

北京昌平十三陵钻孔地应力测量与实时监测在 断层活动危险性分析中的应用探讨

丰成君, 张 鹏, 孙炜锋, 谭成轩*

中国地质科学院地质力学研究所, 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: 本文尝试运用北京昌平十三陵钻孔 98 m 深度原地应力测量和实时监测数据, 依据弹性力学应力张量叠加原理, 计算得到不同时段地应力结果; 根据断层滑动摩擦准则, 探讨南口山前断裂活动性, 对了解该区地震危险性有重要的意义。原地应力测量与实时监测计算结果表明: 在 2010 年 1 月初和 2013 年 3 月 31 日, 最大水平主应力平均值分别为 5.30 MPa 和 7.56 MPa, 呈增加趋势; 最大水平主应力方向也由 NNW 逐渐过渡到 NE 至近 EW 向。断层面上剪应力与正应力的比值结果显示: 在 2010 年 1 月初和 2013 年 3 月底, 平均比值分别为 0.12 和 0.22, 虽均没有达到断层面临界滑动摩擦系数 0.6, 但其显示出的增加趋势在一定程度上反映了该地区构造活动有增强的迹象, 该现象值得关注。

关键词: 首都圈; 地应力测量; 地应力实时监测; 摩擦滑动准则; 地震危险性

中图分类号: P315.727; P553 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.03.10

The Application of in Situ Stress Measuring and Real-time Monitoring Results to Analyzing the Fault Activity Hazard at Ming Tombs Borehole in Changping District, Beijing

FENG Cheng-jun, ZHANG Peng, SUN Wei-feng, TAN Cheng-xuan*

Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Institute of Geomechanics,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081

Abstract: According to the elasticity of the stress tensors superposition principle, the authors calculated the stress state in different periods at the borehole drilled at Ming Tombs, Changping District, Beijing, attempting to apply the data obtained by in-situ stress measuring and monitoring. Based on the frictional sliding criteria, this paper deals with the sliding of piedmont Nankou fault near the borehole, which serves as an important implication for understanding the seismic hazard in this region. The in-situ stress results show that, at the stages of early January, 2010 and March 31, 2013, the average maximum horizontal principal stress was respectively 5.30 Mpa and 7.56 MPa, showing an increasing trend; the direction of maximum horizontal principal stress was gradually converted from NNW to NE-nearly EW. The ratio between shear stress and normal stress on the fault plane revealed that, at the stages of early January, 2010 and the end of March, 2013, the average ratio was respectively 0.12 and 0.22 at the depth of 98 m, which didn't achieve the threshold sliding friction coefficient 0.6 of the fault. However, the increasing trend of the average ratio indicates that the tectonic activity in the region may increase to some extent. The phenomenon deserves further attention.

Key words: Beijing region; in-situ stress measurement; in-situ stress real-time monitoring; frictional sliding criteria; seismic hazard

本文由中国地质调查局地质矿产调查评价专项“首都圈地区关键构造部位深孔地应力测量监测与地质安全评价”(编号: 12120113012100)

与国土资源部公益性行业科研专项“我国东部沿海核电站区域地壳稳定性与地质灾害研究”(编号: 201211096)联合资助。

收稿日期: 2013-09-25; 改回日期: 2014-01-07。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 丰成君, 男, 1985 年生。博士研究生。主要从事构造应力场方向研究。E-mail: fcj19850718@163.com。

*通讯作者: 谭成轩, 男, 1964 年生。研究员, 博士生导师。主要从事构造应力场方向研究。E-mail: tanchengxuan@tom.com。

地应力是导致地震发生的重要影响因素之一,大地震的孕育和发生是在特定构造部位地应力长期积累、集中、加强和最终导致应变能突然释放的过程,地壳物质的力学性质与地应力对地壳运动具有决定的意义(李四光, 1973)。在地震地质工作的基础上,研究地应力状态的变化与地震孕育、发生、发展的关系,进而实现地震预测,是李四光教授提出的实现地震预报的一条技术思路(黄相宁等, 1982a, b; 孙叶等, 2012)。

大震发生前后,震源及附近地区地壳浅层地应力分布特征(主应力大小、方位及应力状态)确实能发生明显的改变(李方全等, 1979, 1988; Liao et al., 2003; 郭啟良等, 2009; 丰成君等, 2013a; Lin et al., 2013),该现象对于认识震前应力积累、震时应力降、震后应力调整及余震分布均具有一定的指示作用(安其美等, 2004; 吴满路等, 2010; 陈群策等, 2010; 秦向辉等, 2013)。由于震源点受力,在上地壳很大范围内形成应力集中区,虽然难以直接找到应力集中点,但在大范围内测量和监测地壳浅层应力及其变化,进而可能寻找和确定当前应力增高区,并研究其状态和变化趋势,则有可能判断未来大地震的震中区(赵文津, 2009)。此外,通过地应力测量与监测,获取地壳浅层的地应力绝对值及其变化规律,进而推测其深部特征,并以此作为初始条件,结合地壳深部应力场的模拟研究,使得地震的数值预报的实现成为可能(石耀霖等, 2013)。

首都圈地区(北纬 39° — 41° , 东经 114° — 119°)是我国政治文化中心,同时也是我国东部板内地震多发区,自公元前 231 年至 2012 年,京津唐张地区发生 5 级以上的地震 52 次,其中破坏性地震($M_S > 5.5$, 震中烈度约 VII 度)9 次,如: 1679 年三河—平谷 8 级地震; 1966 年邢台隆尧 M_S 6.2 级地震, 宁晋 M_S 7.2 级地震; 1967 年河间 M_S 6.3 级地震; 1976 年唐山 M_S 7.9 级地震和 1998 年张北 M_S 6.2 级地震等(高文学等, 1993; 孙士宏, 1994),这些破坏性地震都给首都圈地区造成不同程度的损失和破坏,该地区长期以来也成为我国地震监视的重点区域。根据华北地区地震活动的“时、空、强”分布特征,该区可能会进入第五个地震活跃期,直接威胁到首都的安全(马文涛等, 2004; 谭成轩等, 2010; 孙叶等, 2012)。

2011 年 8 月 3 日至 2013 年 3 月 31 日,北京昌平十三陵新型压磁地应力监测台站的应力监测曲线显示该区应力值呈缓慢增加的趋势(图 1),其显示出的应力增量是否会增强其附近断层的活动危险性值得讨论。本文尝试运用十三陵钻孔 98 m 深度原地应力测量和实时监测数据,依据库仑摩擦滑动准则,探讨了钻孔在 2010 年 1 月初和 2013 年 3 月 31

日时的应力状态及其对附近断层活动危险性的影响,并结合研究区 2002 年至 2013 年期间的小震(M_L 1.0~3.0)分布规律,初步认识了研究区现今构造活动状况。

