

秦向辉,张鹏,丰成君等. 2014. 北京地区地应力测量与主要断裂稳定性分析. 地球物理学报, 57(7):2165-2180, doi:10. 6038/cjg20140712.

Qin X H, Zhang P, Feng C J, et al. 2014. In-situ stress measurements and slip stability of major faults in Beijing region, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(7):2165-2180, doi:10. 6038/cjg20140712.

北京地区地应力测量与主要断裂稳定性分析

秦向辉^{1,2}, 张鹏^{1,2}, 丰成君^{1,2}, 孙炜锋^{1,2}, 谭成轩^{1,2}, 陈群策^{1,2}, 彭有如³

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

3 北京市地质工程设计研究院, 北京 101500

摘要 2008 年汶川地震后, 为查明北京地区现今地应力状态、评价断裂稳定性, 相继在北京地区开展了 5 个深孔 (600~1000 m) 的水压致裂法地应力测量, 并在适宜深度安装了地应力相对变化监测探头, 建立了地应力变化监测台站. 本文首先利用实测地应力数据分析了北京地区地壳浅表层应力状态, 结果表明: (1) 北京地区千米深度内, 最大、最小水平主应力随深度增加梯度系数分别为 0.0328 和 0.0221, 侧压系数 K_{av} 和 K_{Hv} 值, 最大、最小水平主应力之比 K_{Hh} 值与国内外已有认识基本一致, 而水平向剪应力相对强度参数 μ_m 值较低; (2) 北京地区最大水平主应力优势方向为近 EW 向, 与华北地区构造应力场方向基本一致, 同时受区内断裂活动等影响, 存在与区域主应力方向偏差的局部应力场; (3) 实测数据揭示的应力结构显示, 北京地区地壳浅表层最大主应力 (σ_1) 总体为最大水平主应力 (σ_H), 受区域构造演化以及测点附近断裂的影响, 中间主应力 (σ_2) 与最小主应力 (σ_3) 所对应的实测地应力存在变化, 但总体来讲, 实测地应力数据揭示的应力结构与北京地区主要断裂性质基本相吻合. 其次, 基于实测应力数据, 采用库仑摩擦滑动准则, 结合拜尔定律, 并取摩擦系数为 0.2~1.0, 初步评价了北京地区主要断裂稳定性, 结果显示: (1) 在摩擦系数取 0.6~1.0 条件下, 北京地区现今应力状态尚未达到导致断裂失稳滑动水平, 断裂不会出现失稳滑动现象; (2) 摩擦系数弱化到 0.4 时, 西峰寺钻孔应力状态满足断裂失稳滑动条件, 揭示出八宝山断裂存在失稳滑动可能性, 而夏垫—马坊断裂和黄庄—高丽营断裂附近测点应力状态将趋近满足断裂失稳滑动条件, 表明这两条断裂有趋向失稳滑动可能性; (3) 只有当摩擦系数弱化到 0.2 时, 北京地区主要断裂才可能在现今应力状态出现断裂失稳滑动. 本文的认识对北京地区乃至华北地区构造应力场、地震地质研究有重要参考意义.

关键词 北京地区; 地应力; 水压致裂法; 地壳应力状态; 库仑滑动摩擦准则; 断裂稳定性

doi:10. 6038/cjg20140712

中图分类号 P541

收稿日期 2013-09-24, 2014-01-26 收修定稿

In-situ stress measurements and slip stability of major faults in Beijing region, China

QIN Xiang-Hui^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, FENG Cheng-Jun^{1,2}, SUN Wei-Feng^{1,2},

TAN Cheng-Xuan^{1,2}, CHEN Qun-Ce^{1,2}, PENG You-Ru³

1 Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences (CAGS), Beijing 100081, China

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

3 Beijing Design Institute of Geological Engineering, Beijing 101500, China

Abstract In order to estimate the upper crustal stress state and slip stability of major faults after the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake, five boreholes, i. e., Pinggu, Shisanling, Xifengsi, Miyun,

基金项目 中国地质调查局项目“北京地区主要活动断裂工程地质稳定性评价与地应力测量”(1212010814052)、深部探测技术与实验研究专项(Sinoprobe-06-03)、中国地质调查局项目“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”(12120113012100)及中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费项目(DZLXSJK201107)联合资助.

作者简介 秦向辉, 男, 1984 年生, 助理研究员, 2010 年于中国地质大学(北京)获硕士学位. 主要从事地应力测量与监测、区域地壳稳定性评价等工作. E-mail: qinxiangh03@126.com

and Lisiguang Memorial Hall borehole ranging from 600 to 1000 m were drilled in Beijing region. Hydraulic fracturing method was used to conduct in-situ stress measurements in these five boreholes, and stress monitoring equipment was installed at appropriate depth and monitoring stations were constructed. Those data derived from the in-situ stress measurements reveal that the gradient coefficients of the maximum horizontal stresses and minimum horizontal stresses versus depth are 0.0328 and 0.0221, respectively; and the magnitudes of lateral pressure coefficient such as K_{av} , K_{Hv} and the ratios (K_{Hh}) of the maximum horizontal stress to minimum horizontal stress are consistent with previous studies. However, the ratios (μ_m) of the maximum horizontal shear stress to the average horizontal stress are relatively low. It is noted that the dominant direction of the maximum horizontal stress in Beijing region is \sim EW which is the same with the tectonic stress field of North China. However, sub-regional stress field induced by faults which shows deviation from the orientation of North China, has been also revealed. In addition, the stress regimes inferred from in-situ stress data imply that the maximum horizontal stress (σ_H) is the maximum principal stress (σ_1), while the intermediate (σ_2) and the minimum principal stress (σ_3) show some variations. It is suggested that these variations may be caused mainly by the regional tectonic evolution and the activity of faults near the boreholes. Based on these characteristic parameters, we can point out that the maximum horizontal stress in the upper crust of Beijing region can be defined as dominant stress, while the horizontal shearing stress is relatively weak. Finally, slip stability of major faults in Beijing region is estimated according to Column friction criterion and Byerlee's law, together with the frictional coefficients being assumed to be 0.2, 0.4, 0.6 and 1.0. The results reveal that when the frictional coefficient ranges from 0.6 to 1.0, the recent crustal stress state of Beijing region does not yet reach the expected limit of fault slip. The stress values of the Xifengsi borehole will reach the expected limit when the frictional coefficient is weakened to 0.4, revealing that the Babaoshan fault stands chance of slipping; the Xiadian-Mafang fault and the Huangzhuang-Gaoliying fault will approach to the expected limit of slip and will stand chance of slipping under this hypothesis, but only with very low possibility. However, it should be pointed out that if the frictional coefficient is weakened to as low as 0.2, the major faults in Beijing region will be unstable and slip may occur under the present-day crustal stress state. Conclusions in this paper would be of great significance for studies on tectonic stress field and seismogeology in Beijing region, even North China.

Keywords Beijing region; In-situ stress; Hydraulic fracturing; Crustal stress state; Column frictional failure criterion; Fault slip stability

1 引言

地壳浅表层变形和内部构造活动以及由此导致的各种地质灾害与地壳应力状态密切相关。揭示地壳应力状态及其作用规律,尤其是关键构造部位地壳应力状态,对于研究解决诸如断裂失稳滑动、地震地质、区域地壳稳定性以及重大工程地质问题等有重要作用(谢富仁等,2005;谭成轩等,2010;石耀霖等,2013)。

地应力测量是揭示地壳应力状态最直接的途

径,国内外众多学者通过此方法获得了地壳浅表层应力状态的基本特征,如 Hast 等(1969)通过实测地应力研究了斯堪的纳维亚地区应力场特征; Zoback 等(1980)通过沿圣安德烈斯断裂带地应力测量揭示了该断裂及其外围应力状态;李方全和王连捷(1979)通过华北地区地应力测量分析了该区地壳应力状态;Zoback 等(1993)利用 KTB 钻孔,获得了 6 km 深度内的地应力数据;Wu 等(2009)、陈群策等(2012)汶川地震后沿龙门山断裂带的地应力测量,揭示了震后龙门山断裂带地应力状态。

地应力测量区域的扩大、数据的积累,使通过数

学方法,定量描述地壳应力状态成为可能. Brown 和 Hoek(1978)统计分析了世界范围内地应力值随深度分布特征;Zoback(1992)通过对全球地应力资料的收集整理,绘制了全球应力图;谢富仁等(2003)基于我国大量地应力测量资料,建立了中国地壳应力环境库;谢富仁等(2004)、杨树新等(2012)详细分析了我国地壳浅表层应力分布特征,并进行了构造应力分区研究.这些成果为我们从板块尺度和地块尺度了解某个区域地壳浅表层应力状态提供了参考,但是,上述结果中往往隐含了影响地应力状态的因素,如地质构造、地形地貌、岩体结构等,而在一个构造单元内,断裂活动、地形地貌等影响可能起着控制性作用(Tan et al., 2004; 秦向辉等, 2012),因此,在单一构造单元内关键部位系统地进行地应力测量依旧是准确查明地壳浅表层应力状态最理想和可靠的途径.

除表征地壳应力状态外,地应力测量数据在地震孕育、断裂稳定性分析等方面意义也被广泛发掘.如通过昆仑山地震前后应力对比测量, Liao 等(2003)首次揭示了地震前后应力调整现象;郭啟良等(2009)基于汶川地震前后地应力对比测量结果,深化了大震前后地应力状态调整的认识;Lin 等(2011, 2013)通过应力测量,探讨了 2011 年日本大地震前后应力场调整情况;Anderson(1951)分析了地应力状态与断裂性质之间关系.拜尔定律促进了利用实测地应力数据分析断裂稳定性研究,实测数据也证实了这种方法的适用性,如 Zoback 和 Townend(2001)利用 6 口深孔实测数据对拜尔定律进行了验证分析;Wu 等(2009)、秦向辉等(2013)通过地应力数据分析了龙门山断裂西南段断裂失稳滑动可能性,探讨了地震地质灾害发生的可能性;张鹏等(2013)通过地应力数据,评价了 2011 年日本地震后郯庐断裂山东段稳定性.

作为首都,北京在国家政治、经济文化生活中有着举足轻重的作用.有关北京地区及华北地区地壳结构、断裂活动、地震地质等研究一直在进行,并在断裂活动性、GPS 观测、上地壳三维结构层析、震源机制解等方面取得了重要成果.但是,北京地区实测应力场研究相对不足,其工作主要是在 1976 年唐山 7.8 级地震后应急开展的,限于当时技术条件,地应力测量深度普遍较浅(≤ 300 m),而深部应力数据可以更好的揭示北京地区地壳浅表层现今地应力状态、评价断裂稳定性.此外,2008 年汶川 M_s 8.0 级地震、2011 年日本 M_w 9.0 级地震以及 2012 年 5 月滦

县 M_s 4.8 级地震的发生,对北京乃至华北地区现今地壳应力状态及断裂稳定性的了解和评价提出了新的要求.

