引文格式：邢学敏,王亮,龙京建. 软土地区公路网InSAR建模与形变估计——以洞庭湖区域为例[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):1-7. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2025.06.001

软土地区公路网InSAR建模与形变估计

——以洞庭湖区域为例

邢学敏[1,2]，王　亮[1,2]，龙京建[1,2]

（1. 长沙理工大学交通测绘雷达遥感应用研究所，湖南 长沙 410114；2. 长沙理工大学交通学院，湖南 长沙 410114）

摘　要：软土地区修建的公路易发生沉降，塑性蠕变特性是重要影响因素。针对已有InSAR公路形变模型很少顾及塑性蠕变特征这一缺陷，提出一种改进的InSAR公路形变估计方法，对公路网中路基和桥梁分区开展InSAR建模和形变估计。在软土路基区域，充分顾及塑性蠕变特性，构建非线性粘塑性体周期降水模型（NVPBPP）；在桥梁区域，构建热膨胀线性模型，以表征桥梁材料的热膨胀变形特征。实验选取岳阳洞庭湖东侧一软土区域，获取了其1 a的时序沉降结果。结果表明，研究区域形变以塑性蠕变为主，累积最大沉降量为28 mm；NVPBPP建模精度为3.1 mm，较传统InSAR线性模型提升45.1%，形变估计中误差为±2.5 mm。研究成果可为软土区域交通基础设施安全运营和稳定性监测提供参考。

关键词：InSAR；公路；软土；形变；监测

中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0001-07

InSAR Modeling and Deformation Estimation of Highway Network in Soft Soil Region: A Case Study of Dongting Lake Region

XING Xuemin[1,2], WANG Liang[1,2], LONG Jingjian[1,2]

(1. Institute of Radar Remote Sensing Applications for Traffic Surveying and Mapping, Changsha 410114, China;
2. College of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The highway built in soft soil area is easy to settle, and the plastic creep characteristic is an important influence factor. In view of the defect that plastic creep characteristics are rarely taken into account in existing InSAR highway deformation models, we proposed an improved InSAR highway deformation estimation method to carry out InSAR modeling and deformation estimation for the middle road foundation and bridge subregions of highway network. In the soft soil subgrade area, we constructed a nonlinear viscoplastic periodic precipitation model (NVPBPP) with full consideration of plastic creep characteristics. In the bridge area, we constructed a linear thermal expansion model to characterize the thermal expansion deformation characteristics of bridge materials. Taking a soft soil area on the east side of Dongting Lake in Yueyang for example, we obtained its one-year sequential settlement results. The results show that the deformation in the study area is mainly plastic creep, and the maximum accumulated settlement is 28 mm. The modeling accuracy of NVPBPP is 3.1 mm, which is 45.1% higher than that of traditional InSAR linear model, and the median error of deformation estimation is ±2.5 mm. The research results can provide reference for the safe operation and stability monitoring of traffic infrastructure in soft soil area.

Key words: InSAR, highway, soft soil, deformation, monitoring

截至2023年底，我国公路总里程达543.68万km，其中高速公路18.36万km居全球首位，但软土地区公路沉降问题突出[1]。淮南线、京珠高速广珠段及沪宁高速等均因软基沉降引发路基翻浆、路面维修成本剧增或超设计沉降量等严重问题，凸显长期沉降监测的重要性[2-4]。时序InSAR技术凭借毫米级监测精度和大范围非接触优势[5]，成为交通设施形变监测的有效手段[6-7]，但其形变模型合理性直接影响结果精度。传统模型分为数学函数模型（线性、季节性、多项式）和物理模型两类：前者依赖经验参数，物理意义模糊[8-11]；后者融合物理参数提升精度，已应用于冻土、矿区等领域[12-14]。然而，现有软土公路模型多采用一维线性流变模型[15]，忽略塑性流变特征与车辆荷载下加速蠕变效应，难以精准反映工后沉降机制[16-20]。

本文提出软土地区公路网联合建模方法，针对路基和桥梁分别构建物理驱动形变模型。针对软土路基，

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42074033）；中国水利水电第八工程局有限公司科研项目（2023060）；湖南省交通运输厅科技进步与创新计划资助项目（202211）；长沙市杰出创新青年培养计划资助项目（kq2209011）。

第一作者简介：邢学敏（1983—），博士，教授，研究方向为时间序列合成孔径雷达干涉测量技术（InSAR）在公路变形监测中的应用，Email：xuemin.xing@csust.edu.cn 。

突破传统线性假设，将表征塑性加速蠕变的非线性粘塑性体（NVPB）模型与周期–降水耦合模型结合，构建包含形变速度、降水系数和塑性参数的组合相位模型，以解析车辆荷载与降水共同作用的塑性形变演化过程；针对桥梁结构，采用热膨胀–线性组合模型，量化温度变化引起的材料膨胀收缩效应。实验选取岳阳东洞庭湖软土公路网为研究区，该区域含软粘土路段及两座桥梁，利用2018年2月—2019年2月14景TerraSAR-X影像数据实施时序分析。结果表明：所提模型显著提升了软土路基形变反演精度，成功揭示车辆荷载周期性作用下塑性变形的加速累积规律，以及降水渗透对软土流变特性的强化效应；桥梁区域形变时序特征与温度变化呈现显著相关性，验证了热膨胀模型的适用性。该方法通过分对象建模实现了软土公路网形变机制的多维度解析，为复杂环境下交通基础设施的形变监测与灾害预警提供了理论和技术支撑，对降低运维成本、延长工程寿命具有实践意义。

