

文章编号: 0253-3782(2005)05-0508-07

福建沿海边缘陆域的原地 应力测量研究^{*}

李 宏 安其美 谢富仁

(中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所)

摘要 通过在福建沿海边缘陆域地区活动断裂带附近进行水压致裂原地应力测量, 得到了地表浅部构造应力的大小、方向和分布特征。根据实测的地应力资料, 用库仑摩擦滑动准则分析研究了断裂带的性质和活动性。结果表明: ① 沿海岸线边缘自北向南, 其最大水平主压应力方向为北西向, 与测区北西向断裂带走向近于平行, 与地质构造、跨断层形变测量等方法反映的主压应力方向大体一致, 与震源机制解反映的主压应力方向夹角 20°左右; ② 水平主应力值随深度增加而增大, 与垂直应力值的关系为 $S_H > S_V > S_h$ 和 $S_H \approx S_V > S_h$, 应力状态有利于走滑断层和正断层活动; ③ 利用库仑摩擦滑动准则, 摩擦强度取 0.6~1.0 分析, 断层附近的现今地应力状态达到或超过产生正断层摩擦滑动的临界值, 表明测区现今构造活动以正断层为主; ④ 反映出本区现今构造应力场的力源主要来自太平洋板块向西和菲律宾板块向北西对欧亚板块的水平挤压作用。

关键词 福建沿海 活动断裂带 水压致裂地应力测量 库仑摩擦滑动准则

中图分类号: P553 **文献标识码:** A

引言

中国大陆东南沿海边缘是认识洋、陆岩石圈板块相互运动、物质交换、能量传递及其影响的重要窗口。福建沿海是经济发达地区, 又是多次发生过地震乃至强震的地区。因此, 现今地壳应力状态的测量研究, 对于大陆动力学、边缘海动力学、地震学和防震减灾研究具有重要意义。

水压致裂技术, 起源于美国肯萨斯修果顿天然气田, 它是石油和天然气开采的重要的增产措施。1957 年 Hubbert 和 Willis(1957)发表了水压致裂产生的张破裂与周围应力关系的理论研究成果, 经过几十年理论和实验研究, 水压致裂地应力测量成了目前测量地壳深部应力有效而实用的方法。

用水压致裂法对上述研究区域进行了现今构造应力状态测量。结果表明, 测区内最大水平主压应力方向为北西—北西西向, 与北西向断裂带近于平行, 与北东向断裂带近于垂直。反映了构造活动力源主要来自太平洋板块向西和菲律宾板块向北西方向对欧亚板块的联合挤压(丁祥煥, 1999; 陈玉等, 1982)。利用库仑摩擦滑动准则和地应力实测资料, 研究了断裂带的活动性, 在测量深度域内水平和垂直应力的关系为 $S_H > S_V > S_h$ 和 $S_H \approx S_V >$

* 国家发展与改革委员会发改投资[2004]1138 资助。中国地震局地壳应力研究所论著 2005A012。
2005-02-01 收到初稿, 2005-05-30 收到修改稿, 2005-06-07 决定采用。

S_h . 该应力状态有利于走滑断层和正断层活动, 与地质资料反映的以正断层活动为主基本一致。

1 测区主要地质构造特征

测区广泛发育北北东—北东和北西—北北西两组断裂系, 共同构成了东南沿海地区的主要构造格局(图 1). 北西—北北西向断裂主要沿 320° 方向延伸, 自东北向西南主要有观前—三都澳断裂带、顺昌—福清断裂带、永安—晋江断裂带和上杭—诏安断裂带. 这些断裂均为晚更新世以来活动断裂, 部分断裂为全新世活动断裂, 断裂活动方式以张性正断层为主. 北北东—北东向活动断裂规模较大, 超壳断裂较多, 活动性强, 多为带右旋剪切性质的倾滑型断层, 控制着中、新生代沉积和岩浆活动. 该断裂主要有: 政和—海丰断裂带、长乐—诏安断裂带和邵武—河源断裂带等, 多为晚更新世或全新世活动断裂. 展布于沿海及邻海域的北西—北北西向断裂系, 自北向南几乎平行间隔排列, 它们不仅错断北东向断裂带, 而且还控制着沿岸第四纪断陷盆地的形成和发育, 控制着水系走向和海岸港湾分布. 在与北东向断裂带交会处常有火山、温泉和强震分布(丁祥煥等, 1999; 陈玉仁等, 1982).

