

甘肃模拟水位资料处理方法研究及映震效能评估*

王燕¹, 杨兴悦², 陈雪梅¹, 周建强², 丁宏¹, 次卓嘎³

(1. 甘肃省地震局 天水中心地震台, 甘肃 天水 741020; 2. 甘肃省地震局 武山地震台, 甘肃 武山 741308
3. 西藏自治区地震局, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 利用从属函数、变差率和趋势速率方法提取甘肃模拟水位观测资料的地震前兆异常。结果表明: (1) 1987年1月至2011年9月, 4项水位资料共出现31次从属函数异常、29次变差率异常和23次趋势速率异常。其中, 22次从属函数异常、21次变差率异常和14次趋势速率异常很好地对应了甘肃及邻区 $M_s 5.0$ 以上地震。通过分析异常特征及其与地震的关系, 提出中强地震时间预测的指标与方法, 得出甘肃模拟水位从属函数计算的经验常数以及变差率和趋势速率的异常阈值; (2) 用从属函数、变差率和趋势速率方法定量提取异常结果较为理想, 通过对异常识别方法的效能评价, 得到的 R 值均大于 R_0 值, 表明该方法信度至少为97.5%, 说明3种方法具有实效性。

关键词: 模拟水位观测; 从属函数; 变差率; 趋势速率; 前兆异常

中图分类号: P315.723 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2013)01-0024-10

0 引言

我国地下流体观测网是根据大震现场的监测预报需要发展起来的地震前兆观测系统, 目前, 我国地震地下流体前兆观测已进入了全面现代化的新阶段, “九五”、“十五”项目期间国家投入大量资金对地下流体观测技术系统进行了改造和新建, 其目的是为了提高观测资料内在质量, 使地下流体观测资料在我国地震预测实践中起更大的作用。水位观测也不例外, 随着“九五”、“十五”的改造, 模拟水位观测逐渐被数字化水位观测所取代。甘肃陇01、05、06、18井水位从20世纪80年代开始观测, 2011年10月被数字化水位仪替代。通过对数字与模拟水位观测资料的对比分析, 认为其动态变化特征一致, 与固体潮的相关系数也基本一致, 数据的相关性及内在质量良好, 映震能力相当, 数字化水位仪器可以取代模拟水位观测仪器(耿杰等, 2001; 吴敏, 赵爱平, 2002; 解晓静, 2010; 杨玲英, 毛先进, 2011)。甘肃模拟水位虽然被数字化仪器替代, 但资料还是连续的, 由于这些模拟观测数据观测时间长, 观测期间积累了一些非常宝贵的数据与震例, 有着非常

重要的价值。

甘肃处于青藏块体的东北缘, 祁连山地震带和南北地震带横穿其境内, 是我国大陆强震活动的主要场所之一, 历史上曾发生过多次强烈地震, 现今地震活动仍很频繁。该区域地震的主要特点是震源浅、强度大、危害性强、频度高。甘肃地形狭长, 流体测项多, 但大多数测项都集中在甘肃东部, 模拟水位更是全部集中在甘肃东部, 观测资料连续率高, 多次在地震预测中得到应用。

甘肃模拟水位观测井有着非常好的地球物理环境, 观测资料积累时间长、连续、可靠, 为了更好地利用所产出的大量数据, 笔者对模拟水位资料进行系统分析, 总结出适合甘肃模拟水位的分析方法, 对于方法的研究, 主要考虑用数学方法定量提取异常, 这样可以减少人为“看图识字”方法的影响, 而且提取出的异常明显。

1 甘肃模拟水位测点概况

甘肃模拟水网观测是根据监测预报的需求较早成规模发展起来的地震前兆观测系统, 1985年前后在甘肃地区建立了16个观测点, 主要观测项为水位和流量。随着地震事业的不断发展, 一些

* 收稿日期: 2012-02-13.

基金项目: 中国地震局“三结合”基金项目(2011042)资助.

内在质量不好的观测点在清理时被停测，另外一些观测点的模拟水位仪在“九五”、“十五”期间被数字化仪器替代。观测时间较长的模拟水位观测井有陇 01、05、06、18 井，测点主要集中在甘肃东部（图 1），这几口井从 1981 年 2 月至 1984 年 4 月陆续开始观测。因此笔者选用 1985 年 1 月以来的模拟水位资料作为研究对象，并对各测点概况进行简要介绍。

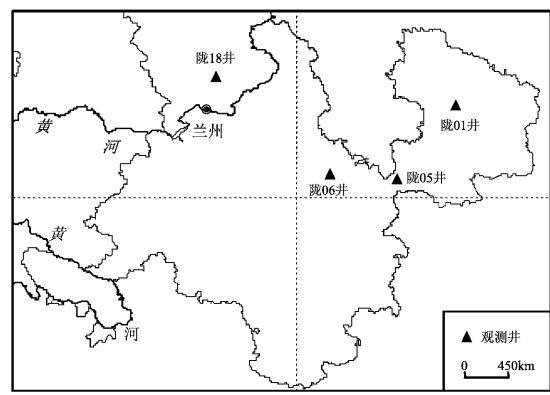


图 1 甘肃模拟水位监测台分布图
Fig. 1 Distribution of analogue water level monitoring stations in Gansu Province

