

鄂尔多斯地块南缘地应力测量研究

牛琳琳^{1,2}, 丰成君^{1,2}, 张 鹏^{1,2}, 陈群策^{1,2}, 谭成轩^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 利用水压致裂法得到的地应力测试数据对鄂尔多斯地块南缘地壳浅部地应力分布规律及断层活动性进行研究。结果表明: (1) 两个水平主应力随深度线性增长, 应力梯度分别为 0.032 和 0.021, 在测量深度域内水平和垂直应力的关系为 $S_H > S_h > S_v$, 该应力状态有利于断层发生逆断层活动, 与 1556 年华山大地震的发震正断层的性质不同; (2) 研究区的最大水平主应力方向为北南—北北西向, 与区域速度矢量场方向一致, 与其他资料解译的区域构造应力方向有一些差异, 主要是受鄂尔多斯地块周缘断层活动的影响; (3) 利用 Mohr-Coulomb 准则及 Byerlee 定律, 摩擦系数取 0.6 ~ 1.0, 对研究区的地应力状态进行分析, 发现鄂尔多斯地块南缘的测点未达到或超过地壳破裂极限状态, 不存在断层失稳或地震等其他形式的地壳活动, 处于较稳定地壳应力状态; (4) 实测数据为该区补充了新的地应力测量资料, 研究结果为该区工程设计及建设、构造应力场数值模拟提供了边界条件, 对于该区地质灾害评价、地壳稳定性以及大陆动力学的研究具有重要意义。

关键词: 鄂尔多斯地块南缘; 水压致裂; 地应力测量; 地应力状态; 构造应力场

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

IN-SITU MEASUREMENTS IN THE SOUTHERN MARGIN OF THE ORDOS BLOCK

NIU Linlin^{1,2}, FENG Chengjun^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, CHEN Qunce^{1,2}, TAN Chengxuan^{1,2}

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: The crustal stress distribution pattern and fault activity of the shallow crust in the southern margin of the Ordos block are studied by using the stress test data obtained from hydraulic fracturing method. The results reveal that the maximum and minimum horizontal principal stress show a good linear relationship with depth. The gradient is 0.032 and 0.021, respectively. Stress structure of $S_H > S_h > S_v$ is favorable for the activity of the reverse fault and that is different from the normal fault occurred in the 1556 Huashan earthquake. The direction of the maximum horizontal principal stress is NS-NNW, which is consistent with the direction of velocity vector field. It is different from regional tectonic stress direction interpreted by other data, which may be affected by the fault activity around the Ordos block. The crustal activity in the study area is discussed by using the Mohr-Coulomb criterion and Byerlee's law under the

基金项目: 国家科技重大专项 (2016ZX05034003-002); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160267); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41702341)

作者简介: 牛琳琳 (1987-), 男, 博士研究生, 主要从事地应力测量与监测、岩石力学、构造应力场等方面的研究工作。E-mail: niulin19881112@163.com

收稿日期: 2017-11-20; **修回日期:** 2017-12-05

范二平编辑

premise that the friction coefficient is 0.6 ~ 1.0. We found that the measured points in the southern margin of Ordos block have not reached or exceeded the limit of the earth's crust rupture and there are no fault instability or earthquake and other forms of the activities, which is in a relatively stable state of crustal stress. New in-situ stress measurement data have been added to the area. The research results provide the boundary conditions for the engineering design and construction, numerical simulation of tectonic stress field in the area, which is of great significance for the study of geological hazard assessment, crustal stability and continental dynamics.

Key words: southern margin of the Ordos block; hydraulic fracturing; in-situ measurement; in-situ stress state; tectonic stress field

0 引言

鄂尔多斯地块在华北地区新生代和现代构造活动中具有重要作用^[1],同时紧邻青藏高原,其地壳动力学、构造活动、地震活动性问题一直是地学界研究的热点,并取得了许多研究成果^[2~7]。鄂尔多斯块体作为华北克拉通内部的稳定块体,内部地质构造单一,地震活动性较弱。而在鄂尔多斯块体周缘发育有一系列断陷盆地,分布大量的活动断裂,在构造应力的作用下,受地壳水平和垂直差异性运动的影响,鄂尔多斯块体周缘地震活动频繁。据历史记载,鄂尔多斯地块周缘发生了19次7级以上的强震,其中包括1303年山西洪洞8级地震、1556年陕西华县8.5级地震、1739年宁夏平罗8级地震和1920年宁夏海原8.5级地震^[4,6~7]。

地震活动是在区域构造应力作用下,应变在活动断裂带上不断积累并达到极限状态后而突发失稳破裂的结果^[8]。地震过程包含着两个相互关联的根本环节,即构造背景和孕震环境^[6]。在长期的地质构造作用下,研究区现今地表地质构造表现为一定的分区性和差异性,同时浅部和深部地球物理场呈现明显的不协调性^[9],以上为鄂尔多斯地块周缘地震发生的孕震环境。此外,在中国大陆为印度板块、太平洋板块和菲律宾海板块所挟持的构造背景下,鄂尔多斯地块及相邻板块间的相互作用和板内深部地球动力作用,为强震的发生提供了有利的构造背景。

基于对研究区上述地质构造和有关地球物理场资料的理解,结合2015年8月至2015年9月在鄂尔多斯地块南缘地带获取的原位地应力测试数据,采用线性拟合方法,对鄂尔多斯地块南缘的地应力赋存特征进行综合分析,利用断层摩擦滑

