

胡玉良、程冬焱、李惠玲等,2016,静乐井 SWY-II 和 LN-3A 水位仪的对比分析,中国地震,32(1),93~102。

静乐井 SWY-II 和 LN-3A 水位仪的对比分析

胡玉良^{1,2)} 程冬焱^{1,2)} 李惠玲^{1,2)} 穆慧敏^{1,2)} 郭宇³⁾ 刘俊芳³⁾

1) 山西省地震局,山西省太原市旧晋祠路二段 69 号 030021

2) 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站,太原 030025

3) 山西省地震局定襄地震台,山西定襄 035400

摘要 对静乐井 SWY-II 水位仪和 LN-3A 水位仪从稳定性、数据一致性、内在质量、系统漂移、水震波、气压效应、自然环境干扰 7 方面进行了对比分析,结果显示:①SWY-II 水位仪和 LN-3A 水位仪运行稳定;②两套仪器观测数据一致性较好;③两套仪器测量精度均优于 0.001m,平均值一致性较好。④通过计算分钟值数据,两套仪器 M2 波潮汐因子及其观测精度较为接近;⑤通过与 SW40-1 水位仪进行对比,两套仪器均存在不同程度系统漂移;⑥两套仪器分钟值数据记录水震波时间及振幅差异明显;⑦两套仪器的气压效应、受自然环境干扰影响较为一致。

关键词: 对比观测 一致性 统计学 漂移 水震波

[文章编号] 1001-4683(2016)01-0093-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

国内外学者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应力应变的变化,还可反映井-含水层水动力条件的变化(国家地震局科技监测司,1994),因此水位动态研究是研究地球某些动力过程和监测地震孕育的重要途径(汪成民等,1988)。

随着“九五”、“十五”、“十一五”项目的全面建设,流体数字化观测仪器在全国开始投入运行,为水位动态研究提供了丰富的数据(廖丽霞等,2013),以此为基础的地震观测技术由模拟观测向数字化观测发展(耿杰,2008)。“十五”期间,山西省地震局对镇川、朔州、太原、静乐、祁县、介休、孝义、漫水和东郭流体井进行了技术改造,统一安装了由中国地震局地震预测研究所研制的 LN-3A 水位仪。“十一五”期间,山西省地震局对榆社红崖头流体井和忻州鸦儿坑流体井进行了技术改造,统一安装了由中国地震局地壳应力研究所研制的 SWY-II 水位仪。

“九五”、“十五”项目建设完成后,耿杰等(2001)、黄春玲等(2010)曾做过数字化水位观测资料与模拟观测资料的对比分析,主要针对 LN-3 型数字水位仪和 SW40-1 日记式水位仪或 LN-3A 型数字水位仪(以下简称 LN-3A 水位仪)和 SW40-1 日记式水位仪(以下简称 SW40-1 水位仪)。由于 SWY-II 型数字化水位仪(以下简称 SWY-II 水位仪)为新研制的仪

[收稿日期] 2015-08-20; [修定日期] 2015-11-23

[项目类别] 中国地震局监测预报司“三结合”项目(150403)资助

[作者简介] 胡玉良,男,1981 生,硕士,工程师;研究方向:前兆系统及仪器运行维护。E-mail:huyuliang130@163.com

器(何案华等,2012),尚未对SWY-II水位仪和LN-3A水位仪进行对比分析研究,因此,本文通过在静乐井对新安装的1套SWY-II及原有的LN-3A水位仪开展为期3个多月的并行观测,从稳定性、数据一致性、数据精度、系统漂移、水震波、气压效应、自然环境干扰这7方面进行对比分析。

1 对比分析

1.1 仪器运行

2015年4月17日将SWY-II水位仪安装到静乐井,从4月18日开始投入运行,台站值班人员按照流体学科规范要求做好仪器维护、数据预处理、观测日志填写、仪器校测等工作,确保SWY-II水位仪产出数据连续、稳定可靠,同时对静乐井原有的LN-3A水位仪的观测数据进行跟踪分析。利用中国地震前兆台网运行评价系统对两套仪器的数据完整率进行统计(表1)。

