•土木工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202500163

本刊网刊

多源数据驱动的膨胀土渠道边坡变形及影响因素分析方法

张妤涵[1],胡　江[1,2],李　星[1,2*]

(1.南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室,江苏 南京 210029;2.水利部大坝安全管理中心,江苏 南京 210029)

摘　要:当前深挖方膨胀土渠道边坡变形的监测和分析多局限于单一尺度,缺乏不同尺度间的系统分析和对比研究。首先,以某调水工程深挖方膨胀土渠坡(桩号8+886～12+921)为研究对象,综合运用小基线集合成孔径雷达干涉测量(SBAS–InSAR)技术与传统变形监测手段开展研究。采用SBAS–InSAR技术处理128景Sentinel–1A影像数据,通过表面沉降监测数据验证SBAS–InSAR结果的可靠性,识别变形速率大于10 mm/a的渠段。其次,结合SBAS–InSAR数据与内部测斜监测数据,从空间上系统分析渠坡的内外部变形特征。最后,选取渠坡地下水位、渠道水位、温度、降雨及时效等影响因子,构建基于注意力机制的自解释神经网络渠坡变形预测模型,分析各因子对渠坡变形的影响大小。结果表明:SBAS–InSAR技术与传统监测手段的变形结果差值小于3 mm,两种监测方法得到的变形趋势一致,渠坡整体呈上抬变形状态,平均变形速率为−10～24 mm/a,其中,桩号11+806～12+921渠段变形较大;以11+700～11+800渠段内的孔径雷达干涉测量技术(InSAR)测点和测斜管数据为例,构建的变形预测模型具有较高精度;卫星视线方向(LOS)的表面变形与内部指向渠道中心线方向(A向)的位移均未表现出收敛趋势,其中,LOS向变形主要受地下水位、渠道水位及时效因素影响,而渠坡深度3.5 m以下的A向位移则主要与温度和时效因素相关。研究成果可为膨胀土渠坡的安全监控与风险防控提供科学依据和技术支撑。

关键词:膨胀土;渠坡;InSAR;变形;自解释神经网络;注意力机制

中图分类号:TV68　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)03-0270-13

膨胀土是自然地质作用下形成的一种具有胀缩性且呈裂隙发育的土体,富含蒙脱石、伊利石等黏土矿物,对于环境变化尤其是干湿变化极为敏感,具有很强的亲水性以及吸水膨胀、失水收缩的特性[1–2]。膨胀土胀缩性显著,膨胀时产生膨胀压力,收缩时形成收缩裂隙,反复胀缩会导致土体强度的衰减;部分早期形成的膨胀土因应力历史作用,处于超固结状态[3–4]。这些特性使膨胀土渠坡在自然作用和人为扰动下易发生变形和破坏,进一步诱发滑坡、崩塌等地质灾害[5]。南水北调中线工程总干渠全长1 432 km,沿线地质条件复杂,经过河南南阳、河北邯郸等膨胀土地区,穿越膨胀土渠道累计长约340 km[6]。开挖不但为渠坡滑坡失稳提供了临空条件,还联合卸荷与近地表强烈大气作用激活了膨胀土胀缩特性,改变了原本相对稳定的湿度场、温度场和地下水赋存状态,形成胀缩活动带[7–8]。深挖方膨胀土卸荷效应更明显、受大气影响更显著,开挖完成和通水运行初期的渠坡变形和稳定性尤其值得关注[9–11]。变形可反映边坡的变形趋势和稳定状况,变形监测和预测可为运行管理提供直接支撑。

为保障膨胀土渠坡的长期稳定性,调水工程按一定间距布设监测断面,采用水准测量、测斜管等传统方法开展变形观测。然而,传统监测手段空间分辨率较低,仅能获得有限监测点的局部变形信息,难以全面掌握非监测点处的变形状态及渠坡整体的变形趋势,存在漏测风险;此外,若密集布设监测点,不仅增加施工难度,也会显著提高工程成本。合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)凭借高时空分辨率、大范围连续监测、高精度、非接触式监测及适用于复杂地形等

收稿日期:2025－03－10　　**修回日期:**2025－04－02　　**网络出版日期:**2025－04－28

基金项目:国家自然科学基金项目(52179138;52209165);黄河水科学研究联合基金项目(U2443232);江西省水利科学院开放研究基金项目(2023SKSG03);湖南省水利科技项目(XSKJ202305949)

作者简介:张妤涵(2001—),女,硕士生. 研究方向:膨胀土渠坡失稳机理及安全监控. E-mail:1052097667@qq.com

* **通信作者:**李　星,高级工程师,E-mail:xingli@nhri.cn

优势，有效克服了传统监测方法的诸多局限[12]。同时，InSAR 卫星数据来源丰富，部分卫星数据可免费获取，监测成本较低，具有良好的工程应用前景。当前，InSAR 技术逐渐被应用于滑坡、地面沉降等地质灾害监测与预警。Kurka 等[13]对比分析干涉测量（D–InSAR）技术和 SBAS–InSAR 技术在膨胀土渠坡变形监测方面的应用，认为 SBAS–InSAR 方法具有受噪声和大气相位干扰更小的优势。张永光等[14]利用改进的 SBAS–InSAR 技术监测南水北调中线辉县段的沉降，发现辉县段膨胀土渠坡呈周期性沉降趋势。张双成等[15]采用基于高程改正的时序 InSAR 技术获取安康机场膨胀土边坡的地表变形并结合降水数据分析膨胀土填方边坡的变形规律。朱武等[16]将时序 InSAR 技术和奇异谱分析相结合，提取了膨胀土渠坡的变形特征。Li 等[17]利用 InSAR 技术获取膨胀土渠坡的位移，并反演其活动层深度。刘辉等[18]基于多源卫星 SAR 数据，完成了南水北调河南长葛段东西向、垂直向及南北向的三维变形时序分解，揭示了变形时空分布特征。尽管上述研究已利用 InSAR 技术实现了对膨胀土渠坡地表变形的监测，但受膨胀土边坡特性影响，膨胀土渠坡变形机制复杂，仅依赖单一数据源难以全面揭示其变形规律。因此，有必要将 InSAR 监测结果与传统内、外部位移监测数据相融合，从多尺度角度系统分析渠坡变形规律和机制，以提升监测解释的准确性与工程指导价值。为此，本文融合 InSAR 与传统监测手段，从不同尺度上对膨胀土渠坡进行监测，并在此基础上引入自解释神经网络（SENN）和注意力（attention）机制，构建多源数据驱动的渠坡变形预测模型，探讨其变形特征、主控因素及演化机制，为渠坡的安全监测与稳定性评估提供科学支撑。

1　研究区概况及研究数据

1.1　研究区概况

某重大调水工程渠首段位于河南省南阳市，穿越强膨胀土和中弱膨胀土区域，地质环境复杂。所处区域为湿润性大陆气候区，夏秋两季炎热多雨、冬春两季干燥少雨，多年平均降雨量为 815 mm，年降水集中在 6—9 月。选取桩号 8+886～12+921 长为 4.035 km 的深挖方膨胀土渠段作为研究区，其位置如图 1 所示，最大挖深为 47.5 m，属于中膨胀土段，局部具有强膨胀性。图 2 为渠道断面结构示意图。图 2 中，渠道底宽为 13.5 m，过水断面坡比为 1.0∶3.0，1 级马道宽为 5.0 m，以上每 6.0 m 设 1 级马道，除 4 级马道宽为 50.0 m 外，其余马道宽均为 2.0 m，1～4 级马道间坡比为 1.0∶2.5，5、6 级马道坡比为 1.0∶3.0。渠道全断面换填水泥改性土，其中，过水断面换填厚为 1.5 m，2～6 级马道换填厚为 1.0 m。

