新疆若羌剖面穿过阿尔金断裂时的各向异性计算结果相似(Wittlinger *et al.*, 1998; 董英君等, 1999)。③K99、K198 和 K197 台站的各向异性延迟时间较其他台站短, 其中 K198 台站在所有的台站中接收 SKS 最多, 计算结果是可信的。这几个台站均位于康西瓦断裂和空喀山断裂之间的甜水海地体, 与相邻的南部羌塘地体和北部的昆仑地体相比, 各向异性的空间分布和延迟均

有差异。④计算中发现有些台站接收到的 SKS 很少, 只能计算出 1~2 次事件的各向异性参数, 如塔里木盆地的 K200 台站只有两次较好的 SKS, 但计算各向异性方向却分别为北东和北西这两个近垂直方向。这一情况与在塔里木盆地南缘的相近位置观测结果(高锐等, 2001)类似。究其原因, 有两种可能: 其一, 说明塔里木盆地古老基底没有受到后期挤压运动影响而保持原有结构, 因而这些台站下方没有各向异性物质存在, 也就观测不到固定的各向异性方向, 但是不远处的 K105 却有各向异性存在, 这之间的差异值得继续研究; 另一种可能是各向异性层的对称轴正好与 SKS 入射角平行或垂直(高锐等, 2001; 罗艳等, 2004)。⑤有些台站观测不到 SKS 分裂, 很难从背景噪声中识别出切向分量, 因此没有得到这些台站下方各向异性参数, 尤其是位于塔里木盆地的 K101、沿康西瓦断裂布设的 K119、K120 和库地断裂附近的 K208、K209 以及狮泉河的 K139、K140 等台站, 其原因除了波型受到的干扰大外, 台站记录信号少也是重要因素。

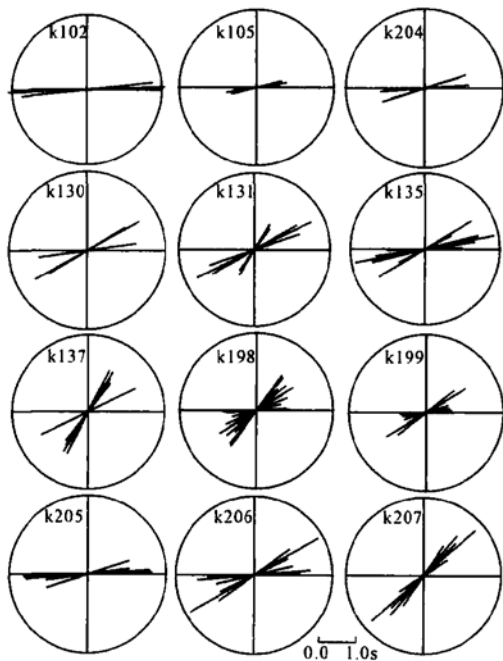


图4 部分台站计算结果玫瑰图

Fig. 4 Rose diagram of results obtained from some stations

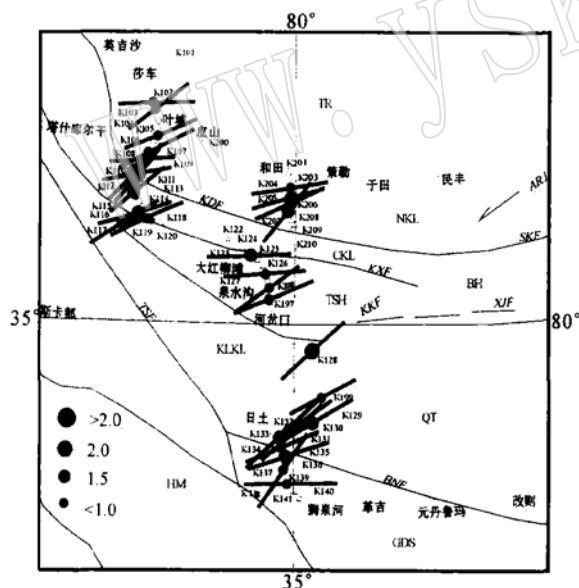


图5 青藏高原西部各向异性计算结果

Fig. 5 Anisotropy of western Tibetan Plateau

黑色短线所示方向为各向异性方向, 黑点为慢波延迟时间, 图中地体和断裂名称与图1相同

Black short line shows fast polarization direction, whereas solid dots indicate time delay between two split components (split time), the names of terrains and faults in the map as for Fig. 1