鉴于此,在北京地区关键构造部位的 5 个 600~1000 m 钻孔中系统地开展了水压致裂地应力测量与监测工作.本文首先简述了北京地区 5 个地应力测点情况,给出了 5 个测点的水压致裂法地应力测量数据;其次,根据实测数据计算了表征地壳浅表层应力状态的参数,分析了北京地区地壳浅表层应力状态;最后,基于实测地应力数据,利用库仑滑动摩擦准则,结合拜尔定律,初步评价了北京地区主要断裂失稳滑动可能性,探讨了地壳浅表层应力状态与断裂活动性间的关系.

2 区域新构造活动

北京地区位于华北平原北部,西部为太行山余脉的西山,北部为燕山山脉的军都山,相对高差较大,属中山、低山地形,东南区为沉积平原.

北京地区地层除缺失上奥陶统至下石炭统、上白垩统及古新统之外,从太古代古老变质岩系至第四系均存在.西北部山区主要出露新生代以前的地层,其余大部分地表被第四纪沉积层覆盖,其沉积厚度一般为 300~500 m,而在顺义盆地、大厂盆地,厚度可达 600~800 m.北京地区岩浆活动频繁,有各种成分的侵入岩和火山岩,主要有前长城期、中元古期、华里西期、燕山期和喜山期,而以燕山期最为强烈,规模最大,形成了诸多酸性—中基性火成岩体(鲍亦冈等,1983).

北京地区发育了一系列活动断裂(如图 1),主要有 NE 向的南口山前断裂、八宝山断裂带、黄庄—高丽营断裂带、顺义—良乡断裂带和夏垫—马坊断裂, NW 向的孙河—南口断裂.其中,南口山前断裂(F_1)总体走向 $NE40^\circ \sim 60^\circ$,倾向 SE,倾角 $50^\circ \sim 80^\circ$,燕山早期表现为逆冲性质,后经过多期活动,上新世至全新世断裂部分段表现为张性正断层(黄秀铭等,1991;焦青等,2005).八宝山断裂(F_2)总体走向 NNE—NE,倾向 SE,倾角 $25^\circ \sim 80^\circ$,断裂形成于中侏罗世至晚侏罗世,早白垩世具有拉张活动特性,末期受到燕山运动 NW—SE 向强烈挤压而表现为逆断层性质,研究表明该断裂目前处于蠕滑状态(车兆宏和范燕,2003;焦青等,2005).黄庄—高丽营断裂(F_3)总体走向 NNE—NE,倾向 SE,倾角 $30^\circ \sim 70^\circ$,为隐伏、半隐伏断裂,发育于早白垩世初,并逐

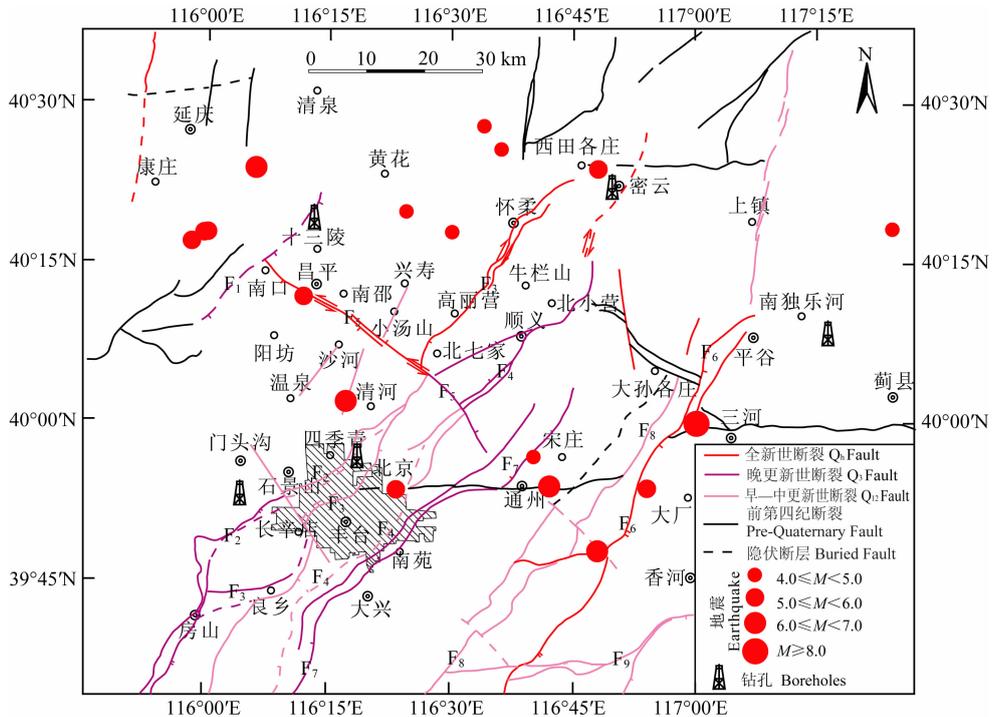


图 1 北京地区主要断裂分布及地应力测量钻孔位置图

图中, F_1 : 南口山前断裂; F_2 : 八宝山断裂; F_3 : 黄庄—高丽营断裂; F_4 : 顺义—良乡断裂; F_5 : 孙河—南口断裂; F_6 : 夏垫—马坊断裂; F_7 : 通县—南苑断裂; F_8 : 燕郊—固安断裂; F_9 : 涿州—宝坻断裂.

Fig. 1 Map of major faults and in-situ stress measurements boreholes in Beijing region

In this figure, faults symbolled from F_1 to F_9 refer to the Nankou Piedmont Fault, Babaoshan Fault, Huangzhuang-Gaoliying Fault, Shunyi-Liangxiang Fault, Sunhe-Nankou Fault, Xiadian-Mafang Fault, Tongxian-Nanyuan Fault, Yanjiao-Gu'an Fault and Zhuozhou-Baodi Fault, respectively.

渐取代八宝山断裂成为北京拗陷西边界断裂, 第四纪期间向北扩展, 形成顺义和怀柔等第四纪次级拗陷(车兆宏和范燕, 2003; 焦青等, 2005). 顺义—良乡断裂(F_4) 总体走向 $NE40^\circ$, 倾向 NW , 倾角 $60^\circ \sim 80^\circ$, 为一条切断至康氏面的断裂, 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, 总体表现为张性顺扭活动(焦青等, 2005; 刘保金等, 2009). 孙河—南口断裂(F_5) 走向 $NW45^\circ \sim 50^\circ$, 倾向 SW , 倾角在 70° 以上, 为北京地区规模最大的北西向隐伏、半隐伏断裂, 第四纪以来表现出多期活动的特点, 活动方式以张性反扭为主(焦青等, 2005; 张世民等, 2008). 夏垫—马坊断裂(F_6) 走向 $NE30^\circ$ 左右, 倾向 SE , 倾角 $65^\circ \sim 70^\circ$, 为大厂盆地的边界断裂, 断裂深达莫氏面, 最新活动时期为全新世, 是 1679 年马坊 8 级地震的发震断裂; 该断裂北段表现为张性顺扭活动、而南段表现出压性顺扭特征(徐锡伟等, 2002).

北京地区新构造活动以活动断裂带为主要表现形式, 此外尚有由活动断裂直接或间接控制的隐伏断陷盆地. 新生代以来, 该区新构造活动总体上表现

为挤压作用由强变弱、伸展作用由弱变强, 挤压作用持续时间相对较短, 伸展作用持续的时间长, 挤压作用和伸展作用交替出现, 挤压构造和伸展构造间互发育(马寅生等, 2002). 古近纪末至新近纪初北京地区具有区域构造挤压作用特征, 而古近纪和新近纪至第四纪北京地区具有明显的区域构造伸展作用特征; 晚第四纪以来, 北京地区处于近东西向受压状态.

地震活动方面, 北京地区位于张家口—渤海地震带上, 该地震带是中国大陆最活动的地震带之一, 历史上地震频发, 地震灾害严重, 北京地区历史上发生的最强烈地震是 1679 年的马坊 8 级地震(如图 1).

3 地应力测点与测量结果

3.1 测点部署原则

研究表明, 活动断裂的两端、转折部位以及不同断裂交汇部位往往是构造活动反应最突出部位, 也是应力最容易集中的地方(李四光, 1965, 1973; 陈庆宣等, 1998). 在活动构造带上的这些构造部位进行

深孔地应力测量与实时监测,了解其应力和能量变化状况,是开展断裂稳定性研究、地震地质研究及区域地壳稳定性评价的有效方法之一。综合北京地区新构造活动特征、历史地震以及地层等条件,在关键构造部位(这些部位处于不同活动断裂交汇或转折部位且岩石条件利于储存高应变能)初步部署了 5 个地应力测量与监测钻孔(见图 1),分别是:位于夏垫—马坊断裂北东段附近的平谷测点、孙河—南口活动断裂与南口山前断裂交汇北东象限的十三陵测点、八宝山断裂附近的西峰寺测点、顺义—良乡断裂北东段的密云测点以及八宝山断裂和黄庄—高丽营断裂之间的李四光纪念馆测点。

3.2 测点概况

北京地区关键构造部位 5 个 600~1000 m 地应力测量钻孔具体情况如下。

平谷钻孔(PG 钻孔)位于平谷区南独乐河镇南山村,构造上位于纬向断裂构造带与北北东向新华夏系活动断裂构造带(夏垫—马坊断裂)交汇部位。钻孔孔口高程 155 m,孔深为 600.47 m;岩性以燕山期花岗岩(0~413.13 m)和中元古代灰岩(413.13~600.47 m)为主,其中,中元古代灰岩中局部夹有薄层花岗岩脉(秦向辉等,2012);该钻孔地应力测量于 2008 年完成。

十三陵钻孔(SSL 钻孔)位于昌平区国土资源部十三陵培训中心,构造上位于北西向孙河—南口活动断裂与北东向南口山前断裂的交汇部位。钻孔孔口高程 171 m,孔深为 600.25 m;岩性以太古代片麻岩(0~280 m)和中元古代灰岩(280~600.25 m)为主。由于在 300 m 深度附近存在断层破碎带,地应力测量仅在 300 m 深度以上进行;该钻孔地应力测量于 2010 年完成。

西峰寺钻孔(XFS 钻孔)位于房山区国土资源部西峰寺培训中心,构造上位于八宝山断裂带上盘。钻孔孔口高程 233 m,孔深为 800.32 m;岩性以三叠纪和侏罗纪砂岩为主,局部夹粉砂岩、泥岩、煤系等薄层;该钻孔地应力测量于 2010 年完成。

密云钻孔(MY 钻孔)位于密云县北京市地质工程设计研究院,构造上位于北东向黄庄—高丽营活动断裂和顺义—良乡活动断裂的北东延伸方向。钻孔孔口高程 70 m,孔深为 1003.42 m;岩性以第四系覆盖层(0~41 m)和太古代片麻岩(41~1003.42 m)为主;该钻孔地应力测量于 2012 年完成。