1 研究区主要活动断裂及特征概述

本文研究范围为北京城区西北侧昌平十三陵地区,研究区及附近主要展布 NE 和 NW 向两组活动断裂(图 2)。NE 向断裂主要有南口山前断裂、八宝山断裂、黄庄—高丽营断裂带和顺义—良乡断裂带;其中: (1)南口山前断裂主体走向 40° ~ 60° , 倾向 SE, 倾角 50° ~ 80° , 燕山早期断裂活动为逆冲性质,之后有过多次活动,上新世至全新世部分段落则转为张性正断层(冉洪流等, 1996; 黄秀铭等, 1991); (2)八宝山断裂总体走向 $N40^{\circ}$ ~ 60° E, 倾向 SE, 倾角 25° ~ 35° , 该断裂形成于中侏罗世至晚侏罗世,早白垩世断裂具有拉张活动特性,末期受到燕山运动 NW—SE 向强烈挤压作用,该断裂则具逆断层性质(王士德等, 1982; 黄秀铭等, 1991),中更新世至全新世仍有活动,但活动性较弱(彭一民等, 1981; 车兆宏等, 1997); (3)黄庄—高丽营断裂总体走向 NNE—NE, 倾向 SE, 倾角 55° ~ 75° , 形成于早白垩世晚期,第三纪与八宝山断裂共同构成北京凹陷西边界,第四纪期间向北扩展,形成顺义和怀柔等第四纪次级凹陷,由南向北活动性逐渐加强,断裂具有正断兼右旋走滑的活动性质(彭一民等, 1981; 王挺梅等, 1983; 王若柏等, 1984; 车兆宏等, 1997); (4)顺义—良乡断裂总体走向 25° ~ 30° , 倾向 NW, 倾角 60° ~ 80° , 主要活动时期为中生代和新生代早期并持续到第三纪,其北段第四纪以来仍在活动,主体为正断层(胡平等, 2000)。研究区内 NW 向断裂主要为南口—孙河断裂(东三旗以西),断裂走向 $N45^{\circ}$ ~ 50° W, 倾向 WS, 倾角约 70° , 该断裂作为首都圈中部一条规模最大的北西向活动断层,对首都圈活动构造和地壳运动具有控制作用,既是华北板块的北边界之一,又是一条强震活动带,第四纪以来活动方式为张性反扭(彭一民等, 1981; 黄秀铭等, 1991)。研究区内,历史上 $M_S \geq 4.0$ 地震相对较少,最大的是 1730 年 9 月 30 日京西 6.5 级地震,震中位于西北旺附近;研究区内历史地震震中大致沿 NW 向南口—孙河断裂带及附近地区展布(图 2)(王宋贤, 1982; 马文涛等, 2004)。

2 北京昌平十三陵钻孔水压致裂地应力测量与断层活动危险性讨论(2010 年初)

北京昌平十三陵地应力测量与监测钻孔位于北京市昌平区十三陵长陵镇泰陵村国土资源部

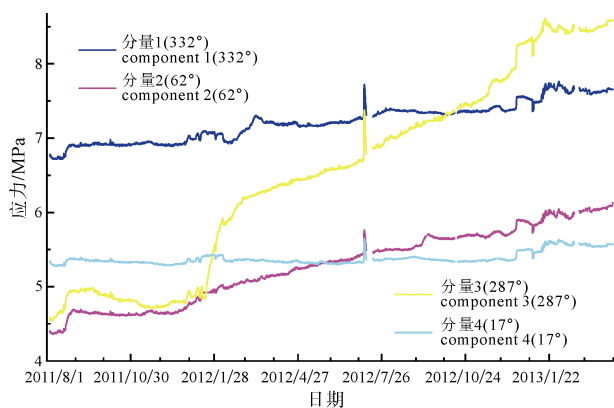


图 1 北京昌平十三陵钻孔新型压磁地应力监测曲线
(2011 年 8 月 3 日—2013 年 3 月 31 日)
Fig. 1 New piezomagnetic stress monitoring curves at
Ming tombs boreholes in Changping District, Beijing
(2011.8.3—2013.3.31)

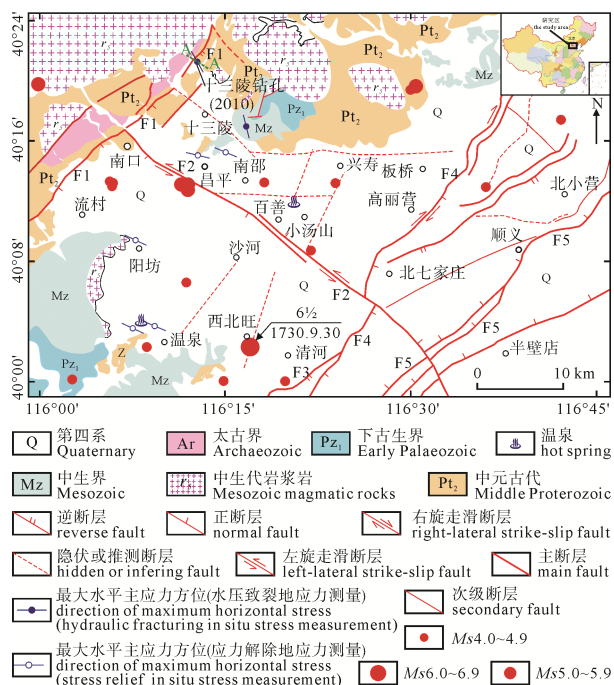


图 2 研究区主要活动断裂分布
Fig. 2 Distributions of main active fractures in the
research region

F1-南口山前断裂; F2-南口—孙河断裂带; F3-八宝山断裂;
F4-黄庄—高丽营断裂带; F5-顺义—良乡断裂带
F1-Nankou piedmont fault; F2-Nankou—Sunhe fault zone;
F3-Babaoshan fault zone; F4-Huangzhuang—Gaoliying fault zone;
F5-Shunyi—Liangxiang fault zone

表 1 十三陵钻孔水压致裂地应力测量结果
Table 1 Hydraulic fracturing in-situ stress measuring
results at Ming Tombs boreholes

深度	S_H	S_h	S_v	S_H 方位	S_H 平均方位
103.50	5.30	3.91	2.74		
111.20	6.25	4.71	2.95	N25°W	
130.90	6.16	4.32	3.47	N18°W	N22°W
163.70	6.07	4.44	4.34	N20°W	
181.00	4.33	3.33	4.80		
207.50	4.87	4.04	5.50	N26°W	

注: S_H -最大水平主应力; S_h -最小水平主应力; S_v -垂向应力。

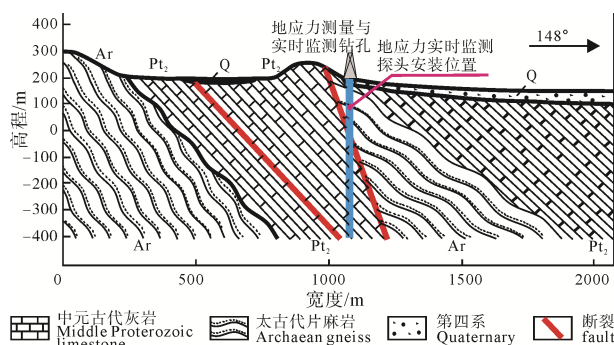


图 3 北京昌平十三陵地应力测量与监测钻孔地层剖面
(A-A')简图
Fig. 3 Stratigraphic section of in-situ stress measuring
and monitoring borehole at Ming Tombs
in Changping District, Beijing

十三陵培训中心院内(图 2), 地理坐标为 116°12'49"E, 40°19'22"N, 钻孔高程 171 m, 深度 600 m, 于 2009 年 8 月 25 日开钻, 12 月 30 日终孔。钻孔附近野外地质调查和钻孔岩芯初步表明, 该钻孔位于南口山前断裂附近, 钻孔浅部(约 0~182 m)位于断裂上盘, 为太古代片麻岩, 岩体较完整; 而在钻孔深部(约 182~600 m)则处于断裂下盘, 为中元古代灰岩, 岩体较破碎(图 3)。

2.1 北京昌平十三陵钻孔水压致裂地应力测量及结果分析

水压致裂地应力测量方法是国际岩石力学学会试验方法委员会建议的确定岩体应力方法之一, 目前也是国际上能较好地直接进行深孔应力测量的先进方法(Haimson et al., 1989, 2003)。关于水压致裂地应力测量的原理和方法本文不再赘述。北京十三陵钻孔水压致裂地应力测量结果见表 1。

十三陵钻孔在 103.50~207.50 m 深度范围内, 最大水平主应力 S_H 为 4.33~6.25 MPa, 最小水平主应力 S_h 为 3.33~4.71 MPa。在 165.00 m 以上, 三个主应力之间的关系为 $S_H > S_h > S_v$ (图 4), 为逆断型应力状态, 该特征与南口山前断裂燕山早期逆冲活动性质相一致; 而在 180.00 m 以下, 三个主应力之间的关系则转为 $S_v > S_H > S_h$ (图 4), 为正断型应力状态, 该特征则与南口山前断裂现今活动特性相吻合。钻孔附近最大水平主应力 S_H 方向为 N18°W—N26°W, 平均为 N22°W(图 4), 该方向与附近十三陵抽水蓄能电站厂区内水压致裂地应力测量得到的最大水平主应力方向(N16°W)基本一致(图 2), 而与首都圈及华北区域构造应力场主压应力方向(NE—NEE)有较大的差别(李钦祖, 1980; 李钦祖等, 1982; 魏光兴等, 1982; 黄福明等, 1995; 周翠英等, 2001; 马文涛等, 2004; 崔效锋等, 2010); 由于该钻孔测量得到的最大水平主应力方向数据多取自 200.00 m 以上, 而区域构造

