

DOI:10.13203/j.whugis20180150



文章编号:1671-8860(2018)12-2050-08

PS-InSAR 技术对上海高架路的沉降监测与归因分析

王 茹¹ 杨天亮² 杨梦诗¹ 廖明生¹ 林金鑫² 张 路¹

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 上海地质调查研究院,上海,200072

摘 要:上海市高架道路是上海市重大基础设施工程之一,跨越 11 个行政区,打通了城市交通脉络。为保证其安全运营和可持续发展,利用高分辨率永久散射体雷达干涉测量技术对高架路进行沉降监测,沉降结果与同期水准数据基本保持一致,最大误差不超过 3 mm/a。进一步联合高架路的结构特性、运营车辆的动荷载情况、高架路施工进度,分析了提取的高架路沉降的空间分布情况以及时间演化行为。多因素的归因分析结果表明,上海市高架道路沉降格局与周边区域地面沉降密切相关,同时与高架道路自身荷载和运营车辆动荷载、高架道路建成时间有关。

关键词:PS-InSAR;高架道路;沉降监测;运行状况;归因分析

中图分类号:P237

文献标志码:A

上海地处长江入海口,是长江经济带的龙头城市。而地面沉降这一缓慢性、持久性的灾害,其影响范围和程度随着时间的推移会越来越明显,对城市发展造成的损失和危害十分严重^[1]。其中,地面沉降会对运行的高架道路产生显著影响,加重了高架维护成本与不安全因素。为确保城市高架道路的安全运营,对现有的高架道路进行沉降监测研究是不可缺少的。

时间序列合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)具有高分辨率、大范围、厘米级地表形变场获取的能力^[2]。1999 年前后, Ferretti 等提出了 PS-InSAR (persistent scatterer InSAR) 技术,引入振幅离差来提取时间序列上的稳定 PS 点,监测精度可达毫米级^[3]。近 20 年来,该技术得到了改进与广泛的应用,伍吉仓等^[4]提出在上海地区使用 PS-InSAR 技术监测地面沉降是一种经济有效的选择;裴媛媛等^[5]、王艳等^[6]利用长时间序列 InSAR 技术在上海实验区取得了高精度的实验结果;杨梦诗等^[7]提出多平台 InSAR 数据联合估计沉降速率场方法,并成功应用于上海地区。针对大型线状地物的监测,蒋亚楠等^[8]利用时间序列分析方法对上海磁悬浮列车专线进行了微小形变监测;

秦晓琼等^[9]对上海道路网沉降进行了监测,并分析其时空特性;段光耀等^[10]利用 36 景 ASAR 影像获取了京津城际铁路沿线地面沉降场并分析其演化特征。尽管目前已经开展了一些 InSAR 技术监测线状地物的研究工作,但缺少车辆动荷载等因素对其运营影响的分析。路堤在自重、土层压缩以及动荷载的重复作用下会产生残留变形,其中循环荷载会对材料特性甚至结构稳定性造成巨大影响,可能致使压缩层密实度增加,一定程度上危害路基稳定性。

因此,本文以 PS-InSAR 核心技术为基础,采用覆盖上海区域左右实验区各 12 景 TerraSAR 影像提取了高架道路年沉降速率,监测结果与同期水准作对比验证。此外,还利用多相关因子假设分析的方法,结合提取的周边区域地面沉降、车辆动荷载以及不同建设时间等因子来探讨上海高架道路变化的驱动因素。

1 基于 PS-InSAR 技术对上海高架路进行沉降监测及分析方法

时间序列 SAR 数据中蕴含着反映地物目标长期变化规律的丰富信息。利用 PS-InSAR 技术

收稿日期:2018-05-02

项目资助:国家自然科学基金重点项目(61331016);国家自然科学基金(41571435)。

第一作者:王茹,博士生,主要研究方向为 SAR 数据处理与分析。wangr2017@whu.edu.cn

通讯作者:廖明生,博士,教授。liao@whu.edu.cn

可以在城市地区检测到毫米级的地表微小形变^[11]。本文结合城市重大基础设施工程监测的需求,在前期成熟的 SAR 数据处理技术方法的基础上,根据高架道路的特性,进一步设计出适用于高分辨率 TerraSAR-X 卫星数据精细监测分析大型人工地物的算法及数据处理流程,为城市重大市政工程的安全监测及推广提供强有力的保障。