2 原地应力测量结果

2.1 闽北地区

在周宁进行了 3 个 $300\sim500$ m 深孔的地应力测量. 测孔位于闽北观前—三都澳北西向断裂带东段. 周宁地区地貌为中山-中低山地形夹杂着一些山间盆地, 应力测量部位属强烈剥蚀的中低山地貌. 地层岩性为肉红色与乳白色钾长花岗岩, 新鲜完整坚硬. 测孔孔口高程分别为 522.73, 634.81 m 和 588 m. 孔深分别为 340.17, 450.20 m 和 402.10 m. 孔间水平距离在 200 m 之内. 测孔深度超过地形地貌的影响范围, 测量结果能较好地反映较深部的应力状态. 其水平最大主应力为 $12\sim17$ MPa, 水平最小主应力为 10 MPa 左右, 垂直应力是由静岩压力估计的, 水平主应力随深度增加而增大(图 2). 水平最大主压应力的方向为 $N42^{\circ}W$ 左右(图 1).

在宁德飞峦进行了 3 个钻孔的原地应力测量, 钻孔位于观前—三都澳北西向断裂带东段滨海边缘, 与寿宁—华安北东向断裂带为邻. 在区域构造运动影响下, 北西、北东向两组构造交会, 断裂带、裂隙密集带、构造线大部分为斑岩充填. 测区处于闽东火山喷发带内, 主要为一套上侏罗系酸性火山碎屑熔岩和火山碎屑岩. 其主要岩性为灰、浅灰色流纹

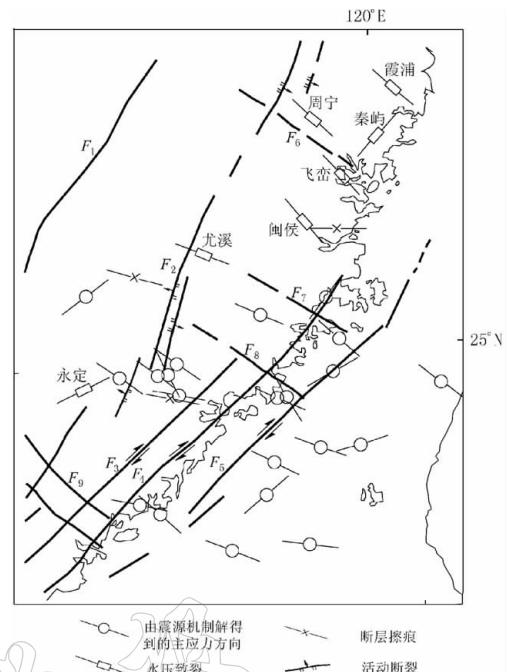


图 1 地质构造和构造应力主方向
(图中地名为水压致裂测点所在地区)

F_1 . 邵武—河源断裂带; F_2 . 政和—海丰断裂带;
 F_3 . 福清东张—诏安汀洋断裂带; F_4 . 长乐—诏安断裂带;
 F_5 . 牛山岛—兄弟屿断裂带; F_6 . 观前—
三都澳断裂带; F_7 . 顺昌—福清断裂带; F_8 . 永安—
晋江断裂带; F_9 . 上杭—诏安断裂带

质凝灰岩。测孔孔口高程分别为 505.93, 208.26 m 和 268.26 m, 孔深分别为 429.00, 204.01 m 和 150.06 m。水平最大主应力为 10~15 MPa, 水平最小主应力为 6~9 MPa, 水平主应力随深度增加而增大(图 3)。水平最大主压应力的方向为 N36°W 左右(图 1)。