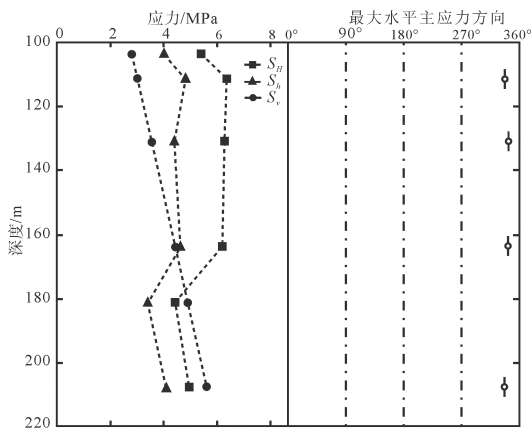


图 4 北京昌平十三陵钻孔主应力值及最大水平主应力方向随深度变化

Fig. 4 Magnitude of principal stresses and direction of maximum horizontal principal stress versus depth at Ming Tombs boreholes in Changping District, Beijing

应力场主压应力方位多由震源机制解确定得到,其深度均在几 km 至几十 km,受地形地貌、岩石物理力学性质及局部构造活动不同等因素的影响,地壳浅表层与深部的地应力特征可能会存在差异(谭成轩等, 2006)。

2.2 断层活动危险性讨论

在不考虑断层内聚力的情况下,当断层面的剪应力 τ_n 大于或等于滑动摩擦阻力 $\mu\sigma_n$, 则断层出现摩擦滑动, 其中, σ_n 为断面上的正应力, μ 为断层面的摩擦系数, 断层滑动失稳的条件为(Byerlee, 1978):

$$\tau_n/\sigma_n \geq \mu \tag{1}$$

建立三维直角坐标系 xyz , 其中, x 轴正方向和钻孔最大水平主应力平均方向(N22°W)一致, y 轴正方向与最小水平主应力方向一致, z 轴垂直向上十三陵钻孔附近南口山前断层倾向取 148°, 倾角为 70°(图 3), 根据任意斜截面上的正应力与剪应力的计算公式(梁海庆等, 1993; 李同林等, 2006), 计算钻孔附近断面上的剪应力(τ_n)、正应力(σ_n), 及两者之间的比值 τ_n/σ_n (表 2)。

研究表明, 大部分岩石的摩擦系数位于 0.6~1.0 之间(Byerlee, 1978; Zoback et al., 2003), 在分析地

表 2 十三陵钻孔附近断层面外法线与主应力坐标轴夹角余弦值与断层面上剪应力值、正应力值及两者比值计算结果

Table 2 Results of $l, m, n, \sigma_m, \tau_n$ and τ_n/σ_n						
深度/m	l	m	n	σ_n/MPa	τ_n/MPa	τ_n/σ_n
103.50	0.9254	0.1632	0.3420	4.96	0.84	0.17
111.20	0.9254	0.1632	0.3420	5.82	1.08	0.18
130.90	0.9254	0.1632	0.3420	5.80	0.90	0.15
163.70	0.9254	0.1632	0.3420	5.82	0.60	0.10
181.00	0.9254	0.1632	0.3420	4.36	0.23	0.05
207.50	0.9254	0.1632	0.3420	4.92	0.25	0.05

壳浅部断层活动时, 该摩擦系数可近似代表断层面的滑动摩擦系数, 并将 0.6 作为判断断层失稳的临界摩擦系数(安其美等, 2004; 陈群策等, 2010; 秦向辉等, 2013; 丰成君等, 2013b)。由表 2 可看出, 2010 年初, 在 0~210 m 深度范围内, 十三陵钻孔附近断面上的剪应力与正应力的比值为 0.05~0.18, 远未达到断面上的临界摩擦系数 0.6, 理论上, 南口山前断裂不存在因为应力达到临界状态而发生黏滑失稳的危险。

3 北京昌平十三陵钻孔地应力监测与变化 (2011 年 8 月 3 日—2013 年 3 月 31 日)

3.1 北京昌平十三陵钻孔地应力监测与数据分析

十三陵钻孔水压致裂地应力测量结束后, 于 2010 年 1 月在该钻孔 98 m 深度安装了 4 分量新型压磁地应力监测系统。该系统由中国地质科学院地质力学研究所研制, 目前, 已实现 4 分量监测探头自动加(卸)载、监测数据远程无线传输的功能, 且安装深度已超过 200 m, 处于国际领先水平(陈群策等, 2011; 董树文等, 2012, 2013)。十三陵钻孔 4 分量应力监测探头安装方位见图 5。

从 2011 年 8 月至今, 该地应力监测仪器已连续、稳定地获得了地应力监测数据(图 1)。图 1 显示的地应力监测数据从 2011 年 8 月 3 日 00:00 至 2013 年 2013 年 3 月 31 日 00:00, 可以直观看出: 分量 1、2、4 变化幅度较小, 分量 3 变化较大, 但不超过 4 MPa, 总体上, 4 个分量监测探头显示的正应力变化比较平稳(图 1)。参考应力观测数据的自检条件“(1+2)正应力变化=(3+4)正应力变化”(张培耀等, 2008; 黄相宁等, 2009; 池顺良等, 2013), 由图 6 可以看出, 在该阶段, 分量(1+2)正应力变化曲线与分量(3+4)正应力变化曲线形态较为相近, 两者之间虽然并不相等, 但其差值比较小, 介于 0~1.5 MPa 之间, 且多小于 1.0 MPa, 故该阶段 4 分量所显示出的正应力变化是比较可靠的。

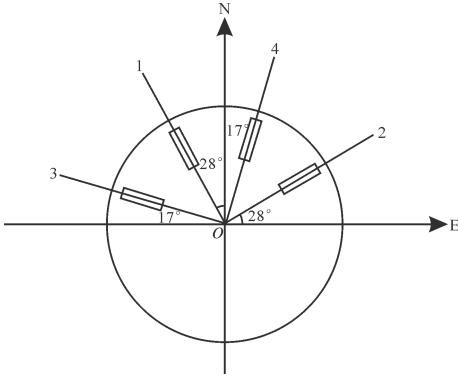


图 5 十三陵钻孔 4 分量新型压磁地应力监测探头方位 Fig. 5 Positions of four new piezomagnetic probes at Ming Tombs boreholes

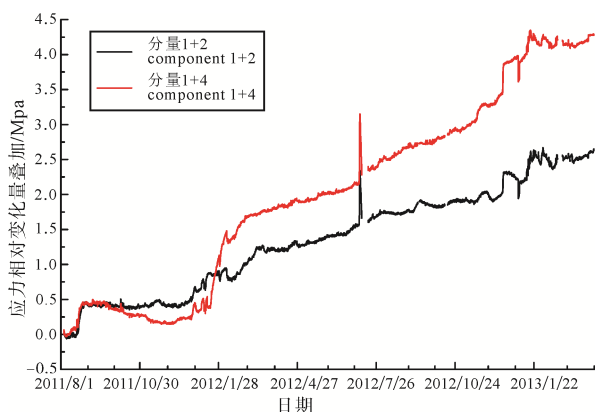


图6 十三陵地应力台站应力观测数据自检曲线
Fig. 6 Self checking curves of stress monitoring data at Ming Tombs in-situ stress monitoring station