1.1 大范围 PS 点探测与提取

实验基于前期成熟的 InSAR 数据处理技术方法^[2-3],生成时序差分干涉图,采用基于振幅离差、时间相干系数的多重方法进行大范围 PS 点的探测与提取。在提取的相干点目标上建立 Delaunay 三角网并进行三维时空解缠,然后用时空滤波方法估计并去除每个 PS 点的大气和轨道误差,最终得到形变相位。同时可以估算出每个 PS 点的地表高程值。当采用线性形变模型时,地表的形变相位为:

$$\Delta\phi_{\text{def}} = -\frac{4\pi v T}{\lambda} \quad (1)$$

式中, v 是雷达视线向的线性形变速率; T 为 SAR 影像的成像时间间隔。将式(1)沿垂直于地面的方向进行投影,综合每个 PS 点不同时间间隔对应的垂直形变速率,可以计算出每个 PS 点目标的形变时间序列。

1.2 城市高架道路 PS 点提取

大范围沉降监测结果只能宏观上观测地面沉降趋势,对于具体的工程设施还需进一步进行 PS 点的提取与分析。从物理散射特性方面分析,上海的建筑物、大型人工线状地物大多采用钢筋或混凝土等材料,在 SAR 影像上表现为高相干点目标,并可以构成二面角、三面角等稳定的强散射结构,便于时间序列 InSAR 技术的应用。

本文针对高架道路的特征(其横断面如图 1 所示),空间上,以上海高架道路位置矢量图为基础,选择道路中心线双侧缓冲区 10 m 以内的 PS 点,即城市高架路上的点目标,并根据估计高程值剔除一些虚假目标;时间上,利用相干性最大似然估计值来评估目标点的相位稳定性,并剔除相位不稳定的 PS 点。提取的 PS 点主要分布在路面与防撞墙形成的二面角结构、道路中央和两边的金属栏杆以及一些金属路牌上,因此所得的结果可以较好地反映出高架结构自身的形变。

1.3 城市高架道路沉降驱动因素分析

城市高架道路运行稳定性的影响因素有很多,本文主要关注周边区域地面沉降情况 H_1 、高架道路运营车辆动荷载 H_2 、高架道路建成时间

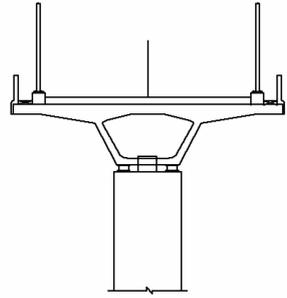


图 1 高架标准横断面

Fig. 1 Standard Cross Section of Viaduct

H_3 等 3 种因素。针对每一种因素 H_i 分别作零假设以及备选假设: H_{i0} : 该因素对高架道路沉降无作用; H_{i1} : 该因素对高架道路沉降起作用。分析高架道路 n 个目标点:

$$\begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{31} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{n3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} = \mathbf{Y} \quad (2)$$

式中, H_{i0} 成立时, $P_{mi} = 0$; H_{i1} 成立时, $P_{mi} = 1$; ϵ_i 为残差变量,即未讨论的其他因素; \mathbf{Y} 为 n 个目标点的真实沉降情况。

对于高架道路任意目标点 P_i , PS-InSAR 方法估计的沉降值记为 v_i 。首先根据经纬度坐标选择该点周边 200 m 范围内的 PS 点集沉降速率平均值作为周边区域地面沉降值 V_i 。逐点比较 v_i 与 V_i , 两者沉降情况一致时,取 $P_{i1} = 1$, 否则取值为 0。其次,根据目标点 P_i 所在路段的车辆拥堵指数 Veh_i 与 v_i 的关系,当 $Veh_i \geq 50$ 且 $v_i < -3$ 或者 $Veh_i < 50$ 且 $v_i > -3$ 时,取 $P_{i2} = 1$, 否则取值为 0。最后,根据目标点 P_i 所在路段的已建成通车运营时间 T_i 与 v_i 的关系,同样根据阈值赋值 P_{i3} 。由此,基于目标点 P_i 的 8 种情况和空间位置讨论高架道路沉降驱动因素的作用情况。

2 高架路沉降实验区概况及实验数据

实验区共有两个覆盖范围的 TerraSAR-X 影像数据,对应的覆盖范围如图 2 所示。覆盖范围内包括内环高架路、中环高架路、外环高架路、南北高架路、延安高架路、沪闵高架路和逸仙高架路,见图 2 中在数据覆盖范围内的黄色高架道路。左右覆盖区均选取 12 幅影像,时间跨度为 2016-10 至 2017-10,其中,左实验区选择 2017-04-29 影像为主影像,右实验区选择 2017-04-18 影像为主影像。选取的影像具体成像时间和垂直基线如表 1 所示。左实验区垂直基线绝对值不超过 440 m,时间基线绝对值不超过 200 d;右实验区垂直