陇 01 井位于鄂尔多斯地台，庆阳县黄土梁塬地区。该井原为长庆油田测井公司的试验井，井深 221.61 m，套管深 52.70 m，观测层为 52.70 m 以下的白垩系砂岩，为孔隙承压水，水位埋深约 38 m，降水对水位无影响。该井于 1984 年 4 月开始观测。

陇 05 井位于华亭马峡井，六盘山断裂带东侧。井孔处于山间狭窄河谷的一级阶地上，与河床水平距离约 20 m，高出河水面约 3 m。井深 225.5 m。含水层为上元古界白云岩岩溶裂隙承压水层，降水对水位有影响。该井于 1982 年 7 月开始观测。

陇 06 井位于甘肃省静宁县，井深 401 m，水位埋深 8 m 左右。井水为志留系砂岩裂隙承压水，上覆地层为不良透水性的第三系砂质泥岩，其厚度为 33 m（唐九安等，1993）。该井于 1982 年 10 月开始观测。

陇 18 井位于兰州市七里河区崔家崖大滩，所处构造部位为兰州断陷谷地黄河南岸 I 级阶地，地层为第四系河床相沉积，井深 82 m。观测含水层为 45 m 以下的砂砾石层，在 18 m 以下含砂量增

高，并夹有薄层粘性土，局部呈半胶结状态，井水位埋深约 12 m。地下水主要由兰州市南七道梁山区降水补给，地下水类型为局部承压水（唐九安等，1995；张新基等，2005）。该井于 1981 年 2 月开始观测。

2 地震目录的选取

考虑本区地震活动的周期性和强度起伏的特点，选取距测点 700 km 内的甘肃及其邻区 5 级以上地震作为研究对象。关于前兆资料映震能力范围，许多学者进行过研究总结，由于各测点地质结构的复杂性和地震震源机制等的不确定性，一些学者给出了前兆资料映震能力大概的定量范围，这些定量范围更多的是定性成份。因此笔者分别选取震中距小于 700 km 的 8 级地震，震中距小于 500 km 的 7 级地震，震中距小于 400 km 的 6 级地震，震中距小于 300 km 的 5 级地震。相邻两次地震时间间隔小于 10 个月的，只统计发生较早的地震，同一地震对不同测点的震中距是不同的，因此按测点的震中距进行筛选地震。遵循上述原则所选出的地震目录及震中距参数见表 1。

3 中短期异常提取方法

甘肃模拟水位资料观测时间较长，所有观测数据都在 26 年以上，观测资料连续可靠、内在质量高，有些测点资料在邻近地区发生的中强地震前出现了明显的短临异常，大致表现为水位测值下降一发震一回升。但是大多数中强地震发生前水位测值都会出现趋势性变化，这种趋势性变化在有些地震前非常明显，在有些地震前不是特别突出。不管趋势性异常是否明显，如果都是用传统的“看图识字”方法来判断，这在很大程度上带来了一些不确定性，无法定量给出异常开始时间、结束时间及异常变化幅度。为此，笔者采用定量方法来提取水位资料的中短期异常。中国地震工作者在 20 世纪 70 年代就提出了长、中、短、临渐近式预报思路，认为长期异常预报时间为几年至二三十年，中期异常预报时间为一年至数年，短期异常预报时间为数月内，临震异常预报时间为几天至十几天（张国民等，2001）。

表 1 1987 ~ 2011 年甘肃及邻区发生的 $M_s \geq 5.0$ 地震参数
Tab. 1 Parameters of $M_s \geq 5.0$ earthquakes from 1987 to 2011 in Gansu Province and its adjacent regions

编号	发震时间 /年-月-日	震中位置			震级 M_s	震中距/km			
		$\varphi_N/ (^{\circ})$	$\lambda_E/ (^{\circ})$	地点		陇 01 井	陇 05 井	陇 06 井	陇 18 井
1	1987-01-08	34.17	103.23	甘肃迭部	5.9	(443)	324	243	269
	1987-08-10	38.05	106.28	宁夏灵武	5.5	231	312	312	278
2	1990-04-26	36.06	100.33	青海共和	7.0	(638)	(566)	(474)	313
	1990-10-20	37.12	103.63	甘肃天祝	6.2	354	332	261	64
3	1991-10-01	37.80	101.40	青海门源	5.2	(565)	(538)	(458)	251
4	1994-01-03	36.10	100.10	青海共和	6.0	(658)	(588)	(495)	332
5	1995-07-22	36.50	103.00	甘肃永登	5.8	398	346	261	68
6	1996-06-01	37.20	102.90	甘肃天祝	5.4	(419)	(390)	313	106
7	2000-06-06	37.10	104.00	甘肃景泰	5.9	322	306	240	65
8	2003-10-25	38.40	101.20	甘肃民乐	6.1	(603)	(589)	(514)	306
	2003-11-13	34.72	103.90	甘肃岷县	5.2	363	248	163	212
9	2006-06-21	33.10	105.00	甘肃文县	5.0	(409)	277	251	(400)
10	2008-03-30	38.00	102.00	甘肃肃南	5.0	(522)	(506)	(432)	224
	2008-05-12	31.00	103.40	四川汶川	8.0	687	555	518	618
11	2009-09-19	32.80	105.60	陕西宁强	5.1	(412)	285	280	(450)

