

甘肃“十五”数字化水位观测资料分析及地震前兆监测效能评估^{*}

张 昱¹, 刘小凤¹, 邵辉成², 常千军¹, 康庆强¹

(1. 甘肃省地震局, 兰州 730000 2. 陕西省地震局, 西安 710068)

摘要: 通过对甘肃地区的“十五”数字化观测台网水位资料的年、月、日动态特征以及主要影响数字化水位资料的干扰因素等进行分析, 发现大多数井点的资料连续可靠, 特大地震的震后效应明显。目前数字化水位观测中存在的问题是个别井点的水位动态存在一些明显的突变和缺数。根据以往的震例总结, 年变规律明显的井点, 有可能在地震中期或中短期前兆异常监测中发挥一定的效能; 观测资料日均值月动态和时均值日动态规律明显的井点, 在地震短期或短临前兆监测中有可能发挥一定的效能。潮汐理论用于模拟观测资料的处理方法, 也可以在数字化观测资料中应用。总体来说, 甘肃地区“十五”数字化水位观测质量明显要高于“九五”台网的质量。

关键词: 数字化; 水位; 动态特征; 甘肃地区; 监测效能

中图分类号: P315.72+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2010)04-0281-07

0 引言

赋存于地壳岩体空隙中的地下水具有分布的广泛性、易流动性和不可压缩性等特征。当井和含水层系统处于封闭性良好的承压体系时, 地下水能起到灵敏测压计的作用。地下水动态是在自然、人为等多种因素的影响下, 随时间变化的复杂的物理过程。

我国地震地下水位的数字化观测已有十多年的历史(车用太等, 2002; 张立等, 2009), 并且取得了许多宝贵的观测资料和一些震例资料。国内外地震学者曾以大量的观测事实论证了水位动态不仅可以直接反映含水层受力状态变化引起的孔隙压力的变化, 而且还可以反映出含水层地下水径流的速度与流量等渗流场的变化(张素欣等, 2002; 耿杰等, 2008), 因此地下水位观测一直是地震前兆观测的重要测项(汪成民等, 1988; 王吉易等, 1997)。随着地下流体数字化观测技术的发展, 地震地下水动态技术也逐渐由模拟观测向数字化观测发展。

“九五”期间中国地震局对水位观测台网进行了数字化改造, “十五”期间中国地震局又对水位观测台网进行了改造。“十五”改造期间, 甘肃地区新增了很多井点, 这些井点已经正式运行两年多。尽管这些井点的观测资料在我们的日常预报中已经使用, 但是, 对这些资料的连续性、可靠性以及在地震预报中能发挥的前兆监测效能等没有一个整体的评估。本文对甘肃地区“十五”数字化水位观测资料做了简单的分析, 讨论了模拟观测资料的分析处理方法在数字化观测资料中的应用, 并对目前影响数字化水位观测资料动态特征的干扰因素进行了简单的分析, 对数字化水位观测的现状及其效能做了初步探讨。

1 数字化水位观测概况

“十五”期间甘肃地区地下水位数字化观测由两个项目承建, 分别为甘肃前兆台网和天祝前兆台阵, 共 7 个井点、8 个测项。前兆台网分别是武都樊坝、清水温泉、临夏(1 号井有两套不同的观测仪器); 天祝前兆台阵分别为永登莺鹑、景泰芦

* 收稿日期: 2009-11-06

基金项目: 中国地震局震情跟踪合同制定向工作任务“南北地震带北段大震危险性强化跟踪研究”、甘东南-陕甘宁地震重点危险区及邻区强震危险性分析(2010010110)项目联合资助。

阳、古浪横梁、临夏（2号井）等测点。临夏 3 个测项、清水温泉、景泰芦阳资料连续性和可靠性均很好，永登莺鸽资料可靠性很好，略有缺数；武都樊坝观测资料稍有突变；古浪横梁断记较多。总体上多数井点资料的连续性和可靠性好，可利用率较高。