表1 静乐井数字水位仪观测数据完整率对比

时间 (2015年)	SWY-II水位仪 完整率/%	LN-3A水位仪 完整率/%	备注
4月	100	99.995	
5月	100	99.998	从4月18日 开始计算
6月	100	99.998	
7月	100	100	
平均	100	99.998	

由表1可知,两套水位仪运行稳定,均未发生故障,数据连续率均达99.99%以上。

1.2 数据一致性分析

首先对静乐井SWY-II、LN-3A两套水位仪曲线形态进行定性分析,提取2015年4月18日~7月31日的分钟值数据,如图1所示,从曲线形态上看,两套仪器的趋势是一致的,从图上也能明显看出在水震波记录的幅度上有差异(见本文1.6节),为了更详细地说明两套仪器记录数据的差异是否随时间而变化,将两套仪器产生的分钟值数据相减,得到的差值如图2所示。两套仪器除了在地震波记录的幅度上有差异外,在其余时间内差值最小值是

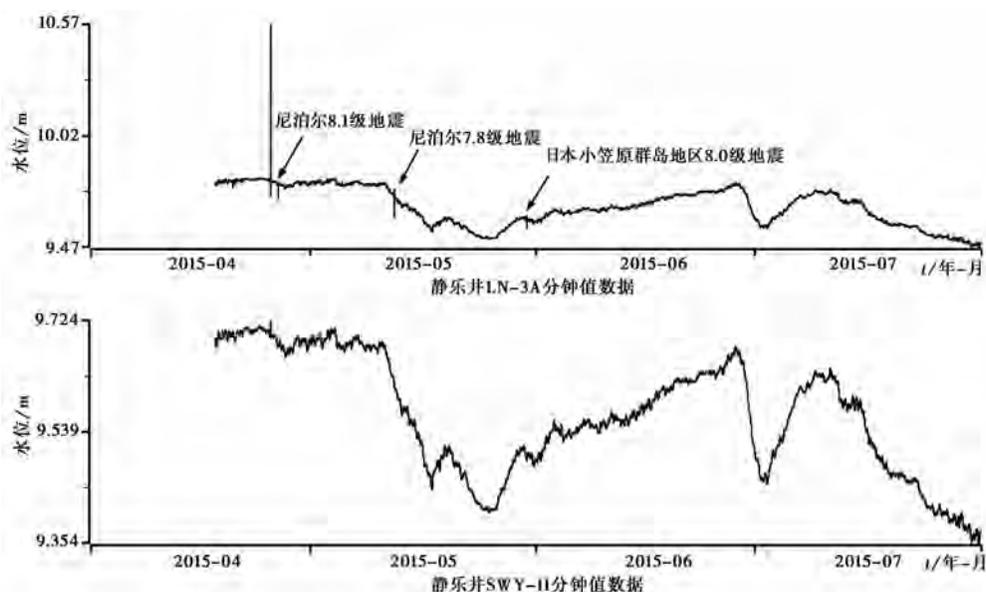


图1 静乐井2015年4月18日~7月31日数字水位仪分钟值数据对比曲线图

0.091m, 最大值是 0.115m, 平均差值为 0.103m, 差值变化幅度不超过 0.024m。平均差值不在零附近主要是由于两套仪器之间存在系统误差, 通过修正 SWY-II 或 LN-3A 的参数值即可解决, 差值曲线形态和变化幅度说明两套仪器的一致性非常好。

