

海原甘盐池井水位固体潮效应分析

丁风和

宁夏回族自治区地震局宁夏地震台, 宁夏 银川

收稿日期: 2025年12月30日; 录用日期: 2026年2月3日; 发布日期: 2026年2月13日

摘要

利用频谱分析、调和分析等方法, 分析了海原甘盐池地震观测井水位的固体潮效应。引起甘盐池井水位变化的主要潮汐分波主要有M₂波、S₂波、O₁波、K₁波和N₂波, 且S₂波振幅最大。潮汐因子计算结果表明甘盐池井含水层裂隙较发育, 存在破碎和风化现象, 与外界存在一定水力联系。各分波存在周期短的波其相位滞后通常比较小的现象。可选择M₂波来分析甘盐池井水位的潮汐因子、潮汐因子误差、相位滞后、相位滞后误差和观测幅度等参数。

关键词

甘盐池地震观测井, 气压效应, 固体潮效应, 海原

Analysis of the Solid Tide Effect on the Water Level of Ganyanchi Well in Haiyuan

Fenghe Ding

Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region Ningxia Seismic Station, Yinchuan Ningxia

Received: December 30, 2025; accepted: February 3, 2026; published: February 13, 2026

Abstract

Using methods such as spectral analysis and harmonic analysis, the solid tide effect of water level

文章引用: 丁风和. 海原甘盐池井水位固体潮效应分析[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(2): 168-174.
DOI: 10.12677/ag.2026.162017

in the seismic observation well of Ganyanchi, Haiyuan was analyzed. The main tidal component waves causing changes in the water level of the Ganyanchi well include M₂ wave, S₂ wave, O₁ wave, K₁ wave, and N₂ wave, with the S₂ wave having the largest amplitude. The calculation results of the tidal factors indicate that the aquifer fractures in the Ganyanchi well are relatively developed, with phenomena of fragmentation and weathering, and there is a certain hydraulic connection with the outside. For each component wave, there is a phenomenon where waves with shorter periods usually have smaller phase lags. The M₂ wave can be selected to analyze parameters such as tidal factors, tidal factor errors, phase lag, phase lag errors, and observed amplitude of the well water level in Ganyanchi.

Keywords

Ganyanchi Seismic Observation Well, Barometric Effect, Solid Tide Effect, Haiyuan

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

影响地下水位变化的因素有很多,如气压、固体潮、气象、水文因素和人类活动等。井水位的固体潮效应一直以来是国内外学者研究地下水位微动态变化的主要对象[1]-[8]。地球在绕日地和月地公共质心运动的过程中,由于起潮力的作用固体地球产生潮汐变形。这时贮存于地壳含水层孔隙、裂隙或岩溶中的地下水,必然随着含水层的变形出现起伏波动。地下水位的固体潮效应研究前人主要利用维尼迪科夫调和分析方法来提取井水位观测中各波群的潮汐因子、相位滞后等参数以及所需的日波、半日波的固体潮信息,来开展相关研究[9]-[12]。本文以宁夏海原甘盐池地震观测井为例,利用傅里叶频谱分析、维尼迪科夫调和分析等方法,分析了该井水位的潮汐因子、相位滞后、观测幅度等参数,这对该井水位微动态特征的全面认识具有重要的科学意义,也可为异常甄别和震情跟踪服务。

2. 基础资料

2.1. 区域水文地质概况

海原甘盐池地震观测井位于海原弧形断裂带甘盐池拉分盆地内,盆地2条边界走滑断层分别为海原断裂带内的次级断层—西华山北麓断层和黄家洼山南麓断层。区域地下水的补给主要受控制甘盐池拉分盆地边界的西华山和黄家洼山山体基岩裂隙水潜流补给。区域地表径流量小,且季节变化大,暴雨季节有洪水,雨后流量骤减,旱季断流。

2.2. 井孔概况

海原甘盐池地震观测井原为宁夏地矿局水文二队1974年4月施工建设的水文地质勘探井。成井深度306.73 m,现有井深165 m,套管直径146 mm,套管深165.64 m。观测含水层为第四系盆地边缘裂隙含水层,阻水底板为第四系粘沙土,阻水顶板为第四系粘沙土。在42.51~47.0 m、92.03~137.99 m、150.3~165.64 m段有滤水管,水位观测段在42.5 m下(图1)。观测含水层埋深约20 m,含水层揭露厚度大,有较好的封闭性,岩性孔隙大,透水性较好。

