

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.013

江苏跨江大桥形变 InSAR 时空特征分析

肖儒雅¹, 王 迅¹, 李子阳², 李 益³, 何秀凤¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院; 2. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室; 3. 南京市防汛机动抢险队)

摘要: 基于 2015—2024 年 Sentinel-1 卫星数据, 利用合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术对江苏省不同类型跨江大桥开展了长时序形变监测与分析。结果表明: InSAR 技术可有效获取跨江大桥形变信息, 监测效果受桥梁几何结构及材料特性影响显著; 连续钢桁结构与钢桥塔具有良好的后向散射特性, 监测点分布密集, 利于精细刻画其周期性形变特征; 斜拉桥与悬索桥形变主要集中于主跨中部, 并向两端逐渐递减, 累计形变量存在明显差异。结合温度数据分析表明, 连续钢桁结构桥梁表现出显著的热胀冷缩效应, 其周期性形变振幅由主跨中心向两端递增; 斜拉桥与悬索桥的温变效应主要集中于钢结构桥塔部位。

关键词: 跨江大桥; 形变监测; InSAR; 小波分析; 时空特征; 江苏省

Spatiotemporal characteristic analysis of cross-river bridge deformation in Jiangsu Province with InSAR

Xiao Ruya¹, Wang Xun¹, Li Ziyang², Li Yi³, He Xiufeng¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University;

2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute;

3. Nanjing Flood Control Mobile Rescue Team)

Abstract: Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) was applied to Sentinel-1 satellite imagery from 2015 to 2024 to monitor long-term deformation of various cross-river bridge types in Jiangsu Province, China. The results demonstrate that InSAR effectively captures cross-river bridge deformation, with monitoring efficacy influenced by geometric structures and material properties of the bridge. Continuous steel truss structures and steel bridge towers exhibit strong backscattering characteristics, enabling dense monitoring point distributions that finely depict periodic deformation characteristics. For cable-stayed and suspension bridges, deformation concentrates at the mid-span and attenuates toward both ends, with notable differences in cumulative deformation magnitude. Integrated temperature data analysis reveals pronounced thermal expansion and temperature shrinkage effects in continuous steel truss bridges, characterized by periodic deformation amplitudes increasing from the mid-span center to both ends. Thermal effects in cable-stayed and suspension bridges are predominantly localized at steel bridge towers.

Key words: cross-river bridge; deformation monitoring; InSAR; wavelet analysis; spatiotemporal characteristic; Jiangsu Province

桥梁作为交通网络中的关键组成部分, 对区域乃至国家经济发展具有重要作用。受长期运营、结构老化、荷载增加等因素影响, 桥梁易出现损伤, 进而可能诱发重大安全事故。因此, 桥梁结构健康监测是交通与工程领域关注的重点^[1]。传统的桥梁形变监测主要依赖水准仪、加速度计、全站仪、全球导航卫星系统(GNSS)接收机等设备, 这些测量设备存在人工成本高、监测点空间密度不足等问题。我国现役桥梁数量已超百万座, 构建低成本、高精度、高自动化水平的形变监测体系, 对于预防桥梁工程风险具有重要意义。

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)是近年来快速发展的影像大地测量技术, 得益于其高时空分辨率、厘米级监测精度及低监测成本等优点^[2-3], 能够满足安全监测时空连续性要求, 可为现有监测手段提供有效补充, 已广泛应用于地震形变^[4]、火山活动^[5]、滑坡预警^[6-7]、城市沉降^[8]等领域。近年来, 高空间分辨率、快重访 SAR 卫星与时序 InSAR 分析方法的发展, 进一步推动了 InSAR 技术广泛应用于大坝^[9-10]、机场^[11]、桥梁^[12]等城市生命线工程及重大基础设施形变精细监测。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42174018, 42574067)

作者简介: 肖儒雅(1987—), 男, 教授, 博士, 主要从事影像大地测量研究。E-mail: ruya.xiao@hhu.edu.cn

通信作者: 何秀凤(1962—), 女, 教授, 博士, 主要从事卫星大地测量和形变监测研究。E-mail: xfhe@hhu.edu.cn

目前,国内外已有探索性研究利用 InSAR 技术对桥梁的形变特征进行精细刻画。Sousa 等^[13]综合永久散射体与小基线集方法,对葡萄牙一失事桥梁进行历史形变回溯,首次验证了 InSAR 技术在桥梁形变监测中的有效性。Qin 等^[14]基于时序 InSAR 技术监测大跨度钢结构桥梁的热胀冷缩形变,并结合特定桥梁结构分析了温度变化对桥体形变的影响。Ma 等^[15]通过融合桥梁结构先验信息改进 InSAR 跨海大桥形变监测算法,提升了形变监测精度与风险识别能力。周云等^[16]利用时序 InSAR 技术成功探测了京沪高铁南京大胜关长江大桥(以下简称“京沪高铁长江大桥”)的显著周期性形变,并分析了其与温度变化的响应关系。Feng 等^[17]结合长短期记忆神经网络与时序 InSAR 监测结果,分析了温度等外界因素对桥梁稳定性的影响,预测了桥梁形变特征,实现了异常预警。

现有研究不仅关注对特定桥梁开展 InSAR 形变监测的案例分析,也针对不同结构类型桥梁的形变规律进行了探索。例如:Qin 等^[18]提出了一种针对桥梁的多时相差分 InSAR 技术,分析了拱桥与斜拉桥的形变特征差异;周云等^[19]的研究中指出钢桥的回波信号强度优于钢筋混凝土桥,并对其机制进行了探究。但现有研究对桥梁类型的覆盖范围仍有限,对江苏省内的跨江大桥也缺乏系统研究。为此,本文选取 2015—2024 年欧洲空间局 Sentinel-1 卫星影像数据,以江苏跨江大桥为研究对象,开展长时序 InSAR 形变监测,旨在分析不同类型、材料桥梁形变在时空维度上的特征差异。

1 研究对象与数据

1.1 江苏跨江大桥概况

江苏省位于我国东部沿海地区,是长江三角洲、长江经济带和长三角城市群的重要组成部分。江苏地处长江、淮河及沂沭泗河下游,境内水系发达、河网密布,对陆路交通构成显著挑战。为此,江苏省建设了规模大、密度高的桥梁网络,其中尤以跨越长江的大跨度桥梁为标志性工程。仅在长江江苏段主航道,就已建成 15 座跨江大桥,其空间分布如图 1(a)所示。这 15 座跨江大桥中,超过半数位于南京市境内,其余长江沿岸城市境内分别建有 2 座或 3 座。