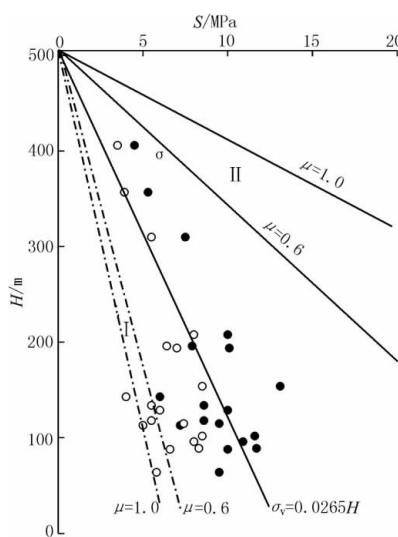


图 2 周宁地区地应力随深度分布及正断层与逆断层活动临界区

- 实测水平最大主应力; ○ 实测水平最
小主应力; I. 正断层活动 σ_h 临界区;

II. 逆断层活动 σ_H 临界区

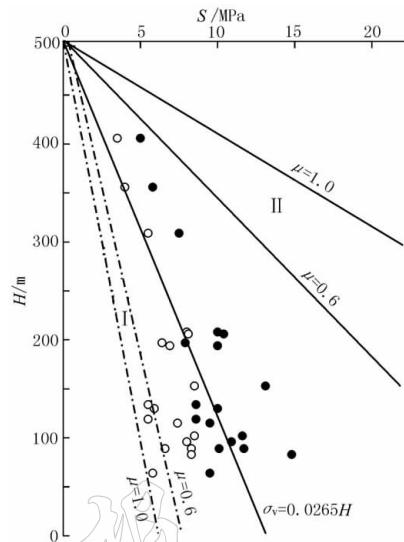


图 3 宁德飞峦地应力随深度分布及正断层与逆断层活动临界区

- 实测水平最大主应力; ○ 实测水平最
小主应力; I. 正断层活动 σ_h 临界区;

II. 逆断层活动 σ_H 临界区

在福鼎霞浦进行了 4 个钻孔的原地应力测量, 钻孔位于霞浦—福鼎北东向断层南侧。受区域不同构造活动的影响, 发育有不同方向的次级断层和密集的节理带, 总体而言为北东—北东东向, 属张扭性断层, 测孔岩性为钾长花岗岩。测孔孔口高程分别为 216.32, 235.55, 227.34 m 和 296.69 m, 孔深分别为 184.88, 184.54, 184.50 m 和 245.50 m。水平最大主应力为 5~13 MPa, 水平最小主应力为 4~9 MPa, 水平主应力随深度增加而增大(图 4)。水平最大主压应力的方向为 N48°E 左右(图 1)。

在福鼎秦屿进行了两个钻孔的原地应力测量, 钻孔位于霞浦—福鼎北东向断层东南侧。测区具有代表性的流江—秦屿构造带, 走向为 NNE 向, 为压扭性断层, 测孔岩性为浅灰色晶屑凝灰岩。测孔孔口高程分别为 268.58 m 和 296.69 m, 孔深分别为 380.57 m 和 301.00 m。水平最大主应力为 5~13 MPa, 水平最小主应力为 3~8 MPa, 水平主应力随深度增加而增大(图 5)。水平最大主压应力的方向为 N42°W 左右(图 1)。

2.2 闽中地区

在闽侯进行了 1 个钻孔的原地应力测量, 钻孔位于长乐—诏安北北东断裂带的北段, 主要构造以北东为主, 北西向次之。地层主要为侏罗系上统南园组第二段, 岩性为凝灰熔岩夹凝灰岩。测孔孔口高程约 400 m, 孔深 365 m。水平最大主应力为 7~10 MPa, 水平最小主应力为 4~7 MPa, 水平主应力随深度增加而增大(图 6)。水平最大主压应力的方向为 N35°W 左右(图 1)。