水位数字化观测采用两种仪器，分别为 LN-3A型数字化水位仪和 ZKGD型水位仪，仪

器由两部分组成，一部分是水位传感器，另一部分是数字记录器。LN-3A型和 ZKGD型数字化水位仪采样率高、信息量大，人为观测误差小，不受水位埋深、井管倾斜、弯曲等观测条件限制，自动化程度高，资料传递快速，观测精度高于 SW40-1 型水位仪。表 1 给出了甘肃地区“十五”地下水位数字化观测点（井）的基本概况。

表 1 数字化水位测点基本概况
Tab 1 The basic situation of digital water level measurement points

测点名	断层	井深 /m	地下水类型	地层岩性	观测仪器
武都樊坝井	西秦岭北缘断裂	200.03	承压水	砂质泥岩	LN-3A
清水温泉井	西秦岭北缘断裂	443.8	承压水	花岗岩	LN-3A
临夏 1号井	二级阶地	200.1	承压水	砂质泥岩	LN-3A ZKGD
景泰芦阳井	断陷盆地	194.29	承压水	砂岩、石英岩	ZKGD
古浪横梁井	沟台地（峡谷中）	193.01	承压水	砂岩、砂砾岩	ZKGD
永登莺鸽井	河谷沟台地	63.00	承压水	灰岩	ZKGD
临夏 2号井	二级阶地	70.52	承压水	砂质泥岩	ZKGD

2 数字化水位观测资料的分析

井孔水位可以直接反映水压（静水压力、动水压力、渗透压力）、流速、流量、渗透介质的性质、孔隙度及渗透率等地下水动力学特征，它对岩体的任何压力（如波动、振荡、振动、潮汐）的改变都有灵敏的反映。同时井孔水位还能清楚地记录到地震波和震时应变引起的水位变化。通过观测高质量的水位数据，可以求得孕震过程中介质连续变化和各种变化阶段的特征信息。

2.1 不同观测仪器产出资料的对比

临夏 1号井中安装了 LN-3A和 ZKGD两套不同型号的仪器，2号井中安装 ZKGD型水位仪。笔者对同一口井中两套不同仪器产出的观测资料从动态特征方面进行了对比分析，结果发现，观测资料长时间的变化趋势相似，形态完全相同。短期的变化形态也基本相同，对某一天而言，同一口井中两套仪器的变化时间（分钟值或整点值）不完全同步（图 1）。笔者就这个问题请教过一些专家和仪器管理部门的人员，他们也发现了这个

问题，但真正的原因还不清楚。

另外，笔者对同井不同观测仪器的观测资料分别用日均值和整点值进行了相关分析计算，计算结果表明，日均值相关性非常好，相关系数很高；整点值个别时段相关系数较低。这与我们从观测曲线中看到的实际情况相符。

2.2 数字化水位观测资料的固体潮汐效应

模拟观测深井水位具有固体潮显示已是无可争议的事实（唐九安等，1993—1995），笔者对 2008 年以来部分井点的数字化水位观测资料进行了调和分析计算。表 2 为临夏（1号井，LN-3）、永登、清水和景泰等测点的部分计算结果。

从表 2 中可看出，临夏井点数字化水位资料潮汐因子较大且稳定，在 0.60 以上，相对误差较小；景泰井点潮汐因子在 0.30~0.40 之间，相对误差较小；清水和永登井点潮汐因子较小，但相对误差都比较小，尽管有些井点潮汐因子较小，但均比较稳定。这也说明不同井点的潮汐可能受多种因素的影响，如井的封闭性、井深等等。其余井点也均有潮汐效应，只是显现程度不同，景泰、永登、古浪 3 个井点某些时段的波形不完整。

2.3 数字化水位观测资料的震时和震后效应

地震发生对地下流体动态的影响十分显著, 孙小龙等 (2008)、刘成龙等 (2009) 对地震地下流体效应, 尤其是对地下水的效应进行过深入的研究。地震地下流体效应有两种成因机制, 一是由于地震波的传播引起; 另一种是地震破裂传播及震后应力