由图1可看出,与2011.8.3 00:00相比,在该阶段末(2013.3.31 00:00),4分量应力监测得到的正应力均有不同程度的增加,假设4个分量探头在该阶段内的正应力变化量分别记为: $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, $\Delta\sigma_3$, $\Delta\sigma_4$,有: $\Delta\sigma_1=0.89$ MPa, $\Delta\sigma_2=1.73$ MPa, $\Delta\sigma_3=3.98$ MPa, $\Delta\sigma_4=0.28$ MPa。

3.2 基于4分量应力监测数据计算其引起平面应力状态下应力分量变化

假设三个方向 a 、 b 、 c 相互夹角为 45° ,三个方向上正应力(或变化量)分别为 σ_a 、 σ_b 、 σ_c (或 $\Delta\sigma_a$ 、 $\Delta\sigma_b$ 、 $\Delta\sigma_c$),而两个主应力(或引起 a 、 b 、 c 三个方向正应力变化量的主应力变化量)分别为 σ_{Hmax} 、 σ_{hmin} (或 $\Delta\sigma_{Hmax}$ 、 $\Delta\sigma_{hmin}$),其中, σ_{Hmax} (或 $\Delta\sigma_{Hmax}$)与 a 方向的夹角为 θ ,则由公式(2)可计算出主应力(或变化量)(王连捷等,1991):

$$\begin{aligned}\sigma_{Hmax} &= \frac{\sigma_a + \sigma_c}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_b - \sigma_a)^2 + (\sigma_b - \sigma_c)^2}{2}} \\ \sigma_{hmin} &= \frac{\sigma_a + \sigma_c}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_b - \sigma_a)^2 + (\sigma_b - \sigma_c)^2}{2}} \\ \tan 2\theta &= \frac{2\sigma_b - \sigma_a - \sigma_c}{\sigma_a - \sigma_c}\end{aligned}\quad (2)$$

表3 二维平面应力分量变化计算结果
(2011.8.3—2013.3.31)

Table 3 Results of variations of stress tensors under the two-dimensional plane stress state (2011.8.3—2013.3.31)

	方案	分量	$\Delta\sigma_{xx}$ /MPa	$\Delta\sigma_{yy}$ /MPa	$\Delta\tau_{xy}$ /MPa
2011.8.3	①	2, 4, 1	0.6893	0.3898	0.9200
—	②	4, 1, 3	1.2946	0.0624	2.0676
2013.3.31	③	1, 3, 2	3.2522	3.1856	-1.8756
	④	3, 2, 4	3.8824	2.8380	-0.7080

表4 初始水平主应力及应力分量计算结果

Table 4 Results of initial horizontal principal stresses and components of stress tensors

σ_{Hmax}^i /MPa	σ_{hmin}^i /MPa	σ_{xx}^i /MPa	σ_{yy}^i /MPa	τ_{xy}^i /MPa
5.30	3.91	4.1050	4.1220	0.4828

建立直角坐标系 xoy , x 正方向与正东方向一致, y 正方向与正北方向一致(图5),根据二维平面应力张量转换公式(李同林等,2006),将由公式(2)计算得到的主应力变化量计算得到其引起在坐标系 xoy 下的平面应力分量变化。计算过程中基于4分量监测探头中任意3个方向上的正应力变化量,共有4组方案,分别为:①(分量2,4,1)、②(分量4,1,3)、③(分量1,3,2)和④(分量3,2,4)。二维平面应力张量变化量计算结果见表3。

4 北京昌平十三陵钻孔地应力计算结果与断层活动危险性讨论(2013年3月底)

4.1 初始地应力场(2011年8月初)

参考表1中十三陵钻孔2010年1月初的地应力测量结果,在2011年8月初,压磁探头安装深度(98 m)处的最大水平主应力 $\sigma_{Hmax}^i=5.30$ MPa, $\sigma_{hmin}^i=3.91$ MPa, $\sigma_v^i=2.60$ MPa,最大水平主应力方向仍然为 $N22^\circ W$,并将该应力结果作为初始应力值。根据二维平面应力张量转换公式可以计算出其在直角坐标系 xoy 下的应力分量 σ_{xx}^i 、 σ_{yy}^i 、 τ_{xy}^i (表4)。

4.2 现今地应力场(2013年3月底)

设在2013年3月底钻孔98 m处的最大水平主应力为 σ_{Hmax}^P ,最小水平主应力为 σ_{hmin}^P ,垂向应力为 σ_v^P ,在直角坐标系 xoy 下的应力分量为 σ_{xx}^P 、 σ_{yy}^P 、 τ_{xy}^P ,将初始应力分量(表4)和该阶段(2011.8.3—2013.3.31)应力分量变化(表3)进行叠加(公式3),即可得到在2013年3月底的二维应力分量(表5),再由二维平面应力状态下主应力计算公式(李同林等,2006)分别计算出现今最大水平主应力 σ_{Hmax}^P 、最小水平主应力 σ_{hmin}^P 和最大水平主应力方向(表5)。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx}^P & \tau_{xy}^P \\ - & \sigma_{yy}^P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^i & \tau_{xy}^i \\ - & \sigma_{yy}^i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta\sigma_{xx} & \Delta\tau_{xy} \\ - & \Delta\sigma_{yy} \end{pmatrix}\quad (3)$$

由表5可以看出,在2013年3月底,钻孔98 m处的最大水平主应力值为6.06~8.73 MPa,最小水平主应力值为2.17~6.91 MPa,最大水平主应力优势方向为NE—近EW向,逐渐趋于华北区域构造应力场NEE—近EW向的主压应力方位。2010年1月初,地应力绝对测量得到钻孔内的最大水平主应力方向平均为 $N22^\circ W$,由此看来,从2010年1月初至2013年3月底,十三陵钻孔附近的最大主应力方向有调整,并呈现出与区域构造应力场方位一致的趋势。

4.3 断层活动危险性讨论

计算出十三陵钻孔98 m位置在初始应力条件下(2011年8月初)和现今应力条件下(2013年3月底)附近断层面上的剪应力、正应力和两者的比值(表6)。

由表6可以看出,在2011年8月初,十三陵钻

孔附近断层面上的剪应力与正应力的比值为 0.18; 在 2013 年 3 月底, 两者之间的比值为 0.16~0.24, 平均为 0.22; 两个阶段剪应力与正应力的比值均没有达到断层面上的临界摩擦系数 0.6, 理论上, 钻孔附近的南口山前断裂不存在黏滑失稳的危险。比较可以看出, 在 2013 年 3 月底, 断层面上剪应力与正应力的比值大于 2011 年 8 月初的值, 表明, 从 2011 年 8 月初至 2013 年 3 月底约 3 年的时间内, 十三陵钻孔附近应力水平在逐渐增加, 断层面上的剪应力与正应力的比值在也逐渐增大, 该变化趋势值得关注。

4.4 北京昌平及其附近地区现今地震活动性

上述分析表明北京昌平十三陵及其附近地区的应力水平自 2010 年初以来是增加的, 由地应力资料计算得到的浅层南口山前断裂面上的剪应力与正应力的比值虽没有达到断层发生黏滑失稳时的临界值 0.6, 却呈现出增大的趋势。为直观了解该区构造活动的强度, 我们根据中国地震台网中心首都圈地区地震数据库搜集到研究区内 347 条 M_L 1.0~3.0 级小震活动记录(2002 年 1 月 8 日至 2013 年 4 月 24 日) (<http://www.csndmc.ac.cn/newweb/data.htm>)(注: 该区没有 $M_L > 3.0$ 级地震记录); 为深入地地了解这些小震分布特征, 将本文研究区根据经纬度分为 9 个区, 分别记为 A、B、C、D、E、F、G、H 和 I(图 7); 将 347 条小震分布区域进行分区统计, 并给出其 M-T(震级-时间) 图(图 8), 并描绘出各个小区块内小震发生时间和震级图(图 9)。

研究区小震活动分布特征分析如下:

(1)从空间尺度上可看出, 研究区内 M_L 1.0~3.0 小震活动主要分布在区域 B、D、G、H 和 I, 即昌平区、海淀区北部和顺义区南部(图 8a)。其中, 以昌平为中心, 15 km 为半径的范围内, 小震活动分布(区域 A+区域 B+区域 D+区域 E)则占到了总数的