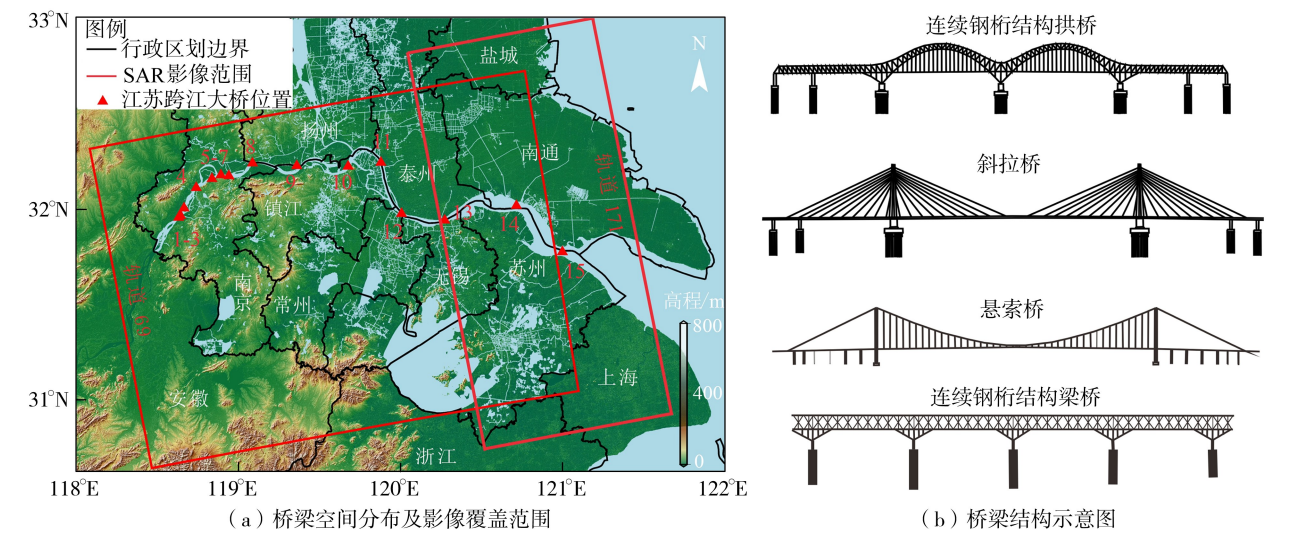


图 1 江苏跨江大桥空间分布与结构示意图

Fig. 1 Spatial distribution and structures of cross-river bridges in Jiangsu Province

长江江苏段主航道上的 15 座跨江大桥的桥梁类型、用途等信息如表 1 所示,按其结构主要可分为钢桁结构拱桥、斜拉桥、悬索桥与钢桁结构梁桥 4 种类型,其典型结构如图 1(b)所示。按桥梁用途统计,跨江大桥以公路桥为主,仅有少量公铁两用桥与铁路桥;就运营时间而言,除南京长江大桥运营已近 60 a 外,其余跨江大桥的运营时间在 5~25 a 之间,均未超过 30 a。江苏长江沿岸广泛分布由河流冲积作用形成的软土层,该类土体具有高含水量、大孔隙比、低承载力等特性^[20-21],在长期荷载作用下易发生显著固结沉降,对跨江大桥等重大基础设施的长期安全运营构成潜在威胁。

表1 江苏跨江大桥基本信息

Table 1 Basic information of cross-river bridges in Jiangsu Province

编号	桥梁名称	桥梁类型	桥梁用途	通车时间
1	京沪高铁长江大桥	钢桁结构拱桥	铁路桥	2011 年 6 月
2	南京大胜关长江大桥	斜拉桥	公路桥	2005 年 10 月
3	南京江心洲长江大桥	斜拉桥	公路桥	2020 年 12 月
4	南京长江大桥	钢桁结构梁桥	公铁两用桥	1969 年 1 月
5	南京八卦洲长江大桥	斜拉桥	公路桥	2001 年 3 月
6	南京新生圩长江大桥	悬索桥	公路桥	2025 年 11 月
7	南京栖霞山大桥	悬索桥	公路桥	2012 年 12 月
8	南京龙潭大桥	悬索桥	公路桥	2025 年 1 月
9	润扬大桥	悬索-斜拉桥	公路桥	2005 年 4 月
10	五峰山大桥	悬索桥	公路桥	2021 年 6 月
11	泰州大桥	悬索桥	公路桥	2012 年 11 月
12	常泰长江大桥	斜拉桥	公铁两用桥	2025 年 9 月
13	江阴大桥	悬索桥	公路桥	1999 年 9 月
14	沪苏通长江公铁大桥	斜拉桥	公铁两用桥	2020 年 7 月
15	苏通大桥	斜拉桥	公路桥	2008 年 6 月

1.2 研究数据

本文采用 Sentinel-1 卫星 C 波段合成孔径雷达(SAR)影像开展江苏跨江大桥形变监测与分析,空间分辨率约 20 m。影像覆盖范围如图 1(a)所示,共选取 2015—2024 年 550 景渐进式扫描地形观测(terrain observation by progressive scans,TOPS)模式 VV 极化单视复数影像,数据涵盖两个轨道:轨道 69(275 景,2015 年 4 月至 2024 年 10 月)与轨道 171(275 景,2016 年 1 月至 2024 年 3 月)。

此外,本文利用 Sentinel-1 卫星精密轨道星历产品与 30 m 空间分辨率的哥白尼数字高程模型(DEM)去除 InSAR 数据处理过程中轨道误差和参考相对形变监测结果的影响。为探究温度变化对桥梁形变的驱动作用,结合欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA5 再分析资料中 0.25°×0.25°的时均气温数据分析桥梁形变与温度变化的响应关系。

2 时序 InSAR 形变监测方法

InSAR 形变监测的基本原理是利用同一地区不同成像时刻的 SAR 回波信号之间的相位差,获取研究区地表形变信息^[22]。本文采用 GAMMA 软件对 Sentinel-1 卫星数据进行处理,结合卫星精密轨道数据以削弱轨道误差,利用 DEM 数据对 SAR 影像进行精确配准、地理编码以及地形相位去除等。根据时空基线情况,设定每景影像最多与后续 5 景进行组合的小基线集干涉策略,以平衡数据量与处理效率。最终轨道 69 与轨道 171 分别生成了 1360 幅和 1355 幅干涉图,其最长时间基线分别为 168 d 和 144 d,最短时间基线均为 6 d,干涉图的时空基线结果如图 2 所示。

