

甘肃省地下水台网监测效能 及地震短临异常指标

刘耀炜 孙天林* 沈克金

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 本文系统研究了甘肃省地下水台网各井点的干扰情况, 并通过资料处理, 分析了地下水短临异常的某些特征, 讨论了其监测效能, 最后提出了该地区地震短临异常指标。

关键词: 异常识别 甘肃 地下水观测 临震异常

1 观测井资料概况

甘肃省现有国家地震局验收的地下水观测井8口, 其中有流量观测井3口, 这些水位观测井分别于1981—1984年建成并投入观测。水位观测采用SW40-1型自记式水位仪, 流量观测采用容积法定时手测。清理攻关以后, 各观测点的辅助观测项目气压、降水、气温等资料齐全。本项研究工作使用了台网中5口水位井, 3口流量井的1985年1月至1991年12月的资料。

水位观测井分别位于陇东、陇南和兰州3个地区, 流量井位于陇东、陇南地区, 各井的基本情况见表1、图1。

表1 甘肃省地下水位(流量)井概况

井号	井名	构造部位	井深 m	水位埋深 m	流量 L/s	地下水类型	辅助项目	含水层岩性	测项	始测时间
陇01	庆阳长指井	鄂尔多斯地台	225.6	30.0		孔隙承压水	气压、降水	白垩系砂岩	水位	1984-04
陇05	华亭马峡井	六盘山断裂带	255.5	3.0		裂隙承压水	气压、降水	二叠系砂岩	水位	1984-04
陇06	静宁新店井	静宁庄浪断裂带	400.8	8.6		裂隙承压水	气压、降水	志留系石英砂岩	水位	1982-10
陇12	西和邓家山	天水文县断裂带	650.0	4.8		裂隙承压水	气压、降水	泥盆系灰岩	水位	1985-05
陇18	兰州大滩井	黄河I级阶地	82.0	2.4		局部承压水	气压、降水	第四系砂砾岩	水位	1981-02
陇07	清水李沟井	清水成县断裂带	165.0	+5	0.023	孔隙承压水	气压、降水	第三系砂砾岩	流量	1981-06
陇09	礼县石桥井	礼县宕昌断裂带	268.4	+24	1.815	孔隙承压水	气压、降水	第三系含砾砂岩	流量	1981-10
陇10	成县安房井	清水成县断裂带	264.5	+18	0.039	孔隙承压水	气压、降水	第三系含砂泥岩	流量	1981-07

陇07井、陇09井、陇10井流量变化一般受降水干扰影响不大, 但与气压关系明显。如日变化与气压的相关系数分别为: $R=0.62$ (07井), $R=0.89$ (09井), $R=0.91$ (10井)。这3口流量井均能很好地记录固体潮汐波(月波与半月波), 说明其流量井对含水层孔隙压力变

* 国家地震局分析预报中心

化是灵敏的。从宏观上来看,观测井的流量均受到大面积含水层自然减压的影响,其观测值呈趋势性下降变化(07 井、10 井),通过趋势分析,可以排除这种干扰^[5]。

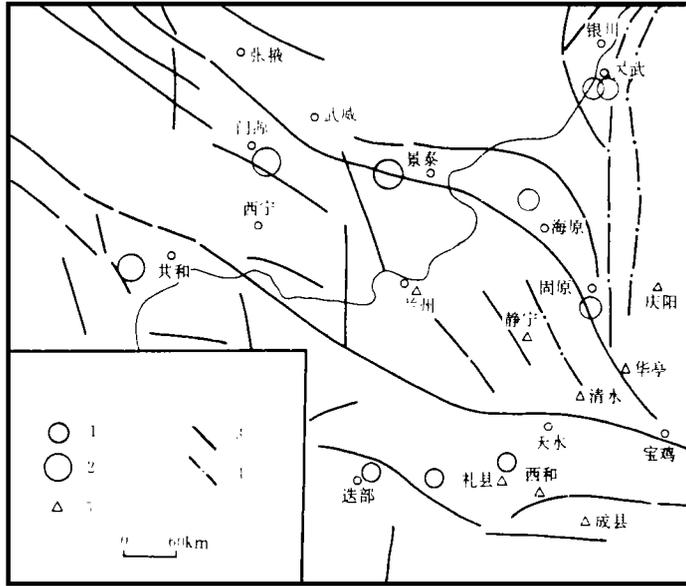


图 1 甘肃地下水台网分布、地震及区域地质构造图

- 1. $M_s=5.0-5.9$; 2. $M_s=6.0-7.0$; 3. 活动断裂;
- 4. 隐伏断裂; 5. 水位观测点

Fig. 1 Distribution of groundwater station network, earthquakes and regional tectonics in Gansu Province.

