Advances in Geosciences 地球科学前沿, 2025, 15(8), 1229-1237
Published Online August 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ag
https://doi.org/10.12677/ag.2025.158115

Hans汉斯

海原小山四分量钻孔应变异常分析

王　静，李国斌，王晨曦

宁夏回族自治区地震局，宁夏　银川

收稿日期：2025年6月5日；录用日期：2025年8月17日；发布日期：2025年8月27日

摘　要

海原小山钻孔应变第二分量、第三分量自2020年8月15日以来，由上升(张性)变化转为下降(压性)变化，存在异常变化。本文通过走访调查排除了抽水应用，通过相似变化对比分析和模型计算认为此次异常变化为降雨所致。

关键词

海原小山，钻孔应变，异常

Analysis of Anomalies in the Four-Component Borehole Strain at Haiyuan Xiaoshan

Jing Wang, Guobin Li, Chenxi Wang

Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan Ningxia

Received: Jun. 5th, 2025; accepted: Aug. 17th, 2025; published: Aug. 27th, 2025

Abstract

Since August 15, 2020, the second and third components of the borehole strain at Haiyuan Xiaoshan have shifted from an upward (tensile) trend to a downward (compressive) trend, exhibiting anomalous variations. This study rules out groundwater extraction as the cause through field investigations. By conducting a comparative analysis of similar variations and model calculations, it is concluded that the observed anomalies are attributed to rainfall.

Keywords

Haiyuan Xiaoshan, Borehole Strain, Anomaly

文章引用: 王静, 李国斌, 王晨曦. 海原小山四分量钻孔应变异常分析[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(8): 1229-1237.
DOI: 10.12677/ag.2025.158115

Copyright © 2025 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

海原小山钻孔应变第二分量、第三分量自 2020 年 8 月 15 日以来，由上升(张性)变化转为下降(压性)变化(图 1)。自观测以来，类似变化共有 13 次，其中，2016 年 4 月 1 日至 2016 年 4 月 4 日、2016 年 7 月 18 日至 2016 年 7 月 22 日、2017 年 8 月 22 日至 2019 年 9 月 1 日、2018 年 7 月 11 日至 2018 年 8 月 21 日异常之后，宁夏境内有 ML4 级以上或较远区域有 ML5.0 级以上地震发生。相关研究表明，多次显著地震前钻孔应变存在异常[1]-[9]，对该异常进行深入分析，对地震预测具有重要意义。