层底深度 /m	井孔结构地层 柱状图	岩 性	成井单位	宁夏地质局第二水文工程地质队
			成井日期	1979年4月
13.40	/	砾质粘砂土	位 置	海原县甘盐池乡唐家坡村南
22.40	/	含砾粘砂土	经 纬 度	东经105.32° 北纬36.65°
71.68	/	粘砂土	自 然 环 境 源	该井位于甘盐池盆地中，降雨及地表水对水位均有影响。
76.40	/	含砾粘砂土		
106.40	变质岩 风化沉积物	构造部位	1920年海原8.5级大震变形带，西华山北麓断裂带上，为新构造盆地
132.68	角砾、碎石、卵石		
136.65	云母片麻岩	水 文 条 件 地 简 质 述	地处封闭性盆地，为洪积砾砂，粗砂层堆积，透水性较好。补给源主要为断层带深部涌水和四周中低山裂隙水。
273.40	变质岩风化沉积物夹薄层黄土状粘砂土		
296.30	角砾、块石、碎石		
306.73	变质岩风化沉积物		

Figure 1. Column chart of Ganyanchi seismic observation well

图1. 甘盐池地震观测井孔柱状图

3. 分析方法

3.1. 频谱分析方法

该方法就是将观测的水位时间序列用傅里叶分析方法分解成为许多不同频率的正弦分量，提取分析水位观测信号和干扰的频率成分。地球固体潮是很多潮汐分波的总和，但主要成分是5个日波(O_1 、 K_1 、 P_1 、 Q_1 、 J_1)和5个半日波(M_2 、 N_2 、 L_2 、 S_2 、 K_2)，占全部起潮力95%以上的只有 M_2 波、 O_1 波、 K_1 波、 S_2 波和 N_2 波这5个波群，同样由固体潮引起的井水位潮汐现象也具有相同的分波。

3.2. 调和分析方法

保加利亚学者维尼迪科夫提出了一种采用数字频率滤波器对观测数据进行滤波的方法，以取得日波

或半日波中的波群观测振幅与理论振幅之比(振幅比或潮汐因子)以及观测相位与理论相位之差(相位超前或滞后)。在对井水位固体潮的分析研究中,通常利用维尼迪科夫设计的偶数字滤波器和奇数字滤波器进行连续48 h的固体潮观测,取整点值经过数学变换后,可按最小二乘法原理求得各波群的潮汐因子、相位滞后、残差矢量等参数,提取所需的日波、半日波的固体潮信息。

4. 甘盐池井水位固体潮效应特征分析

选取2008~2025年甘盐池井水位整点值数据,通过频谱分析得到该井水位周期-振幅谱结果,引起甘盐池井水位变化的主要潮汐分波有M₂波、S₂波、O₁波、K₁波和N₂波(图2)。振幅由大到小的波群依次为S₂波、M₂波、K₁波、O₁波和N₂波,在日波群和半日波群中,由气压引起的S₂波和K₁波振幅都最大,说明甘盐池井水位气压效应显著。

Table 1. Statistical table of main wave tidal parameters of water level in Ganyanchi well

表1. 甘盐池井水位主要分波潮汐参数统计表

潮汐波群	潮汐因子($\text{mm}/10^{-9}$)	潮汐因子误差($\text{mm}/10^{-9}$)	相位滞后(°)	相位滞后误差(°)	观测幅度(mm)
O ₁ 波	0.2067	0.0068	-20.1777	1.8765	1.5826
K ₁ 波	0.1895	0.0045	-9.2219	1.3764	2.0977
N ₂ 波	0.2694	0.0098	-57.2823	2.0764	0.5755
M ₂ 波	0.2710	0.0019	-54.2027	0.3919	2.9984
S ₂ 波	0.6161	0.0037	-19.4234	0.3521	3.2382