基线绝对值不超过 340 m,时间基线绝对值不超过 180 d;空间基线和时间基线都比较小,有利于相干性的提高,保证高质量干涉成像与相位解缠。

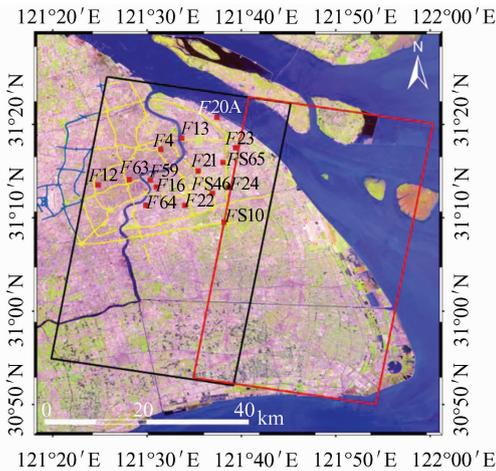


图2 影像的空间覆盖范围,包括高架分布图和已知水准点位

Fig. 2 Space Coverage of the Images, Including the Elevated Road Maps and Known Leveling Points

表1 影像及干涉对信息

Tab. 1 Basic Information of the Interferograms

左实验区		右实验区	
时间	垂直基线/m	时间	垂直基线/m
2016-10-13	-105.4	2016-10-24	182.8
2016-11-15	-31.6	2016-11-26	101.1
2016-12-18	83.2	2016-12-29	331.5
2017-01-20	-57.4	2017-01-31	174.6
2017-03-05	-132.4	2017-03-16	4.2
2017-04-29	0	2017-04-18	0
2017-05-21	-86.1	2017-05-10	189.1
2017-06-12	-85.8	2017-06-01	116.2
2017-07-04	44.8	2017-06-23	270.1
2017-09-08	-52.4	2017-07-15	192.8
2017-09-30	-435.1	2017-08-06	196.5
2017-10-22	52.7	2017-10-11	-155.1

3 城市高架道路 InSAR 沉降监测结果

通过对获取的两个实验区数据集进行处理分析,利用控制点进行实验结果的拼接,得到整体范围内高架道路沿线目标点,并与同期地面水准数据进行参考对比验证。

3.1 高架道路 InSAR 沉降监测结果分析

2016—2017年,上海市主要高架道路年平均沉降速率分布图如图3所示,总体的沉降速率在 $-10\sim 10$ mm/a之间。与往年监测结果相比,出现两部分比较明显的沉降路段。在空间上表现为斜对角分布,大部分沉降速率不超过 -10 mm/a。

主要沉降路段分布如下:

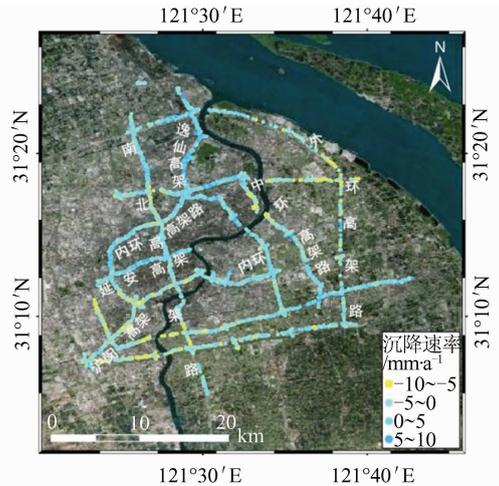


图3 高架沿线沉降速率分布图

Fig. 3 Subsidence Velocity Map of Elevated Highway

1)外环浦东新区高架路段与五洲大道口,交叉口处五洲大道在上方,因此交叉口处的形变主要来自于五洲大道,这里表现出一定的下沉,沉降速率约在 $-10\sim -5$ mm/a之间;

2)中环路东北角军工路隧道附近,这一段主要是隧道区域,因此是隧道上方地物的沉降情况所反映的变化,这段表现出一定量的沉降,沉降速率约在 $-10\sim 0$ mm/a之间;

3)外环高架路的莘庄立交、中环高架路的梅虹路立交和沪闵高速路段主要都在路面上,但地铁1号线从沪闵高架路通过,这块表现出一定的下沉,沉降速率不超过 -10 mm/a。

3.2 InSAR 估计结果的精度分析

为全面评估 InSAR 技术解译的精度,实验采用每年一次的地面面积水准测量数据进行验证。地面水准测量工作基于基岩标或分层标进行测量,为保证 InSAR 监测结果与水准测量结果对比的一致性,通过最邻近法选择 PS 点监测结果与水准点进行对比,评估 InSAR 技术解译的准确性和精度水平。高架附近的地面水准点位置和编号见图2。年平均沉降速率对比结果如图4所示,二者的平均误差为 1.192 mm/a,标准差为 0.816 mm/a,水准测量结果与 InSAR 技术的监测结果保持良好的一致性,对比结果相差不超过 3 mm/a。

另外,考虑时间序列上的沉降量变化,对二者的时间序列变化曲线进行对比,发现其变化趋势比较吻合,进一步证实 InSAR 监测结果的可靠性,可以达到毫米级的精度。F4 位于中心城区,F16 位于浦东花木镇,F22 位于上海浦东新区,FS10 位于磁悬浮列车轨道附近,它们的时间序列曲线如图5所示。