李四光纪念馆钻孔(LSG 钻孔)位于海淀区国土资源部李四光纪念馆内,构造上位于北东向八宝

山活动断裂和北北东向黄庄—高丽营活动断裂之间。钻孔孔口高程 71 m,孔深为 600.26 m;岩性以新生代地层(0~389 m)和中生代—古生代的砂砾岩、泥岩、灰岩等(389~600.26 m)为主。该钻孔在 400 m 深度以上下了套管,因而地应力测量在 400 m 以下进行;其地应力测量于 2012 年完成。

3.3 地应力测量方法

水压致裂法通过水力压裂诱发裂缝方式来测量地应力,是目前常用的地应力测量方法,也是国际岩石力学学会(ISRM)推荐的五种地应力测量方法之一,该方法适用于深孔地应力测量,其可靠性和准确性在实践中得到了广泛认可,具体测量程序参考 Amadei 和 Stephansson(1997)、Haimson 和 Cornet(2003)等人的论述。北京地区 5 个钻孔的水压致裂测量均严格按照 ISRM 建议步骤及要求进行;在水压致裂参数计算时,也采用 ISRM 建议方法进行,其中,在计算关闭压力(P_c)时,综合了单切线法、 dt/dP vs P 法和 dP/dt vs P 法计算结果进行最终取值,以提高计算结果准确性(Hayashi 和 Haimson, 1991; Haimson 和 Cornet, 2003; Choi, 2012; 丰成君等,2012);在计算主应力值时,孔隙压力根据国内外研究成果,取近似等于静水压力(Barton et al., 1995; Zoback and Townend, 2001)。

3.4 地应力测量结果

在北京地区 5 个钻孔中共获得水压致裂测量曲线 85 组,图 2 给出了 5 个钻孔不同岩性中典型水压致裂测量曲线,分别是:平谷钻孔 297.40 m 测段(花岗岩)和 514.50 m 测段(灰岩)、十三陵钻孔 207.50 m 测段(片麻岩)、西峰寺钻孔 429.50 m 测段(砂岩)、密云钻孔 975.80 m 测段(片麻岩)以及李四光纪念馆钻孔 526.13 m 测段(灰岩)。图 3 以李四光纪念馆钻孔 526.13 m 测段为例阐述了关键参数 P_c 计算方法,其中,图 3a 给出了手动切线方式进行单切线法计算 P_c 结果,而图 3b 和图 3c 分别给出了计算机自动处理方式进行 dt/dP vs P 法和 dP/dt vs P 法计算 P_c 结果,最后,这三种方法结果的平均值作为最终的 P_c 值,参与主应力值计算。北京地区 5 个钻孔水压致裂测量参数及主应力计算结果见表 1。

4 地壳浅表层应力状态

基于表 1 中数据,我们评价了北京地区地壳浅表层应力状态,包括:地应力大小、最大水平主应力方向以及应力结构。

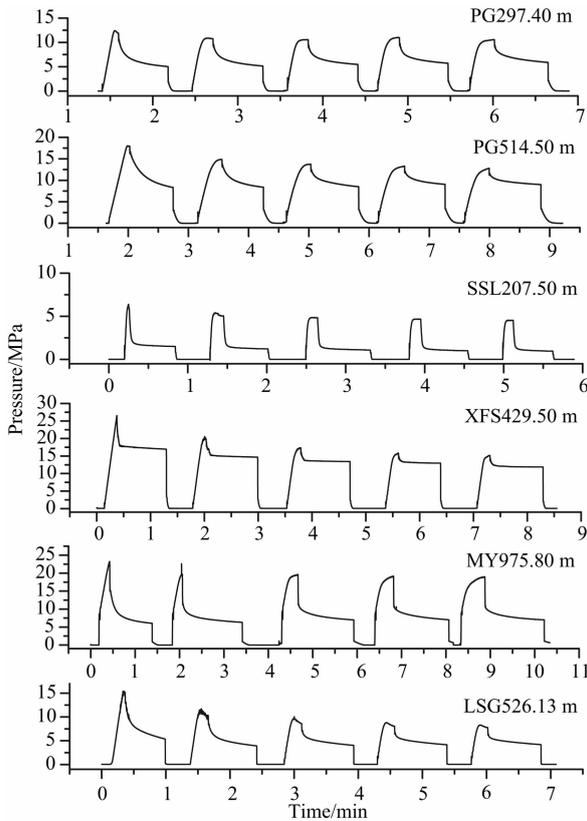


图2 北京地区5个钻孔不同岩石中典型水压致裂曲线
图中,PG代表平谷,SSL代表十三陵,XFS代表西峰寺,
MY代表密云,LSG代表李四光纪念馆.

Fig. 2 Typical curves of hydraulic fracturing in-situ stress measurements in different type rock masses of these five boreholes in Beijing region

The capital letters PG, SSL, XFS, MY and LSG refer to the Pinggu borehole, Shisanling borehole, Xifengsi borehole, Miyun borehole and Lisiguang Memorial Hall borehole, respectively.

4.1 地应力大小

根据表1的数据,我们以线性回归方式计算了北京地区千米深度以内最大、最小主应力值随深度变化关系,结果见式(1)和(2),实测地应力值随深度变化如图4所示.

$$\sigma_H = 0.0328H + 2.56 \quad (r = 0.81, n = 85) \quad (1)$$

$$\sigma_h = 0.0221H + 2.00 \quad (r = 0.88, n = 85) \quad (2)$$

式中, r 为相关性系数, n 为拟合样本数.

式(1)和(2)及图4揭示,北京地区地壳浅表层地应力值随深度增加而增大,符合已有认识和规律(Brown and Hoek, 1978; 赵德安等,2007;景锋等,2007;王艳华等,2012).考虑到华北地块和北京地区在区域动力学背景方面存在相似或可对比性,将上述计算结果同华北地块相关结果进行了对比,结果表明,北京地区水平主应力值随深度增加梯度略大

于杨树新等(2012)对华北地块4 km深度范围内拟合结果,但与李方全与祁英男(1988)对河北易县拟合结果接近.上述不同结果间的差异,作者认为原因可能在于拟合计算使用的数据量、拟合深度范围不同以及拟合结果中包含有影响地应力的因素等.上述结果总体反映了北京地区地壳浅表层应力场特征.

除了上述地应力值随深度变化梯度参数外,国内外还常用以下几个参数表征地壳浅表层应力状态(Brown and Hoek, 1978; 赵德安等,2007;景锋等,2007;王艳华等,2012;杨树新等,2012):

$$K_{av} = (\sigma_H + \sigma_h) / 2\sigma_v, \quad (3)$$

$$K_{Hv} = \sigma_H / \sigma_v, \quad (4)$$

$$K_{Hh} = \sigma_H / \sigma_h, \quad (5)$$

$$\mu_m = (\sigma_H - \sigma_h) / (\sigma_H + \sigma_h). \quad (6)$$

式中, K_{av} 和 K_{Hv} 为侧压力系数, K_{Hh} 对于表征水平面内应力作用形态有重要意义,而 μ_m 则可以表征水平面内最大剪应力相对大小.从本质上来看,上述几个参数反映了区域应力积累特征,而这种应力积累又与断层活动性密切相关,表1给出了北京地区上述4个参数具体计算结果.基于表1结果,对 K_{av} 和 K_{Hv} 值随深度分布采用双曲线形式进行了拟合(赵德安等,2007;景锋等,2007;王艳华等,2012),式(7)和(8)分别给出了 K_{av} 和 K_{Hv} 随深度分布拟合结果,而式(9)和(10)分别给出了 K_{av} 和 K_{Hv} 随深度分布外包络线拟合结果,图5a和图5b给出了其分布图.关于 K_{Hh} 和 μ_m 随深度分布特征,可以采用双曲线形式拟合和线性回归形式拟合两种方法进行分析(景锋等,2007;王艳华等,2012),通过对表1中 K_{Hh} 和 μ_m 数据拟合后发现,线性回归拟合能更好地描述北京地区 K_{Hh} 和 μ_m 值随深度分布特征,式(11)和(12)分别给出了北京地区 K_{Hh} 和 μ_m 随深度分布拟合结果,图5c和图5d给出其分布图.

$$K_{av} = 55/H + 1.11, \quad (7)$$

$$K_{Hv} = 54/H + 1.35, \quad (8)$$

$$30/H + 0.60 \leq K_{av} \leq 400/H + 1.20, \quad (9)$$

$$30/H + 0.70 \leq K_{Hv} \leq 600/H + 1.40, \quad (10)$$

$$K_{Hh} = 1.42 \times 10^{-4}H + 1.37, \quad (11)$$

$$\mu_m = 5.73 \times 10^{-5}H + 0.15. \quad (12)$$

式(7)–(10)和图5揭示,北京地区千米深度内, K_{av} 与 K_{Hv} 分布特征与已有认识基本一致,表现为越接近地表越分散,随着深度增加,波动范围减小(Brown and Hoek, 1978; 赵德安等,2007;景锋等,2007;王艳华等,2012;杨树新等,2012),随着深度增

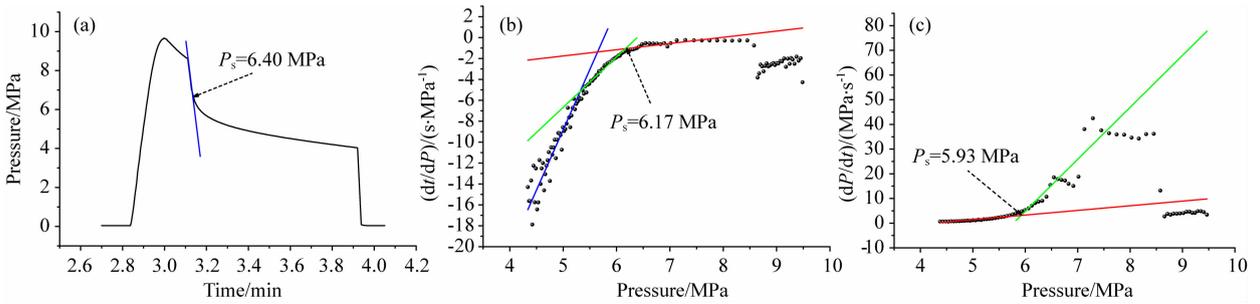


图3 单切线法(a)、 dt/dP vs P 法(b)和 dP/dt vs P 法(c)计算李四光纪念馆钻孔(LSG)

526.13 m 测段 P_s 值曲线(三种方法的平均值用来确定最终的关闭压力值)

Fig. 3 Determinations of shut-in pressure (P_s) in 526.13 m in Lisiguang Memorial Hall borehole using (a) inflection point method, (b) dt/dP vs P method and (c) dP/dt vs P method. The average value of these three methods is adopted to calculate the shut-in pressure, P_s .

