

色气湾台伸缩仪受水库蓄水载荷变化影响分析

李嘉昕

包头市地震局, 内蒙古 包头

收稿日期: 2025年8月20日; 录用日期: 2025年9月20日; 发布日期: 2025年9月29日

摘要

本文通过分析包头地区强降雨对包头市色气湾台伸缩仪观测资料的影响特征, 结合水库蓄水加卸载作用建立数值模型进行定量分析。结果表明, 荷载变化量产生的影响量级与伸缩仪的限定指标接近, 附近昆都仑水库的巨量蓄水对包头市色气湾台伸缩仪形变观测产生持续影响。

关键词

伸缩仪, 异常, 加卸载作用, 数值建模, 水库蓄水

Analysis of the Influence of Reservoir Water Storage Load Variation on the Extensometer at Seqiwan Bay

Jiaxin Li

Baotou City Earthquake Bureau, Baotou Inner Mongolia

Received: Aug. 20th, 2025; accepted: Sep. 20th, 2025; published: Sep. 29th, 2025

Abstract

In this paper, the influence characteristics of heavy rainfall in Baotou area on the observation data of the extensometer at Saqiwan platform in Botou City are analyzed, and a numerical model is established for quantitative analysis in combination with the water storage and unloading effect of the reservoir. The results show that the magnitude of influence generated by the load change is close to the limit index of the extensometer, and the massive water storage of the nearby Kundulun reservoir has a sustained effect on deformation observation of the extensometer at Saqiwan platform in Baotou City.

Keywords

Extensometer, Anomaly, Loading and Unloading Effects, Numerical Modeling, Reservoir Impoundment

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/>



1. 引言

2018 年包头地区遭遇强降雨天气(图 1)，2018 年 4 月~10 月的总降雨量为 646.5 mm，其中 2018 年 7 月 19 日~7 月 24 日降雨量为 230 mm，单日最大降雨量为 90 mm (以上数据由包头市气象局提供)。2018 年 7 月 20 日起，包头市色气湾台伸缩仪出现大幅度的异常变化，打破年变规律。该异常变化为 2006 年建台以来首次出现，特别是在鄂尔多斯块体北缘地震长期平静的大背景下，引起观测人员的高度关注。本文通过收集附近水库的水位及蓄水量变化，定量分析其与形变异常的相关性，对包头市色气湾台伸缩仪异常记录给出较为合理的解释，为地震预测研究和危险区判定提供技术支持。

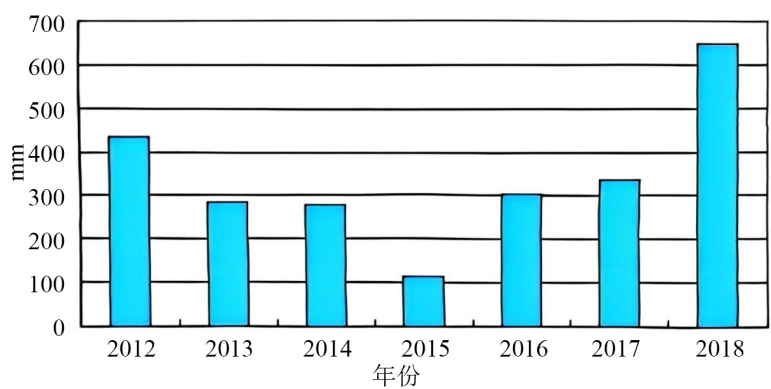


Figure 1. Comparison of average rainfall in Baotou from 2015 to 2018 (data provided by Baotou Meteorological Bureau)
图 1. 包头市 2015~2018 年平均降雨量对比(数据由包头市气象局提供)

2. 台站基本情况概述

包头市色气湾台位于乌拉山山前断裂北侧，上覆岩石厚度大于 50 m，基岩为花岗片麻岩，洞内日温差小于 0.03℃，年温差小于 0.1℃，湿度大于 80%，干扰背景小，观测条件优越，详细参数见表 1。

Table 1. Parameters of the observation chamber at Seqiwan Station in Baotou City
表 1. 包头市色气湾台观测洞室参数