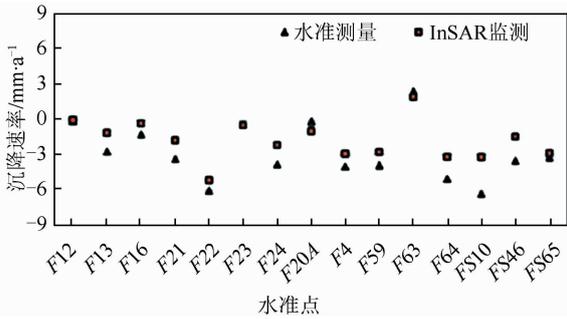


图 4 水准测量与 InSAR 监测的形变速率对比

Fig. 4 Comparison of Deformation Rate Monitoring by Leveling and InSAR

4 城市高架道路沉降成因分析

高架道路沉降变形的影响因素是多方面的,周边区域地面沉降是影响高架道路沉降变形的主要因素^[12]。高架道路自身荷载和运动车辆动荷载对下卧土层产生的附加应力造成的土体压密也会对高架路沿线沉降产生一定的影响。同时,高架道路的建成时间、路网的密集程度及工程建设活动也会对高架路沿线的稳定性产生一定的影响。

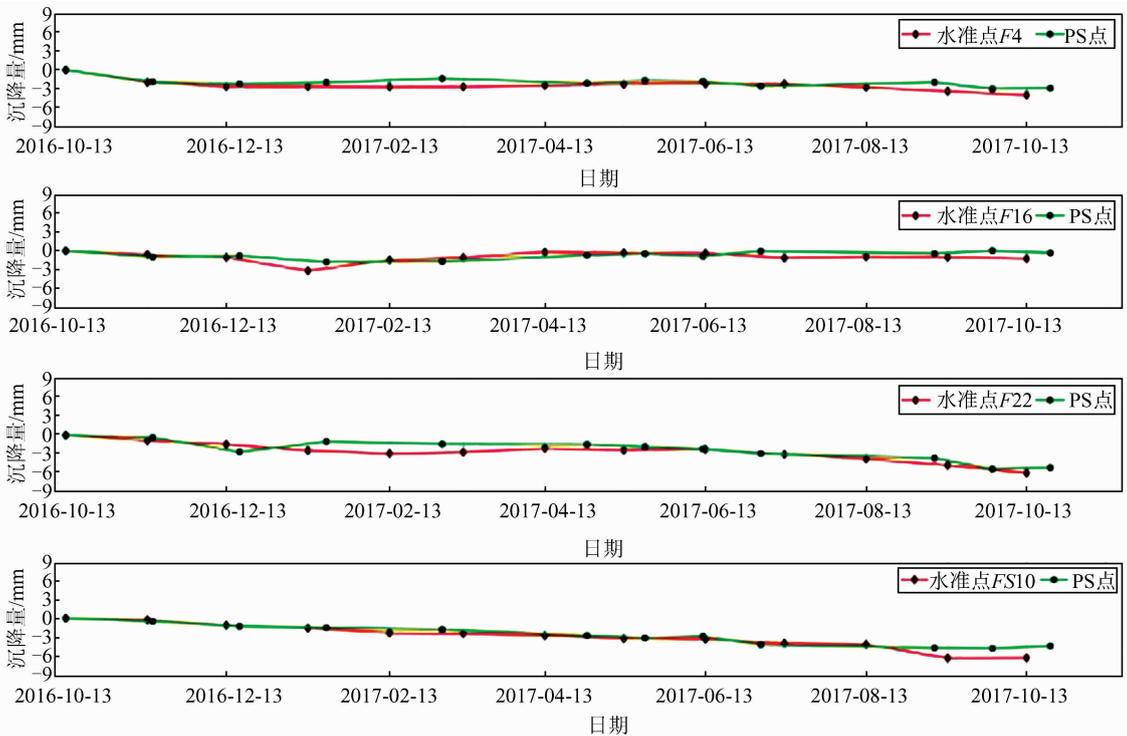


图 5 沉降时间序列对比图

Fig. 5 Subsidence Time Series of Leveling Points

4.1 周边区域地面沉降对高架道路沉降的影响

高架道路一般采用桩基础结构,选用的钻孔灌注桩、管桩和方桩等均属于端承摩擦桩。由于桩身与侧面土层之间摩擦阻力的作用,桩身和周围土层会保持着基本一致的沉降趋势。

如图 6 所示,高架道路沿线几处比较明显的沉降段周边都存在着区域地面沉降趋势。同时,高架道路沿线的沉降速率范围($-10 \sim 10$ mm/a)比周边区域地面沉降速率范围($-20 \sim 10$ mm/a)小,这是由于高架道路通常具有比较稳定的桩基础结构,因此沉降速率比周边区域地面沉降速率小。