观测井的水位变化一般受降水干扰较大。其中陇 05 井、陇 12 井受降水干扰明显,短临异常可信度差,但年变形态稳定,大震前出现打破年变形态的现象。陇 01 井在 1985—1986 年中期,曾一度出现大幅度的上升与下降,1986 年 8 月门源地震后,水位大幅度升降消失,但一直呈趋势下降变化。1988 年—1990 年趋势下降转缓,1991—1992 年,水位变化趋于稳定。该井在几次 5 级以上地震前都有短临异常反映,是一口较好的地震预报观测井。陇 06 井从其观测资料与气象资料对比可见,降水对其水位的直接影响不大,但受到气压、河水流量的季节性影响,短临异常信息较弱。由于该井固体潮明显,潮差达 14 cm,其潮汐因子可作为重要的异常参考指标。陇 18 号井年变形态明显,而且相当稳定,直接受降水干扰不大,因此,其中短期异常判别标准主要看其是否打破年变。

2 单井异常判别及监测效能

根据我们对甘肃井点观测资料的处理经验,选择了 4 种数学处理方法:一阶差分、突跳频次、趋势分析和相关距平分析方法,进行单井异常识别与提取。异常对应地震的有效范围以井孔为中心对不同震级取不同半径,对 $M_s=5-5.9$ 地震取半径为 350 km,对 $M_s=6-6.9$ 地震取半径为 500 km,对 $M_s \geq 7.0$ 地震取半径为 600 km。共选择了甘肃及邻区 9 次

$M_s \geq 5.0$ 的地震,利用下述公式对每口井的异常标志的映震能力进行了计算:

$$\text{映震能力}(R) = \frac{\text{对应地震次数}}{\text{地震总次数} + \text{有异常无震次数}}$$

表2是单井异常及映震能力统计表。

表2 单井异常统计表(统计时段:1985-01至1991-12)

序号	井孔	异常标志	异常提取方法	异常指标	异常次数	有异常无震次数	异常对应地震次数	有震无异常次数	R 值
1	01井	异常转折	原始旬均值	经验	8	0	8	1	0.89
2	01井	水位阶变	一阶差分(旬均值)	1.5倍方差	9	2	7	2	0.64
3	01井	突跳加剧	突跳频次(日均值)	3次/五日	3	0	3	5	0.38
4	05井	异常转折	趋势分析(旬均值)	2倍方差	1	0	1	8	0.11
5	05井	突跳加剧	突跳频次(日均值)	2次/五日	2	0	2	7	0.22
6	06井	幅度增大	相关距平(旬均值)	2倍方差	6	1	5	3	0.56
7	06井	突跳加剧	突跳频次(日均值)	2次/五日	6	3	3	5	0.27
8	07井	幅度增大	趋势分析(旬均值)	1.5倍方差	3	0	3	4	0.43
9	07井	异常转折	趋势分析(日均值)	2倍方差	6	2	4	3	0.44
10	07井	突跳加剧	突跳频次(日均值)	2次/五日	6	2	4	3	0.44
11	09井	幅度增大	原始旬均值	2倍方差	7	1	6	1	0.75
12	10井	异常转折	趋势分析(旬均值)	2倍方差	7	1	6	1	0.75
13	10井	突跳加剧	突跳频次(日均值)	2次/五日	8	2	6	1	0.67
14	12井	突跳加剧	一阶差分(日均值)	大于0.2m	5	2	3	0	0.60
15	12井	突跳加剧	突跳频次(日均值)	3次/五日	4	2	2	1	0.40
16	18井	上升转折	相关距平(旬均值)	二倍方差	2	0	2	5	0.29
17	18井	突跳加剧	突跳频次(日均值)	2次/五日	6	1	5	2	0.63
总计					89	19	70	54	0.49