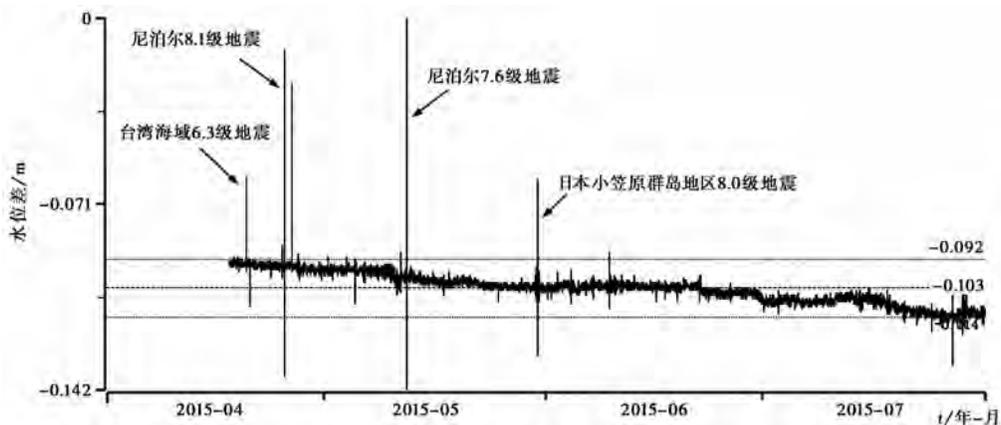


图2 静乐井 2015 年 4 月 18 日~7 月 31 日数字水位仪分钟值数据差值曲线图

标准偏差越小, 表明测量的分散度越小, 测量的精度越高, 用标准偏差可以表征测量精度。在无系统误差的情况下, 一般把标准偏差作为测量误差(何平, 1994)。由于两套仪器均放置在水井中, 当井水位发生变化时两套仪器的产出数据也会随之发生变化。为了计算两套仪器的标准偏差, 从而确定两套仪器的精度, 需要按照一定的条件对两套仪器产出的分钟值数据进行筛选, 条件为: ①选取的时间段必须短; ②确保两套仪器观测数据要平稳, 波动要尽可能地小。基于以上两点, 选取了 2015 年 4 月 23 日 7:00~8:00 的分钟值, 使用 SPSS 软件做单因素方差分析(罗纳德, 2010; 里斯, 2011), 计算了两套仪器的标准偏差。

为了使用 SPSS 软件对两套仪器时均值数据做配对样本 t 检验(罗纳德, 2010; 里斯, 2011), 需要消除两套仪器之间存在的系统误差。本文对 LN-3A 水位仪时均值进行了修正, 具体修正过程如下: SWY-II、LN-3A 水位仪 2015 年 4 月 18 日零点数据分别是 9.693 和 9.787, 两者相差 0.094, 故对 LN-3A 水位仪从 2015 年 4 月 18 日~7 月 31 日之间所有时均值数据都减去 0.094 即可。

1.2.1 单因素方差分析

方差分析就是分析不同水平下各个总体的均值是否有显著的差异。统计推断方法是计算 F 统计量, 进行 F 检验。单因素方差分析指的是自变量只有一个的方差分析, 计算公式为(邱轶兵, 2008)

$$F_A = \frac{V_A}{V_e}$$

其中, V_A 为因素偏差平方和; V_e 为误差平方和; F_A 为一个统计量, 服从自由度为 (F_A, f_e) 的 F 分布, 其中 F_A 为因素偏差平方和自由度; f_e 为误差平方和自由度。给定 $\alpha = 0.05$, 如果 $F_A \geq F_{0.05}(f_A, f_e)$, 就说明因素 A 变化的影响大于误差的影响, 即该因素变化显著。

利用 SPSS 软件对 SWY-II 水位仪和 LN-3A 水位仪 2015 年 4 月 23 日 7:00~8:00 之间

的分钟值数据进行单因素方差计算,计算结果如表 2。

表 2 描述统计

	样本数 /个	均值 /m	标准偏差 /m	标准误差 /m	均值的 95%置信区间		极小值 /m	极大值 /m
					下限/m	上限/m		
LN-3A	60	9.80008	0.000279	0.000036	9.80001	9.80016	9.800	9.801
SWY-II	60	9.70605	0.000220	0.000028	9.70599	9.70611	9.706	9.707
总数	120	9.75307	0.047214	0.004310	9.74453	9.76160	9.706	9.801

由表 2 可知, LN-3A 水位仪标准偏差是 0.000279, SWY-II 水位仪标准偏差是 0.00022, 说明两套仪器测量精度基本无差异, 并且均优于 0.001m。

1.2.2 配对 t 检验基本步骤

首先, 提出两配对样本 t 检验的假设为 H_0 , 两样本均值 μ_1 、 μ_2 无显著差异, 即 $H_0 = \mu_1 - \mu_2 = 0$ 。

$$t = \frac{\bar{d} - (\mu_1 - \mu_2)}{s/\sqrt{n}}$$

然后, 按照上述公式计算 t 统计量, 其中: \bar{d} 为两配对样本差值的均值; $\mu_1 - \mu_2$ 为两均值之差; s 为差值标准差; n 为样本数。给定显著水平 $\alpha = 0.05$, 当 $t_\alpha > |t|$ 时, 证明假设 H_0 成立, 两组序列均值无显著性差异。

