

应用水位 b 值动态推算华北中强地震前主应力方向^{*}

卜凡泉, 张福友, 徐文华

(山东省滨州行署地震局, 山东 滨州 256602)

摘要: 在计算、统计济阳拗陷区群井水位-气压效率(b)和判定华北断块中强地震前兆动态的基础上, 结合井孔所处断裂构造走向, 推算了单井 b 值响应的构造裂纹应力、应变特征, 并以群井推算结果研究了震前异常场的主应力方向. 初步归纳出华北不同区块中强地震前在济阳拗陷呈现的主压应力方位及不同块区间的演变规律, 力图为地下流体的地震预报增添新方法.

主题词: 井水水位; 华北; 主应力方向; 强震

中图分类号: P641; P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(1999)02-0189-05

0 前言

地震地下水位作为前兆手段长期为人们所采用, 随着井孔辅助设施的逐步完善, 对地下水位信息资源的开发也逐步向着深度和广度拓展. 流体动态内涵的地球物理参数十分丰富, 其中不少具有响应地层应力、应变动态的效能, 但目前利用某一观测区域群井的有关参数研究地震($\Delta < 700$ km, $M_S > 5.0$)前主应力方向, 跟踪地层应力应变的演变特征, 服务于地震预报的尝试还不多见.

地下水位观测具有自身优势和特性. 在某一区间井孔往往比较密集, 各井所处断裂构造走向、观测深度、岩性、井孔结构等各不相同, 信息源广且可以相互对比、验证. 在资料处理和分析预报基础上可以依照单井水位-气压相关参数的前兆动态, 应用地质、流体等力学原理, 结合有关地质资料, 对所响应的地震前兆场主应力方向进行推算, 并以群井推算结果研究该地震在观测区域的应力、应变特征. 由多震例可以统计出某块区中强地震前的主应力方向及相邻块区间的演变规律, 为未来地震的空间预报积累经验. 该方法虽然带有较浓的经验成份, 但效果比较理想, 有望发展成为实用且可信度较高的方法.

1 济阳拗陷区测井与构造的总体布局(图1)

该课题使用了鲁北济阳拗陷区鲁03, 04, 08, 09, 26, 28号地震地下水位观测井的气压效率(b)资料, 资料时段除26号井为6a多外其余都在10a以上. 这6口测井全部都是由石油探井

收稿日期: 1998-01-13

^{*} 山东省地震局合同制课题-97

第一作者简介: 卜凡泉, 男, 1951年生, 高级工程师, 从事地下流体预报地震研究.

改造而成的.03,04,08号井的观测层岩性为第三系砂岩,其埋深依次为550,654,2047m;26号井裸眼于第三系砂岩与奥陶系石灰岩接触的断裂面中,埋深1800m~2779m;09,28号井则裸眼于奥陶系石灰岩地层,埋深分别为2799~2886和2764~2904m.砂岩井(03,04,08,26)水位-气压效率偏低, $b = 3.0 \sim 5.4 \text{ mm/hPa}$,石灰岩井(09,28)则偏高, $b = 7.0 \sim 7.2 \text{ mm/hPa}$.各井气压、降水等辅助观测设施齐全,资料连续、可靠.

济阳坳陷断裂构造十分发育,主要断裂的优势走向为北东东,平行于坳陷主轴,大多呈现引张沉陷模式,少量为北北西或南北向,把坳陷切截成菱形块体.济阳坳陷也是现代构造活动强烈的地区,1969年渤海7.4级地震就发生在坳陷东部.为尽可能灵敏地响应地层的应力应变,遴选的上述6口测井都靠近或位于构造断裂面上.为了便于研究和对比,可以把这6口井定位的断裂构造依据走向划分为3种类型:04,08,09,26这4口井定位的构造走向为北东东($N10^\circ \sim 30^\circ E$),定为 F_A 型;03号井定位的构造走向为北西西($N70^\circ W$),定为 F_B 型;28号井定位的构造走向则为近南北向($N10^\circ W$),定为 F_C 型.此外,09号井定位的构造走向同时比较接近 F_C 型,属交汇部位.不同类型构造中的井孔就成为比较合理、灵敏的流体响应地层应力应变的监测点.

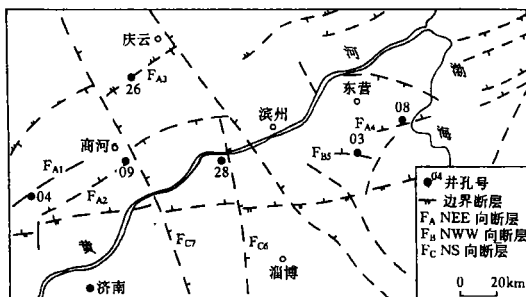


图1 济阳坳陷区地下水位测井
与构造的组合格局

Fig.1 Observation wells and structures
in Jiyang depression.