1 InSAR时序相位建模

1.1 软土地区路基InSAR形变模型

假设 $N+1$ 景影像处理得到 m 幅解缠干涉图，第 m 幅解缠干涉图上像素 i 的相位可表示为：

$$\Delta\phi_i^m=\Delta\phi_{i,\mathrm{def}}^m+\Delta\phi_{i,\mathrm{top}}^m+w_i^m\approx\frac{4\pi}{\lambda}\Delta d_i^m+\Delta\phi_{i,\mathrm{top}}^m+\Delta\phi_{i,\mathrm{res}}^m+\Delta\phi_{i,\mathrm{atm}}^m+\Delta\phi_{i,\mathrm{noi}}^m \tag{1}$$

式中，$\Delta\phi_i^m$ 为解缠相位；$\Delta\phi_{i,\mathrm{def}}^m$ 为低通形变相位；$\Delta\phi_{i,\mathrm{top}}^m$ 为残余地形相位；w_i^m 为相位残差，包括高通残余形变相位 $\Delta\phi_{i,\mathrm{res}}^m$、残余大气相位 $\Delta\phi_{i,\mathrm{atm}}^m$ 和噪声相位 $\Delta\phi_{i,\mathrm{noi}}^m$；$\lambda$ 为雷达波长。其中，$\Delta d_i^m=d_i\left(t_B^m\right)-d_i\left(t_A^m\right)$，表示该点在影像获取时刻 t_A^m 和 t_B^m 间的形变分量；$A,B\in[0,N]$ 且 $A<B$，传统线性速率形变模型将其表示为时间序列上各时段形变速率与时间乘积。

由文献[15]可知，软粘土区域的地表形变受降水和周期变化影响，在此将表征形变随时间呈周期变化的周期模型作为基础模型，并融入降水分量，以替代线性速率模型，构建表征降水变化影响的形变分量模型，则基础模型可改写为：

$$\Delta d_{i,s}^m=v_i\left(t_B^m-t_A^m\right)+a_i\left[\sin\left(\frac{2\pi}{T}t_B^m\right)-\sin\left(\frac{2\pi}{T}t_A^m\right)\right]+b_i\left[\cos\left(\frac{2\pi}{T}t_B^m\right)-\cos\left(\frac{2\pi}{T}t_A^m\right)\right]+Pc_i\left[\mathrm{Prec}\left(t_B^m\right)-\mathrm{Prec}\left(t_A^m\right)\right] \tag{2}$$

式中，$\Delta d_{i,s}^m$ 为周期降水形变分量；T 为单个周期长度，在此取作1 a；$\mathrm{Prec}(t)$ 为该时刻累积降水量；线性速率 v_i、正弦系数 a_i、余弦系数 b_i、降水因子系数 Pc_i 为4个待求参数。

NVPB模型是一种用于描述材料在复杂载荷下的非线性粘塑性行为的模型，可综合表征软粘土粘性和塑性的综合特性[21]。较适用于软土在加速蠕变阶段应变随时间变化的规律。如图1为NVPB本构模型组合元件结构示意图，由非线性粘性元件与塑性体并联组成，即当外界施加应力时，其模型总应变为各元件应变之和。当外界压力恒定时，其流变本构方程为：

$$\varepsilon=\frac{\sigma_c-\sigma_s}{\eta}t^n \tag{3}$$

式中，ε 为材料产生的应变；t 为应变发生过程的总时间；σ_c 为恒定的外界荷载，工后运营阶段 σ_c 为公路层的总重力，实验中取作一定值常数；σ_s 为应力阈值，通过开展材料长期强度实验分析获取，视为已知数据；n 为加速蠕变阶段的蠕变影响指数，可通过对材料进行敏感性分析获取，一般取值范围为（0,3.7）；η 为材料塑性系数，是流变学中重要的蠕变参数，也是模型中的待估参数。

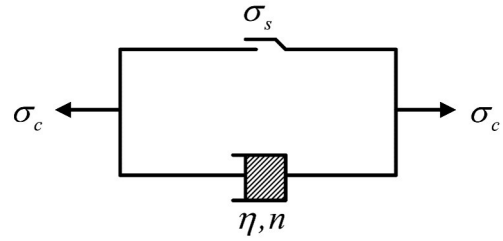


图1 NVPB本构模型组合结构[22-23]