4.2 车辆动荷载对高架道路沉降的影响

随着经济的发展,交通量不断增加,车速不断

提高,车辆实际运行过程中施加于路面的明显的动力荷载模式和静力荷载模式差异较大。行车动荷载因素与其他影响高架道路形变的因素相比虽然不大,但这种通常以某种特定频率作用于路基的动态荷载却对路堤维持某一恒定抗剪强度可能产生不利影响^[13]。路堤在自重、土层压缩以及动荷载的重复作用下所产生的残留变形以及循环荷载会对材料特性甚至结构稳定性造成巨大影响,可能致使压缩层密实度增加,一定程度上危害路基稳定性。

图 7 为对应的高架道路工作日拥堵指数分布情况图。交通拥堵指数是用量化方法表达道路交通运行的拥堵程度,是道路交通状态的数字化表达^[14]。上海市道路交通拥堵指数的计算是以一

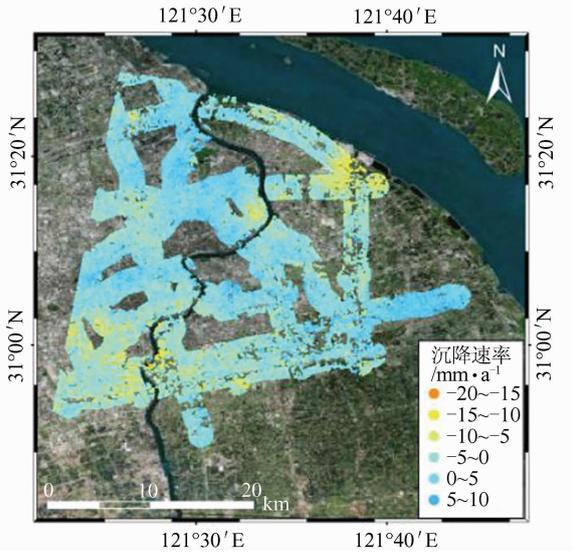


图6 高架路周边地面沉降速率图

Fig. 6 Subsidence Velocity in the Surrounding Area Along the Elevated Roads

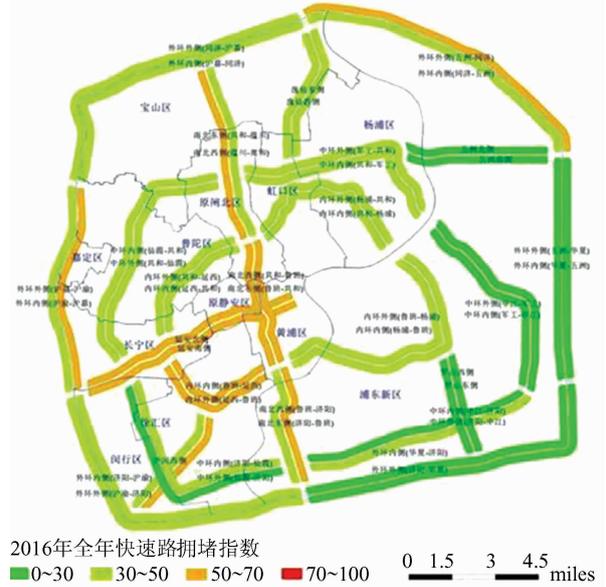


图7 上海高架道路工作日拥堵指数分布图 (央广网,2017)

Fig. 7 Congestion Index Distribution of Shanghai Elevated Road on Weekdays

定范围内各个路段实时采集的平均车速为基本参数,按不同等级道路设施要素和通行能力,加权集成并经过标准化后计算生成,数值介于0~100之间,数值越大,表明道路交通越拥堵。通过历史数据统计分析、出行调查和现场验证,将指数划分为畅通、较畅通、拥挤和堵塞4种拥堵程度等级,如表2所示。

从图7中可以看出,外环高架东北部分路段、南北高架、沪闵高架、内环高架西南部分路段均被列为较为拥堵路段,InSAR解译出的高架沿线沉降速率图(图3)中,上述路段均出现-10~-5 mm/a的地面沉降,说明高架道路会受到车辆动荷载施加的作用力,可以通过限行等有效控制手段平衡各路段交通量,维持高架正常安全运营。

表2 交通拥堵指数分级表^[14]

Tab. 2 Traffic Congestion Index Scale^[14]