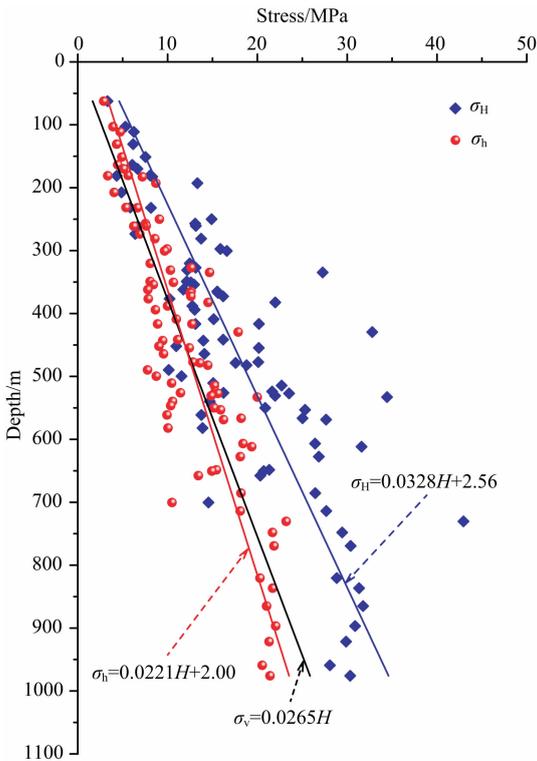


图4 北京地区地应力值随深度变化图

Fig. 4 Variation of measured stresses with depth in Beijing region

加其稳定值分别趋近于 1.17 和 1.40 左右; K_{Hh} 随深度变化比较离散, 随深度增加趋于稳定, 其线性回归结果表明千米深度内 K_{Hh} 值在 1.37~1.51 之间; μ_m 值随深度分布特征与 K_{Hh} 相似, 其线性回归结果表明千米深度内 μ_m 值在 0.15~0.21 之间变化, 变化范围较小. 综合上述结果认为, 北京地区地壳浅表层应力状态表现出以水平向应力作用为主导, 但水平向剪应力相对强度较低特征.

4.2 最大水平主应力方向

通过水压致裂测量中印模试验, 获得了 26 个测

段的最大水平主应力方向数据, 表 1 和图 6 给出了结果及其随深度分布图. 图 6 揭示, 5 个钻孔的最大水平主应力方向主要集中在 NEE—EW 方位(平均 $N75^\circ E$)、NWW—EW 方位(平均 $N74^\circ W$)以及 NW 方位(平均 $N28^\circ W$). 其中, NEE—EW 方位和 NWW—EW 方位为优势方向, 这与中国大陆地壳应力环境库结果(谢富仁等, 2003)、首都圈地区震源机制解结果(马文涛等, 2004)、李方全和王连捷(1979)北京地区地应力测试结果、北京地区 GPS 观测结果(王琪等, 2002)以及剪切波偏振结果(吴晶等, 2007; 高原和吴晶, 2008)等揭示的区域应力场方向基本一致. 图 6 中存在的与区域应力场方向有偏差的 NW 方位, 以及极少数的 NE 方位, 主要在十三陵钻孔和平谷钻孔. 分析表明, 平谷钻孔浅部 NE 方位主应力方向与山体坡向基本一致, 反映出地形地貌造成的非构造应力场特征, 钻孔浅部应力集中特征也印证这一点, 而钻孔深部 NW 方向反映的是新华夏系断裂与纬向构造带交汇区域的应力场特征. 至于十三陵钻孔, 地质调查揭示, 该钻孔揭穿了 NE 向南口山前断裂(图 7), 推断可能是受 NE 或 NEE 向断裂和 NWW 向断裂的切割, 张家口—蓬莱断裂带两侧的次级地块反向旋转(马文涛等, 2004), 而导致该测点及附近主应力方向偏转, 距离该钻孔不远的十三陵抽水蓄能电站 ZK36 和 ZK38 钻孔揭示的主应力方向为 $N50^\circ W$ 左右¹⁾, 这和十三陵钻孔揭示的主应力方向接近, 但和区域应力场方向不同, 两个测点主应力方向的偏转, 是否确实由上述原因造成, 有待继续深入研究.

1) 国家地震局地壳应力研究所, 北京十三陵抽水蓄能电站地应力测量报告, 1992.

表 1 北京地区水压致裂法地应力测量结果

Table 1 Results of hydraulic fracturing in-situ stress measurements in Beijing region

钻孔	H (m)	P_0 (MPa)	P_b (MPa)	P_r (MPa)	P_s (MPa)	σ_H (MPa)	σ_h (MPa)	σ_v (MPa)	σ_H 方向	K_{av}	K_{Hv}	K_{Hh}	μ_m
	62.41	0.62	7.85	4.71	2.88	3.31	2.88	1.65		1.88	2.01	1.15	0.07
	151.19	1.51	8.90	5.65	4.90	7.54	4.90	4.01	N56°E	1.55	1.88	1.54	0.21
	170.00	1.70	13.34	6.87	5.07	6.64	5.07	4.51	N47°E	1.30	1.47	1.31	0.13
	192.77	1.93	14.21	10.82	8.69	13.32	8.69	5.11		2.15	2.61	1.53	0.21
	232.00	2.32	13.50	9.39	6.62	8.15	6.62	6.15	N30°E	1.20	1.33	1.23	0.10
	250.00	2.50	13.90	9.84	9.08	14.90	9.08	6.63		1.81	2.25	1.64	0.24
	281.00	2.81	12.04	9.19	8.58	13.74	8.58	7.45		1.50	1.84	1.60	0.23
	297.40	2.97	15.20	10.97	9.94	15.88	9.94	7.88		1.64	2.02	1.60	0.23
	320.32	3.20	11.90	8.51	8.06	12.47	8.06	8.49		1.21	1.47	1.55	0.21
	349.00	3.49	14.79	8.52	8.05	12.14	8.05	9.25	N36°W	1.09	1.31	1.51	0.20
平谷 (PG)	354.00	3.54	12.94	8.71	8.40	12.95	8.40	9.38		1.14	1.38	1.54	0.21
	362.00	3.62	10.87	8.00	7.79	11.75	7.79	9.59		1.02	1.23	1.51	0.20
	376.62	3.77	13.11	9.53	7.84	10.22	7.84	9.98		0.90	1.02	1.30	0.13
	388.00	3.88	15.18	13.33	9.99	12.76	9.99	10.28		1.11	1.24	1.28	0.12
	394.00	3.94	12.70	8.96	8.64	13.02	8.64	10.44	N27°W	1.04	1.25	1.51	0.20
	409.00	4.09	16.63	13.69	10.97	15.13	10.97	10.84		1.20	1.40	1.38	0.16
	441.50	4.42	18.12	12.75	11.12	16.19	11.12	11.70	N43°W	1.17	1.38	1.46	0.19
	454.60	4.55	16.36	12.52	12.41	20.16	12.41	12.05		1.35	1.67	1.62	0.24
	477.20	4.77	16.53	13.62	12.83	20.10	12.83	12.65		1.30	1.59	1.57	0.22
	514.50	5.15	22.82	17.75	15.20	22.70	15.20	13.63		1.39	1.67	1.49	0.20
527.00	5.27	24.38	17.97	15.59	23.53	15.59	13.97		1.40	1.68	1.51	0.20	
553.06	5.53	20.47	16.83	15.89	25.31	15.89	14.66		1.41	1.73	1.59	0.23	
十三陵 (SSL)	103.00	0.60	8.27	5.83	3.91	5.30	3.91	2.74		1.68	1.93	1.36	0.15
	111.20	0.67	10.53	7.21	4.71	6.25	4.71	2.95	N25°W	1.86	2.12	1.33	0.14
	130.85	0.87	10.53	5.93	4.32	6.16	4.32	3.47	N18°W	1.51	1.78	1.43	0.18
	163.70	1.20	8.97	6.05	4.44	6.07	4.44	4.34	N20°W	1.21	1.40	1.37	0.16
	181.00	1.37	6.09	4.29	3.33	4.33	3.33	4.80		0.80	0.90	1.30	0.13
	207.50	1.64	8.47	5.61	4.04	4.87	4.04	5.50	N26°W	0.81	0.89	1.21	0.09
西峰寺 (XFS)	180.50	1.01	10.09	7.77	5.61	8.05	5.61	4.78		1.43	1.68	1.43	0.18
	231.50	1.52	19.81	8.72	5.36	5.84	5.36	6.13		0.91	0.95	1.09	0.04
	257.03	1.77	30.80	7.75	7.53	13.07	7.53	6.81	N84°E	1.51	1.92	1.74	0.27
	260.73	1.81	12.55	7.87	7.61	13.15	7.61	6.91		1.50	1.90	1.73	0.27
	261.15	1.81	17.00	10.18	6.23	6.70	6.23	6.92		0.93	0.97	1.08	0.04
	273.50	1.94	19.35	12.36	6.90	6.40	6.90	7.25		0.92	0.95	0.93	0.04
	300.50	2.21	20.97	10.17	9.66	16.60	9.66	7.96	N84°E	1.65	2.09	1.72	0.26
	334.68	2.55	21.47	14.19	14.67	27.27	14.67	8.87		2.36	3.07	1.86	0.30
	382.33	3.02	32.30	18.49	14.50	21.99	14.50	10.13		1.80	2.17	1.52	0.21
	416.50	3.37	18.98	14.59	12.71	20.17	12.71	11.04		1.49	1.83	1.59	0.23
429.50	3.50	29.36	17.26	17.85	32.79	17.85	11.38		2.22	2.88	1.84	0.30	

