

河北井网水位观测中的刚性 动态与弹性动态

黄保大 贾化周 万迪堃 董守玉 蓝秀英

(河北省地震局)

在经典的水文地质学专著中,有这样两句话:“地下水动态是地下水均衡的外部表现,地下水均衡是导致动态变化的内在原因”。也就是说,水位变化反映着含水层内水量的均衡。属于正均衡,水位上升;属于负均衡,水位下降。这一观点,在很长时期内成为研究地下水动态的基本指导思想。无疑,这在研究浅层地下水资源评价中是正确的。尽管在邢台地震后广大地震工作者观测到一些与含水层水量变化毫不相干的水位动态,但由于理论准备不足,对那些动态的意义和价值认识不够,未引起足够的重视和深入的研究。全国第二代地震地下水观测网的建设 and 大量观测资料的取得,为研究地下水动态提供了新鲜的思路与途径,推动着地震地下水工作的飞速发展。在1981年国家地震局组织的地下水影响因素研究组的研究成果《地震地下水动态及其影响因素》专著中首次公开地明确提出:地下水位是在多种因素影响下的综合物理量。影响水位变化的主要可分两大类:一类是通过影响含水层水量变化而引起水位变化;另一类是使含水层应力应变状态发生改变而引起水位变化。前者的主要因素有降水、地表水入渗、开采、注水等;后者的主要因素有固体潮汐(靠近海岸的还有液潮)、气压、降雨荷载、地震波、断层蠕动、不均匀块体升降等。含水层水量变化,往往引起水位大幅度升降,通常称为宏观动态,也就是刚性动态;应力应变状态变化引起的水位升降一般幅度很小,通常称为微动态,也就是弹性动态。

一般情况下,由于潜水的干扰因素复杂多变,定量排除非常困难,加之对地壳应力应变反应不灵敏,因此不适用于地震监测。承压水,特别是封闭性较好的深层基岩承压水,干扰因素较少且易于识别和排除,对地壳应力应变反应灵敏。由于井孔水位对含水层微量体应变有显著的放大作用,以及承压水对孔隙压的变化有快速传递能力,因而深层承压水位成为地震监测中的重要手段。河北省地下水观测网自1981年正式验收以来,提供了丰富的水位资料和动态信息,是我们研究地震与地下水关系的宝贵财富,现就各种动态信息讨论如下。

一、含水层水量增减造成的水位动态(刚性动态)

1、降水造成的水位动态

在我省由17个井孔组成的井网中,不同程度地受降水补给影响的井孔有8个,占总井孔数的47%。在降水渗入补给的影响下,这些井孔水位动态的基本特点是具有明显的年周期变化。距补给区近的井孔,高水位期出现在8—9月份,如完县井等;远离补给区的井孔,高水位期出现在1—2月份,如泽1、玉田、岳42等井。低水位期一般均出现在6—7月份。水位年变幅受降水量、含水层埋深及岩性等多种因素影响,以灰岩水变幅最大,火山岩水最小,年变幅大者可达6—7米,小者不足1米,各井变化情状见下表:

井 孔	最高水位期(月)	最低水位期(月)	年最大变幅(米)	含水层岩性	井深(米)
完 县	8—9	6—8	7.31	灰 岩	500
泽 1	3—4	8—9	2.03	砂	501.45
昌 黎	3—4	7—10	0.72	花 岗 岩	301.04
山西水2	1—2	6—7, 11—12	6.85	灰 岩	286.57
滦南气象站	3—4	6—10	4.10	砂	250.48
玉 田	3—4	6—8	1.98	灰 岩	456.42
岳 42	1—3	6	5.45	灰 岩	706.7

2、开采造成的水位动态:

过量开采,动用静储量,造成水位的持续下降,这是华北地区浅层承压水近年来的基本特征。由于开采方式和开采量的不同,水位动态略有差别。如泽1井,由于区域性开采,形成匀速缓降型动态,从1981年1月至1985年底,总下降量达3.76米,年下降速度0.75米。唐山市由于大量直接开采岩溶裂隙水,致使山西水2井水位形成阶梯陡降型动态,每年雨季水位短时间略有回升,但很快又转为长时间、大幅度的下降,构成继续下降陡坎。虽然1984—1985年由于降水量增大,补给回升,但从1981.1—1985年底水位仍下降了十几米。