项目	等级			
	畅通	较畅通	拥挤	堵塞
指数区间	[0,30)	[30,50)	[50,70)	[70,100)
车流现象				

4.3 建成时间对高架道路沉降的影响

根据上海市高架路建设时间的情况,可以分为2000年前建成通车的路段和2000年后陆续建成通车的路段,两部分的沉降速率图如图8所示。可以看出,近年来建成的高架路的沉降目标点多于2000年前建成通车的路段,但不代表着20世纪90年代通车的高架道路不存在沉降,比如受到徐汇区地面沉降的影响,内环西南角处也出现少

数沉降点,沉降速率不超过-10 mm/a。相比较而言,2000年后建成通车的路段出现沉降的略多,集中在一些交叉路口。由于交叉路口车流量较大,动荷载带来的沉降较大,但沉降速率也不超过-10 mm/a。

统计分析不同沉降速率段的PS点占各自总数的比例(见表3),可以发现,2000年后通车的PS点与2000年前通车的相比,-10~-5 mm/a的比例偏高,整体沉降点(-10~0 mm/a)占比53.75%。而2000年前通车的高架道路沿线出现10.29%的PS点存在5~10 mm/a的回弹,高于2000年后通车的高架沿线PS点。说明高架道路地面沿线在工程结束后存在着先沉降后平稳又少许回弹的趋势。

表3 形变速率统计表

Tab. 3 Statistics of Settlement Velocity

形变范围/ (mm·a ⁻¹)	所占比例/%	
	2000年前通车	2000年后通车
-10~-5	5.58	10.23
-5~0	35.09	43.53
0~5	49.04	41.89
5~10	10.29	4.35

4.4 高架道路沉降驱动因素归因分析

根据前文介绍的模型分析方法,首先得到高架道路PS点沉降值 v_i 、高架道路PS点周边区域地面沉降值 V_i 、所在路段的车辆拥堵指数 V_{eh_i} 和路段已建成通车运营时间 T_i ,其中 $i=1,2,\dots,n$;

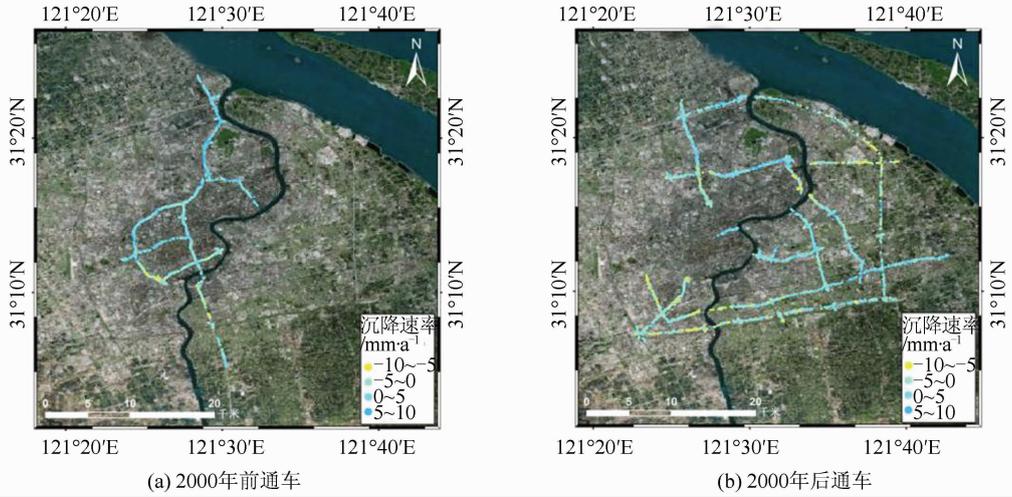


图 8 不同建成时间高架路沉降速率对比图

Fig. 8 Comparison of Settlement Velocity of Elevated Highway for Different Construction Time

$$\begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{31} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & \dots & P_{n3} \end{pmatrix}$$

其次得到 $\begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{31} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & \dots & P_{n3} \end{pmatrix}$, 对于每个目标点可能存在的 23 种情况, 将其结果用不同颜色表示, 并统计每种情况出现的比例, 结果如图 9、图 10 所示。

由图 9 可知, 红色路段代表 3 种驱动因素并行作用于高架道路, 主要分布在逸仙高架路、内环高架路浦西部分北部; 橙色路段表示周边区域沉降和建成时间的影响, 主要分布在延安高架路、中环高架路上中路隧道附近和外环高架路莘庄立交与济阳路之间路段。浦东部分的高架道路包括内环高架路、中环高架路和外环高架路五洲大道以南部分, 即图中黄色路段, 代表着周边区域沉降和车辆动荷载为主要影响因素路段。与浦东部分相比, 浦西部分徐汇区的高架道路情况比较复杂, 多种情况交叉出现。

由图 10 统计数据可知, 单一因素作用的路段较少, 两种或者 3 种因素共同作用于高架道路沉降稳定性的路段占比最多。周边区域地面沉降影响因素占比最大, 约 86.7% 的路段都受到该因素的影响。另外, 不容忽视的 2.05% 的目标点没有探测到任何一种因素, 意味着影响高架路稳定性的还有其他未讨论的因素, 如高架沿线周边工程活动带来的影响、高架道路密度带来的损害风险^[15]、高架沿线地下土层分布影响等。