山洞			仪器洞室			仪器墩	
进深	覆盖	年温变幅	日温变幅	相对湿度	基础	相对高差	
85 m	50 m	0.1℃	<0.03℃	NS: 80% EW: 80%	花岗片麻岩	NS: 0.02 m EW: 0.03 m	

包头市色气湾台 2006 年运行以来，伸缩仪运行稳定，观测精度高于全国台站平均水平，仪器参数见

表 2。

Table 2. Deformation observation instrument parameters

表 2. 形变观测仪器参数

仪器名称	型号	生产厂家	数量	观测精度	灵敏度	记录方式	投入观测时间
洞体应变仪	SS-Y	武汉地震研究所	1	10	0.001	数字记录	2006-11

3. 形变异常形态特征

包头市在 2018 年 7 月 19 日~7 月 23 日发生强降雨, 包头市色气湾台伸缩仪出现大幅度异常变化, 并打破年变规律, 伸缩仪于 10 月下旬恢复正常。

伸缩仪(SS-Y)异常变化描述

2018 年 7 月 19 日起, 洞体应变仪 2 个分量出现同步异常变化(图 2), 1 阶差分曲线均超过 2 倍方差, 打破年变规律。其中, EW 向表现为大幅度负向漂移, 由缓慢压性状态转变为加速压性。2018 年 7 月 19 日~2018 年 9 月 1 日负漂幅度达 5800×10^{-10} , 是正常变化的 5 倍; NS 向也表现为大幅度负向漂移, 由缓慢张性状态转变为强烈压性, 2018 年 7 月 19 日~2018 年 9 月 1 日负漂幅度达 3500×10^{-10} , 异常变化幅度前所未有。伸缩仪 2 个方向异常的持续时间不同, EW 向异常畸变持续时间为 40 d, 2018 年 9 月 10 日恢复, NS 向持续时间为 48 d, 2018 年 9 月 18 日恢复。

