

文章编号: 0253-3782(2007)02-0130-12

云南及邻区应力应变场分区耦合 特性初步研究^{*}

马宏生^{1, 2), †} 张国民¹⁾ 刘 杰³⁾ 江在森¹⁾
华 卫^{2, 4)} 王 辉¹⁾ 王新岭¹⁾

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

2) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

3) 中国北京 100036 中国地震台网中心

4) 中国广州 510070 广东省地震局

摘要 利用云南及邻区遥测台网记录到的 6 361 条近震数据, 采用互相关系数法计算 16 个台站共 64 条 S 波分裂事件, 同时收集了 8 个序列的 S 波分裂研究结果, 初步给出了云南及邻区横波分裂的分布特征; 应用哈佛大学给出的 43 个中强震震源机制解, 利用其 P 轴方位角平均结果, 给出了云南及邻区 3 个主要分区地壳应力场的最大主压应力方位; 根据“中国地壳运动观测网络”基本网 1999—2004 年的观测资料, 按观测点给出了云南及邻区的主应变率分布; 此外, 还搜集到云南及邻区的 SKS 分裂结果和 P_n 波各向异性资料. 通过研究发现: ① 作为强震孕育主体环境的大陆岩石圈在横向上具有明显的分块特点; ② 大陆岩石圈的力学行为随深度而变化, 具有明显的分层特性; ③ 云南及邻区所含的各活动地块可能具有不同类型, GPS 所反映的地壳变形信息可能受到块体类型控制; ④ 云南及邻区的地壳 S 波分裂可能受其上地壳甚至地表构造影响较大.

关键词 云南及邻区 横波分裂 大陆岩石圈 应力应变场 层间耦合

中图分类号: P315.72⁺7

文献标识码: A

引言

随着大陆动力学研究的深入, 岩石圈层间耦合作用越来越被地学界所关注(Fuchs, 1997). 岩石圈的层间耦合作用, 应由两个主要因素决定: 一个是力的作用状态或动力来源; 另一个是岩石圈流变结构(宁杰远等, 2003). 大陆岩石圈的构造应力场主要可区分为 3 层, 即岩石圈下层应力场、多震层应力场和浅层地壳应力场(王绳祖, 1985). 大陆岩石圈的力学行为随深度而变化, 具有明显的分层特性, 由脆性、半脆性的上层(上地壳)向半韧性、韧性的下层(下地壳和上地幔)过渡(王绳祖, 1993a). 根据大陆岩石圈网络状流动与多层构造变形的观点(王绳祖, 1993b; 王绳祖等, 2001; Wang, 1993), 板块边缘驱动力主要通过岩石圈下层的网络状塑性流动实现其远程传递, 并牵引上层, 控制板内构造变形和地

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418406)、科技部社会公益项目(2004DIA3J010)和地震科学联合基金(106016)资助.

2006-06-27 收到初稿, 2006-11-14 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者. e-mail: mhs@seis.ac.cn

震活动, 从而形成多层构造应力场. 塑性流动决定了岩石圈下层应力方向的逐渐偏转, 显示出较有规律的变化; 多震层应力方向的变化, 既受下层的控制, 在总的趋势上表现出统一的规律性, 又因边界、构造和块体等因素的影响而导致具体作用方向的偏离; 浅层应力场, 则因地形和人为因素的干扰而偏离下层控制(王绳祖, 2002).

大陆岩石圈的活动地块分区不仅在水平方向上受到活动断裂的围限, 并呈现分区构造应力场的差异; 在垂向上也会受到底部作用的控制, 呈现为不同圈层的力学耦合行为差异. 杨晓松和马瑾(2003)的研究认为, 可以将大陆块体划分为两种基本类型: 地壳型块体和岩石圈型块体. 地壳型块体是由大陆上部地壳所构成, 壳内软弱带为其底部边界带和潜在解耦带; 岩石圈型块体在岩石圈尺度上是力学耦合的, 以上地幔软流圈的顶面为其底部边界. 任金卫(2004)在研究了大陆壳幔运动的耦合关系后, 认为分层的耦合作用对地块的活动性和强震发生等有至关重要的影响.

云南及邻区特殊的构造环境和频繁的强震活动是研究现今构造运动、大陆强震孕育环境和预测未来强震危险区最理想的场所(吴建平等, 2001; 徐锡伟等, 2003; 汪一鹏等, 2003; 乔学军等, 2004; 何正勤等, 2004). 本文通过对云南及邻区岩石圈应力应变场的横向分块和纵向分层研究, 获取各种物理参数所表征的地球物理场信息, 剖析不同圈层间的耦合关系, 深化对各向异性、应力应变场和构造活动过程的认识. 研究内容包括: 地壳 S 波分裂, 中强地震震源机制解, GPS 应变场和反映岩石形变历史的 Pn 各向异性(黄金莉等, 2003), 以及反映上地幔各向异性的 SKS 分裂(常利军等, 2006)等. 研究结果对解释块体运动、韧性层加载、强震成因等深部动力学问题有重要意义.

1 地壳横波分裂

云南地区区域数字地震台网由 26 个数字地震台站组成. 本文选取了除昆明台、个旧台、洱源台、腾冲台外的 22 个数字地震台站(图 1b)周围 10 余公里内的地震观测报告和数字地震波形资料, 由云南省地震遥测台网提供(1999—2005 年). 其中 1999 年 7 月—2003 年 12 月的记录挑选原则是确保同一次地震有 3 个以上台站记录到; 2004 年 1 月—2005 年 10 月的记录均为 $M_L \geq 2.5$ 地震的记录, 并满足同一次地震有 3 个以上台站记录到, 共选出有波形资料的记录 6 361 条. 图 1 给出了研究中所涉及到的地震分布以及台站(代号).

剪切波传播时经过各向异性的介质后发生分裂, 分裂成快波和慢波. 这两个波在近似互相正交的振动方向上以不同的速度传播(Crampin, 1990). 由于剪切波的固有性质与剪切波窗的特殊要求, 剪切波分裂对接收到的波形影响以及地震波的能量都主要集中在东西向与南北向的波形上, 所以计算剪切波的分裂参数就是将东西向与南北向的波形进行旋转分离出快慢波, 计算它们的互相关系数, 互相关系数最大时的快慢波时间差与快波振动方向就是剪切波分裂的延时和快波偏振方向(高原, 郑斯华, 1994; Okada *et al.*, 1994).