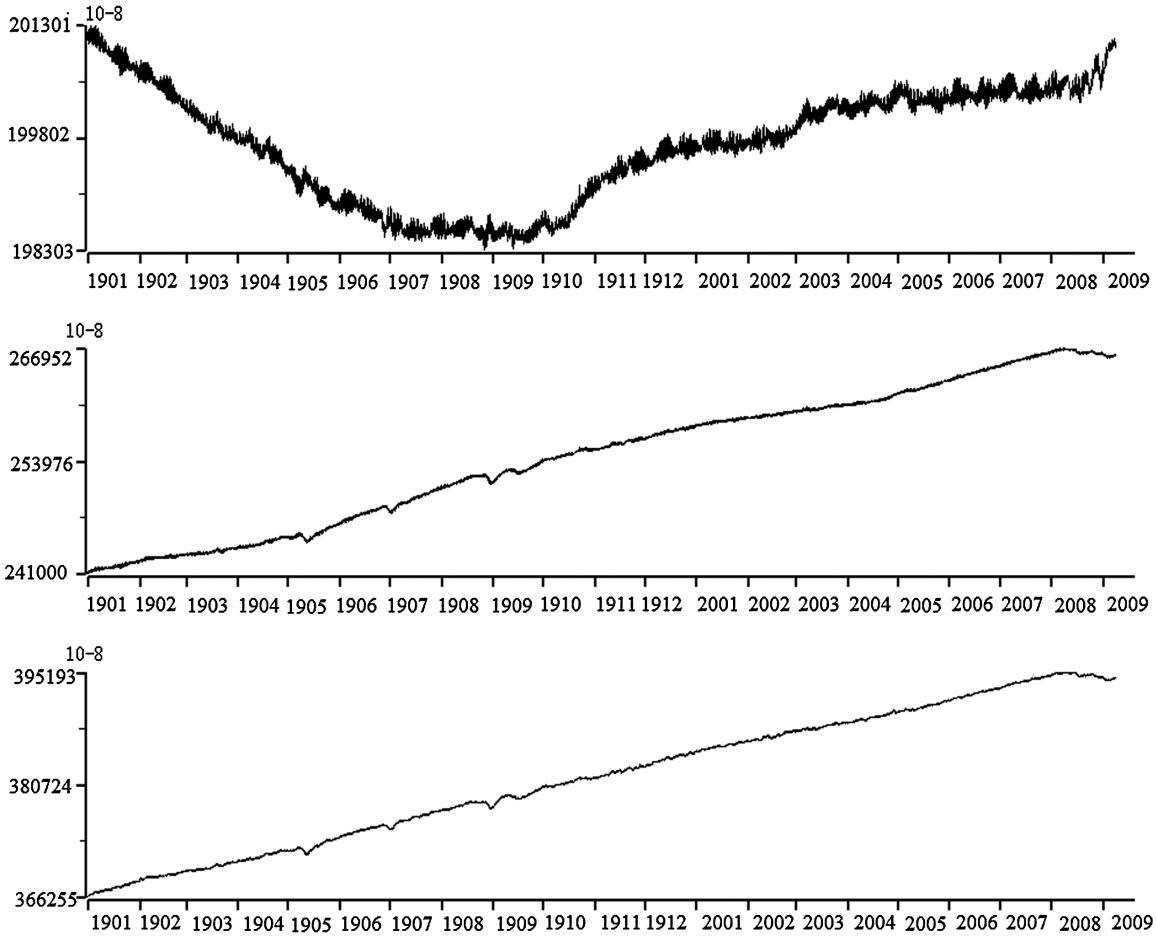


Figure 1. Abnormal variation curves of the second and third components of borehole strain at Haiyuan Station (Xiaoshan)
图 1. 海原台(小山)钻孔应变第二、第三分量异常变化曲线

2. 台站及观测系统介绍

2.1. 台站地理、地质构造情况及基础资料

海原台小山观测点地处中卫市海原县南华山(N36.51˚, E105.60˚)，海拔 2194 m，属黄河中游黄土丘陵

沟壑区(图 2)。地貌受弧形推覆构造的控制，以低中山为主，境内丘陵起伏，沟壑纵横，山脉走向多与构造线方向一致。其中南华山呈西北－东南走向，为六盘山余脉，由南向北深入，依次为南华山、西华山、月亮山等，形成西南高、东北低的特殊地形，南部以南华山主峰马万山为最高，海拔 2955 m，是宁夏南部最高峰。这一地区地势高寒，雨量较多，有少量天然次生林零星分布。观测点距海原县城约 11 km，测点西侧为海原盆地，其间丘陵起伏，沟壑纵横交错，植被稀疏，水土流失严重，黄土丘陵占 66%，土石山区占 1.6%，塬地占 4.4%，河谷川地占 20.9%。具有随海拔高度变化的典型山地气候。月平均气温为 9.8℃，最热月在 7 月，降雨主要集中在每年 5~9 月，占全年的 77.6%降水量。