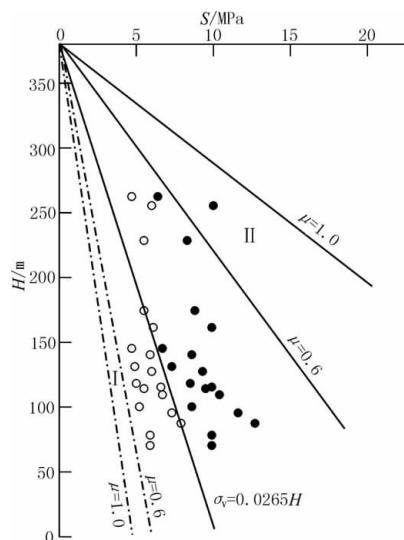


图 4 福鼎霞浦地应力随深度分布及正断层与逆断层活动临界区

- 实测水平最大主应力; ○ 实测水平最小主应力;
- I. 正断层活动 σ_h 临界区;
- II. 逆断层活动 σ_h 临界区

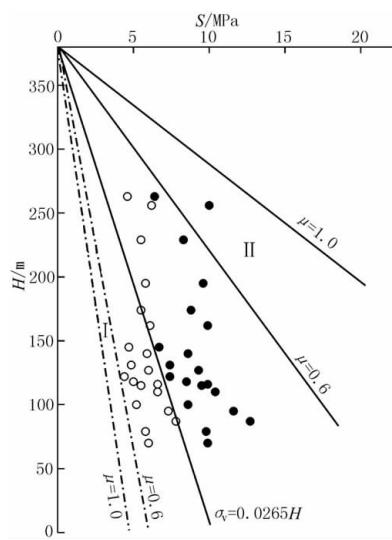


图 5 福鼎秦屿地应力随深度分布及正断层与逆断层活动临界区

- 实测水平最大主应力; ○ 实测水平最小主应力;
- I. 正断层活动 σ_h 临界区;
- II. 逆断层活动 σ_h 临界区

3 福建沿海边缘原地应力状态与断层活动性分析

3.1 福建沿海边缘原地应力状态

图 1 给出了福建沿海边缘陆域 7 个不同深度钻孔中测量的主压应力轴的方向, 以及 3 个测点断层滑动资料和 22 次地震的主压应力轴的分布。主压应力轴基本呈 NW—WNW 向, 大致呈“扇形”, 由陆域指向海洋。这一结果表明, 影响我国福建沿海陆域边缘新构造断裂运动性质的构造应力, 主要来自印度块体对中国大陆的碰撞, 以及太平洋板块和菲律宾板块沿冲绳—台湾岛弧的俯冲作用。水压致裂应力测量资料反映的主压应力轴为 NW 向, 断层滑动资料和震源机制解资料反映的主压应力轴为 WNW 向, 相差 20° 左右。由北向南水平主压应力轴的方向有从 NW 方向逐渐向 WNW 方向偏转的趋势。黄松风(2003)利用 1989—2002 年共 14 a 多个场地的跨断层水准测量成果得出, 长乐—诏安断裂带所有断层受力性质基本相同, 这些断裂总体上受到同一应力场作用, 以压性逆断作用为主。