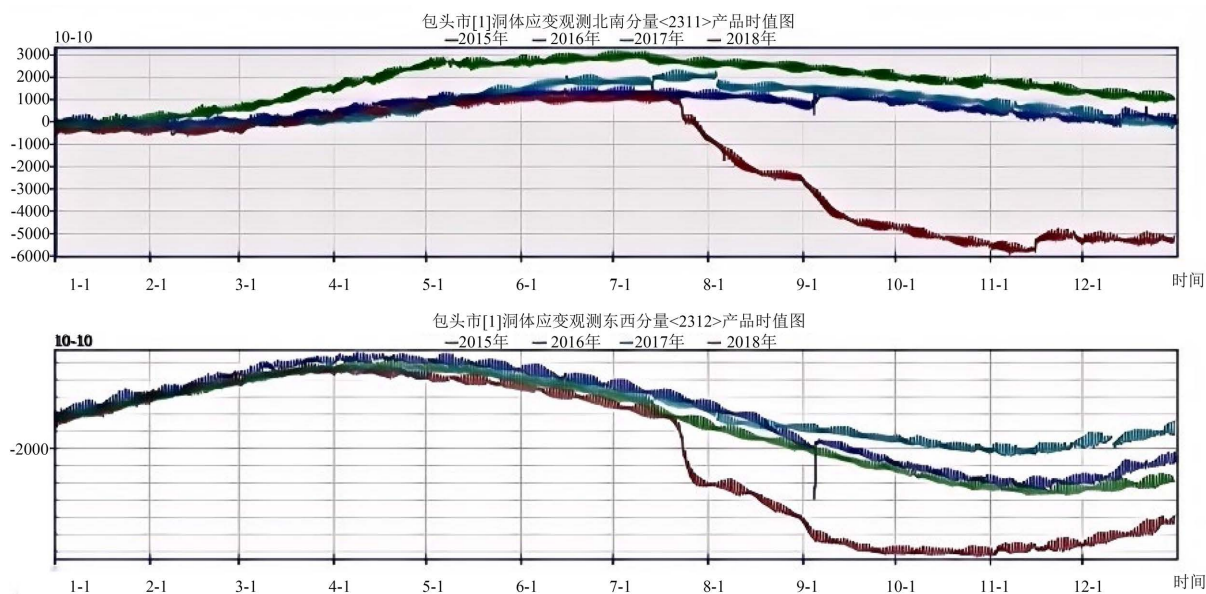


Figure 2. Comparison curve of the whole-time value of the tunnel strain gauge

图 2. 洞体应变仪整时值对比曲线

4. 水库蓄水加卸载作用数值建模定量分析

4.1. 昆都仑水库位置

昆都仑水库位于包头市色气湾台西北方向约 7.22 km 处, 2016 年~2017 年因为干旱, 蓄水量仅余 50 万 m^3 , 2018 年 7 月 20 日~7 月 23 日暴雨导致水库蓄水量由枯水期的 600 万 m^3 突增到 3540 万 m^3 , 使水

库水位升高了 6.36 m, 达到历史最高水位。7 月 23 日 12:00~7 月 25 日 08:30 水库开闸向下游的昆都仑河泄洪, 泄洪量为 2056.77 万 m^3 , 泄洪后水库容量保持在 2000 万 m^3 左右(以上数据由包头市水库管护中心提供), 东西向水库载荷的巨大变化, 有可能对东西向的洞体应变仪观测记录产生持续影响。

4.2. 水库蓄水加卸载作用形变机理解析

地层受到的载荷作用发生变化时, 会产生一定形变。在加卸载作用下, 不同弹性模量的岩石内部发生形变也会不同, 例如: 岩石加载后弹性变化、岩石加载后弹塑性变化、弹性岩石卸载前原始状态、弹性岩石卸载后变化、弹塑性岩石卸载前原始状态、弹塑性岩石卸载后变化, 六种模型(图 3)。水库载荷可以改变库区岩体应力场(图 3(a)), 如果岩石弹性模量较大(如闪长岩、花岗岩、灰岩等), 则易发生弹性应变; 如果岩石弹性模量较小(如泥灰岩、石膏等), 则易发生弹塑性应变。包头市色气湾台伸缩仪所处基岩为花岗岩, 弹性模量较大, 水库蓄水导致载荷加载, 基岩发生弹性应变, 载荷体应变表现为张性变化(图 3(b)) [1]。

