

深井孔隙压力测量及其与地震活动性的关系*

高建理 孙世宗 丁健民 梁国平

(中国北京 100085 国家地震局地壳应力研究所)

摘要 介绍了在深钻井中测量岩层流体孔隙压的方法. 以华北地区沉积盆地为例, 分析了 0~4 km 深度岩层孔隙压实测值的变化规律, 并结合区内 1900 年以来发生的 $M_s \geq 5.0$ 的地震, 讨论了 3 000 m 深处异常孔隙压的区域分布与地震活动的关系. 研究表明, 深井中实测的岩层孔隙压 p_0 并不完全等同于静水压 p_H , 超孔隙压现象存在但不具普遍性. 由油田勘探井、评价井及开发井中实测的孔隙压 (p_{01} , p_{02} 及 p_{03}) 与静水压之间的关系为: ① 具超孔隙压的地区 $p_{01} > p_{02} > p_H > p_{03}$; ② 孔隙压正常或偏低的地区 $p_H > p_{01} > p_{02} > p_H > p_{03}$. 通过对本区超孔隙压现象的区域分布与 $M_s \geq 5.0$ 地震活动的关系分析, 发现大约以纬度 $36^\circ \sim 36.5^\circ$ 为界, 南部存在超孔隙压现象, 即在约 2 000 m 深度以下, 实测孔隙压明显高于静水压, 且随深度增加而呈幂函数递增, 其地震活动性弱; 而北部实测孔隙压基本正常或偏低, 孔隙压值随深度呈线性递增, 其地震活动性较强.

主题词 孔隙压力 地壳应力 静水压 压力系数 断层活动与地震

引言

岩层的流体孔隙压对岩层的构造运动可能有重要影响, 因为断层带孔隙压的上升会降低断层面的摩擦阻力而导致断层滑动 (Rice, 1990; Lachenbruch, Sass, 1992). 沉积盆地内液体的抽取也会降低其孔隙压并改变应力状态乃至诱发地震 (Segall, 1989). 可见, 孔隙压的变化将直接或间接地影响断层活动与地震.

在水压致裂应力测量的数据处理中, 孔隙压的大小会直接影响地下最大水平主应力值的估算. 过去因条件限制通常很难获得原地实测的岩层流体孔隙压, 故在应力值计算中多以同等深度的静水压代替孔隙压. 近些年来, 各大油田从油气勘探与开发的需要出发, 以多种测试方法在石油钻井中进行了地层压力 (即岩层孔隙压) 的测试, 深度可达 4 km, 个别达 5 km. 山东胜利油田和河南中原油田部分勘探井中测出的孔隙压反映出约在 2 000 m 深度以下远远高于同等深度的静水压, 可称其为存在高异常孔隙压, 或超孔隙压现象 (杨绪充, 1985; 高建理等, 1987). 超孔隙压现象能普遍存在于沉积盆地中吗? 其分布特点与地震活动性有关吗? 这些是本文所要讨论的问题. 了解沉积盆地岩层孔隙压的分布特点, 有助于实际地壳应力状态的确定和断层活动性的预测, 并在此基础上推断上地壳强度.

* 地震科学联合基金会资助项目.
1995-06-26 收到初稿, 1995-12-06 收到修改稿并决定采用.

1 深井孔隙压的测量方法

石油部门称深井孔隙压力测量为地层测试。自 1955 年法国斯伦贝谢(Schlumberger)公司研制成功电缆式地层测试仪以来,迄今已成为评价油气储集层产能的重要工具。地层测试仪能测量地层流体压力(即孔隙压),采集地层中液体(包括油、气和水),估算地层有效渗透率,并能测定油、气和水之间的界面。

地层测试仪自问世后已得到迅速发展,测量设备已达近 10 种。国内使用最广泛的有斯伦贝谢公司 1974 年研制的重复式地层测试仪(Repeat Formation-Tester,简称 RFT)和美国德莱赛-阿特拉斯(Dresser Atlas)公司于 1978 年研制的多次地层测试仪(Formation Multi-Tester,简称 FMT)。另外,使用较早的还有测试阀靠管柱上提下放控制开关井的多流测试仪,简称 MFE。经过测试比较,普遍认为斯伦贝谢公司的重复式地层测试仪功能多,资料的质量最佳^①。