续表 1

钻孔	H (m)	P_0 (MPa)	P_b (MPa)	P_r (MPa)	P_s (MPa)	σ_H (MPa)	σ_h (MPa)	σ_v (MPa)	σ_H 方向	K_{av}	K_{Hv}	K_{Hh}	μ_m
西峰寺 (XFS)	532.78	4.53	33.39	20.97	19.98	34.44	19.98	14.12		1.93	2.44	1.72	0.27
	568.73	4.89	25.86	16.12	16.22	27.65	16.22	15.07	N79°W	1.46	1.83	1.70	0.26
	611.73	5.32	25.10	21.16	19.36	31.60	19.36	16.21		1.57	1.95	1.63	0.24
	657.73	5.78	20.20	14.15	13.42	20.33	13.42	17.43		0.97	1.17	1.51	0.20
	700.35	6.20	13.53	10.69	10.48	14.55	10.48	18.56		0.67	0.78	1.39	0.16
	730.43	6.50	28.85	20.15	23.20	42.95	23.20	19.36		1.71	2.22	1.85	0.30
密云(MY)	182.60	1.61	18.53	11.63	7.18	8.30	7.18	4.84	N79°W	1.60	1.71	1.16	0.07
	327.20	3.05	28.45	21.71	12.63	13.13	12.63	8.67		1.49	1.51	1.04	0.02
	331.10	3.09	24.08	15.66	10.31	12.18	10.31	8.77	N73°W	1.28	1.39	1.18	0.08
	350.50	3.29	21.84	16.04	10.64	12.59	10.64	9.29		1.25	1.36	1.18	0.08
	365.00	3.43	26.32	18.87	12.61	15.53	12.61	9.67	N66°W	1.46	1.61	1.23	0.10
	367.30	3.45	24.76	18.50	12.52	15.61	12.52	9.73		1.45	1.60	1.25	0.11
	372.70	3.51	23.59	18.07	12.59	16.19	12.59	9.88		1.46	1.64	1.29	0.13
	478.50	4.57	25.80	18.63	13.59	17.57	13.59	12.68		1.23	1.39	1.29	0.13
	482.20	4.60	26.44	20.02	14.47	18.79	14.47	12.78		1.30	1.47	1.30	0.13
	524.00	5.02	29.86	19.24	15.30	21.64	15.30	13.89	N85°E	1.33	1.56	1.41	0.17
	530.80	5.09	22.88	17.49	14.85	21.97	14.85	14.07	N83°E	1.31	1.56	1.48	0.19
	550.00	5.28	28.86	19.30	15.15	20.87	15.15	14.58		1.24	1.43	1.38	0.16
	566.50	5.45	32.67	24.06	18.18	25.03	18.18	15.01		1.44	1.67	1.38	0.16
	606.80	5.85	31.07	22.90	18.39	26.42	18.39	16.08		1.39	1.64	1.44	0.18
	627.50	6.06	31.85	21.37	18.09	26.84	18.09	16.63	N52°E	1.35	1.61	1.48	0.19
	648.50	6.27	25.60	18.70	15.43	21.32	15.43	17.19		1.07	1.24	1.38	0.16
	650.40	6.28	25.37	17.77	14.92	20.71	14.92	17.24		1.03	1.20	1.39	0.16
	685.50	6.64	30.38	21.43	18.17	26.44	18.17	18.17	N67°E	1.23	1.46	1.46	0.19
	713.90	6.92	29.62	19.65	18.08	27.67	18.08	18.92		1.21	1.46	1.53	0.21
	748.00	7.26	39.30	28.31	21.67	29.44	21.67	19.82		1.29	1.49	1.36	0.15
769.40	7.47	34.53	27.69	21.85	30.39	21.85	20.39		1.28	1.49	1.39	0.16	
820.50	7.99	30.22	24.01	20.28	28.84	20.28	21.74		1.13	1.33	1.42	0.17	
836.60	8.15	31.04	25.60	21.69	31.32	21.69	22.17		1.20	1.41	1.44	0.18	
865.00	8.43	28.80	22.86	21.02	31.77	21.02	22.92	N54°E	1.15	1.39	1.51	0.20	
896.70	8.75	34.25	26.46	22.03	30.88	22.03	23.76		1.11	1.30	1.40	0.17	
921.50	9.00	31.81	25.03	21.30	29.87	21.30	24.42	N73°W	1.05	1.22	1.40	0.17	
959.22	9.37	29.16	24.15	20.53	28.07	20.53	25.42		0.96	1.10	1.37	0.16	
975.80	9.54	32.99	24.33	21.40	30.33	21.40	25.86		1.00	1.17	1.42	0.17	
李四光 纪念馆 (LSG)	416.66	3.84	12.94	9.70	8.88	13.10	8.88	11.04	N81°E	1.00	1.19	1.48	0.19
	443.13	4.10	14.19	10.27	9.45	13.98	9.45	11.74	N82°E	1.00	1.19	1.48	0.19
	452.00	4.19	12.43	9.03	8.06	10.96	9.03	11.98		0.83	0.91	1.21	0.10
	464.05	4.31	13.39	10.21	9.54	14.10	9.54	12.30		0.96	1.15	1.48	0.19
	489.65	4.57	15.45	8.58	7.76	10.13	7.76	12.98		0.69	0.78	1.31	0.13
	499.59	4.67	14.22	9.54	8.74	11.55	8.74	13.24		0.77	0.87	1.32	0.14
	510.55	4.78	16.56	11.46	10.44	15.08	10.44	13.53		0.94	1.11	1.44	0.18

续表 1

钻孔	H (m)	P_0 (MPa)	P_b (MPa)	P_r (MPa)	P_s (MPa)	σ_H (MPa)	σ_h (MPa)	σ_v (MPa)	σ_H 方向	K_{av}	K_{Hv}	K_{Hh}	μ_m
李四光纪念馆 (LSG)	526.13	4.93	20.50	13.14	11.43	16.22	11.43	13.94	N69°E	0.99	1.16	1.42	0.17
	539.71	5.07	16.01	11.88	10.55	14.70	10.55	14.30		0.88	1.03	1.39	0.16
	546.50	5.14	18.30	10.90	10.34	14.98	10.34	14.48	N77°W	0.87	1.03	1.45	0.18
	561.21	5.28	13.79	10.75	9.93	13.76	9.93	14.87		0.80	0.93	1.39	0.16
	582.04	5.49	16.69	10.74	10.04	13.89	10.04	15.42		0.78	0.90	1.38	0.16

注: H —地面至测段中心深度; P_0 —孔隙压力; P_b —破裂压力; P_r —重张压力; P_s —关闭压力; σ_H —最大水平主应力; σ_h —最小水平主应力; σ_v —垂向应力,按照等于上覆岩层重度计算,岩石平均密度取 $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

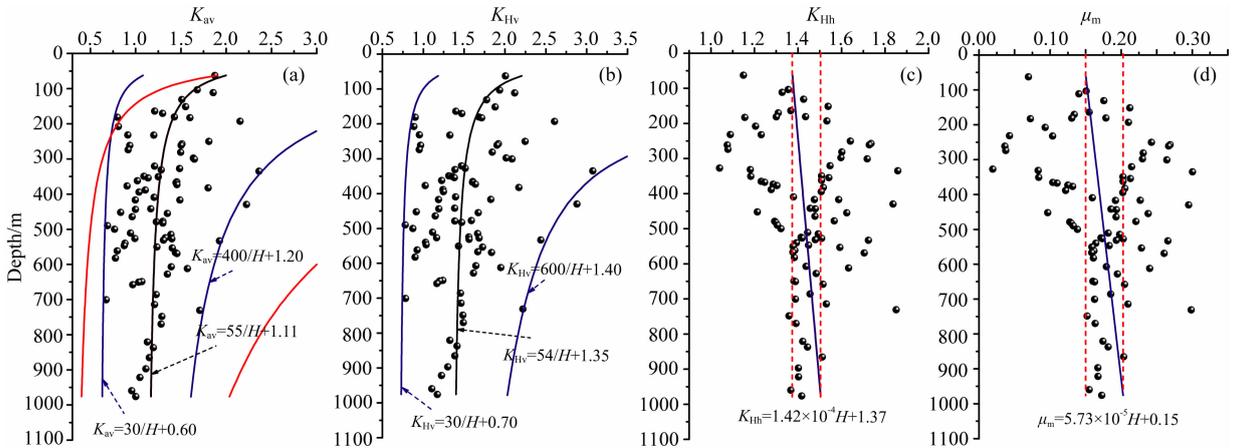


图 5 北京地区 K_{av} (a)、 K_{Hv} (b)、 K_{Hh} (c) 和 μ_m (d) 随深度分布图

图 5a 中红色线为 Brown 和 Hoek 结果(1978).

Fig. 5 Variation of K_{av} (a), K_{Hv} (b), K_{Hh} (c) and μ_m (d) with depth in Beijing region

The red lines in Fig. 5a represent the envelope curves calculated by Brown and Hoek (1978).

总的来说,北京地区地应力测量数据揭示,北京地区地壳浅表层主应力方向以近 EW 为优势方向,但也存在着受局部活动断裂影响而与区域性应力场方向存在偏差的局部应力场。

4.3 地应力结构

Anderson(1951)断层理论揭示了断裂性质与地应力状态的关系. 根据表 1 数据和 Anderson 断层理论,我们分析了北京地区实测地应力数据揭示的地应力结构. 结果表明,平谷钻孔地应力结构为 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$, 表现为逆断层性质应力特征,反映出此构造交汇部位的现今压性应力场特征;西峰寺钻孔地应力结构为 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$, 表现为逆断层性质应力特征,反映出八宝山断裂现今压性活动特征;密云钻孔深部数据揭示地应力结构为 $\sigma_H > \sigma_v \geq \sigma_h$, 表现为走滑断层性质应力特征,与震源机制解揭示的首都圈地区中强震发震机制以走滑型为主结果相吻合(马文涛等,2004),而浅部数据可能受沉积环境影响;李四光纪念馆钻孔地应力结构为 $\sigma_v \geq \sigma_H > \sigma_h$, 表现为

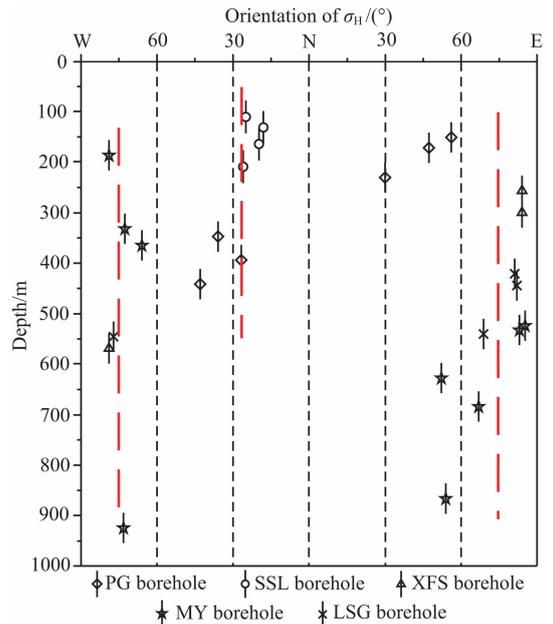


图 6 北京地区最大水平主应力方向随深度分布图
Fig. 6 Variation of the orientations of the maximum horizontal stresses with depth in Beijing region

正断层性质应力特征,符合黄庄—高丽营断裂中南段活动特征;十三陵钻孔由于揭穿了南口山前断裂,测量数据偏少偏浅,加之十三陵地区构造演化复杂,存在不同走向断裂及推覆构造(崔盛芹等,2003;马文涛等,2004),为北京地区新构造活动的多期性及挤压与拉伸作用转化特征表现强烈的区域(马寅生等,2002),因此应力结构未能完全准确反映断裂性质。上述结果及图4表明,北京地区地壳浅表层应力状态以水平向作用为主导, σ_H 为最大主应力(σ_1),而中间主应力(σ_2)与最小主应力(σ_3)所对应的实测地应力存在的变化,主要是受北京地区新构造活动以及测点附近断裂活动影响。

5 基于地应力数据的断裂稳定性分析

如引言所述,国内外在地应力状态与断裂稳定性研究方面有不少尝试和成果,本文也利用实测地应力数据,探讨了北京地区地应力状态对于断裂稳定性评价的意义。

5.1 断裂失稳滑动判据

库仑摩擦滑动准则表明,假定断裂面内聚力为零的条件下,如果断裂面上的剪应力 τ 大于等于滑动摩擦阻力 $\mu\sigma_n$,那么断裂将沿着一个合适方位角失稳滑动,其中 μ 是断裂带的摩擦系数, σ_n 则是断裂面上的正应力。在引入主应力和有效应力概念后,有效最大主应力与最小主应力之比可以表示为摩擦系数的函数(Jaeger and Cook, 1979; Zoback and Healy, 1992):

$$\frac{\sigma_1 - P_0}{\sigma_3 - P_0} \leq (\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2, \quad (13)$$