调整引起。地下水位的震时和震后变化, 形态上主要有两种类型, 一类是急速的阶跃变化, 这主要是近震的井水位效应; 另一类是水位的震荡变化, 又称为水震波效应。

2008 年以来全球发生多次 $M_{\geq 7.0}$ 以上地震, 笔者对水位井点的资料做了分析, 结果发现所有

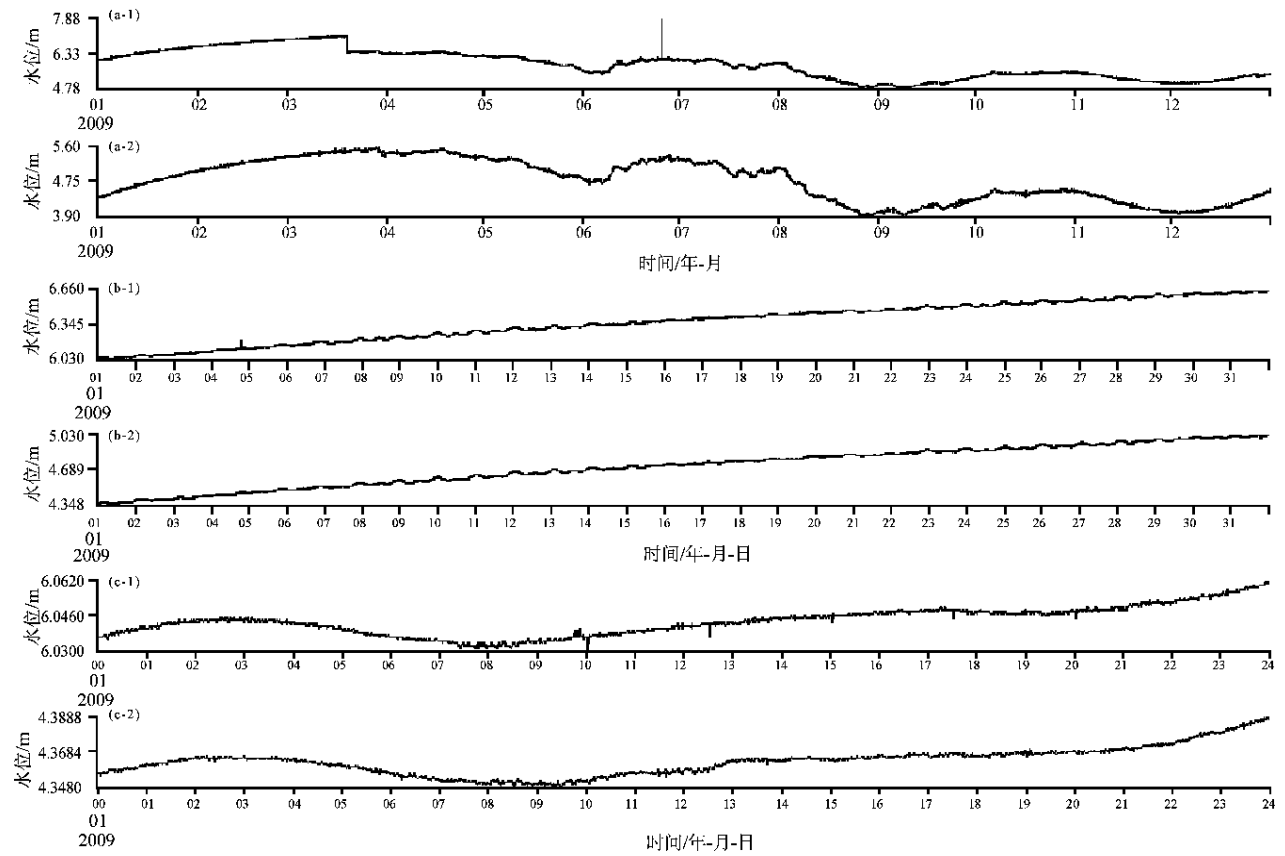


图 1 同井不同仪器不同时间尺度对比观测曲线
(a) 2009 年; (b) 2009 年 1 月; (c) 2009 年 1 月 1 日
(a-1)、(b-1)、(c-1) LN-3 (a-2)、(b-2)、(c-2) ZKGD
Fig 1 The comparison curve of different implements instruments
on different time scales at the same well point

表 2 临夏、景泰、清水、永登井点水位 M_2 潮汐因子和相对误差计算结果
Tab 2 The relative errors and tidal factors of M_2 Linxia Jingtai Qingshui and Yongdeng well points