重复式地层测试仪一次下井可进行多次高精度的孔隙压测试,其井下装置分液压系统、取样系统和测压系统三部分,测试过程也相应分 3 个步骤:

(1) 液压过程。井下仪器被下至待测层位后,液压系统通过电力驱动泵施压使仪器的推靠器靠向一侧,集流器与封隔器插入井壁岩层中,而使井下仪器脱离井壁固定在井中。

(2) 取样过程。封隔器的极板中心是取样管,取样管中装有活塞,测试时活塞抽吸地层的流体,管中有一过滤器以防泥砂进入仪器而堵塞流路,测试完毕后活塞便将过滤器清洗干净。取样管中有两个预测室,容积均为 10 cm^3 。一个为低速,一个为高速。取样测试时,预测室自动打开,以不同的速度分别抽取两个 10 cm^3 的液体。抽取的液体不保存。随着仪器的收拢,预测管线上的阀门将自动打开使预测室的液体排除。这时预测室又与井中泥浆柱沟通,测出泥浆柱压力。取样系统原理示于图 1。

(3) 测压过程。在测试仪器的液体管路中装有一压力传感器,它可将液体压力(孔隙压力或泥浆压力)转换为相应的电信号,传至地面以数字和曲线模拟两种形式记录在磁带和胶片上。RFT 装有容积分别为 4.546 L 和 11.365 L 的取样筒,可以在一次下井中取两种流体样品。这两种样品可由不同的深度获得,也可在同一深度获得。样品被密封于筒内,待仪器被提至地面后转入高压物性分析筒中供分析用。取样的同时可获得压力恢复曲线。其模拟记录曲线及数据读取方法可参阅丁健民等(1994)的文章。

2 深井孔隙压实测资料的分析

我们共搜集到华北地区各大油田数百口钻井计 1 500 余条地层孔隙压的测量数据。其中勘探井 510 条,评价井 541 条,其余钻井(如开发井、注水井、调整井和观察井等)468 条,测量深度为 1 000~5 000 m,其中又以 2 000~4 000 m 居多。我们首先分析孔隙压测值(p_0)随深度的变化规律以及不同地区压力系数 K 值的统计分布特征($K = p_0 / p_H$)。