注：表中带括号数字表示震中距超过映震范围，不在本文中讨论。

兴悦等（2006，2011）曾利用从属函数、变差率、趋势速率方法提取了甘东南水氡资料的中期异常，得出了较为理想的结果，因此在本文中也引入该方法，通过分析比较笔者认为用水位 13 点滑动平均值作为数据序列计算的效果较好，其效果明显优于直接使用月均值提取异常。异常判定方法见表 2。

表 2 中短期异常判定方法表
Tab. 2 Anomaly judgment methods in middle-short term

方法	使用数据	信息参数计算		异常判定指标
		计算式	特定要求	
从属函数	月均值的 13 点滑动平均值 M_i	$\mu_i = \left[1 + \frac{\alpha}{ k_i r_i } \right]^{-1}$	求曲线上升段的从属函数，拟合窗口长度 $m = 9$	$\mu_i > 0.5$
变差率	月均值的 13 点滑动平均值 M_i	$\overline{R}_i = \frac{\overline{C}_i - \overline{C}_{i-12}}{\overline{C}_{i-12}}$		$R_i > \text{均值}$
趋势速率	月均值的 13 点滑动平均值 M_i	$Y = a + bX$	拟合窗口长度为 13	$V_i > 0.5$

注：（1）在计算式中， k_i 为观测值变化斜率； r_i 为与 k_i 相应的相关系数； α 为经验常数； R_i 为变差率； \overline{C}_i 和 \overline{C}_{i-12} 分别为水位月滑动平均值和一年前同月的值； V_i 为趋势速率。（2）从属函数、变差率、趋势速率的计算值全部放在右端点上。

4 模拟水位资料中短期异常分析

文中所选的 4 口井资料都出现过不同程度的人为干扰，人为干扰系指仪器故障、台站改造、无

规律抽水等引起的台阶变化。在资料处理中，对人为干扰引起的台阶状变化进行校正，校正后的月均值曲线如图 2 所示。本文将预报时间（表 3 中的超前时间）在 1 个月至 3 年定义为中短期异常。异常持续时间在 2 年以内，可对应 5.5 级以下地

震；异常持续 3 年以内，可对应 5.5 级以上地震；异常时间超过 3 年视为不对应地震；震后 3 个月内在有效震中距范围内出现异常视为震后效应。

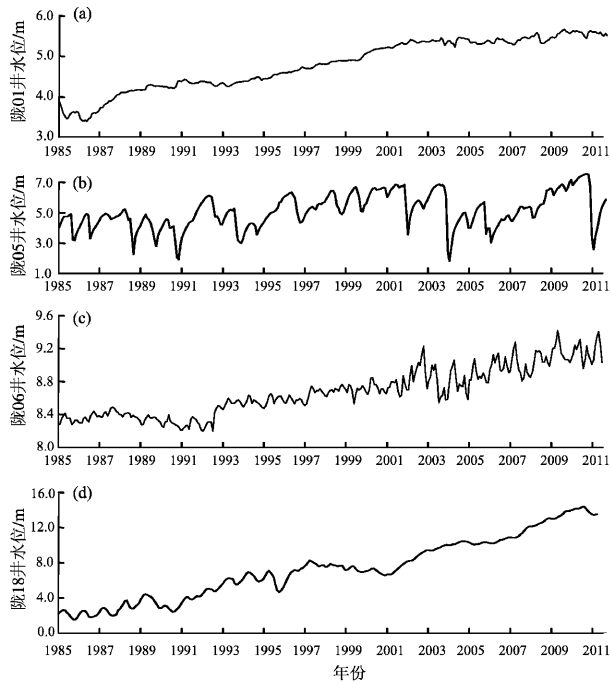


图 2 甘肃模拟水位月均值曲线

Fig. 2 Month mean values curves of analogue water level in Gansu Province

4.1 从属函数中短期异常特点

笔者用从属函数法分析 1985 年 1 月至 2011 年 9 月甘肃东部 4 个水位测项的观测资料，结果表明：统计时段内共出现 31 次异常（图 3），其中 22 次异常很好地对应了表 1 中所列的 5 级以上地震。发生了地震而没有出现异常就算漏报，共 10 次；出现了异常而没发生地震属虚报，共 9 次。中短期异常特征列于表 3。通过对甘肃模拟水位资料的研究，得出从属函数中短期异常的特点：