测点	观测时间	潮汐因子	相对误差	测点	观测时间	潮汐因子	相对误差
临夏	2008 年 1 月	0.607 7	0.025 1	景泰	2008 年 5 月	0.395 9	0.012 9
	2008 年 12 月	0.604 8	0.016 8		2008 年 9 月	0.386 3	0.007 4
	2009 年 2 月	0.636 8	0.018 6		2009 年 5 月	0.369 7	0.010 7
	2009 年 7 月	0.647 4	0.045 3		2009 年 8 月	0.354 3	0.009 8
清水	2008 年 5 月	0.224 2	0.006 8	永登	2008 年 5 月	0.170 6	0.009 3
	2009 年 3 月	0.245 3	0.007 7		2008 年 9 月	0.127 4	0.006 3
	2009 年 2 月	0.114 9	0.004 8		2009 年 8 月	0.235 7	0.007 8

井点（7口井、8个测项）在2008年汶川8.0级地震时震后效应非常明显，变化形态有突变型、脉冲型和缓变型。其中武都为突升型，上升幅度较大，为3.46 m；清水为突升型，上升幅度为0.012 m；永登和景泰为脉冲型，变化幅度分别为0.000 6 m和0.005 3 m；临夏两口井3测项为缓降或突降，下降幅度分别为0.15 m

0.16 m、0.18 m；古浪为缓降或突降，下降幅度为0.414 m。而这些井点在其它大地震时震后效应并不明显。这也说明了地下水位地震波效应主要受震地点、震级等因素的影响。因为对同一口井而言，观测层的岩性、水位埋深、含水层的封闭性等不会发生变化。图2为不同井点记录到的汶川地震的震时与震后效应曲线。