(1)庆阳陇01井:该井地下水主要由当地和山区降水补给,其水位变化受降水和气压影响不明显。该井水位观测曲线现出明显的阶段性,其异常特点表现不完全一致。1985年1月至1986年8月,该井水位出现大幅度的上升与下降,在这期间发生了宕昌 $M_s=5.0$ 地震和青海门源 $M_s=6.4$ 地震,其中门源地震的异常持续时间长达373天左右(图3a)。从1986年9月至1989年1月,该井水位观测曲线在趋势下降的背景上,出现3次阶梯状变化和1次阶跃变化(1987年3月下旬),分别对应了甘肃迭部 $M_s=5.9$ 、宁夏灵武 $M_s=5.5$ 、甘肃礼县 $M_s=5.1$ 和宁夏灵武 $M_s=5.4$ 4次中强地震(图2a,图2b)。1988年2月至1990年12月期间,水位观测曲线在平稳变化的背景上,出现了两次较大幅度的阶梯状变化异常,呈下降→转平→上升→转平形态,分别对应了宁夏固原 $M_s=5.1$ 和甘肃景泰 $M_s=6.2$ 地震(图2c)。对该井用经验来判别原始旬均值异常,其与地震对应率较高,映震能力 $R=0.89$,但缺点是无定量标准。如果用数学方法处理资料,一阶差分(旬均值)效果最好(图3e),映震能力 $R=0.64$ 。01井水位变化除呈上述趋势转折变化异常外,其突变性异常也比较丰富。

(2)华亭陇05井:该井地下水主要由六盘山降水和当地降水补给,其水位呈有规律的季

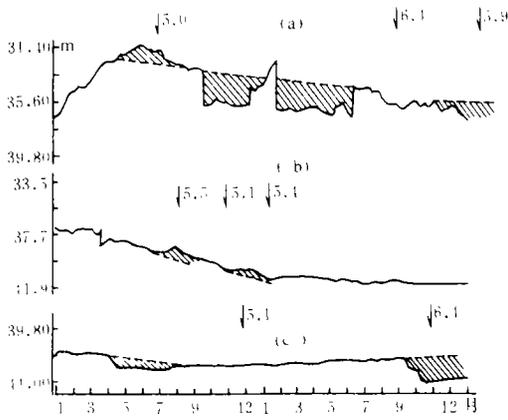


图 2 陇 01 井水位日值图
a. 1985—1986 年; b. 1987—1988 年; c. 1989—1990 年

Fig. 2 Curves of daily values of water level at Qingyang station of Gansu Province.

节变化,受降水直接影响较大,一般在 6—9 月份雨季到来时期,水位直线上升,形成很明显的年变形态(图 4)。从图 4 中可以看出,1985、1986 年其水位年变形态极为相似,但 1987 年年变幅偏低。从降水量看,1987 年 7、8、9 月与 1986 年同期大体一致,而且 1987 年 8、9 两月略有偏高,但水位值却比 1986 年下降 80 cm,这种变化可能与在其周围发生的地震有关。这种打破年变的异常,虽无定量指标,但可以作为参考。另外,在 1990 年景泰地震前该井水位上下波动加剧,与往年的单峰形态有很大不同,震后水位持续下降,年变形态破坏,这可能是大面积应力调整的结果。对该井水位资料用数学方法处理的效果不理想。

(3)静宁陇 06 井:大气降水为该井主要补给源。该井自 1983 年建成以来水位稳定,最大年变幅度小于 0.3 m,水位固体潮汐明显,可达 14 cm 左右。一般降雨对水位影响不明显,但雷阵雨有明显干扰,其潮汐曲线有明显畸变,水位的气压系数约 5 cm/hPa。由于该井位于河床

I 级阶地上,其水位变化受河水的影响,趋势异常不易识别,但用相关距平法对其旬均值作年变校正后,在 1986 年门源 6.4 级和 1990 年景泰 6.2 级地震前,水位变化呈现加速上升的