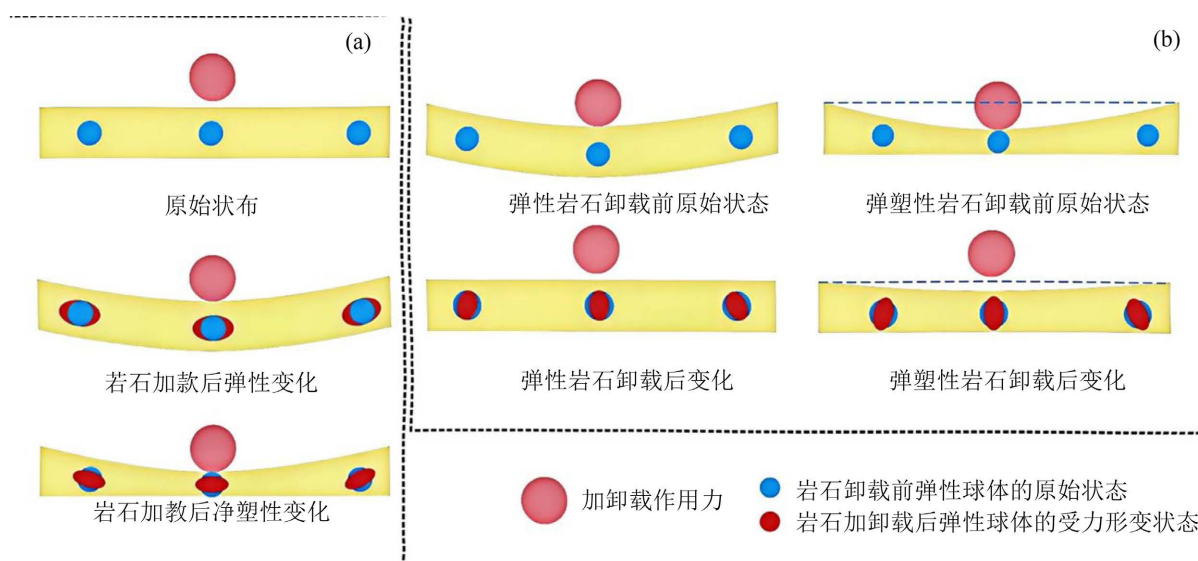


Figure 3. Deformation mode models of different lithologic rocks under loading and unloading (a) original state; (b) elastic rock, elastoplastic rock

图 3. 不同岩性岩石在加卸载作用下形变模式模型(a)原始状态; (b) 弹性岩石、弹塑性岩石

4.3. 地表载荷影响力学模型

当半无限弹性体平面体上作用着垂直集中力 P 时, 半无限体内任意一点 $A(x, y, z)$ 所引起的应力解的布辛奈斯克(Boussinesq)表达式为:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{R^5} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{360 \times 60 \times 60}{2\pi} \tan^{-1} \left[(\varepsilon_{z1} - \varepsilon_{z2}) / d \right] \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{3P}{2\pi} \left\{ \frac{y^2 z}{R^5} + \frac{1-2\mu}{3} \left[\frac{R^2 - Rz - z^2}{R^3 (R+z)} - \frac{y^2 (2R+z)}{R^2 (R+z)^2} \right] \right\} \quad (3)$$

式中, P 为作用于坐标原点并垂直于地面的集中应力, μ 为泊松比, R 为载荷力作用点至参考点的距离, z 为载荷力作用点至参考点距离的垂直投影。由弹性力学可知, 各向同性弹性体所处的空间应力状态可表

示为:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (4)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (6)$$

式中, E 为岩石弹性模量, ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的线应变 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的法向应力。

本文研究的是载荷 P 在点 $A(x, y, z)$ 引起的应变变化, 故此处的 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 可由式(1)~(3)给出, 则形变因载荷作用所产生的变化量为:

$$\theta = \frac{360 \times 60 \times 60}{2\pi} \tan^{-1} [(\varepsilon_{z1} - \varepsilon_{z2})/d] \quad (7)$$

式中, d 为伸缩仪基线长度。

为定量分析水库蓄水造成的荷载变化对包头市色气湾台伸缩仪观测数据的影响, 根据地表荷载影响的力学模型, 从理论上计算荷载变化引起的包头市色气湾台伸缩仪观测值变化。

水库载荷模拟的计算结果见表 3, 其中, 蓄水造成的荷载增加量 $P = (3.43 - 0.060) \times 10^{11}$ N, 水库中心至伸缩仪观测洞室的水平距离 $r = 7.22 \times 10^3$ m, $x = 2.32 \times 10^3$, $y_1 = 6.8377 \times 10^3$ m, $d = 0.3$ m, $y_2 = y_1 + d = 6.838 \times 10^3$ m; 水库蓄水位 1155 m, 台站海拔高度 1330 m, 取 $z = -175$ m, 包头市色气湾台山洞岩性为花岗岩, 岩石弹性模量 $E = (5.08 - 5.41) \times 10^4$ mPa, 泊松比 $\mu = 0.16 - 0.18$ [2]。

Table 3. Reservoir load simulation results

表 3. 水库载荷模拟计算结果

仪器名称	水库蓄水量/ 10^7 m ³	岩石参数		模拟计算理论值/ 10^{-6}
		弹性模量/ 10^4 mPa	泊松比	
伸缩仪	3.43	5.08	0.16	-1.41231
	3.43	5.08	0.18	-1.41231