动准则和Byerlee定律,探讨了鄂尔多斯南缘的断层活动性质,以期对鄂尔多斯地块南缘的地震活动性有一定的认识。

1 鄂尔多斯地块南缘地质构造和动力背景

1.1 地质构造

鄂尔多斯地块自始新世开始形成至今仍在活动,内部变形较小,其周缘边界断裂带变形强烈、强震频繁发生(见图1)。活动地块及其边界组合包括鄂尔多斯周缘断陷系和鄂尔多斯稳定地块^[10]。鄂尔多斯块体四周被断裂和断陷盆地所包围,其西部、南部、东部边界分别为银川—吉兰泰断陷盆地、渭河断陷盆地、山西断陷盆地,西南边界为青藏高原东北缘挤压性构造带。其中,鄂尔多斯地块东侧的山西断陷盆地是一条不连续的右旋剪切拉张带,而北缘的河套断陷盆地为东西向剪切拉张带,主要断裂显示了左旋走滑活动特征^[11~12]。基于新生代盆地的演化、现代地震活动以及区域应力场特征等,众多学者对鄂尔多斯地块周缘新生代断陷盆地形成的动力学演化机制进行了探讨^[2~7,13~14]。

1.2 水平运动特征

鄂尔多斯地块西南侧表现为挤压边界,而四周为剪切拉张带,整体水平运动差异大^[12~13]。相关研究结果认为,自晚新生代以来,鄂尔多斯地块运动稳定^[14~16]。鄂尔多斯地块现今水平运动形式包括地块自身逆时针的旋转运动和随中国大陆东部的整体运动,两者叠加构成了地块现今水平运动的宏观表现形式^[17]。

有关学者对研究区GPS速度场滤波进行了研究,结果表明,鄂尔多斯地块东西缘、南北缘分别表现为右旋、左旋运动特征,地块西南侧的运

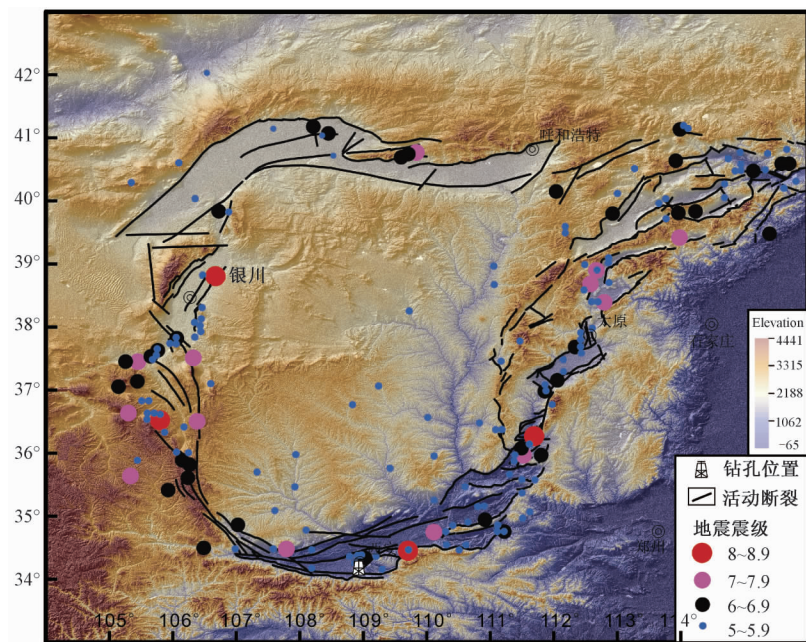


图 1 鄂尔多斯地块活动断裂及地震分布

Fig. 1 Active faults and seismic distribution in the Ordos block

动速率变化较大, 反应青藏高原向该区的挤压力逐渐增大^[10]。

1.3 动力来源

在运动学上相互制约的块体的转动是地壳中重要的构造运动形式, 块体间边界断裂的活动本质上是这些块体以不同方式转动的结果。鄂尔多斯地块的运动既包括自身的逆时针旋转, 同时作为中国东部整体运动的一部分, 解释了鄂尔多斯地块东西缘和南北缘运动方式的差异性^[17]。此外, “鄂尔多斯地块推挤阻碍”模式认为地块运动的力源主要来自于印度板块向欧亚板块的碰撞造成的青藏高原东北缘的挤压作用力, 同时, 南部的华南板块以及北部的燕山地块对鄂尔多斯南北边界存在推挤阻碍作用^[18-19]。

2 地应力测量方法及测量结果

2.1 地应力测量方法

水压致裂技术起源于美国油气田开采, 是油气开采增产的重要措施。国际岩石力学学会 (ISRM) 推荐水压致裂方法为有效确定岩体应力的方法之一。由于该方法具有操作简单、原位测量、不受测量深度限制等特点, 在国内外工程建设、地震机理研究、地壳动力学研究等领域得到广泛应用。

为了取得真实可靠的地应力测量结果, 现场测试程序及数据采集、处理均按照国际岩石力学学会相关技术规范执行^[20], 测试记录曲线规范、标准, 曲线所记录的参数特征值确切, 尤其为关闭压力的取值奠定基础, 保证了测量成果的真实性和可靠性^[21]。同时, 依据压裂段的压力—时间曲线, 选取破裂压力明显, 重张压力和关闭压力确切的测段作为压力印模试验段^[21], 以尽可能准确地获取每个测段的最大水平主应力方位。在水压致裂法中, 瞬时关闭压力 P_s 等于最小水平主应力, 另外由于 P_s 取值导致的误差可在最大主应力值中扩大 3 倍, 因此关闭压力的取值对于地应力测量的精度尤为关键^[21]。ISRM 建议至少采用 2 种方法对 P_s 进行判读, 试验中 P_s 取值采用单切线法、 dt/dp 、 dp/dt 方法, 并将三者平均值作为水平应力的计算依据^[21-23]。在地应力测量中, 孔隙压力取值据已有研究结果, 近似等于静水压力^[24]。

2.2 地应力测量结果

地应力测量点位于西安市长安区天子峪, 钻孔的位置如图 1 所示, 点位坐标为 34.0311°N 、 108.9236°E , 海拔高度 650 m, 钻孔位于冲沟缓坡地带, 从钻探岩心来看, 岩性为中粗粒角闪二长花岗岩, 地表风化强烈, 岩石比较松散, 但地应力测量深度段岩石较为完整。在 80.50 ~ 399.00 m 测试深度域内, 共取得了 10 个测段的压裂数据和