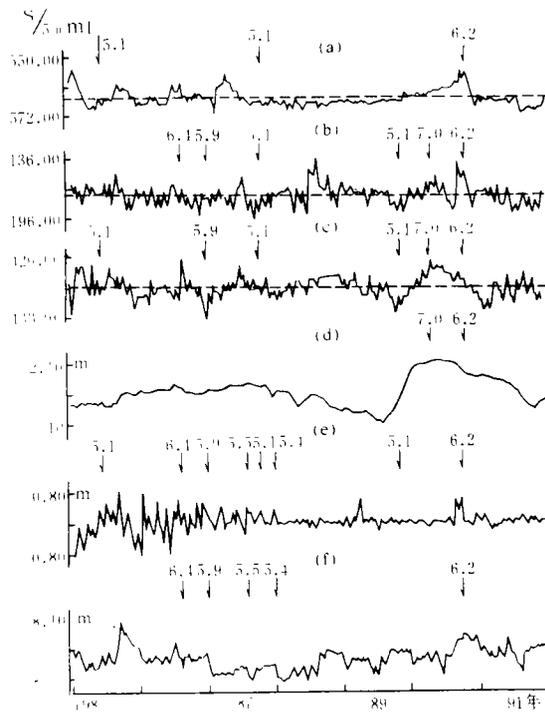


图 3 水位、流量井旬均值曲线图
a. 07 井; b. 09 井; c. 10 井; d. 18 井;
e. 01 井; f. 06 井

Fig. 3 Curves of ten-day mean values of water level and discharge wells.

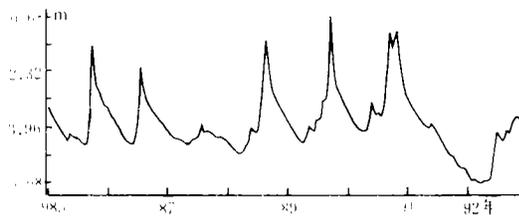


图 4 陇 05 井水位旬均值曲线图
Fig. 4 Curves of ten-day mean values of water level at Huating station of Gansu Province.

异常,并超过2倍均方差(图4f),映震能力 $R=0.56$ 。另外,其五日突跳频次,在门源地震和景泰地震前均出现了异常(图5d)。

(4)清水陇07井:该井流量较小,年变幅度不大,雨水对流量无大的影响,但由于受含水层的自然减压作用,流量呈趋势下降的变化。从其旬均值的趋势分析校正图中可以看出(图3a),在其周围发生的3次5.0级以上地震前其流量变化均有不同程度的异常显示,映震能力 $R=0.43$ 。从其日均值的突跳频次图中可以看出(图5e),有5组每五日突跳超过2次的异常,其中4次对应了5级以上地震,该方法的映震能力 $R=0.44$ 。

(5)礼县陇09井:该井地下水主要由秦岭山区降水补给,其流量较大(每秒流量在1.8升左右),流量动态变化较稳定,年变形态明显,无趋势变化,从日变曲线或从五日滑动曲线上可看出明显的潮汐月波与半月波。用旬均值的二倍均方差为控制线,出现的6次异常分别对应了6次5级以上地震,地震对应率较高(图3b),映震能力 $R=0.75$ 。其中3次6级以上地震异常出现的时间较早,持续时间较长,另外,1990年景泰地震后,其异常直到1991年底才结束。

(6)成县陇10井:该井地下水主要由当地降水和山区降水补给,其流量年变幅不大,含水层封闭条件较好。1986年在降水量大幅度减少的情况下,其流量值并没有减小,说明该井流量受降水影响不大。该井类似于07井,流量较小,呈趋势性下降变化,用趋势分析方法对其旬均值作处理,用二倍均方差作为异常控制线,其流量变化出现7次异常,分别对应了6次5级以上地震,是对应率较高的流量观测井(图3c),映震能力 $R=0.75$ 。

(7)西和陇12井:该井自1985年投入观测以来,资料不连续,1989年以后,资料才趋于正常,可信度提高。该井地下水的补给源主要是中高山区的大气降水,其水位年动态变化比较明显,与大气降水有一定关系。从1989年开始,在此期间,该井周围发