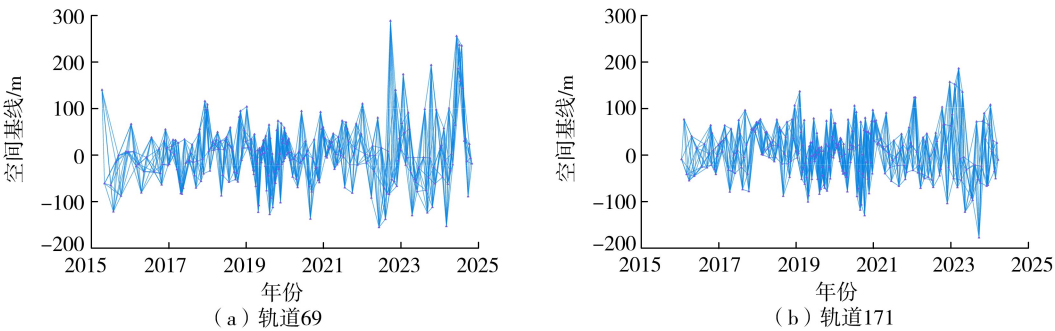


图2 江苏跨江大桥时序 InSAR 形变监测干涉图时空基线信息

Fig. 2 Temporal and spatial baselines of interferograms for time-series InSAR deformation monitoring of cross-river bridges in Jiangsu Province

本文基于 StaMPS/MTI 框架,应用改进的时序 InSAR 分析策略获取江苏跨江大桥形变信息。先利用振幅离差指数法选取候选监测点,然后采用迭代低通滤波提取候选点的空间相关相位分量,根据干涉相位时间

序列标准差进一步筛选候选点;将所有候选相干目标重采样以改善低相干区域的相位质量,并利用统计费用网络流方法^[23]进行干涉相位解缠;最终基于最小二乘法估计监测目标的形变信息。

3 跨江大桥形变 InSAR 监测结果与分析

3.1 成像几何与散射特性

受 SAR 侧视成像几何影响,雷达波束斜向照射地表,导致不同地物特性与几何结构的目标监测效果存在差异。图 3 为不同类别地物的散射特性示意图。卫星雷达波到达水面时发生近似镜面反射,传感器难以有效接收回波信号,后向散射强度弱,因此长江水体呈现为低灰度值区域;而江面上的船只、桥梁则因后向散射强而显示为高灰度值目标。

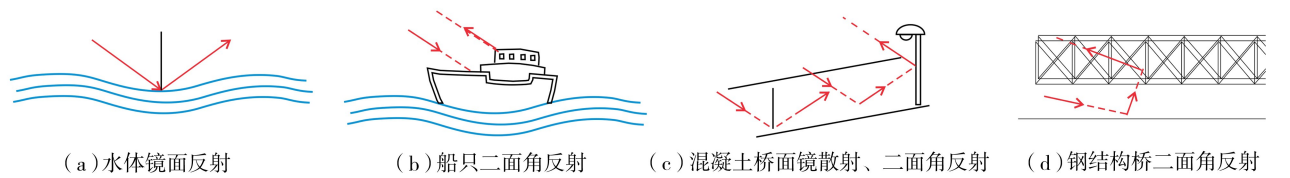


图 3 不同地物 SAR 散射特性对比

Fig. 3 Comparison of SAR scattering characteristics of different ground objects

由于桥梁几何结构、表面材料的差异,跨江大桥上 InSAR 监测点的空间分布特征区别显著。例如,京沪高铁长江大桥跨江部分被连续拱形钢桁结构覆盖,钢桁结构与桥面及钢桁结构之间形成多个二面角反射结构,引发雷达信号多次反射,使得大量回波信号能被卫星传感器接收。因此,桥体部分在 SAR 强度影像上呈现明亮特征,监测点分布密集,且同样呈拱形(图 4(a))。南京大胜关长江大桥为钢塔斜拉桥,桥面为混凝土路面,雷达信号照射时易发生近似镜面反射;路面与路灯、斜拉索等桥梁构件可形成二面角,使部分回波信号到达卫星传感器。但其桥面两侧的斜拉索间距较大,因此桥体部分的 InSAR 监测点数量显著少于京沪高铁长江大桥;钢结构桥塔的散射特性较好,故南北两侧桥塔处的监测点分布相对密集(图 5(a))。

3.2 跨江大桥形变 InSAR 时空特征

本文选取京沪高铁长江大桥(钢桁结构拱桥)、南京大胜关长江大桥(斜拉桥)、南京长江大桥(钢桁结构梁桥)和江阴大桥(悬索桥)这 4 座覆盖了江苏长江主航道上全部桥梁结构类型的典型跨江大桥进行 InSAR 形变分析,4 座桥梁的建成通车时间在 10~60 a 范围内,具有显著的差异性,能够代表不同服役阶段的大桥状态。

3.2.1 京沪高铁长江大桥

京沪高铁长江大桥是南京市境内唯一的高速铁路桥,设计为连续钢桁结构拱桥,采用六线轨道设计,是同时服务于京沪高铁、沪汉蓉高铁及南京城市轨道交通的过江通道。主桥长 1 615 m,于 2011 年 6 月建成通车,可容纳 3 种不同速度等级的列车同时运行^[24]。图 4(a)为桥体年平均形变速率监测结果。5 个 InSAR 典型监测点:JH01、JH05 位于钢桁结构东西两侧,JH02、JH04 位于两处拱形钢结构顶端,JH03 位于主桥中心拱形结构的连接处,沿卫星视线方向的形变时间序列结果如图 4(b)所示,其中正值表示桥体形变朝向卫星,负值表示形变远离卫星。桥梁各部位均存在明显周期性形变,主桥中部区域形变振荡幅度最小,向两端方向逐渐增大。此外,钢桁梁南北两侧(JH01 与 JH05)的形变相位相反。该周期性形变除受钢结构温度敏感性影响外,列车行驶的动态荷载亦可能是重要的驱动因素之一。

3.2.2 南京大胜关长江大桥

南京大胜关长江大桥于 2005 年 10 月正式通车,已运营超过 20 a,是我国首座钢塔斜拉桥。该桥桥面为六车道设计,主跨跨径 1 288 m,南北两侧各设一座 215 m 高的索塔。其桥面以上塔柱为钢结构,桥面以下塔柱为钢筋混凝土结构^[25]。图 5(a)为桥体年平均形变速率监测结果,选取的 5 个典型 InSAR 监测点(DSG01、DSG05 分别位于桥梁主跨南北两端,DSG02、DSG04 分别位于南北两座索塔的钢结构部位,DSG03 位于主跨中心的斜拉索锚固区)形变时间序列如图 5(b)所示。