自流井放水量过大,造成弹性储量的消耗,引起水位的连续下降。其下陡速率随时间逐渐变缓,最后达到新的平衡。下降过程曲线呈负指数衰减。属于这种类型的井孔有晋19、济1、万全井等,占井孔总数的18%。如万全井,1981年3—12月水位下降600毫米,每月下降60毫米,1982年1—12月下降300毫米,每月下降25毫米,1983年1—2月下降30毫米,每月下降15毫米。自流量与水位同步变化。

当自流井关井、停止自流后,含水层弹性储量得到逐步恢复,造成水位缓慢上升,其上升速率逐渐变小,上升曲线呈指数增长。如永年井,1981年7—12月水位上升1.53米,平均每月上升88毫米;1982年1—12月上升0.43米,平均每月上升36毫米;1983年1—12月上升0.18米,平均每月上升15毫米;1984年1—12月上升0.19米,平均每月上升16毫米;1985年1—12月上升0.11米,平均每月上升9毫米,1986年转平。

3、油田注水造成的水位动态。

在油田附近的深井,受油田注采的影响,水位在一个时期内持续上升,这类井孔有三个(容1、雄101、马17井),占井孔总数的18%。如容1井,1981年1月至1983年6月

共上升1.96米,平均每月上升65毫米。容1井位于郑东、任邱两油田北西约35—40公里。经气压校正后的水位变化趋势与任邱、郑东油田总压降的变化一致,井水位变化滞后两油田总压降变化约6个月(图1),容1井水位呈趋势性上升阶段,正是两油田注水,地层压力回升过程。将郑东油田和任邱油田总压降与容1井水位进行复相关计算,求得复相关系数 $R=0.98$,相关性极好,说明容1井水位的趋势性上升,是郑东、任邱两油田注水的结果。之所以如此,是因为冀中拗陷古潜山水是一个统一的水动力体系,具有统一的补给区、径流区和排泄区。尽管受断块和凹槽的分割,各个局部具有一定的封闭性和独立性,从而形成了冀中拗陷古潜山水既有水力联系,但又不通畅的局面。当任邱和郑东两油田注水,引起区域地层压力回升,孔隙水压增高,其结果必然改变古潜山水的循环条件,使上游段水力坡度减小,地下水向下游排泄变缓。

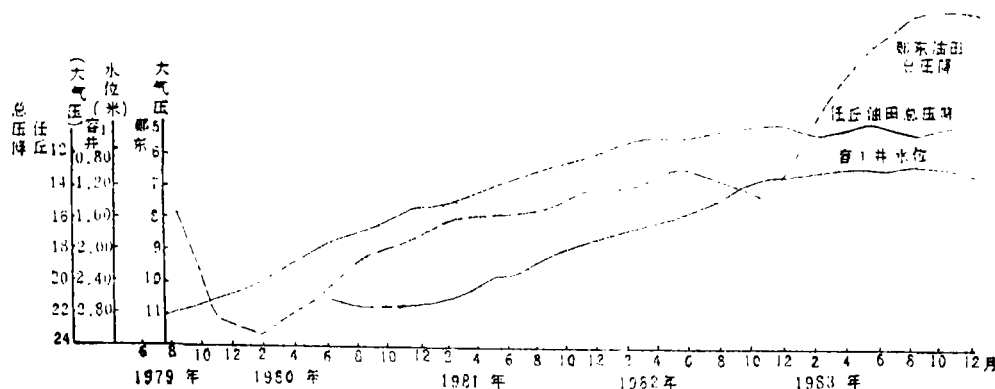


图1 容1井水位与任邱、郑东油田总压降关系曲线

二、含水层应力应变状态改变造成的水位动态(弹性动态)

1、地下水位的潮汐效应:

水位的潮汐现象,主要表现为一日两峰两谷或一峰一谷的变化,其峰谷与重力固体潮理论值的峰谷呈同步变化;水位潮差在朔、望日前后最大、上下弦最小;每日相位后移42分钟左右;水位升降变化具有半日、日、半月等周期,其中半日、日周期是主要的。地下水位的潮汐效应具有普遍性。我省井网中能记录固体潮的井孔有12个,占井孔总数的71%,水位潮差一般在10厘米左右,大于10厘米的有岳42、完县、容1、玉田和永年等井(图2)。

地球是一个弹性体,由于本身的自转和绕日、月、地公共质心运动的过程中,在引潮力的作用下,固体地球产生潮汐变形,地壳中的含水层也随之变形,从而引起孔隙水压的变化,导致测压水头变化,使井水位发生有规律性的周期性升降。井水位随引潮力的改变而变化,当井孔附近引潮力较大时,井孔处于地球潮汐椭球体的膨胀区,所以含水层的孔隙压力相对地减小,水位较低,反之亦然。太阳和月亮所引起的最大引潮力分别为 39.8克重/厘米^2 和 187.6克重/厘米^2 ,最大潮汐体应变为 3.39×10^{-3} 。目前使用的大

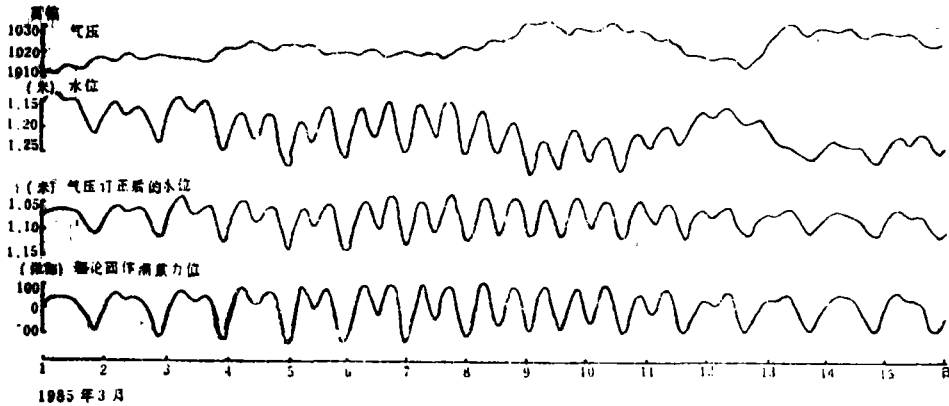


图2 永年井水位与气压、固体潮关系图

部分水位仪测量精度总的来说属毫米级,可观测到10厘米的水位潮差,故可以反映 $10^{-7} \sim 10^{-10}$ 量级的体应变,2—13克重/厘米²的潮汐应力,可见深井水位的观测效果在一定意义上讲,相当于一台地层应力计、体积应变仪和重力仪的效果。

2、地下水的气压效应:

承压水位气压效应的原因,是气压对含水层和井水面同时施加了垂向附加应力,含水层和井水间产生了水压差,而导致井水与含水层相互渗流的结果。气压升高时,井水位下降;气压降低时,井水位上升,显示出气压高低与水位升降呈反变关系的连通管效应(见图2)。水位变化一般要滞后于气压变化,滞后时间长短与井孔的气压系数有关,气压效率高的井孔,滞后时间短,一般不超过1小时,气压效率低的井孔,滞后时间长。一些气压效率高的井孔,往往对微气压变化也有明显的反应,五级以上的风可以引起水面波动,造成水位的高频波动。水位变化量与气压变化量之比谓水位的气压系数,它因井而异。一般变化在1—7毫米/百帕之间。我省井网中气压系数较大的有玉田(6.1毫米/百帕)、容1(5.2—6.2毫米/百帕)、永年(5.8毫米/百帕左右)、新泽5(7.1~7.3毫米/百帕),灰岩含水层的井孔普遍比其它岩性的井孔高。