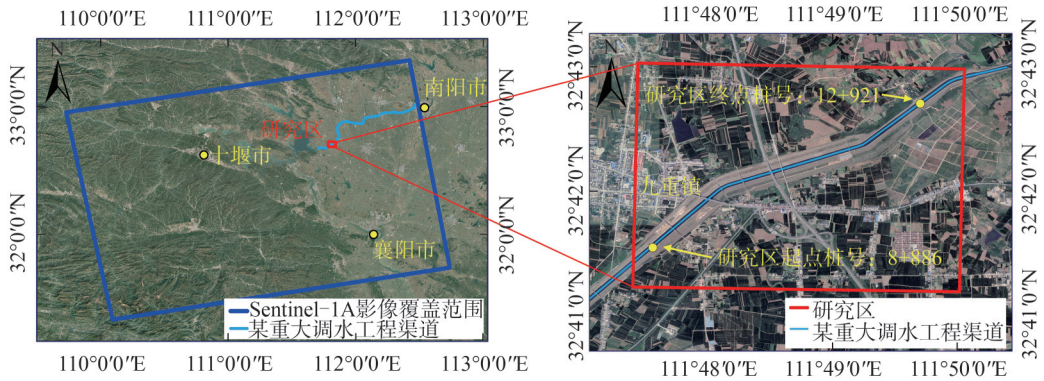


图 1　研究区位置

Fig. 1　Location of the study area

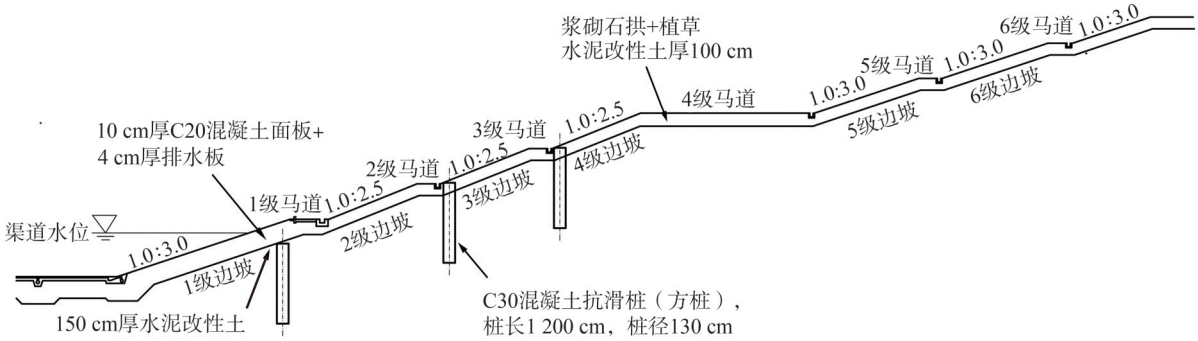


图 2　渠道断面结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the channel cross-section structure

1.2 研究数据

所用干涉测量数据选择欧洲空间局发射的Sentinel–1A卫星单式复数(SLC)升轨影像数据,时间跨度为2017年3月12日至2021年12月28日,共计128景,重访周期为12 d,其成像模式为干涉宽幅(IW),分辨率(距离向×方位向)为5 m×20 m。数字高程模型(DEM)采用美国NASA发布的SRTM_DEM数据,分辨率为30 m。卫星轨道数据采用POD(precise orbit ephemerides data)精密轨道数据。传统内外部变形监测数据采用垂直位移测点及测斜管指向渠道中心线方向(A向)的监测结果。

2 研究方法

2.1 SBAS–InSAR方法原理

小基线集技术(SBAS)[19]是基于D–InSAR和永久散射体干涉测量(PS–InSAR)技术的一种时序InSAR方法,这种方法利用高相干散射体上稳定可靠的相位信息,通过迭代拟合相位模型来估计和去除各类误差项,以提取微小变形信号。该方法能够处理长时间序列变形监测的问题,减少相位失相干和大气延迟效应的影响,从而获得更高质量的变形测量结果[20]。SBAS–InSAR技术原理及数据处理流程如图3所示。

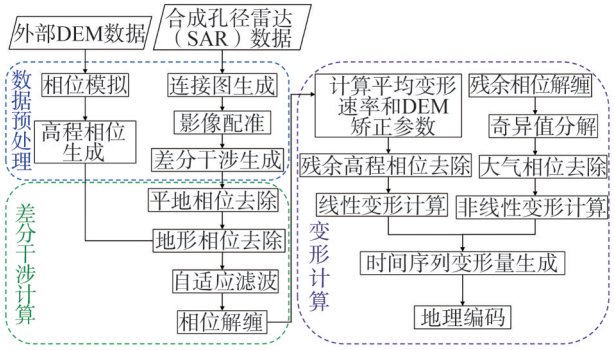


图3 SBAS–InSAR数据处理流程

Fig. 3 Flowchart of SBAS–InSAR data processing

假设共获取了覆盖同一区域的N+1(N为相邻时间段数量)幅SAR影像,通过影像配准、差分干涉图生成、地形相位去除、相位解缠处理后可以得到差分干涉图的总数量M($\frac{N+1}{2}\le M\le N\frac{N+1}{2}$),幅时空基线均小于某一阈值的差分干涉图。第$m$($1\le m\le M$)幅差分干涉图上任意一点的干涉相位可表示为:

$$\Delta d=d_{t\mathrm{B}}-d_{t\mathrm{A}} \tag{1}$$

$$\Delta\varphi_m=\varphi_{t\mathrm{B}}-\varphi_{t\mathrm{A}}\approx\frac{4\pi}{\lambda}\Delta d+\Delta\varphi_m^{\mathrm{topo}}+\Delta\varphi_m^{\mathrm{atm}}+\Delta\varphi_m^{\mathrm{noiae}} \tag{2}$$

式(1)、(2)中:$d_{t\mathrm{A}}$和$d_{t\mathrm{B}}$分别为t_{A}、t_{B}时刻相对于初始时刻t_0(即$d_{t0}\equiv0$)的视线方向累积变形量;$\Delta\varphi_m^{\mathrm{topo}}$、$\Delta\varphi_m^{\mathrm{atm}}$、$\Delta\varphi_m^{\mathrm{noise}}$分别为差分干涉图中残余的地形相位、大气延迟相位和噪声相位,可以通过选择一定数量具有高相干性的控制点,并根据其相位信息对残余相位进行估计;λ为卫星波长;Δd为视线向地表变形;Δ为差分符号;$\Delta\varphi_m$为第m幅差分干涉图上任意一点的干涉相位;$\varphi_{t\mathrm{A}}$、$\varphi_{t\mathrm{B}}$分别为t_{A}、t_{B}时刻相对于初始时刻的相位值。

根据控制点的相位信息对残余相位进行估计,将式(2)简化并表示为:

$$\Delta\varphi_m=\varphi_{t\mathrm{B}}-\varphi_{t\mathrm{A}}\approx\frac{4\pi}{\lambda}\Delta d=\sum_{k=t_{\mathrm{A},m}+1}^{t_{\mathrm{B},m}}((t_k-t_{k-1})v_k) \tag{3}$$

式中,$t_{\mathrm{A},m}$和$t_{\mathrm{B},m}$为第m幅差分干涉图对应主影像t_{B}和从影像t_{A}的索引,v_k为各时段的线性变形速率,k为时序变形的时段索引,t_k、t_{k-1}分别为第k、k–1景SAR影像的获取时间。

将式(3)转化为矩阵形式,可表示为:

$$\Delta\boldsymbol{\varphi}=\boldsymbol{A}v_k \tag{4}$$

式中:$\Delta\boldsymbol{\varphi}$为所有差分干涉对的干涉相位差向量;$\boldsymbol{A}$为$M\times N$的矩阵,由–1、0、1元素组成,$\boldsymbol{A}$为:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}-1&1&0&\cdots&0&0\\-1&0&1&\cdots&0&0\\\vdots&\vdots&\vdots&\ddots&\vdots&\vdots\\0&0&0&\cdots&-1&1\end{bmatrix} \tag{5}$$

式(4)的求解是一个最小二乘问题,采用奇异值分解方法将多个基线集联合求解,得到最终的累积变形时间序列或变形速率。

2.2 基于注意力机制的SENN渠坡变形预测模型

SENN模型的预测结果可分解为输入特征的贡献,每个特征对预测结果的贡献是明确的[21]。该模型通常由特征提取器从原始输入数据中提取高层特征,并通过解释器将提取的特征与预测结果建立关联。SENN通过局部线性近似的方法对模型的预测过程进行解释[22–23],其预测结果可表示为:

$$f(x)=\boldsymbol{\theta}(x)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}(x) \tag{6}$$

式中:$f(x)$为预测结果;$\boldsymbol{\theta}(x)$为特征提取器生成的特征;$\boldsymbol{\varphi}(x)$为解释器生成的权重,表示每个特征对预测结果的贡献;x为输入数据。

Attention机制根据输入数据不同部分的重要性,动态分配权重,并通过加权求和的方式,使模型能够聚焦于当前任务最重要的部分[24–25],其数学形式表示为:

$$\mathrm{Attention}(Q,K,V)=\mathrm{softmax}\left(\frac{QK}{\sqrt{d_k}V}\right) \tag{7}$$

式中:Attention(·)为注意力函数;Q为查询(Query),表示当前需要关注的内容;K为键(Key),表示输入数据的特征;V为值(Value),表示输入数据的具体信息;d_k为缩放