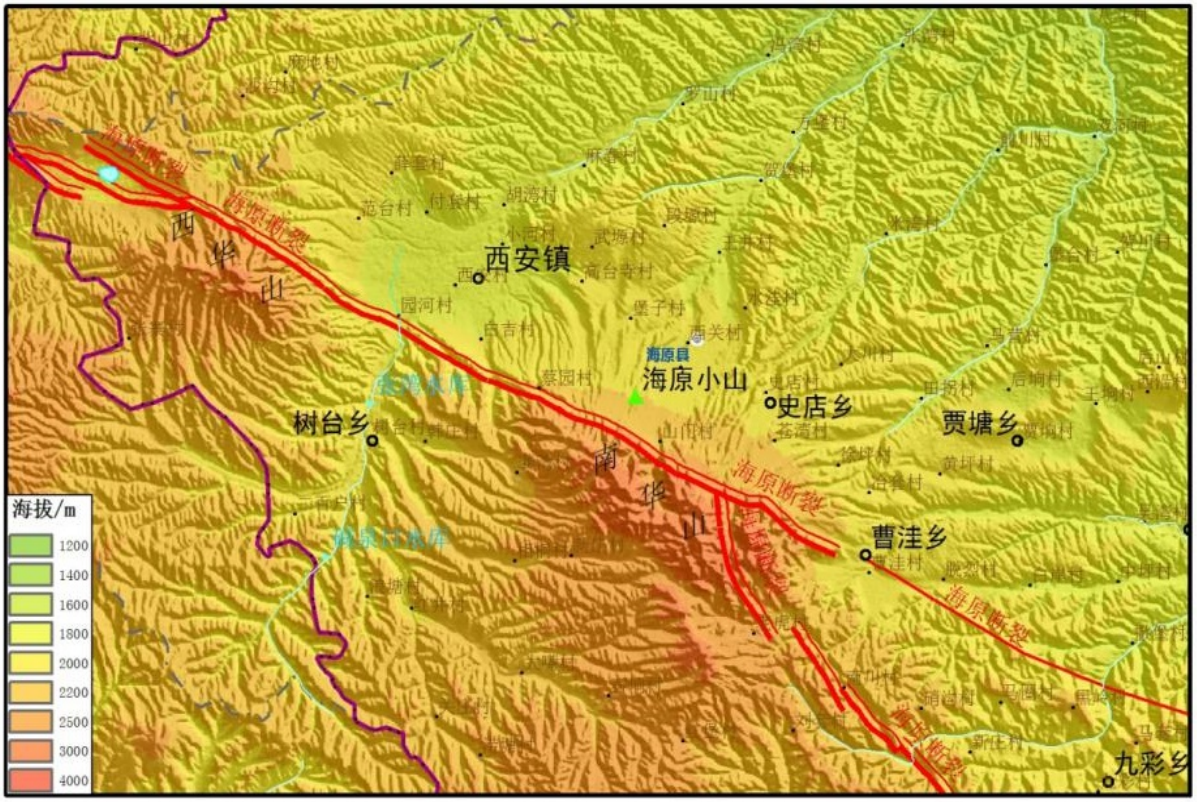


Figure 2. Geographical location and tectonic geomorphology distribution map of Xiaoshan Station, Haiyuan observatory
图 2. 海原台小山地理位置及构造地貌分布图

区域内弧形山地组成地貌骨架，小山观测点总体上位于海原断裂带的米家山－南华山－六盘山带弧形山地带。该带为海原断裂带的延伸最长、宽度最大、组成最复杂的一列弧形山地带，山地带西侧为第四纪盆地海原盆地，山地带的东北侧与盆地之间为活动断裂带[10]。

在活动构造上，测点所在的南、西华山北麓断层是海原活动断裂带中最主要的一条次级剪切断层。断层东起曹洼以东，经乱堆子、油房院、刺儿沟、菜园、大沟门和杨户章沟，向西延伸至干盐池盆地北缘，长达 73 km 左右。这是一条产状和力学性质多变的活动断层，其走向为 305˚~310˚，而倾向及活动方式在不同的区段是变化的，总的来说断层以左旋走滑运动为主，兼有不同性质的倾滑分量。在断层两端和盆地边缘，断层多向盆地倾斜，表现为正走滑断层，而其中段则为逆走滑断层[10]。由于断层较长，活动性质多变，其中山门至菜园段为测点所在断裂，该段断层由近于平行的断层组成一条断裂带，断层左旋错动河流、冲沟、阶地及洪积扇，在小山附近断层倾向为南西倾斜。观测点位于 NW 向海原断裂带中

段主干活动断裂(南西华山东北缘断裂) SW 盘上，距主断裂的地表迹线 400~450 m。该断裂也是 1920 年宁夏海原 8 1/2 级巨大地震破裂的核心段落，新构造活动性质以左旋走滑为主，兼有一定的逆冲运动分量。断层两盘的地貌差异十分明显，南盘为高耸的山体，北盘为广阔的盆地。小山探槽揭示断层产状为210˚∠54˚。断层倾向山里，发育于前寒武系基岩破碎带上。地震地表破裂表现为一系列雁行式排列的张裂缝。

2.2. 台站观测系统介绍

海原小山观测点位于南华山沟口山坡上，测点背靠山坡，面朝沟口，距海原断裂带主破裂带仅几百米，台站勘选时有多位专家学者对该点位的选取给予高度肯定。海原小山架设两套形变观测仪器，即钻孔倾斜仪和钻孔应变仪，两井孔相距不到 5 m，测点形变观测仪器参数如表 1 所示，该点同时配有钻孔水位和钻孔气压观测。