3 解释与讨论

通常认为地震波各向异性是由上地幔橄榄石晶体的优

势取向(LPO)引起的,但是产生LPO的构造过程仍不十分清楚,笔者偏重于以下观点:各向异性是由过去和现在的构造运动产生的岩石圈整体变形引起的。在构造稳定区,各向异性可解释为最后一次造山运动产生并保存下来的“化石”各向异性,在构造活动区,各向异性反映了正在进行的构造运动(Silver and Chan, 1991)。由SKS分裂计算的各向异性层的深度,理论上应来自核幔边界到台站下的广大范围内,但根据上地幔的物质成分及实际资料研究结果表明,由SKS分裂得到的各向异性层参数反映的各向异性层来自上地幔,并且各向异性层是由与地幔流动变形有关的具有各向异性的橄榄石晶体的优势取向引起的(姜枚等,1996;吕庆田等,1997;黄晓葛等,1999)。橄榄石晶体的优势取向通常都平行于物质流动方向,本项研究结果表明西昆仑地区剪切波各向异性方向总体呈北东 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$,与青藏高原上地幔物质流动方向一致。

上地幔低速层对应于上地幔部分熔融带已是地学界的共识(金振民,1995),而低速层的物质在应力作用下更易变形和流动。研究表明:上地幔上部($< 200\text{ km}$)地震波各向异性明显大于上地幔下部($< 300\text{ km}$) (王子潮,1992)。对照西昆仑地震层析结果(薛光琦等,2004)发现,上地幔的低速体往往是形成各向异性较强的地段。如甜水海地体上地幔 200 m 以上显示为一楔状低速层, 200 m 以下则为直立状高速体。分布于甜水海地区低速区的下地壳或上地幔物质发生部分熔融应该成为主要制约各向异性的因素(薛光琦等,2004)。也就是说,甜水海地体上地幔 200 m 以上楔状低速层与K197、K198、K199等台站的各向异性变化有关。

位于库车断裂附近的K205台站下 200 m 以上地幔为略向北倾的高速体, 200 m 以下则为直立低速体且延伸至 400 m 以下。那么K204、K205、K206和K207台站下方各向异性层只能来自 200 km 以下到核幔边界的全路程中低速层所产生的各向异性的总和。

本次计算结果显示,西昆仑上地幔各向异性层厚度约为 $70\sim 191\text{ km}$ 不等,其中康西瓦断裂和空喀山断裂之间的甜水海地体各向异性层厚度最薄,K199台站其各向异性层亦只有 90 km ,各向异性层最厚的分布在昆仑地体和班公-怒江断裂一带。其他几个位于羌塘地体的台站,其各向异性方向与1992年中法合作各向异性研究结果接近(史大年等,1996)。

1992年以来国内外研究人员在青藏高原及其邻域进行了多次天然地震考察和研究,在各向异性方面的研究也取得了一些成果。图6为青藏高原及其周边地区的各向异性分布,图中塔里木盆地以西为境外资料(Davis, 1997),青藏高原中部德庆-龙尾错为中美合作研究成果(Huang *et al.*, 2000),塔里木南缘4个台站为中国地质科学院和台湾省(高锐等,2001)合作研究成果,其余均为本研究组的研究成果(姜枚等,2003)。