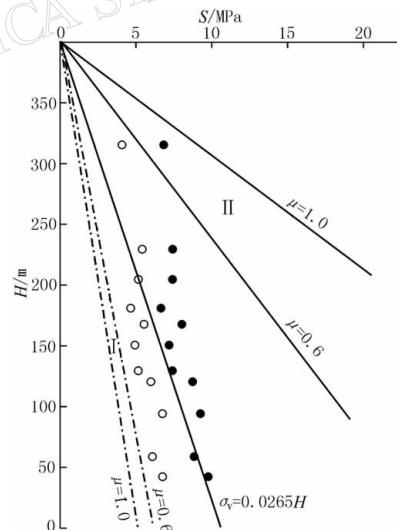


图 6 闽侯地应力随深度分布及正断层与逆断层活动临界区

- 实测水平最大主应力; ○ 实测水平最小主应力;
- I. 正断层活动 σ_h 临界区;
- II. 逆断层活动 σ_h 临界区

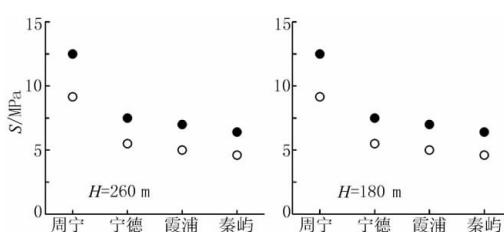


图 7 福建西北部—东南濒海陆域应力分布特征
● 实测水平最大主应力；○ 实测水平最小主应力

时，则分别有利于逆断层、走滑断层和正断层活动。

库仑准则指出，如果断层面的剪切应力 τ 大于等于阻碍滑动的摩擦力 $\mu\sigma_n$ 时，沿断层面就会产生摩擦滑动。其中， μ 是根据试验确定的断层的“摩擦系数”，或称“摩擦强度”； σ_n 是断层面上的正应力。引入有效应力的概念，最大与最小有效主应力之比可简单地表示为“摩擦系数” μ 的函数。当断层的固有强度或内聚力为 0 时，可用下式来表示 (Jaeger, Cook, 1979)：

$$\frac{S_1 - P_0}{S_3 - P_0} = [(1 + \mu^2)^{1/2} + \mu]^2 \quad (1)$$

式中， S_1 和 S_3 分别为断层面外围的最大与最小主应力值， P_0 为孔隙压力，中间主应力 S_2 作用在断层面内。若最大与最小有效主应力之比小于此值则断层面稳定，若大于等于此值则在方位合适的层面上可能发生活动。所谓方位合适的层面是指，断层面的法线方向与最大主应力 S_1 的夹角为 ϕ ，这里 ϕ 与 μ 的关系由下式给出：

$$\phi = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \arctan \mu \right) \quad (2)$$

Byerlee (1978) 综合各种类型岩石的试验资料得出，在应力值小于 100 MPa 时，大部分岩石的 μ 值为 0.85。李方全等 (1993) 对三峡坝区花岗岩、灰岩和砂岩进行的三轴摩擦试验结果得出，在正应力小于 150~250 MPa 范围内，岩石摩擦强度的下限大体为 $\tau = 0.65 \sigma_n$ 。其上限为 $\tau = 1.10 \sigma_n$ ，平均 $\tau = 0.85 \sigma_n$ 。Zoback 和 Hickman (1982) 以及 Zoback 和 Healy (1984) 在判断浅部断层活动时，认为 μ 取 0.6~1.0 是合理的。

图 2~6 给出了不同测区水平最大主应力 S_H 、水平最小主应力 S_h 和由静岩压力估计的垂直应力 S_v 随深度分布，以及逆断层和正断层活动相应的水平主应力临界区。孔隙压力 P_0 。根据钻孔水位按静水压力考虑。在周宁和宁德飞峦地区 3 个主应力值之间的关系为 $S_H \approx S_v > S_h$ ，应力状态有利于走滑和正断层活动；在福鼎霞浦、秦屿和闽侯地区 3 个主应力值之间的关系为 $S_H > S_v > S_h$ ，应力状态有利于走滑断层活动。下面根据实测应力状态及其随深度的变化，分别讨论正断层、逆断层和走滑断层活动的可能性。

1) 正断层、逆断层活动。一般而言，垂直应力按静岩压力估计是合理的。如果发生正断层活动，则要求水平最小主应力小于临界值。在图 2~6 中，在周宁和宁德飞峦地区水平最小主应力的实测值在高程 100 m 左右已经进入临界区，在其它 3 个测区部分测点接近临界区，说明在福建沿海边缘陆域 NW 向的部分断层具有发生正断层活动可能性。在 5 个测区的地应力状态，垂直应力基本上是中间主应力或与水平最大主应力接近，这种应力状态