如果将气压视为荷载作用于地面、气压附加应力在向地下传递过程中,应力要衰减,不同气压作用面积的大小、含水层的埋藏深度,井孔所处作用力的不同位置等,都将明显地影响着应力的衰减与分布,从而影响气压系数、松散岩层受气压作用后变形较大,含水层孔隙水压增量就高,井水与含水层间形成的压差就小,故气压系数低;坚硬岩层由于变形量小,孔隙水压增量低,井水与含水层间形成的压差就大,故气压系数高。井孔含水层顶板埋深愈大,气压附加应力向地下传递时衰减愈多,井水与含水层间的压差就愈大,故气压系数大。导致水系数愈大,其互相渗流量越大,故气压系数也就愈大。就同一井孔而言,气压系数随着气压变化速率、气压的平面分布而不断变化的。因此,气压系数是在一定范围内波动的一个变量。

3、地下水位的降雨荷载效应:

新泽5井在降雨后1小时之内,水位急剧上升,雨停后缓慢下降,经研究,它既不是

上游降雨后抬高水头的水压传递，也不是下游降雨水位壅高，地下水排泄受阻，更不是当地雨水入渗的结果，而是当地降雨附加应力向下传递造成的。该井含水层埋深大（2800米），封闭性好（矿化度大于10克/升、压力系数大于0.96）。水位最大上升量与降雨量的关系表现出很好的重现性和相关性，二者的比值在0.23~0.57之间，相关系数达0.98以上（图3），我省具有降雨荷载效应的井孔还有容1井。

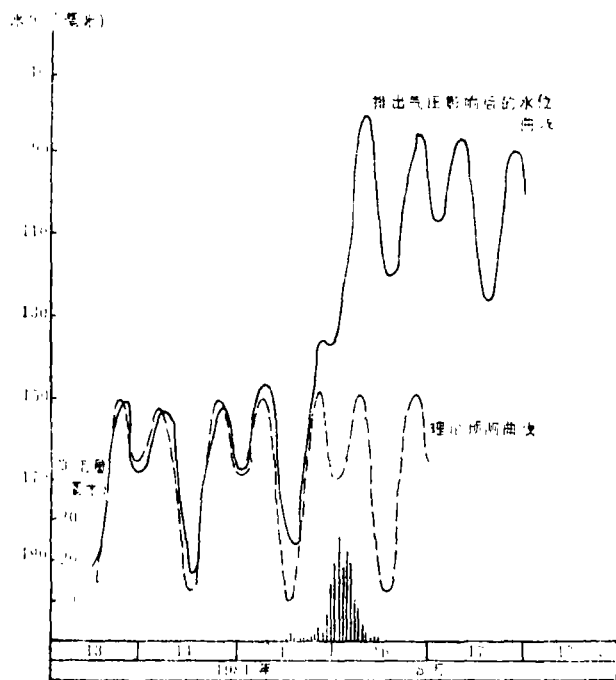


图3 降雨与排除气压后的水位曲线关系图（新泽5井）

某一集中力作用地面时，土体受的外部荷载通过颗粒的接触点向下迅速传递，随深度的增加，承压面积愈来愈大，作用在单位面积上的垂直应力逐渐减少，谓之应力的扩散。当作用有一个以上集中力时，土体中各点所受的力都可以按应力迭加原理进行计算，谓之应力的集中。在降雨荷载强度一定的情况下，地下应力的分布状况与荷载面积关系极大。在某一研究深度，荷载面积愈大，其垂直应力也愈大，当荷载面积无限大时，垂直应力将等于荷载强度。以新泽5井为例，含水层顶板埋深2800米，降雨面积

积设为 14×14 平方公里，井孔处于两区中心，降雨量100毫米（相当于 10 克/厘米^2 ），据J. 布辛奈斯克公式计算的结果是：井孔附近含水层顶板垂直附加应力为 9.6 克/厘米^2 ，角点为 2.5 克/厘米^2 。在封闭性较好的条件下，附加应力主要由水体承担，从而增大了孔隙水压，引起水位上升。然而随着应力的调整，孔隙水压逐渐转移到含水层岩石骨架上，造成有效应力的增量，而使水位缓慢下降。