40%(图 8a), 该区域内, NW 向孙河—南口断裂和 NE 向南口山前断裂在南口附近交汇, 小震活动分布又相对密集, 一定程度上可能反映出南口山前断裂现今活动性有所增强。

(2)从时间尺度上可以看出, 在整个研究区内, 大致从 2007 年以来, 小震活动发生较频繁, 其中, 在 2009 年至 2013 年时间段内, 其分布更加密集(图 8b)。在十三陵钻孔附近 4 个区域(A、B、D 和 E)中, 区域 A 和 B 在 2010 年 4 月以后, 小震活动明显多于该时间点之前; 区域 D 和 E 在 2008 年 4 月以后, 小震活动也显著增加; 在其他区域中, 小震活动分布相对较均匀; 总体上, 研究区 9 个小区内小震发生频次在近 5 年间大体呈现出增加的趋势, 其中, 昌平区的 A、B、D 和 E 四个区域中这种变化趋势更明显(图 9)。

综上所述, 研究区近 12 年小震活动表明, 受控于区域内断裂活动, 十三陵钻孔所在的昌平及附近地区现今构造活动有增强的趋势, 该现象与十三陵钻孔地应力测量和监测结果所反映出断层活动危险

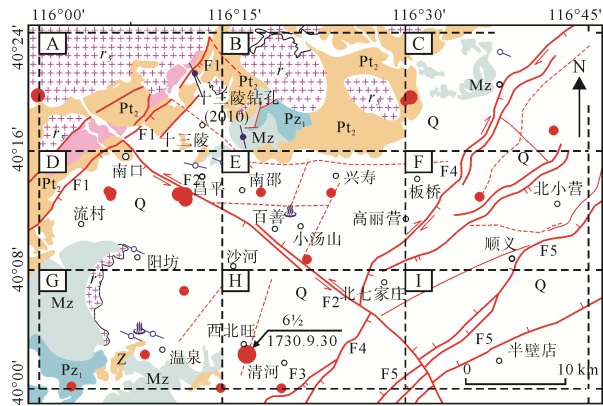


图 7 研究区小震活动分布区域(M_L 1.0~3.0; 图例同图 2)
Fig. 7 Distribution of small earthquakes in the study area (M_L 1.0~3.0; legends as for Fig. 2)

表 5 十三陵钻孔 98 m 位置现今主应力计算结果(2013 年 3 月底)

Table 5 Results of current principal stress at the depth of 98 m at Ming Tombs borehole

方案	σ_{xx}^P/MPa	σ_{yy}^P/MPa	τ_{xy}^P/MPa	$\sigma_{Hmax}^P/\text{MPa}$	$\sigma_{Hmin}^P/\text{MPa}$	σ_v^P/MPa	σ_{Hmax}^P 方向
①	4.79	4.51	1.40	6.06	3.24	2.60	N48°E
②	5.40	4.18	2.55	7.41	2.17	2.60	N52°E
③	7.36	7.31	-1.39	8.73	5.94	2.60	N46°W
④	7.99	6.96	-0.23	8.04	6.91	2.60	N78°W

表 6 北京十三陵钻孔附近断层面外法线与主应力坐标轴夹角余弦值与断层面上剪应力值、正应力值及两者比值计算结果

Table 6 Results of $l, m, n, \sigma_n, \tau_n$ and τ_n/σ_n

日期		l	m	n	σ_n/MPa	τ_n/MPa	τ_n/σ_n
2011.8.3		0.9254	0.1632	0.3420	4.95	0.88	0.18
2013.3.31	方案	①	0.1632	0.9254	3.24	0.51	0.16
		②	0.0982	0.9346	2.27	0.53	0.23
		③	0.9118	0.2273	7.87	2.01	0.26
		④	0.6528	0.6760	6.89	1.65	0.24

性增加的趋势基本一致。

5 结论与讨论

5.1 十三陵钻孔原地应力测量结果及变化

(1)2010年1月初,在钻孔103.50~207.50 m深度范围内,最大水平主应力 S_H 为4.33~6.25 MPa;最小水平主应力 S_h 为3.33~4.71 MPa;最大水平主应力 S_H 方向为 $N18^\circ W \sim N26^\circ W$,平均为 $N22^\circ W$;其中,在钻孔98 m深度, S_H 约为5.30 MPa, S_h 约为3.91 MPa。

(2)2013年3月底,在钻孔98 m深度,最大水平主应力 S_H 值为6.06~8.73 MPa,平均为7.56 MPa;最小水平主应力 S_h 值为2.17~6.91 MPa;最大水平主应力优势方位为NE—近EW向。

比较该钻孔不同时段应力测量结果可得,从2010年1月初至2013年3月底,最大水平主应力平均值由5.30 MPa增加到7.56 MPa,增加了近42.6%;最大水平主应力方向由NNW逐渐过渡到NE—近EW向。

5.2 十三陵钻孔附近断层活动危险性分析

在2010年1月初,在0~210 m深度范围内,十三陵钻孔附近南口山前断层面的剪应力与正应力的比值为0.05~0.18,平均为0.12;在2013年3月底,

在98 m深度,该比值为0.16~0.24,平均为0.22;2个阶段断面上的剪应力与正应力的比值均小于断层面滑动临界摩擦系数0.6,理论上,在现今应力水平下该断层不存在发生黏滑活动的危险,但其增加的趋势一定程度上表明了该区构造活动有所增强,该现象值得关注。

5.3 讨论

本文论述过程中,主要基于钻孔98 m深度原地应力测量与实时监测资料,故地应力监测数据的可靠性直接决定了钻孔在不同时段地应力计算结果的正确性,进而影响到对该区地震活动危险性的判

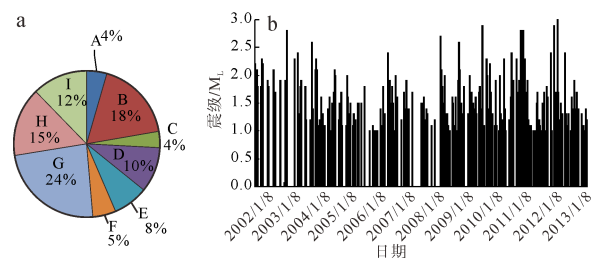


图8 小区域内小震活动分布统计及研究区“M-T”图
Fig. 8 Statistic distribution of small earthquakes in each sub-region and “M-T” chart in the study area

a-小区域内小震活动分布统计; b-研究区“M-T”图
a-statistic distribution of small earthquakes in each sub-region; b-“M-T” chart in the study area