4 个测段的印模定向数据（见表 1），其中 10 个测段的原始压裂曲线如图 2 所示。

表 1 鄂尔多斯地块南缘地应力测量结果

Table 1 Results of in-situ stress measurement by hydraulic fracturing in southern margin of the Ordos block										
测段 序号	测段 深度/m	孔隙压力 P_o /MPa	主应力值/MPa			应力特征参数				印痕裂缝 方向/°
			S_H	S_h	S_V	S_H/S_V	S_H/S_h	$(S_H + S_h)/2S_V$	$(\sigma_1 - P_o)/(\sigma_3 - P_o)$	
1	80.50	0.76	3.91	3.71	2.13	1.84	1.05	1.79	0.44	N313°W
2	120.60	1.16	5.40	5.11	3.20	1.69	1.06	1.64	0.48	
3	136.40	1.31	5.88	5.27	3.61	1.63	1.12	1.54	0.50	
4	167.92	1.63	5.19	4.60	4.45	1.17	1.13	1.10	0.79	
5	187.00	1.82	8.79	7.97	4.96	1.77	1.10	1.69	0.45	N357°W
6	224.80	2.20	11.99	8.88	5.96	2.01	1.35	1.75	0.38	
7	237.26	2.32	13.56	9.29	6.29	2.16	1.46	1.82	0.35	N345°W
8	258.75	2.54	13.83	9.56	6.86	2.02	1.45	1.70	0.38	
9	299.24	2.94	10.17	7.75	7.93	1.28	1.31	1.13	0.69	N10°E
10	399.00	3.94	12.51	10.29	10.57	1.18	1.22	1.08	0.77	

注： S_V 为铅直应力（ $S_V = \rho gH$ ， ρ 取 2650 kg/m³， H 为上覆岩体的厚度）， S_H 为最大水平主应力， S_h 为最小水平主应力， σ_1 为最大主应力值， σ_3 为最小主应力值

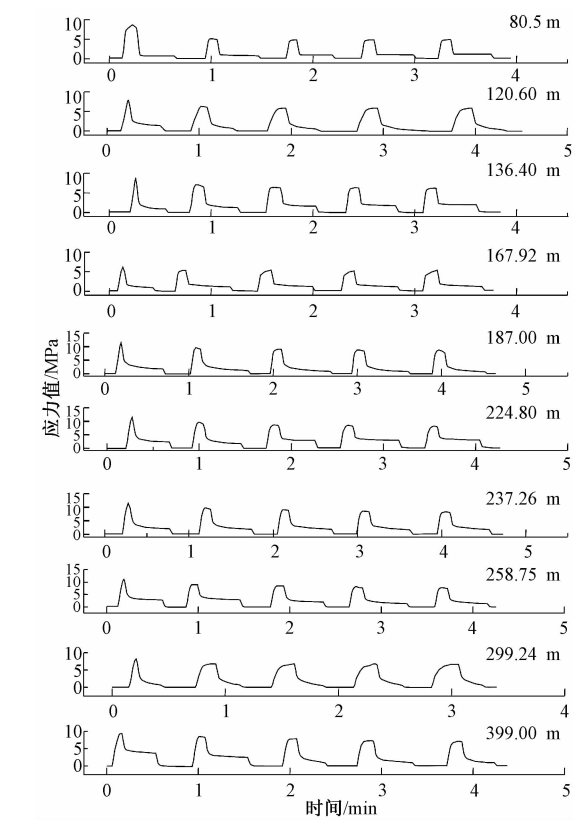


图 2 10 个测段原始压裂曲线

Fig. 2 Original hydraulic fracturing pressure-time curves of ten segments

3 测试数据分析

3.1 水平主应力随深度分布规律

地应力值随深度的变化特征一定程度上反映地壳浅部的应力状态，通过地应力测量资料分析地壳应力特征一直是地球科学家探索的问

题^[21, 24~26]。为了直观地表现测点所反映的地应力分布规律，利用钻孔的实测资料，使用线性回归分析的方法，对 10 个测试段的应力值进行回归分析，得到最大水平主应力、最小水平主应力随深度变化的关系式，回归曲线如图 3 a 所示。回归方程如下：

$$S_H = 2.357 + 0.032H \tag{1}$$

$$S_h = 2.719 + 0.021H \tag{2}$$

式中： S_H 、 S_h 分别为最大水平主应力、最小水平主应力，MPa； H 为测点埋深，m。

结合表 1 及图 3a，可知在测试深度 80.50 ~ 399.00 m 范围内，最大水平主应力和最小水平主应力的量值分布范围分别为 3.91 ~ 13.83 MPa、3.71 ~ 10.29 MPa。回归方程中最大水平应力与最小水平应力的梯度分别为 0.032、0.021，高于相关学者对华北板块、华南板块以及整个中国大陆的拟合结果（0.022、0.017 左右）^[27~29]，这主要是数据测量方法、岩性以及拟合深度不同所致。同时回归方程具有较大的常数项，反映测点的构造应力较大。

表 1 给出了测点水平主应力和垂向应力的应力量值，由 Anderson 断层理论^[30]，结合图 3a 可知，鄂尔多斯地块南缘地壳浅部三个主应力值之间的关系为 $S_H > S_h > S_V$ ，构造应力场以水平构造应力为主，应力状态有利于逆断层活动，区别于 1556 年华山大地震正断活动性质。

3.2 侧压系数随深度的分布规律

利用实测资料，计算侧压系数 k_{hh} (S_H/S_h)、 k_{hV} (S_H/S_V)、 k_{av} ($(S_H + S_h)/2S_V$) 的比值如表 1 所示，