因子，用于防止内积过大；softmax 函数用于生成权重，表示各影响因子的重要性。

选取地下水位、渠道水位、气温、降雨量和时效作为影响因子，构建融合注意力机制的SENN渠坡变形预测模型。首先，通过SENN提取关键特征，并引入Attention机制动态分配各影响因子的权重；随后，利用SEEN的解释器将加权后的特征与渠坡变形预测结果建立映射关系，实现对卫星视线方向（LOS）和测斜管A向累计位移的预测。膨胀土渠坡的变形预测结果可表示为：

$$f(x)=\boldsymbol{\theta}(x)^{\mathrm{T}}\mathrm{Attention}(Q,K,V)\boldsymbol{\varphi}(x) \tag{8}$$

式中，$\mathrm{Attention}(Q,K,V)\boldsymbol{\varphi}(x)$为加权后的特征。

3　变形监测与预测模型结果

3.1　SBAS–InSAR变形监测可靠性验证

采用SBAS–InSAR技术处理覆盖研究区的128景升轨Sentinel–1A卫星影像，并在渠道两侧各提取200 m缓冲区，获取研究渠段2017年3月至2021年12月的LOS方向地表变形监测结果。LOS向位移是InSAR测量得到的地表变形在卫星视线方向上的一维投影分量，因受限于卫星飞行轨道和成像几何特征，InSAR技术对南北向位移变化不敏感，其监测结果主要反映地表在垂直方向和东西方向上的位移信息[20]。

研究区渠段沿线布设有表面水平和垂直位移测点，每间隔约100 m设置1个一般外观监测断面，采用水准仪和全站仪进行观测，以反映深挖方渠段沿线各处的渠坡表面变形情况。水平和垂直位移监测频率为每月1～4次。9+363断面和11+400断面左岸1～4级马道上布设了BM01、BM03、BM05和BM07共4个表面垂直位移测点。

为验证InSAR结果的可靠性，选取9+363左岸断面4级马道P1点及11+400左岸断面3级马道P2点，提取其变形时间序列，并将LOS向的变形投影到垂直方向上，与对应断面上1～4级马道表面垂直位移测点的监测数据进行对比。渠道9+363、11+400和11+850断面左岸渠坡表面垂直位移及InSAR测点布置示意图如图4所示。SBAS–InSAR监测结果与表面垂直测点监测结果对比情况如图5所示。

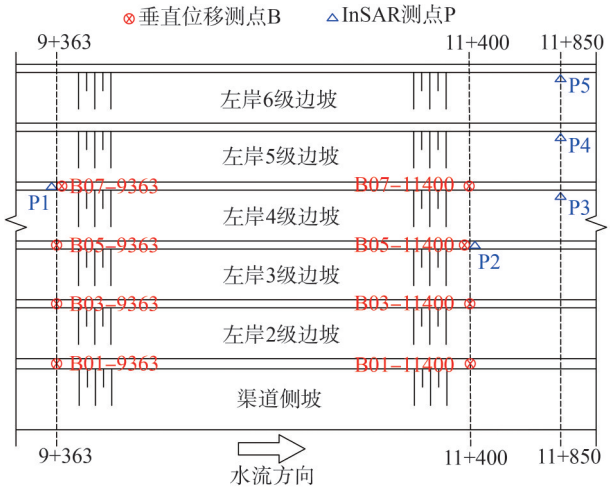


图4　渠道9+363、11+400和11+850断面左岸渠坡表面垂直位移及InSAR测点布置示意图

Fig. 4　Schematic diagram of vertical surface displaceent and InSAR monitoring points layout on the left bank canal slope at cross-sections 9+363, 11+400, and 11+850

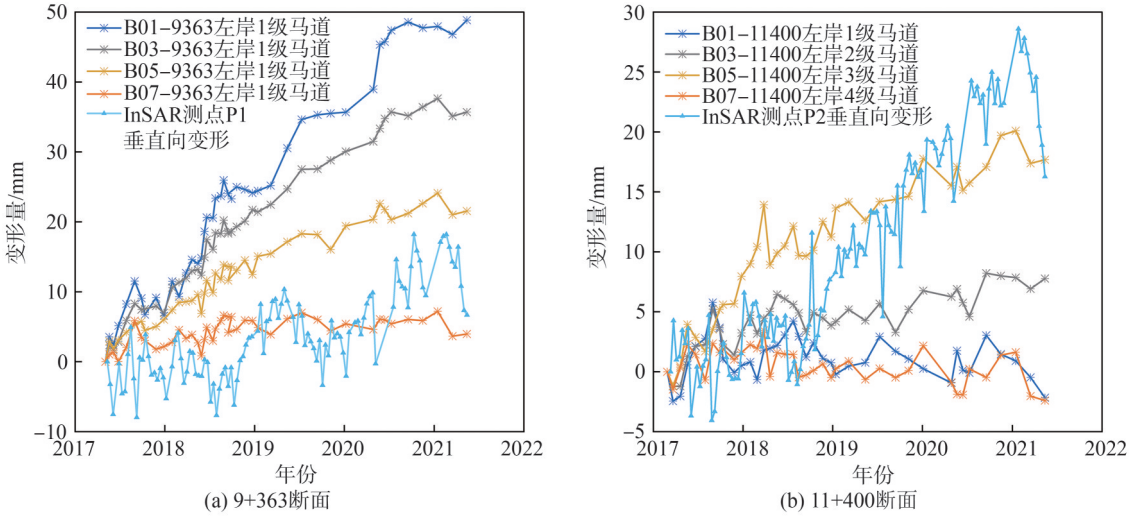


图5　SBAS–InSAR监测结果与表面垂直测点监测结果对比情况

Fig. 5　Comparison between SBAS–InSAR monitoring results and surface vertical monitoring point results

9+363断面左岸，1～4级马道的垂直位移均呈上抬变形，其中：1级马道的变形最大，且仍呈持续增长趋势；4级马道处，SBAS–InSAR监测结果和表面垂直位移测点监测结果差值为2.71 mm。11+400断面左岸，2、3级马道也表现出明显的上抬变形，而1～4级马道的变形较小，基本稳定，其中，3级马道的SBAS–

InSAR结果与垂直位移观测值的差值为−1.41 mm。两个测点的变形量差值均小于3 mm，且变形趋势整体一致，表明基于SBAS–InSAR技术获取的变形监测结果具有较高的精度与可靠性。

在工程实际应用中，传统监测手段仅能覆盖局部测点，难以全面反映整个渠坡的变形状态，且常规布设监测点多集中在1～4级渠坡，对5、6级渠坡的变形监测存在一定局限。这一局限性可能导致难以及时发现隐患。例如，在某段5级渠坡发生滑坡后（图6），现场管理人员才得知这一情况，影响了工程安全管理的及时性和有效性。相较而言，SBAS–InSAR技术具备大范围覆盖、高空间分辨率、全天候及非接触式监测等优势，能够识别微小变形区域，捕捉5、6级渠坡的变形趋势，弥补了传统监测方法在空间覆盖上的不足，有效提升监测的全面性与精度。此外，InSAR技术还可获取变形时间序列，支持对长期演化过程的监测和趋势预测，为工程安全管理提供更加科学的决策依据。为进一步分析渠坡变形，选取11+850断面4～6级渠坡上的P3、P4和P5这3个测点（图4），提取LOS向的变形时间序列进行研究，11+850断面垂直向变形时间序列如图7所示。结果表明，该渠坡存在明显的上抬变形趋势，其中，4、5级渠坡的变形较大，且4～6级呈逐渐减小的分布特征。2021年2月7日，渠坡变形量达到峰值。



(a) 5级渠坡滑坡



(b) 滑坡导致混凝土拱圈断裂

图6 5级渠坡滑坡

Fig. 6 Landslide of the fifth-level canal slope

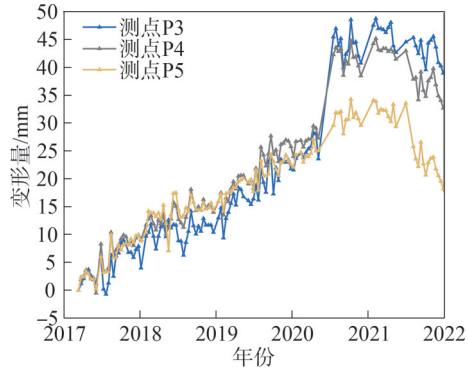


图7 11+850断面InSAR测点垂直向变形时间序列

Fig. 7 Vertical deformation time series of InSAR measurement points at section 11+850

3.2 SBAS–InSAR表面变形监测与预测模型结果

3.2.1 SBAS–InSAR表面变形监测结果

渠坡年平均变形速率如图8所示。由图8可知，研究渠段的变形速率为−10～24 mm/a（正值表示抬升，负值表示下沉），两侧渠坡存在上抬变形。结合历史监测数据与文献[26–27]，以10 mm/a变形速率为判别阈值，识别变形显著的区域。结果表明，9+263～12+921深挖方渠段中部分区域的变形速率大于10 mm/a，其中，11+806～12+921段为抬升速率较大的集中区域。