4、地下水位的地震波效应：

我省井网中的岳42、山西水2、玉田、昌黎、万全、永年等井，在地震波到达时刻，水位图上清晰地记录到地震波（图4）。其主要成分为瑞雷波，振动周期在15~30秒之间，波速3.85公里/秒左右，一般说来井孔水位记录远震的效果好于近震，对于东部洋壳方向来的地震波好于西部陆壳方向来的地震波。水位波幅由几毫米至40厘米以上，最长延时可达3小时40分。记录水震波的井孔动静水位都有，以静水位记录最好，含水层埋深基本上在1000米以内，灰岩井孔记录最好（波幅大、次数多）。

井水位记录地震波的能力，主要取决于两个方面：一是井孔水位的阻尼系数与放大倍数。含水层导水系数大，水柱高度小，有利于放大倍数的提高和阻尼系数的降低；二

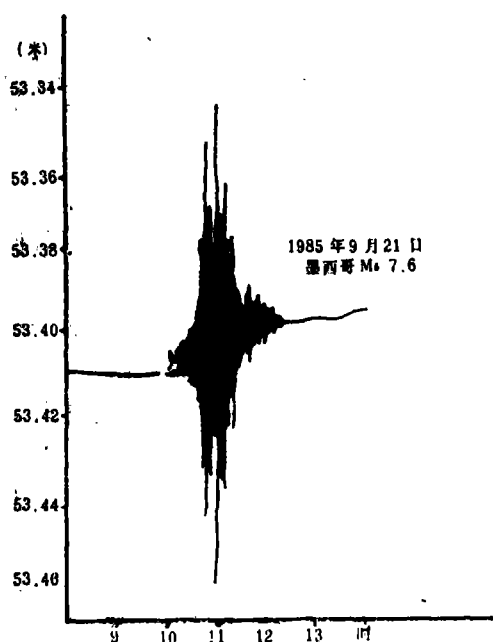


图4 山西水、井水震波图

是地震波的固有周期和井——含水层的频率特性，这实质上就是水位的频率响应能力，从而造成井水位对地震波有很强的方向性和选择性。

5、地下水位的地震效应：

地下水位的地震效应是指地震前兆异常、震时和震后效应，这是地震地下水研究的主要课题。几年来的地震预报实践和地震地下水的研究成果表明，地下水是一种很有希望的地震预报手段。从我省井网的震例总结来看，动水位观测井的映震能力好于静水位观测井。我省有动水位观测井6口，共有14个地震出现了25井次的地下水位异常。1981年河北井网建网以来，河北省境内共发生 $M_s \geq 5.0$ 级地震5次，其中唐山老震区1982年3月8日滦县北5.0、1982年10月19日卢龙

5.3、1984年1月7日滦县5.0级地震前，马17、浅牛6、昌黎井都出现了水位异常，并且昌黎井都有震时震后效应；邢台老震区1981年11月9日隆尧5.8、1985年11月30日任县5.3级地震前，马17和浅牛6井都出现了水位异常（图5、6）。

从动水位井的异常特点来看，主要有以下二点：（1）从异常形态来看，基本上是突升或突降的台阶式异常，可能是由断层蠕动引起的（图5），很容易与正常形态相区别。（2）从震中距来看，震中距较近的地震，一般震时震后效应明显（图6、7），震中距较远的地震，一般无震时震后效应。

地下水位的地震效应除了与井孔所处的地质构造、水文地质条件有关外，还与地下水位的观测方式有关，一般动水位观测井优于静水位观测井。

总之，由于含水层应力应变状态变化引起的水位升降，是地下水动态中的普遍现象。除了上述几个方面外，还有块体升降运动、矿井塌方等造成的动态。研究地下水微动态具有十分重要的意义。利用微动态的数学模型，可以推算含水层的有关参数，这不仅对水文地质学是一个重大的推进，而且为地壳动力学的研究开拓一个新的领域和途径。微动态的研究，是通向水位定量预报的基本途径，是今后必须大力加强的研究课题。