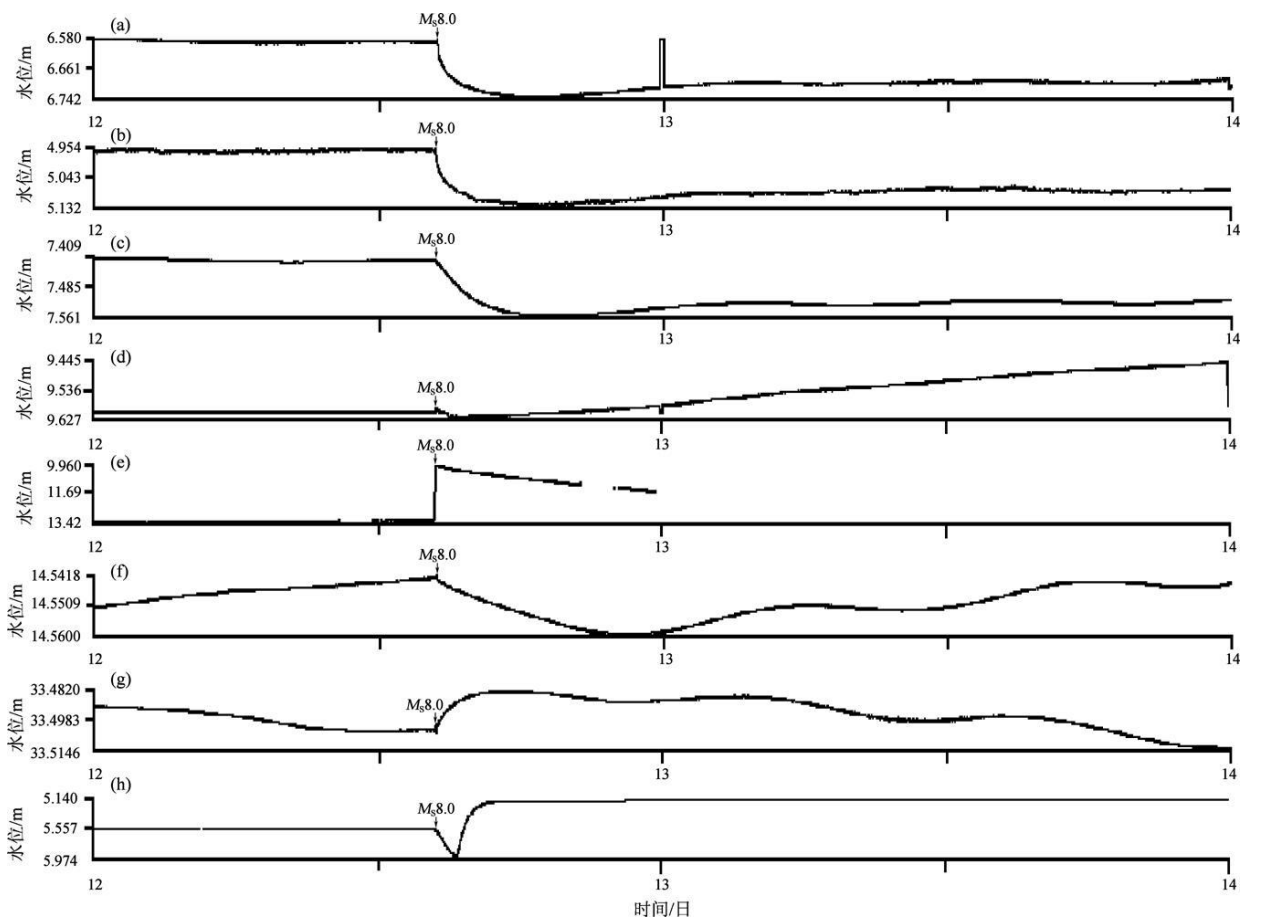


图2 不同测点记录到汶川地震的同震效应曲线
(a) 临夏 (1) LN-3 (b) 临夏 1号井 (ZKGD); (c) 临夏 2号井; (d) 清水温泉;
(e) 武都樊坝; (f) 永登; (g) 景泰; (h) 古浪
Fig 2 The coseismic curve effect of Wenchuan Earthquake at different measuring points

2.4 数字化水位观测资料的气压效应

气压变化对地下水的影响具有普遍性。气压每变化1 hPa所引起的水位变化量，称为井水位气压效率，单位为mm/hPa。它是反映井孔水位的气压效应强弱的一个重要指标。井水位的气压效率与观测层埋深、井的单位涌水量等有关。正常情况下井水位变化与气压变化之间呈负相关关系，这是由于气压增大时，井孔中

的水向含水层方向流动，导致井孔水位下降；气压减小时，含水层中的水向井孔方向流动，导致水位上升，当相关关系为正时，说明水位动态在受气压作用的同时还受到其他附加应力作用的可能，并且以其他附加应力为主。水位井点中，只有临夏和永登两个井点有比较连续的气压资料，笔者选取这两个井点的资料进行水位气压相关分析，结果见表3。

表 3 水位与气压观测相关分析结果
Tab. 3 Correlation analysis of water level and atmospheric pressure

测点	时间	相关系数	时间	相关系数
	(年—月—日 ~年—月—日)		(年—月—日 ~年—月—日)	
临夏	2008—01—01 ~2008—03—31	—0.029 0	2008—04—01 ~2008—06—30	0.226 1
	2008—07—01 ~2008—09—30	—0.504 1	2008—10—01 ~2008—12—31	—0.228 8
	2009—01—01 ~2009—03—31	—0.504 3	2009—04—01 ~2009—06—30	0.484 7
	2009—07—01 ~2009—09—30	—0.001 4	2009—10—01 ~2009—12—31	—0.113 6
永登	2008—04—01 ~2008—06—30	—0.209 4	2008—07—01 ~2008—09—30	0.419 0
	2008—10—01 ~2008—12—31	0.291 5	2009—01—01 ~2009—03—31	0.347 5
	2009—04—01 ~2009—06—30	—0.053 1	2009—07—01 ~2009—09—30	0.445 1