- (1) 异常持续时间：最短为 1 个月，最长为 24 个月，平均为 9.1 个月。
- (2) 异常超前时间：最短为 1 个月，最长 31 个月，平均为 12.0 个月。
- (3) 在异常持续过程中发生地震 8 次，异常结束后发生地震 14 次。
- (4) 异常变幅：最小为 0.51，最大为 0.79，平均为 0.61。
- (5) 异常对应率为 71.0%，漏报率为 31.3%，虚报率为 29.0%。

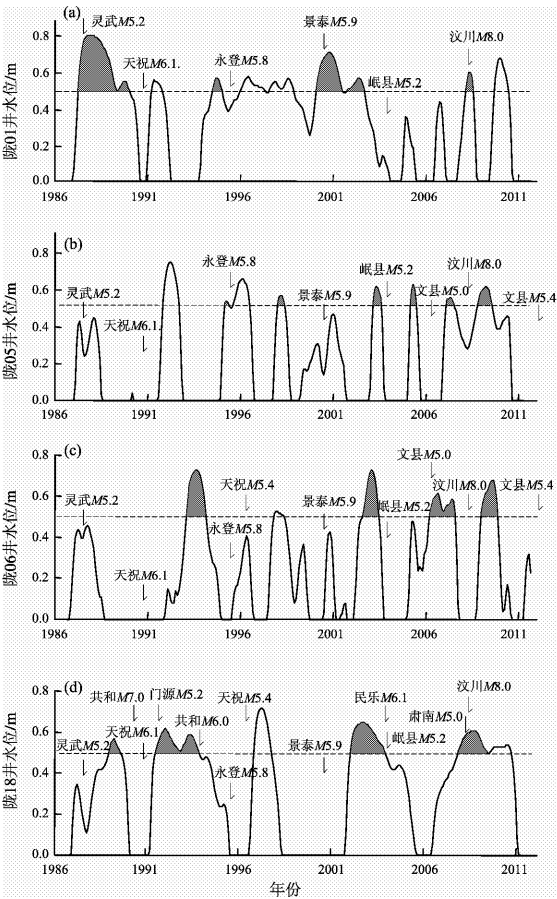


图 3 甘肃模拟水位从属函数异常曲线

Fig. 3 Abnormal curves of subordinate function of analogue water level in Gansu Province

4.2 变差率中期异常特点

笔者用变差率方法分析了 1985 年 1 月至 2011 年 9 月甘肃 4 个测点的模拟水位观测资料，统计结果表明：共出现 29 次异常（图 4），其中 21 次异常很好地对应了甘肃及邻区 5 级以上地震。漏报 11 次，虚报 8 次。中期异常特征见表 4。通过对甘肃东部地下流体资料的研究，总结出甘肃模拟水位变差率中短期异常的特点：

- (1) 持续时间：最短为 1 个月，最长为 43 个月，平均为 18.2 个月。
- (2) 超前时间：最短为 0 个月，最长 31 个月，平均为 9.3 个月。
- (3) 在异常持续过程中发生地震 15 次，异常结束后发生地震 6 次。
- (4) 异常变幅：最小为 0.5%，最大为 62.6%，平均为 13.4%。
- (5) 异常对应率为 72.4%，漏报率为 34.4%，虚报率为 27.6%。

表 3 甘肃模拟水位从属函数中短期异常特征统计表

Tab. 3 Anomaly feature statistics of subordinate function of analogue water level in middle-short term in Gansu Province