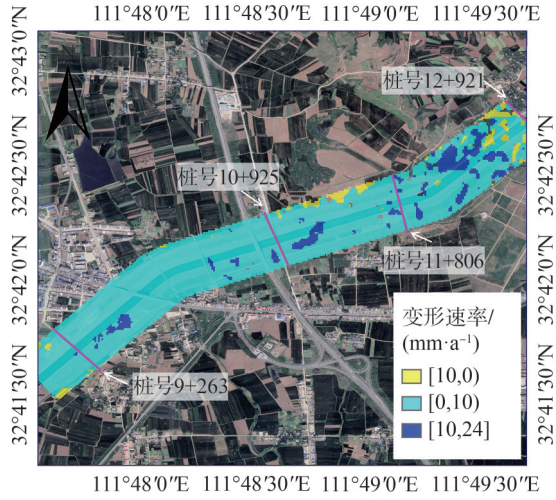


图8 渠坡年平均变形速率

Fig. 8 Annual average deformation rates of the channel slope

渠坡的累计变形量如图9所示。由图9可知，以2017年3月12日的影像数据为基准，2018年12月之前渠坡的变形较小，随后变形逐年加剧，LOS方向的正向位移持续增长。最大累计变形量为97 mm，出现在12+300断面附近；11+806～12+921渠段部分区域的累计变形量超过40 mm，而9+263～11+806渠段大部分区域变形量则小于40 mm。

为进一步分析重点区域的变形特征，截取11+806附近渠坡断面的变形数据，结果如图10所示，11+700～11+800渠道右岸1～4级渠坡的变形量较

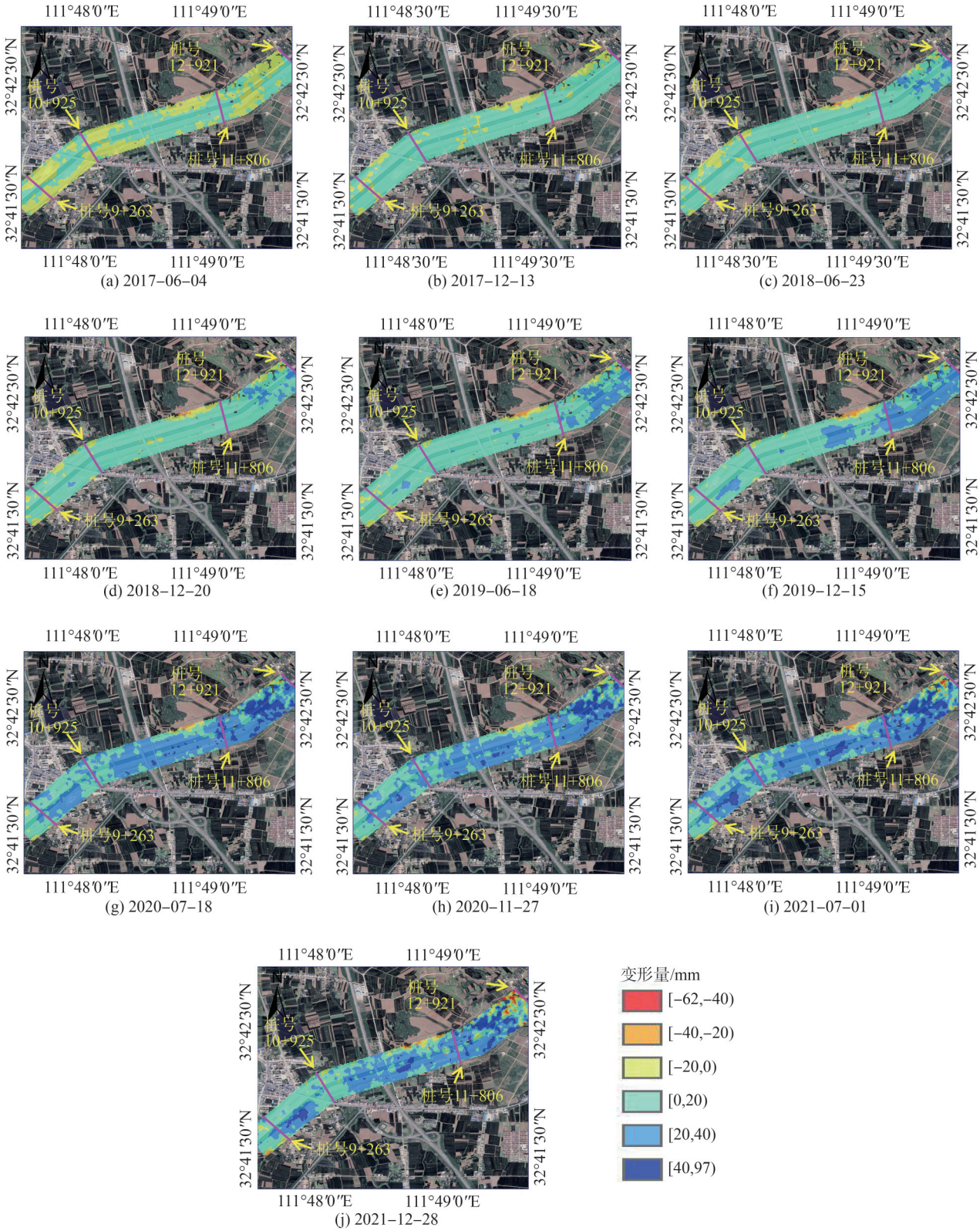


图9　渠坡累计变形量

Fig. 9　Cumulative deformation of the channel slope

大，最大累计变形量达46.00 mm；左右岸5、6级渠坡的变形量相对较小，最大累计变形量为32.56 mm。该段渠坡呈现显著的抬升特征，2017—2021年最大抬升速率达12.14 mm/a。整体来看，右岸渠坡的变形量普遍大于左岸。监测资料显示，3级马道右、左岸的地下水位范围分别为157.91～160.03 m和150.92～156.78 m，右岸地下水位明显高于左岸。较高的地下水位使右岸土体含水量增加，长期处于饱和状态，导

致土体反复膨胀和强度软化，进而促使右岸渠坡变形幅度显著大于左岸。

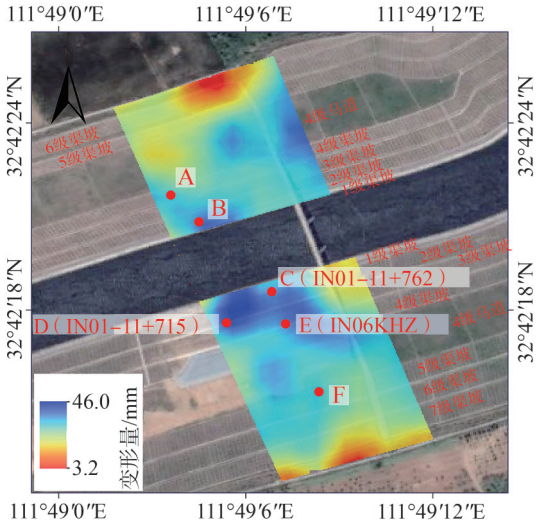
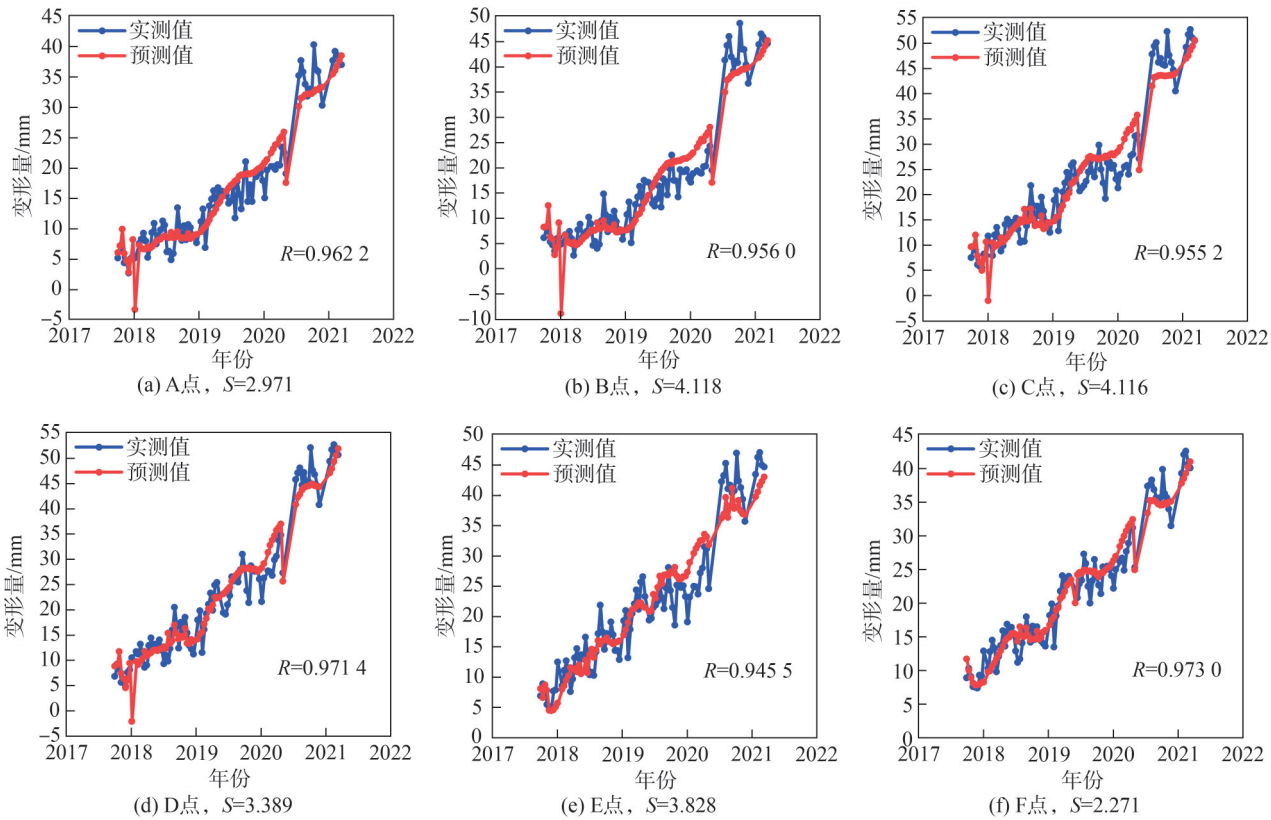