利用 SPSS 软件对 SWY-II 水位仪和 LN-3A 水位仪 2015 年 4 月 18 日~7 月 31 日的时均值数据进行配对 t 检验, 计算结果如表 3。

表 3 配对 t 检验结果

配对	成对差分					t 检验值	自由度	双侧概率值
	均值	标准偏差	均值的标准误差	差分的 95%置信区间				
	/m	/m	/m	下限/m	上限/m			
SWY-LN3A	-0.009046	0.005503	0.000110	-0.009261	-0.008831	-82.530	2519	0.000

从表 3 可以得到 SWY-II 水位仪和 LN-3A 水位仪数据之差的均值、标准差、均值标准误差、95%的置信区间以及 t 检验值、自由度和双侧概率值。通过分析可知, 双侧概率值小于 0.05, 说明两套仪器均值存在差异; 两套仪器均值相差 0.009m, 标准偏差为 0.005m, 说明两套仪器均值虽有差异, 但均在观测允许的误差范围内, 因此, 从观测的角度来说, 可认为两套仪器均值是一致的。

1.3 数据内在质量

井水位潮汐是固体地球潮汐的一种次生效应(汪成民, 1988), 由于观测井一般深度只有数百米或数千米, 处于地球表层, 因此地球表层潮汐应力分布会影响静水位反周期性变化(国家地震局科技监测司, 1995)。吕芳等(2012)认为静乐井的井-含水层系统对地壳应力-应变有较强的响应能力, 本文通过对静乐井两套数字水位仪分钟值数据和理论固体潮进行曲线对比及计算 M2 波潮汐因子及其观测精度, 也印证了这一点。

从图 3 可以看出, 两套水位仪均能记录到完整的日波与半日波, 相位同步清晰, 幅度较大, 与理论固体潮曲线相位一致。

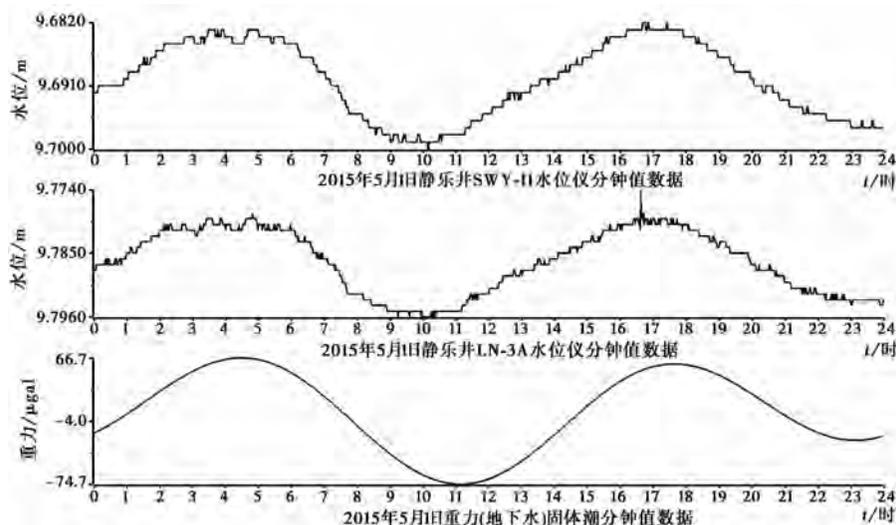


图 3 2015 年 5 月 1 日 SWY-II、LN-3A 水位及理论固体潮时均值数据曲线

使用两套水位仪分钟值数据, 利用中国地震前兆台网运行评价系统 2011 版软件计算两套水位仪 M2 波潮汐因子及其观测精度(刘春国等, 2015), 并进行对比分析, 其结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出, 对于 M2 波潮汐因子和观测精度, SWY-II 水位仪均优于 LN-3A 水位仪。