由图 5(b)可知,桥梁跨径南北两侧桥体区域(DSG01、DSG05)较为稳定,10 a 累计形变量约为 40 mm。

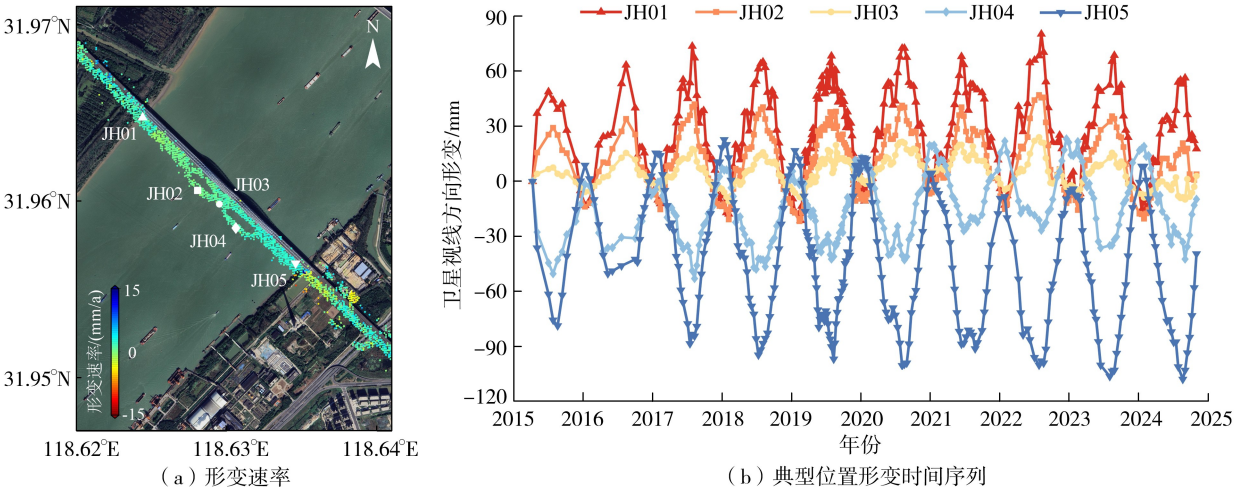


图 4 京沪高铁长江大桥形变时序 InSAR 监测结果

Fig. 4 Time-series InSAR deformation monitoring results of Beijing-Shanghai High-Speed Railway Bridge over the Yangtze River

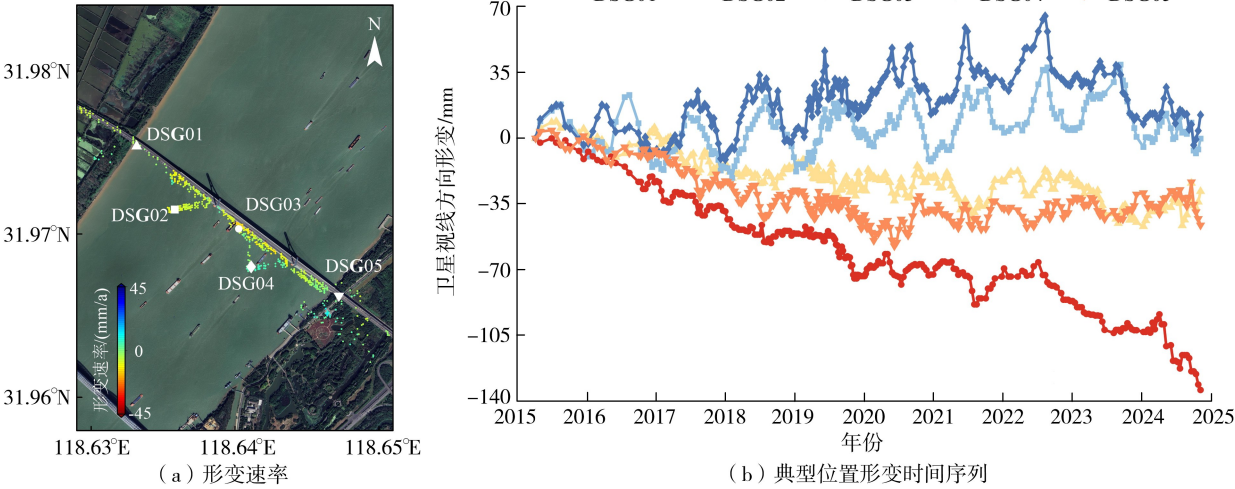


图 5 南京大胜关长江大桥形变时序 InSAR 监测结果

Fig. 5 Time-series InSAR deformation monitoring results of Nanjing Dashengguan Bridge over the Yangtze River

索塔钢结构部位(DSG02、DSG04)存在显著的周期性形变,且两塔时序振荡特征基本一致,除钢结构热胀冷缩的温度效应驱动外,桥面系竖向及水平向荷载对桥塔的影响亦可能是周期性振荡的原因。主跨中心区域(DSG03)形变特征显著,10a 累计形变量接近 140mm。由于斜拉桥结构特性导致受力分布不均,桥梁表面形变呈现显著的时空差异。

相较于连续钢桁结构覆盖的京沪高铁长江大桥,南京大胜关长江大桥桥面与桥塔的面层材料及结构形式差异显著,致使不同位置的形变特征一致性较差。此外,其钢塔处的周期性形变平滑度亦明显低于京沪高铁长江大桥,可能归因于公路桥所受随机交通荷载的非平稳性特性。相较于铁路周期性列车荷载,公路桥输入荷载的规律性较差,从而诱发更为复杂的桥梁结构动力响应。

3.2.3 南京长江大桥

南京长江大桥系长江流域首座我国自行设计建造的双层公铁两用桥,下层双线铁路桥于 1968 年 10 月通车,上层双向四车道公路桥于同年 12 月启用,运营已近 60 a,至今仍是南京市跨江核心枢纽之一。南京长江大桥跨江主桥的上下两层由钢桁架结构连接。由于长期运营,公路桥面反复出现病害,2016 年 10 月公路桥启动了为期 27 月的封闭维修,期间禁止机动车、非机动车及行人通行,但铁路桥维持正常运营^[26]。

图 6(a)为南京长江大桥年平均形变速率监测结果,选取的 5 个典型监测点(DQ01~DQ04 点位于钢桁架主桥上部,DQ05 位于南侧引桥处(该区段上下两层桥体无钢桁架连接))形变时间序列如图 6(b)所示。