从表 3 可看出，这两个井点水位与气压的相关性不是很好。张淑亮等（2005）和刘国俊等（2009）认为井水位的气压效率与下列因素有关：（1）含水层的岩性和岩石的压缩系数；（2）含水层的渗透性能和岩石的导水系数；（3）观测方式。气压变化引起井孔水位变化是通过井孔和含水层间渗流来实现的。当大气压变化时，井孔中的水流与含水层中的水流产生对流，由于这两个流动过程中所受的阻力不同，其渗流量也必然不同，导致不同气压变化过程引起井水位变化量也不同，表现为不同观测井水位与气压的相关系数各不相同。即使同一观测井在不同时段也有差异。另外，由于资料时间较短，样本较少，个别时段有缺数，可能也会引起相关性不稳定（张昱等，2008）。

3 水位动态分析及地震前兆效能评估

3.1 水位年动态分析

井水位的年动态曲线是以月均值为基础绘制的。对所有井点的资料分析结果表明，多数井点的井水位表现出比较明显的年变规律。年动态以年变型为主（有年变形态的井点其井水位可能受当地的气候、水位开采以及用水量等因素的影响），也有平稳波动型。其中临夏两口井 3 个测项、永登、景泰井有明显的年变形态，清水、武都、古浪井为平稳波动型。图 3 所示为不同形态的两种年变类型。

3.2 水位月动态分析

水位月动态分析是在以日均值为基础绘制的曲线上进行的，主要分析其 1 个月的时间尺度上是否有规律可循：把渐升、渐降、平稳波动的变化作为有规律的变化标志，把无规律起伏、阶变、

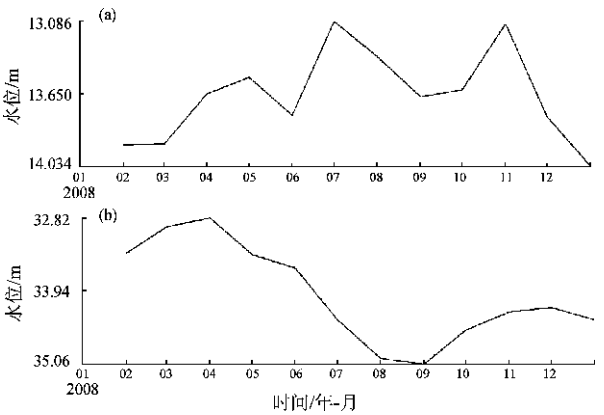


图 3 甘肃地区井水位的月均值动态类型
(a) 武都井；(b) 景泰井
Fig. 3 The monthly means dynamic type of well level in Gansu region

明显的脉冲作为无规律变化的标志。

对所有井点的资料，笔者随机选取 2008 ~ 2009 年底每年 6 个月（不同月份）的数据进行分析，结果表明，多数井点资料的月动态规律清楚，其变化形态有渐升、渐降和平稳波动 3 种类型。尽管武都和古浪两个井点有一些突变或缺数，但资料分段分析后月动态规律还是清晰的。图 4 为不同类型的月动态观测曲线。

3.3 水位日动态分析

井水位时均值日动态最显著的特征是地球固体潮汐效应，即井水位随潮汐引力的大小而升降变化。笔者对观测资料做了分析，发现 8 个测项的水位资料都能看到固体潮汐效应，只是不同井的水位潮汐显现程度不同而已。有些井点水位潮汐现象比较显著，日变幅度较大，有些较小。个别井点由于有干扰或缺数形态不是特别清晰，但资料分段使用后还是可以看出比较明显的潮汐效应。

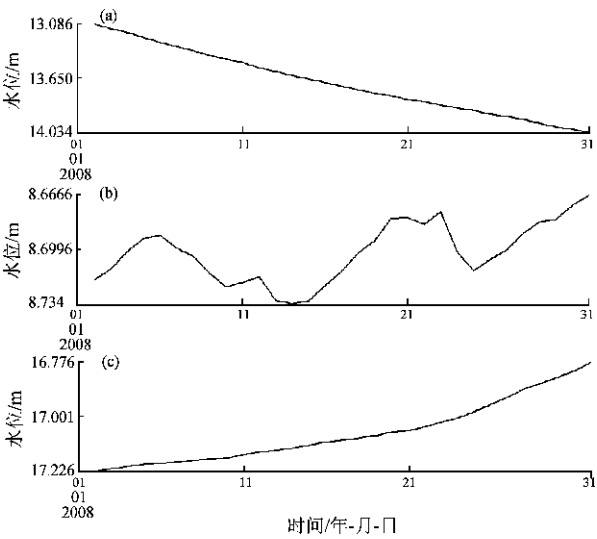


图 4 甘肃地区井水位的日均值动态类型
(a) 临夏井; (b) 清水井; (c) 永登井
Fig 4 The daily means dynamic type
of well level in Gansu region