Table 1. Deformation monitoring instruments and equipment at Haiyuan Station (Xiaoshan)
表 1. 海原台(小山)形变观测仪器设备表

仪器名称	分向	型号	数量	技术指标	记录方式	投入观测时间	备注
钻孔倾斜	EW/NS	CZB-1	1	$1\times10^{-3"}$	数采	2007.8	十五
钻孔应变	四分量	YRY-4	1	1×10^{-10}	数采	2007.9	十五

海原台(小山)钻孔应变仪架设于 2007 年 9 月，为“十五”数字化观测项目，分量钻孔应变包括 4 个应变分量和钻孔水位、钻孔气压共六个测向，应变分量方位为第一分量(北南) 111˚、第二分量(东西) 156˚、第三分量(北东) 201˚、第四分量(北西) 246˚。海原小山钻孔应变孔深 60.37 m，钻孔在 28.6~37.9 米间有一段较完整的灰岩层，仪器探头安装于 36.5 米处，安装时稳定水位距井口 15 米(图 3)。

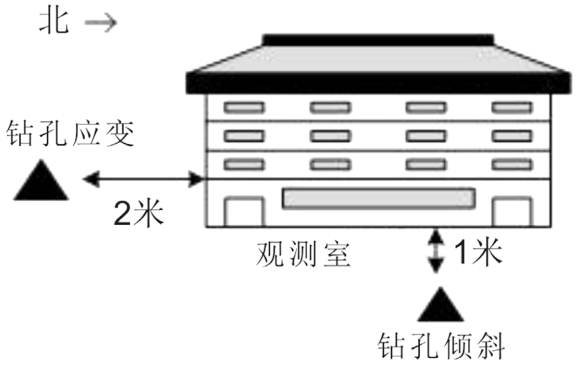
3. 钻孔应变仪自洽性分析

钻孔应变观测中，通过 4 组径向测微传感元件测量 4 个方向圆筒直径的微小变化，各组元件依次相隔 45˚。当测量仪器探头放入地层钻孔，并用耦合介质(特制水泥)将探头与地层连为一体后，通过仪器测量系统就能获得地层钻孔 4 个方向的钻孔孔壁径向位移 S。四个分量观测数据具有检验观测内在质量的自检功能，$S_1 + S_3 = S_2 + S_4$ 即自洽原理，利用这一原理即相互垂直方向上的应变之和(面应变)为不变量的特点对不同元件的应变观测进行互检，由此判断仪器状态、评定资料内在质量。图 4 为 $S_1 + S_3$ (黑色)和 $S_2 + S_4$ (蓝色)曲线对比图，从图中可以看出，2013 年底，$S_2 + S_4$ (蓝色)曲线出现转折下降，而 $S_1 + S_3$ (黑色)曲线未出现，两条曲线出现背离，除此以外，其余时间 $S_1 + S_3$ (黑色)与 $S_2 + S_4$ (蓝色)相关性较好，特别是 2019 年以来两条曲线几乎重合，符合自洽原理，观测资料内在质量较好，能够真实反映地下构造变形。

4. 钻孔应变异常分析

4.1. 抽水影响分析

测点北东方向以往存在机井抽水，主要供县城用水，机井基本位于海原县城内，分布如图 5 所示，距离测点最近约 4.7 km，最远约 6.4 km，18 口机井长期处于抽水状态，平均每口机井抽水量为 800 m^3/d。2016 年 5 月以来，海原县城周边用水情况发生一定变化，由原来的地下抽水、南华山自流水供给逐渐更换为调用黄河水，两年前大部分机井已停止抽水，仅剩西北方向分布的三口机井在抽水，即耙子洼(11 号机井)、安桥铺(2 号机井)、大树坑(2 号机井)。宁夏水投中源水务有限公司海原分局为其管理者，交流后



海原井下应变钻孔柱状图

开孔日期：2006年9月22日　　钻孔位置：宁夏海原县城西南山边
终孔日期：2007年10月18日　　孔　号：DZ—海1
设计孔深：60米　　施工单位：宁夏地质工程勘察院
终孔深度：60.37米　　钻机型号：GXY—150