软土沉降 S_r 与应变 ε 之间的函数关系可表示为：

$$S_r=\int_{t_1}^{t_2}\int_0^{\mathrm{H}}\varepsilon\cdot\mathrm{d}h\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中，H为软土层平均厚度，为常数；t_1、t_2 分别为形变发生的起始日期；h、t 均为积分变量，分别为软土层的厚度和时间。由式（3）和式（4）联立可得 S_r。

$$S_r=\frac{\mathrm{H}(\sigma_c-\sigma_s)}{(n+1)\eta}(t_2^{n+1}-t_1^{n+1}) \tag{5}$$

上式为软土地区公路地表沉降与蠕变参数 η 的时序函数关系，可以综合描述软土在工后期的粘性和塑性流变变形特征。由式（2）和式（5）推算，则式（1）中的总形变可表示为如下的组合形式：

$$\Delta d_i^m=d_i\left(t_B^m\right)-d_i\left(t_A^m\right)=\Delta d_{i,s}^m+\Delta d_r \tag{6}$$

式中，$\Delta d_r = S_r = S_{\mathrm{LOS}}/\cos\theta$，$\Delta d_r$ 为垂直向形变；S_{LOS} 为LOS向形变，即InSAR获取的雷达视线向（line of sight, LOS）形变；θ 为雷达传感器入射角，可在影像参数文件中获取。

式（1）中残余地形相位可由以下经验公式表示：

$$\Delta\phi_{i,\mathrm{top}}^{m} = \frac{4\pi}{\lambda}\times\frac{B_{\perp}h_i}{R\sin\theta} \tag{7}$$

式中，R 为雷达传感器到像元中心的距离；θ 为平均入射角；$B_{\perp}$ 为干涉对垂直空间基线；h_i 为像元上的高程改正值。结合式（1）、（2）、（5）~（7），可得：

$$\begin{aligned}\Delta\phi_i^m = {} & \frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_{\perp}h_i}{R\sin\theta} + \frac{4\pi\cos\theta}{\lambda}v_i\left(t_B^m - t_A^m\right) + \frac{4\pi\cos\theta}{\lambda}\frac{H(\sigma_c-\sigma_s)}{(n+1)\eta}\times \\ & (t_B^{n+1} - t_A^{n+1}) + \frac{4\pi\cos\theta}{\lambda}a_i\left[\sin\left(\frac{2\pi}{T}t_B^m\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{T}t_A^m\right)\right] + \\ & \frac{4\pi\cos\theta}{\lambda}b_i\left[\cos\left(\frac{2\pi}{T}t_B^m\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{T}t_A^m\right)\right] + \\ & \frac{4\pi\cos\theta}{\lambda}Pc_i\left[\mathrm{Prec}\left(t_B^m\right) - \mathrm{Prec}\left(t_A^m\right)\right] + w_i^m\end{aligned} \tag{8}$$

上式即为软土区域公路InSAR时序相位组合模型，由NVPB、周期分量、降水分量组合而成。模型中未知参数为：v_i、a_i、b_i、Pc_i、η、h_i。当观测方程多于6个时，即可解算出未知参数。

1.2　桥梁区域InSAR形变模型

对桥梁结构表面的形变，采用文献[20]中热膨胀线性模型构建，热膨胀线性形变可表示为：

$$\Delta d_{i,t}^{m} = Tc_i\left[\mathrm{Temp}\left(t_B^m\right) - \mathrm{Temp}\left(t_A^m\right)\right] \tag{9}$$

式中，Tc_i 为热膨胀系数；$\mathrm{Temp}(t)$ 为研究区域在SAR影像过境时刻的环境温度。线性模型为式（2）中 $v_i\left(t_B^m - t_A^m\right)$ 这一部分，结合式（1）、（7）、（9），可得：

$$\begin{cases}\Delta\phi_i^m = \dfrac{4\pi}{\lambda}\dfrac{B_{\perp}h_i}{R\sin\theta} + \dfrac{4\pi}{\lambda}v_i\left(t_B^m - t_A^m\right) + \dfrac{4\pi}{\lambda}Tc_i \\ \left[\mathrm{Temp}\left(t_B^m\right) - \mathrm{Temp}\left(t_A^m\right)\right] + w_i^m\end{cases} \tag{10}$$

上式即为顾及热膨胀的桥梁区域时序InSAR相位模型，也就是热膨胀线性模型（thermal expansion linear，TEL）。模型中未知参数为：v_i、Tc_i、h_i。当观测方程个数大于或等于3时，即可解算出未知参数。

1.3　InSAR模型参数估计与时序形变生成

式（8）是关于未知参数的非线性模型，求解的过程是非线性模型未知参数估计问题，其中只包含了一个非线性未知参数 η，即塑性系数，且该未知参数为一次项。因此可以将 $1/\eta$ 当成一个整体，将其作为一个新的未知参数，转化为线性模型，再利用线性最小二乘估计方法即可实现求解。与文献[15]与文献[24]中参数估计采用的遗传算法（genetic algorithm，GA）相比，解算效率和精度均得到显著提升。