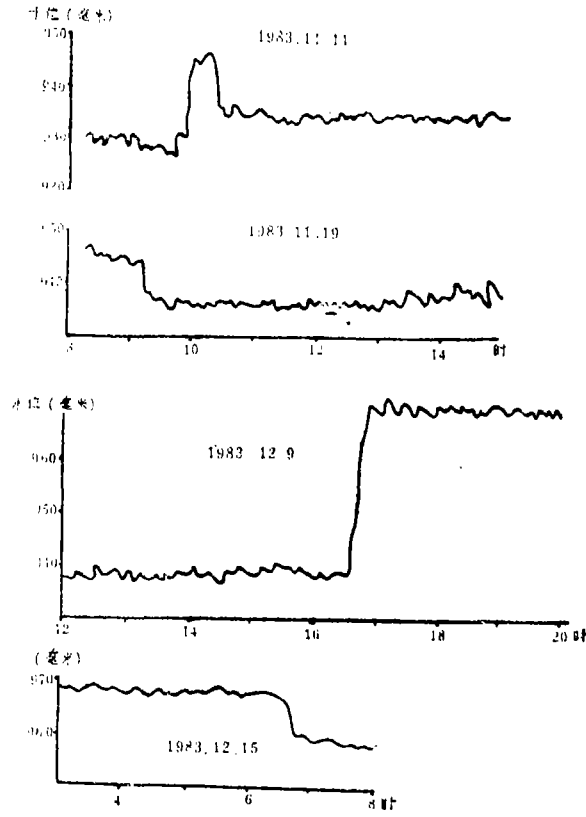


图5 滦县5.0级地震前浅牛6井水位的四次突变

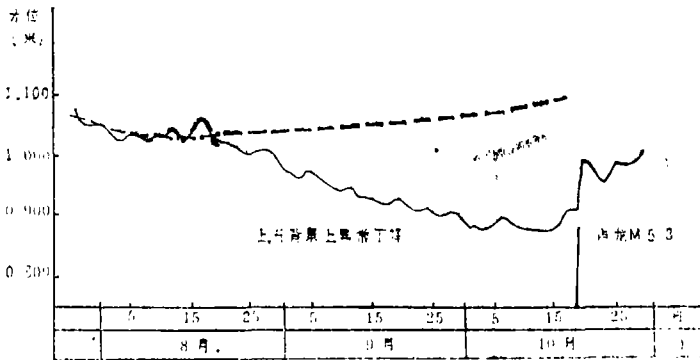


图6 卢龙5.3级地震前昌黎井水位异常变化

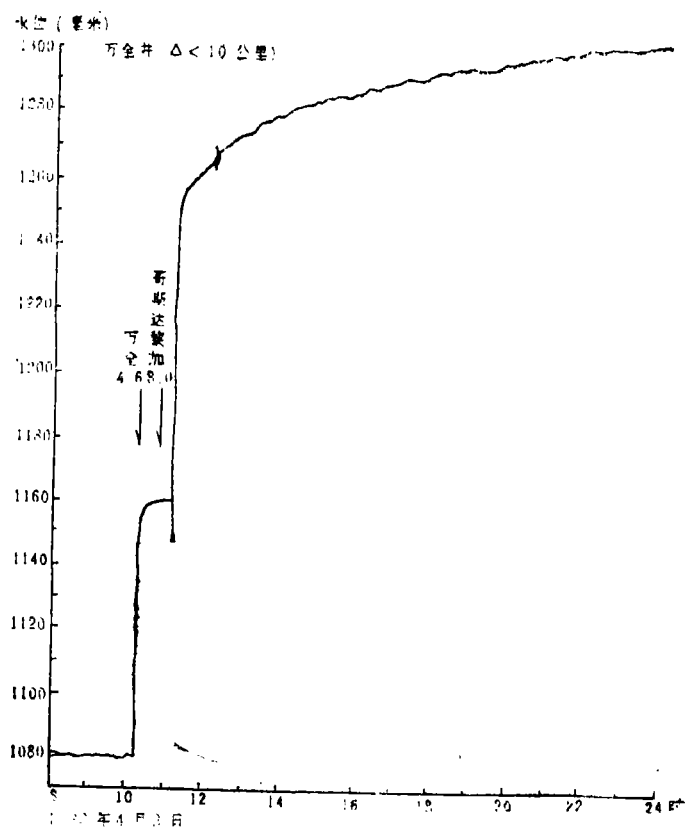


图7 万全4.5级地震万全井水位震时震后效应