图 10　11+806 断面及附近渠坡累计变形量

Fig. 10　Cumulative deformation of the channel slope at section 11+806 and its vicinity

3.2.2　LOS 向变形预测模型结果

在 11+700～11+800 渠段中，结合变形量和测斜管布设情况，选取变形量大于 40 mm 的代表性测点 A～F（图 10），提取变形时间序列用于分析。其中，A、B 点分别位于左岸 4、2 级渠坡，C～F 点依次分布于右岸 1～3 和 5 级渠坡。由于仅收集到 2017 年 8 月 28 日至 2021 年 3 月 25 日期间的降雨量数据，故在该时间范围内建立基于注意力机制的 SENN 预测模型，对 A～F 这 6 个点的变形进行预测，结果如图 11 所示。图 11 中，R 为决定系数，S 为均方根误差。由图 11 可知，截至 2021 年 3 月，6 个点的变形均未收敛，仍处于缓慢增长阶段，且具有明显的季节性波动特征，但整体抬升趋势稳定。C、D 点的累计变形量最大，分别为 50.50 和 50.61 mm。根据 C～F 点的时间序列可知，右岸渠坡上 1～5 级渠坡的变形量呈逐级减小的趋势。A～F 点预测模型的决定系数均大于 0.94，所建模型具有良好的预测能力。



(a) A点，S=2.971　(b) B点，S=4.118　(c) C点，S=4.116

(d) D点，S=3.389　(e) E点，S=3.828　(f) F点，S=2.271

图 11　11+700～11+800 渠段 SBAS–InSAR 变形时间序列及模型预测值

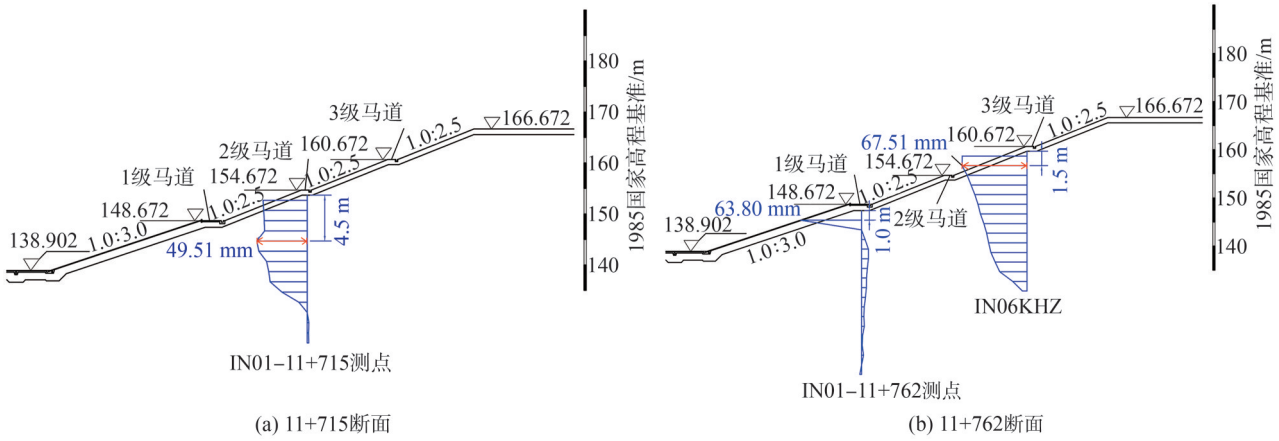
Fig. 11　Time series of SBAS–InSAR deformation and model prediction values for the channel section 11+700～11+800

3.3　测斜管内部变形监测与预测模型结果

3.3.1　测斜管内部变形监测结果

为分析膨胀土渠坡内部不同深度处的变形特征，本文利用测斜管监测数据对渠坡内部 A 向（指向渠道中心线方向为正，反之为负）变形进行研究。研究范围为 11+700～11+800 渠段，在右岸 11+715 断面 2 级马道，11+762 断面 1、3 级马道（图 10 中 D、C、E 3 点）布设了测斜管，分别监测渠道左右岸方向（A 向）及渠道上下游方向（B 向，指向下游方向为正，反之为负）的内部变形情况，本文聚焦 A 向累计位移分析。截至

2021 年 3 月，A 向累计位移分布如图 12 所示，11+715 断面 2 级马道测点在距孔口 4.5 m 深度处出现最大位移，达 49.51 mm，该测点在距孔口 10.5 m 深度处表现出明显变形。11+762 断面 1 级马道在孔口以下 1.0 m 深度处变形最大，累计位移为 63.80 mm，其余深度的位移较小；11+762 断面 3 级马道在 1.5 m 深度处达到最大位移 67.51 mm，变形深度延伸至孔口以下 13.5 m。



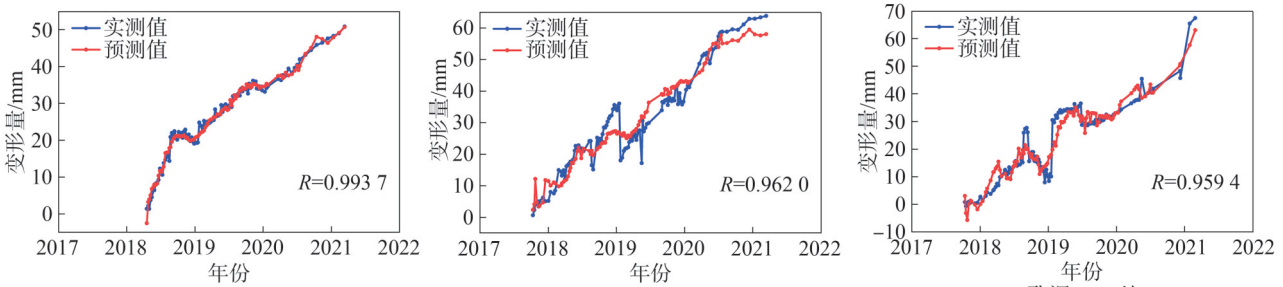
(a) 11+715断面　　(b) 11+762断面

图 12　不同渠道断面 A 向累计位移分布

Fig. 12　Distribution of cumulative displacement in the A-direction of different canal cross sections

3.3.2　A 向变形预测模型结果

3 个测斜管测点的 A 向累计位移及其模型预测值如图 13 所示。由图 13 可知：模型的决定系数均大于 0.95，建模精度较高，能较好地反映膨胀土渠坡内部 A 向累计变形的变化趋势；3 个测点的累计变形仍在继续增加，11+762 断面 3 级马道处的内部变形最大。



(a) IN01–11+715孔深4.5 m处，S=1.299　(b) IN01–11+762孔深1.0 m处，S=4.454　(c) IN06KHZ孔深1.5 m处，S=4.121