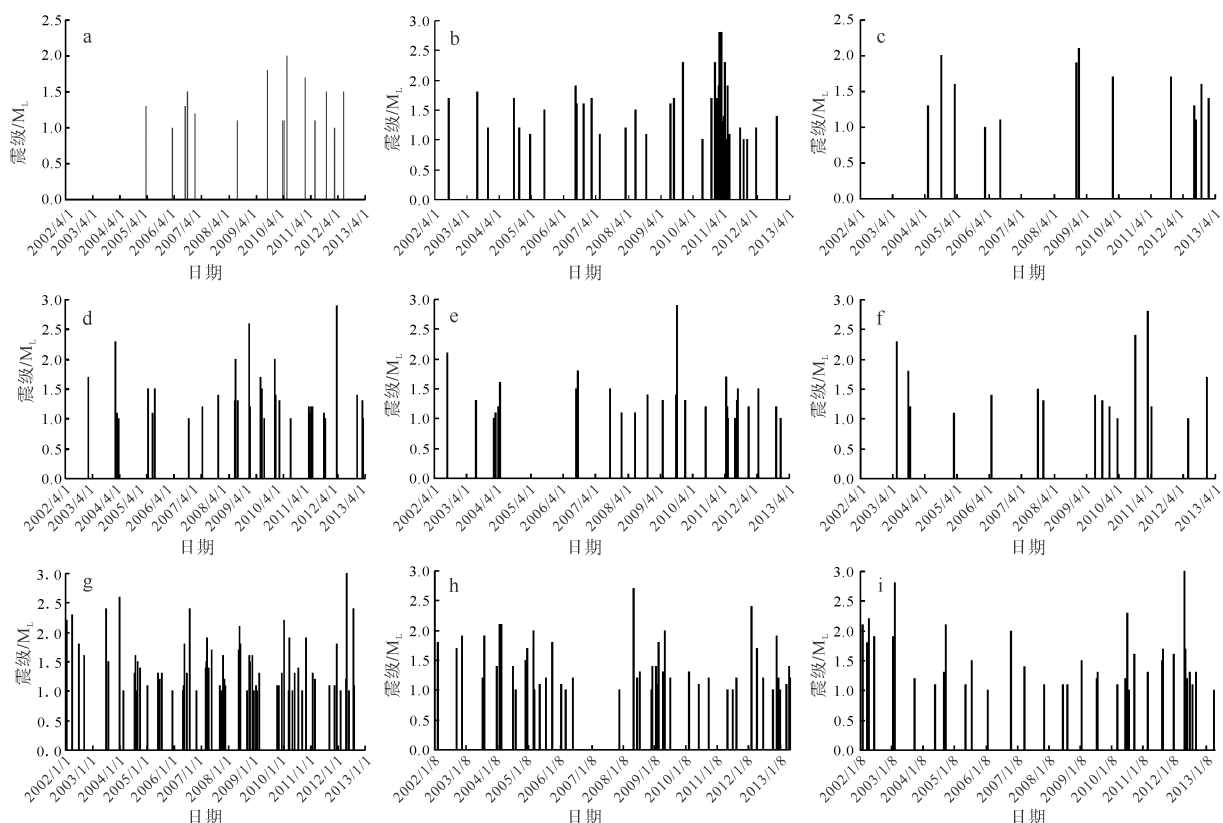


图9 小区域内小震活动“M-T”图

Fig. 9 “M-T” chart of small earthquakes in each sub-region

a-区域A“M-T”图; b-区域B“M-T”图; c-区域C“M-T”图; d-区域D“M-T”图; e-区域E“M-T”图; f-区域F“M-T”图; g-区域G“M-T”图;

h-区域H“M-T”图; i-区域I“M-T”图

a-“M-T” chart in area A; b-“M-T” chart in area B; c-“M-T” chart in area C; d-“M-T” chart in area D; e-“M-T” chart in area E; f-“M-T” chart in area F; g-“M-T” chart in area G; h-“M-T” chart in area H; i-“M-T” chart in area I

断。分析认为,从2011年8月3日00:00至2013年3月31日00:00的地应力实时监测数据基本满足自检条件,监测数据较客观、可靠,该台站测量和监测数据所显示出的地应力变化规律一定程度上直观反映出研究区现今构造活动的强度,因此,继续加强野外地质调查,充分利用现有地震地质资料,并深入分析地应力实时监测数据,对于认识区域内断裂活动、地震危险性及地壳稳定性是有必要的。

致谢:衷心地感谢中国地质科学院地质力学研究所王连捷研究员、廖椿庭研究员、陈群策研究员、吴满路研究员、孙东生博士、周能娟博士和秦向辉助理研究员对本文提出宝贵的建议。

参考文献:

- 安其美,丁立丰,王海忠,赵仕广. 2004. 龙门山断裂带的性质与活动性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 24(2): 115-119.
- 车兆宏,巩曰沐,刘善华,刘天海,孟国杰. 1997. 北京黄庄—高丽营断层、八宝山断层中段活动性综合研究[J]. 中国地震, 13(4): 330-337.
- 陈群策,安其美,孙东生,杜建军,毛吉震,丰成君. 2010. 山西盆地现今地应力状态与地震危险性分析[J]. 地球学报, 31(4): 541-548.
- 陈群策,李宏,廖椿庭,吴满路,崔效锋,杨树新. 2011. 地应力测量与监测技术实验研究——SinoProbe-06 项目介绍[J]. 地球学报, 32(增刊 1): 113-124.
- 池顺良,刘琦,池毅,邓涛,廖成旺,阳光,张贵萍,陈洁. 2013. 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 级地震的震前及临震应变异常[J]. 地震学报, 35(3): 296-303.
- 崔效锋,谢富仁,李瑞莎,张红艳. 2010. 华北地区构造应力场非均匀特征与煤田深部应力状态[J]. 岩石力学与工程学报, 29(增 1): 2755-2761.
- 董树文,李廷栋,陈宣华,魏文博,高锐,吕庆田,杨经绥,王学求,陈群策,石耀霖,黄大年,周琦. 2012. 我国深部探测技术与实验研究进展综述[J]. 地球物理学报, 55(12): 3884-3901.
- 董树文,李廷栋,高锐,吕庆田,魏文博,杨经绥,王学求,陈群策,石耀霖,黄大年,陈宣华,周琦. 2013. 我国深部探测技术与实验研究与国际同步[J]. 地球学报, 34(1): 7-23.
- 丰成君,陈群策,谭成轩,吴满路,秦向辉,廖椿庭. 2013a. 汶川 $M_s 8.0$ 级地震对龙门山断裂带附近地应力环境影响初探——以北川、江油地区为例[J]. 地震学报, 35(2): 137-150.
- 丰成君,陈群策,谭成轩,吴满路,秦向辉,孟文. 2013b. 龙门山断裂带东北段现今地应力环境研究[J]. 地球物理学进展, 28(3): 1109-1121.
- 高文学,马瑾. 1993. 首都圈地震地质环境与地震灾害[M]. 北京:地震出版社.
- 郭啟良,王成虎,马洪生,王崇良. 2009. 汶川 $M_s 8.0$ 级大震前后的水压致裂原地应力测量[J]. 地球物理学报, 52(5): 1-7.
- 胡平,罗华春,孟勇琦,白立新,王湘南. 2000. 从顺义地表破裂带分析顺义—良乡断裂北段的活动性[J]. 地震地质, 22(2): 123-128.
- 黄福明,马延著,李群芳,黄佩玉,王静. 1995. 华北北部构造应力场[J]. 中国地震, 11(2): 121-132.
- 黄相宁,康仲远,张超,李健春,王恩福. 1982. 地应力变化与地震预报[J]. 中国地质科学院地质力学研究所刊, 3: 153-169.
- 黄相宁,王连捷,葛丽明. 2009. 压磁应力计测量地应力相对变化结果讨论[C]//地壳构造与地壳应力文集. 北京:中国地震局地壳应力研究所, (21): 40-57.
- 黄相宁. 2006. 我所经历的地应力分析预测地震之发展[C]//地壳构造与地壳应力文集. 北京:中国地震局地壳应力研究所, (2): 26-36.
- 黄秀铭,汪良谋,徐杰,方仲景,张裕明,向家翠,王辉. 1991. 北京地区新构造运动特征[J]. 地震地质, 13(1): 43-51.
- 李方全,祁英男. 1988. 地壳应力随深度变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 7(4): 301-309.
- 李方全,王连捷. 1979. 华北地区地应力测量[J]. 地球物理学报, 22(1): 1-8.
- 李钦祖,靳雅敏,于新昌. 1982. 华北地区的震源机制与地壳应力场[J]. 地震学报, 4(1): 55-61.
- 李钦祖. 1980. 华北地壳应力场的基本特征[J]. 地球物理学报, 23(4): 376-388.
- 李四光. 1973. 地质力学概论[M]. 北京:科学出版社.
- 李同林,殷绥域. 2006. 弹塑性力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社.
- 梁海庆,刘建中,刘其向. 1993. 西南部分活动断裂面上现今应力状态与断裂失稳变形的关系[J]. 中国地震, 9(1): 46-53.
- 马文涛,徐锡伟,于贵华,张兰凤. 2004. 首都圈地区的地震活动性与断裂的关系[J]. 地震地质, 26(2): 293-304.
- 彭一民,李鼎容,谢振钊,王安德,刘清泗. 1981. 北京平原区同生断裂的某些特征及其研究意义[J]. 地震地质, 3(2): 57-64.
- 秦向辉,陈群策,谭成轩,安其美,吴满路,丰成君. 2013. 龙门山断裂带西南段现今地应力状态与地震危险性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 32(增 1): 2870-2876.
- 冉洪流,董瑞树,冯荣梅. 1996. 昌平南口山前断裂断层分段的地震学特征[J]. 山西地震, 86(3): 45-48.
- 石耀霖,张贝,张斯奇,张怀. 2013. 地震数值预报[J]. 物理, 42(4): 237-255.
- 孙士宏. 1994. 首都圈地区地震活动的分期与分区研究[J]. 地震, 6: 19-25.
- 孙叶,谭成轩,苗培实,王连捷,吴树仁,王瑞江,陈群策,孙炜锋,孙东生,赵卫华. 2012. 地震地质与地震预报[M]. 北京:地质出版社.
- 谭成轩,秦向辉,王瑞江,龙长兴,邓乃恭,孙叶,张春山,孙炜锋. 2010. 中国大陆中东部 $M \geq 8.0$ 级特大地震震背景初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 29(增 2): 162-171.
- 谭成轩,孙炜锋,孙叶,王连捷. 2006. 地应力测量及其地下工程应用的思考[J]. 地质学报, 80(10): 1627-1632.
- 王连捷,潘立宙,廖椿庭,丁原辰,区明益. 1991. 地应力测量及其在工程中的应用[M]. 北京:地质出版社.
- 王若柏,黄立人. 1984. 北京地区的水平形变及其构造意义[J]. 地震地质, 6(4): 17-24.
- 王士德,张之一,吴新国. 1982. 北京西山“八宝山断裂带”特征及其形成机理探讨[J]. 河北地质学院院报, 12(Z1): 111-127.
- 王宋贤. 1982. 北京地区断层活动的阶段性特征[J]. 地震地质, 4(3): 73-79.
- 王挺梅,胡言,方仲景,丁梦林,徐杰. 1983. 北京黄庄断裂活动的地质证据[J]. 地震地质, 5(1): 1-2.
- 魏光兴,周翠英,赵兴兰. 1982. 华北地区中小地震应力场的优势方位[J]. 地球物理学报, 25(4): 333-343.
- 吴满路,张岳桥,廖椿庭,陈群策,马寅生,吴金生,严君凤,区明益. 2010. 汶川地震后沿龙门山断裂带原地应力测量初步结果[J]. 地质学报, 84(9): 1292-1299.