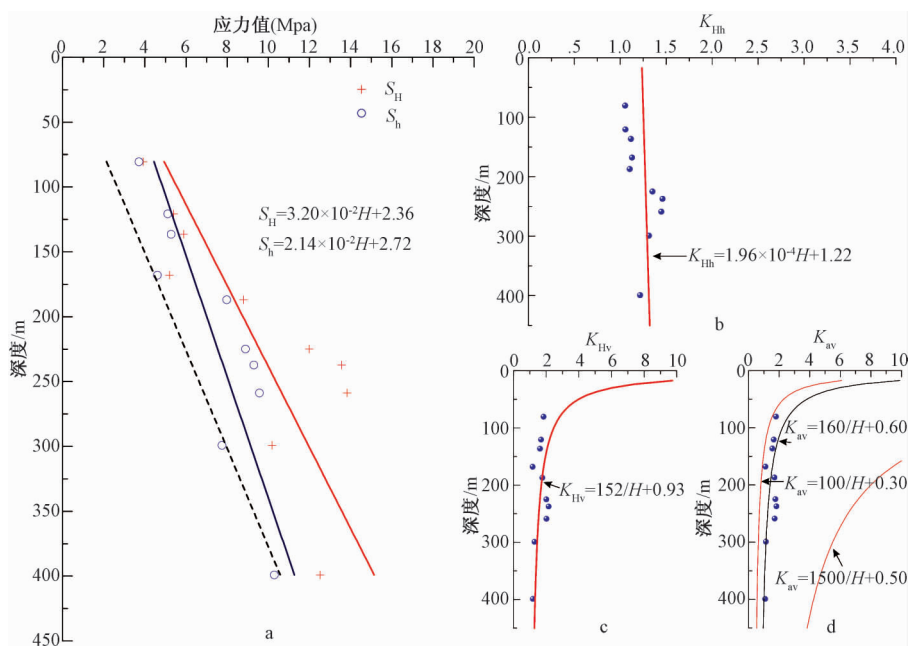


图 3 最大、最小水平主应力 (a) 及侧压系数 (b—d) 随深度变化图

Fig. 3 Curves of variation of the maximum and the minimum horizontal principal stress (a) and lateral pressure coefficient (b—d) with depth

并分别建立随埋深变化的散点分布图, 见 3b—3d 示。对于 k_{1h} , 采用线性拟合其随深度变化的关系, 而 k_{1hv} 、 k_{av} 则选用 Stacey 和 Wesseloo^[31] 统计南非地应力采用的 $k = a/H + b$ 的函数形式进行回归拟合。相应的拟合公式如 (3) — (5) 所示, 拟合曲线如图 3 所示。

$$k_{1h} = 1.94 \times 10^{-4} + 1.22 \quad (3)$$

$$k_{1hv} = 152/H + 0.93 \quad (4)$$

$$k_{av} = 160/H + 0.60 \quad (5)$$

图 3d 中红色外包络线为 Brown 和 Hoek^[32] 利用全球地应力测量资料统计的水平平均主应力与垂直应力之比, 即侧压系数 k_{av} 的分布范围, 鄂尔多斯地块南缘的地应力测量数据分布在外包络线之内。

由表 1 与图 3b—3d 可知, k_{1h} 、 k_{1hv} 、 k_{av} 的分布范围分别为 1.05 ~ 1.46、1.17 ~ 2.16、1.08 ~ 1.82, k_{1h} 随深度的增加变化较小, 稳定在 1.22 左右。 k_{1hv} 、 k_{av} 的比值随深度呈缓慢衰减的态势, 表明在测试深度范围内, 鄂尔多斯地块南缘构造水平应力占主导地位, 随着深度增加, 构造应力场的影响减弱, 垂向应力增强^[21]。

3.3 最大水平主应力方位分布特征

采用水压致裂印模系统获得了最大水平主应力方向值, 见表 1, 应力方向的分布范围为北西

313°—北东 10°。为了更直观的分析应力方向的分布规律, 利用实测结果, 做出最大水平主应力方向随深度的分布图 (见图 4) 及分布统计玫瑰花图 (见图 5a), 结合表 1 判别分析可知^[21], 各测段地应力方向分布比较集中, 鄂尔多斯地块南缘地应力状态主要受区域构造应力场控制, 钻孔在 0 ~ 400 m 深度范围内最大水平主应力方向为北北西到近南北向。

从板块尺度来看, 鄂尔多斯地块南缘的力源仍然来自印度板块相对于欧亚板块的北向碰撞作用。新生代以来, 印度板块以 50 mm/a 的速率向北推挤欧亚板块, 导致青藏高原的整体上升和地壳物质的东移, 其远程效应作用于鄂尔多斯地块南缘。鄂尔多斯地块南缘交接转换区成为青藏高原向东北边缘扩展的前锋地带, 构成高原与东侧外围的渐变过渡边界, 高原物质向外扩展受阻而在转换区向东有限逃逸^[33]。印度板块的向北推挤到本区的楔形挤入, 这种推挤作用在鄂尔多斯地块南部边界受到阻挡作用, 秦巴断块隆起消减了在地区的运动, 印度洋板块通过印度次大陆向北与欧亚板块顶撞的势头逐渐减弱, 在东面遇到华北地块的阻挡, 迫使应力发生调整, 构造应力场会产生一定偏转, 最新的 GPS 观测数据获得的区域运动速度场矢量资料反映最大主压应力方向

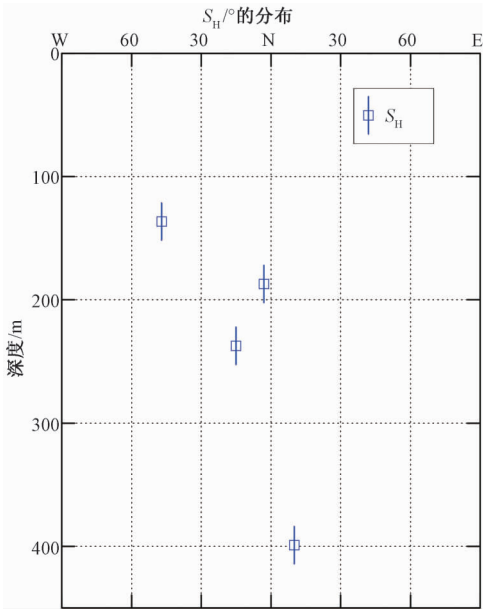


图 4 最大水平主应力方位随深度变化图

Fig. 4 Variation of the orientation of the maximum horizontal principal stress with depth