2 资料及应力方向的反演思路和方法

b 值系水位、气压日均值经一阶差分后以线性回归方法所得^[1],差分前已将原始水位中降水干扰排除,按月组合,五日滑动.地震孕育过程中水位 b 值动态因响应异常场的应力应变而发生变化.判定异常形态的标准是看 b 值是否超越其二倍均方差(ΔS).自1981年开始,凡是投入观测的井孔都进行连续计算、统计.

断裂带裂纹的发育方向在平面上依同于断裂构造.当区域应力形式改变时,包括主断裂面在内的裂纹最易发生体积应变,影响着地层的导水系数,表现为流体对气压等外部应力的响应效率改变.主压应力(σ_1)正面作用于观测段地层裂纹面时,裂纹面受压而闭合,地层导水系数减小,对气压的响应效率降低^[2];同理,变主压应力为引张(σ_3), b 值则相应增高.其它形式的应力、应变状态都可依据 b 值动态推算出来.

经验表明,地震前相同观测区域不同井孔的 b 值异常动态、幅度往往有较大差异,表现为所响应的同一应力场在不同构造带中产生的应变特征、强度可以完全不同,因此,依据单井 b 值异常动态推算介质的主应力方向成为可能.推算方法是:以 ΔP ($\Delta P = 2\Delta S$)值作为主应力性质、方向的鉴别标准,①如果 b 值的正、负异常值 $\Delta b > \Delta P$,则可以认为该井所处构造线正接受引张力(σ_3)或主压应力(σ_1)作用(如果 $\Delta b \geq \Delta P$,可认为地震震级较高,距离较近);②如果 $\Delta b < \Delta P$,则认为 σ_3 或 σ_1 与构造法线有一角度(θ)偏离,其方向依据群井相同性质应力的优势方向而定,推算公式为

$$2\theta = \arccos \frac{\Delta b}{\Delta P} \quad (1)$$

当 $\Delta b = 0$ 时,则认为 σ_1 和 σ_3 与法线夹角相等($\theta = 45^\circ$),应变效能中和.以此方法逐震例、逐井孔推算出主应力方向,计算出群井平均方位角及平均误差,剔除大于误差值的井孔数值,二次平均,即可得出地震在济阳拗陷呈现的主应力方向.

3 邻近块区中强地震前的主应力方向

依照上述方法用 b 值动态对邻近($\Delta \leq 700$ km)地带 $M_S > 5.0$ 地震的前兆场应力、应变特征进行了研究.03,04,08,09,26 和 28 号井的 ΔP 值分别为 1.36,0.82,1.60,0.54,1.52 和 1.12.

3.1 宁晋 5.8 和菏泽 5.9 级地震前的构造主应力方向

1981 年 10 月 30 日河北宁晋 5.8 级地震发生之前已有 03,04,08 号这 3 口井的 b 值资料(图 2).从图 2 可看出,同位于 F_A 型断裂带的 04 和 08 号井的 b 值出现 Δb 分别为 1.90 和 2.43, $\Delta b \geq \Delta P$ 的高值异常,显示 F_{A1} 和 F_{A4} 构造裂纹正面接受 σ_3 而强烈开启.由(1)式推算 F_{A1} 的 σ_3 方向应为 $N28^\circ W$, σ_1 为 $N28^\circ E$;推算 F_{A4} 的 σ_3 方向和 σ_1 方向则分别为 $N24^\circ W$ 和 $N24^\circ E$.位于 F_{B5} 构造上的 03 号井则无明显的异常反应($\Delta b = 0$),可以认为 σ_1 和 σ_3 与 F_{B5} 法线夹角相等($\theta = 45^\circ$),其方向分别为 $N30^\circ W$ 和 $N30^\circ E$.根据这 3 口井的研究结果推测,该地震在济阳拗陷呈现的前兆应力场 σ_1 方向为 $N27^\circ E$, σ_3 方向为 $N27^\circ W$.

1982 年 10 月 19 日滦县 5.3 级地震发生前的主应力方向为 $N30^\circ E$.