地层时代	层底深度(m)	单层厚度(m)	钻孔结构图	地层柱状图(1:150)	地层名称	岩性描述
Q_4	2.60	2.60	Φ146mm		含砾砂性土	主要为土黄色砾土组成,为风积物和坡积物,大于4mm以上的确砾占30%左右，较松散，2.6m处严重
	17.42	14.82			碎石土	主要为坡积物,局部见块石,11-12米处极其松散施工中多处漏浆,并有探头石。
O	26.65	9.23			碎裂带	为青灰-灰黑色粉砾岩,岩芯均呈破碎状,云母含量极高,漏浆较严重,在底部26米处,粉砂岩结构较完整,为浅灰-灰黑色,矿物粒度较均一,局部含岩屑和小砾石。
	28.66	2.01			灰黑色岩石	较破碎,颗粒呈次棱角状,中间夹层含白色片状云母,岩芯单节长度大于20cm的有三节
	37.97	9.31	130mm		青灰色灰岩	较完整,块状构造。在29。0-29.25米含方解石脉。新鲜裂隙面倾角52度裂隙面闭合。
	52.49	14.52			碎裂岩	极其破碎,岩芯呈粉末状,含沙量大,施工中漏浆掉块现象很严重。
	58.37	3.88			青灰色灰岩	较完整,长度大于30-40cm的岩样有8节,岩芯采取率为83%,灰岩岩样累计长度2.81米,该段推荐为下入仪器段。
	60.37	2.00			灰黑色青岩	较破碎，岩芯采取不均匀，单节岩芯为16cm

编图：李彦平　　制图：朱冬霞　　审核：郭永峰

Figure 3. Location and stratigraphic column of the strain well at Xiaoshan, Haiyuan
图 3. 海原小山钻孔应变井孔位置与柱状图

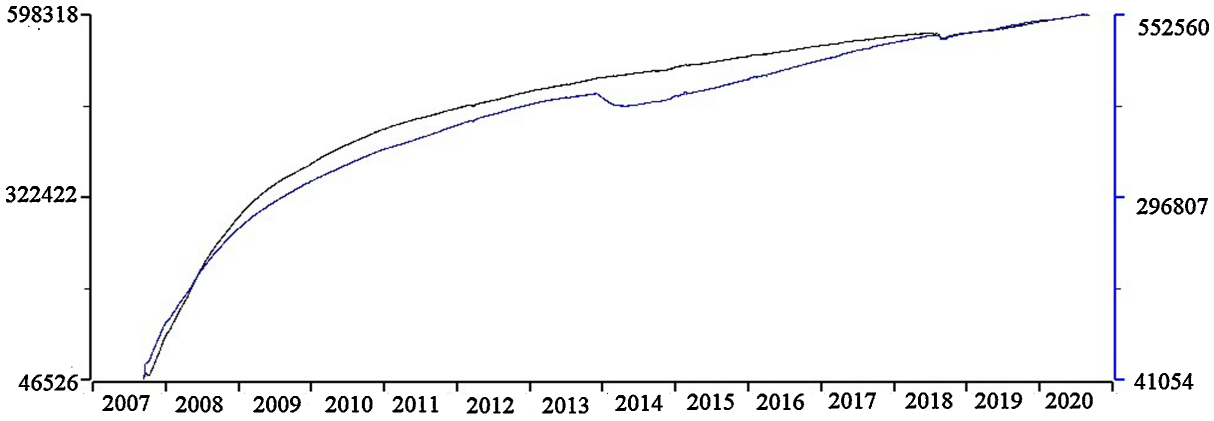


Figure 4. Self-consistent strain curves of the Haiyuan platform (small hill) borehole ($S_1 + S_3$ in black, $S_2 + S_4$ in blue)
图 4. 海原台(小山)钻孔应变自洽曲线($S_1 + S_3$ 黑色，$S_2 + S_4$ 蓝色)