由青藏高原东北缘到鄂尔多斯地块南缘发生了北东到北西西—北西向的变化^[34]，如图 5b 所示。利用震源机制资料、GPS 方法、地质等方法也得到相同的应力场特征^[35~38]。如江在森等根据中国大陆的 GPS 观测资料，得到中国大陆地壳水平运动速度场结果，而在鄂尔多斯地块南缘表现为北西—北西西向^[35]；徐纪人等研究中国大陆及其周缘发生的中强震的震源机制解，得到中国大陆地壳区域应力场特征，在鄂尔多斯地块南缘 P 轴方位集中在北西—东西向之间^[36]。

地应力实测资料显示鄂尔多斯地块南缘现今的主压应力方向呈现出北北西向到近南北向的趋势，结合该区其他资料解译反演得到的构造应力场方向，发现实测方向与部分水压致裂资料得到的方向吻合较好，而与其他资料解译的构造应力场方向存在差异（见图 5c）^[21, 39]，很可能是由于其他资料的测试结果受到鄂尔多斯地块南缘断层不同程度的影响所致。

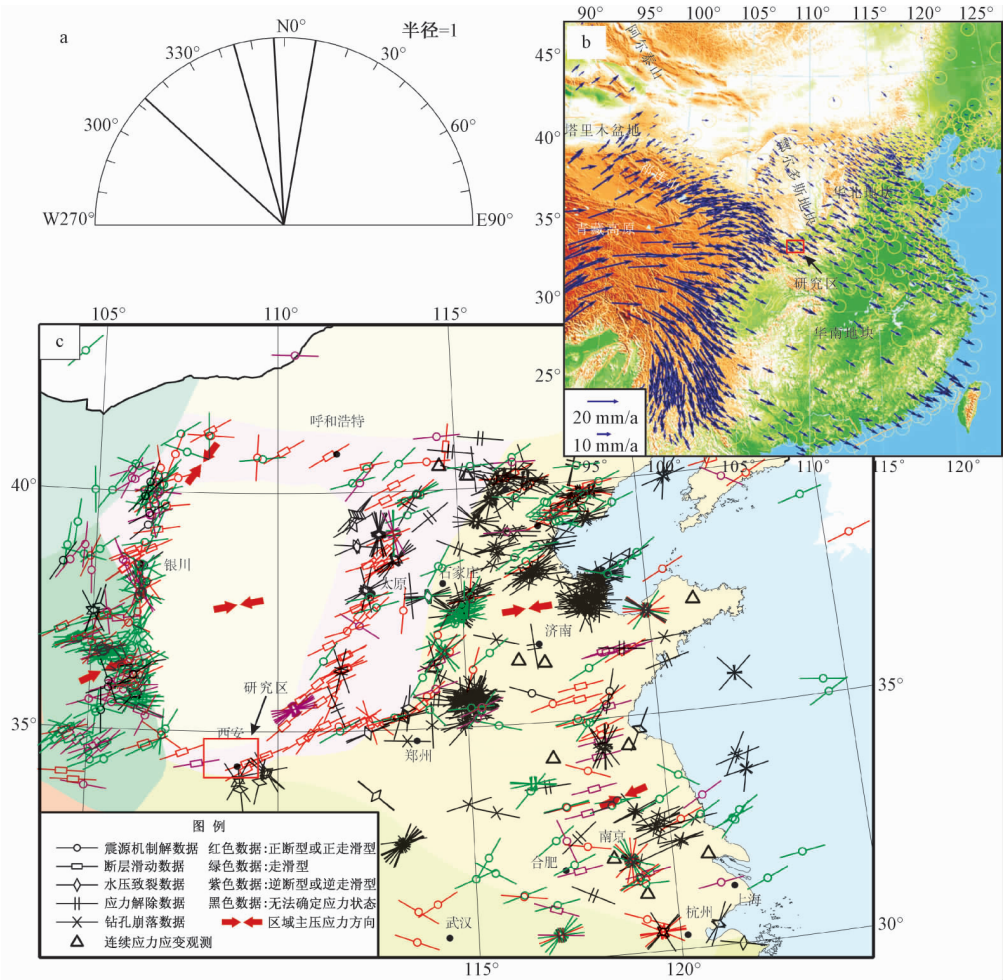


图 5 鄂尔多斯地块南缘现今地应力作用方向 (a、c) 及地壳运动速度场 (b)

Fig. 5 Directions of in-situ stress (5-a、5-c) and GPS velocity field (5-b) in southern margin of the Ordos block

4 断层活动性

库伦剪切破裂准则认为岩石抵抗剪切破坏的能力不仅与作用在截面上的剪应力有关, 而且还与作用在该界面上的正应力有关, 并可写成关系式 $\tau = \tau_0 + \mu\sigma_n$ 。其中, τ_0 表示内聚力, σ_n 表示剪切面上的正应力值, $\mu = \tan\psi$, μ 表示内摩擦系数, ψ 为内摩擦角。用主应力改写库伦准则, 并引入有效应力的概念。这样滑动阻力便是正应力 σ_n 与孔隙压力 P_0 之差的函数。最大、最小主应力之比可简单的表示为摩擦系数 μ 的函数, 如下^[21]:

$$(\sigma_1 - P_0) / (\sigma_3 - P_0) = ((\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu)^2 \quad (6)$$

式中 σ_1 、 σ_3 分别为断层面上的最大与最小主应力值, P_0 为孔隙压力。

当应力之比大于 $((\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu)^2$ 值时, 断层面在方位合适的面上可能发生滑动, 这里取方位合适的面指断层面的法线方向与最大主应力 σ_1 的夹角为 ψ 的面, ψ 与 μ 的关系为 $\psi = 0.5 (\pi/2 + \tan\mu)$ ^[21, 40]。