图 13　A 向累计位移及其模型预测值

Fig. 13　Cumulative displacements in the A-direction and its model prediction values

4　融合多源数据的变形规律及影响因素分析

4.1　表面变形规律及影响因素分析

LOS 向累计位移预测模型各分量占比如图 14 所示。由图 14 可知，渠坡变形主要受地下水位、渠道水位及时效影响，其中：时效分量在 6 个测点中均占较高比例，对变形具有显著影响；地下水位对右岸渠坡变形影响较大，D 点地下水位分量占比最高，是该点变形的主导因素。相较之下，左岸渠坡变形更易受渠道水位变化影响。此外，温度和降雨因子的影响占比较小，不是导致变形的主要因素。在衬砌板完好的情况下，渠道水位对渠坡变形产生的影响有限[28]，然而，A、B 两点渠道水位分量占比较高，推测其变形与渠道水位变化高度相关。结合现场条件分析，推测 A、B 两点衬砌

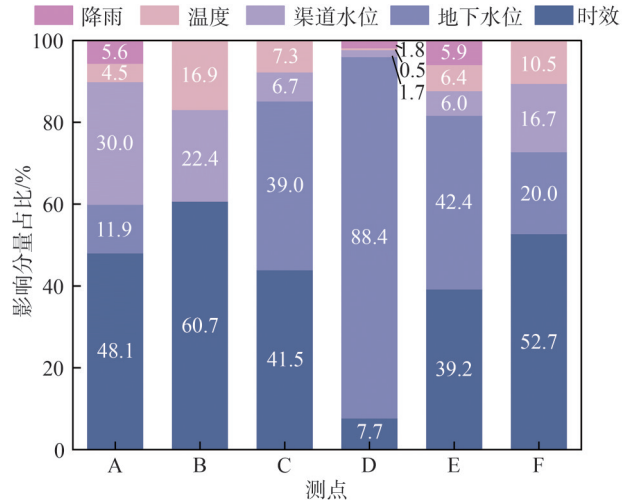


图 14　LOS 向累计位移预测模型各影响分量占比

Fig. 14　Proportion of each influencing components in the LOS direction cumulative displacement prediction model

板可能已发生破损，导致渠道水位与地下水位发生联通，左岸地下水位普遍高于渠道水位，并补给渠道水位[11]，从而对渠坡变形产生影响。

4.2 内部变形规律及影响因素分析

测斜管测点最大位移深度处变形量预测模型各影响分量占比如图 15 所示。

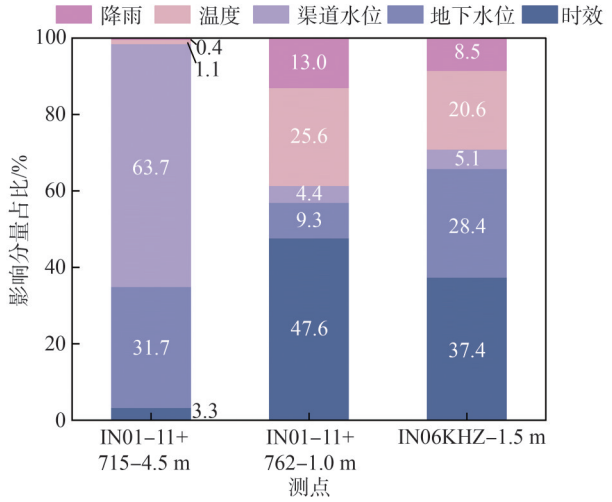


图 15 测斜管最大位移深度处 A 向累计位移预测模型各影响分量占比

Fig. 15 Proportion of each influencing components in the A-direction cumulative displacement prediction model at the maxim-um displacement depth of the inclino-meter

由图 15 可知：IN01–11+715 测点 A 向变形主要受地下水位和渠道水位影响；IN01–11+762 测点的变形则主要由温度、降雨及时效因素驱动；IN06KHZ 测点变形则受地下水位、温度及时效分量的综合影响较大。

以 IN06KHZ 测斜管测点为例，分析不同深度处 A 向累计位移预测模型各分量占比，如图 16 所示。

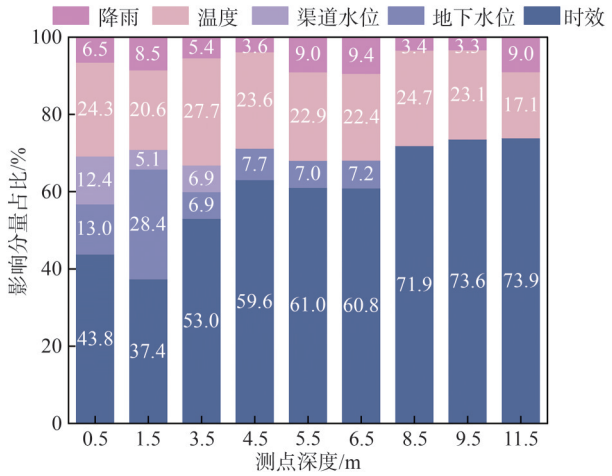


图 16 IN06KHZ 测斜管不同深度处 A 向累计位移预测模型各影响分量占比

Fig. 16 Proportion of each influencing components in the A-direction cumulative displacement prediction model at different depths of the IN06KHZ inclinometer

由图 16 可知：时效分量对 A 向变形的影响最大，其次为温度因子，渠道水位与降雨分量影响较小；地下水位对表层土体影响较大，但随深度增加，其影响逐渐减弱。这一现象可归因于膨胀土在长期干湿循环作用下反复胀缩，变形逐步积累，形成显著的时效效应。由于降雨具有短时性和季节性，难以持续改变土体含水率与结构状态，因而其影响相对较小。地下水位变化可引起浅层土体吸水膨胀土，导致渠坡变形，但深层土体因受上覆荷载作用密实度较高、渗透性较低、膨胀性受限，导致地下水位变化对其变形影响有限。

4.3 讨论

结合图 11、13 可知，11+700～11+800 渠段的膨胀土渠坡 LOS 向变形及内部 A 向变形均处于变形发展阶段，变形尚未稳定。整体表现为渠坡持续抬升的同时，局部存在指向渠道方向的滑移趋势。分析表明：渠坡表层变形主要受地下水位、温度和时效等因素影响；而 3.5 m 以下深度的变形主要受温度和时效驱动。C、D、E 这 3 点的 LOS 向表面变形以地下水位和时效为主控因素，而其 A 向内部变形的影响因素更为复杂，受到渠道水位、温度等多因素的共同作用。

该段渠坡变形受渠坡开挖卸荷效应与膨胀土水–力耦合作用共同驱动[29]：渠坡最大开挖深度约 42 m，大规模卸荷导致应力重分布，引发土体力学参数劣化。随着开挖深度的增加，卸荷裂隙密度不断增大，形成优势渗流通道[30]，加速孔隙水压力的消散，进一步诱发土体的持续时效变形。现场巡视表明，该渠段右岸 3、4 级渠坡及 4 级马道均存在不同程度渗水现象[11]，测压管监测数据亦显示右岸 3 级马道地下水位常年高于渠底 19.01～21.13 m，说明地下水位长期处于高位。工程地质报告，该段膨胀土黏土矿物含量为 17%～29%，主要由蒙脱石和伊利石组成，自由膨胀率为 58%～67%。地下水渗透使土体含水量增加，显著提高膨胀应力[31]。这一推论与现场巡查中发现的 2、3 级渠坡坡脚隆起现象相印证（2017 年 5 月）[32–33]，进一步说明高含水状态下膨胀土的胀缩特性是导致渠坡变形的关键因素之一。

5 结 论

利用 SBAS–InSAR 技术，对某调水工程深挖方膨胀土渠段（8+886～12+921）2017 年 3 月至 2021 年 12 月期间共 128 景 Sentinel–1A 影像数据进行了处理，结合测斜管内部变形数据，从不同尺度分析变形规律，并进一步构建基于注意力机制的 SENN 预测模型分析影响因素，得到以下主要结论：

1）SBAS–InSAR 技术获取的变形结果与垂直位移

观测数据高度一致，说明其结果具有较高的可靠性。InSAR数据实现大范围、连续面状监测，弥补了传统点式监测在测点密度、断面数量、空间覆盖方面的不足。研究区深挖方膨胀土渠坡年平均变形速率为−10～24 mm/a，整体呈上抬趋势，最大累计变形量达97 mm。

2）基于InSAR监测结果，11+806～12+921渠段变形速率显著偏大，属变形集中区。其中，1～4级渠坡变形量较大，5、6级边坡变形较小。同时，该段右岸渠坡地下水位长期高于左岸，导致右岸渠坡变形量明显大于左岸。

3）结合InSAR变形时间序列、测斜管观测结果与构建的基于注意力机制的SENN预测模型分析表明，11+700～11+800渠坡的LOS向及A向变形仍处于持续发展阶段，未表现出收敛趋势。

4）11+700～11+800渠段LOS向表面变形主要受地下水位、渠道水位和时效因素影响；A向内部变形则主要受时效作用，其次为温度，渠道水位及降雨影响较小。地下水位对表层土体影响较大，对深层土体影响相对较小。

5）本文构建的多源数据驱动的膨胀土渠坡变形预测及影响因素分析方法，能够有效揭示膨胀土渠坡的变形规律及主控因素，可为深挖方膨胀土渠坡的安全监控提供科学依据与技术支撑。

参考文献：

[1] Gong Biwei,Cheng Zhanlin,Guo Xiling,et al.Research progress on the stability of expansive soil slope in the middle route of south-to-north water diversion project[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2011,28(10):134–140.[龚壁卫,程展林,郭熙灵,等.南水北调中线膨胀土工程问题研究与进展[J].长江科学院院报,2011,28(10):134–140.]