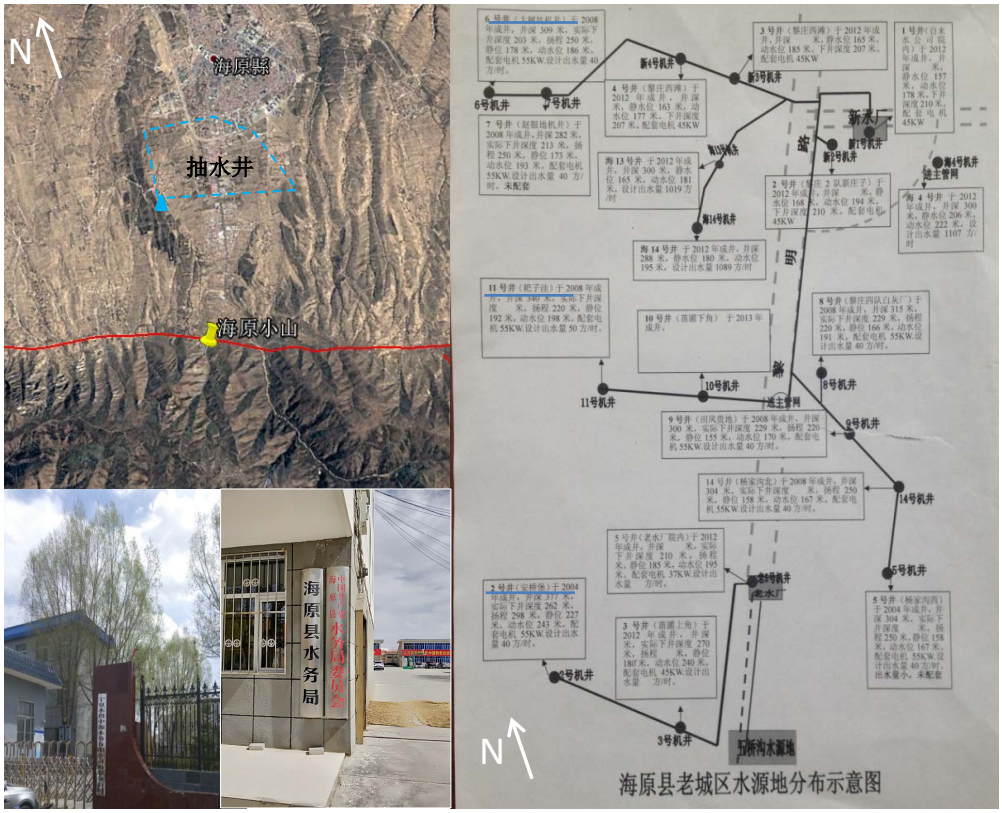


Figure 5. Investigation and consultation curve of water pumping from surrounding wells
图 5. 周边机井抽水情况调查与咨询曲线图

表示 2018 年开始海原小山周边地下水泉水出露逐渐增多，出水量有所增大，抽水有所减少，且 3 口抽水井距离海原小山测点较小，抽水对海原小山钻孔应变存在影响的可能性较小。

4.2. 降雨影响分析

4.2.1. 相似异常变化分析

为了分析降雨对钻孔应变的影响，本文统计了 2014 年以来连续数天累积降雨量达 20 mm 以上时的

钻孔应变第二分量、第三分量变化及所有钻孔应变第二分量、第三分量发生趋势转折变化时的降雨量，见表 2，从中可以得到如下特点，① 除 2018 年 7 月 2 日钻孔应变小幅度变化外，其余钻孔应变第二分量、第三分量发生转折之前，均有显著降雨发生。② 在 27 次降雨事件中，有 7 次没有发生趋势转折压性变化，降雨后钻孔应变发生转折的比例达 74%，七次未发生转折的情况中，降雨量日值在 20 mm~50 mm 之间，降雨量累积量不大；③ 降雨累积量与钻孔应变分量变化幅度之间没有规律的关系；最大降雨量时段为 2017 年 8 月 20 日至 8 月 29 日，第二分量、第三分量的变化幅度仅为 434.04×10^{-10}、313.44×10^{-10}；最小降雨累积量时段 2016 年 3 月 20 日至 2016 年 3 月 25 日，为 20.7 mm，第二分量、第三分量变化幅度分别为 2181.138×10^{-10}、2012.163×10^{-10}，变化幅度仅次于 2018 年 8 月 13 日至 9 月 2 日，即大降雨量可能对应小幅度应变变化，而小降雨量可能对应大幅度应变变化；大部分时段，降雨量集中在 20~60 mm，而应变变化幅度集中在 200×10^{-10}~400×10^{-10}。④除 2016 年 3 月 20 日至 3 月 25 日降雨外，其余钻孔应变变化均发生于降雨后 1~2 天或降雨过程中，2016 年 3 月 20 日至 3 月 25 日降雨发生后 6 天，才发生钻孔应变变化，故 2016 年 4 月 1 日开始的应变变化应与降雨无关。