本文利用遗传算法进行计算, 自动选择互相关系数最大时的 τ 和 θ 为该记录的延时与快波偏振方向. 在进行计算时, 作如下约束(王新岭等, 2006; 华卫等, 2006):

1) 剪切波窗理论入射角的临界值为 35° . 由于射线在接近地表时, 射线传播时的轨迹趋向垂直方向, 因此实际计算时采用临界角为 60° 的剪切波窗(Shih, Meyer, 1990; Cochran *et al.*, 2003; Peng, Ben-Zion, 2004). 具体措施: 限制 S—P 到时差 ≤ 2.5 s; 利用 S—P 及震中距计算震源深度; 从而保证入射角 $\leq 60^\circ$.

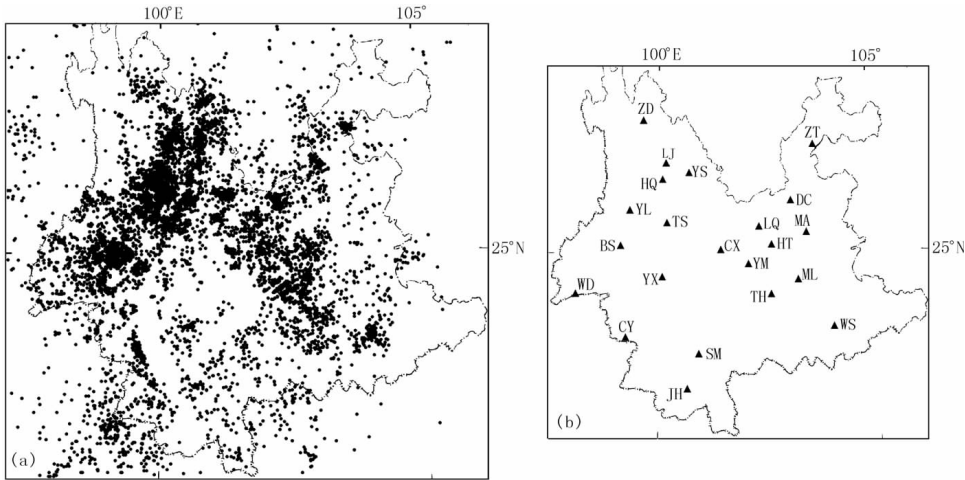


图 1 云南及邻区地震分布和台站位置

(a) 云南及邻区 1999 年 7 月—2005 年 6 月地震分布；(b) 云南地区 22 个数字地震台站分布及台站名称

HT. 黑龙潭；TH. 通海；ML. 弥勒；MA. 马龙；YM. 易门；LQ. 禄劝；CX. 楚雄；YS. 永胜
LJ. 丽江；YL. 云龙；HQ. 鹤庆；DC. 东川；CY. 沧源；SM. 思茅；TS. 团山；BS. 保山
YX. 云县；JH. 景洪；ZD. 中甸；WD. 畹町；WS. 文山；ZT. 昭通

2) 采用带通 5 阶 0.8~10 Hz 的巴特沃兹带通滤波器对原始波形进行了滤波；要求地震波的信噪比(SNR)≥3.0.

3) 地震波东西与南北两个水平向的合成振幅与垂直向的振幅比≥1.5，地震波水平向的两个分量经过旋转和延时校正后合成的纵向能量与切向能量之比≥2.0.

4) 算出的延时如果小于 0.01 s，就认为剪切波没有进行分裂，同时设定最大延时为 0.2 s；快慢波的互相关系数≥0.6.

依据上述规则挑选出符合条件 1)~3) 的地震波记录共计 290 个，占波形总记录的 4.56%；有横波分裂现象的地震记录 64 个，约占总纪录的 1%。表 1 给出了丽江台的相应事件参数、快波偏振方向(Φ)及快慢波到时差(Δt).

由于同一台站接收到不同事件的快波偏振方向不完全一致，为深化对各台站所处构造环境各向异性的认识，采用下面求角度平均值的公式分别计算每个台站接收事件的平均快波偏振方向 $\bar{\theta}$ 与 R 值。 R 值在 0~1.0 之间，其大小反映了快波偏振方向集中的程度，越接近 1.0 说明快波偏振方向越集中(Davis, 1986; Mardia, Jupp, 2000).

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} [(\sum_{i=1}^n \sin \theta_i) / (\sum_{i=1}^n \cos \theta_i)] \tag{1}$$

$$R = \frac{1}{n} \sqrt{(\sum_{i=1}^n \sin \theta_i)^2 + (\sum_{i=1}^n \cos \theta_i)^2} \tag{2}$$

式中， n 为某一台站计算出的事件数， θ_i 为每个事件的快波偏振方向。计算结果列于表 2.

由表 2 可见，偏震分析虽然给出了 16 个台站的平均快波偏振方向，但仅 5 个台站数的分裂事件在 5 个以上。考虑到计算结果的空间尺度的相关性，同时为验证计算结果可靠性，丰富区域内横波分裂观测点个数，本文补充了云南地区 8 个显著序列的 S 波分裂结果，从而初步给出了云南地区横波分裂的分布特征(图 2)。这 8 个序列分别是 1982 年 7 月 3 日剑