测点名称	序号	异常时间				异常最大变幅	经验常数 μ	对应地震		
		开始 /年-月	结束 /年-月	持续时间 /月	超前时间 /月			时间/d	震级 M_s	震中
陇01井	1	1987-05	1989-05	24	3	0.79		1987-08-10	5.5	宁夏灵武
	2	1989-07	1990-01	6	15	0.54		1990-10-20	6.2	甘肃天祝
	3	1991-04	1991-10	6	—	0.55		超出震中距范围		
	4	1994-08	1995-01	5	11	0.56		1995-07-22	5.8	甘肃永登
	5	1996-02	1997-04	12	—	0.57		超出震中距范围		
	6	1997-09	1998-03	6	—	0.54	0.09	无地震发生		
	7	1998-05	1998-12	7	—	0.56		无地震发生		
	8	2000-03	2001-07	16	3	0.70		2000-06-06	5.9	甘肃景泰
	9	2002-01	2002-09	3	22	0.56		2003-11-03	5.2	甘肃岷县
	10	2008-04	2008-08	4	1	0.59		2008-05-12	8.0	四川汶川
	11	2009-10	2010-07	9	—	0.67		无地震发生		
陇05井	1	1991-11	1992-10	11	—	0.75		超出震中距范围		
	2	1995-03	1995-07	4	4	0.54		1995-07-22	5.8	甘肃永登
	3	1995-08	1996-08	12	—	0.66		超出震中距范围		
	4	1998-01	1998-06	5	29	0.57	0.07	2000-06-06	5.9	甘肃景泰
	5	2003-03	2003-09	6	8	0.62		2003-11-03	5.2	甘肃岷县
	6	2005-04	2005-08	4	14	0.63		2006-06-21	5.0	甘肃文县
	7	2007-03	2007-08	5	14	0.56		2008-05-12	8.0	四川汶川
	8	2008-11	2009-09	10	10	0.62		2009-09-19	5.1	陕西宁强
陇06井	1	1993-03	1994-03	12	28	0.73		1995-07-22	5.8	甘肃永登
	2	1997-11	1998-06	7	31	0.53		2000-06-06	5.9	甘肃景泰
	3	2002-09	2003-07	10	14	0.73	0.008	2003-11-03	5.2	甘肃岷县
	4	2006-04	2007-09	17	2	0.62		2006-06-21	5.0	甘肃文县
	5	2009-01	2009-12	11	8	0.68		2009-09-19	5.1	陕西宁强
陇18井	1	1989-03	1989-07	4	13	0.53		1990-04-26 1990-10-20	7.0 6.2	青海共和 甘肃天祝
	2	1991-09	1992-09	12	1	0.58		1991-10-01	5.2	青海门源
	3	1993-03	1993-11	8	10	0.56		1994-01-03 1995-07-22	6.0 5.8	青海共和 甘肃永登
	4	1996-12	1997-11	11	—	0.70	0.08	无地震发生		
	5	2002-03	2003-11	20	19	0.62		2003-10-25 2003-11-03	6.1 5.2	甘肃民乐 甘肃岷县
	6	2008-02	2009-04	14	3	0.58		2008-03-30 2008-05-12	5.0 8.0	甘肃肃南 四川汶川
	7	2010-08	2010-09	1	—	0.51		无地震发生		

注：超前时间系异常开始时间与发震时间之间的时差，异常时段内发生两次地震按第一次发生时间计算。

表 4 甘肃模拟水位变差率中短期异常特征统计表

Tab. 4 Anomaly feature statistics of variation rate of analogue water level in middle-short term in Gansu Province										
测点名称	序号	异常时间				异常最大变幅	经验常数 μ	对应地震		
		开始 /年-月	结束 /年-月	持续时间 /月	超前时间 /月			时间/d	震级 M_s	震中
陇01井	1	1987-04	1990-06	38	4	11.2	0.020	1987-08-10	5.5	宁夏灵武
	2	1991-07	1992-02	7	—	2.8		超出震中距范围		
	3	1994-06	1995-07	13	13	2.5		1995-07-22	5.8	甘肃永登
	4	1995-12	1999-04	40	—	2.9		超出震中距范围		
	5	2000-03	2002-11	32	3	4.6		2000-06-06	5.9	甘肃景泰
	6	2008-05	2008-07	2	0	2.0		2008-05-12	8.0	四川汶川
	7	2009-11	2010-08	9	—	3.2		无地震发生		
陇05井	1	1987-07	1988-08	13	1	15.9	0.033	1987-08-10	5.5	宁夏灵武
	2	1992-01	1993-02	13	—	62.6		超出震中距范围		
	3	1995-03	1996-12	21	4	35.7		1995-07-22	5.8	甘肃永登
	4	1998-01	1999-01	12	—	18.8		无地震发生		
	5	1999-10	2001-09	23	8	9.5		2000-06-06	5.9	甘肃景泰
	6	2003-03	2003-11	8	8	21.3		2003-11-03	5.2	甘肃岷县
	7	2005-05	2006-01	8	13	22.1		2006-06-21	5.0	甘肃文县
	8	2007-02	2010-09	43	15	24.6		2008-05-12 2009-09-19	8.0 5.1	四川汶川 陕西宁强
陇06井	1	1987-04	1988-07	15	4	1.0	0.004	1987-08-10	5.5	宁夏灵武
	2	1992-12	1994-10	22	31	2.7		1995-07-22	5.8	甘肃永登
	3	1996-03	1996-07	4	3	0.5		1996-06-01	5.4	甘肃天祝
	4	1997-11	1999-03	16	31	1.2		2000-06-06	5.9	甘肃景泰
	5	2001-05	2001-06	1	—	0.5		无地震发生		
	6	2002-07	2003-11	16	16	2.2		2003-11-03	5.2	甘肃岷县
	7	2005-03	2005-05	2	—	0.5		无地震发生		
	8	2005-08	2007-11	27	10	1.7		2006-06-21	5.0	甘肃文县
	9	2009-01	2010-06	17	8	2.1		2009-09-19	5.1	陕西宁强
陇18井	1	1987-06	1990-03	33	2	34.7	0.089	1987-08-10 1990-04-26	5.5 7.0	宁夏灵武 青海共和
	2	1991-08	1994-12	40	2	39.8		1991-10-01 1994-01-03	5.2 6.0	青海门源 青海共和
	3	1996-12	1998-03	15	—	30.0		无地震发生		
	4	2002-03	2004-04	25	19	21.1		2003-10-25 2003-11-03	6.1 5.2	甘肃民乐 甘肃岷县
	5	2008-04	2009-06	14	1	11.5		2008-05-12	8.0	四川汶川