表 4 水位仪 M2 波潮汐因子及其观测精度对比

日期	SWY-II 水位仪		LN-3A 水位仪	
	M2 潮汐因子	观测精度	M2 潮汐因子	观测精度
5 月	0.254	0.05	0.2461	0.061
6 月	0.2475	0.0392	0.2394	0.0426
7 月	0.2475	0.0431	0.2411	0.0484
均值	0.2497	0.0441	0.2422	0.05067

1.4 系统漂移

SWY-II 和 LN-3A 水位仪传感器均采用扩散硅半导体压力器件。一方面半导体的温度特性使硅压力传感器的零点和灵敏度随温度而发生漂移(孙凤玲等, 2007; 张艳锋等, 2008), 导致测量精度会下降(何平等, 2008); 另一方面, 由于传感器埋深(即传感器探头至水面的距离)会随时间发生变化, 也会导致测量精度发生变化(杨鼎鸿等, 2013), 因此有必要计算两套数字化水位仪在工作环境下的系统漂移。

由于每天均对静乐井 SW40-1 水位仪进行校测, 因此可以认为 SW40-1 水位仪测量值是准确的, 故以 SW40-1 水位仪 2015 年 4 月 18 日~6 月 30 日的日均值为基准, 与两套数字化

水位仪同时段的日均值分别相减,得到两组差值,以此来确定每套仪器随时间变化漂移情况。差值对比曲线如图4所示,SW40-1水位仪日均值曲线如图5所示。

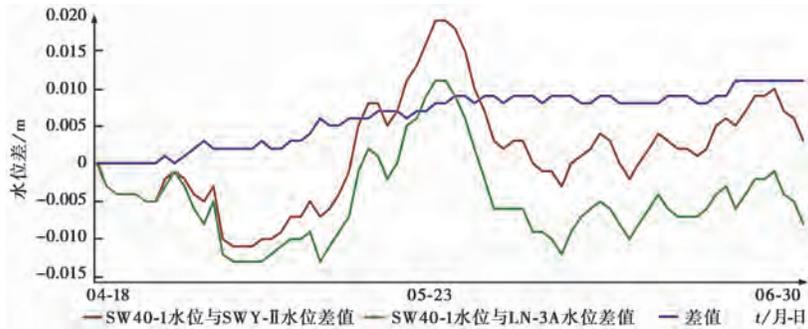


图4 静乐井两套数字水位仪系统误差对比分析曲线

由图4可知,SWY-II水位仪正向最大漂移量为0.019m, LN-3A水位仪为0.011m; SWY-II水位仪反向最大漂移量为-0.011m, LN-3A水位仪为-0.013m; SWY-II水位仪漂移量平均值为0.0014m, LN-3A为-0.0048m。从曲线形态上来看,2条曲线较为一致,只是幅度略有差异;对2条曲线做一阶差分后可以看出,SWY-II水位仪的漂移量稍大于LN-3A,最大相差0.009m,但漂移量都在mm级,这可能是由于两套水位仪压力传感器的特性差异造成的。总体来说,两套水位仪测量值均会随时间发生不同程度漂移,并且漂移量随时间发生非线性变化,因此两套数字化水位仪均需按照规范要求定期进行校测。

对比图4和5可知, LN-3A和SWY-II两套水位仪系统漂移量最大时,静乐井实际水位观测值最小,由此说明水位的上下波动对两套水位探头的压力响应系数有一定的影响。

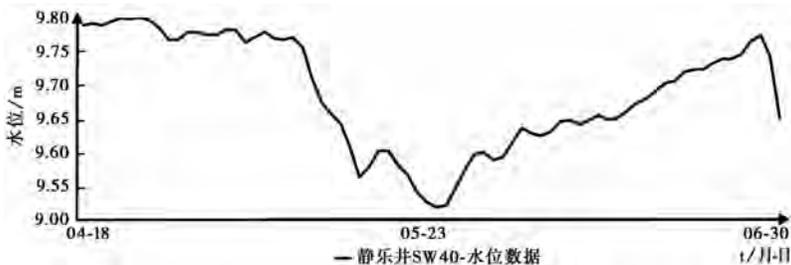


图5 静乐井SW40-1水位曲线

1.5 气压效应

气压对地下水影响具有普遍性(汪成民等,1988;耿杰等,2001),气压每变化1hPa所引起的水位变化称为井水位气压效率,单位为mm/hPa,利用SPSS软件对静乐井两套水位仪日均值与气压数据进行皮尔逊相关系数计算后发现,SWY-II水位仪与气压相关系数为0.307, LN-3A水位仪与气压相关系数为0.293,相关程度均较弱,两套水位仪测值与气压的相关系数较为接近。