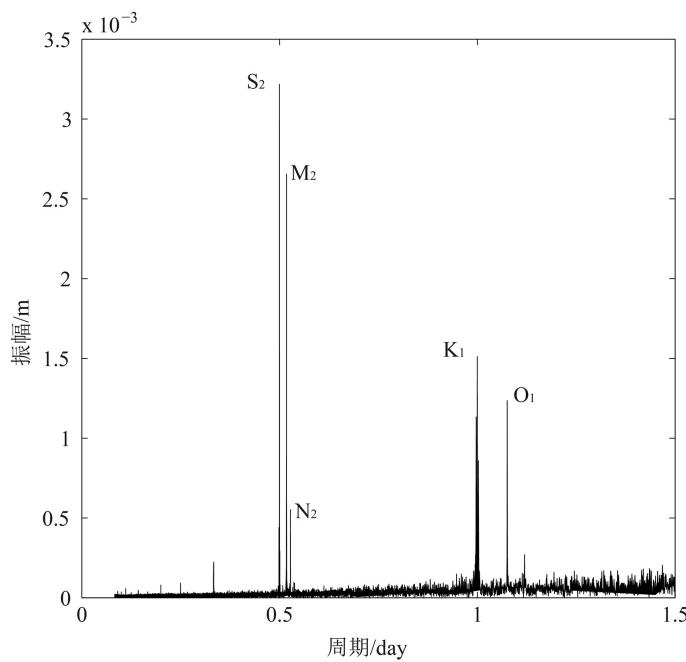


Figure 2. Period-amplitude spectrum results of well water level in Ganyanchi, Haiyuan

图2. 海原甘盐池井水位周期-振幅谱结果

另外,潮汐因子作为井水位观测系统灵敏度的主要参量,其值的大小反映出井含水层裂隙发育及坚硬程度。一般情况下,潮汐因子在 $(0.22\sim 10) \times 10^{-9}$ mm体应变范围内,井水位观测系统的灵敏度(潮汐响应)越高,其含水层介质越坚硬且难以变形。相反井水位观测系统的灵敏度(潮汐响应)越低,含水层裂隙

发育, 破碎和风化现象严重, 孔隙度也大[13]。另外, 在半日波主项的选择中, 一般选择振幅最大, 且其测定的误差也最小。从通过维尼迪科夫调和分析得到的甘盐池井水位 M_2 波、 S_2 波、 O_1 波、 K_1 波、 N_2 波的潮汐因子、潮汐因子误差、相位滞后、相位滞后误差和观测幅度等参数(表 1)可以看出, 除了 S_2 波外, M_2 波和 N_2 波的潮汐因子略高于井水位观测系统的最低灵敏度 $0.22 \text{ mm}/10^{-9}$ 体应变, 说明甘盐池井含水层裂隙较发育, 存在破碎和风化现象, 与外界存在一定水力联系, 但具有一定承压性。

由表 1 可以看出, S_2 波潮汐因子和振幅都最大, 但潮汐因子误差次小。而 M_2 波潮汐因子和振幅都次大, 但潮汐因子误差最小。另外, 考虑到 M_2 波更稳定, 可选择 M_2 波来分析甘盐池井的潮汐因子、潮汐因子误差、相位滞后、相位滞后误差和观测幅度等参数。

井水位相位滞后是水文地质学中的重要现象, 反映了地下水系统对外界压力变化的响应特性[14]。从表 1 和图 2 可以看出, 日波群中的 K_1 波比 O_1 波周期更短, 其相位滞后比 O_1 波小; 半日波群中的 S_2 波、 M_2 波和 N_2 波也表现出了周期短的波其相位滞后通常比较小的现象, 即相位滞后由小到大分别为 S_2 波、 M_2 波和 N_2 波, 和其相应的周期长短是一致的。