注：超前时间系异常开始时间与发震时间之间的时差，异常时段内发生两次地震以按第一次发生时间计算。

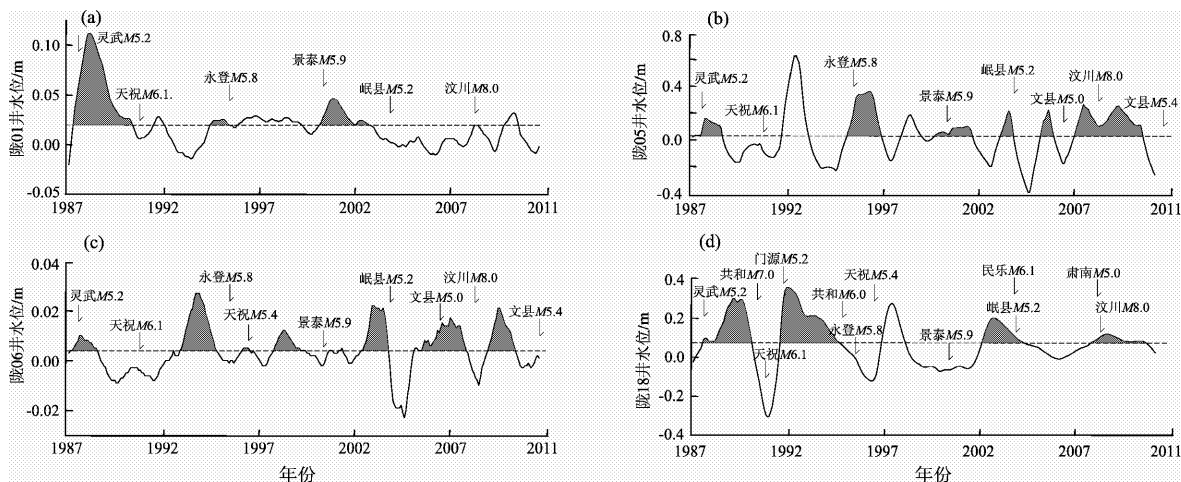


图 4 甘肃模拟水位变差率异常曲线

Fig. 4 Abnormal curves of variation rate of analogue water level in Gansu Province

4.3 趋势速率中期异常特点

笔者用趋势速率方法分析了 1985 年 1 月至 2011 年 9 月甘肃 4 个测项的模拟水位观测资料,发现该时段内共出现 24 次异常(图 5),其中 14 次异常很好地对应了甘肃及邻区 5 级以上地震,漏报 17 次,虚报 10 次。中期异常特征见表 5。通过对这些资料的研究,总结出甘肃模拟水位趋势速率中短期异常的特点:

- (1) 持续时间:最短为 2 个月,最长为 27 个月,平均为 10.6 个月。
- (2) 超前时间:最短为 1 个月,最长 26 个月,平均为 11.5 个月。
- (3) 在异常持续过程中发生地震 6 次,异常结束后发生地震 8 次。
- (4) 异常变幅:最小为 0.53,最大为 1.00,平均为 0.71。
- (5) 对应率为 58.3%,漏报率为 54.8%,虚报率为 41.7%。

5 异常识别方法的效能评价

20 世纪 70 年代初,许绍燮提出了 R 值评分,延用至今,现已成为我国地震分析预报研究工作中使用最为广泛的一种评分法,将 R 值定义为

$$R = c - b = \frac{\text{报对的地震次数}}{\text{应报的地震次数}} - \frac{\text{报对占用时间}}{\text{预报占用的时间}}$$