生了3次5.0级以上地震,对其资料的日均值作一阶差分 and 突跳频次处理(图5a),震前其水位变化有较明显的突变异常,但由于固原5.1和景泰6.2级地震的异常已与雨季降水干扰重叠,故其可信度受到一定影响。但共和7.0级地震前4个月(12月份前后)出现的水位突升突降异常是非常明显的。用上述两种方法处理后资料的映震能力分别为 $R=0.6$ 和 $R=0.4$ 。

(8)兰州大滩陇18井:该井地下水主要由当地和七道梁山区降水补给。大气降水和黄河径流对该井的水位变化均有一定影响,年变形态清楚,总体呈趋势下降变化,高水位出现在

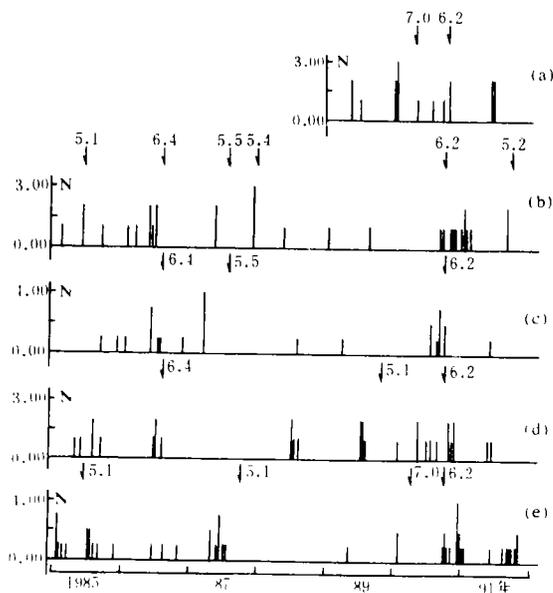


图5 水位、流量井五日突跳频次图

a. 12井; b. 18井; c. 01井; d. 06井; e. 07井

Fig. 5 Frequency of five-day sudden changes of water level and flow wells.

8—10月,低水位出现在3—4月。从1985年以来资料一直比较稳定,1989年高峰出现在12月份,从降水和黄河径流的资料分析,不是干扰所致。用其旬均值资料作趋势分析后,再作相关距平分析,得到一组相关矩平校正曲线,用二倍均方差作异常控制线,可以明显看出共和7.0级地震和景泰6.2级地震前水位变化出现长达近1年的趋势异常(图3d)。用日均值作突跳频次统计,异常与地震对应率较高(图5b)。用上述两种方法处理后资料的映震能力分别为 $R=0.29$ 和 $R=0.63$ 。

3 水位异常的判定标志与指标

根据上述单井异常特征分析及异常统计结果,得出甘肃省地下水井网震例统计表(表3)。

3.1 发震时间的异常标志

根据统计,在45井次异常中,异常结束后发震的有40次,占89%,而在异常未结束发震的有5次,占11%(表3)。异常结束后30天内发震的井次为15次,占38%;在30天至90天内发震的井次为14次,占35%;90—240天以内发震的井次为10次,占25%。由此可以推出,利用甘肃省地下水观测点异常结束时间进行发震时间的预报,在30天内发震的概率为38%,90天内发震的概率为73%,关于15天以内的临震预报,由于异常点少,无一定规律可循,但如果发生固体潮畸变或水位日变曲线突发性变化,有可能在9天左右发生5.0—5.9级中强震。

3.2 发震震级的异常标志

根据甘肃及邻区6次5.4级以上地震的异常统计(表4),可以看出,平均异常持续时间与地震震级的对数关系为: $\log T = -4.6 + 1.01 M_s$,异常出现的最早时间与震级的对数关系为: $\log T = -1.94 + 0.7 M_s$ 。可以利用上述公式推算出震级大小。一般来说,7.0级地震的异常持续时间为11个月左右,6.0级地震的异常持续时间为4个月左右,5.0级地震的异常持续时间在1个月内。而一个7.0级地震最早异常出现在震前20个月左右,6.0级地震最早异常出现在震前14个月左右,5.0级地震最早异常出现在震前4个月左右。另外,利用9次地震异常分布的最大范围 L (km)与震级的关系(数据略),求出它们之间的统计公式:

$$M_s = -3.25 + 3.49 \log(L) (r = 0.751)$$

从上述公式可以推出,一个7.0级地震的最大异常范围半径为700 km左右,一个6.0级左右地震的异常范围半径为450 km左右,一个5.0级地震的异常范围在250 km左右。