式中, σ_1, σ_3 分别为断裂外围最大与最小主应力; P_0 为孔隙压力,国内外的研究表明,在地壳浅表层低渗透率岩石中,孔隙压力与静压力大致相等,因此本文取孔隙压力近似等于静水压力(Barton et al, 1995; Zoback and Townend, 2001)。

将实测地应力值代入式(13)中,若左侧比值小于右侧值,则断裂稳定;反之,若左侧比值大于或等于右侧值,则断裂可能沿合适方位失稳滑动。“合适的方位”是指断裂面法线方向与最大主应力间夹角为 φ 的面, φ 和 μ 的关系可以用(14)式表示:

$$\varphi = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \arctan \mu \right). \quad (14)$$

根据Anderson断层理论,对于不同类型断层,其 σ_1, σ_3 所对应的实测地应力不同,对于正断层、逆断

层以及走滑断层,式(13)将分别变化为:

$$\frac{\sigma_v - P_0}{\sigma_h - P_0} \leq (\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2, \quad (15)$$

$$\frac{\sigma_H - P_0}{\sigma_v - P_0} \leq (\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2, \quad (16)$$

$$\frac{\sigma_H - P_0}{\sigma_h - P_0} \leq (\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2. \quad (17)$$

可以看出,上述判据中,合适的 μ 值是评价断裂稳定与否的关键。Byerlee(1978)综合各种岩石的室内实验资料发现,应力值小于200 MPa时,大部分岩石的 μ 值在0.6~1.0之间;Brace和Kohlstedt(1980)认为拜尔实验结果适用于5 km以内深度;Zoback等(2001, 2007)对世界范围内6口深孔资料分析后也认为地壳浅表层应力状态基本符合 μ 取0.6~1.0结果;苏恺之等(1996)对三峡坝区花岗岩、灰岩、砂岩三轴实验表明,三峡坝区岩石摩擦强度下限为 $0.65\sigma_n$,平均为 $0.85\sigma_n$,同时认为在评价地壳浅部断层失稳滑动时, μ 取0.6~1.0是合适的;Lockner等(1986)、Blanpied等(1991, 1995)总结大量花岗岩和石英岩实验结果后指出,两种岩石的摩擦系数大致在0.65~0.75,并且随着含水量增加,仅下降少许。目前,大多数研究者在进行断裂失稳滑动评价时将 μ 取0.6~1.0,但是,一些研究者认为真实条件下断裂带的摩擦系数可能要低于上述结果(Byerlee, 1990; Boatwright and Cocco, 1996)。Carpenter等(2009, 2011)研究圣安德列斯断裂带样品后发现,花岗闪长岩等脆性岩石、富粘土岩石的摩擦系数大致在0.56~0.68,而断裂带中蛇绿岩的摩擦系数仅在0.18~0.26;Zhang和He(2013)等借助三轴实验系统对采自龙门山断裂带的泥岩和砂岩样品、模拟断层泥样品以及天然断层泥样品进行剪切变形实验,实验条件与龙门山断裂带2 km深处的条件相一致,结果表明,天然断层泥比原岩的泥岩和砂岩更富含伊利石,而且强度比原岩弱得多,天然断层泥的稳态摩擦系数约为0.4,原岩约为0.6,而灰岩断层泥的 μ 为0.6~0.7;Zoback(2007)也指出,在地壳浅表层,且孔隙压力近似为静水压力条件下,对于逆断层,实际摩擦系数应该要比0.6低,因为地壳浅部岩体不大可能承受摩擦系数取0.6那么大的应力值,断裂失稳滑动标准可能为最大有效主应力大致等于2.2倍垂向有效主应力(μ 取0.4左右),对于正断层,标准可能为最小有效主应力大致等于0.6倍垂向有效主应力(μ 取0.2左右),而对于走滑断层,暂无更明确的取值标准。

综上所述,利用库仑滑动摩擦准则探讨断裂稳定性时,本文不仅计算了国内外常用的 μ 取0.6~1.0情况,还考虑了断裂带摩擦系数弱化到0.4和0.2的情况,并对计算结果进行了对比分析,进而探讨了北京地区地应力状态与断裂活动性之间的关系。

5.2 断裂失稳滑动评价结果

利用式(13)判据,并分别取摩擦系数为0.2、0.4、0.6和1.0,计算并判断了北京地区实测应力状态是否满足上述判据,图8给出了具体计算结果。

图8a显示,在 μ 取0.6~1.0条件下,北京地区地壳浅表层应力状态尚未达到能导致断裂失稳滑动的水平,而只有摩擦系数弱化到0.4时,部分地应力数据才可能满足断裂失稳滑动要求。为了更加深入地评价主要断裂失稳滑动可能性,并探讨摩擦系数弱化对断裂稳定性的影响,对北京5个钻孔数据也分别采用库仑滑动摩擦准则进行了计算。图8(b-f)表明,在 μ 取0.6~1.0时,5个钻孔应力状态均不满足断裂失稳滑动条件,断裂不会出现失稳滑动,与图8a计算结果一致;在 μ 取0.4时,西峰寺钻孔(图8d)地应力状态达到断裂失稳滑动应力条件,而平谷钻孔(图8b)、密云钻孔(图8e)和李四光纪念馆钻孔(图8f)地应力状态将趋近于满足断裂失稳滑动应力条件,其他钻孔揭示的应力状态未达到导致断裂失稳滑动应力条件;图8也表明,只有断裂带的摩擦系数弱化到0.2,北京地区目前应力状态下才会超过断裂失稳滑动限值。此外,由于十三陵钻孔(图8c)数据偏少且较浅,其结果存在不确定性,结合该钻孔地应力相对变化研究结果(丰成君等,2014),认为该钻孔地应力状态虽然尚不满足摩擦系数取0.6时断裂失稳滑动条件,但有逐步满足条件的趋势,值得继续关注。

综上所述,在摩擦系数取0.6~1.0条件下,5个钻孔揭示的北京地区地壳浅表层应力状态尚不足以导致断裂失稳滑动;而在摩擦系数弱化到0.4时,八宝山断裂存在断裂失稳滑动可能性,夏垫—马坊断裂和黄庄—高丽营断裂将趋向失稳滑动状态;而只有到摩擦系数弱化到0.2时,北京地区在目前地壳浅表层应力状态下,才可能真正出现断裂失稳滑动。需要指出的是,以上分析中并未完全考虑断裂带实际产状和理想滑动角之间的差别,而是假定断裂沿着式(14)确定的面失稳滑动。另外,上述分析也表明准确获得地应力数据外,获取断裂带真实摩擦系数对于探讨地应力状态与断裂稳定性关系有重要意义。

6 结论

本文采用水压致裂法在北京地区5个深孔中系统地进行了地应力测量,获得了85段应力值数据和26段主应力方向数据,初步揭示了北京地区地壳浅表层现今应力状态。同时,基于实测地应力数据,结合库仑摩擦滑动准则和拜尔定律,并取摩擦系数为0.2~1.0,评价了北京地区主要活动断裂失稳滑动可能性,探讨了地应力状态与断裂活动间关系。通过以上分析,可以得到如下结论:

(1)85段应力值数据揭示,北京地区最大、最小水平主应力随深度增加梯度系数分别为0.0328和0.0221;侧压力系数 K_{av} 和 K_{Hv} 采用双曲线方式拟合的稳定值分别为1.17和1.40,与国内外研究结果基本一致;最大、最小水平主应力比 K_{Hh} 随深度分布相对比较离散,其线性回归值在1.37~1.51之间;水平向剪应力相对强度指标 μ_m 随深度分布同样较离散,其线性回归值在0.15~0.21之间。上述结果表明,北京地区地壳浅表层应力状态以水平向应力作用为主导,但水平向剪应力相对较弱。

(2)26段主应力方向数据反映北京地区地壳浅表层最大水平主应力优势方向总体为近EW向,与其他资料揭示的区域构造应力场方向基本一致,但是受研究区内部断裂发育及其活动等影响,也存在着与区域构造应力场方向存在偏差的局部应力场,如南口山前断裂附近钻孔实测的NW向主应力方向。

(3)基于实测地应力数据的应力结构分析表明,北京地区地壳浅表层最大主应力(σ_1)为实测最大水平主应力(σ_{Hh}),而中间主应力(σ_2)与最小主应力(σ_3)所对应的实测地应力存在变化,这可能是受到了区域构造演化以及测点附近断裂分布及活动的影响。总体来讲,实测数据揭示的应力结构与测点附近活动断裂性质基本相吻合,也能够反映北京地区新构造运动特点。

(4)基于实测应力数据,使用库仑滑动摩擦准则,取孔隙压力近似等于静水压力,并假定摩擦系数取0.2~1.0,评价了主要断裂稳定性。结果显示,在摩擦系数取0.6~1.0时,北京地区地壳浅表层现今应力状态尚未达到断裂失稳滑动限值,断裂不会出现失稳滑动;在摩擦系数弱化为0.4时,八宝山断裂存在失稳滑动可能性,而夏垫—马坊断裂、黄庄—高丽营断裂将趋近于失稳状态;只有在摩擦系数弱化到0.2时,北京地区在现今应力场作用下,才可能出

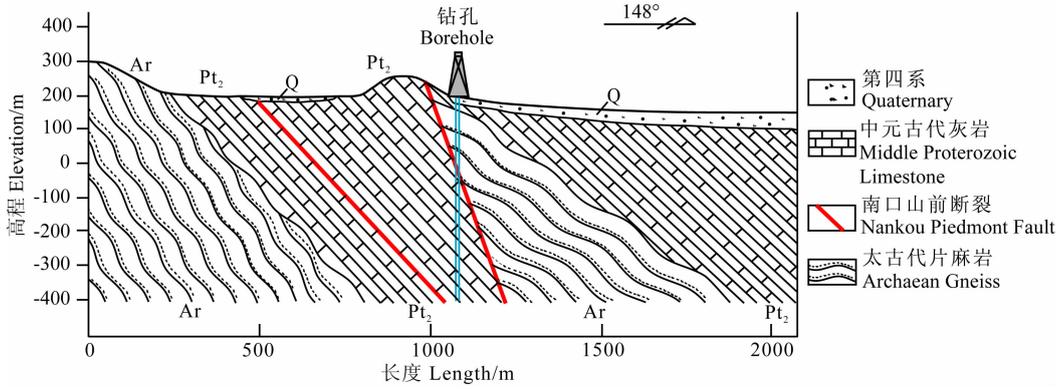


图 7 十三陵钻孔地质剖面简图

Fig. 7 Geological section of Shisanling borehole in Shisanling sub-region in Beijing