临夏井 3 个测项日变完整, 大小波清楚, 清水和武都井点的日变也完整, 但曲线不光滑, 波动较大; 景泰井点比较完整, 部分时段比较清楚, 某些时段不是很好; 永登井点日变幅很小, 古浪井点比较完整, 部分时段变化幅度较小。

3.4 地震前兆效能评估

从前面的分析可以看出: (1) “十五”数字化水位年变规律比较清楚的井点有: 临夏 2 口井、景泰、永登; 清水、武都、古浪年变规律不清楚, 为平稳波动型。(2) 月动态有渐升、渐降、平稳波动三种类型。其中临夏两口井、永登、景泰、清水井点月动态规律比较清楚, 武都、古浪资料分段使用后基本清楚。(3) 日变规律清楚的井点为: 临夏 2 口井、清水; 武都、景泰、永登、古浪井点。

根据以上分析我们可以判断: 临夏两口井不仅能在地震的中期或中短期前兆监测中发挥一定的效能, 也能识别出地震短期前兆异常, 或者在短临前兆监测中发挥一定的效能。景泰、永登两个井点在地震的中期或中短期前兆监测中能发挥一定的效能, 也能识别出地震短期前兆异常, 有可能在短临前兆监测中发挥一定的效能。清水井点有可能在地震的中期或中短期前兆监测中发挥一定的效能, 也能在地震短期和短临前兆监测中

发挥一定的效能。武都、古浪两个井点有可能在地震的中期或中短期前兆监测中发挥一定的效能, 也可能在地震短期和短临前兆监测中发挥一定的效能 (车用太等, 2006)。

4 观测技术对数字化水位资料的影响

我们对所有水位资料进行分析, 发现观测资料主要存在两个问题, 一个是突变或脉冲变化, 另一个就是缺数。直观分析这些变化基本不属于地震前兆异常。造成这种变化的影响因素大部分是由仪器故障引起的, 主要有电压瞬间不稳、突然断电、数采器故障、传输等引起观测值的不正常变化。数字水位观测资料的脉冲、阶变等不正常变化大部分是仪器方面的原因, 由人为操作不当引起的不正常变化很少。对于这些不正常非客观的资料动态, 因其形态特征各异, 引起的原因有待进一步分析。

5 结论与讨论

(1) 甘肃地区“十五”数字化水位观测目前共有 7 个井点、8 个测项 (临夏一个井点中有两套不同型号的观测仪器)。其中有 6 个井点资料比较连续稳定, 可以直接使用, 占总数的 75%。2 个井点的资料略有干扰或缺数, 经过处理后基本可以使用。

(2) 数字化水位固体潮调和分析计算结果表明, 资料比较连续稳定的井点多数有记录固体潮汐效应的能力。只是有些井点水位固体潮汐效应比较明显, 潮汐因子较大, 相对误差较小; 有些井点潮汐因子较小, 但均比较稳定。另外, 所有井点都能观测到特大地震的震后效应。

(3) 对有气压资料的临夏和永登两个井点进行了水位气压相关分析, 结果发现这两个井点的水位气压效应不明显。

(4) 数字化水位观测中, 还需要解决以下一些问题: ① 找出水位观测资料不正常井点的原因, 确保所有观测井能够正常工作, 得到连续可靠的观测资料, 在今后的地震监测预报中发挥更好的作用; ② 井水位观测数据中, 个别井点存在一些突变或脉冲, 这是水位在地震短期和短临前兆监