① 马建国,1986. 电缆式地层测试仪器的现状及发展,国外测井技术水平调研专辑。

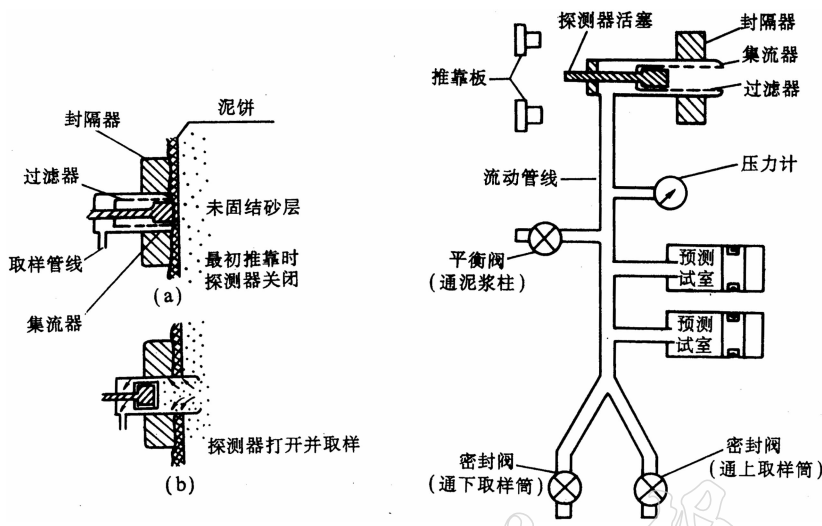


图 1 重复地层测试仪(RFT)取样系统原理图

2.1 孔隙压测值随深度的变化规律

以往因没有实测孔隙压(p_0)资料,故通常以静水压(p_H)代替.随着深井孔隙压实测资料分析结果的积累,人们对 $p_H=p_0$ 的理想模式提出了质疑.杨绪充等(1985)通过对山东济阳拗陷内石油勘探井的孔隙压实测结果提出,在2 200 m深度以下存在 $p_0>p_H$ 现象,他称其为超孔隙压带.1987年,高建理等(1987)在分析了河南东濮拗陷内石油探井中孔隙压测量结果后,也提出该区从2 600 m深处往下存在超孔隙压带,且孔隙压差值 $\Delta p_0=(p_0-p_H)$ 有随深度增加而增大的趋势.丁健民等(1994)又较系统地分析了东濮拗陷内孔隙压随深度的变化,认为压力系数 K 随深度的增加呈阶梯状增大.然而,以上的工作多停留在对超孔隙压现象的定性描述上.本文从统计的角度对华北地区不同区域和不同类型钻井(勘探井、评价井和开发井)中测得的地层孔隙压进行分析,试图弄清沉积盆地内超孔隙压现象的纵、横向分布规律,并探讨其对断层活动性的可能影响.

2.1.1 濮阳地区(中原油田)

该区位于河南、河北和山东三省交界处的东濮拗陷内.在本区搜集到地层孔隙压数据456条,深度为1 400~3 700 m.图2a为本区实测孔隙压与深度关系图.图中方块、三角和叉字分别代表勘探井(p_{01})、评价井(p_{02})和开发井(p_{03}).三类钻井测得的孔隙压均随深度增加而增大,用幂函数拟合数据的结果列于图的右上角,直实线为静水压.由该图可见,勘探井和评价井拟合线约以2 400 m为界,其上孔隙压略低于静水压,其下孔隙压则高于静水压,且随深度的增加孔隙压差值 Δp 也增大.在测深范围内,由开发井中测出的孔隙压值始终低于静水压.这种现象可能与油气开采所引起的能量损失有关.在2 400 m以下,相同深度上存在 $p_{01}>p_{02}>p_H>p_{03}$ 的关系.

2.1.2 济阳地区(胜利油田)

该区指山东北部的济阳拗陷地区.图2b是由杨绪充(1985年)发表的有关图件整理出的结果.图中数据点为勘探井中试油测压值,它们呈幂函数变化.由该图可见,约在1 800

m 以下出现超孔隙压现象, 且随深度递增.

2.1.3 天津地区(大港油田)

本区指天津、塘沽一带渤海湾沿海地区. 本区共搜集到孔隙压数据 24 条, 其中 19 条由勘探井测得, 其余 5 条从评价井和开发井测得. 测量仪器为多流测试器(MFE). 图 2c 为孔隙压随深度变化的关系图. 由该图显见, 本地区孔隙压与静水压差异不大.

2.1.4 冀中地区(任丘油田)

冀中地区位于华北平原中西部, 本区共搜集到孔隙压实测数据 141 条, 分勘探井、评价井和开发井三类, 用 RFT 和 MFE 两种仪器测得. 表示在图 2d 中. 由该图可见, 勘探井和评价井中孔隙压测值与深度之间的线性关系较佳, 而开发井的测点分布则较为分散, 这与油、气开采程度不无关系. 图 2d 中三类钻井孔隙压测值随深度的增加基本服从于线性回归关系式, 回归直线均在静水压 p_H 之内侧. 也就是说, 该区不仅不存在超孔隙压力带, 而且有孔隙压偏低的特点. 在相同的深度上存在 p_H (静水压力) $> p_{01}$ (勘探井) $> p_{02}$ (评价井) $> p_{03}$ (开发井) 的关系.