[2] Gong Biwei,Cheng Zhanlin,Hu Bo,et al.Research on engineering properties of fissures in expansive soil[J].Rock and Soil Mechanics,2014,35(7):1825–1830.[龚壁卫,程展林,胡波,等.膨胀土裂隙的工程特性研究[J].岩土力学,2014,35(7):1825–1830.]

[3] Li Qingyun,Cheng Zhanlin,Gong Biwei,et al.Failure mechanism and treatment technology of expansive soil slope of middle route project[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2009,26(11):1–9.[李青云,程展林,龚壁卫,等.南水北调中线膨胀土(岩)地段渠道破坏机理和处理技术研究[J].长江科学院院报,2009,26(11):1–9.]

[4] Leng Ting,Tang Chaosheng,Xu Dan,et al.Advance on the engineering geological characteristics of expansive soil[J].Journal of Engineering Geology,2018,26(1):112–128.[冷挺,唐朝生,徐丹,等.膨胀土工程地质特性研究进展[J].工程地质学报,2018,26(1):112–128.]

[5] Zhao Siyi,Shi Zhenming,Bao Yanni,et al.Stability analysis of expansive soil slope considering seepage softening and moistening swelling deformation[J].Journal of Engineering Geology,2021,29(3):777–785.[赵思奕,石振明,鲍燕妮,等.考虑吸湿膨胀及软化的膨胀土边坡稳定性分析[J].工程地质学报,2021,29(3):777–785.]

[6] Guo Jianhua,Wang Hanhui,Li Shichang,et al.Evolution pattern of cracks in expansive soil and the deformation of canal slopes in dry and wet environments[J].Rock and Soil Mechanics,2024,45(S1):433–442.[郭建华,王汉辉,李世昌,等.干湿环境下膨胀土裂隙演化规律及渠坡变形研究[J].岩土力学,2024,45(S1):433–442.]

[7] Huang Xiaohu,Hu Yulong,Guo Fei,et al.Study on the mechanism of landslide promotion of expansive soil under the combined action of rainfall and reservoir water[J].Advanced Engineering Science,2026,58(2):109–122.[黄晓虎,胡禹龙,郭飞,等.降雨及库水联合作用下膨胀土滑坡变形机理研究[J].工程科学与技术,2026,58(2):109–122.]

[8] Liu Longwu,Zheng Jianlong,Miao Wei.Researches on characteristics of swell and shrinking active zone of expansive soil and failure mechanism of landslides[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(1):28–33.[刘龙武,郑健龙,缪伟.广西宁明膨胀土胀缩活动带特征及滑坡破坏模式研究[J].岩土工程学报,2008,30(1):28–33.]

[9] Hu Jiang,Li Xing.Analysis of spatiotemporal deformation characteristics of deep excavated expansive soil slopes[J].Rock and Soil Mechanics,2024,45(10):3071–3080.[胡江,李星.深挖方膨胀土边坡时空变形特征分析[J].岩土力学,2024,45(10):3071–3080.]

[10] Hu Jiang,Li Xing,Ma Fuheng.Deformation causes of deep excavated expansive soil canal slope during operation period[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2023,40(11):160–167.[胡江,李星,马福恒.深挖方膨胀土渠道边坡运行期变形成因分析[J].长江科学院院报,2023,40(11):160–167.]

[11] Hu Jiang,Yang Hongwei,Li Xing,et al.Slope deformation characteristics and influencing factors of deeply excavated expansive soil canal slopes with high groundwater level during operation periods[J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(5):94–101.[胡江,杨宏伟,李星,等.高地下水位深挖方膨胀土渠坡运行期变形特征及其影响因素[J].水利水电科技进展,2022,42(5):94–101.]

[12] Xu Qiang, Zhu Xing, Li Weile, et al. Technical progress of space–air–ground collaborative monitoring of landslide[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1416–1436.[许强,朱星,李为乐,等."天–空–地"协同滑坡监测技术进展[J].测绘学报,2022,51(7):1416–1436.]

[13] Kurka M,Gutjahr K H.Observation of expansive clay mo-

vement with DInSAR[M]//Engineering Geology for Society and Territory—Volume 5. Cham: Springer International Publishing,2014:151–154.

[14] Zhang Yongguang, Tian Fan, Li Yingchun, et al. Application of time series InSAR to deformation monitoring in central line project of south-to-north water transfer[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2021,38(8):72–77.[张永光,田凡,李迎春,等.时序InSAR在南水北调中线形变监测中的应用[J].长江科学院院报,2021,38(8):72–77.]

[15] Zhang Shuangcheng, Si Jinzhao, Xu Yongfu, et al. Time-series InSAR for stability monitoring of Ankang Airport with expansive soil[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2021,46(10):1519–1528.[张双成,司锦钊,徐永福,等.时序InSAR用于安康膨胀土机场稳定性监测[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1519–1528.]

[16] Zhu Wu, Dou Hao, Yin Nazheng, et al. Deformation characteristics analysis of the expansive soil slope by integrating of InSAR and SSA techniques: A case study of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2022,51(10):2083–2092.[朱武,窦昊,殷那政,等.联合InSAR和SSA的膨胀土边坡形变特征分析——以南水北调工程为例[J].测绘学报,2022,51(10):2083–2092.]

[17] Li Ziyuan, Hu Jun, Zhang Xing, et al. Characterization of elastoplastic behavior and retrieval of active zone depth for expansive soil slopes in the middle-route channel head of the South-to-North Water Diversion Project, China, using InSAR time series[J].Remote Sensing of Environment, 2023,295:113666.

[18] Liu Hui, Li Shihuan, Miao Changwei, et al. Multi-platform InSAR three-dimensional deformation monitoring of Henan Changge section of south-to-north water diversion project[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2025, 46(5):1–13.[刘辉,李世环,苗长伟,等.南水北调河南长葛段多平台InSAR三维形变监测[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(5):1–13.]

[19] Berardino P,Fornaro G,Lanari R,et al.A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2002,40(11):2375–2383.

[20] Zhu Jianjun,Li Zhiwei,Hu Jun.Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717–1733.[朱建军,李志伟,胡俊.InSAR变形监测方法与研究进展[J].测绘学报,2017,46(10):1717–1733.]

[21] Alvarez–Melis D, Jaakkola T S. Towards robust interpretability with self-explaining neural networks[C]//Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems. Montréal: Curran Associates, Inc.,2018:7775–7784.

[22] Dhurandhar A,Chen P,Luss R,et al.Explanations based on the missing: Towards contrastive explanations with pertinent negatives[C]//Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems. Montréal:Curran Associates,Inc.,2018:892–902.

[23] Zhang Zaixi, Liu Qi, Wang Hao, et al. ProtGNN: Towards self-explaining graph neural networks[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2022, 36(8): 9127–9135.

[24] Zhu Zhangli, Rao Yuan, Wu Yuan, et al. Research progress of attention mechanism in deep learning[J].Journal of Chinese Information Processing,2019,33(6):1–11.[朱张莉,饶元,吴渊,等.注意力机制在深度学习中的研究进展[J].中文信息学报,2019,33(6):1–11.]

[25] Ren Qiubing,Li Mingchao,Shen Yang,et al.Dynamic monitoring model for dam deformation with spatiotemporal coupling correlation characteristics[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(10):160–172.[任秋兵,李明超,沈扬,等.耦合时空相关特性的大坝变形动态监控模型[J].水力发电学报,2021,40(10):160–172.]

[26] 中国地质灾害防治工程行业协会.地质灾害InSAR监测技术指南(试行):T/CAGHP 013—2018[S].北京:中国地质灾害防治工程行业协会,2018.