1.6 水震波效应

2015年4月~7月,静乐井SWY-II和LN-3A水位仪记录到6级以上地震4次(表5)。

表 5 静乐井数字水位仪记录地震情况对照表

地震事件			SWY-II 水位仪		LN-3A 水位仪	
日期	地点	震级	震荡时间/min	水位振幅/m	震荡时间/min	水位振幅/m
2015-04-20	台湾	6.4	3	0.003	8	0.035
2015-04-25	尼泊尔	8.1	36	0.028	51	0.862
2015-05-12	尼泊尔	7.5	6	0.011	22	0.14
2015-05-30	日本小笠原群岛	8.0	22	0.004	67	0.066

地下水位水震波受观测层的岩性、埋深、井孔-含水层间的导水能力、井孔水柱高度、地震地点、震级(耿杰等,2001、2008)及观测仪器(廖丽霞等,2009;廖丽霞等,2013)等诸多因素的影响。分析结果表明, LN-3A 和 SWY-II 水位仪在分钟值采样下均能清晰记录到水震波,但震荡时间和震荡幅度均有明显差别,具体原因是由于 SWY-II 水位仪内部采用秒采样,然后将 60s 数据进行平均后获得分钟值数据,这样相当于 SWY-II 水位仪进行了平均滤波,信号平滑度较好,但降低了灵敏度;而 LN-3A 水位仪是在每个分钟某一个时刻进行数据采集获得分钟值数据。

由于 SWY-II 水位仪保存了秒采样的水位数据,这里截取了 SWY-II 水位仪 2015 年 4 月 25 日尼泊尔地震前后记录的秒采样数据曲线,如图 6 所示,通过图 6 可以看到清晰的水震波,震荡时间为 50min,和 LN-3A 水位仪相差无几;震荡幅度达到 1.757m,比 LN-3A 水位仪高 0.895m。基于此,建议将 SWY-II 水位仪秒采样数据接入到前兆数据管理系统,这样获取的信息更多,有利于进一步研究。

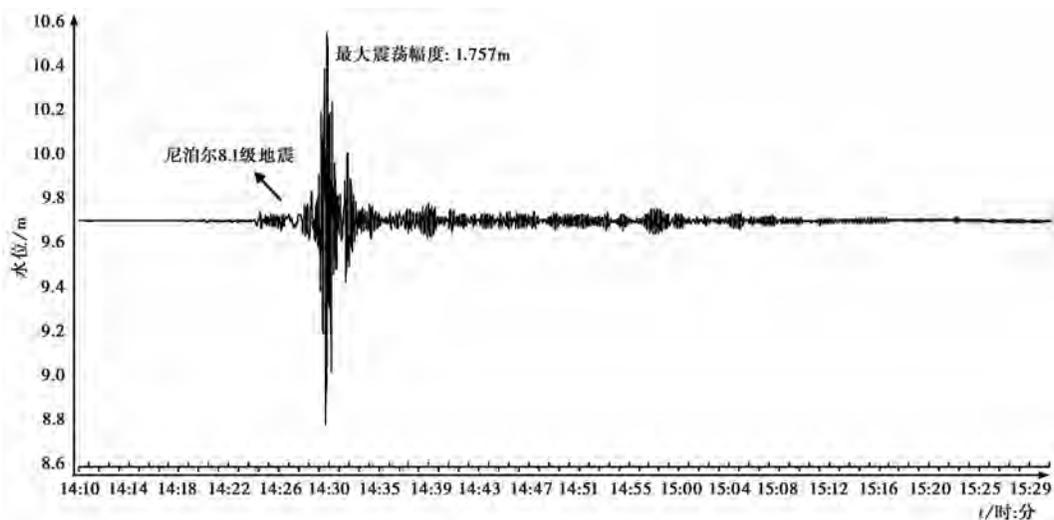


图 6 静乐井 SWY-II 水位仪 2015 年 4 月 25 日秒数据曲线

1.7 自然环境干扰

利用前兆台网(台站)观测数据跟踪分析软件查询可知,2015 年 4 月 18 日~7 月 31 日, LN-3A 水位仪记录到自然环境干扰事件 5 次,其中降水影响 4 次,雷电影响 1 次。以 5 月 12