5. 甘盐池井水位 M_2 波潮汐因子和相位滞后时序特征分析

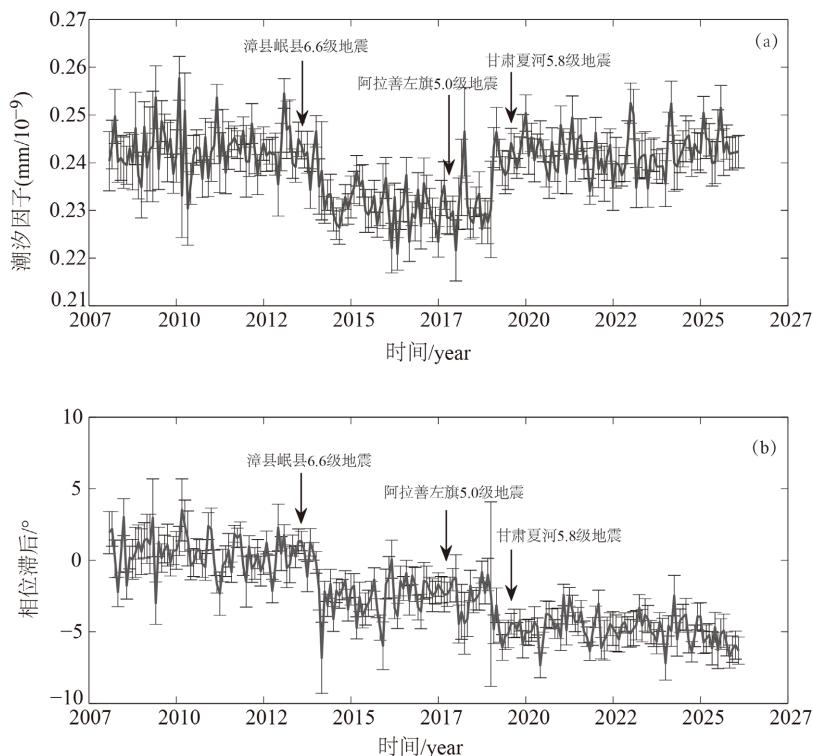


Figure 3. Time series curve of tidal factor and phase lag for the M_2 wave of water level, which only exhibits the solid tide response term, in the Ganyanchi well in Haiyuan

图 3. 海原甘盐池井仅剩固体潮响应项水位 M_2 波的潮汐因子和相位滞后时序曲线

利用仅剩固体潮响应项的水位计算潮汐因子和相位滞后等参数, 无疑更具科学性和可信度。前人[2][8]利用卷积回归法可对观测水位进行气压校正、气压和固体潮同时校正。本文也利用该方法, 对甘盐池井水位分别进行气压校正、气压和固体潮同时校正后, 得到了该井仅剩固体潮响应项的水位, 在此基础上计算了甘盐池井仅剩固体潮响应项水位 M_2 波的潮汐因子和相位滞后等参数。结果表明: M_2 波潮汐因子除了 2013 至 2018 年整体偏低外, 其余时段变化比较平稳。 M_2 波相位滞后自 2008 年以来整体呈下降

趋势,但2014年和2019年前后有较大的变幅。另外,从2008年以来甘盐池井周围300 km范围内5.0级以上地震对应情况来看,2013年7月22日甘肃漳县岷县6.6级地震、2017年6月3日内蒙古阿拉善左旗5.0级地震、2019年10月28日甘肃夏河5.8级地震与M₂波潮汐因子和相位滞后动态变化有较好的对应(图3)。究其原因可能与区域地壳应力变化导致含水层结构发生改变,譬如当地壳应力积累时,岩石微小形变会通过孔隙水压力传递,阻碍水流交换,使潮汐因子响应减弱,表现为低值。另外,地震前,含水层水流方向可能从垂向流为主转变为水平流为主,相位由超前向滞后转变。图3中的相位滞后曲线也表明了滞后也越來越明显。

6. 结论与讨论

本文利用频谱分析和调和分析等方法分析了甘盐池井水位的固体潮效应。结果表明:甘盐池井水位中由气压引起的S₂波和K₁波振幅都最大,说明该井水位气压效应显著。除了S₂波外,M₂波和N₂波的潮汐因子略高于井水位观测系统的最低灵敏度0.22 mm/10⁻⁹体应变,说明甘盐池井含水层裂隙较发育,存在破碎和风化现象,与外界存在一定水力联系,这与该井受2条边界走滑断层影响的地质构造条件是一致的。另外,日波群和半日波群中各分波存在周期短的波其相位滞后通常比较小的现象,反之亦然。