表 1 丽江台地震事件参数及偏振测量结果

| 事件编号 | 日期 | 发震时刻 | 震中位置 | | 深度/km | $\Phi/^{\circ}$ | $\Delta t/s$ |
|------|------------|-------------|----------------------|----------------------|-------|-----------------|--------------|
| | 年-月-日 | 时:分:秒 | $\varphi_N/^{\circ}$ | $\lambda_E/^{\circ}$ | | | |
| 563 | 2000-12-06 | 23:15:08.50 | 27.083 | 100.233 | 11.6 | 122.7 | 0.18 |
| 567 | 2000-12-09 | 14:12:57.26 | 27.100 | 100.233 | 10.7 | 70.6 | 0.19 |
| 589 | 2000-12-15 | 23:52:37.68 | 27.083 | 100.233 | 11.6 | 102.5 | 0.18 |
| 686 | 2000-12-31 | 04:56:44.36 | 27.083 | 100.233 | 10.1 | 44.6 | 0.13 |
| 1490 | 2001-08-10 | 02:10:08.82 | 26.983 | 100.367 | 13.0 | 140.7 | 0.08 |
| 1974 | 2001-11-19 | 20:46:34.60 | 26.983 | 100.233 | 13.0 | 167.9 | 0.15 |
| 2558 | 2002-04-15 | 00:44:30.48 | 27.017 | 100.317 | 15.0 | 143.5 | 0.13 |
| 3244 | 2002-09-03 | 20:40:50.22 | 27.000 | 100.333 | 9.0 | 109.3 | 0.13 |
| 3471 | 2002-10-18 | 01:57:18.60 | 26.967 | 100.283 | 10.0 | 26.1 | 0.06 |
| 3720 | 2002-12-10 | 22:55:26.06 | 26.967 | 100.283 | 10.0 | 70.2 | 0.12 |
| 3721 | 2002-12-10 | 23:04:06.44 | 26.967 | 100.283 | 10.0 | 81.0 | 0.12 |
| 4017 | 2003-02-28 | 23:32:01.92 | 26.933 | 100.167 | 24.0 | 170.2 | 0.07 |
| 4033 | 2003-03-02 | 22:46:33.92 | 27.017 | 100.317 | 11.0 | 166.8 | 0.05 |
| 4339 | 2003-05-19 | 04:13:45.48 | 27.000 | 100.300 | 6.0 | 41.9 | 0.05 |
| 4370 | 2003-05-27 | 16:38:59.28 | 27.083 | 100.267 | 14.4 | 24.3 | 0.18 |
| 4635 | 2003-08-01 | 09:11:44.72 | 27.117 | 100.233 | 11.0 | 174.3 | 0.16 |
| 4770 | 2003-08-22 | 02:35:18.96 | 27.033 | 100.233 | 10.0 | 19.6 | 0.16 |
| 5077 | 2003-10-23 | 23:50:32.56 | 26.983 | 100.317 | 11.0 | 34.0 | 0.13 |
| 5080 | 2003-10-24 | 02:50:32.42 | 26.983 | 100.317 | 12.0 | 40.1 | 0.12 |

表 2 云南地区 16 个台站的横波分裂参数

| 台站 | 台站代号 | 事件次数 | $\theta/^{\circ}$ | $\overline{\Delta t}/s$ | R |
|-----|------|------|-------------------|-------------------------|-------|
| 黑龙潭 | HT | 2 | 119.65 | 0.125 | 0.551 |
| 通海 | TH | 2 | 110.00 | 0.120 | 0.995 |
| 弥勒 | ML | 1 | 139.20 | 0.030 | 1.000 |
| 易门 | YM | 10 | 108.06 | 0.113 | 0.644 |
| 楚雄 | CX | 2 | 95.55 | 0.085 | 0.531 |
| 永胜 | YS | 5 | 23.63 | 0.076 | 0.981 |
| 丽江 | LJ | 19 | 89.84 | 0.125 | 0.596 |
| 云龙 | YL | 1 | 46.20 | 0.030 | 1.000 |
| 鹤庆 | HQ | 1 | 113.30 | 0.130 | 1.000 |
| 思茅 | SM | 1 | 140.70 | 0.160 | 1.000 |
| 团山 | TS | 6 | 149.22 | 0.150 | 0.990 |
| 保山 | BS | 7 | 107.86 | 0.057 | 0.616 |
| 云县 | YX | 2 | 98.65 | 0.105 | 0.968 |
| 中甸 | ZD | 1 | 177.00 | 0.100 | 1.000 |
| 畹町 | WD | 3 | 57.71 | 0.147 | 0.464 |
| 文山 | WS | 1 | 162.80 | 0.080 | 1.000 |

川 $M_s5.4$ (雷军等, 1997), 1985 年 4 月 18 日禄劝 $M_s6.1$ (李白基, 1996), 1995 年 10 月 24 日武定 $M_s6.5$ (李白基等, 2002), 2000 年 1 月 15 日姚安 $M_s6.5$ (王新岭等, 2006), 2001 年 4 月 12 日施甸 $M_s5.9$ (高原等, 2004), 2001 年 10 月 27 日永胜 $M_s6.0$ (邬成栋等, 2004), 以及 2003 年 7 月 21 日、10 月 16 日云南大姚 $M_s6.2$ 、 $M_s6.1$ (华卫等, 2006). 表 3 列出了以上 8 个序列横波分裂参数. 图 2 给出了云南及邻区 16 个台站的平均快波偏振方向和 8

个序列的优势或平均快波偏振方向及分区优势方向分布.

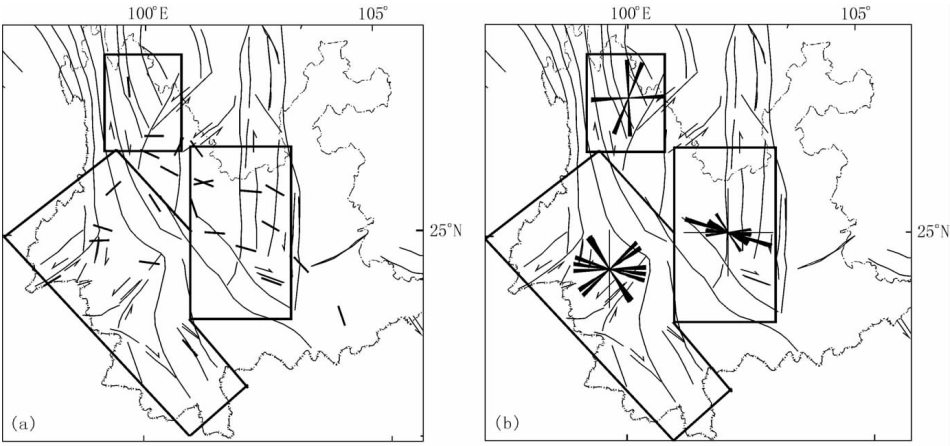


图 2 云南及邻区 16 个台站和 8 个序列的快波偏转方向及分区优势方向
(a) 快波偏转方向; (b) 分区优势方向

表 3 云南地区 8 个序列的横波分裂参数

| 编号 | 日期 | 地点 | 震级 | $\lambda_E/^{\circ}$ | $\varphi_N/^{\circ}$ | 快波方位 | |
|----|------------|----|-----|----------------------|----------------------|------|------|
| 1 | 1982-07-03 | 剑川 | 5.4 | 101.14 | 26.65 | 45° | 305° |
| 2 | 1985-04-18 | 禄劝 | 6.1 | 102.82 | 25.85 | 171° | 120° |
| 3 | 1995-10-24 | 武定 | 6.5 | 102.32 | 25.83 | 32° | 94° |
| 4 | 2000-01-15 | 姚安 | 6.5 | 101.1 | 25.5 | 160° | 177° |
| 5 | 2001-04-12 | 施甸 | 5.9 | 99.07 | 24.87 | 88° | |
| 6 | 2001-10-27 | 永胜 | 6.0 | 100.57 | 26.23 | 340° | 300° |
| 7 | 2003-07-21 | 大姚 | 6.2 | 101.3 | 26.0 | 120° | 80° |
| 8 | 2003-10-16 | 大姚 | 6.1 | 101.3 | 26.0 | 108° | |