张培耀, 张道仪, 朱万守, 范良龙, 陈若萍, 延军. 2008. 四川汶川 8 级地震地应力异常——来自压磁频率应力测量系统的记录[J]. 地质学报, 82(12): 1788-1799.

赵文津. 2009. 就汶川地震失报探讨地震预报的科学思路——再论李四光地震预报思想[J]. 中国工程科学, 11(6): 4-15.

周翠英, 王华林, 王红卫, 王梅, 柳凤兰, 周元夫. 2001. 华北 4 次中、强地震前震源区及其附近应力场的变化[J]. 地震地质, 23(1): 98-110.

References:

- AN Qi-mei, DING Li-feng, WANG Hai-zhong, ZHAO Shi-guang. 2004. Research of property and activity of Longmen Mountain fault zone[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 24(2): 115-119(in Chinese with English abstract).
- BYERLEE J O. 1978. Friction of Rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 116(45): 615-626.
- CHE Zhao-hong, GONG Yue-mu, LIU Shan-hua, LIU Tian-hai, MENG Guo-jie. 1997. Comprehensive Study of Fault Activity of Huangzhuang-Gaoliying and Babaoshan Fault in the Middle Section[J]. Earthquake Research in China, 13(4): 330-337(in Chinese with English abstract).
- CHEN Qun-ce, AN Qi-mei, SUN Dong-sheng, DU Jian-jun, MAO Ji-zhen, FENG Cheng-jun. 2010. Current In-situ Stress State of Shanxi Basin and Analysis of Earthquake Risk[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(4): 541-548(in Chinese with English abstract).
- CHEN Qun-ce, LI Hong, LIAO Chun-ting, WU Man-lu, CUI Xiao-feng, YANG Shu-xin. 2011. An Experimental Study of the Technique for In-Situ Stress Measurement and Monitoring: An Introduction to the Project sinoProbe-06[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(S1): 113-124(in Chinese with English abstract).
- CHI Shun-liang, LIU Qi, CHI Yi, DENG Tao, LIAO Cheng-wang, YANG Guang, ZHANG Gui-ping, CHEN Jie. 2013. Borehole strain anomalies before the 20 April 2013 Lushan $M_s 7.0$ earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 35(3): 296-303(in Chinese with English abstract).
- CUI Xiao-feng, XIE Fu-ren, LI Rui-sha, ZHANG Hong-yan. 2010. Heterogeneous features of state of tectonic stress field in north China and deep stress in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 29(S1): 2755-2761(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong, CHEN Xuan-hua, WEI Wen-bo, GAO Rui, LÜ Qing-tian, YANG Jing-sui, WANG Xue-qiu, CHEN Qun-ce, SHI Yao-lin, HUANG Da-nian, ZHOU Qi. 2012. Progress of deep exploration in mainland China: A view[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(12): 3884-3901(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong, GAO Rui, LÜ Qing-tian, WEI Wen-bo, YANG Jing-sui, WANG Xue-qiu, CHEN Qun-ce, SHI Yao-lin, HUANG Da-nian, CHEN Xuan-hua, ZHOU Qi. 2013. Progress of Sinprobe-Deep Exploration in China 2008—2012[J]. Acta Geoscientica Sinica, 34(1): 7-23(in Chinese with English abstract).
- FENG Cheng-jun, CHEN Qun-ce, TAN Cheng-xuan, WU Man-lu, QIN Xiang-hui, LIAO Chun-ting. 2013a. A preliminary study of the influence of Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake on in-situ stress state near Longmenshan fault zone: A case study in Beichuan and Jiangyou areas[J]. Acta Seismologica Sinica, 35(2): 137-150(in Chinese with English abstract).
- FENG Cheng-jun, CHEN Qun-ce, TAN Cheng-xuan, WU Man-lu, QIN Xiang-hui, MENG Wen. 2013b. Analysis on current in-situ stress state in northern segment of Longmenshan fault belt[J]. Progress in Geophysics, 28(3): 1109-1121(in Chinese with English abstract).
- GAO Wen-xue, MA Jin. 1993. Seismo-geological background and earthquake hazard in Beijing area[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese with English abstract).
- GUO Qi-liang, WANG Cheng-hu, MA Hong-sheng, WANG Chong-gen. 2009. In-situ hydro-fracture stress measurement before and after the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(5): 1-7(in Chinese with English abstract).
- HAIMSON B C, CORNET F H. 2003. 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 & Mining Sciences, 40(7-8): 1011-1020.
- HAIMSON B C. 1989. Measurement of Rock Stress Using the Hydraulic Fracturing Method in Cornwall U.K.-Part II. Data Reduction and Stress Calculation[J]. Int.J.Rock Mech.Min.Sci. and Geomech, Abstr., 26(5): 361-372.
- HU Ping, LUO Hua-chun, MENG Yong-qi, BAI Li-xin, WANG Xiang-nan. 2000. Analysis for activity of north section of the Shunyi-Liangxiang fault from the Shunyi ground rupture zone[J]. Seismology and Geology, 22(2): 123-128(in Chinese with English abstract).
- HUANG Fu-ming, MA Yan-zhu, LI Qun-fang, HUANG Pei-yu, WANG Jing. 1995. The Tectonic Stress Field in the Northern Part of North China[J]. Earthquake Research in China, 11(2): 121-132(in Chinese with English abstract).
- HUANG Xiang-ning, WANG Lian-jie, GE Li-ming. 2009. A Discussion on the Relative Variation of Crustal Stress Measured by Piezomagnetic Stress Gauge[C]// Crustal structure and stress. Institute of crustal dynamics, SSB, (21): 40-57(in Chinese with English abstract).
- HUANG Xiang-ning. 2006. The development of my experience of applying the stress to analyze the prediction of earthquake[C]//Crustal structure and stress. Beijing: Institute of Crustal Dynamics, SSB, (2): 26-36(in Chinese).
- HUANG Xiu-ming, WANG Liang-mou, XU Jie, FANG Zhong-jing, ZHANG Yu-ming, XIANG Jia-hui, WANG Hui. 1991. Characteristics of neotectonic movement in Beijing area[J]. Seismology and Geology, 13(1): 43-51(in Chinese with English abstract).
- HUANG-Xiang-ning, KANG Zhong-yuan, ZHANG Chao, LI Jian-chun, WANG En-fu. 1982. Variation of Terrestrial Stress and Prediction of Earthquake[J]. Journal of Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, 3: 153-169(in Chinese with English abstract).
- LI Fang-quan, QI Ying-nan. 1988. Variation of Crustal Stresses with Depth in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 7(4): 301-309(in Chinese with English abstract).
- LI Fang-quan, WANG Lian-jie. 1979. Stress measurement in north China[J]. Acta Geophysica Sinica, 22(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- LI Qin-zu, JIN Ya-ming, YU Xin-chang. 1982. Focal mechanisms and crustal stress field in north China[J]. Acta Seismologica