按照地表荷载影响的力学模型及岩层加载载荷变形机理, 蓄水阶段荷载引起的伸缩仪应变量的理论极值为 -1.41231×10^{-6} (表 3)。包头市色气湾台 2018 年 7 月 20 日~2018 年 9 月 1 日伸缩仪水平应变的变化量范围为 3000×10^{-10} ~ 6000×10^{-10} (表 4), 若考虑模型计算误差, 理论计算值和实际异常值比较接近。参考应变干扰的限定指标, 应变的最低分辨率为 1.455×10^{-8} , 水库蓄水造成的荷载变化超过了应变干扰的限定指标 1.455×10^{-8} , 因此认为, 包头市色气湾台西北方向昆都仑水库蓄水对包头市色气湾台伸缩仪的异常变化存在影响。

Table 4. Abnormal changes in extensometer

表 4. 伸缩仪异常变化量

仪器	测项	异常值/ 10^{-10}
伸缩仪	EW 分量异常变化量	6000
	NS 分量异常变化量	3000

5. 讨论

已有文献资料表明，应变固体潮的异常变化主要与洞室温度、大气压、集中降雨、台站周边蓄水体荷载等变化有关。大气压变化使观测点附近岩体受到与岩体方向垂直的应力变化，对岩体应变量产生影响。降雨期间，雨水一部分直接入渗台站所在山体岩层，受雨水荷载附加垂向应力，应变表现为压性变化。降雨期间水库水位急剧变化导致水库荷载及周围岩体所受压强变化，对岩体应变量产生影响。

1、本文通过分析强降雨期间，昆都仑水库蓄水到泄洪的载荷变化对伸缩仪应变变化产生的影响(表5)，初步给出定量的结果，地应变变化开始时间滞后于降雨开始时间。

通过建立理论模型定量分析荷载对应变观测的影响，该方法在荷载距离应变观测较近、或者荷载变化量较大时才较为有效，因为地壳结构复杂，假定的模型是建立在各向同性弹性体的空间应力状态下的，距离越远或者荷载变化量越小则模型的准确性越差。作者今后还会对理论值与观测值存在差异的潜在原因进行深入研究。

Table 5. Statistics of strain changes of extensometer during rainfall
表 5. 降雨期间伸缩仪应变变化统计表

2018 年变化时段(月 - 日)	NS 向变化量(10^{-10})	EW 向变化量(10^{-10})	体应变变化量(10^{-10})	水库蓄水量(M^3)
7-19~7-23	160.8	600.5	507.5	3540 万
7-23~7-25	776.6	1676.4	1635.3	3000 万左右
7-25~7-28	132.6	1271.1	935.8	2000 万左右
7-28~08-01	678.9	291.5	646.9	2000 万左右
08-01~08-10	459.6	230.6	460.1	2000 万左右
08-10~08-20	663.7	757.1	947.2	2000 万左右
08-20~09-01	191.5	998.3	793.2	2000 万左右
09-01~09-03	344.9	488.2	555.4	2000 万左右

2、强降雨期间，孔隙弹性形变也会对伸缩仪产生影响，影响孔隙弹性形变的核心参数包括介质性质、降雨特征及地质结构。包头地区 2018 年 7 月 23 日最大降雨量为 90 mm，色气湾地震台表层覆盖岩体多为裂隙岩体，如遇短时间强降雨易发生快速孔隙水压累积，触发显著弹性形变。由于色气湾地震台目前没有孔隙弹性形变相关的监测技术和数据研究，因此暂时无法评估其在此次形变异常的相关性。

6. 结语

通过对水库蓄水加卸载作用的数值建模进行定量分析发现，昆都仑水库蓄水荷载产生的应变变化量与伸缩仪干扰的限定指标接近，足以对包头市色气湾台的形变记录产生持续影响。因此，2018 年 7 月 20 日至 2018 年 9 月 1 日包头市色气湾台伸缩仪的显著异常与强降雨导致附近水库蓄水量增加及水位上升有关。

基金项目

内蒙古自治区地震局局长基金课题(项目编号：2025QN33)。

参考文献

[1] 熊峰, 陈立峰, 查斯, 刘永梅. 黄河蓄水工程对乌海体应变影响[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(3): 86-90.
[2] 谢仁海, 渠天祥, 钱光谟. 构造地质学[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2007: 25-37.