图 7 给出了周宁—东南濒海陆域霞浦和秦屿高程 260 m 和 180 m 的水平最大和最小主应力的变化。从相同高程上水平应力的大小看，由西北部的周宁—东南濒海陆域霞浦和秦屿，水平主应力值呈逐渐下降趋势。

3.2 主应力之间的关系与断层活动性

应用断层摩擦滑动准则，可以研究断层的活动性。当最大、最小和垂直应力的关系为 $S_H > S_h > S_v$ ， $S_H > S_v > S_h$ 和 $S_v > S_H > S_h$

不利于逆断层活动。在图 2~6 中水平最大主应力也没有进入或临近逆断层活动邻区, 说明福建沿海边缘陆域发生逆断层活动可能性很小。

2) 走滑断层活动。在福建沿海边缘陆域福鼎霞浦、秦屿和闽侯 3 个地区, 地应力状态为 $S_H > S_V > S_h$, 有利于走滑断层活动。我们将 5 个测区的地应力实测资料绘于图 8 中, 可见实测的应力状态处于包线以下, 不会产生走滑断层活动(图 8)。

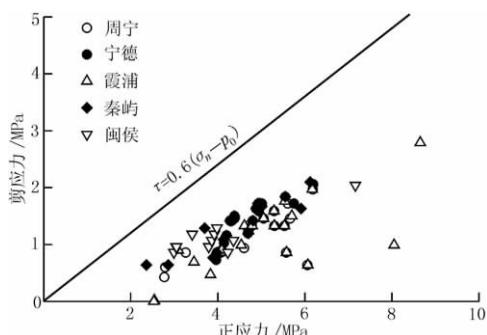


图 8 福建沿海边缘陆域走滑断层活动临界区

4 讨论和结论

1) 从福建沿海陆域 5 个地区应力状态与断裂活动的分析看出: 地壳浅部构造应力场以水平构造应力为主, 主应力值随深度增加而增大, 主压应力轴与海岸线走向近于垂直, 与主要海湾的发育方向近于一致。福建北部小区域内平面应力值明显高于南东部海域。

2) 福建沿海陆域北西部地区 3 个主应力值之间的关系为 $S_H \approx S_V > S_h$, 应力状态有利于走滑和正断层活动; 东南濒海陆域和中部地区 3 个主应力值之间的关系为 $S_H > S_V > S_h$, 应力状态有利于走滑断层活动。

3) 用库仑摩擦滑动准则和实测的地应力资料对福建沿海断裂带的活动性分析表明, 在福建沿海陆域北北东向断裂带和北西向构造带复合部位, 局部构造活动强烈, 应力状态比较复杂, 某些局部地段达到产生摩擦滑动要求的临界应力值, 具有发生正断层活动的可能性。

4) 在研究区内, 近地表与深部应力场可能不完全一致。利用原地应力测量结果解释断裂活动及地震研究, 主要取决于近地表的应力资料与深部应力场之间的对应程度。对此, 国内外进行了大量的测量研究。总体认为, 原地应力测量结果与根据测点附近活断层类型推断的结果相一致。例如, Rummel(1983)对德国东部边界 19 个 100~500 m 深度钻孔的 100 多次水压致裂地应力测量资料分析研究得出, 在一个应力分区内, 浅部与深部应力状态大致受同一构造应力场控制。谢富仁等(2004)和李方全等(1988)研究指出, 我国大陆地应力场具有明显的分区性, 在同一应力分区内, 浅部的应力资料与用震源机制解等方法反映的深部应力状态有良好的一致性。但也有的研究认为, 地壳浅部地形地貌比较复杂, 地层的各向异性非常明显, 断裂带的产状在垂直深度上也未必是固定不变的, 地壳不同深度上岩层的变形速率可能不同。因此, 浅部的与发震深度上的应力状态可能存在不一致性(Zoback, 1992)。