表 4 云南及邻区 3 个主要构造分区的平均偏振方向

| 区域 | 相关台站代号 | 序列编号 | $\bar{\theta}/^{\circ}$ | R |
|------|------------------------|---------------|-------------------------|------|
| 滇中块体 | HT, TH, YM, CX | 1, 2, 3, 7, 8 | 109 | 0.95 |
| 滇西南 | YL, SM, TS, BS, YX, WD | 5 | 93 | 0.82 |
| 滇西北 | YS, LJ, ZD | | 35 | 0.78 |

地区、包含腾冲—澜沧断裂带的滇西南地区. 表 4 给出了 3 个主要分区内的台站代号和序列编号, 以及通过台站和序列的优势方向计算得到的各区域平均快波偏振方向与 R 值(表 4、图 2). 下面主要围绕这 3 个分区进行分析.

2 地壳应力场与 GPS 应变场

图 3 是云南及邻区活动断裂的空间分布(邓起东等, 2002)和区域内中强震震源机制解 P 轴的空间展布. 图 3 中的中强震震源机制解参数由哈佛大学给出, 云南及邻区自 1966—2003 年, 共有 43 个结果. 按云南及邻区的构造背景同样可将其进行分组, 其中滇中块体分布 11 个, 滇西北的中甸—丽江—大理地区有 6 个, 滇西南地区 12 个. 从图 3 可以看出,

由图 2 可见, 云南及邻区 S 波分裂的快波偏振方向存在区域性分布特征. 将 16 个台站和 8 个序列的偏振方向按照云南及邻区的区域构造背景大致可分为 3 个区: 滇中块体、滇西北的中甸—丽江—大理

这 3 个分区内地震的震源机制解最大主压应力轴比较接近，为获得区域主压应力场方向，利用角度求平均的方法，给出了云南及邻区的 3 个主要构造分区的震源机制解 P 轴的平均方位，结果见表 5。

表 5 云南及邻区 3 个分区的 GPS 最大主压应变、震源机制解 P 轴、 P_n 快波速和 SKS 快波轴的相关参数

| 地区 | GPS 最大主压应变 | | | 震源机制 P 轴 | | | P_n 各向异性快波速 | | | SKS 分裂快波轴 | | |
|-----|------------|-------------------------|------|------------|-------------------------|------|---------------|-------------------------|------|-----------|-------------------------|------|
| | 个数 | $\bar{\theta}/^{\circ}$ | R | 个数 | $\bar{\theta}/^{\circ}$ | R | 个数 | $\bar{\theta}/^{\circ}$ | R | 个数 | $\bar{\theta}/^{\circ}$ | R |
| 滇中 | 54 | 151 | 0.85 | 11 | 158 | 0.96 | 24 | 169 | 0.94 | 17 | 84 | 0.90 |
| 滇西南 | 75 | 15 | 0.81 | 12 | 28 | 0.95 | 53 | 110 | 0.88 | 14 | 101 | 0.97 |
| 滇西北 | 16 | 134 | 0.73 | 6 | 108 | 0.65 | 16 | 108 | 1.00 | 4 | 9 | 1.00 |

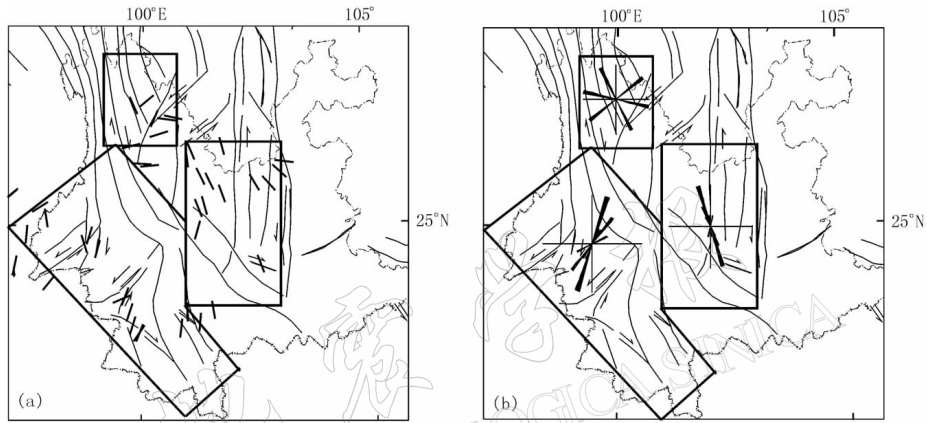


图 3 云南及邻区由 CMT 目录得到的 43 个中强震 P 轴方位及分区优势方向
(a) 43 个中强震 P 轴方位；(b) 分区优势方向

将震源机制解 P 轴的平均结果与前人研究结果(崔效锋, 谢富仁, 1999; 程万正等, 2003; 吴建平等, 2004; 谢富仁等, 2004)相对比, 滇中块体和滇西南地区的最大主压应力方位吻合较好。而滇西北的中甸—丽江—大理这一区域平均的最大主压应力方位, 与王凯英等(2003)的研究结果也有可比性。因此, 本文利用哈佛震源机制解通过角度平均得到的区域应力场能够较有效地代表各分区的背景应力场分布。

在获得了区域背景应力场后, 本文还根据“中国地壳运动观测网络”1999—2004 年的 GPS 资料解算的中国大陆水平运动速度场的结果, 基于连续介质假设, 借助最小二乘配置法, 通过水平运动速度值经验协方差函数获得的水平运动速度场模型(江在森等, 2003), 给出了云南及邻区各观测点的最大主压应变分布(图 4)。