1983 年 11 月 7 日菏泽 5.9 级地震发生前 04 和 08 号井依然呈现 Δb 值(1.60 和 2.33)大于 ΔP 的高值异常(图 2),而且在时间上也相当同步,显示地层的受力状态与上述 5.8 级地震类同.突出的是 03 号井,由 5.8 级地震前的较平静转化为与 09 号井情况相似的 Δb 分别为 2.34 和 0.55 的高值异常, $\Delta b \geq \Delta P$,并存在低值($\Delta b = 1.70$ 和 $\Delta b = -1.11$)异常相间的跳跃现象. b 值动态显示,5.9 级地震前的 σ_3 向着有利于 F_B 型构造裂纹开启的方向转化.推算得到的 F_{B5} 构造应力 σ_3 方向为 $N80^\circ E$, σ_1 为 $S10^\circ E$;09 号井推算得到的 F_{A2} 构造 σ_1 方向为 $N25^\circ E$.根据这 4 口井的研究结果推测,该地震前兆场呈现的 σ_1 方向为 $N22^\circ E$, σ_3 方向为 $S68^\circ E$.

3.2 大同 6.1 和 5.8 级地震前的构造主应力方向

1989 年 10 月 18、19 日大同 5.7、6.1 级地震前多数井孔的 b 值异常动态(图 3)与宁晋、菏泽地震前有很大不同.原先相对活跃的 04 和 08 号井在大同地震前只有 08 井存在 $\Delta b > \Delta P$ 的高值异常,由(1)式推算, σ_3 与 08 号井所处的 F_{A4} 法线有 25° 的偏离, σ_3 方向为 $N80^\circ E$, σ_1 方向为 $S10^\circ E$.相反,09 号井则存在 $\Delta b < \Delta P$ 的低值异常,推算 σ_1 与 F_{A2} 法线有 20° 的偏离,方向为 $S46^\circ E$.而 04 和 28 号两井异常不清晰($\Delta b = 0$),只有 03 号井 Δb 高(0.84)、低(-1.20)值异常跳动明显,表明 σ_1 垂直作用于 F_{B5} .单井检测: F_{A1} 、 F_{A4} 、 F_{B5} 上的 3 口井的 σ_1 同为 $S10^\circ E$, F_{A2} 、 F_{C6} 上的 σ_1 则为 $S46^\circ E$.综合推算该地震前兆场的 σ_1 方向为 $S24^\circ E$, σ_3 方向为

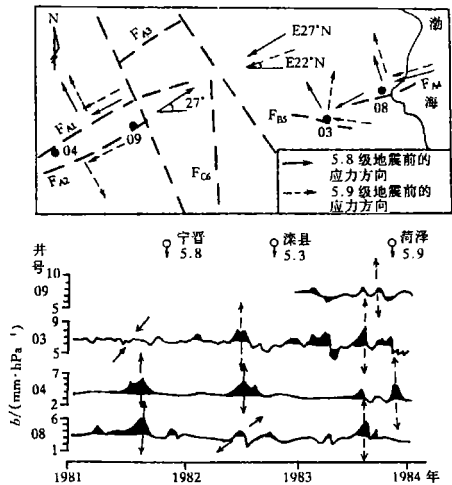


图 2 宁晋 5.8 级和菏泽 5.9 级地震前的水位 b 值及推测的构造主应力方向

Fig.2 Water level b -value before the Ningjin $M_S 5.8$ and Heze $M_S 5.9$ earthquakes and inferred directions of principal stresses.

N46°E.

1991年3月26日大同5.8级地震前群井 b 值响应的地层应力应变特征与6.1级地震的截然不同(图3).04和08号井恢复了已往突出、鲜明的动态特征,呈现为 Δb (2.10和0.93)的高值异常段.03和28号井则转为低值异常,且幅度之低($\Delta b = -2.20$ 和 $\Delta b = -0.49$)为前所未有.依上述方法判定:该地震前主应力有利于 F_B 型构造裂纹面的压闭.根据各井推算的 σ_1 方向,剔除超标的08和09号井数值,综合得 σ_1 的方向为N55°E.

3.3 包头6.4级地震前的构造主应力方向

1996年5月30日包头6.4级地震前各井 b 值动态与大同5.8级地震前类同,只是幅度稍有差异(图4),最活跃的是08号井, $\Delta b = 4.73$ 的异常段为前所未有.据推算,除08号井响应的