本区取得的岩石圈各向异性的特征(图5)与图6相对比,可以看到构造运动对岩石圈的影响是形成本区岩石圈剪切波各向异性的主要原因。本区的主要应力方向为NE向。

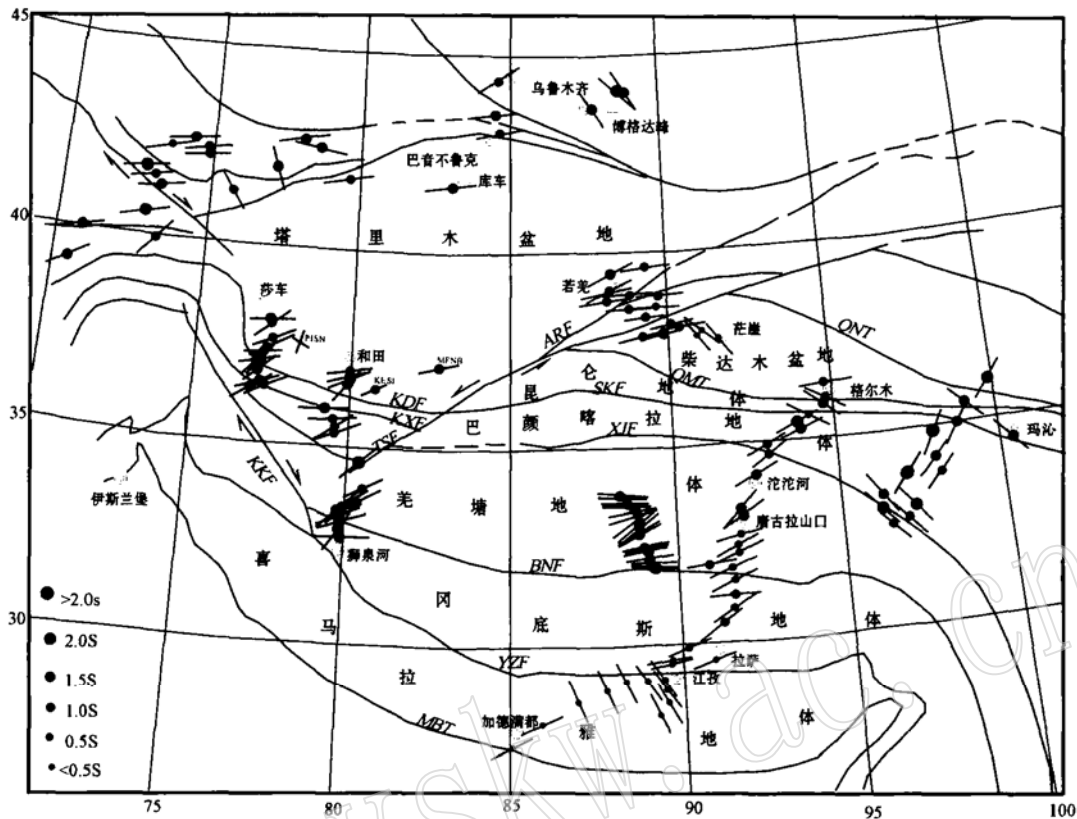


图 6 中国西部及其周边地区剪切波各向异性图

Fig. 6 Shear wave Anisotropy in western China and its neighboring regions

KDF—库地断裂; KXF—康西瓦断裂; ARF—阿尔金断裂; SKT—东昆仑断裂带; XJF—金沙江断裂; BNF—班公—怒江断裂; TSF—喀拉昆仑断裂; YZF—雅江断裂; MBT—主边界逆冲断裂; QNT—柴北缘断裂; MKF—昆中断裂; 黑色短线所示方向为各向异性方向, 黑点为慢波延迟时间

KDF—Kudi fault; KXF—Kangxiwa fault; ARF—Altyn Tagh fault; SKT—South Kunlun fault; XJF—Jinshajiang fault; BNF—Bangong-Nujiang fault; TSF—Kalakunlun fault; YZF—Yarlung Zangpo fault; MBT—Main boundary thrust; QNT—North Qaidam basin fault; MKF—Middle Kunlun fault; The black short line shows fast polarization direction whereas the solid dots show time delay between two split components (split time)

位于日土到狮泉河段的台站正处于班公—怒江断裂的西端, 临近空喀山断裂和喀拉昆仑断裂, 所得到的各向异性方向大致为北东方向, 穿过班公—怒江断裂时其方向没有发生变化, 其方向发生明显变化的位置是在南端狮泉河北部, 离开班公—怒江断裂带约 50 km 各向异性方向转成近东西向(图 5)。该特征与图 6 中穿越青藏高原中段的各向异性特征(姜枚等, 2003)相似, 即各向异性在穿过班公—怒江断裂带时没有改变其北东向方向, 其发生变化的位置正好处于断裂带以南 50~100 km 处。两条相距约 550 km 的剖面结果如此相似, 说明青藏高原各地体的各向异性在较大的东西向范围内保持稳定。以羌塘地体为例, 该地体岩石圈固有的各向异性方向为北东向, 它们在青藏高原地体拼合过程中受印度板块向北推进的影响, 长期受北东向构造作用的影响形成了该地体岩石圈的各向异性, 当然也可能是更早期构造作用下形成的固有的方向, 只是其方向在地体拼合过程中地体内部没有发生大变化。