对于式（8）和式（10），所有干涉相位观测方程可以表示为式（11）的矩阵形式：

$$\boldsymbol{F}_i = \boldsymbol{A}\times X_i \tag{11}$$

式中，$\boldsymbol{F}_i = \left[\Delta\phi_i^1\ \Delta\phi_i^2\ \cdots\ \Delta\phi_i^m\right]^{\mathrm{T}}$ 为 m 个干涉对组成的观测相位向量；对于式（8），$X_i = \left[v_i\ a_i\ b_i\ Pc_i\ 1/\eta\ h_i\right]^{\mathrm{T}}$；对于式（10），$X_i = \left[v_i\ Tc_i\ h_i\right]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{A}$ 为系数矩阵。以式（8）为例，有 m 个观测值和6个未知参数，其最小二乘解都可表示为：

$$X_i = \left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\right)^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}F_i \tag{12}$$

上式求解过程中，由于各方程之间可能不独立导致的法方程系数阵奇异问题，可利用奇异值分解（singular value decomposition，SVD）得到广义逆来解决。求得参数向量 $\boldsymbol{X}_i$ 的最优估值后，计算获取形变相位分量 $\Delta\phi_{i,\mathrm{def}}^{m}$（低通形变）和残余地形相位分量 $\Delta\phi_{i,\mathrm{top}}^{m}$。

由式（1）可得总相位残差分量 w_i^m，包括高通残余形变相位 $\Delta\phi_{i,\mathrm{res}}^{m}$、大气延迟相位 $\Delta\phi_{i,\mathrm{atm}}^{m}$ 和噪声相位 $\Delta\phi_{i,\mathrm{noi}}^{m}$，通过时间维上的高通滤波和空间维上的低通滤波去除残余相位中的大气延迟及噪声相位残留后，可得到高通残余形变相位分量。再次采用SVD分解方法计算出对应的高通形变速率，在时间域上积分即可得到高通残余形变时间序列，与低通形变序列相加，进而得到总形变序列[25]。

2　研究区域与数据处理

2.1　研究区域与数据来源

本文选取岳阳市洞庭湖周围一软土区域为研究区（如图2），其位于长江中游荆江河段南岸，是我国第二大天然淡水湖，由东、西、南洞庭湖及大通湖组成，其中东洞庭湖面积最大。自北向南，该区域由杭瑞洞庭大桥和洞庭湖大桥连接两岸，东侧有沿湖路、杭瑞高速、洞庭大道、望岳路、冷水辅路等多条重要交通线路。

东洞庭湖周边水系发达，软土层主要由淤泥、淤泥质粘土、塑性状粉质粘土、粉质砂土组成，致使沿岸区域易发生地表沉。该区域地处亚热带湿润气候区，日照充足，年均气温17C°。雨量充沛，降水量1 200~1 300 mL，每年3—8月为多雨季节，降水量约

占全年降水总量的70%；9月至次年2月降雨较少，仅占全年的30%，季节性降水情况会导致地表变形随之变化。每逢汛期，东洞庭湖两岸交通线路都面临着路面变形、塌陷等安全隐患。因此，对本地区交通线路进行长期沉降监测有重要意义。

为更好地研究东洞庭湖及其周边区域的地表沉降信息，本实验收集了14景覆盖研究区域的TerraSAR-X波段Spotlight升轨影像，该数据是由德国宇航中心（DLR）提供高分辨率SAR数据，空间分辨率为1 m，影像的获取时间为2018年2月—2019年2月，雷达入射角θ为39.8°，雷达入射波长λ为32 mm。利用美国国家航天局（national aeronautics and space administration，NASA）提供的空间分辨率为30 m的SRTM（shuttle radar topography mission）DEM数据辅助地形相位去除。从美国国家海洋和大气管理局（NOAA）下设的国家环境信息中心（NCEI）（https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/archive/）收集了岳阳市2018年2月—2019年2月的累积降水数据和平均气温数据，用于后续InSAR建模。



a SAR影像覆盖范围　　b 研究区域路网

图2　研究区域

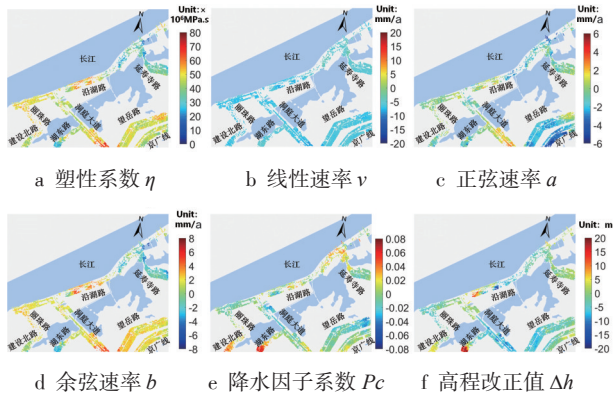
2.2　数据处理

采用瑞士差分干涉处理软件GAMMA进行前期干涉处理，包括SAR影像配准、重采样、干涉相位生成、平地相位去除、初步相位滤波、地形相位的去除和相位解缠。为保证影像中公路像素原始分辨率，距离向和方位向的多视比设置为1∶1，干涉处理中设置的时间基线、空间基线阈值分别为120 d和100 m。采用高斯滤波器进行初始相位的滤波，以抑制斑点噪声。采用了最小费用流法进行相位解缠，它能够在保证相位一致性的同时减小解缠误差。通过删除解缠效果不佳的干涉对，共挑选出30幅高质量解缠后的差分干涉图。后续处理中的高相干点选取、时序形变模型建立、形变未知参数解算和时序形变生成的实施均利用Matlab软件自编代码开展。其中通过双重阈值法，即联合振幅离差和相干性阈值提取高相干点，分别设置振幅离差阈值、相干性阈值为0.6和0.5。