由图 4a 可以看出, 云南及邻区的最大主压应变方位变化趋势从滇中块体的 NNW—SSE 向开始, 到红河断裂带附近呈近 NS 向, 跨过红河断裂带后则有两组优势方位分别为 NNW—SSE 和 NNE—SSW 向; 滇西北的中甸—丽江—大理地区以 NE 向拉张为主, 滇中块体东边界的安宁河—小江断裂带以左旋走滑为主, 而保山—普洱块体变形则比较复杂, 在腾冲—澜沧断裂带附近主要呈 NE 向挤压。这一结果与王琪等(2001)揭示的川滇地区 GPS 运动和杨国华等(2002)得到的川滇菱形块体应变特征一致; 与朱守彪等(2005)采用 Kriging 法获得青藏高原及邻区均匀网格速度后, 根据有限元分析中形函数理论求导得到

的最大主压应变分布基本一致.

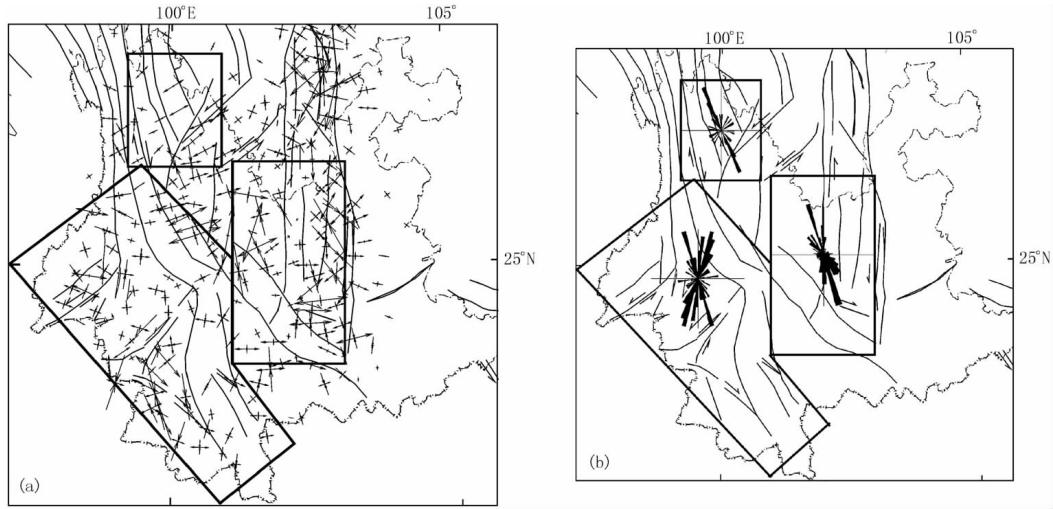


图 4 云南及邻区 1999—2004 年 GPS 最大主压应变方位及分区优势方向
(a) 最大主压应变方位; (b) 分区优势方向

此外, 本文还搜集到川滇地区反映上地幔顶部形变的 Pn 各向异性(黄金莉等, 2003)数据(图 5a), 以及反映上地幔各向异性的 SKS 分裂(常利军等, 2006)结果(图 5b). 同样根据上面分析 S 波分裂及计算区域应力场的分区原则, 分别计算了滇中块体、滇西南地区

和滇西北的中甸—丽江—大理地区最大主压应变的平均方位、Pn 各向异性快波速的平均方位和上地幔 SKS 分裂快波轴的平均方位(表 5).

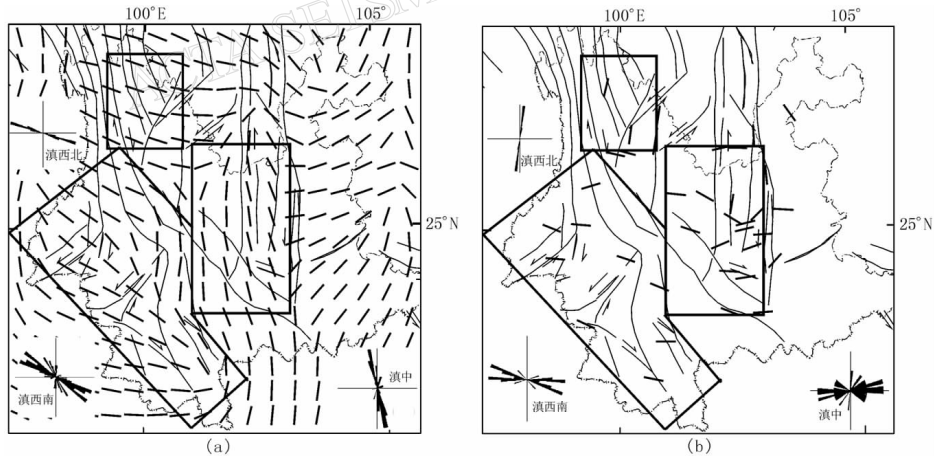


图 5 云南及邻区 Pn 快波轴与 SKS 快波分裂方位及分区优势方向
(a) Pn 快波轴及分区优势方向; (b) SKS 快波分裂方位及分区优势方向

3 不同圈层的力学耦合行为分析

任金卫(2004)在研究了中国大陆由 Pn 波得到的下地壳—上地幔各向异性方位的平均方向与由 GPS、活断层和地震资料联合反演结果获得的上地壳最大剪切方位的平均方向的

差异后认为，在活动性强的构造单元，其深部上地幔塑性剪切带的展布与上地壳脆性剪切带的方位有较大的差异；而活动性弱的构造单元，则差异较小。杨晓松和马瑾(2003)在研究青藏—川滇岩石圈解耦时，同样发现川滇地区反映上地幔顶部各向异性的 Pn 波测量结果与 GPS 和构造地质研究结果存在较大差异。

Hearn 等(1991)和 Hearn(1996)研究认为，上地幔各向异性是岩石圈在形变过程中，由平行于主张应变方向的橄榄石晶轴长轴方向引起的，它指示了速度各向异性的快波方向。因此，我们收集到的 SKS 快波轴和 Pn 各向异性结果主要表征的是最大主张应变方向。但由于我们研究的主要是最大主压应力或应变力学耦合行为，而最大主压应变方位垂直于最大主张应变方向，因此，在图 6b, c, d 中用的最大主压应变方位是将收集到快波数据旋