5 结 语

采用 PS-InSAR 技术监测高架路沿线地面沉降, 具有监测密度大、覆盖范围广、干涉数据处理自动化程度高等特点^[9], 将该技术转为工程应用

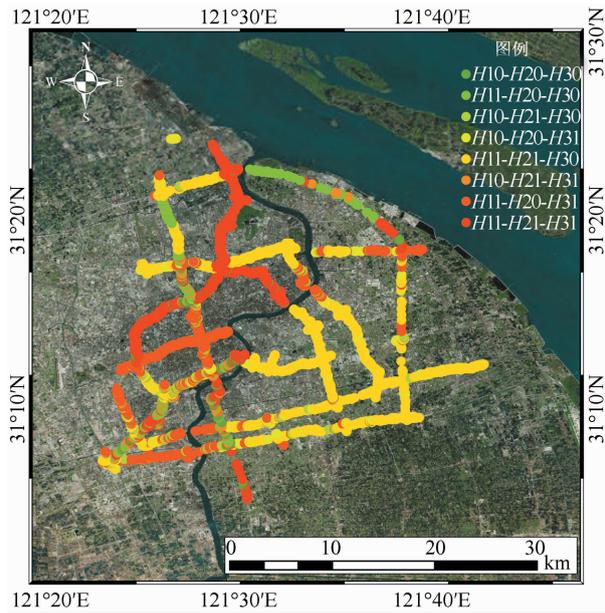


图 9 不同沉降驱动因素作用图

Fig. 9 Different Settlement Driving Factors on the Map

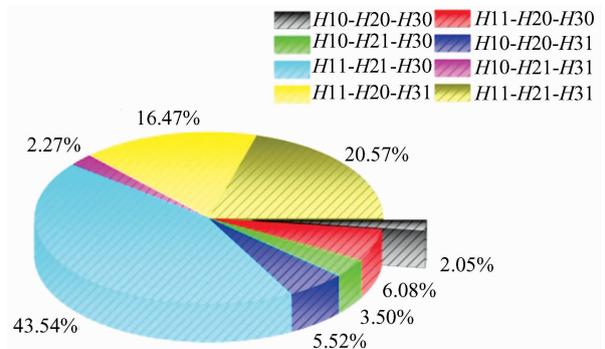


图 10 不同沉降驱动组合因素比例图

Fig. 10 Proportion Map of Different Settlement Driving Factors

十分必要。本文利用高分辨率 TerraSAR-X 卫星

影像数据获取了2016—2017年度上海高架沿线地面沉降速率,并与同期水准数据进行精度验证,进而对沉降成因进行多方面的分析和探讨,为高架道路的沉降监测提供新的思路和方法。

对上海市高架道路沿线的沉降分析表明,主要沉降路段分布在外环浦东新区高架路段与五洲大道口、中环路东北角军工路隧道附近、外环高架路的莘庄立交、中环高架路的梅虹路立交和沪闵高速路段。根据归因分析,约87%的PS点沉降与周边区域沉降相关,约70%的PS点沉降与车辆动荷载相关,约45%的PS点沉降与建成时间相关,即周边区域地面沉降带来的作用占主导因素。

综上所述,基于高分辨率PS-InSAR技术在上海市高架道路沿线地面沉降监测的应用分析,意味着该技术可以成功应用于城市高架道路的形变监测,有待于进一步工程化推广应用。同时,参考更丰富的相关资料和数据有利于更全面系统的归因分析,也是下一步工作的发展方向。