由图 6(b)可知,引桥处形变值较为稳定,而钢桁梁主桥则表现出周期性形变特征,此差异主要源于钢结构的热胀冷缩效应以及铁路桥荷载的耦合作用。

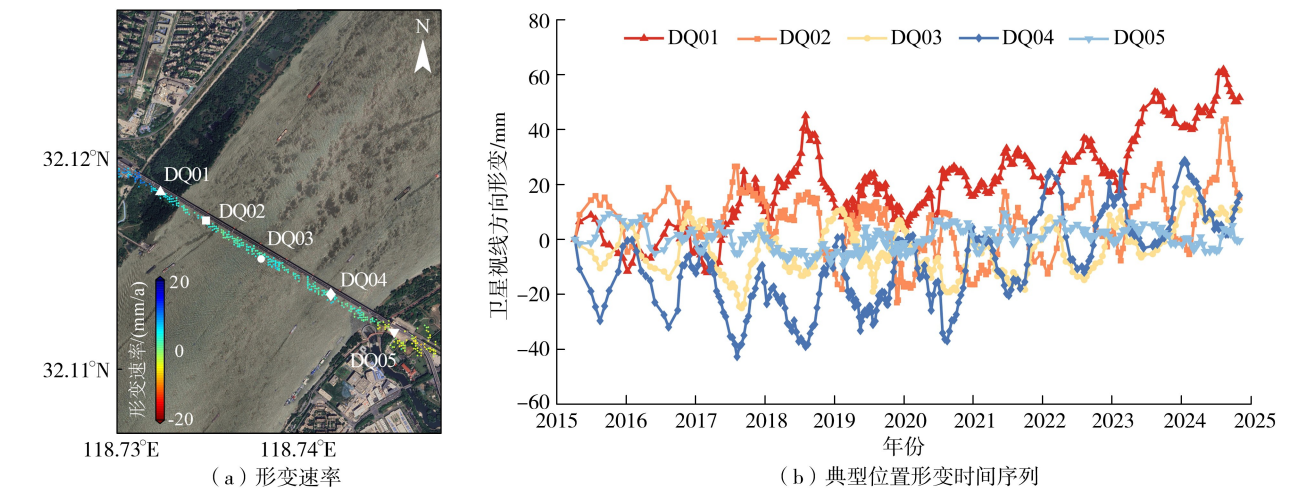


图 6 南京长江大桥形变时序 InSAR 监测结果

Fig. 6 Time-series InSAR deformation monitoring results of Nanjing Yangtze River Bridge

进一步的对比分析显示,南京长江大桥(连续钢桁梁结构)与京沪高铁长江大桥(连续钢桁拱结构)虽同属连续钢桁体系且均呈现周期性形变,但前者时序形变幅度显著小于后者。此现象可能源于南京长江大桥的长期服役,且其公路桥面板对钢桁结构热胀冷缩形变的有效约束作用。

3.2.4 江阴大桥

江阴大桥坐落于靖江市与江阴市之间,是北京至上海国道主干线的关键跨江工程,对贯通苏南苏北具有重要作用。大桥按六车道高速公路标准设计建造,于 1999 年 9 月建成通车,是我国首座跨径超千米的特大型钢箱梁悬索桥。其跨江主桥段无桥墩,仅靠南北两座 190 m 高的桥塔以及两侧缆索支撑桥体^[27]。运营以来累计通行车辆已超 3 亿辆次,且超载、重载车辆通行比例持续增加,对桥梁结构长期性能构成显著影响。

图 7(a)为江阴大桥年平均形变速率监测结果,桥体中部形变较为显著,并向南北两端呈递减趋势。5 个 InSAR 监测点中,JY01、JY05 分别位于主桥南北侧主缆与桥体连接处,JY02、JY04 分别位于南北索塔处,JY03 位于主跨中点。JY04 周边水体区域内识别到的显著 InSAR 信号特征点,对应为南侧桥塔顶部。由图 7(b)可知,桥体中部形变显著,JY03 点累计形变量超 70 mm;主桥两端形变较为稳定,位于主缆与桥体连接处的 JY01、JY05 点累计形变约 35 mm,仅为主跨中部形变量的 50%;索塔处呈现周期性形变特性,南侧桥塔的形变振荡幅度较大。

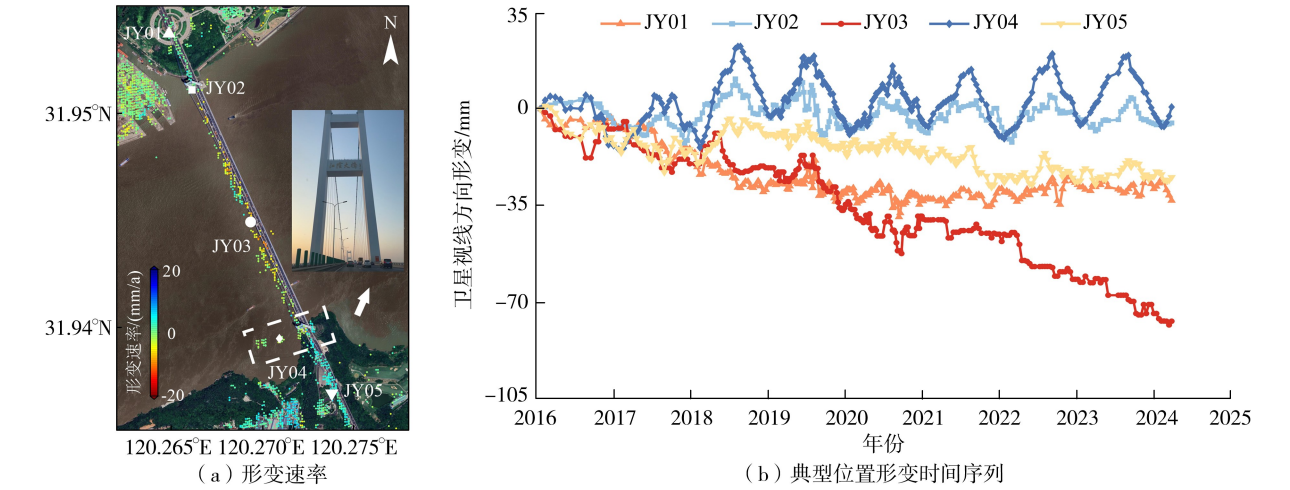


图 7 江阴大桥形变时序 InSAR 监测结果

Fig. 7 Time-series InSAR deformation monitoring results of Jiangyin Yangtze River Bridge

与斜拉桥(南京大胜关长江大桥)的形变空间分布特征相似,悬索桥(江阴大桥)亦呈现桥梁主跨中部形变最为显著、向桥体两侧方向逐渐衰减的特征。同时,索塔处形变受钢梁热胀冷缩效应与桥塔荷载的耦合作用影响,表现出周期性形变特性。对比图 7(b)和图 5(b)可知,江阴大桥主跨中部累计形变量仅为南京大胜关长江大桥对应值的 50%,该差异或主要归因于二者在建造年代、服役时长以及桥体荷载模式等方面的不同。