在青藏高原边缘的走滑断裂附近, 例如北缘的阿尔金断裂附近, 各向异性方向与断裂带方向一致, 与地体边界一致。

班公—怒江断裂带作为羌塘地体和拉萨地体的分界线主要是地壳断裂的分界位置, 在深部, 上地幔各向异性变化的分界线应在断裂带以南 30~50 km 处。Chen 和 Ozalaybey(1998)认为, 这里是欧亚板块向南延伸的断部位置, 而印度板块的北端在安多以北, 两处均为各向异性方向发生变化的位置。

值得注意的另一特征是, 各向异性方向受岩石圈物质运移方向的影响, 在走滑断裂附近的各向异性方向与断裂方向平行, 阿尔金断裂以及高原边缘其他断裂上均有此特征。从金沙江断裂看, 中段各向异性与金沙江断裂有一定夹角, 向东金沙江断裂与各向异性方向非常一致, 这说明金沙江断裂的西部和东部性质有差异, 东部具有走滑性质, 这与地质学上的分析一致(许志琴等, 2001)。而在盆地内部上地幔各向异性往往强度不大, 方向不确定。

感谢许志琴院士、肖序常院士及吴良士研究员对本文的指导与帮助, 同时对中法两国野外科研人员的辛勤工作表示真挚的感谢。

References

- Chen Wangping and Ozalaybey S. 1998. Correlation between seismic anisotropy and Bouguer gravity anomalies in Tibet and its implications for lithospheric structures[J]. *Geophys. J. Int.*, 135(1): 93~101.
- Davis P, England P and Houseman G A. 1997. Comparison of shear wave splitting and finite strain from the India-Asia collision zone [J]. *J. Geophys. Res.*, 102(B12): 27 511~ 27 522.
- Dong Yingjun, Xue Guangqi, Ma Kaiyi, *et al.* 1999. Studies on shear wave anisotropy beneath Altyn-fault system and its adjacent area [J]. *Progress in Geophysics*, 14(4): 58~ 65 (in Chinese with English abstract).
- Gao Rui, Xiao Xuchang, Liu Xun, *et al.* 2001. Detail lithospheric structure of the contact zone of west Kunlun and Tarim revealed by deep seismic reflection profile along the Xinjiang geotranssect [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(6): 547~ 552 (in Chinese with English abstract).
- Huang Weichuang, James F N, Frederik T, *et al.* 2000. Seismic polarization anisotropy beneath the central Tibetan plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 105(B12): 27 979~ 27 989.
- Huang Xiaoge and Bai Wuming. 1999. Research on seismic anisotropy: a review [J]. *Progress in Geophysics*, 14(3): 54~ 60 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Mei, Lü Qingtian and Xue Guangqi. 1995. The study on the structure of crust and upper mantle with natural earthquakes in central Tibetan plateau [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 39(4): 470~ 482 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Mei, Xu Zhiqin, Hirn A, *et al.* 2001. Teleseismic anisotropy and corresponding features of the upper mantle in Tibet plateau and its neighboring areas [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(2): 111~ 116 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhenmin. 1995. Progress on experimental study of dynamic partial melting of upper mantle [J]. *Earth Science*, 20(4): 438 (in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Jiang Mei, Ma Kaiyi, *et al.* 1997. The deformation characters of Qinghai- Xizang lithosphere: implication from earthquake mechanism and seismic anisotropy [J]. *Geological Review*, 43(4): 337~ 346 (in Chinese with English abstract).