2.1.5 滦南地区(冀东油田)

滦南地区指唐山、滦县以南渤海湾北部沿海区的南堡凹陷. 共搜集到该区 81 条由 RFT 测量的孔隙压数据. 其中勘探井 3 条、评价井 68 条、开发井 10 条. 数据表示在图 2e 中. 由于勘探井测值太少, 开发井资料又过于分散, 故仅对由评价井测得的孔隙压力值与深度进行了回归分析, 它们之间服从线性回归关系式. 本区不但没有超孔隙压现象, 而且在测深范围内表现为孔隙压系统的偏低, 即 p_{02} (评价井) $< p_H$ (静水压力), 两者以几乎相同的斜率随深度的增加而递增.

2.1.6 辽河地区(辽河油田)

辽河地区地处辽宁省南部辽河下游的下辽河拗陷. 该区搜集到 456 条孔隙压实测数据, 其中勘探井 96 条, 评价井 217 条, 开发井 143 条, 均由德莱赛 3 700 系列多次地层测试仪 FMT 测得. 图 2f 为孔隙压与深度关系图. 分别按三类钻井测值及深度进行了回归计算, 其关系式见图 2f, 相关系数以勘探井最高, $r_1 = 0.93$; 评价井次之, $r_2 = 0.57$; 开发井最差, $r_3 = 0.27$. 本区亦不存在超孔隙压现象, 而是孔隙压偏低, 且在相同深度上存在 p_H (静水压力) $> p_{01}$ (勘探井) $> p_{02}$ (评价井) $> p_{03}$ (开发井) 的规律.

根据以上 6 个油田所在地区的实测地层孔隙压和随深度的变化特征, 服从线性拟合的 3 个地区(冀中、滦南和辽河), 其回归方程中自变量的斜率由勘探井、评价井、开发井逐渐变小、相关性也逐渐变弱. 此类地区不存在超孔隙压现象, 且孔隙压偏低, 深部往往是 p_H (静水压力) $> p_{01}$ (勘探井) $> p_{02}$ (评价井) $> p_{03}$ (开发井) 的现象. 然而, 服从幂函数曲线拟合的 3 个地区(濮阳、济阳和天津), 三类钻井的拟合方程之间无明显的规律可循, 但它们在超孔隙压出现的深度上均存在 p_{01} (勘探井) $> p_{02}$ (评价井) $> p_H > p_{03}$ (开发井) 的特征, 超孔隙压出现的深度通常在 2 000 m 左右. 由此可见, 无论在哪个地区, 开发井的孔隙压 p_{03} 拟合线均低于静水压力 p_H 值, 油井水压致裂是为增产采取的措施, 均在开发井中实施, 故由压裂曲线求取水平主应力值时, 若用 p_H 参与计算, 必定存在孔隙压误差, 应以实际 p_{03} 的拟合方程予以修正.