4 跨江大桥形变温度驱动分析

为探究江苏跨江大桥不同位置的周期性形变特性,本文结合连续小波分析方法^[28]进行研究。针对每座桥梁,分别选取 3 个典型监测点,其连续小波分析结果如图 8 所示。受连续钢桁结构温变效应影响,京沪高铁长江大桥与南京长江大桥在不同位置均表现出显著的年周期性形变特征,而南京大胜关长江大桥与江阴大桥的年周期性形变信号仅明显存在于南北钢结构桥塔处,桥梁主跨区域则未呈现稳定的周期性形变特征。基于小波变换识别的周期性形变特征,依据傅里叶级数理论,构建仅含年周期项的傅里叶级数模型 $f(t)$:

$$f(t) = B_0 + B_1t + B_2\cos(2\pi t) + B_3\sin(2\pi t)$$
(1)

式中: B_0 、 B_1 分别为常数项与线性趋势斜率; B_2 、 B_3 分别为年周期项系数; t 为时间。根据周期项系数计算年周期性形变振幅 A :

$$A = \sqrt{B_2^2 + B_3^2}$$
(2)

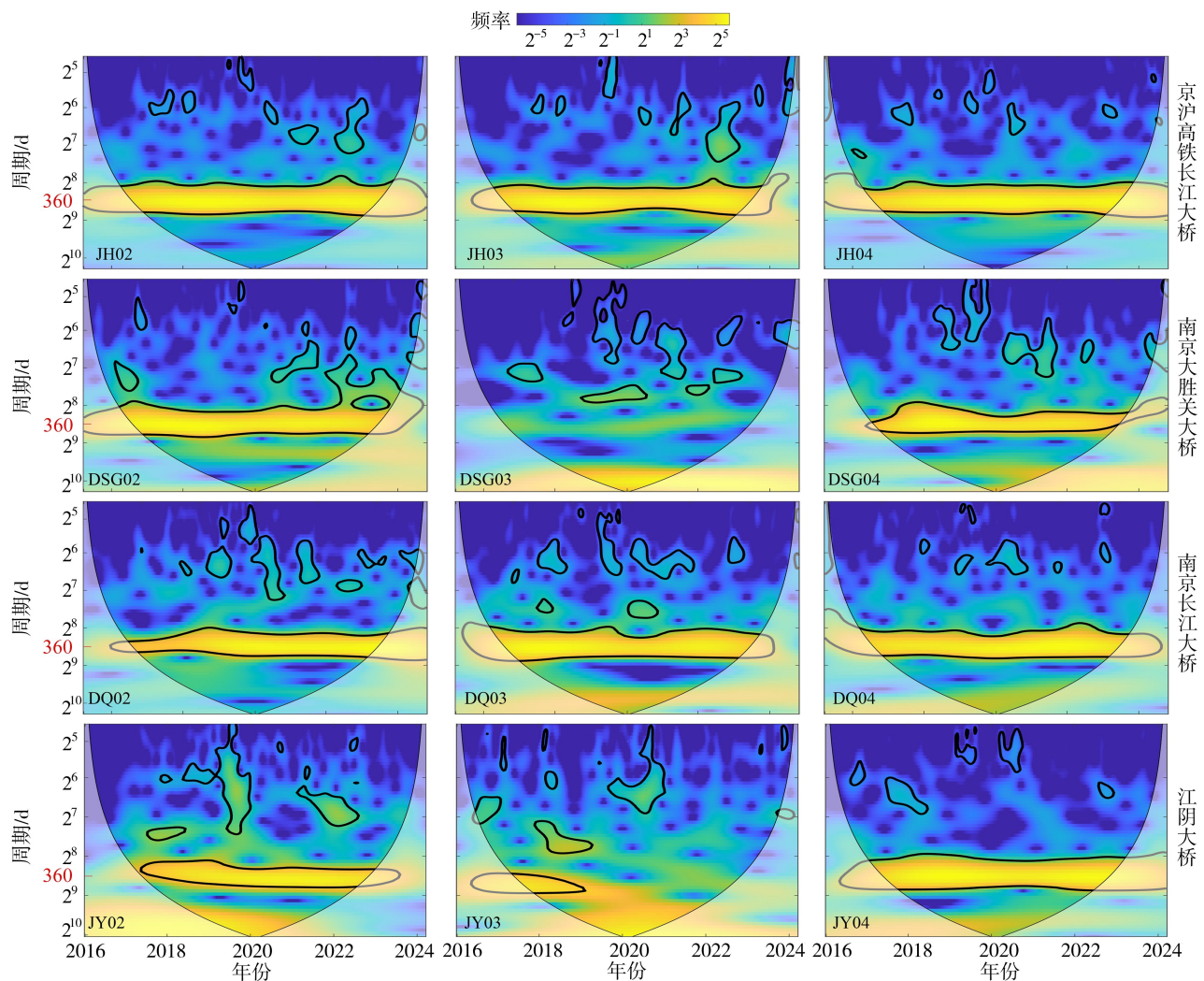


图 8 4 座跨江大桥典型监测点连续小波分析结果

Fig. 8 Continuous wavelet analysis results of typical monitoring points at four cross-river bridges

除主跨中心监测点 DSG03(南京大胜关长江大桥)与 JY03(江阴大桥)因无明显年周期性形变外,4 座跨

江大桥各监测点的形变振幅计算结果如表 2 所示。

由表 2 可见,钢桁结构跨江大桥(京沪高铁长江大桥、南京长江大桥)的周期性形变振幅均呈现由主桥中部向两端逐渐增大的趋势,其中,京沪高铁长江大桥的振幅增幅最为显著。

此外,本文基于 ERA5 再分析资料计算每日平均气温,并选取与 InSAR 时序观测日期匹配的温度数据,开展形变与温度变化的交叉小波分析,结果如图 9 所示。图 9 揭示了桥梁形变与温度变化之间的相位关系:当监测点的形变与温度变化相位角为 0° 时(如 JH02、JH03),两者呈正相关关系;当相位角为 180° 时(如 JH04),形变响应滞后温度变化约 180 d(即 $1/2$ 周期),此时二者呈负相关关系,这反映热胀冷缩效应下形变方向与温度升降呈反向变化。交叉小波对比分析表明,不同类型、材料桥体形变对温度变化的响应程度存在明显差异:京沪高铁长江大桥与南京长江大桥(均为钢桁结构)的形变受温度变化影响较为显著,而南京大胜关长江大桥(斜拉桥)与江阴大桥(悬索桥)的桥体中心区域温变效应相对较弱,两侧钢结构桥塔处的温度响应更为明显。