3.3 发震地点的异常标志

由于甘肃省地下水点集中分布在甘肃东部一带,而3次6.0级以上的强震均发生在甘肃西部,其震中地区异常特征无法统计,对于5.0—5.9级中强震,一般来说异常点分布在断裂带上,震中区异常井点较集中,但在构造带上的井点异常更明显。具体来说,甘肃省地下水点对南北地震带上的5.0—5.9级地震均有较好的对应能力。

3.4 异常的“同步性”与预报的成功率

甘肃省水位观测井大部分位于南北地震带北段,由于受区域应力场的统一作用,尽管各井点异常强度不同,但从异常的起始时间统计结果可以看出,起始异常的“时间差”在1—2个月内,空间展布集中于250 km范围内的“同步”变化异常比较明显,以此作为短临前兆异

表3 震例统计表

序号	地震	异常井孔		异常起始时间		异常转折时间		异常持续时间	异常形态	异常精度
		井孔	震中距(km)	日期	距发震(天)	日期	距发震(天)			
1	1985-06-24 甘肃宕昌 M _s =5.0	01井	388	1985-06-16	8	1985-06-16	8	1	时值水位突降 趋势上升下降 上升下降转平 上升下降	0.2m
		01井	388	1985-01-01	175	1985-06-20	4	172		4.2m
		07井	190	1985-01-30	145	1985-02-10	134	12		6s
		10井	120	1985-01-10	165	1985-05-31	24	142		7s
2	1986-08-26 青海门源 M _s =6.4	01井	580	1985-09-20	340	1986-01-20	218	123	上升下降两次 上下突变 上升转平 上升下降上升 上升下降转平 突跳频次增大	4.0m
		01井	580	1986-06-10	77	1986-06-12	75	3		1.5m
		07井	510	1986-06-28	59	1986-09-05	-10	69		12s
		07井	510	1985-09-10	350	1986-07-20	37	314		12s
		09井	480	1985-08-10	381	1985-12-20	249	133		35s
		18井	285	1986-06-01	87	1986-07-01	57	31		2次
3	1987-01-08 甘肃迭部 M _s =5.9	01井	430	1986-10-20	80	1986-12-31	8	73	下降上升下降 突跳频次增大 上升下降上升 突跳频次增大 上升下降 突跳频次增大	2.0m
		06井	285	1986-12-20	19	1986-12-25	14	6		2次
		07井	300	1986-06-28	194	1986-09-05	125	70		12s
		09井	190	1986-10-10	90	1986-10-15	85	6		2次
		10井	240	1986-08-01	161	1987-01-01	8	154		10s
		10井	240	1986-08-01	161	1986-10-10	90	72		2次
4	1987-08-10 宁夏灵武 M _s =5.5	01井	265	1987-03-11	152	1987-03-20	143	10	突跳频次增大 下降上升下降 上升下降转平 突跳频次增大 突跳频次增大 水位突降	4次
		01井	265	1987-03-15	148	1987-03-20	143	6		1.5m
		01井	265	1987-07-10	31	1987-08-05	5	27		1.0m
		10井	490	1987-05-25	77	1987-06-20	51	27		2次
		18井	325	1987-05-15	87	1987-05-20	82	6		2次
		18井	325	1987-05-19	83	1987-05-20	82	2		0.09
5	1987-10-25 甘肃礼县 M _s =5.1	01井	320	1987-03-11	228	1987-03-20	219	10	突跳频次增大 突跳频次增大 上升下降转平 上升下降转平 上升下降转平 突跳频次增大	4次
		07井	120	1987-04-20	188	1987-08-30	57	132		2次
		07井	120	1987-07-15	192	1987-07-31	87	16		20s
		09井	震中	1987-06-01	147	1987-09-10	45	103		15s
		10井	75	1987-06-05	143	1987-09-20	35	109		10s
		18井	240	1987-05-08	170	1987-05-15	163	8		2次
6	1988-01-04 宁夏灵武 M _s =5.4	01井	265	1987-12-11	24	1987-12-16	19	6	突跳频次增大 下降上升	4次
		18井	325	1987-12-15	20	1987-12-20	15	6		0.1m
7	1989-11-20 宁夏固原 M _s =5.1	01井	140	1989-10-25	26	1989-10-25	26	1	时值水位突降 下降转平上升 上升下降转平 下降上升	0.1m
		01井	140	1989-03-31	235	1989-07-20	123	112		0.1m
		09井	225	1988-06-20	518	1989-12-30	-40	558		40s
		10井	260	1989-01-01	323	1989-10-31	21	303		20s
8	1990-04-26 青海共和 M _s =7.0	09井	520	1988-06-20	675	1989-12-30	117	559	上升下降转平 下降上升 突降上升 突跳频次增大 上升转平	40s
		10井	585	1989-01-01	481	1990-04-30	-4	485		6s
		12井	560	1990-03-20	37	1990-04-20	6	32		1.0m
		12井	560	1989-12-25	122	1990-01-03	113	10		3次
9	1990-10-20 甘肃景泰 M _s =6.2	18井	340	1989-09-01	238	1990-03-10	47	191	上升下降转平 突跳频次增大 突变上升 趋势上升 下降上升 上升转平	1.5m
		01井	410	1990-09-08	42	1990-10-09	11	32		2.0m
		01井	410	1990-07-26	86	1990-10-10	10	77		1次
		07井	360	1990-10-01	20	1990-10-20	0	21		6s
		07井	360	1990-04-05	198	1990-11-15	-26	224		12s
		09井	355	1990-09-01	50	1990-11-30	-41	91		50s
18井	340	1989-09-01	415	1990-03-10	224	191	1.5m			