Byerlee 综合各种不同岩石类型的实验室摩擦试验资料, 结果表明大部分岩石的摩擦系数位于 0.6 ~ 1.0 之间, 并认为当 σ_n 低于相当于地壳中部深度的正应力数值 200 MPa 时, $\tau = 0.85\sigma_n$; 当超过 200 MPa 而小于 2000 MPa 时, $\tau = 50 + 0.6\sigma_n$, 即拜尔利定律^[21, 41]。国内外众多学者通过研究得到摩擦系数的分布范围大致在 0.6 ~ 1.0 之间^[40, 42 ~ 43], 因此在分析鄂尔多斯地块南缘断层活动性的研究中取 $\mu = 0.6 \sim 1.0$, 并且不考虑断层内聚力。

在原地应力测量过程中, 能够获得 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 (σ_2 , 中间主应力) 具体量值的机会非常少, 但是按照 Anderson 理论, 比较 S_H 、 S_h 和 S_v 量值的大小, 可以近似的将其看作三向主应力值。利用实测数据及表 1, 做出 $(\sigma_1 - P_0) / (\sigma_3 - P_0)$ 比值的分布情况及摩擦系数分别为 $\mu = 0.6$ 和 $\mu = 1.0$ 时的临界线 (见图 6), 可以看出, 所有测段的 $(\sigma_1 - P_0) / (\sigma_3 - P_0)$ 比值均位于临界线的下侧, 地应力的实测值低于断层发生摩擦滑动极限状态的临界值, 表明鄂尔多斯地块南缘现今地应力积累水平较低, 未达到地壳破裂极限状态, 不存在断层失稳或地震等其他形式的地壳活动。

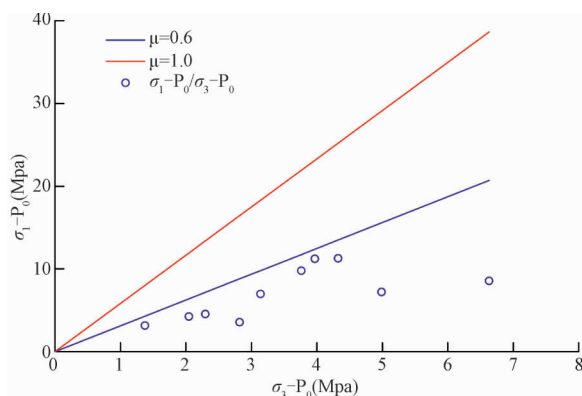


图 6 $(\sigma_1 - P_0) / (\sigma_3 - P_0)$ 的分布情况及应力状态分析图

Fig. 6 Distribution of $(\sigma_1 - P_0) / (\sigma_3 - P_0)$ and stress state analysis of the fault

5 结论

通过水压致裂方法获得鄂尔多斯地块南缘的地应力测量数据, 采用统计回归方法, 分析了该区的地应力的赋存特征及分布规律, 结合 Mohr-Coulomb 准则及 Byerlee 定律探讨了这一地区的地壳活动性, 得到以下结论:

(1) 水平主应力随深度的增加呈现良好的线性关系, 最大、最小水平主应力量值随深度变化的拟合关系式分别为 $S_H = 2.357 + 0.032H$ 、 $S_h = 2.719 + 0.021H$, 三个主应力值之间的关系有利于逆断层活动; 在测试深度范围内, 侧压系数 k_{Hv} 、 k_{av} 的值随深度呈缓慢衰减的态势, 表明在测试深度范围内鄂尔多斯地块南缘构造水平应力占主导地位, 随着深度增加, 构造应力场的影响减弱, 垂向应力增强。

(2) 鄂尔多斯地块南缘现今最大水平主应力方向与最新的 GPS 观测数据反映地壳运动速度场基本吻合, 而与其他资料解译的构造应力场方向存在差异, 很可能是由于测量结果受到鄂尔多斯地块南缘断层不同程度的影响所致。印度洋板块对青藏高原北向的持续挤压, 造成高原隆升以及东北缘的扩张, 鄂尔多斯地块南缘交接转换区在东南面遇到华北地块的阻挡, 迫使应力发生调整, 构造应力场会产生一定偏转, 自青藏高原东北缘向鄂尔多斯地块南缘的构造应力方向由北东、北东东向逐渐转为近北西向。