4.2.2. 模型定量分析

为了定量研究降雨量对钻孔应变的影响，本文继续进行了两方面分析：

(1) 利用闫伟的降雨量与海原钻孔应变变化的回归程序，建立了降雨累积量与钻孔应变变化的回归模型。两个分量的回归模型结果为：

第二分量：$y = 47.6607x + 552.9123$　　CF = 0.34205

第三分量：$y = 32.5398x + 323.5993$　　CF = 0.2873

两个分量模型拟合的 CF 值均较小，模型拟合效果欠佳；利用回归模型，根据降雨累积量反算第二分量、第三分量钻孔应变变化，得到的应变变化远大于实际应变变化；这些都进一步证实，钻孔应变与降雨累积量之间不存在显著的函数关系，无规律可寻。

(2) 使用钻孔应变变化幅度/降雨累积量，计算每 mm 降雨累积量对应的钻孔应变变化，为了清晰的反映一次持续的降雨事件对钻孔应变的影响，本文将连续降雨时段进行了合并，计算结果如表 3 所示，13 次有钻孔应变变化对应的降雨时间中，2016 年 3 月 20 日至 2016 年 3 月 25 日和 2018 年 7 月 11 日至 7 月 21 日两个时段，钻孔应变变化量/降雨量量值远大于其它时间，表明每 mm 降雨量对应的钻孔应变变化较大。

4.2.3. 降雨影响机理分析

降雨量对钻孔应变的影响较复杂，需具体问题具体分析，降雨时，地层受到压力挤压会增大含水层的孔隙压力，即呈现短期的压性增强，导致钻孔应变呈下降变化。邱泽华还发现当降雨汇集在观测点附近时，降雨对钻孔应变的影响存在放大效应；当地面发生积水时，降雨可能引起钻孔应变上升[11]。海原小山测点出现的降雨累积量与应变变化幅度不存在函数相关的现象可以从两方面考虑：

① 海原小山测点位于半山腰，相对较高，北面为一冲沟，雨水汇集在冲沟，冲沟处压力增大，地面下移，相对地，位于上面的海原小山测点抬升，这在一定程度上减小了降雨带来的压力，即冲沟雨水汇集可能缩小降雨对钻孔应变的影响。由于这种缩小作用，较大的降雨量可能引起较小的钻孔应变变化，当降雨量不是很大时，可能不能引起钻孔应变变化。

② 当降雨量较小，而钻孔应变变化较大时，由于海原小山测点位于高地，降雨对钻孔应变的影响不存在放大效应，钻孔应变变化除受降雨量影响外，剩余部分应为由构造变形引起。

此次海原台(小山)钻孔应变变化，经历了三次下降、每次下降发生前，均有显著降雨发生，且降雨停止之后，有所回升。三次累积降雨为 125.3 mm，第二分量、第三分量变化幅度分别为 1077.8×10^{-10}、

1296.7×10^{-10}，1 mm 降雨量相当于引起 8 个单位的第二分量变化、10 个单位的第三分量变化，与大多数情况类似，认为此次海原台(小山)钻孔应变变化为降雨所致。

Table 2. Statistics of cumulative rainfall and strain changes in the Xiaoshan drilling hole at Haiyuan Station
表 2. 降雨累积量与海原台(小山)钻孔应变变化统计

降雨时段	降雨累积量	异常时段	第二分量异常幅度	第三分量异常幅度	降雨滞后时间	钻孔倾斜变化
20140708~20140709	76.1	2014710~20140714	486.888	289.033	降雨后 2 天	无变化
20140906~2014916	83.1	20140917~20140927	983.358	1113.819	降雨后 1 天	有，同步
20150708~20150709	30.5	无变化	0	0	无变化	无变化
20150803	44.4	无变化	0	0	无变化	无变化
20160320~20160325	20.7	20160401~20160404	2181.138	2012.163	降雨后 6 天	有，同步
20160520~20160524	25.3	无变化	0	0	无变化	无变化
20160718	42.8	20160718~20160722	419.7014	295.821	降雨过程中	有，同步
20160813~20160815	57.4	无变化	0	0	无变化	无变化
20160823~20160825	77.8	20180823~20160826	419.5785	520.2951	降雨过程中	有，同步
20170602~20170610	38.3	无变化	0	0	无变化	无变化
20170820~20170829	173.7	2017082~20170901	434.0399	313.439	降雨过程中	有，同步
20171008~20171011	48.1	无变化	0	0	无变化	无变化
无降雨		20180702~20180705	318.89	258.9		缺数
20180710	23.4	20180711~20180721	1260.59	1175.2	降雨后 1 天	有，同步
20180719~20180723	36.7	20180721~20180731	175.2	210.9	降雨后 2 天	有，同步
20180813~20190902	146.3	20180820~20180908	10914.9	8918.6	降雨过程中	有，同步
20190427	36.2	20190428~20190502		26.5	降雨后 1 天	有，同步
20190505~20190510	105.5	20190508~20190512	960.17	1031.199	降雨过程中	有，同步