参 考 文 献

- [1] Wang Hanmei. Study on Risk Evaluation and Control Schemes of Land Subsidence in Shanghai City [J]. *Shanghai Geology*, 2010, 31(4): 7-11(王寒梅. 上海地面沉降风险评价及防治管理区建设研究[J]. 上海地质, 2010, 31(4): 7-11)
- [2] Liao Mingsheng, Wang Teng. Time Series InSAR Technology and Application [M]. Beijing: Science Press, 2014(廖明生, 王腾. 时间序列 InSAR 技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014)
- [3] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20
- [4] Wu Jicang, Chen Ying, Wang Jiexian. A New Method for Monitoring Ground Deformation Using Permanent Scatterers SAR Interferometry [C]. 2005 Conference of China Synthetic Aperture Radar, Nanjing, China, 2005(伍吉仓, 陈鹰, 王解先. 一种利用永久散射体干涉测量监测地面形变的新方法[C]. 2005年中国合成孔径雷达会议, 南京, 2005)
- [5] Pei Yuanyuan, Liao Mingsheng, Wang Hanmei. Monitoring Subsidence in Reclamation Area with Time Series DInSAR Images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(9): 1 092-1 095(裴媛媛, 廖明生, 王寒梅. 利用时序 DInSAR 监测填海造陆地区地表沉降[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(9): 1 092-1 095)
- [6] Wang Yan, Liao Mingsheng, Li Deren, et al. Monitoring Land Subsidence Field Using Coherent Points in Long Time-Series [J]. *Journal of Geophysics*, 2007, 50(2): 598-604(王艳, 廖明生, 李德仁, 等. 利用长时间序列相干目标获取地面沉降场[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 598-604)
- [7] Yang Mengshi, Liao Mingsheng, Shi Xuguo, et al. Land Subsidence Monitoring by Joint Estimation of Multi-platform Time Series InSAR Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(6): 797-802(杨梦诗, 廖明生, 史绪国, 等. 联合多平台 InSAR 数据集精确估计地表沉降速率场[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(6): 797-802)
- [8] Jiang Ya'nan, Yang Mengshi, Liao Mingsheng, et al. Deformation Monitoring of the Shanghai Maglev System Based on the Time-Series Analysis of InSAR Data [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2013, 34(4): 17-20(蒋亚楠, 杨梦诗, 廖明生, 等. 应用时间序列 InSAR 技术监测上海磁悬浮列车专线形变[J]. 上海国土资源, 2013, 34(4): 17-20)
- [9] Qin Xiaoqiong, Yang Mengshi, Liao Mingsheng, et al. Exploring Temporal-Spatial Characteristics of Shanghai Road Networks Settlement with Multi-temporal PSInSAR Technique [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2): 170-177(秦晓琼, 杨梦诗, 廖明生, 等. 应用 PSInSAR 技术分析上海道路网沉降时空特性[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(2): 170-177)
- [10] Duan Guangyao, Liu Huanhuan, Gong Huili, et al. Evolution Characteristics of Uneven Land Subsidence Along Beijing-Tianjin Inter-City Railway [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(12): 1 847-1 853(段光耀, 刘欢欢, 宫辉力, 等. 京津城际铁路沿线不均匀地面沉降演化特征[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(12): 1 847-1 853)
- [11] Chen Jiwei. Development and Prospect of the Permanent Scatterers Technique on Land Subsidence [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(5): 88-90(陈基伟. PS-InSAR 技术地面沉降研究与展望[J]. 测绘科学, 2008, 33(5): 88-90)
- [12] Huang Xiaoqi. Study on Land Subsidence Monitoring in City Viaduct [J]. *Shanghai Geology*, 2007(3): 32-34(黄小秋. 城市高架道路沉降监测研究[J]. 上海地质, 2007(3): 32-34)
- [13] Fan Yunlong. Analysis and Research on Subgrade Response Under Traffic Load [D]. Changsha: Central South University, 2008(樊云龙. 交通荷载作用下路基响应的分析和研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008)

- [14] Shanghai Traffic Information Center. What is Traffic Trip Index? [EB/OL]. <http://www.jtex.sh.cn/zhishu/jiedu.html>, 2018(上海交通大学信息中心. 什么是交通出行指数? [EB/OL]. 上海交通出行网, 2018)
- [15] Wang Hanmei. The Risk Assessment System and Risk Management of Land Subsidence in Shanghai [D]. Shanghai: Shanghai University, 2013(王寒梅. 上海市地面沉降风险评价体系及风险管理研究 [D]. 上海:上海大学, 2013)

Attribution Analysis on Deformation Feature of the Shanghai Elevated Highway by Persistent Scatterer SAR Interferometry

WANG Ru¹ YANG Tianliang² YANG Mengshi¹ LIAO Mingsheng¹ LIN Jinxin² ZHANG Lu¹

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China

Abstract: Elevated highway is one of the major infrastructures in Shanghai spanning 11 administrative regions. In order to ensure its safe operation and sustainable development, high-resolution persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR) technology is used to monitor and analyze the displacement of the elevated highway, combining with the level data to further verify the monitoring accuracy. The settlement results are basically consistent with the leveling data, and the maximum error does not exceed 3 mm/a. The results of multi-factor attribution analysis show that the settlement pattern of elevated roads is closely related to the land subsidence in the surrounding areas, the dynamic load of the operating vehicles, and the time about elevated road was built.

Key words: PS-InSAR; elevated highway; subsidence monitoring; operational state; attribution analysis

First author: WANG Ru, PhD candidate, specializes in SAR data processing and analysis. E-mail: wangr2017@whu.edu.cn

Corresponding author: LIAO Mingsheng, PhD, professor. E-mail: liao@whu.edu.cn

Foundation support: Key Project of the National Natural Science Foundation of China, No. 61331016; the National Natural Science Foundation of China, No. 41571435.