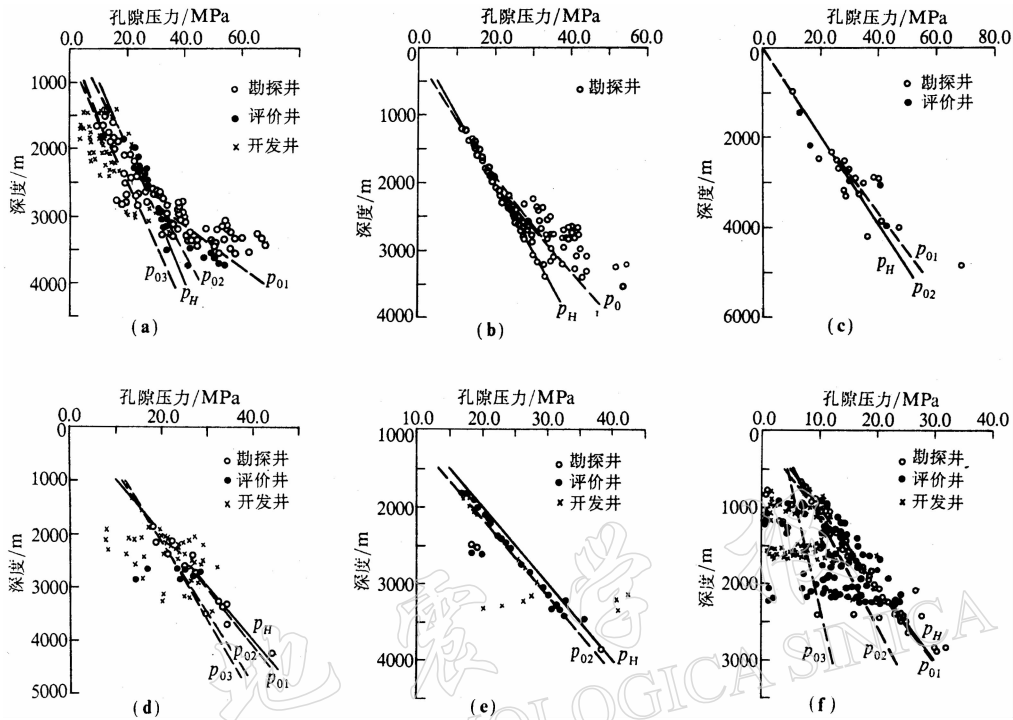


图 2 沉积盆地内孔隙压随深度的变化(各关系式中 p_0 代表孔隙压, D 表示深度). (a) 濮阳地区: $p_{01}=2.8\times10^{-6}\times D^{2.05}$, $p_{02}=2.3\times10^{-3}\times D^{1.19}$, $p_{03}=6.3\times10^{-4}\times D^{1.32}$; (b) 济阳地区: $p_0=0.015\times D^{1.26}$; (c) 天津地区: $p_{01}=5.1\times10^{-3}\times D^{1.09}$, $p_{02}=9.2\times10^{-3}\times D^{1.01}$; (d) 冀中地区: $p_{01}=0.009\ 627D+0.432\ 755$, $p_{02}=0.007\ 541D+3.639\ 731$, $p_{03}=0.006\ 970D+4.752\ 471$; (e) 滦南地区: $p_{02}=0.010\ 045D-1.626\ 69$; (f) 辽河地区: $p_{01}=0.010\ 238D-1.166\ 044$, $p_{02}=0.006\ 985D+2.211345$, $p_{03}=0.003\ 248D+2.673\ 711$

2.2 压力系数 K 的分布特征

为分析孔隙压的分布特征及其变化,引入压力系数 K 这一参数,令其等于孔隙压与静水压之比(即 $K=p_0/p_H$, $p_H=0.01\text{ MPa/m}$).若 $K>1$,称为超孔隙压; $K=1$,为正常孔隙压; $K<1$,为低孔隙压.现以直方图统计出 6 个地区的勘探井与评价井的压力系数分布特征(如图 3 所示).直方图的横轴为压力系数,纵轴为测量数据个数.由图可见,濮阳和天津地区既存在超孔隙压现象,又存在低孔隙压现象;济阳地区以正常孔隙压为主,几乎不存在低孔隙压现象.冀中、滦南和辽河地区都不存在明显的超孔隙压现象,而存在低孔隙压现象,冀中与辽河地区的低孔隙压现象更显著些.

2.3 有关孔隙压分布特征的小结

通过上述分析可得出以下几点看法:

- (1) 沉积盆地内的超孔隙压现象并不具普遍性.在所分析的 6 个沉积盆地中濮阳地区最显著,济阳地区次之,天津地区则不明显.冀中、滦南与辽河地区不仅不存在超孔隙压现象,而且还伴有低孔隙压特点,其中以冀中和辽河两地区较突出.
- (2) 存在超孔隙压现象的 3 个地区,孔隙压与深度之间大致呈幂函数分布,超孔隙压

出现的深度在 2 000 m 左右. 无超孔隙压现象的 3 个地区, 孔隙压随深度呈线性增加, 其线性相关性以勘探井最佳, 评价井次之, 开发井最差.