3　实验结果与精度验证

3.1　实验结果

非桥梁的公路区域参数估计结果如图3所示，在此对桥梁区域的点进行了掩膜处理。从图3a中可以看出，塑性系数主要分布在[0,80]×10^{-6} MPa.s区间，从空间分布上来看，塑性系数这个流变参数的估计值呈现出西高东低，内陆地区高，靠近水域附近区域低的特点，靠近水域区域向内陆区域颜色呈现出蓝绿色到红色变化。本文通过实验还发现，η估计值与形变量值呈现反相关关系，即η值越低的区域，其对应沉降量越大，而η值较高的区域，其产生的形变量越较小。从图3b中可以看出，线性速率主要分布在[−15,0] mm.a^{-1}，形变速率表现为该区域西快东慢的特征，由图中颜色分布结合ColorBar可以看出，线性速率呈现出类似的空间分布规律，即该区域西部沉降速率较为明显，最大沉降速率可达16 mm·a^{-1}。周期速率参数实验结果分别显示在图3c~d，正弦速率集中在[−6,6] mm·a^{-1}，余弦速率集中在[−8,8] mm·a^{-1}。从图中可以看出，2个周期参数值空间分布特征相似，最大沉降为8 mm·a^{-1}，表明该区域地表沉降存在不可忽略的季节特征。从图3e中可以看出，降水因子系数分布在[−0.08,0.08]的范围内，降水因子的物理含义为单位降雨量时发生的形变量。图中可见该参数量值分布较为均匀且有正有负，也反映了降雨对软土地基的作用会导致膨胀或收缩，因此地表变形表现出量值正负均匀分布的特征。从图3f中可以看出，高程改正值主要分布在[−20,20] m的范围内，经查找资料，在影像过境期间进行过道路修建，再加上DEM的时效性不高，可能会使该区域高程改正值偏大。



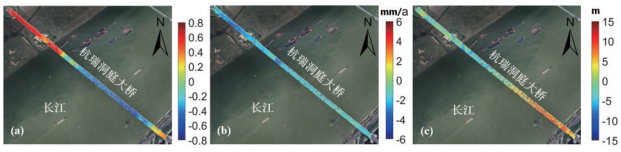
a 塑性系数η　　b 线性速率v　　c 正弦速率a

d 余弦速率b　　e 降水因子系数Pc　　f 高程改正值Δh

图3　NVPBPP模型估计的未知参数结果

研究区域内桥梁的未知参数估计结果如图4所示，主要是针对研究区域内的杭瑞洞庭大桥。从图4a中可以看出，热膨胀系数主要分布在[−0.8,0.8]的范围内，

热膨胀系数的物理意义为每单位气温变化时发生的形变量。河流区域两侧桥两端桥墩处热膨胀系数较大，且形变量有正有负。从图 4b 中可以看出，线性形变速率主要集中在[−6,0] mm·a^{-1}。从图 4c 中可以看出，高程改正值主要分布在[−15,15] m 的范围内，整体而言，桥梁两端的高程改正值较小，中间改正值大。



a 热膨胀系数 Tc　b 线性速率 v　c 高程改正值 Δh

图 4　杭瑞洞庭大桥热膨胀线性模型估计的未知参数结果

由前述估计的参数结果计算生成了东洞庭湖区域 InSAR 视线向时序形变结果，时间跨度为 2018 年 2 月 25 日—2019 年 2 月 12 日，为了进一步研究该地区沉降形变，本文将其公路与桥梁的时序沉降整合到一起，其时序沉降结果如图 5 所示。从研究区域的空间分布来看，该区域存在 A、B、C 三个明显的沉降漏斗。A、B 两个沉降漏斗区域颜色以橙红到深红色为主，C 沉降漏斗区域颜色以黄色到红色为主，三个沉降漏斗主要分布在靠近水域的区域，通过图中颜色的分布可以看出越靠近河流其形变量级越大，颜色由黄到橙至红。A 和 B 沉降漏斗主要处在长江沿岸，区域 A 的最大累积形变−28 mm；区域 B 的最大累积形变−25 mm。C 沉降漏斗主要分布在东风湖的沿岸，最大累积形变−27 mm。