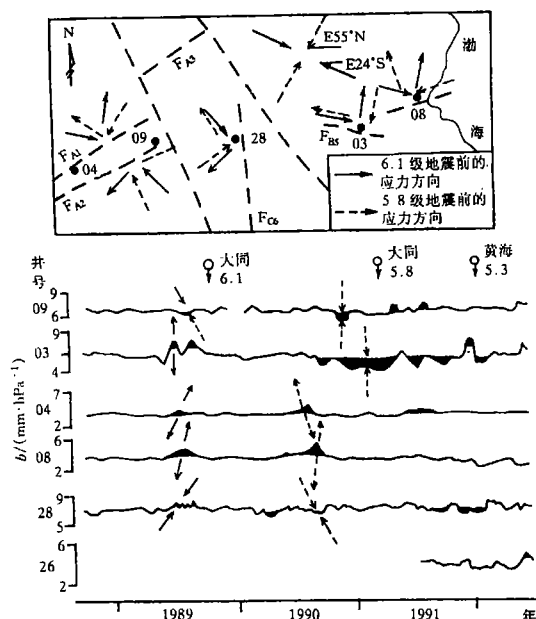


图3 大同6.1和5.8级地震前的水位 b 值及推测的构造主应力方向

Fig. 3 Water level b -value before the Datong $M_{S6.1}$ and $M_{S5.8}$ earthquakes and inferred directions of principal stresses.

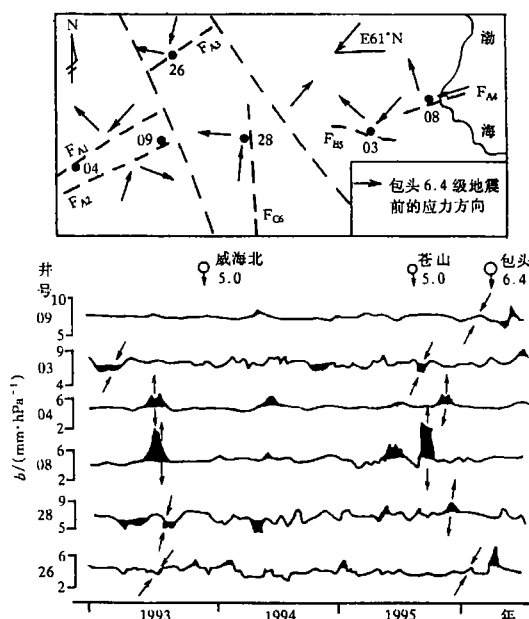


图4 包头6.4级地震前的水位 b 值及推测的构造主应力方向

Fig. 4 Water level b -value before the Baotou $M_{S6.4}$ earthquake and inferred directions of principal stresses.

方向角度(N18°E)较低外,其它5口井均为N46°~80°E,平均为N61°E.综合得该地震前呈现的构造主应力 σ_3 方向为N61°W.

4 推算不同块区震前主应力方向的意义

利用群井 b 值研究华北不同块区^[3]中强地震前在济阳拗陷呈现的主应力方向,目的在于识别其前兆应力、应变特征以及不同块区间的演变规律,服务于地震预报.从研究结果看,不同块区间 $M_S > 5.0$ 地震前主应力方向变化规律极强,方向角约以北纬33°线为轴,向两侧逐块区扩大.以勿南沙6.2、中黄海5.3级地震为代表的扬子块区,震前主应力 σ_1 的方向由S16°E渐变为N11°E,绕EW轴摆动.以菏泽5.9、宁晋5.8级地震为代表的冀鲁块区,则由N22°E渐变为N30°E,偏离轴向约26°.而以大同5.8、包头6.4级地震为代表的太行及西部块区,方位则达到N58°E左右,且比较发散(图5).上述情况表明,华北不同块区震前 σ_1 方向的演变有规律可

循,进而可依据群井 b 值推算的 σ_1 方向判定未来地震的发生区间。

5 讨论

(1) 该方法受距离和震级的局限.从检测结果看,对于几百公里范围内 $M_S > 5.0$ 的震例效果比较好,但对于远场($d > 1000$ km),即使较大地震的 b 值异常动态也并不显著。

(2) 观测井应尽可能多且同处于一个构造单元,这样容易消除不同区域应力场的干扰.多井孔可以更合理地印证和修订推算结果,降低误差率。

(3) 观测层裂纹发育程度不决定 b 值异常动态.一般认为,裂纹不发育的地层易于显示开启应变(b 值升高),反之,则易于显示闭合应变(b 值降低).其实不然,类似 08 和 04 号测层比较密闭的井孔依然存在比 ΔS 低 3 倍的异常时段,而裂纹高度发育的井也有不少高值异常,所以,决定 b 值异常动态的主导因素是主应力的方向和强度及其与构造的组合格局。

(4) b 值异常动态常发生跳跃式改变.该现象以 03、08、09 等井比较明显,03 号井在菏泽 5.9 级地震前表现得最为突出(图 2), b 值异常动态跳动频度高、幅度大.笔者认为,上述现象是流体对某一方向主应力强度不能持续、均衡,即表现为强弱转化(主应力方向改变)从而导致裂纹应变形态改变的响应.分析 03 号井 b 值异常动态丰富鲜明的地质和力学机制之后,认为它所定位的 F_B 型断裂可能属区域应力场中应变灵敏型构造。