日~17日记录的事件为例进行说明,通过与SWY-II水位仪同时段观测数据对比可知(图7(b)和(c)),2条曲线形态完全一致,从而说明了观测数据变化与观测系统无关,为了进一步说明是何种因素导致的水位上升,增加了忻州鸦儿坑雨量曲线,并且与2014年数据进行同期对比,如图7所示。

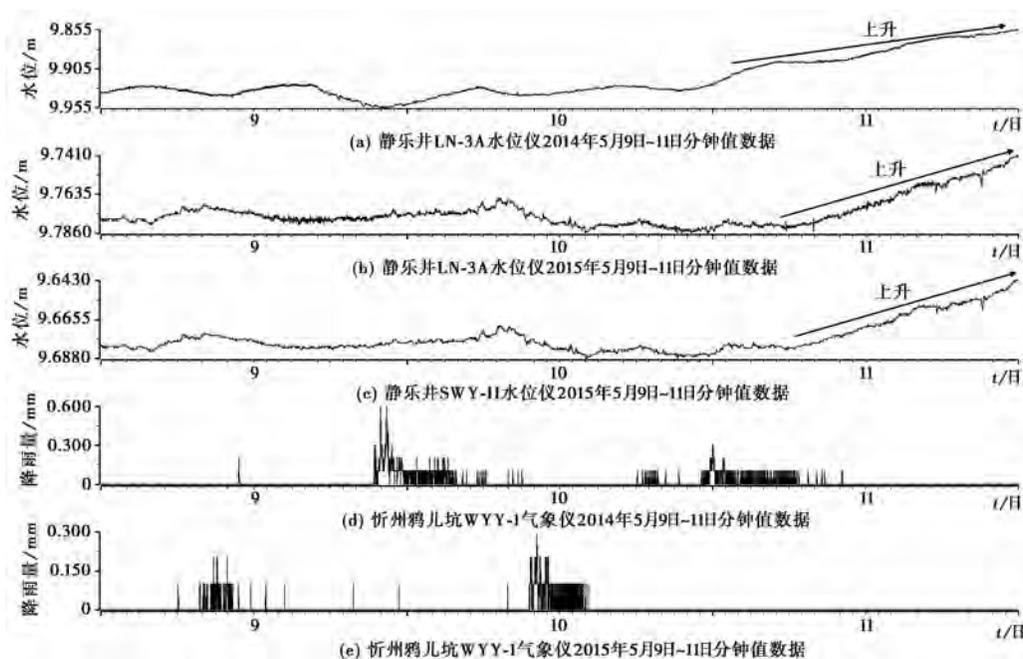


图7 静乐井水位与降雨量同期对比曲线

从图7可以看出,2014年5月9日~11日与2015年5月9日~10日同期均有降雨,导致静乐井水位上升。

2 结论与讨论

两套数字化水位仪在并行运行期间工作稳定,数据完整;通过曲线形态对比,两套仪器一致性非常好;采用相关统计学方法得知,两套数字化水位仪观测数据精度均优于0.001m,产出均值一致性较好;利用相关软件对两套数字化水位仪时均值数据计算了M2波潮汐因子及其观测精度,结果表明,SWY-II水位仪观测精度优于LN-3A水位仪;基于静乐井模拟水位数据,对两套数字化水位仪系统漂移进行了计算,结果显示,两套数字化水位仪均出现不同程度系统漂移,因此在数字化水位仪运行过程中,需对水位传感器定期进行标定校测,确保水位数据真实可靠;两套水位仪水位数据与气压相关性较为一致;分钟值采样下,水震波记录震荡时间及水位振幅有明显差别;自然环境干扰方面,两套水位仪干扰程度较为一致。