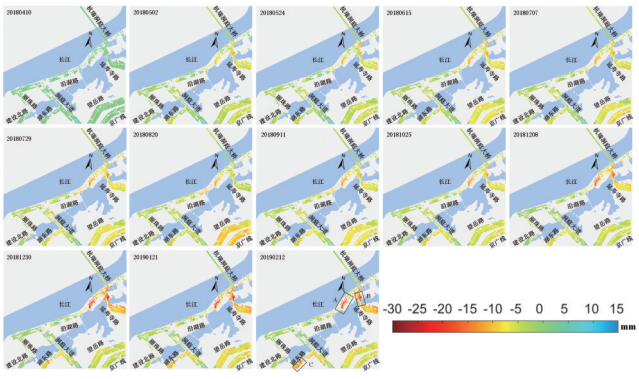


图 5　总路网时序沉降结果（参考日期 2018-02-25）

从研究区域的时序变化来看空间分布，2018 年 2 月 25 日—2018 年 4 月 10 日，测区整体形变区域稳定；从 2018 年 5 月 2 日起，测区开始出现形变区域趋势；从 2018 年 5 月 24 日—2018 年 12 月 8 日，研究区域形变逐渐增加，形变速率也在逐渐增大；2018 年 12 月 30 日—2019 年 2 月 12 日，该区域的形变速率逐渐减少，形变趋于稳定。研究区域内沉降速率在时间序列上呈现出明显的先快后慢的特征，符合软土沉降的非线性沉降规律。

从图中可以发现，沿湖路西段、丽珠路、建设北路、洞庭大道较为稳定，在图中表现为绿色和黄色。沿湖路东段、延寿寺路、湖东路形变较明显，出现多处橙红色和红色，其中沿湖路东段累积沉降最大，达 28 mm。望岳路和京广线也出现轻微沉降，以黄色为主。杭瑞洞庭大桥时序形变量大部分在[−5,0]mm 之间，且大桥两端与大桥中部的变化趋势相反，刚好与热膨胀系数 Tc 的趋势相吻合。

3.2　精度验证

因研究区域无可用外部实测数据，本文分别从建模精度、内符合精度两方面来评估实验结果的精度。

1）建模精度：利用时序影像上所有高相干点的残余高通形变均方根(RMS)来评估[26]。首先对时间序列残余相位（即式（8）中 w_i^m）进行时间维高通滤波，去除大气残留相位，再进行空间维的低通滤波，去除噪声相位。此时认为 w_i^m 中残留部分为残余形变相关的相位分量。统计每景影像上所有高相干点残余形变的 RMS，并与线性速率模型[15]生成的残余形变 RMS 进行对比，结果如图 6 所示。本文方法的残余形变 RMS 在时间序列上均要小于传统线性模型，平均 RMS 为 ±3.1 mm，相比传统线性模型提升 45.1%，证实了本文方法在顾及了塑性蠕变特征后的建模精度更高，更加符合软土公路的 InSAR 时序形变规律。

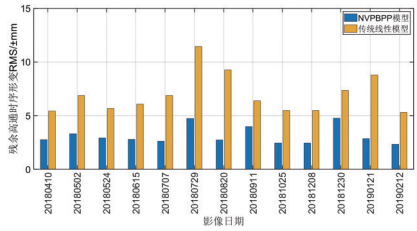


图 6　残余高通时序形变 RMS 对比

2）内符合精度：利用间接平差精度评定估计模型未知参数的中误差，再通过误差传播定律计算时序形变的中误差来评估[27]。可通过间接平差精度评定计算出观测值的单位权中误差 σ_0 和形变参数 $\boldsymbol{X}=[v\ a\ b\ Pc\ \eta]^{\mathrm{T}}$ 的协因数阵 $\boldsymbol{Q}_{XX}$，任意时刻 t 的低通时序形变 D 可表示为 X 的函数：

$$D=d_s+d_r=v\times t+a\times\sin(\frac{2\pi}{T}t)+b\times\cos(\frac{2\pi}{T}t)+Pc\times\mathrm{Prec}(t)+\frac{H(\sigma_c-\sigma_s)t}{(n+1)\eta} \tag{13}$$

根据误差传播定律，时序形变的协因数阵 $\boldsymbol{Q}_D$ 可由下式计算：

$$\boldsymbol{Q}_D=\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{XX}\boldsymbol{E} \tag{14}$$

式中，$\boldsymbol{E}$ 为时序形变关于 $\boldsymbol{X}$ 的系数阵，则时序形变的中误差可由下式计算：

$$\sigma_D = \sigma_0 \sqrt{\boldsymbol{Q}_D} \tag{15}$$

根据式（15）计算了所有高相干点时序形变中误差的平均值，结果如图7所示。可以发现中误差大小与监测时长成正比，在12个月的监测时段内，累积时序形变的中误差最大为±3.6 mm，中误差均方根为± 2.5 mm。

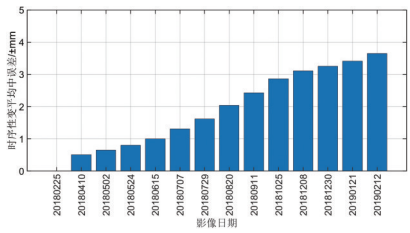


图7　高相干点时序形变中误差

4　洞庭湖区域公路网形变成因分析

选取5个典型点进行分析，如图8所示，A1点位于杭瑞洞庭大桥桥墩处，A2点位于杭瑞洞庭大桥桥梁中心，A3点位于沿湖路与洞庭湖大桥交汇处，A4点位于沿湖路与沿湖北路交汇处，A5点位于望岳路与望岳小区路口交汇处。