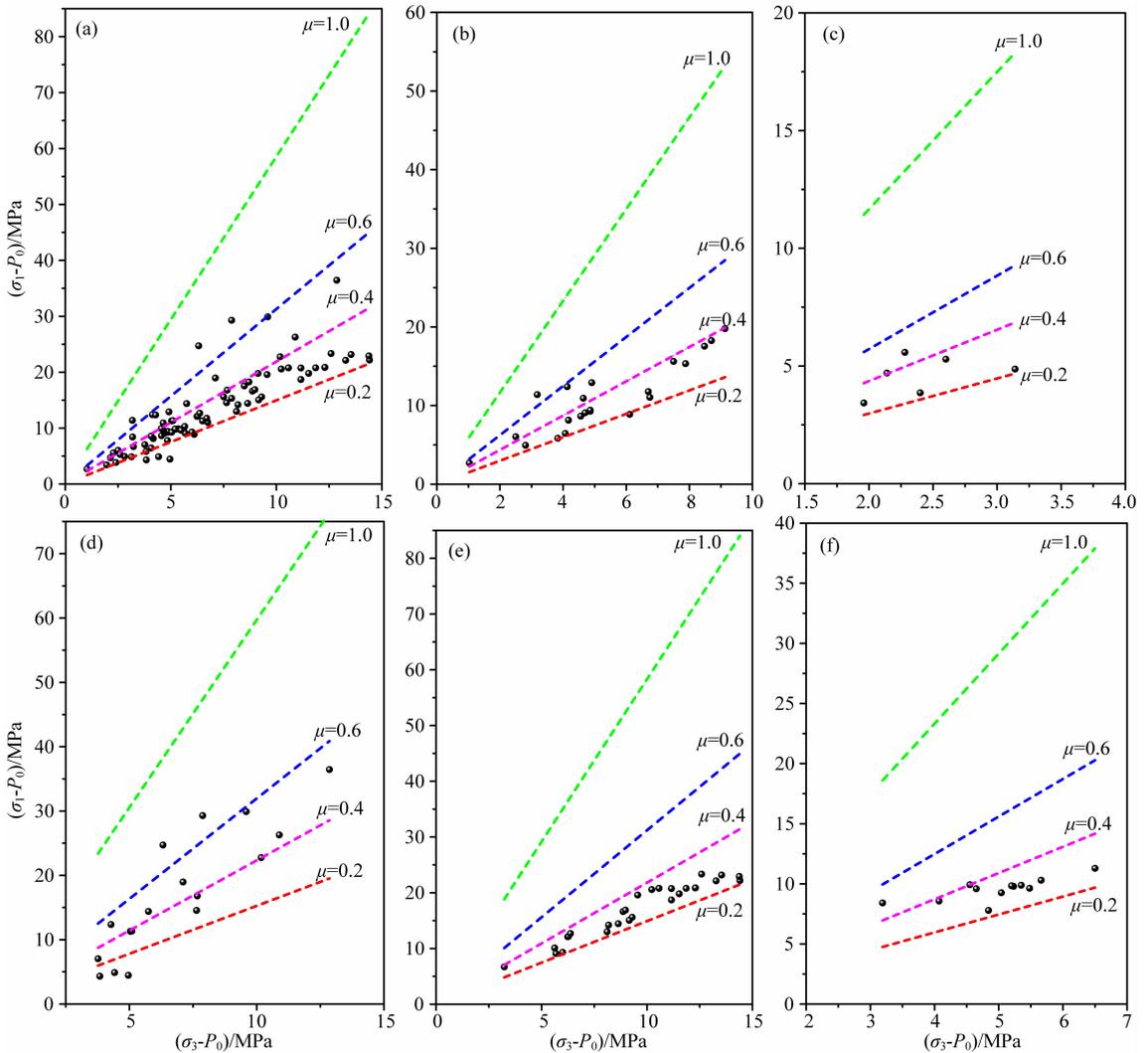


图 8 基于实测地应力数据的北京地区整体(a)、平谷钻孔(b)、十三陵钻孔(c)、西峰寺钻孔(d)、密云钻孔(e)及李四光纪念馆钻孔(f)库仑摩擦滑动准则评价结果

Fig. 8 Plots displaying calculation results in the Beijing region (a), Pinggu borehole (b), Shisanling borehole (c), Xifengsi borehole (d), Miyun borehole (e) and Lisiguang Memorial Hall borehole (f) using Coulomb frictional failure criterion with frictional coefficients ranging from 0.2 to 1.0

现断裂失稳滑动。

本文的分析,主要基于地应力绝对测量结果,在探讨地应力状态与断裂稳定性时,一些合理的假设也被采用,如假定断裂失稳滑动时沿着式(14)确定的面滑动、摩擦系数使用的是外围岩石的而非真正断裂带的。同时,由于北京区域构造与新构造活动复杂,地应力数据依然偏少偏浅等,对断裂稳定性认识难免存在偏差。另外,研究表明构造应力场随时间、构造活动而调整,地应力绝对测量结果为研究其现今状态提供了一个时间点上的参考,而应力场长期的演化调整,需要结合地应力相对变化监测进行分析,这也是后续研究的方向和重点。

致谢 中国地震局地壳应力研究所安其美研究员参加现场测试并对结果进行了讨论,同时协助收集了部分资料,中国地质科学院地质力学研究所区明益研究员参加了现场测试,在此表示感谢;作者同时感谢匿名审稿人提出的宝贵意见!

References

- Amadei B, Stephansson O. 1997. Rock Stress and Its Measurement. London: Chapman & Hall.
- Anderson E M. 1951. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Application to Britain. Edinburgh: Oliver and Boyd.
- Bao Y G, Xie D Y, Chen Z B, et al. 1983. On the Yanshan movement in Beijing area. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), (2): 195-204.
- Barton C A, Zoback M D, Moos D. 1995. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, 23(4): 683-686.
- Blanpied M L, Lockner D A, Byerlee J D. 1991. Fault stability inferred from granite sliding experiments at hydrothermal conditions. *Geophys. Res. Lett.*, 18(4): 609-612, doi:10.1029/91GL00469.
- Blanpied M L, Lockner D A, Byerlee J D. 1995. Frictional slip of granite at hydrothermal conditions. *J. Geophys. Res. (Solid Earth)*, 100(B7): 13045-13064, doi:10.1029/95JB00862.
- Boatwright J, Cocco M. 1996. Frictional constraints on crustal faulting. *J. Geophys. Res.*, 101 (B6): 13895-13909.
- Brace W F, Kohlstedt D L. 1980. Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiments. *J. Geophys. Res.*, 85 (B11): 6248-6252.
- Brown E T, Hoek E. 1978. Trends in relationship between measured in-situ stresses and depth. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, (15): 211-215.
- Byerlee J D. 1978. Friction of rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 116(4-5): 615-626.
- Byerlee J D. 1990. Friction, overpressure and fault normal compression. *Geophys. Res. Lett.*, 17(12): 2109-2112.
- Carpenter B M, Marone C, Saffer D M. 2009. Frictional behavior of materials in the 3D SAFOD volume. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L05320, doi:10.1029/2008gl036660.
- Carpenter B M, Marone C, Saffer D M. 2011. Weakness of the San Andreas Fault revealed by samples from the active fault zone. *Nature Geoscience*, 4(4): 251-254, doi:10.1038/ngeo1089.
- Che Z H, Fan Y. 2003. Tracing study of fault activity of the Beijing Huangzhuang-Gaoliying fault and Babaoshan fault in recent time. *Earthquake* (in Chinese), 23(3): 97-104.
- Chen Q C, Feng C J, Meng W, et al. 2012. Analysis of in-situ stress measurements at the northeastern section of the Longmenshan fault zone after the 5. 12 Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(12): 3923-3932.
- Chen Q X, Wang W X, Sun Y, et al. 1998. Rock Mechanics and Analysis of Tectonic Stress Field (in Chinese). Beijing: Geological Publish House.
- Choi S O. 2012. Interpretation of shut-in pressure in hydrofracturing pressure-time records using numerical modeling. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 50: 29-37.
- Cui S Q, Wu Z H, Ma Y S, et al. 2003. Meso-Cenozoic intracontinental orogenic process in the Beijing area—A case study based on geological observations from the Ming Tombs to Badaling mountain. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 9 (3): 201-219.
- Feng C J, Chen Q C, Wu M L, et al. 2012. Analysis of hydraulic fracturing stress measurement data—discussion of methods frequently used to determine instantaneous shut-in pressure. *Rock and Soil Mechanics* (in Chinese), 33(7): 2149-2159.
- Feng C J, Zhang P, Sun W F, et al. 2014. 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. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(3): 345-354.
- Gao Y, Wu J. 2008. Compressive stress field in the crust deduced from shear-wave anisotropy: an example in capital area of China. *Chinese Science Bulletin*, 53(18): 2840-2848.
- Guo Q L, Wang C H, Ma H S, et al. 2009. In-situ hydro-fracture stress measurement before and after the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake of China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52 (5): 1395-1401, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.029.
- 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). *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40(7/8): 1011-1020, doi:10.1016/j.ijrmms.2003.08.002.
- Hast N. 1969. The state of stress in the upper part of the earth's crust. *Tectonophysics*, 8(3): 169-211.
- Hayashi K, Haimson B C. 1991. Characteristics of shut-in curves in hydraulic fracturing stress measurements and determination of in situ minimum compressive stress. *J. Geophys. Res.*, 96