通过对比分析发现,两套数字化水位仪在系统漂移及水震波记录方面存在着一些差异,SWY-II水位仪秒采样数据记录地震波信息较为丰富,这为下一步深入研究提供了方向。

参考文献

- 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, *地震研究*, **31**(3), 238~243。
- 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, *地震地质*, **23**(3), 455~463。
- 国家地震局科技监测司, 1994, *地震地下流体观测技术*, 北京: 地震出版社。
- 国家地震局科技监测司, 1995, *地震地下水手册*, 北京: 地震出版社。
- 何案华、贾鸿飞、王宝锁等, 2012, SWY-II 型水位仪的研制, *大地测量与地球动力学*, **32**(6), 156~159。
- 何平, 1994, 评估测量数据精度的几种方法, *工业仪表与自动化装置*, (5), 13~17。
- 何平、潘国峰、孙以材等, 2008, 压力传感器温度漂移补偿的 RBF 网络模型, *仪器仪表学报*, **29**(3), 572~576。
- 黄春玲、刘国俊、王向阳等, 2010, 山西前兆台站水位模拟与数字观测对比分析, *山西地震*, (4), 4~10。
- 里斯, 田金方译, 2011, *数理统计及数据分析*, 北京: 机械工业出版社。
- 廖丽霞、秦双龙、陈昌泳, 2013, 不同采样率水位同震响应能力及其特征分析, *地震地磁观测与研究*, **34**(3), 150~155。
- 廖丽霞、陈昌泳、倪晓寅等, 2009, 不同型号仪器水位记震能力对比分析, *地震研究*, **32**(2), 137~144。
- 刘春国、孔令昌、杨竹转等, 2015, 中国地震井水位观测网监测效能评估分析, *中国地震*, **31**(2), 329~337。
- 罗纳德·D·约克奇, 刘超等译, 2010, *SPSS 其实很简单*, 北京: 中国人民大学出版社。
- 吕芳、张淑亮、胡玉良等, 2013, 山西静乐井水位异常调查与分析, *山西地震*, (3), 28~31。
- 邱轶兵, 2008, *试验设计与数据处理*, 合肥: 中国科学技术大学出版社。
- 孙凤玲、于海超、王金文等, 2007, 硅压阻式压力传感器温度补偿建模与算法研究, *微纳电子技术*, **44**(7), 48~50。
- 汪成民、车用太、万迪坤等, 1988, *地下水微动态研究*, 北京: 地震出版社。
- 杨鼎鸿、程庆斌、邓聪等, 2013, 数字化水位观测仪零漂分析, *地震地磁观测与研究*, **34**(3), 144~149。
- 张艳锋、严家明, 2008, 基于最小二乘法的压力传感器温度补偿算法, *计算机测量与控制*, **15**(12), 1870~1871。

Contrast analysis on the SWY-II and the LN-3A instruments at the Jingle well

Hu Yuliang^{1,2)} *Cheng Dongyan*^{1,2)} *Li Huiling*^{1,2)} *Mu Huimin*^{1,2)} *Guo Yu*³⁾
*Liu Junfang*³⁾

1) Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030021, China

2) State Key Observatory of Shanxi Rift System, Taiyuan 030025, China

3) Dingxiang Seismic Station of Earthquake Administration of Shanxi Province, Dingxiang 035400, Shanxi, China

Abstract In the paper, the SWY-II and the LN-3A instruments are contrasted from the seven aspects of stability, data consistency, internal quality, systematic drift, water-seismic waves, barometric effect and natural environment interference at the Jingle well. The main conclusions are as follows: ① The two digital instruments are stable. ② The observation data of the SWY-II instrument coincided with the LN-3A instrument. ③ The measurement accuracy of two instruments is basically the same. There is a good identity in the mean consistency of the two instruments. ④ There is little difference in the tidal factor of M2 wave and the observation precision between the two instruments. ⑤ The two instruments have systematic drift in varying degrees. ⑥ There is a big difference in the vibration time and the ranges of the water-seismic waves between the two instruments. ⑦ There is little difference in the barometric effect and the natural environment interference between the two instruments.

Key words: Comparative observation Consistency Statistics Drift Water-seismic waves