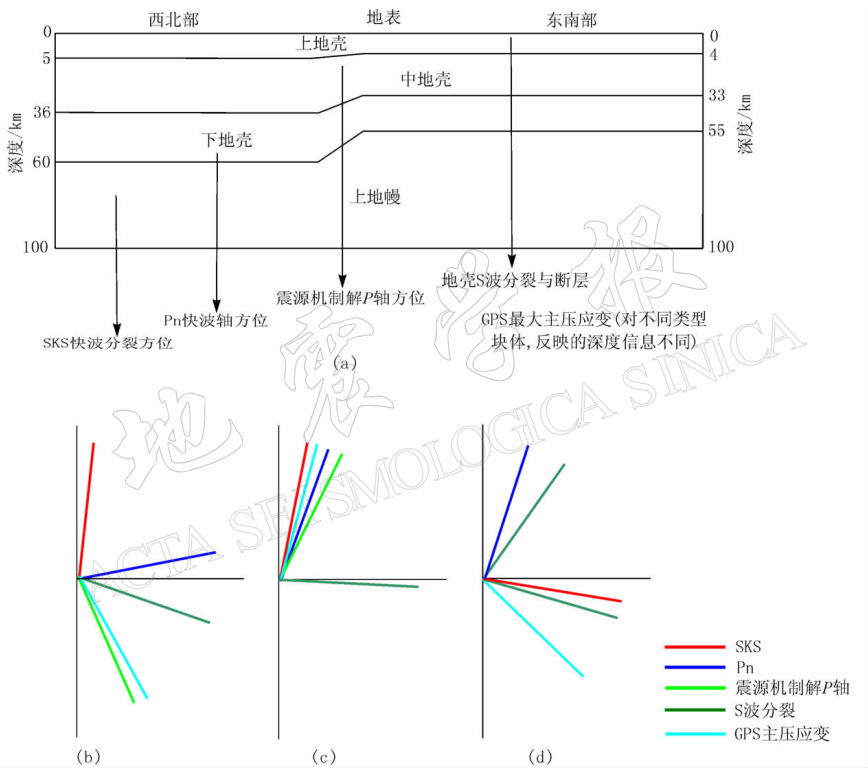


图 6 云南及邻区表征各层位应力应变方位的物理参数及各层位平均方位的分区分布
(a) 不同物理参数所表征的层位示意图；(b) 滇中块体各层位平均方向分布；(c) 滇西南
地区各层位平均方向分布；(d) 滇西北地区各层位平均方向分布

转 90°后的结果。许忠淮等(1989)在用地震资料推断我国大陆构造应力场时的假设是：① 区域构造应力场在时间和空间上稳定；② 多次地震平均的 P, B, T 轴方向可代表区域平均构造应力主轴方向。张国民和李丽(2003)研究结果表明，中国大陆地震深度终止于壳内脆韧性转换带。故多震层应力场应该可由震源机制解反演的区域最大主压应力方位表征。熊熊等(2004)认为，地壳的运动和变形是各种地球动力学过程在地表的综合显现，是地壳介质对板块构造和深部动力过程作用的综合响应，蕴含着丰富的地球内部结构、介质特征和深部过程信息。GPS 应变场代表了现今的地壳和岩石圈的构造运动和变形，其最大主压

应变方向应该与岩石圈深部动力学过程紧密联系,而剪切波的分裂参数主要与传播时经过区域的构造特征和应力场相关(Crampin, 1990; Peng, Ben-Zion, 2005; 赖院根等, 2006),受地震区断层的交错和破裂引起的滑动影响,主要表现的是上地壳区域内的介质性质和应力场方位。

图 6a 是云南及邻区 3 个主要分区的 SKS 分裂反映的上地幔岩石圈最大主压应力、Pn 各向异性反映的莫霍面最大主压应变、中上地壳区域应力场的最大主压应力、地壳 S 波分裂快波偏振方向和 GPS 最大主压应变的平均方位及其代表的层位分布示意图。

由图 2 至图 6 可见,云南及邻区不同层位上的应力应变耦合状态在横向分布上有较强烈的变化。从整体而言,滇中块体与滇西南地区有一定的规律可言,滇西北地区则非常复杂。代表层位力学行为较清楚的 3 个参量,SKS 分裂反映的上地幔岩石圈最大主压应力、Pn 各向异性反映的莫霍面最大主压应变、震源机制解 P 轴反映的中上地壳最大主压应力,自深部向浅部变化的规律,无论在滇中块体还是滇西南地区都呈现顺时针旋转的特征。滇中块体 3 个参量的夹角变化很大,而滇西南则相对比较集中,可能分别对应着杨晓松和马瑾等(2003)提出的地壳型块体和岩石圈型块体。至于 GPS 应变场所反映的深度信息,从本研究来看,对地壳型块体,如滇中块体,主要反映的是中上地壳的变形信息,其平均应变方位与震源机制解 P 轴反映的中上地壳最大主压应力方位一致;而对岩石圈型块体,如滇西南地区,则可能反映的更多的是整个岩石圈的变形情况,其平均应变方位与 SKS 分裂反映的上地幔岩石圈最大主压应力更为接近。引起 S 波分裂的原因是地壳中存在有效的各向异性介质体,即垂直平行裂隙系。造成形成这种介质的原因,Crampin(1990)认为是应力场的作用,水平的或近似水平的主压应力使平行于主压应力的裂隙张裂扩大,垂直主压应力的裂隙封闭缩小,这种按应力方向排列的充液微裂隙和孔隙称为 EDA 裂隙。本文研究发现:无论滇中还是滇西南,地壳 S 波分裂快波平均方位与 SKS 分裂反映的上地幔岩石圈最大主压应力、Pn 各向异性反映的莫霍面最大主压应变、震源机制解 P 轴反映的中上地壳最大主压应力以及 GPS 反演得到的主压应变方位分区变化并不完全一致,其方位在云南及邻区总体呈现为 NW—SE 向。从前人序列研究结果来看,似有一定可信度。这种现象究竟是由于上地壳的介质构造差异,还是其它原因造成的,值得做更为深入地探讨。