- (B11): 18311-18321.
- Huang X M, Wang L M, Xu J, et al. 1991. Characteristics of neotectonic movement in Beijing area. *Seismology and Geology* (in Chinese), 13(1): 43-51.
- Jaeger J C, Cook N G W. 1979. *Fundamentals of Rock Mechanics* (2nd edition). New York: Chapman & Hall.
- Jiao Q, Qiu Z H, Fan G S. 2005. Analysis on recent tectonic activity and seismicity of Babaoshan-Huangzhuang-Gaoliying fault in Beijing region. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 25(4): 50-54.
- Jing F, Sheng Q, Zhang Y H, et al. 2007. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China mainland. *Chinese J. Rock Mech. Eng.* (in Chinese), 26(10): 2057-2062.
- Li F Q, Wang L J. 1979. Stress measurements in North China. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 22(1): 1-8.
- Li F Q, Qi Y N. 1988. Variation of crustal stresses with depth in China. *Chinese J. Rock Mech. Eng.* (in Chinese), 7(4): 301-309.
- Li S G. 1965. On the items of seismology research. *Chinese Geology* (in Chinese), (12): 41-43.
- Li S G. 1973. *Seismology* (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Liao C T, Zhang C S, Wu M L, et al. 2003. Stress change near the Kunlun fault before and after the M_s 8.1 Kunlun earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 30(20): 2027-2030, doi:10.1029/2003GL018106.
- Lin W R, Saito S, Sanada Y, et al. 2011. Principal horizontal stress orientations prior to the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki, Japan, earthquake in its source area. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G10, doi:10.1029/2011GL049097.
- Lin W R, Conin M, Moore C, et al. 2013. Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Science*, 339(6120): 687-690, doi:10.1126/science.129379.
- Liu B J, Hu P, Chen Y, et al. 2009. The crustal shallow structures and buried active faults revealed by seismic reflection profiles in northwestern area of Beijing plain. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(8): 2015-2025, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.08.009.
- Lockner D A, Summers R, Byerlee J D. 1986. Effects of temperature and sliding rate on frictional strength of granite. *Pure Applied Geophysics*, 124(3): 445-469.
- Ma W T, Xu X W, Yu G H, et al. 2004. The relationship between seismic activity and fault activity in Beijing region. *Seismology and Geology* (in Chinese), 26(2): 293-304.
- Ma Y S, Cui S Q, Zhao Y, et al. 2002. The transformation process of Mesozoic-Cenozoic tectonic regime in the north of north China. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 8(1): 15-25.
- Qin X H, Tan C X, Sun J Z, et al. 2012. Experimental study of relation between in-situ crustal stress and rock elastic modulus. *Rock and Soil Mechanics* (in Chinese), 33(6): 1689-1965.
- Qin X H, Chen Q C, Tang C X, et al. 2013. Analysis of current geostress state and seismic risk in southwest segment of Longmenshan fracture belt. *Chinese J. Rock Mech. Eng.* (in Chinese), 32(S1): 2870-2876.
- Shi Y L, Zhang B, Zhang S Q, et al. 2013. Numerical earthquake prediction. *Physics* (in Chinese), 42(4): 237-255.
- Su K Z, Li F Q, Zhang B C, et al. 1996. *Integrated Research on the Stress Field and Pore Pressure at the Three Gorges Site* (in Chinese). Beijing: Seismological Press.
- Tan C X, Wang R J, Sun Y, et al. 2004. Numerical modeling estimation of the 'Tectonic Stress Plane' (TSP) beneath topography with quasi-U-shaped valleys. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, (41): 303-310, doi:10.1016/S1365-1609(03)00096-0.
- Tan C X, Qin X H, Wang R J, et al. 2010. Preliminary analysis of earthquake occurrence background of $M_s \geq 8.0$ catastrophic earthquakes in middle and east parts of Chinese continent. *Chinese J. Rock Mech. Eng.* (in Chinese), 29(S2): 3598-3607.
- Wang Q, Zhang P Z, Ma Z J. 2002. GPS database and velocity field of contemporary tectonic deformation in continental China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 9(2): 415-429.
- Wang Y H, Cui X F, Hu X P, et al. 2012. Study on the stress state in upper crust of China mainland based on in-situ stress measurements. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(9): 3016-3027, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.020.
- Wu J, Gao Y, Chen Y T, et al. 2007. Seismic anisotropy in the crust in northwest capital area of China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 50(1): 209-220.
- Wu M L, Zhang Y Q, Liao C T, et al. 2009. Preliminary results of in-situ stress along the Longmenshan fracture belt zone after the Wenchuan M_s 8.0 earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 84(9): 1292-1299.
- Xie F R, Chen Q C, Cui X F, et al. 2003. *Research on Crustal Stress State in China and Adjacent Area* (in Chinese). Beijing: Geological Publish House.
- Xie F R, Cui X F, Zhao J T, et al. 2004. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 47(4): 654-662.
- Xie F R, Qiu Z H, Wang Y, et al. 2005. Earth stress observation and earthquake prediction. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), (5): 54-59.
- Xu X W, Wu W M, Zhang X K, et al. 2002. *The Latest Crustal Deformation and Earthquakes in Beijing Area* (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Yang S X, Yao R, Cui X F, et al. 2012. Analysis of the characteristics of measured stress in Chinese mainland and its active block and North-South seismic belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(12): 4207-4217, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.032.
- Zhang L, He C R. 2013. Frictional properties of natural gouges from Longmenshan fault zone ruptured during the Wenchuan M_w 7.9 earthquake. *Tectonophysics*, 594: 149-164, doi:10.1016/j.tecto.2013.03.030.
- Zhang S M, Wang D D, Liu X D, et al. 2008. Using borehole core analysis to reveal Late Quaternary paleoearthquakes along the Nankou-Sunhe fault, Beijing. *Science in China (Earth Science)*,

- 51(8): 1154-1168.
- Zhang P, Qin X H, Feng C J, et al. 2013. In-situ stress measurements of deep borehole in Shandong segment of Tan-Lu fracture belt and analysis of its activity. *Rock and Soil Mechanics* (in Chinese), 34(8): 2329-2336.
- Zhao D A, Chen Z M, Cai X L, et al. 2007. Analysis of distribution rule of geostress in China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 26(6): 1265-1271.
- Zoback M D, Tsukahara H, Hickman S. 1980. Stress measurements at depth in the vicinity of the San Andres Fault; implication for the magnitude of shear stress at depth. *J. Geophys. Res.*, 85(B11): 6157-6173.
- Zoback M D, Healy J H. 1992. In-situ stress measurements to 3.5 km depth in the Cajon Pass scientific research borehole; implications for the mechanics of crustal faulting. *J. Geophys. Res.*, 97(B4): 5039-5057.
- Zoback M D, Apel R, Baumgärtner J, et al. 1993. Upper-crustal strength inferred from stress measurements to 6 km depth in the KTB borehole. *Nature*, 365(6447): 633-635.
- Zoback M D, Townend J. 2001. Implications of the hydrostatic pore pressures and high crustal strength for the deformation of intraplate lithosphere. *Tectonophysics*, 336(1-4): 19-30.
- Zoback M D. 2007. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 123-139.
- Zoback M L. 1992. First and second order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project. *J. Geophys. Res.*, 97(B8): 11703-11728.
- ### 附中文参考文献
- 鲍亦冈, 谢德源, 陈正邦等. 1983. 论北京地区燕山运动. *地质学报*, (2): 195-204.
- 车兆宏, 范燕. 2003. 北京黄庄—高丽营断层、八宝山断层现今活动追踪研究. *地震*, 23(3): 97-104.
- 陈群策, 丰成君, 孟文等. 2012. 5.12 汶川地震后龙门山断裂带东北段现今地应力测量结果分析. *地球物理学报*, 55(12): 3923-3932.
- 陈庆宣, 王维襄, 孙叶等. 1998. *岩石力学与构造应力场分析*. 北京: 地质出版社.
- 崔盛芹, 吴珍汉, 马寅生等. 2003. 北京地区中生代陆内造山过程——以十三陵—龙庆峡—八达岭线路观察为基础. *地质力学学报*, 9(3): 201-219.
- 丰成君, 陈群策, 吴满路等. 2012. 水压致裂应力测量数据分析——对瞬时关闭压力 P_s 的常用判读方法讨论. *岩土力学*, 33(7): 2149-2159.
- 丰成君, 张鹏, 孙炜锋等. 2014. 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. *地球学报*, 35(3): 345-354.
- 高原, 吴晶. 2008. 利用剪切波各向异性推断地壳主压应力场: 以首都圈地区为例. *科学通报*, 53(23): 2933-2939.
- 郭啟良, 王成虎, 马洪生等. 2009. 汶川 $M_s 8.0$ 级大地震前后的水压致裂原地应力测量. *地球物理学报*, 52(5): 1395-1401.
- 黄秀铭, 汪良谋, 徐杰等. 1991. 北京地区新构造运动特征. *地震地质*, 13(1): 43-51.
- 焦青, 邱泽华, 范国胜. 2005. 北京地区八宝山—黄庄—高丽营断裂的活动与地震. *大地测量与地球动力学*, 25(4): 50-54.
- 景锋, 盛谦, 张勇惠等. 2007. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究. *岩石力学与工程学报*, 26(10): 2057-2062.
- 李方全, 王连捷. 1979. 华北地区地应力测量. *地球物理学报*, 22(1): 1-8.
- 李方全, 祁英男. 1988. 地壳应力随深度的变化规律. *岩石力学与工程学报*, 7(4): 301-309.
- 李四光. 1965. 关于地震地质工作问题. *中国地质*, (12): 41-43.
- 李四光. 1973. *地震地质*. 北京: 科学出版社.
- 刘保金, 胡平, 陈颢等. 2009. 北京平原西北部地壳浅部结构和隐伏活动断裂——由地震反射剖面揭示. *地球物理学报*, 52(8): 2015-2025.
- 马文涛, 徐锡伟, 于贵华等. 2004. 首都圈地区的地震活动性与断裂的关系. *地震地质*, 26(2): 293-304.
- 马寅生, 崔盛芹, 赵越等. 2002. 华北北部中生代构造体制的转换过程. *地质力学学报*, 8(1): 15-25.
- 秦向辉, 谭成轩, 孙进忠等. 2012. 地应力与岩石弹性模量关系试验研究. *岩土力学*, 33(6): 1689-1695.
- 秦向辉, 陈群策, 谭成轩等. 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. *岩石力学与工程学报*, 32(增1): 2870-2876.
- 石耀霖, 张贝, 张斯奇等. 2013. 地震数值预报. *物理*, 42(4): 237-255.
- 苏恺之, 李方全, 张伯崇等. 1996. 长江三峡坝区地壳应力与孔隙水压力综合研究. 北京: 地震出版社.
- 谭成轩, 秦向辉, 王瑞江等. 2010. 中国大陆中东部 $M_s \geq 8.0$ 级特大地震震震背景初步分析. *岩石力学与工程学报*, 29(增2): 3598-3607.
- 王琪, 张培震, 马宗晋. 2002. 中国大陆现今构变形 GPS 观测数据与速度场. *地学前缘*, 9(2): 415-429.
- 王艳华, 崔效峰, 胡幸平等. 2012. 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. *地球物理学报*, 55(9): 3016-3027.
- 吴晶, 高原, 陈运泰等. 2007. 首都圈西北部地区地壳介质地震各向异性特征初步研究. *地球物理学报*, 50(1): 209-220.
- 谢富仁, 陈群策, 崔效峰等. 2003. 中国大陆地壳应力环境研究. 北京: 地质出版社.
- 谢富仁, 崔效峰, 赵建涛等. 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区. *地球物理学报*, 47(4): 654-662.
- 谢富仁, 邱泽华, 王勇等. 2005. 我国地应力观测与地震预报. *国际地震动态*, (5): 54-59.
- 徐锡伟, 吴卫民, 张先康等. 2002. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震. 北京: 科学出版社.
- 杨树新, 姚瑞, 崔效峰等. 2012. 中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析. *地球物理学报*, 55(12): 4207-4217.
- 张世民, 王丹丹, 刘旭东等. 2008. 北京南口—孙河断裂带第四纪古地震事件的钻孔剖面对比与分析. *中国科学(D辑)*, 38(7): 881-895.
- 张鹏, 秦向辉, 丰成君等. 2013. 郯庐断裂带山东段深孔地应力测量及其现今活动性分析. *岩土力学*, 34(8): 2329-2336.
- 赵德安, 陈志敏, 蔡小林等. 2007. 中国地应力场分布规律统计分析. *岩石力学与工程学报*, 26(6): 1265-1271.