- Sinica, 4(1): 55-61(in Chinese with English abstract).
- LI Qin-zu. 1980. General features of the stress field in the crust of north China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 23(4): 376-388(in Chinese with English abstract).
- LI Si-guang. 1973. *Introduction to Geomechanics*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- LI Tong-lin, YIN Sui-yu. 2006. *Mechanics of Elasticity and Plasticity*[M]. Wuhan: Chinese University of Geosciences Press(in Chinese).
- LIANG Hai-qing, LIU Jian-zhong, LIU Qi-xiang. 1993. The Relationship between Present State of Stress in Part of Active Faults Plane and Their Unsteady form in Southeast China[J]. *Earthquake Research in China*, 9(1): 46-53(in Chinese with English abstract).
- LIAO Chun-ting, ZHANG Chun-shan, WU Man-lu, MA Yin-sheng, OU Ming-yi. 2003. Stress change near the Kunlun fault before and after the $M_s 8.1$ Kunlun earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 30(20): 2027-2030.
- LIN Wei-ren, CONIN M, MOORE J C, CHESTER F M, NAKAMURA Y, MON J J, ANDERSON L, BRODSKY E, EGUCHI N, SCIENTISTS E. 2013. Stress State in the Largest Displacement Area of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake[J]. *Science*, 339(6120): 687-690.
- MA Wen-tao, XU Xi-wei, YU Gui-hua, ZHANG Lan-feng. 2004. The relationship between seismic activity and fault activity in Beijing region[J]. *Seismology and Geology*, 26(2): 293-304(in Chinese with English abstract).
- PEN Yi-ming, LI Ding-rong, XIE Zhen-zhao, WANG An-de, LIU Qing-si. 1981. Some features of contemporaneous faults in Beijing plain and their significance[J]. *Seismology and Geology*, 3(2): 57-64(in Chinese with English abstract).
- QIN Xiang-hui, CHEN Qu-ce, TANG Cheng-xuan, AN Qi-mei, WU Man-lu, FENG Cheng-jun. 2013. Analysis of current geostress state and seismic risk in southwest segment of Longmenshan fracture belt[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 32(S1): 2870-2876(in Chinese with English abstract).
- RAN Hong-liu, DONG Rui-shu, FENG Rong-mei. 1996. Seismological Features of the Segmentation of Nankou Piedmont Fault in Changping County[J]. *Earthquake research in Shanxi*, 86(3): 45-48(in Chinese with English abstract).
- SHI Yao-lin, ZHANG Bei, ZHANG Si-qí, ZHANG Huai. 2013. Numerical earthquake prediction[J]. *Physiscs*, 42(4): 237-255(in Chinese with English abstract).
- SUN Shi-hong. 1994. Study on substage and zoning of seismicity in capital circle area[J]. *Earthquake*, 6: 19-25(in Chinese with English abstract).
- SUN Ye, TAN Cheng-xuan, MIAO Pei-shi, WANG Lian-jie, WU Shu-ren, WANG Rui-jiang, CHEN Qu-ce, SUN Wei-feng, SUN Dong-sheng, ZHAO Wei-hua. 2012. *Seismological and the prediction of earthquake*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- TAN Cheng-xuan, QIN Xiang-hui, WANG Rui-jiang, LONG Chang-xin, DENG Nai-gong, SUN Ye, ZHANG Chun-shan, SUN Wei-feng. 2010. Preliminary analysis of earthquake occurrence background of $M_s \geq 8.0$ catastrophic earthquake in middle and east part of Chinese content[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(S2): 162-171(in Chinese with English abstract).
- TAN Cheng-xuan, SUN Wei-feng, SUN Ye, WANG Lian-jie. 2006. A Consideration on In-Situ Crustal Stress Measuring and Its Underground Engineering Application[J]. *Acta Geological Sinica*, 80(10): 1627-1632(in Chinese with English abstract).
- WANG Lian-jie, PAN Li-zhou, LIAO Chun-ting, DING Yuan-chen, OU Ming-yi. 1991. *Crustal stress measurements and their application in Engineering*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WANG Ruo-bai, HUANG Li-ren. 1983. Horizontal deformation and its geotectonic implication in the Beijing area[J]. *Seismology and Geology*, 6(4): 17-24(in Chinese with English abstract).
- WANG Shi-de, ZHANG Zhi-yi, WU Xin-guo. 1982. Discussion of the features and formation mechanism of Babaoshan fault in Xishan, Beijing[J]. *Journal of Hebei College of Geology*, 12(Z1): 111-127(in Chinese).
- WANG Song-xian. 1982. The feature of the fault activities by stages in the Beijing region[J]. *Seismology and Geology*, 4(3): 73-79(in Chinese).
- WANG Ting-mei, HU Yan, FANG Zhong-jing, DING Meng-lin, XU Jie. 1983. Geological Evidence for the Recent Activity of Huangzhuang Fault in Beijing[J]. *Seismology and Geology*, 5(1): 1-2(in Chinese with English abstract).
- WEI Guang-xin, ZHOU Cui-ying, ZHAO Xing-lan. 1982. Dominant directions of stress field from minor earthquakes in north-eastern China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 25(4): 333-343(in Chinese with English abstract).
- WU Man-lu, ZHANG Yue-qiao, LIAO Chun-ting, CHEN Qun-ce, MA Yin-sheng, WU Jin-sheng, YAN Jun-feng, OU Ming-yi. 2009. Preliminary Results of In-Situ Stress Measurements Along the Longmenshan Fault Zone After the Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake[J]. *Acta Geological Sinica*, 84(9): 1292-1299(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Pei-yao, ZANG Dao-yi, ZHU Wan-shou, FAN Liang-long, CHEN Ruo-ping, YAN Jun. 2008. Anomalous Earth Stress of the $M_s 8.0$ Wenchuan Earthquake in Sichuan, China—Recording from Piezomagnetic Frequency Measurement to the Earth Stress[J]. *Acta Geological Sinica*, 82(12): 1788-1799(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Wen-jin. 2009. Pondering over the scientific thinking of earthquake prediction from the miss report of Wenchuan Earthquake—re-discussing Li Siguang's earthquake prediction thought[J]. *China Engineering Science*, 11(6): 4-15(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Cui-ying, WANG Hua-lin, WANG Hong-wei, WANG Mei, LIU Feng-lan, ZHOU Yuan-fu. 2001. The changes of stress field in the focal region and its adjacent areas before four moderate-strong earthquakes in north China[J]. *Seismology and Geology*, 23(1): 98-110(in Chinese with English abstract).
- ZOBACK M D, BARTON C A, BRUDY M, CASTILLO D A, FINKBEINER T, GROLLMUND B R, MOOS D B, PESKA P, WARD C D, WIPRUT D J. 2003. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40: 1049-1076.