式中, c 定义为有震报准率; b 的原意义为空报率,

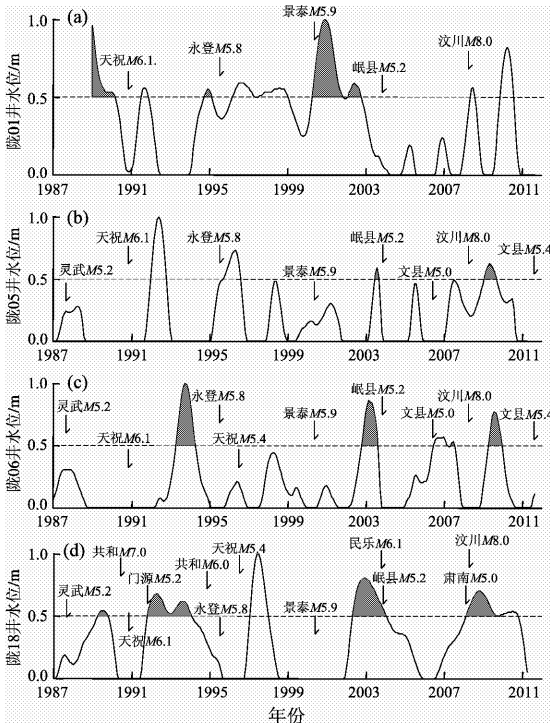


图 5 甘肃模拟水位趋势速率异常曲线

Fig. 5 Abnormal curves of trend rate of analogue water level in Gansu Province

在此定义为预报占用时间率。故 R 值表示为扣除了占时率的报准率。由识别方法评分得到的 R 值,大于 R_0 值,则表明该方法至少有 97.5% 的置信度(张国民等, 2001; 朱成英, 高小其, 2011)。

选取表 1 中的地震进行分析。从属函数、变差率、趋势速率异常开始到发震时间的具体计算分别见表 3、表 4、表 5。甘肃 4 个模拟水位资料,从

表 5 甘肃模拟水位趋势速率中短期异常特征统计表

Tab. 5 Anomaly features of trend rate of water level in middle-short term in Gansu Province

测点名称	序号	异常时间				异常最大变幅	对应地震		
		开始 /年-月	结束 /年-月	持续时间 /月	超前时间 /月		时间/d	震级 M_s	震中
陇 01 井	1	—	1990-03	>14	>21	0.96	1990-10-20	6.2	甘肃天祝
	2	1991-08	1991-12	4	—	0.56	超出震中距范围		
	3	1994-10	1995-03	5	9	0.55	1995-07-22	5.8	甘肃永登
	4	1996-04	1997-05	13	—	0.59	超出震中距范围		
	5	1997-08	1999-02	18	—	0.55	无地震发生		
	6	2000-05	2001-11	18	1	1.00	2000-06-06	5.9	甘肃景泰
	7	2002-03	2002-11	8	20	0.59	2003-11-03	5.2	甘肃岷县
	8	2008-06	2008-09	3	—	0.56	汶川地震震后效应		
	9	2009-12	2010-08	8	—	0.82	无地震发生		
陇 05 井	1	1992-01	1992-11	10	—	1.00	超出震中距范围		
	2	1995-10	1996-09	11	—	0.73	永登地震震后效应		
	3	2003-07	2003-10	3	4	0.59	2003-11-03	5.2	甘肃岷县
	4	2009-02	2009-10	8	7	0.62	2009-09-19	5.1	陕西宁强
陇 06 井	1	1993-05	1994-05	12	26	1.00	1995-07-22	5.8	甘肃永登
	2	2002-11	2003-09	10	12	0.86	2003-11-03	5.2	甘肃岷县
	3	2006-07	2007-03	8	—	0.57	文县地震震后效应		
	4	2007-06	2007-08	2	11	0.53	2008-05-12	8.0	四川汶川
	5	2009-05	2010-01	8	4	0.77	2009-09-19	5.1	陕西宁强
陇 18 井	1	1989-05	1989-11	6	11	0.54	1990-04-26	7.0	青海共和
							1990-10-20	6.2	甘肃天祝
	2	1991-11	1994-02	27	26	0.68	1994-01-03	6.0	青海共和
	3	1997-02	1998-01	11	—	1.00	无地震发生		
	4	2002-05	2004-02	21	17	0.81	2003-10-25	6.1	甘肃民乐
							2003-11-03	5.2	甘肃岷县
	5	2008-03	2009-09	18	2	0.70	2008-05-12	8.0	四川汶川
	6	2009-12	2010-11	11	—	0.54	无地震发生		

注：超前时间系异常开始时间与发震时间之间的时差，异常时段内发生两次地震按第一次发生的时间计算。

属函数时间段：1986 年 9 月~2011 年 9 月；变差率和趋势速率时间段：1987 年 1 月至 2011 年 9 月，其中陇 01 井水位资料变化幅度较大，1990 年 10 月 20 日地震前趋势速率异常开始时间不能确定，因此选用趋势速率时间段为 1990 年 11 月~2011 年 9 月。异常识别方法效能评价参数见表 6。

从表 6 中可以看出 3 种识别方法的 $R > R_0$ ，说明甘肃模拟水位从属函数、变差率、趋势速率值

具有实效性。 R_0 值从许绍燮研究的具有 97.5% 置信水平的 R 值表查出（张国民等，2001）。

6 结论与讨论

（1）用从属函数、变差率、趋势速率方法提取甘肃模拟水位资料的异常明显，对应地震效果比较理想；通过对异常识别方法的效能评价，认

表 6 异常识别方法效能评价参数

Tab. 6 Efficiency evaluation parameters of abnormal identification method

异常识别方法	报对地震次数	应报的地震次数	报对占用时间（月）	预报占用总时间（月）	漏报次数	R 值	具有 97.5% 置信水平的 R_0 值
从属函数	22	32	263	1204	10	0.47	0.188
变差率	21	32	196	1188	11	0.49	0.188
趋势速率	14	31	171	1164	17	0.30	0.179