4 讨论和结论

本文利用云南及邻区遥测台网记录到的 6 361 条近震数据,采用互相关系数法计算 16 个台站共 64 条 S 波分裂事件,同时收集了 8 个序列的 S 波分裂研究结果,从而初步给出了云南地区横波分裂的分布特征;由哈佛大学给出的 43 个中强震震源机制解,利用其 P 轴方位通过角度平均计算,给出了云南及邻区 3 个主要分区地壳应力场的最大主应力方位;根据“中国地壳运动观测网络”基本网 1999—2004 年的观测资料,按观测点给出了云南及邻区的主应变率分布;此外,还搜集到云南及邻区的 SKS 分裂结果和 Pn 波各向异性资料。通过研究发现:

- 1) 作为强震孕育主体环境的大陆岩石圈在横向上具有明显的分块特点,各参量在 3 个分区,特别是滇中块体和滇西南地区,显示出不同分布特征。

- 2) 无论滇中块体还是滇西南,岩石圈力学耦合行为在纵向具有明显的分层特征,从岩石圈下部到中上地壳,都呈现顺时针旋转的特征。

3) 从大陆岩石圈力学耦合行为的分层变化来看, 滇中块体可能属于地壳型块体, 滇西南地区属于岩石圈型块体。

4) 从本研究 GPS 应变场所反映的深度信息来看, 对地壳型块体, 如滇中块体, 主要反映的是中上地壳的变形信息; 而对岩石圈型块体, 如滇西南地区, 则可能反映的更多的是整个岩石圈的变形情况。

5) 地壳 S 波分裂快波的平均方位, 无论滇中还是滇西南, 可能更多的是反映了上地壳或地表的某个层位的裂隙排列, 与区域构造有一定联系。

6) 对于滇西北地区, 由本研究所得到的反映不同层位应力应变场方位的物理参数来看, 状态非常复杂, 可能与其位于川滇地区运动场和变形场的旋转中心区有关。

一些区域的部分参量方位分布十分分散, 可能与分区范围有关。由于云南及邻区构造复杂, 各分区中有不同构造体系, 而造成一些区域的部分参量方向并非一组、而是多组。如果能有更为细致的划分, 其结果会更加合理。但由于目前能够获取的数据较少, 而且分区又是借鉴了“大陆强震机理与预测”项目给出的活动块体划分, 相对而言较为宏观。然而, 从本文涉及的 5 种参量、3 个分区共 15 个平均结果看, 就其玫瑰花瓣图的离散程度而言, 仅 3 个计算的结果可靠性较差, 因此整体而言本研究给出的统计结果基本反映了云南及邻区岩石圈应力应变场的横向分块和纵向分层特征, 对揭示中国大陆活动地块构造及其块体运动特征, 以及块体边界带的构造变形对强震的控制作用等动力学问题有一定意义。

中国地震局地震预测研究所黄金莉研究员提供了相关的 Pn 数据; 云南省地震局苏有锦研究员、付虹研究员和云南省地震遥测台网的同志对本工作给予了多方面支持和帮助; 审稿者提出了许多有益的参考意见。作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 常利军, 王椿镛, 丁志峰. 2006. 云南及邻区 SKS 分裂研究[J]. 地球物理学报, **49**(1): 212-224.
- 程万正, 刁桂苓, 吕弋培. 2003. 川滇地块的震源力学机制、运动速率和活动方式[J]. 地震地质, **25**(1): 71-87.
- 崔效锋, 谢富仁. 1999. 利用震源机制解资料对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究[J]. 地震学报, **21**(5): 513-522.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D辑), **32**(12): 1 020-1 030.
- 高原, 梁维, 丁香, 等. 2004. 云南 2001 年施甸地震的剪切波分裂参数变化特征[J]. 地震学报, **26**(6): 576-582.
- 高原, 郑斯华. 1994. 唐山地区剪切波分裂研究(II): 相关函数分析法[J]. 中国地震, **10**(增刊): 22-32.
- 何正勤, 叶太兰, 苏伟. 2004. 云南及邻区地壳中上部横波速度结构研究[J]. 地球物理学报, **47**(5): 838-844.
- 华卫, 刘杰, 陈章立, 等. 2006. 2003 年云南大姚 6.2 级、6.1 级地震余震序列 S 波分裂研究[J]. 地震学报, **28**(4): 357-371.
- 黄金莉, 宋晓东, 汪素云. 2003. 川滇地区上地幔顶部 Pn 速度细结构[J]. 中国科学(D辑), **33**(增刊): 144-150.
- 江在森, 马宗晋, 张希, 等. 2003. GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形[J]. 地球物理学报, **46**(3): 352-358.
- 赖院根, 刘启元, 陈九辉, 等. 2006. 首都圈地区横波分裂与地壳应力场特征[J]. 地球物理学报, **49**(1): 189-196.
- 雷军, 王培德, 姚陈, 等. 1997. 云南剑川近场横波特征及其与构造的关系[J]. 地球物理学报, **40**(6): 791-801.
- 李白基, 秦嘉政, 钱晓东. 2002. 1995 年武定 6.5 级地震余震的 S 波分裂[J]. 地震研究, **25**(2): 108-114.
- 李白基. 1996. 云南禄劝地震余震分裂 S 波的变化[J]. 地震学报, **18**(2): 224-230.
- 宁杰远, 臧绍先, 王曙光, 等. 2003. 底部水平拖曳作用下岩石圈的层间耦合[J]. 中国科学(D辑), **33**(增刊): 33-44.
- 乔学军, 王琪, 杜瑞林. 2004. 川滇地区活动地块现今地壳形变特征[J]. 地球物理学报, **47**(5): 805-811.