表4 水位最早异常起始时间和平均异常持续时间与震级关系($\log T = a + bM_s$)

地震	平均异常持续时间		最早异常时间		相关分析	
	T(天)	log(T)	T(天)	log(T)	平均持续时间	最早异常时间
共和 7.0	323	2.51	675	2.83	r=0.938, 大于信度为 0.01 的 r 值(0.735) a=-4.60 b=1.01	r=0.826, 大于信度为 0.01 的 r 值(0.735) a=-1.94 b=0.70
门源 6.4	210	2.32	381	2.58		
景泰 6.2	146	2.16	415	2.62		
迭部 5.9	59	1.77	194	2.29		
灵武 5.5	17	1.23	184	2.27		
灵武 5.4	6	0.78	24	1.38		

常的判断指标,可以排除无震异常的干扰,对提高地震的预报成功率是极为重要的。

本项工作得到了王长岭研究员的帮助和指导,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- 汪成民,车用太,万迪坤,董守玉. 地下水微动态研究. 北京:地震出版社,1988
- 汪成民,李宜瑚,王铁成,贾化周,车用太. 中国地震地下水动态观测网. 北京:地震出版社,1990
- 王长岭,刘耀炜,陶淑芬. 水化单点异常指标的判定方法. 地震预报方法实用化研究文集(水位水化专辑). 北京:地震出版社,1990
- 刘耀炜. 地震水文地球化学干扰因素的定性分析与定量排除方法. 地震预报方法实用化研究文集(水位水化专辑). 北京:地震出版社,1990
- 孙天林,刘耀炜. 甘肃井网的流量观测及震例分析. 内陆地震,1991,5(4):317—323

THE MONITORING ABILITY OF GROUNDWATER STATION NETWORK IN GANSU AND ITS SHORT-IMPENDING ANOMALY INDICES

Liu Yaowei, Sun Tianlin and Sheng Kejin

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000)

Abstract

This paper systematically studies the interference of groundwater station network in Gansu Province, analyses the some characters of groundwater short-impending anomalies, discusses its monitoring ability to mid-strong earthquakes, and suggests some seismic short-impending anomaly indices for this region.

Subject words: Anomaly recognition, Gansu Province, Groundwater observation, Impending earthquake anomaly