(3) 测点的地应力状态未达到或超过地壳破

裂极限状态,鄂尔多斯地块南缘处于较稳定的应力状态。

参考文献/References

- [1] 郭祥云,蒋长胜,王晓山,等.鄂尔多斯块体周缘中小地震震源机制及应力场特征[J].大地测量与地球动力学,2017,37(7):675~685.
GUO Xiangyun, JIANG Changsheng, WANG Xiaoshan, et al. Characteristics of small to moderate focal mechanism solutions stress field of the Circum-Ordos Block[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(7): 675~685. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张培震,邓起东,张国民,等.中国大陆的强震活动与活动地块[J].中国科学(D辑),2003,33(增刊):12~20.
ZHANG Peizhen, DENG Qidong, ZHANG Guomin, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2003, 46(S2): 13~24.
- [3] 邓起东,尤惠川.鄂尔多斯周缘断陷盆地地带的构造活动特征及其形成机制[A].国家地震局地质研究所.现代地壳运动研究(1)——大陆裂谷与深部过程[M].北京:地震出版社,1985.
DENG Qidong, YOU Huichuan. Formation mechanism and characteristics of tectonic movement of basin zone around the Erdos Block[A]. Beijing: Seismological Press, 1985. (in Chinese)
- [4] 国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组.鄂尔多斯周缘活动断裂系[M].北京:地震出版社,1988.
Erdos Activity Periphery Fault System Research Group, State Seismological Bureau. Active fault system around Ordos Block[M]. Beijing: Seismological Press, 1988. (in Chinese)
- [5] 徐锡伟,程国良,马杏垣,等.华北及其邻区块体转动模式和动力来源[J].地球科学——中国地质大学学报,1994,19(2):129~138.
XU Xiwei, CHENG Guoliang, MA Xingyuan, et al. Rotation model and dynamics of blocks in North China and its adjacent areas[J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 1994, 19(2): 129~138. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张培震,邓起东,张竹琪,等.中国大陆的活动断裂—地震灾害及其动力过程[J].中国科学:地球科学,2013,43(10):1607~1620.
ZHANG Peizhen, DENG Qidong, ZHANG Zhuqi, et al. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China[J]. Scientia Sinica Terrae, 2013, 43(10): 1607~1620. (in Chinese)
- [7] 国家地震局地质研究所,宁夏回族自治区地震局.海原活动断裂带[M].北京:地震出版社,1990.
Institute of Geology, China Earthquake Administration, The Ningxia Hui Autonomous Region Seismological Bureau. Haiyuan active fault system[M]. Beijing: Seismological Press, 1990. (in Chinese)
- [8] Scholz C H. Earthquakes and friction laws[J]. Nature, 1998, 391(6662): 36~42.
- [9] 周鼎武,李文厚,张云翔,等.区域地质综合研究的方法与实践[M].北京:科学出版社,2002.
ZHOU Dingwu, LI Wenhou, ZHANG Yunxiang, et al. The method and practice of regional geological comprehensive study[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [10] 高立新,韩晓明,戴勇,等.鄂尔多斯地块的运动特性与现今地震活动性[J].大地测量与地球动力学,2017,37(4):349~354.
GAO Lixin, HAN Xiaoming, DAI Yong, et al. Movement characteristics and the present seismic behavior of the Ordos Block[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(4): 349~354. (in Chinese with English abstract)
- [11] 高彬,周仕勇,蒋长胜.基于地震活动性资料估计鄂尔多斯块体周缘构造断面层面倾角[J].地球物理学报,2016,59(7):2444~2452.
GAO Bin, ZHOU Shiyong, JIANG Changsheng. Estimate of dip angles of faults around Ordos Block based on earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(7): 2444~2452. (in Chinese with English abstract)
- [12] 邓起东,程绍平,闵伟,等.鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论[J].地质力学学报,1999,5(3):13~21.
DENG Qidong, CHENG Shaoping, MIN Wei, et al. Discussion on Cenozoic tectonics and dynamics of Ordos Block[J]. Journal of Geomechanics, 1999, 5(3): 13~21. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张培震,张会平,郑文俊,等.东亚大陆新生代构造演化[J].地震地质,2014,36(3):574~585.
ZHANG Peizhen, ZHANG Huiping, ZHENG Wenjun, et al. Cenozoic tectonic evolution of continental Eastern Asia[J]. Seismology and Geology, 2014, 36(3): 574~585. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张岳桥,施炜,廖昌珍,等.鄂尔多斯盆地周边断裂运动学分析与晚中生代构造应力体制转换[J].地质学报,2006,80(5):639~647.
ZHANG Yueqiao, SHI Wei, LIAO Changzhen, et al. Fault kinematic analysis and change in Late Mesozoic tectonic stress regimes in the peripheral zones of the Ordos Basin, North China[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 639~647. (in Chinese with English abstract)
- [15] 徐锡伟,邓起东,韩竹君.霍山山前断裂晚第四纪活动和古地震研究[A].马宗晋.山西临汾地震研究与系统减灾[M].北京:地震出版社,1993.
XU Xiwei, DENG Qidong, HAN Zhujun. The Late Quaternary activity of the piedmont fault of Mt. Huoshan and paleoearthquake study[A]. MA Zongjin. Earthquake Research and Systematical Disaster Reduction in Linfen, Shanxi[M]. Beijing: Seismological Press, 1993. (in Chinese)