- 任金卫. 2004. 中国大陆壳幔运动耦合作用分析[J]. 地震地质, **26**(4): 566-575.
- 汪一鹏, 沈军, 王琪, 等. 2003. 川滇块体的侧向挤出问题[J]. 地学前缘, **10**(特刊): 188-192.
- 王凯英, 马瑾, 顾国华. 2003. 1996 年川滇地区发生的一次应力转向事件[J]. 地学前缘, **10**(特刊): 233-239.
- 王琪, 张培震, 牛之俊, 等. 2001. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. 中国科学, **31**(7): 529-536.
- 王绳祖. 1985. 岩石共轭剪切网络的实验研究[G]//国家地震局地质研究所编. 现代地壳运动研究(1). 北京: 地震出版社: 171-178, 190-192.
- 王绳祖. 1993a. 亚洲大陆岩石圈多层构造模型和塑性流动网络[J]. 地质学报, **67**(1): 1-18.
- 王绳祖. 1993b. 岩石的脆性-延性转变及塑性流动网络[J]. 地球物理学进展, **8**(4): 25-37.
- 王绳祖, 张四昌, 田勤俭, 等. 2001. 大陆动力学: 网状塑性流动与多级构造变形[M]. 北京: 地震出版社: 215.
- 王绳祖. 2002. 青藏高原岩石圈多层构造应力场[J]. 地震, **22**(3): 21-26.
- 王新岭, 刘杰, 张国民, 等. 2006. 2000 年姚安地震余震序列的剪切波分裂研究[J]. 地震学报, **28**(2): 119-131.
- 邬成栋, 秦嘉政, 皇甫岗. 2004. 永胜 6.0 级地震的余震 S 波分裂研究[J]. 地震研究, **27**(2): 140-145.
- 吴建平, 明跃红, 王椿镛. 2001. 云南数字地震台站下方的 S 波速度结构研究[J]. 地球物理学报, **44**(2): 228-237.
- 吴建平, 明跃红, 王椿镛. 2004. 云南及邻区中小地震震源机制及构造应力场研究[J]. 地震学报, **26**(5): 457-465.
- 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛. 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, **47**(4): 654-662.
- 熊熊, 藤吉文, 郑勇. 2004. 中国大陆地壳运动的 GPS 观测及相关动力学研究[J]. 地球物理学进展, **19**(1): 16-25.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J]. 中国科学, **33**(增刊): 151-162.
- 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 等. 1989. 由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场[J]. 地球物理学报, **32**(6): 636-647.
- 杨国华, 李延兴, 韩月萍, 等. 2002. 中国西部地壳现今变形特征及其机制探讨[J]. 测绘学报, **31**(4): 292-299.
- 杨晓松, 马瑾. 2003. 大陆岩石圈解耦及块体运动讨论: 以青藏高原—川滇地区为例[J]. 地学前缘, **10**(特刊): 240-247.
- 张国民, 李丽. 2003. 地壳介质的流变性与孕震模型[J]. 地震地质, **25**(1): 1-10.
- 朱守彪, 蔡永恩, 石耀霖. 2005. 青藏高原及邻区现今地应变率场的计算及其结果的地球动力学意义[J]. 地球物理学报, **48**(5): 1 053-1 061.
- Cochran E S, Vidale J E, Li Y G. 2003. Near-fault anisotropy following the Hector Mine earthquake[J]. *J Geophys Res*, **108**(B9): 2 436-2 447.
- Crampin S. 1990. The scattering of shear waves in the crust[J]. *Pure Appl Geophys*, **132**: 67-91.
- Davis J C. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*[M]. Hoboken N J: John Wiley: 649.
- Fuchs K. 1997. Synopsis SFB 108: Stress and stress release in the lithosphere[J]. *Tectonophysics*, **275**(1-3): 1-13.
- Hearn T M, Beghoul N, Barazangi M. 1991. Tomography of the western United States from regional arrival times[J]. *J Geophys Res*, **96**: 16 369-16 381.
- Hearn T M. 1996. Anisotropic Pn Tomography in the western United States[J]. *J Geophys Res*, **101**: 8 403-8 414.
- Mardia K V, Jupp P E. 2000. *Directional Statistics*[M]. Hoboken N J: John Wiley: 429.
- Okada T, Matsuzawa T, Matsumoto S, et al. 1994. Shear wave splitting observed in the southwestern part of Fukushima prefecture, northeastern Japan[J]. *J Phys Earth*, **42**: 303-319.
- Peng Z, Ben-Zion Y. 2004. Systematic analysis of crustal anisotropy along the Karadere-Düzce branch of the North Anatolian fault[J]. *Geophys J Int*, **159**: 253-274.
- Peng Z, Ben-Zion Y. 2005. Spatiotemporal variations of crustal anisotropy from similar events in aftershocks of the 1999 M7.4 Izmit and M7.1 Düzce, Turkey, earthquake sequences[J]. *Geophys J Int*, **160**: 1-17.
- Shih X R, Meyer R P. 1990. Observation of shear wave splitting from nature events: South Moat of Long Valley Caldera, California, June 29 to August 12, 1982[J]. *J Geophys Res*, **95**: 11 179-11 196.
- Wang S Z. 1993. Net-like earthquake distribution and plastic-flow network in central and eastern Asia[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **77**: 177-188.

COUPLING CHARACTERISTICS OF STRESS AND STRAIN AT DIFFERENT LAYERS OF DIFFERENT SUB-REGIONS IN YUNNAN AND ITS ADJACENT AREAS

Ma Hongsheng^{1,2)} Zhang Guomin¹⁾ Liu Jie³⁾ Jiang Zaisen¹⁾
Hua Wei^{2,4)} Wang Hui¹⁾ Wang Xinling¹⁾

1) *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

2) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

3) *China Earthquake Networks Center, Beijing 100036, China*

4) *Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China*

Abstract: In this paper, we collect 6 361 waveform data to calculate the shear wave splitting parameters from a regional seismic network of 22 digital stations in Yunnan and its adjacent area from July 1999 to June 2005. By using the cross-correlation method, 64 splitting events of 16 stations are processed. We also collect the splitting results of 8 earthquake sequences to present the characteristics of shear wave splitting in Yunnan and its adjacent areas. The orientations of maximum principal compressive stress of 3 sub-regions in this area are derived from the CMT focal mechanism solutions of 43 moderate-strong earthquakes provided by Harvard University by the P axis azimuth-averaging method. The principal strain rate at each observatory is deduced from the observations of Crustal Movement Observation Network of China during the period from 1999 to 2004. In addition, the data of Pn anisotropy and SKS splitting of Yunnan and its adjacent areas are also collected. We have discovered from this study that the continental lithosphere, as a main seismogenic environment for strong earthquake, can be divided into blocks laterally; the mechanical behavior of lithosphere varies with depth and can be divided into different layers in the vertical orientation; the information of crustal deformation obtained from GPS might be affected by the type of blocks, since there are different types of active blocks in Yunnan and its adjacent areas; the shear wave splitting in this region might be affected mainly by the upper crust or even the surface tectonics.

Key words: Yunnan and its adjacent areas; shear wave splitting; continental lithosphere; stress and strain; coupling of different layers