表 2 跨江大桥周期性形变振幅

Table 2 Periodic deformation amplitude of cross-river bridges		
桥梁	监测点	振幅/mm
京沪高铁长江大桥	JH02	21.4 ± 0.6
	JH03	7.6 ± 0.4
	JH04	22.3 ± 0.6
南京大胜关长江大桥	DSG02	12.4 ± 0.6
	DSG04	9.9 ± 0.9
南京长江大桥	DQ02	11.0 ± 0.7
	DQ03	8.0 ± 0.5
	DQ04	13.0 ± 0.7
江阴大桥	JY02	3.3 ± 0.3
	JY04	9.3 ± 0.4

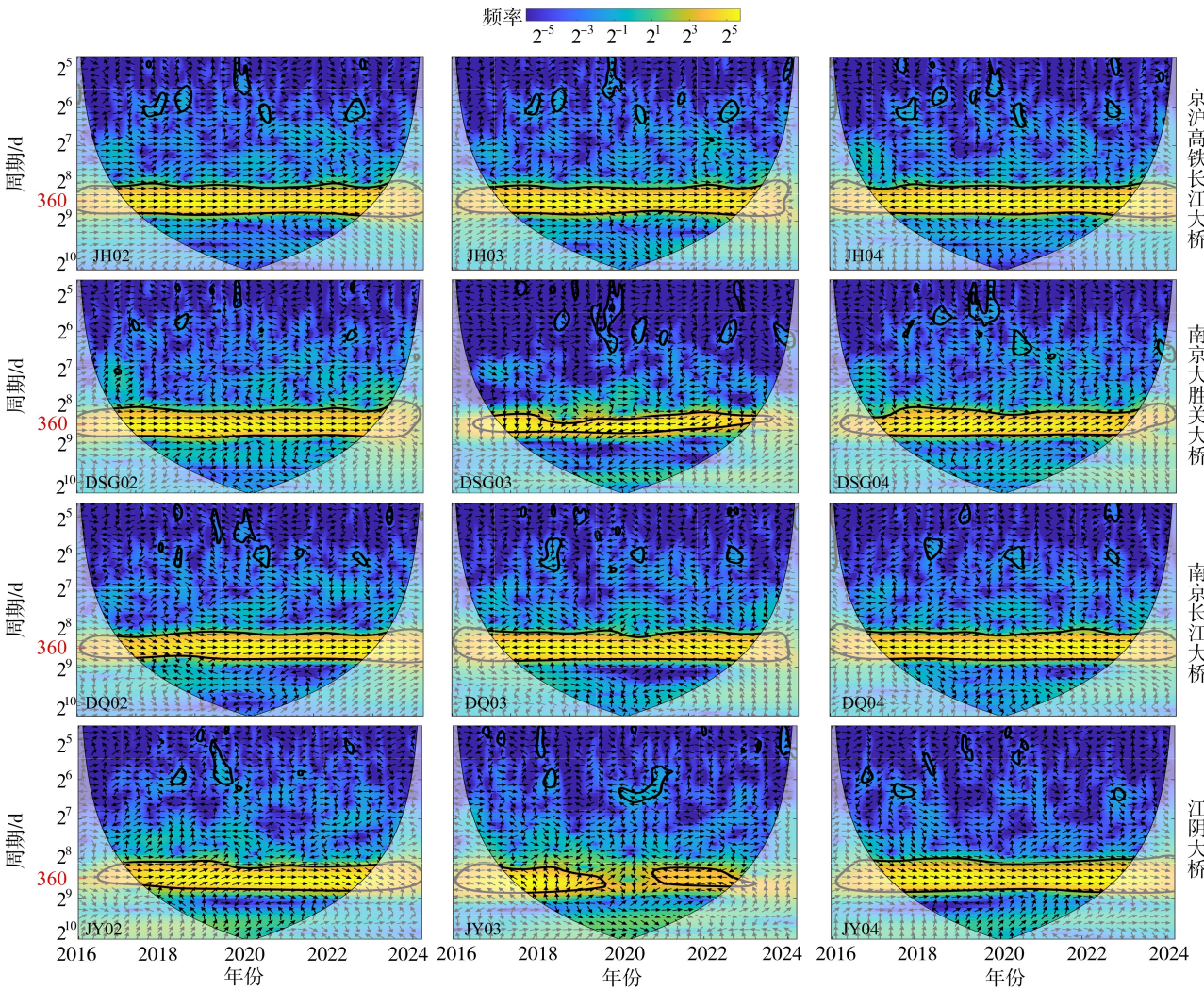


图 9 4 座跨江大桥典型监测点交叉小波变换结果

Fig. 9 Cross wavelet transform results of typical monitoring points at four cross-river bridges

5 结 论

- a. InSAR 技术可有效获取跨江大桥形变信息,其监测效果受桥梁几何结构与材料特性影响显著。跨江大桥桥面与附属结构之间形成的二面角能显著增强 InSAR 后向散射强度。因此,在后向散射特性良好的连续钢桁结构与钢桥塔处,InSAR 监测点分布密集,可精细刻画桥梁的形变特征。
- b. 不同类型跨江大桥的形变时空特征差异显著。连续钢桁结构桥梁整体呈现明显周期性形变,但振荡幅度存在空间分异;斜拉桥与悬索桥因结构特性导致各部位受力不均,形变主要集中于主跨中部,并向桥梁两端逐渐衰减;南京大胜关长江大桥主跨中心最大累计形变量约 140 mm,江阴大桥最大累计形变量约 70 mm。
- c. 不同结构类型跨江大桥形变对温度变化的响应机制不同。京沪高铁长江大桥与南京长江大桥(钢桁结构)桥体形变与温度变化呈现显著相关性,其周期性形变振幅沿主桥中心向桥体两端递增。南京大胜关长江大桥(斜拉桥)、江阴大桥(悬索桥)桥梁中心区域温变效应相对较弱,其显著的周期性热胀冷缩形变主要集中于钢结构桥塔部位。

参考文献:

[1] 黄侨,李维珍,任远,等. 基于监测数据的悬索桥关键约束装置状态评估方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):61-68. (Huang Qiao, Li Weizhen, Ren Yuan, et al. Status assessment method of key restraint devices for long span suspension bridge based on monitoring data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2): 61-68. (in Chinese))

[2] 李振洪,朱武,余琛,等. 影像大地测量学发展现状与趋势[J]. 测绘学报,2023,52(11):1805-1834. (Li Zhenhong, Zhu Wu, Yu Chen, et al. Development status and trends of Imaging Geodesy[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(11): 1805-1834. (in Chinese))

[3] Xiao Ruya, Yu Chen, Li Zhenhong, et al. InSAR stacking with atmospheric correction for rapid geohazard detection: applications to ground subsidence and landslides in China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 115:103082.