- Luo Yan, Huang Zhongxian, Peng Yanju, *et al.* 2004. A study on SKS splitting beneath the China mainland and adjacent regions [J]. 47(5): 813~ 821 (in Chinese with English abstract).
- Ota K. (interpreted by LIU Qiyuan, Wu Ningyuan, Xiu Jigang, *et al.*). 1992. *Anatomy of Seismograms* [M]. Beijing: Seismologic Publishing House (in Chinese).
- Shi Danian, Dong Yingjun and Jiang Mei. 1996. Shear wave anisotropy beneath the Tibetan Plateau [J]. *Global Tectonics and Metallogeny*, 70(4): 10~ 16 (in Chinese with English abstract).
- Silver P G and Chan W W. 1988. Implications for continental structure and evolution from seismic anisotropy [J]. *Nature*, 335: 34~ 39.
- Silver P G and Chan W W. 1991. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation [J]. *J. Geophys. Res.*, 96: 16 429~ 16 454.
- Wang Shengze. 1994. Preliminary study on deep seismic phase and hypocentral localization in Pamir region [J]. *Inland Earthquake*, 8: 34~ 42 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zichao. 1992. New progress in rheology of peridotite in the upper mantle and their geodynamic implication [J]. *Progress on Geophysics*, 10(2): 1~ 15 (in Chinese with English abstract).
- Wittlinger G, Tapponnier P, Poupinet G, *et al.* 1998. Tomographic Evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Tagh fault [J]. *Science*, 28: 74~ 76.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Jiang Mei, *et al.* 2001. Collision orogeny of the northern Qinhai- Tibet plateau and its deep dynamics [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(1): 5~ 10 (in Chinese with English abstract).
- Xue Guangqi, Jiang Mei, Su Heping, *et al.* 2004. Tomographic of the deep tectonics in the Yecheng- Shiquanhe area of the Tibet plateau [J]. 34(4): 329~ 334 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 董英君, 薛光琦, 马开义, 等. 1999. 阿尔金断裂系及邻区剪切波各向异性研究 [J]. *地球物理学进展*, 14(4): 58~ 63.
- 高锐, 肖序常, 刘训, 等. 2001. 新疆地学断面深反射地震反射剖面揭示的西昆仑-塔里木结合带岩石圈的细结构 [J]. *地球学报*, 22(6): 547~ 552.
- 黄晓葛, 白武明. 1999. 地震波速各向异性的研究进展 [J]. *地球物理学进展*, 14(3): 54~ 60.
- 姜枚, 吕庆田, 薛光琦. 1996. 青藏高原中段天然地震探测地壳和上地幔结构的研究 [J]. *地球物理学报*, 39(4): 470~ 482.
- 姜枚, 许志琴, Hirn A, 等. 2003. 青藏高原及其邻区地震各向异性和上地幔特征 [J]. *地球学报*, 27(2): 111~ 116.
- 金振民. 1995. 上地幔动态部分熔融研究的重要发现 [J]. *地球科学*, 20(4): 438.
- 吕庆田, 姜枚, 马开义, 等. 1997. 由震源机制和地震波各向异性探讨青藏高原岩石圈变形 [J]. *地质评论*, 43(4): 337~ 346.
- 罗艳, 黄忠贤, 彭艳菊, 等. 2004. 中国大陆及邻区 SKS 波分裂研究 [J]. *地球物理学报*, 47(5): 813~ 821.
- O. 库尔哈奈克 (刘启元, 吴宁远, 修济刚译). 1992. *地震图解析* [M]. 地震出版社, 150.
- 史大年, 董英君, 姜枚, 等. 1996. 西藏定日-青海格尔木上地幔各向异性研究 [J]. *地质学报*, 70(4): 10~ 16.
- 王盛泽. 1994. 帕米尔地区深震震相特征及震源定位的初步研究 [J]. *内陆地震*, 8(1): 33~ 42.
- 王子潮. 1992. 上地幔橄榄岩流变性研究新进展及其地球动力学意义 [J]. *地球物理学进展*, 10(2): 1~ 15.
- 许志琴, 杨经绥, 姜枚. 2001. 青藏高原北部的碰撞造山及深部动力学——中法地学合作研究新进展 [J]. *地球学报*, 22(1): 5~ 10.
- 薛光琦, 姜枚, 宿和平, 等. 2004. 利用层析成像研究青藏高原叶城-狮泉河地区深部构造 [J]. *中国科学(D辑)*, 34(4): 329~ 334.