(3) 在同一深度上, 存在超孔隙压的地区孔隙压与静水压的关系为 p_{01} (勘探井) $> p_{02}$ (评价井) $> p_H$ (静水压力) $> p_{03}$ (开发井); 不存在超孔隙压的地区则有 p_H (静水压力) $> p_{01}$ (勘探井) $> p_{02}$ (评价井) $> p_{03}$ (开发井).

(4) 无论存在超孔隙压与否, 开发井中测得的孔隙压通常均低于静水压. 这显然起因于油气开采所造成的能量衰减.

3 超孔隙压现象与地震活动可能关系的讨论

本文展示的资料表明, 超孔隙压的存在仅是局部现象. 其成因除沉积过程中自身因素外, 尚需长期的环境条件, 诸如构造运动相对弱, 具备相对封闭的环境, 隔断了局部岩层流体与外界的沟通, 使漫长的沉积与成油过程中各种物理、化学反应产生的高流体孔隙压力得以保存(Shi, Wang, 1986).

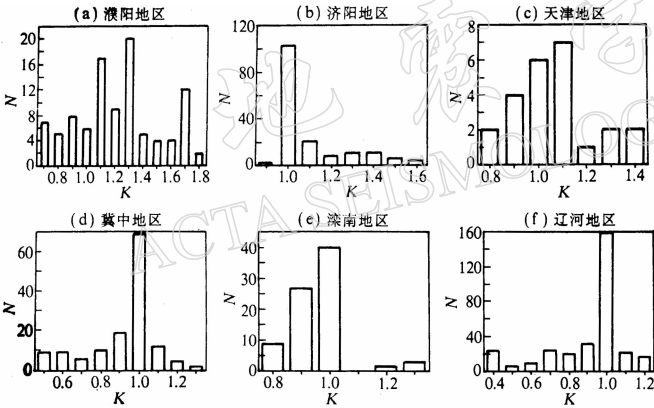


图 3 压力系数 K 的统计直方图
(K=孔隙压/静水压)

在断层带周围向地下注入流体会增大孔隙压、降低断层面的有效正应力, 致使沿断层面产生摩擦滑动而诱发地震. 这类地震通常震源较深, 震级较大 (Healy *et al.*, 1968; Raleigh *et al.*, 1976). 然而, 有趣的是在油气田由于液体的抽取, 会降低孔隙压并引起地面沉降变形, 结果也会触发地震 (Simpson *et al.*, 1976; Yerkes, Castle, 1970). Segall(1989, 1985)还对这种实地地震监测得出的认识进行

了理论模型分析, 发现油、气等流体的抽取会引起储层岩石的受压, 表现为垂直方向的地面沉降和水平方向的围岩挤压, 而储层边缘部位转为拉张. 应力条件的变化必然会导致断层的运动, 乃至触发地震, 这类地震震源较浅, 且以小震居多, 个别情形也会发生大震.

既然油气田流体的抽取会触发地震, 那么孔隙压的分布是否也与地震活动性有一定的关系? 现结合 1900 年以来本区 $M_s \geq 5$ 的地震分布, 讨论孔隙压与地震活动性的可能关系 (图 4).

图 4 展示了华北平原区 K (孔隙压/静水压) 等值线与 1900 年以来 $M_s \geq 5$ 地震的分布. 图中阴影区为山东济阳地区, 因缺乏孔隙压测点的坐标位置, 故无法得出该区的 K 等值线图. 然而图 2b 和图 3b 已展示该区在 1 800 m 深度以下存在超孔隙压现象, 其压力系数可高达 1.5~1.6, 因此可认为阴影区也代表孔隙压高的异常区. 西部的濮阳地区也是高