(5) 不同走向构造上的井孔的 b 值动态差异明显.同处在 F_A 型构造上的 04、08、09、26 号测井,其 b 值异常动态往往相同,大多呈现为正异常,尤其是 04 和 08 号井,在多次地震之前,其异常形态几乎完全一致,更值得注意的是 04 号井,在十几年来诸多震例中全部呈现为正异常,可以认为是水井 b 值动态取决于构造走向与主应力方向有机组合的一个例证. F_B 型构造井孔(03)与 F_A 型井孔截然不同,该井孔 b 值动态在多数情况下呈现负异常,西部块区(太行、鄂尔多斯)尤为突出,震前 b 值动态几乎都为负异常,且时段较长(3~8 个月),从而成为分析预测地震发生区间所必须重视的前兆现象。

笔者认为:井孔 b 值确有显示所处断裂构造受力性质、方向、强度的功能;不同块区地震在济阳坳陷显示的主应力方向确有规律可循。

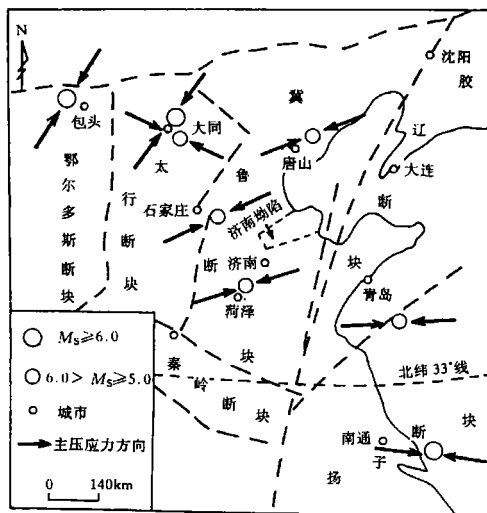


图 5 由水位 b 值动态推测的华北不同断块中强地震前主应力方向

Fig. 5 The inferred directions of principal stresses before strong earthquakes in North China based on water level b -value dynamics.

参考文献

- [1] 林纪曾. 观测数据的数学处理[M]. 北京:地震出版社, 1983.
- [2] 张昭栋, 等. 地下水潮汐分析[M]. 济南:山东大学出版社, 1988. 55~60.
- [3] 张步春, 蔡文伯. 华北断块区构造单元的划分及其边界问题[A]. 见:华北断块区的形成与发展[C]. 北京科学出版社, 1980. 12~18.

(下转 202 页)

- [8] 才树华, 贾云鸿, 何秀琴, 吕德徽. 毛毛山活动断裂带运动学特征及与海原活动断裂带的对比[A]. 见: 中国活动断层研究[C]. 北京: 地震出版社, 1994. 48~58.

ACTIVITY MIGRATION OF THE QUATERNARY SHUIQUANJIANSHAN-JUEWUSHAN SOUTH PIEDMONT FAULT ZONE AND ITS MECHANISM IN JINGYUAN, GANSU

CAI Shu-hua, ZHANG Jie

(*Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China*)

Abstract

The Shuiquanjianshan-Juewushan south piedmont fault zone in Jingyuan region, Gansu Province was a strike reverse fault before early Quaternary and became sinistral strike-slip fault in middle Quaternary. As the strong activity occurred along the Haiyuan fault zone, the activities of the Shuiquanjianshan-Juewushan fault zone, other active faults before late Quaternary and compressive settling basin within the region were stopped. Obviously, activity of the Quaternary fault was characterized by lateral migration. It is considered that the migration mainly resulted from change of principal stress orientation of regional stress field and characteristic structure boundary condition.

Key words: Gansu; Quaternary; Faulting; Migration mechanism

(上接 193 页)

PRINCIPAL STRESS ORIENTATIONS BEFORE STRONG EARTHQUAKES IN NORTH CHINA INFERRED BY USING WATER LEVEL b -VALUE DYNAMICS

BU Fan-quan, ZHANG Fu-you, XU Wen-hua

(*Seismological Bureau of Binzhou Prefecture, Binzhou 256602, China*)

Abstract

Based on well water level b -value dynamics in the Jiyang depression and strikes of faults on which the wells exist, directions of principal stresses before strong earthquakes in North China are inferred and their evolution laws among different fault blocks are preliminarily summed up in order to add a new method for earthquake prediction by using subsurface fluid.

Key words: Well water level; North China; Principal stress orientation; Strong earthquake