Table 3. Relationship between changes in borehole strain and accumulated rainfall
表 3. 钻孔应变变化与降雨累积量的关系

异常时段	降雨时段	第二分量变化幅度/降雨	第三分量变化幅度/降雨	与周边中强地震关系
20140710~20140714	20140708~20140709	6.40	3.80	无
20140917~20140927	20140906~2014916	11.83	13.40	无
20160401~20160404	20160320~20160325	105.37	97.21	2016 年 4 月 11 日中宁 ML4.4 级地震
20160718~20160722	20160718	9.81	6.91	2016 年 7 月 30 日景泰 ML4.1 级地震
20180823~20160826	20160823~20160825	5.39	6.69	无
20170822~20170901	20170820~20170829	2.50	1.80	2017 年 9 月 2 日固原 ML5.0 级地震
20180711~20180721	20180710~20190902	59.84	49.93	2018 年 9 月 12 日汉中 ML5.6 级地震
20190428~20190502	20190427	0.85	0.73	无
20190508~20190512	20190505~20190510	9.10	9.77	无

续表

20200626~20200631	20190612~20190627	9.03	7.24	无
20190729~20190801	20190726~20190727	15.47	14.07	无
20190827~20190901	20190820~20190901	10.07	9.59	无
20200815~20200829	20200811~20200930	8.59	10.34	无

4.3. 结论

经统计和模型计算，除 2018 年 7 月 2 日至 7 月 5 日小幅度异常外，其他海原台(小山)钻孔应变压性变化前均有降雨发生，且大多情况下，每 mm 降雨量所对应的钻孔应变变化在 16 个单位以下，但由于降雨对钻孔应变影响的复杂性，降雨累积量与钻孔应变变化之间不存在明确的函数关系。

此次海原台(小山)钻孔应变变化，经历了三次下降、每次下降发生前，均有显著降雨发生，且降雨停止之后，有所回升。1 mm 降雨量相当于引起 9 个单位的第二分量变化、10 个单位的第三分量变化，与大多数情况类似，故认为此次海原台(小山)钻孔应变变化为降雨所致。

基金项目

宁夏自然科学基金(2023AAC03806)。

参考文献

[1] 延海军, 张文鑫, 沈宁, 等. 银川 M4.8 地震震前应变异常特征分析[J]. 防灾减灾学报, 2025, 41(2): 88-94.

[2] 孙玺皓, 李霞, 张丽峰, 等. 2023 年积石山 M_S6.2 地震前湟源地形变异常特征[J]. 华南地震, 2024, 44(S1): 124-125.

[3] 孙玺皓, 苏维刚, 冯丽丽, 等. 2021 年玛多 M_S7.4、2022 年门源 M_S6.9 地震前格尔木地形变异常特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2022, 43(S1): 236-238.

[4] 斯琴, 关冬晓, 王斌. 精河 M_S6.6 地震前应变高频异常分析[J]. 内陆地震, 2022, 36(3): 273-281.

[5] 张燕, 王迪晋, 赵莹, 等. 定点形变观测现状及研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 830-838.

[6] 杨文, 宋治平, 苑争一, 等. 2020 年 1 月 16 日新疆库车 5.6 级地震总结[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(3): 147-161.

[7] 杨顺, 程鹏图, 王晨曦, 等. 海原地震台钻孔应变震前短临异常特征研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(15): 5936-5941.

[8] 史小平, 张磊, 姜振海. 临夏台分量钻孔应变观测与岷县——漳县 6.6 级地震的相关性分析[J]. 地震工程学报, 2020, 42(2): 391-395.

[9] 张凌空, 牛安福. 姑咱台压应变异常信号与汶川和芦山等地震的关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(3): 317-322.

[10] 邓启东, 何寿欢, 吴欲文. 海原活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1990.

[11] 邱泽华. 钻孔应变观测理论与应用[M]. 北京: 地震出版社, 1997.