[4] 许才军,熊维,刘传金. 利用大地测量观测资料研究青藏高原三维地壳形变及地震危险性评估进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):997-1009. (Xu Caijun, Xiong Wei, Liu Chuanjin. Progress in studying of 3D crustal deformation and seismic risk assessment of the Tibetan Plateau using geodetic observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7): 997-1009. (in Chinese))

[5] 许文斌,罗兴军,朱建军,等. InSAR 火山形变监测与参数反演研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(10):1632-1642. (Xu Wenbin, Luo Xingjun, Zhu Jianjun, et al. Review of volcano deformation monitoring and modeling with InSAR[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(10): 1632-1642. (in Chinese))

[6] 李振洪,宋闯,余琛,等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用:挑战与对策[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):967-979. (Li Zhenhong, Song Chuang, Yu Chen, et al. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring: challenges and solutions[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 967-979. (in Chinese))

[7] 廖明生,董杰,李梦华,等. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测[J]. 遥感学报,2021,25(1):332-341. (Liao Mingsheng, Dong Jie, Li Menghua, et al. Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 332-341. (in Chinese))

[8] Xiao Ruya, Wang Xun, Jiang Mi, et al. Decadal earth observation-informed analysis of urban riverbank deformation: InSAR insights into soft ground dynamics in Nanjing, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2025, 144:104868.

[9] 肖儒雅,何秀凤. 时序 InSAR 水库大坝形变监测应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(9):1334-1341. (Xiao Ruya, He Xiufeng. Deformation monitoring of reservoirs and dams using time-series InSAR[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(9): 1334-1341. (in Chinese))

[10] Xiao Ruya, Jiang Mi, Li Zhenhong, et al. New insights into the 2020 Sardoba dam failure in Uzbekistan from Earth observation[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 107:102705.

[11] Ma Peifeng, Wang Weixi, Zhang Bowen, et al. Remotely sensing large-and small-scale ground subsidence: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 232:111282.

[12] 廖明生,王茹,杨梦诗,等.城市目标动态监测中的时序 InSAR 分析方法及应用[J]. 雷达学报,2020,9(3):409-424. (Liao Mingsheng,Wang Ru,Yang Mengshi,et al. Techniques and applications of spaceborne time-series InSAR in urban dynamic monitoring[J]. Journal of Radars,2020,9(3):409-424. (in Chinese))

[13] Sousa J J,Bastos L. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2013,13(3):659-667.

[14] Qin Xiaoqiong,Zhang Lu,Yang Mengshi,et al. Mapping surface deformation and thermal dilation of arch bridges by structure-driven multi-temporal DInSAR analysis[J]. Remote Sensing of Environment,2018,216:71-90.

[15] Ma Peifeng,Wu Zherong,Zhang Zhengjia,et al. SAR-Transformer-based decomposition and geophysical interpretation of InSAR time-series deformations for the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Remote Sensing of Environment,2024,302:113962.

[16] 周云,危俊杰,李剑,等.基于 InSAR 技术的大跨桥梁温度变形监测研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2024,51(3):39-50. (Zhou Yun,Wei Junjie,Li Jian,et al. Research on temperature deformation monitoring of long-span bridges based on InSAR technology[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2024,51(3):39-50. (in Chinese))

[17] Feng Jinpeng,Gao Kang,Wu Gang,et al. A deep learning-based interferometric synthetic aperture radar framework for abnormal displacement deformation prediction of bridges[J]. Advances in Structural Engineering,2023,26(16):3005-3020.

[18] Qin Xiaoqiong,Ding Xiaoli,Liao Mingsheng,et al. A bridge-tailored multi-temporal DInSAR approach for remote exploration of deformation characteristics and mechanisms of complexly structured bridges[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2019,156:27-50.

[19] 周云,郝官旺,危俊杰,等.基于 PS-InSAR 技术的大跨度桥梁结构变形监测综述[J]. 工程力学,2025,42(4):25-37. (Zhou Yun,Hao Guanwang,Wei Junjie,et al. Review of PS-InSAR-based long-span bridges structural deformation monitoring[J]. Engineering Mechanics,2025,42(4):25-37. (in Chinese))

[20] 岑威钧,魏江梁,郑长海,等.深厚软土覆盖层固结特性对面板堆石坝安全的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):39-46. (Cen Weijun,Wei Jiangliang,Zheng Changhai,et al. Influence of consolidation characteristics of deep soft soil overburden on the safety of a CFRD[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(2):39-46. (in Chinese))

[21] 吴建,周志芳,王浩,等.太湖隧道湖相沉积软土工程特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):63-70. (Wu Jian,Zhou Zhifang,Wang Hao,et al. Study on engineering properties of lacustrine soft soils along the Taihu tunnel[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(2):63-70. (in Chinese))

[22] 肖儒雅,王迅,孙静怡,等.国产 SAR 卫星差分干涉测量地表形变监测比较[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1517-1526. (Xiao Ruya,Wang Xun,Sun Jingyi,et al. Comparisons of differential interferometry of Chinese SAR satellites in ground deformation monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1517-1526. (in Chinese))

[23] Chen C W,Zebker H A. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization[J]. Journal of the Optical Society of America A,2001,18(2):338-351.

[24] 惠汝海,陈斌.南京大胜关长江大桥主梁加速度响应的长期监测与分析[J]. 铁道建筑,2020,60(2):14-17. (Hui Ruhai,Chen Bin. long-term monitoring and analysis on main girder acceleration response of Nanjing Dashengguan Yangtze River Bridge[J]. Railway Engineering,2020,60(2):14-17. (in Chinese))

[25] 茅建校,桂桂,王浩,等.台风下大跨度斜拉桥钢桥塔动力性能实测研究[J]. 中国公路学报,2023,36(7):102-113. (Mao Jianxiao,Gui Gui,Wang Hao,et al. Field measurement research on dynamic performance of steel pylon of a long-span cable-stayed bridge under typhoons[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(7):102-113. (in Chinese))

[26] 熊文,覃忠余,郭建,等.南京长江大桥铁路层车致振动对公路层维修改造的影响分析[J]. 中国公路学报,2021,34(7):246-257. (Xiong Wen,Qin Zhongyu,Guo Jian,et al. Influence on highway bridge deck system reconstruction by train-passing-railway induced vibration of the Nanjing Yangtze River Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(7):246-257. (in Chinese))

[27] Liu Yun,Tao Tianyou,Wang Hao,et al. Probabilistic turbulence spectra of boundary-layer winds based on measurement at Jiangyin Bridge site[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2022,231:105159.

[28] Grinsted A,Moore J C,Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics,2004,11(5/6):561-566.