- [16] 尤惠川. 河套断陷盆地地质构造特征及其成因机制的讨论 [A]. 国家地震局地质研究所. 现代地壳运动研究 [M]. 北京: 地震出版社, 1985: 88 ~ 97.
YOU Huichuan. Discussion geological structure characteristics and formation mechanism of the Hetao Fault Basin Zone [A]. Institute of Geology, China Earthquake Administration. Modern Crustal Movement Research [M]. Beijing: Seismological Press, 1985: 88 ~ 97. (in Chinese)
- [17] 陈小斌, 臧绍先, 刘永岗, 等. 鄂尔多斯地块的现今水平运动状态及其与周缘地块的相互作用 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2005, 22 (3): 309 ~ 314.
CHEN Xiaobin, ZANG Shaoxian, LIU Yonggang, et al. Horizontal movement of Ordos Block and the interaction of Ordos Block and adjacent blocks [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2005, 22 (3): 309 ~ 314. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李延兴, 张静华, 郭良迁, 等. 鄂尔多斯的逆时针旋转与动力学 [J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25 (3): 50 ~ 56.
LI Yanxing, ZHANG Jinghua, GUO Liangqian, et al. Counterclockwise rotation and geodynamics of Ordos Block [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25 (3): 50 ~ 56. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈小斌, 臧绍先, 魏荣强. 稳定的鄂尔多斯地块在整体运动吗? [J]. 地球物理学报, 2011, 54 (7): 1750 ~ 1757.
CHEN Xiaobin, ZANG Shaoxian, WEI Rongqiang. Is the stable Ordos Block migrating as an entire block? [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54 (7): 1750 ~ 1757. (in Chinese with English abstract)
- [20] Haimson B C, Cornet F H. ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF) [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40 (7 ~ 8): 1011 ~ 1020.
- [21] 牛琳琳, 陈群策, 丰成君, 等. 新疆某高放废物预选处置库区地应力测量研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 36 (4): 917 ~ 927.
NIU Linlin, CHEN Qunce, FENG Chengjun, et al. In-situ stress measurement of candidate area for high level radioactive waste repository in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 36 (4): 917 ~ 927. (in Chinese with English abstract)
- [22] Lee M Y, Haimson B C. Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameter [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1989, 26 (6): 447 ~ 456.
- [23] Hayashi K, Haimson B C. Characteristics of shut-in curves in hydraulic fracturing stress measurements and determination of in situ minimum compressive stress [J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96 (B11): 18311 ~ 18321.
- [24] Hast N. The state of stress in the upper part of the earth's crust [J]. Tectonophysics, 1969, 8 (3): 169 ~ 211.
- [25] Haimson B C. Near-surface and deep hydrofracturing stress measurements in the Waterloo Quartzite [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1980, 17 (2): 81 ~ 88.
- [26] Worotniki G, Denham D. The state of stress in the upper part of the earth's crust in Australia according to measurements in tunnels and mines and from seismic observations [A]. Investigation of Stress in Rock—Advances in Stress Measurement [C]. Sydney, Australia: International Society for Rock Mechanics Symposium, 1976, 71 ~ 82.
- [27] 王艳华, 崔效锋, 胡幸平, 等. 基于原地应力测量数据的中国大陆地壳上部应力状态研究 [J]. 地球物理学报, 2012, 55 (9): 3016 ~ 3027.
WANG Yanhua, CUI Xiaofeng, HU Xingping, et al. Study on the stress state in upper crust of China mainland based on in-situ stress measurements [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55 (9): 3016 ~ 3027. (in Chinese with English abstract)
- [28] 杨树新, 姚瑞, 崔效锋, 等. 中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析 [J]. 地球物理学报, 2012, 55 (12): 4207 ~ 4217.
YANG Shuxin, YAO Rui, CUI Xiaofeng, et al. Analysis of the characteristics of measured stress in Chinese mainland and its active blocks and North-South seismic belt [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55 (12): 4207 ~ 4217. (in Chinese with English abstract)
- [29] 景锋, 盛谦, 张勇惠, 等. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (10): 2057 ~ 2062.
JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, et al. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China Mainland [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (10): 2057 ~ 2062. (in Chinese with English abstract)
- [30] Anderson E M. The dynamics of faulting [J]. Transactions of the Edinburgh Geological Society, 1905, 8 (3): 387 ~ 402.
- [31] Stacey T R, Wesseloo J. The in situ stress regime in Southern Africa [A]. Proceedings of the 9th ISRM Congress [C]. Paris, France: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, 1189 ~ 1192.
- [32] Brown E T, Hoek E. Technical note trends in relationships between measured *in-situ* stresses and depth [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978, 15 (4): 211 ~ 215.
- [33] 李英康, 高锐, 高建伟, 等. 秦岭造山带的东西向地壳速度结构特征 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30 (3): 1056 ~ 1069.
LI Yingkan, GAO Rui, GAO Jianwei, et al. Characteristics of crustal velocity structure along Qingling orogenic belt [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30 (3): 1056 ~ 1069. (in Chinese with English abstract)
- [34] 牛之俊, 王敏, 孙汉荣, 等. 中国大陆现今地壳运动速度场

- 的最新观测结果 [J]. 科学通报, 2005, 50 (8): 839 ~ 840.
- NIU Zhijun, WANG Min, SUN Hanrong, et al. Contemporary velocity field of crustal movement of Chinese mainland from Global Positioning System measurements [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50 (9): 939 ~ 941.
- [35] 江在森, 马宗晋, 张希, 等. 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, 2003, 46 (3): 352 ~ 358.
- JIANG Zaisen, MA Zongjin, ZHANG Xi, et al. Horizontal strain field and tectonic deformation of China mainland revealed by preliminary GPS [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46 (3): 352 ~ 358. (in Chinese with English abstract)
- [36] 徐纪人, 赵志新, 石川有三. 中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究 [J]. 地球物理学报, 2008, 51 (3): 770 ~ 781.
- XU Jiren, ZHAO Zhixin, Ishikawa Y. Regional characteristics of crustal stress field and tectonic motions in and around Chinese mainland [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51 (3): 770 ~ 781. (in Chinese with English abstract)
- [37] 杜兴信, 邵辉成. 由震源机制解反演中国大陆现代构造应力场 [J]. 地震学报, 1999, 21 (4): 354 ~ 360.
- DU Xingxin, SHAO Huicheng. Modern tectonic stress field in the Chinese mainland inversed from focal mechanism solutions [J]. Acta Seismologica Sinica, 1999, 21 (4): 354 ~ 360. (in Chinese with English abstract)
- [38] 徐学义, 何世平, 王洪亮, 等. 中国西北部地质概论-秦岭、祁连、天山地区 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- XU Xueyi, HE Shiping, WANG Hongliang, et al. Geological theory in Northwest China-Qinling, Qilian and Tianshan regions [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [39] 谢富仁, 陈群策, 崔效锋, 等. 中国大陆地壳应力环境基础数据库 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22 (1): 131 ~ 136.
- XIE Furen, CHEN Qunce, CUI Xiaofeng, et al. Fundamental database of crustal stress environment in continental China [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22 (1): 131 ~ 136. (in Chinese with English abstract)
- [40] 苏恺之, 李方全, 张伯崇, 等. 长江三峡坝区地壳应力与孔隙水压力综合研究 [M]. 北京: 地震出版社, 1996, 151 ~ 165.
- SU Kaizhi, LI Fangquan, ZHANG Bochong, et al. Integrated research on the crustal stress and pore water pressure at the dam site of the Three Gorges [M]. Beijing: Earthquake Press, 1996, 151 ~ 165. (in Chinese)
- [41] Byerlee J. Friction of rocks [J]. Pure and Applied Geophysics, 1978, 116 (4 ~ 5): 615 ~ 626.
- [42] Zoback M D, Healy J H. Friction, faulting and in-situ stress [J]. Annales Geophysicae, 1984, 2: 689 ~ 698.
- [43] Zoback M D, Apel R, Baumgärtner J, et al. Upper-crustal strength inferred from stress measurements to 6 km depth in the KTB borehole [J]. Nature, 1993, 365 (6447): 633 ~ 635.