孔隙压区. 北京、冀中、滦南、天津等区孔隙压基本正常, 局部偏低. 故大致以北纬 $36^{\circ} \sim 36.5^{\circ}$ 为界, 北部为正常孔隙压区, 南部为高孔隙压区. 而地震的分布恰好相反, 表现为北部地震多而密集成带, 南部地震少且零星. 邢台地震区接近一个低孔隙压中心, 这些现象似乎说明高孔隙压异常地区地震活动性较弱; 而孔隙压正常甚至偏低的地区地震活动性较强. 值得指出的是, 孔隙压实测深度在 $1 \sim 4.5$ km. 华北地震震深度为 10 km 左右或更深, 实测孔隙压的分布规律在地震深度上是否成立, 尚不能定论. 但构造地震的发生受制于断层运动. 对于切割地壳的深大断裂而言, 其断层运动可存在于一定范围之内, 上至近地表, 下至地壳中、下部. 因而, 孔隙压的变化对断层活动是可能有一定的诱发作用的. 地震活跃的地区, 断层发育且活动性强, 可能致使附近沉积盆地难以形成封闭的环境, 其岩层的流体与断层带的流体连通, 油气储层的流体孔隙压也接近于静水孔隙压. 须指出的是, 图 4 标出的地震震级较大, 这些地震基本与沉积盆地内的油、气抽取无关, 是区域构造运动的产物. 倘若考虑 $M_s < 5.0$ 的小震、甚至微震, 其结果可能会有所不同. 这个问题有待专门研究.

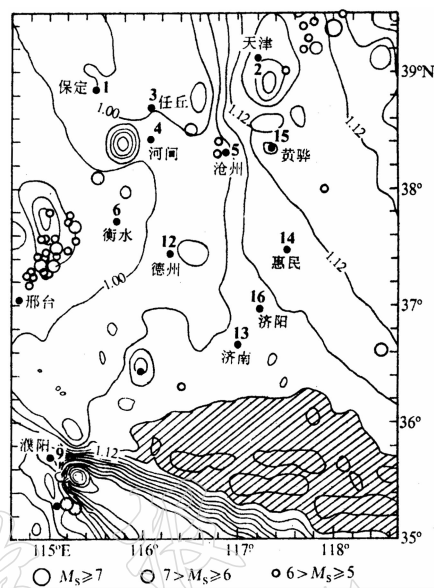


图 4 华北平原区 K(孔隙压/静水压)等值线及地震震中分布图

参 考 文 献

- 丁健民, 梁国平, 高建理, 等, 1994. 沉积盆地深井孔隙压力测量. 国家地震局地壳应力研究所(编), 地壳构造与地壳应力文集(7). 北京: 地震出版社. 84~92
- 高建理, 丁健民, 梁国平, 等, 1987. 华北地区盆地内地壳应力随深度的变化. 中国地震, **3** (4): 82~98
- 杨绪充, 1985. 济阳凹陷沙河街组区域地层压力及水动力学特征探讨. 石油勘探与开发, **12**(4): 13~20
- Healy J H, Rubey W W, Griggs D T, *et al.*, 1968. The Denver earthquakes. *Science*, **161**: 1 301~1 310
- Lachenbruch A H, Sass J H, 1992. Heat flow from Cajon pass, fault strength, and tectonic implications. *J Geophys Res*, **97**(B4): 4 995~5 015
- Raleigh C B, Healy J H, Bredehoeft J D, 1976. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado. *Science*, **191**: 1 230~1 237
- Rice J R, 1990. Fault stress states, pore pressure distributions, and the weakness of the San Andreas fault (abstract). *Eos Trans, AGU*, **71**: 1 652
- Segall P 1985. Stress and subsidence resulting from subsurface fluid withdrawal in the epicentral region of the 1983 Coalinga earthquake. *J Geophys Res*, **90**: 6 801~6 816
- Segall P 1989. Earthquakes triggered by fluid extraction. *Geology*, **17**: 942~946
- Shi Y L, Wang C Y, 1986. Pore pressure generation in sedimentary basin overloading versus aquathermal. *J Geophys Res*, **91**(B2): 2 153~2 162
- Simpson D W, Leith W, 1976. Seismicity and faulting attributable to fluid extraction. *Engineering Geology*, **10**: 151~167
- Yerkes R F, Castle R O, 1970. Surface deformation associated with oil and gas field operations in United States, in Land Subsidence. *International Association of the Science of Hydrology*, UNESCO Publication, **89**(1): 55~66