为甘肃模拟水位从属函数、变差率、趋势速率值具有实效性。

(2) 趋势异常本身并不是某一个地震的“专有”前兆，而是多个地震的“共同前兆”。从成因来看，趋势异常不是来自震源的“源兆”，而是“外因性”的“场兆”（张国民等，2001；范雪芳等，2010）。这一特点决定了依据这类异常提出的发震时间的预测，只是一个“可能的发震时段”，即并不是每一次异常都对应地震。一组趋势异常变化并不只对应一个地震，而是对应一个地震的活跃时段，即趋势异常为多个强震、中强震的共同前兆。

(3) 从统计结果看（表 3~5），用从属函数、变差率、趋势速率方法在异常持续过程发震的次数分别为 8、15、6 次，异常结束后发震的次数分别为 14、6、8 次。异常持续过程和异常结束后发震的总次数大致相当，分别为 29 次和 28 次。异常最大变幅的大小、异常持续时间的长短与震级的大小没有直接关系，这可能与地震的发震机理有关，地震引起的水位变化认为不仅与观测点的水文地质条件有关，也与岩石应力—应变的作用有关。

参考文献：

范雪芳,刘耀炜,吴桂娥,等. 2010. 华北地区水位、水位中期异常特征研究[J]. 地震研究,33(2):147-158.

耿杰,任桂香,王忠民,等. 2001. 山东数字化水位观测资料与模拟观测资料的对比分析[J]. 地震地质,23(3):455-463.

解晓静. 2010. 琼海加积井水位模拟观测与数字观测资料对比分析[J]. 地震地磁观测与研究,31(3):83-87.

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,常千军,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.

吴敏,赵爱平. 2002. 南昌地震台数字水位与模拟水位观测对比研究[J]. 华南地震,22(4):70-73.

杨玲英,毛先进. 2011. 云南部分水位观测点模拟与数字化并行观测资料对比分析[J]. 地震研究,34(3):291-295.

杨兴悦,王燕,猴亚江,等. 2011. 甘肃东南部水氡中期异常特征研究[J]. 地震研究,31(1):8-18.

杨兴悦,王燕,闫万生,等. 2006. 武山 22 号井水位中期异常与地震关系的探讨[J]. 西北地震学报,28(4):378-380.

张国民,傅征祥,桂燮泰,等. 2001. 地震预报引论[M]. 北京:科学出版社.

张新基,赵仅全,刘耀炜,等. 2005. 甘肃省地震监测志[M]. 甘肃:兰州大学出版社.

朱成英,高小其. 2011. 新 20 号井水位异常特征分析[J]. 内陆地震,25(2):158-165.

Research on Processing Method of Analogue Water Level Data and Evaluation of Earthquake-reflecting Efficacy in Gansu Province

WANG Yan¹, YANG Xing-yue², CHEN Xue-mei¹, ZHOU Jian-qiang², DING Hong¹, CI Zhuo-ga¹

(1. *Central Seismic Station of Tianshui, Earthquake Administration of Gansu Province, Tianshui 741020, Gansu, China*)

(2. *Wushan Seismic Station, Earthquake Administration of Gansu Province, Wushan 741308, Gansu, China*)

(3. *Earthquake Administration of Tibet Aatonomaus Region, Lhasa 850000, Tibet, China*)

Abstract

Using the methods of subordinate function, variation rate and trend rate, we extracted the earthquakes precursory anomalies from observation data of analogue water level in Gansu Province. The result indicated that: (1) 4 items of water level data included 31 subordinate function anomalies, 29 variation rate anomalies and 23 trend rate anomalies from Jan. , 1987 to Sep. , 2011. Among them, 22 subordinate function anomalies, 21 variation rate anomalies and 14 trend rate anomalies corresponded with the $M_s > 5$ earthquakes that ever occurred in Gansu Province and its adjacent region. By the analysis of the features of these anomalies and their relation to the earthquakes, the method of time prediction for the moderate-strong and strong earthquakes were proposed, and the empirical constant, anomaly threshold value of variation rate and trend rate were obtained from subordinate function of analogue water level in Gansu Province. (2) Using the methods of subordinate function, variation rate and trend rate, abnormal result which was quantitatively extracted was better. R value was greater than R_0 value obtained by the effectiveness evaluation of abnormal identification method. The results showed that confidence level of this method is at least 97.5% , which indicated these three methods are effectiveness.

Key words: analogue level observation; subordinate function; variation rate; trend rate; precursory anomaly