[27] Zhang Wenfeng. Study on slope deformation of expansive soil canal section in the middle route of south-to-north water diversion project[J]. Yellow River,2019,41(7):131–135.[张文峰.南水北调中线工程膨胀土渠段边坡变形研究[J].人民黄河,2019,41(7):131–135.]

[28] Hu Jiang, Zhang Jikang, Yu Mengxue, et al. Characteristics analysis and prediction of slope deformation of deeply-excavated expansive soil canal[J].Hydro–Science and Engineering,2021(4):1–9.[胡江,张吉康,余梦雪,等.深挖方膨胀土渠道边坡变形特征分析与预测[J].水利水运工程学报,2021(4):1–9.]

[29] Wang Xiaobo,Cai Yaojun,Li Liang,et al.Failure characteristics and mechanism of excavated expansive soil slope of MRP of South-to-North Water Diversion[J].Yangtze River, 2015,46(1):26–29.[王小波,蔡耀军,李亮,等.南水北调中线膨胀土开挖边坡破坏特点与机制[J].人民长江,2015,46(1):26–29.]

[30] Ma Xiaowen, Ai Yingbo. Review of soil behaviors under excavation unloading of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(S1):189–193.[马晓文,艾英钵.基坑开挖土体卸荷特性研究进展[J].岩土工程学报,2011,33(S1):189–193.]

[31] Liu Jingde,Li Qingyun,Gong Biwei.Swelling properties of expansive rock in Middle Route Project of South-to-North Water Diversion[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(5):826–830.[刘静德,李青云,龚壁卫.南水北调中线膨胀岩膨胀特性研究[J].岩土工程学报,2011,33(5):826–830.]

[32] Hu Jiang,Ma Fuheng,Li Xing.Analysis of deformation formation causes and reinforcement disposal effects in deep excavated expansive soil canal slope: Case study[J]. International Journal of Geomechanics,2023,23(5):05023003.

[33] Hu Jiang, Li Xing. Deformation mechanism and treatment effect of deeply excavated expansive soil slopes with high groundwater level: Case study of MR－SNWTP, China[J]. Transportation Geotechnics,2024,46:101253.

Multi-source Data-driven Analysis of Deformation and Influencing Factors for Expansive Soil Canal Slopes

ZHANG Yuhan[1], *HU Jiang*[1,2], *LI Xing*[1,2*]

(1.State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2.Dam Safety Management Center of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract:

Objective Deeply excavated expansive soil canal slopes frequently exhibit significant deformation and poor stability due to the combined effects of excavation unloading, wet–dry cycles, and groundwater level fluctuations. Under the influence of multiple environmental factors, the deformation mechanisms of these slopes are complex and demonstrate pronounced spatiotemporal heterogeneity. Deformation serves as a direct indicator of slope stability, making the analysis of deformation patterns and trends essential for stability assessment. In current engineering practice, deformation data are primarily obtained through discrete point-based monitoring, which captures information only at critical cross-sections or localized areas of the slope. This approach leaves large portions of the slope unmonitored, resulting in limited coverage and creating blind spots in deformation assessment. In addition, the dense deployment of monitoring points increases construction complexity and significantly raises project costs. Therefore, a key challenge in long-distance canal slope safety monitoring involves improving deformation monitoring coverage and cost-effectiveness while maintaining sufficient precision. InSAR technology provides high spatiotemporal resolution, broad coverage, non-contact monitoring capability, and strong adaptability to complex terrain, addressing many limitations associated with conventional point-based methods. This study integrates Small Baseline Subset InSAR (SBAS–InSAR) with traditional deformation monitoring techniques to obtain multi-scale deformation data, enabling deformation analysis from regional scales to localized sections. In addition, the study develops a self-explaining neural network (SENN) model incorporating an attention mechanism to predict canal slope deformation. The model examines the deformation characteristics, dominant controlling factors, and evolutionary mechanisms of deeply excavated expansive soil slopes, facilitating multi-source data-driven analysis of deformation behavior and its influencing factors. This approach provides scientific support for the safety monitoring and stability evaluation of canal slopes.

Methods First, SBAS–InSAR was employed to process Sentinel–1A satellite imagery to extract time-series deformation data. The derived displacements were projected onto the vertical direction and were cross-validated with ground-based vertical displacement measurements to evaluate the reliability of the SBAS–InSAR results. Based on this validation, deformation rate thresholds were established to identify high-risk canal segments, which enabled an analysis of the overall slope deformation trends. Then, a SENN model incorporating an attention mechanism was developed to predict slope deformation. Key influencing factors, including groundwater level, canal water level, air temperature, precipitation, and time-dependent effects, were selected as input variables. The SENN model autonomously extracted critical features and dynamically assigned weights to each factor, predicting cumulative displacements along both the satellite Line-of-Sight (LOS) direction and the inclinometer A-direction. This approach enabled a comprehensive analysis of deformation patterns at the slope surface and at various subsurface depths while clarifying the dominant controlling factors governing expansive soil canal slope behavior.

Results and Discussions The study focused on a deeply excavated expansive soil canal section (Stake 8+88612+921) of a major water diversion project and produced the following key findings: 1) The analysis of 128 Sentinel–1A images from March 2017 to December 2021 revealed that the deformation data obtained through the SBAS–InSAR method showed a discrepancy of less than 3 mm compared to surface vertical displacement measurements at monitoring points (fourth-stage berm at 9+363 and third-stage berm at 11+400), while the deformation trends remained consistent. This result confirmed the reliability of SBAS–InSAR for monitoring canal slope deformation. 2) The study section exhibited LOS deformation rates ranging from –10 to 24 mm/a, which indicated overall uplift characteristics, with positive LOS deformation showing an annual increase. Using a threshold of 10 mm/a, critical deformation zones were identified, particularly within the 11+80612+921 section, where most areas experienced deformations exceeding 40 mm and reached a maximum value of 97 mm. 3) Inclinometer measurements indicated maximum displacements of 49.51 mm at a depth of 4.5 m below the orifice at the second-stage berm (11+715), 63.80 mm at 1 m below the first-stage berm

(11+762), and 67.51 mm at a depth of 1.5 m at the third-stage berm (11+762), with deformation extending to 13.5 m below the orifice. 4) LOS direction deformation was primarily influenced by groundwater level, canal water level, and time-dependent effects. Groundwater level exerted a stronger influence on right-bank deformation, whereas the canal water level more significantly affected left-bank deformation. At the third-stage berm (11+762), A-direction deformation was predominantly controlled by time-dependent effects, followed by temperature effects, while canal water level and rainfall exerted minimal influence. Groundwater level significantly affected surface soils but showed a reduced impact on deeper soil layers. Shallow deformations in expansive soil slopes were mainly controlled by groundwater level, temperature, and time-dependent effects, whereas displacements below a depth of 3.5 m showed a stronger correlation with temperature and time-dependent effects. 5) The 11+700 ~ 11+800 section exhibited continuous surface and internal deformation, with right-bank slopes showing significantly greater deformation than left-bank slopes due to higher groundwater levels. Deformation magnitudes were greater in the first to fourth stage slopes than in the fifth and sixth stage slopes. Deformation mechanisms varied with depth. Deeper soils, which were constrained by overburden pressure, were less affected by groundwater fluctuations, whereas shallow soils showed high sensitivity to both groundwater level variations and temperature changes. The study demonstrated that uplift deformation in this canal section resulted from the combined effects of excavation unloading and hydro-mechanical coupling in expansive soils.

Conclusions The SBAS−InSAR technique effectively monitors large-scale canal slope deformation trends by overcoming the spatial limitations inherent in conventional point-based monitoring methods, which often suffer from restricted coverage and sparse measurement points. The attention-mechanism-based SENN prediction model demonstrates high accuracy in forecasting slope deformation patterns while quantitatively evaluating the relative contributions of various influencing factors. This multi-source data integration approach provides comprehensive insights into the deformation mechanisms of expansive soil canal slopes and their controlling factors, providing a scientific basis for slope safety monitoring. The research outcomes serve as valuable references for the long-term monitoring and engineering management of expansive soil canal slopes and propose innovative methodologies for the safety monitoring of similar engineering projects. The demonstrated technical framework exhibits significant practical value for engineering applications, particularly in addressing deformation monitoring challenges in large-scale water conveyance infrastructure.

Keywords: expansive soil; canal slope; InSAR; deformation; self-explaining neural network (SENN); attention mechanism

（编辑　周　璇）

引用格式: Zhang Yuhan, Hu Jiang, Li Xing. Multi-source data-driven analysis of deformation and influencing factors for expansive soil canal slopes[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(3): 270–282. [张妤涵, 胡江, 李星. 多源数据驱动的膨胀土渠道边坡变形及影响因素分析方法[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(3): 270–282.]