但公认的是, 地震的孕育和突发是能量从积累到释放的过程, 在能量变化到地震触发点以前, 岩石会出现一系列小的局部滑动, 接着在周围的基岩中应力发生变化, 这一变化可以在靠近基岩的地平面或较深的水平面上记录到。例如, Clark(1982)分析了利特尔溪一次 2.1 级小地震的应力变化图象得出, 浅部的应力变化图象与震源机制解是吻合的, 并清楚地显示至少在震前几周或数月的持续时间内, 较深部的构造活动信号可以向上传递到离地表 20 m 的深度上。因此, 测量地震区基岩的绝对应力, 并通过长期的连续记录以监视地

应力的变化，可能是发现地震发生的一种方法。

参 考 文 献

- 陈玉仁, 丁祥焕, 王耀东. 1982. 福建沿海地区北西向断裂近期活动性与地震活动[A]. 见: 中国地震学会地震地质专业委员会主编. 中国活动断裂[C]. 北京: 地震出版社, 200~205
- 丁祥焕, 王耀东, 叶盛基. 1999. 福建东南沿海活动断裂与地震[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 197~210
- 黄松风. 2003. 长诏断裂带垂直运动与地震关系初探[J]. 大地测量与地球动力学, 23(4): 99~104
- 李方全, 张伯崇, 苏恺之. 1993. 三峡坝区水库诱发地震研究[M]. 北京: 地震出版社, 191
- 李方全, 张钧, 刘鹏, 等. 1988. 四川西部水压致裂应力测量[A]. 见: 国家地震局地壳应力研究所编. 地壳构造与地壳应力文集[C]. 北京: 地震出版社, 43~49
- 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 等. 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
- Byerlee J D. 1978. Friction of rocks[J]. *Pure Appl Geophys*, 116(4/5): 615~626
- Clark B R. 1982. Stress change monitoring of active fault in south California[J]. *J Geophys Res*, 87: 4 645~4 656
- Hubbert M K, Willis D G. 1957. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. *Trans AIME*, 210: 153~166
- Jaeger J C, Cook N G. 1979. *Fundamentals of Rock Mechanics*[M]. London: Chapman and Hall Press, 97
- Rummel F. 1983. Hydraulic fracturing stress measurement along the eastern boundary of the SW-German block[M]. Washington: National Academy Press, 3~17
- Zoback M D, Healy J H. 1984. Friction, faulting and in-situ stress[J]. *Annales Geophysicae*, 2(6): 689~698
- Zoback M D, Hickman S. 1982. In site study of the physical mechanics controlling induced seismicity at Monticello reservoir south Carolina[J]. *J Geophys Res*, 87: 6 959~6 974
- Zoback M L. 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The world stress map project[J]. *J Geophys Res*, 97: 11 703~11 728

STUDY ON IN-SITU STRESS MEASUREMENT AROUND COASTAL MARGINAL LAND IN FUJIAN

Li Hong An Qimei Xie Furen

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

Abstract: The in-situ hydraulic fracturing stress measurements have been carried out around the coastal marginal land in Fujian Province. And the characteristics of magnitude, direction and distribution of tectonic stress have been obtained. Based on the observed stress data, the character and activity of fault zone are analyzed and studied in the paper according to the Coulomb friction criteria. ① The maximum horizontal principal compressive stress is in the NW-WNW direction from the north to the south along the coastline verge, which is parallel to the strike of the NW-trending fault zone, consistent with the direction of principal compressive stress obtained from geological structure and across-fault deformation data, and different from that reflected by focal mechanism solution by about 20°. ② The horizontal principal stress increases with depth, the relation among three stresses is $S_H > S_v > S_h$ or $S_H \approx S_v > S_h$, and the stress state is liable to normal fault and strike-slip fault activities. ③ According to Coulomb friction criteria and taking the friction strength μ as 0.6~1.0 for analysis, the stress state reaching or exceeding the threshold for normal-fault frictional sliding near the fault implies that the current tectonic activity in the measuring area is mainly normal faulting. ④ The force source of current tectonic stress field comes mainly from the westward and northwestward horizontal extrusions from the Pacific and Philippine Plates respectively to the Eurasian Plate.

Key words: Fujian coast; active fault zone; hydraulic fracturing stress measurement; Coulomb friction criteria