1）温度对形变产生的影响。表1分别列出桥梁中A1、A2特征点的各形变分量，特征点的总体形变主要由热膨胀分量、线性分量和高通分量三部分组成。从表中数据可以明显看出，占主要分量的是热膨胀分量引起的形变。由图9可看出，2018年4月—2018年10月，温度较高，特征点形变加快；2018年10月—2019年2月，温度较低，特征点形变减慢趋于稳定。由此可以看出，气温是桥梁形变产生的主要影响因素。

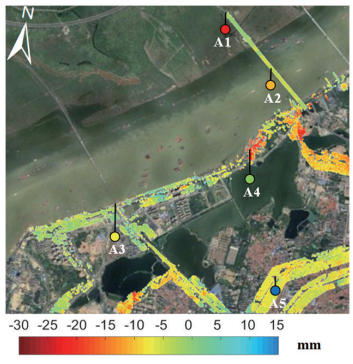


图8　东洞庭湖公路网特征点位置

2）流变特性对形变产生的影响。由前文流变参数结果与时序形变结果整合分析，本文发现一个明显的规律。流变参数值（塑性系数 η）与对应区域形变量呈反相关关系，即流变参数值大的区域，其形变量较小；反之，流变参数值小的区域，其形变量越大。从图3a和图3b中可以看出，塑性系数小的区域线性速率大，式（8）的塑性形变分量也表现出塑性系数与形变值成反比关系，符合上述规律的变化。

表2分别列出公路网中A3、A4、A5特征点的各形变分量，每个特征点的总体形变主要由5个形变分量组成：与塑性蠕变特性相关的形变分量、线性形变分量、周期形变分量、与降水因子相关的形变分量和高通形变分量。以A5点为例，其中与塑性蠕变特性相关的形变分量占比为45.8%，线性形变分量占比为10.2%，周期形变分量占比为21.6%，与降水因子相关的形变分量占比为20.8%，高通形变分量占比为1.6%。从表中数据可以明显看出，占主要分量的是塑性分量引起的形变，说明塑性蠕变在形变中占主导地位。本文中NVPB模型能很好地反映软土公路塑性蠕变特性。

表1　桥梁特征点各形变分量组成表/%

特征点序号	热膨胀分量	线性分量	高通分量
A1	67.6	29.8	2.6
A2	84.2	13.6	2.2

表2　公路网特征点各形变分量组成表/%

特征点序号	塑性分量	线性分量	周期分量	降水分量	高通分量
A3	63.2	12.3	10.8	11.6	2.1
A4	74.1	9.5	6.3	7.2	2.9
A5	45.8	10.2	21.6	20.8	1.6

3）降雨对沉降的影响。3个特征点对应的时序形变结果如图10所示，由图可知，A3点获取的最大累积沉降量为10 mm，A4点为15 mm，A5点为13 mm。3个点总体沉降时序变化特征相似，伴随季节性降水表现出季节性波动。如2018年5月—2018年6月，降水较为显著，3个点形变以下沉为主，幅度为3~4 mm。而在2019年1月—2019年2月，降水量有所减少，3个点有小幅度抬升。由图中可以看出，3个特征点变形呈现出雨季抬升旱季沉降的周期性特性，降水因素对形变产生重要影响，并且形变相对于降水具有滞后性。

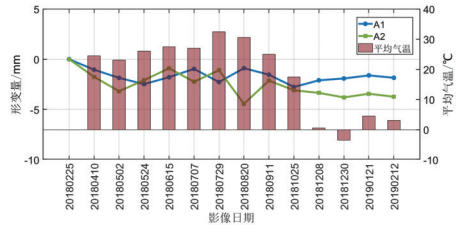


图9　桥梁特征点时序沉降

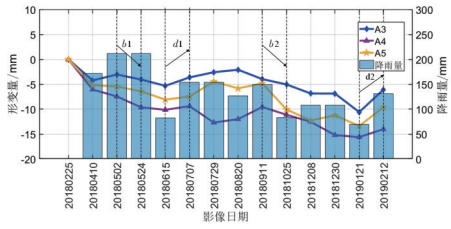


图10　路网特征点时序沉降

5　结　语

本文针对东洞庭湖软土区域公路网形变监测难题，提出一种融合软土塑性蠕变特性的InSAR形变估计方法。针对路基与桥梁差异形变机制，分别构建组合模型：路基区域采用周期模型、降水模型与非线粘塑性模型（NVPB）联合建模，表征降水与软土塑性蠕变耦合作用下的时序形变；桥梁区域结合热膨胀模型与线性模型，解析材料热胀效应。通过非线性最小二乘法解算模型参数，提升解算效率。基于2018年2月—2019年2月Sentinel-1数据实验表明：区域形变以塑性蠕变为核心驱动，流变参数与沉降呈负相关，且形变呈现降雨周期性波动，近水区域沉降量显著高于远水区。NVPB组合模型较传统线性模型精度提升45.1%，参数估计中误差与监测时长正相关。研究证实该方法在软土公路形变监测中的可靠性，可为路基工程安全评估提供技术支撑。