测中与真正的地震前兆异常夹杂在一起时难区分的问题; ③ 还有一个特别值得重视的问题, 就是部分仪器的时钟系统可能存在问题, 因为这些仪器所记录的 2008 年汶川地震的震后效应时间超前, 是在 14 时 23 分或 24 分发生变化的, 估计是时钟系统长时间的误差或者安装仪器时时间校正不准引起的 (我们与监测中心主管人员讨论过)。④ 个别井点水位日动态规律不稳定的问题, 可能是由多种因素引起。因此要发挥“十五”数字化水位观测在地震预报中采样率高、信息量大的作用, 必须对今后更多更长时间的资料做统计分析, 加强对数字化资料的深入分析和研究, 为捕捉地震异常信息提供有效信息, 总结出更有价值, 适合数字化资料的异常提取指标和异常识别方法, 更好地为地震预报服务。

本文的计算程序由唐九安研究员提供, 并在计算中得到指导, 在此表示感谢。

参考文献:

- 车用太, 孔令昌, 陈华静, 等. 2002. 地下流体数字化观测技术 [M]. 北京: 地震出版社.
- 车用太, 赵文忠, 鱼金子, 等. 2006. 京津冀地区井水位的数字化观测

- 及其地震前兆监测效能评估 [J]. 地震, 26(4): 103—111.
- 耿杰, 陈安方, 潘双进. 2008. 无线地下流体数据监测系统水位观测数据与模拟水位观测数据一致性研究 [J]. 地震研究, 31(3): 238—243.
- 刘成龙, 王广才, 张卫华, 等. 2009. 三峡井网井水位对汶川 8.0 级地震的同震响应特征研究 [J]. 地震学报, 31(2): 188—194.
- 刘国俊, 杨海祥, 王向阳, 等. 2009. 山西流体观测井水位与气压相关性分析 [J]. 山西地震, 138(2): 7—10.
- 孙小龙, 刘耀炜, 王博. 2008. 宾川井对印尼大震的同震响应特征及其机理研究 [J]. 地震, 28(3): 69—78.
- 唐九安, 白亚平, 杨淑英, 等. 1993. 甘 06 井水位潮汐参数的震前中期异常 [J]. 地震, 13(6): 21—28.
- 唐九安, 常干军, 白亚平, 等. 1995. 甘 18 井水位观测结果与景泰地震 [J]. 地震地磁观测与研究, 16(3): 56—61.
- 汪成民, 车用太, 万迪坤, 等. 1988. 地下水微动态研究 [M]. 北京: 地震出版社.
- 王吉易, 董守玉, 陈建民, 等. 1997. 地下流体地震预报方法 [M]. 北京: 地震出版社.
- 张立, 赵洪声, 刘耀炜, 等. 2009. 云南会泽井水位与水温相关关系及其变异的地震预测意义 [J]. 地震研究, 32(3): 228—230.
- 张淑亮, 李冬梅, 范雪芳. 2005. 井水位前驱波与气压、风、降雨及强震关系的分析 [J]. 地震, 25(3): 69—77.
- 张素欣, 张子广, 刘俊明, 等. 2002. 数字化水位观测资料的应用与研究 [J]. 地震, 22(4): 89—98.
- 张昱, 钟美娇, 杨晓鹏, 等. 2008. 平凉 C11 井地下流体数字化水位观测资料的分析 [J]. 地震, 28(4): 128—135.

Analysis of the Tenth Five Digital Observation Data of Underground Water Level and Evaluation of Earthquake Prediction Efficacy in Gansu

ZHANG Yu, LIU Xiaofeng, SHAO Huicheng, CHANG Qianjun, KANG Qingqiang

(1. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

(2. Earthquake Administration of Shaanxi Province, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract

This paper analyzed the data of “The Tenth Five” digital water level measurement system. We discussed the characteristics of year-month and day digital water level and application of digital data and some main interference factors in the measurement of digital water level. It was found that the data of most well points are reliable where the post-seismic effect is very obvious. At present, the main problem in measuring digital water level is some significant abrupt shifts and omissions in individual points. Judging from previous earthquake examples, well points with obvious annual variations may have some efficiency in monitoring short-term or short-impending precursor of earthquake. The theory of tides is suitable to process the analog observation data and to process the digital data as well. In the main, the quality of digital water level observation using “The Tenth Five” system has an advantage over “The Ninth Five” system in Gansu region.

Key words: digital observation data; underground water level; dynamic characteristics; gansu and its adjacent area; earthquake prediction efficacy