由前述表1可以看出,S₂波潮汐因子和振幅都最大,但潮汐因子误差次小。而M₂波潮汐因子和振幅都次大,但潮汐因子误差最小。另外,考虑到M₂波更稳定,可选择M₂波来分析甘盐池井的潮汐因子、潮汐因子误差、相位滞后、相位滞后误差和观测幅度等参数。

通过系统分析甘盐池井水位主要潮汐分波,各分波的潮汐因子、潮汐因子误差、相位滞后、相位滞后误差和观测幅度等参数,可以更好地理解该井地下水系统的动态特性,为异常甄别和震情跟踪服务。

在线性、均质、各向同性的多孔介质系统中,系统对强迫周期的响应存在时间延迟,在低频(长周期)强迫下,系统响应滞后显著;在高频(短周期)强迫下,系统响应滞后减小[14][15]。本文也仅是通过甘盐池一口井分析了该井水位的固体潮效应,从频谱分析中也看到了周期越短相位滞后越小的现象。实际的地下水对潮汐的响应由于受环境干扰、人为干扰、观测系统以及阻尼比、渗透系数、储水系数等变化影响,周期越短相位滞后越小的水动力学机制是复杂的,今后还需进行大量细致的研究。

基金项目

项目等级:省部级;项目名称:清水河流域南段国家地下水监测工程观测井用于地震观测的可行性研究;项目编号:2023AAC03810。

参考文献

- [1] 丁风和,刘耀炜,韩晓雷,等.基于井潮、气压效应的苏皖地区突出水位异常分析[J].地震学报,2017,39(2): 248-256.
- [2] 丁风和,罗国富,戴勇.地震观测井地下水承压性判定方法研究与实例[M].北京:地震出版社,2021.
- [3] 丁风和,车用太,刘耀炜,等.地震观测井地下水埋藏类型判定方法及依据[J].地震研究,2022,45(2): 284-289.
- [4] 车用太,鱼金子.地震地下流体学[M].北京:气象出版社,2006.
- [5] 汪成民,车用太,万迪堃,等.地下水微动态研究[M].北京:地震出版社,1988.
- [6] Van Der Kamp, G. and Gale, J.E. (1983) Theory of Earth Tide and Barometric Effects in Porous Formations with Compressible Grains. *Water Resources Research*, **19**, 538-544. <https://doi.org/10.1029/wr019i002p00538>
- [7] Rojstaczer, S. and Riley, F.S. (1990) Response of the Water Level in a Well to Earth Tides and Atmospheric Loading under Unconfined Conditions. *Water Resources Research*, **26**, 1803-1817. <https://doi.org/10.1029/wr026i008p01803>
- [8] Toll, N.J. and Rasmussen, T.C. (2007) Removal of Barometric Pressure Effects and Earth Tides from Observed Water Levels. *Groundwater*, **45**, 101-105. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00254.x>

- [9] 李春洪, 陈益惠, 田竹君. 井-含水层系统对固体潮的动态响应及其影响因素[J]. 中国地震, 1990, 6(2): 37-45.
- [10] 史浙明, 王广才. 承压含水层地下水位固体潮潮汐因子和相位滞后与汶川地震的关系[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(7): 1132-1140.
- [11] 张昭栋, 郑金涵, 张广城. 水井含水层系统的潮汐响应函数[J]. 西北地震学报, 1995, 17(3): 66-71.
- [12] Bredehoeft, J.D. (1967) Response of Well-Aquifer Systems to Earth Tides. *Journal of Geophysical Research*, **72**, 3075-3087. <https://doi.org/10.1029/jz072i012p03075>
- [13] 刘序俨, 郑小菁, 王林, 等. 承压井水位观测系统对体应变的响应机制分析[J]. 地球物理学报, 2009, 52(12): 3147-3157.
- [14] 周江存, 潘尔年, 孙和平. 基于球形地球孔隙弹性潮汐理论的井水位固体潮模拟[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(11): 2061-2070.
- [15] Nigate, F., Yenehun, A., Belay, A.S., et al. (2025) Temporal Variability of Groundwater Levels and Flow System Dynamics in the Semi-Humid Tropical Volcanic Highlands of Ethiopia. *Hydrogeology*, **33**, 1279-1305.