参考文献

[1] 张军辉,张安顺,彭俊辉,等. 长期循环荷载下公路路基永久变形研究综述[J]. 中国公路学报,2024,37(11):1-25

[2] 蔡袁强,严舒豪,曹志刚,等. 交通荷载下粉质黏土路基翻浆冒泥机理试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2021,51(5):1 742-1 748

[3] 陈宝,马传明. 珠江三角洲地区高速公路软基路堤工后沉降分析[J]. 西部探矿工程,2003,14(6):154-156

[4] 赵明华,杨明辉,刘煜,等. 软土路基固结沉降机理及其预测方法研究[J]. 铁道科学与工程学报,2005,1(4):16-20

[5] 云烨,吕孝雷,付希凯,等. 星载InSAR技术在地质灾害监测领域的应用[J]. 雷达学报,2020,9(1):73-85

[6] 朱建军,胡俊,李志伟,等. InSAR滑坡监测研究进展[J]. 测绘学报,2022,51(10):2 001-2 019

[7] 高鹏,耿长良,李鹏,等. 时序InSAR技术在地铁沿线形变监测中的应用[J]. 测绘通报,2024(4):112-118

[8] 苏晓军,张毅,孟兴民,等. 中巴经济走廊洪扎段潜在滑坡SBAS-InSAR早期识别及发育特征分析[J]. 遥感学报,2024,28(4):885-899

[9] 邢明泽,左小清,张荐铭,等. 基于SBAS-InSAR技术的西南山区滑坡稳定性监测[J]. 测绘通报,2024(2):63-68

[10] 李珊珊,李志伟,胡俊,等. SBAS-InSAR技术监测青藏高原季节性冻土形变[J]. 地球物理学报,2013,56(5):1 476-1 486

[11] 张永红,吴宏安,孙广通. 时间序列InSAR技术中的形变模型研究[J]. 测绘学报,2012,41(6):864-869

[12] 李真实. 基于时序InSAR的青藏高原冻土监测研究[J]. 山西建筑,2021,47(5):80-82

[13] 汪晨星,史凌亚,李瑞东. 基于Stacking-InSAR的煤矿沉降监测与综采面参数反演[J].陕西煤炭,2024,43(10):14-20

[14] 王祥,姜楚,蒋煌斌. 基于PS-InSAR技术与M-LSTM的小型水库大坝及岸坡变形预测模型研究[J]. 水电能源科学,2024,42(10):153-157

[15] Zhu Y K, Xing X M, Yuan Z H, et al. Surface Deformation Retrieving over Soft Clay Based on an Improved Time Series InSAR Model: A Case Study of Dongting Lake Area, China[J]. IEEE Access,2020,8:195 703-195 720

[16] 张亮亮,王晓健,周瑞鹤. 一种新的岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 力学(季刊),2020,41(1):116-124

[17] 徐卫亚,杨圣奇,谢守益,等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(II):模型分析[J]. 岩土力学,2005,26(5):693-698

[18] 汪妍妍,盛冬发. 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 应用力学学报,2020,37(2):689-694

[19] 江剑锋,黄其欢,王一安,等. InSAR技术在安庆铁路长江大桥变形监测中的应用[J]. 甘肃科学学报,2018,30(6):73-77

[20] 朱珺,朱凌杰,邢学敏,等. 洞庭湖软土区域时序InSAR形变与环境物理参数联合估计方法[J]. 测绘学报,2023,52(12):2 127-2 140

[21] 邢学敏,杨东,张锐,等. 基于雷达遥感对地观测技术的软土地区公路沉降监测方法[J]. 岩土工程学报,2023,45(10):2 172-2 179

[22] 安文静,盛冬发,张思成,等. 沥青混合料非线性黏弹塑性蠕变模型[J]. 材料科学与工程学报,2022,40(6):1 030-1 033

[23] 崔阿能,胡斌,崔凯,等. 基于应力-时间双阈值条件的岩石黏弹塑性蠕变模型[J]. 公路交通科技,2022,39(2):125-132

[24] Xing X M, Zhu Y K, Xu W B, et al. Measuring Subsidence over Soft Clay Highways Using a Novel Time-series InSAR Deformation Model with an Emphasis on Rheological Properties and Environmental Factors (NREM) [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022,60:1-19

[25] 张超伟,刘运才,左世诚,等. 利用时序InSAR技术开展大型调水工程变形监测[J]. 地理空间信息,2024,22(7):76-79

[26] 李寒冰,罗海滨,吴星乐,等. 时序InSAR技术在南通港地面形变监测中的应用[J]. 海洋测绘,2024,44(6):35-38

[27] 张腾飞,邢学敏,彭葳,等. 融入坐标时间函数(CT-PIM)的矿区时序InSAR形变预计:以淮安盐矿为例[J]. 遥感学报,2024,28(6):1 615-1 631