

基于时序 InSAR 遥感监测的中山市软土地面沉降特征及成因研究

李长山¹, 迟帅²

(1. 中山市海洋与地质环境监测站, 中山 528400; 2. 广东省地质局第十地质大队, 中山 528427)

摘要: 珠三角地区地面沉降灾害时有发生, 受限于现有 GPS、水准监测等手段监测范围窄、耗时长等问题, 难以对区域范围内的软土地面沉降特征做出精准判识。因此, 本文引入时序 InSAR 的先进遥感监测技术, 对研究区中山市广域地面沉降特征及成因深入分析。研究表明: (1) 中山市软土地面沉降受内在因素和外在因素的共同影响, 内在因素主要为软土的工程地质特性、软土固结程度, 外在因素主要为地下水开采、车辆动荷载和建筑物静荷载。(2) 中山地区软土地面沉降类型主要为: 新近沉积松散堆积物自重固结型、大面积欠固结填土压密固结型、地下水位下降导致压密固结型、交通线路车辆动荷载压密固结型和地面建筑物静荷载压密固结型。(3) 中山市软土地面沉降成因为: 受自重应力、动、静荷载附加应力、地下水位波动导致软弱土体颗粒骨架改变、有效应力重分布, 产生压密固结, 诱发地面沉降灾害。(4) InSAR 监测结果表明, 2015—2018 年中山市最大沉降区位于坦洲镇, 最大沉降速率为 35 mm/a, 2019 年~2020 年中山市坦洲镇地面沉降影响范围最广, 沉降速率最快, 区内最大沉降速率超过 38 mm/a。

关键词: 地面沉降; 时序 InSAR; 遥感监测; 沉降成因

中图分类号: P642.26; P642.13⁺3; X83 **文献标识码:** A

STUDY ON THE CHARACTERISTICS AND GENETIC OF SOFT LAND SUBSIDENCE IN ZHONGSHAN CITY BASED ON INSAR REMOTE SENSING MONITORING

LI Chang-shan¹, CHI Shuai²

(1. Zhongshan Marine and Geological Environment Monitoring Station, Zhongshan 528400, China;

2. The 10th Geological Brigade of Guangdong Geological Bureau, Zhongshan 528427, China)

Abstract: Land subsidence disasters occur from time to time in the Pearl River Delta region. Due to the problems such as narrow monitoring range and long time consuming by existing GPS, level monitoring and other means, it is difficult to accurately identify the characteristics of soft land subsidence within the region. Therefore, the advanced remote sensing monitoring technology of InSAR was introduced in this paper to deeply analyze the wide-area land subsidence in Zhongshan City in the study area. The results show that: (1) The settlement of soft soil in Zhongshan City is affected by both internal and external factors; (2) The main settlement types of soft land in Zhongshan area are: self-weight consolidation of newly deposited loose deposits, compaction and consolidation of large-area under consolidation fill, compaction and consolidation caused by groundwater level drop, compaction and consolidation under dynamic load of traffic line vehicles and compaction and

consolidation under static load of ground buildings; (3) The cause mechanism of soft soil surface settlement in Zhongshan City is as follows: the gravity stress, the additional stress of dynamic and static load, and the fluctuation of groundwater level lead to the change of the particle skeleton of soft soil and the redistribution of effective stress, resulting in compaction and consolidation and inducing ground settlement disaster; (4) The InSAR monitoring results showed that the largest subsidence area of Zhongshan City was located in Tanzhou Town from 2015 to 2018, and the maximum subsidence rate was 35 mm/a.

Key words: land subsidence; temporal InSAR; remote sensing monitoring; subsidence genetic

珠三角平原区是人口高密度区,也是我国经济最发达地区之一。随着经济的快速发展,人类工程活动对地质环境的作用及相互影响日益明显,其中地面沉降地质灾害是本文研究区中山市内的主要地质灾害之一^[1-3]。地面沉降灾害影响因素众多,成因类型多样,研究区部分地区已出现严重地面沉降现象,如:公路塌陷开裂、管段错段、房屋地基下沉等,造成严重经济损失^[4-6]。为此,采用基于时序 InSAR 遥感监测的手段对中山市软土地区开展地面沉降影响因素分析、沉降类型总结、监测地面沉降等,对中山市经济长远发展及类似软土地区地面沉降防控具有重要意义。

关于地面沉降监测,诸多学者已开展较多努力且取得良好成果^[7-9]。顾春生等^[10]对江苏常州地面沉降提出了水准测量、光纤监测孔等多监测技术集成的方法,构建立体监测网络,提升监测精度及可靠性。闵望等^[11]采用“星-地-内”立体综合观测与驱动因素协同框架,对连云港地区地下水开采引起的地面沉降进行监测。陈玉林等^[12]利用广州南沙区 GPS 地面沉降系统数据,采用 3 种不同的基准点方案开展数据处理,最终获得 18 个月 GPS 监测沉降序列。但传统的地面监测技术对广域范围长时间序列地面沉降监测较为困难,为此,亟需引入新的监测技术来弥补这一缺陷^[13-16]。InSAR 作为一种新型空间对地观测技术,利用同模式多期 SAR 相位差分计算获取高精度的地表形变信息,具有全天时、全天候、高精度的特点^[17-21]。聂运菊等^[22]采用 SBAS-InSAR 对广州市地面沉降开展监测,认为广州市的软土是导致沉降的主要因素。林广坤^[23]基于时序 InSAR 对广州南沙区地面沉降开展监测,认为南沙区地面沉降总体稳定,呈现南部高于北部的特点。刘自荣等^[24]基于 PS-InSAR 对佛山三龙湾地区地表形变开展监测,认为佛山三龙湾高端创新集聚区目前处于地面沉降的发生阶段,沉降范围在未来将会逐渐扩大,沉降速率逐渐增加。现有研究成果对

珠三角地区,尤其是中山市地面沉降类型缺乏系统性总结,地面沉降特征及地面沉降成因研究仍较为缺乏^[25-27]。对此,本文基于时序 InSAR 遥感技术对中山市软土地面沉降特征及成因开展研究,研究成果期望能为珠三角地区经济发展起到积极作用。

1 中山市软土地面沉降概况

中山市地面沉降发展过程主要分为发现阶段、初步发展阶段及快速发展阶段 3 个时期。发现阶段:1978~1982 年,广州-江门幅区域水文地质普查结果表明,从 20 世纪 70 年代开始,珠江三角洲地区已在局部开始出现地面沉降现象。初步发展阶段:20 世纪 90 年代中期广东省环境地质调查结果表明,中山北部广泛分布松散粉细砂和淤泥,极易产生沙土液化及淤泥触变,致使建筑物产生不均匀沉降。快速发展阶段:20 世纪 90 年代末至 21 世纪初,人类活动对地质环境影响加剧,如中山坦洲低围街,由于软土地基排水固结及临河涌涨落潮冲(掏)引起土体不断流失,2018 年 1 月~2019 年 1 月间产生不均匀地面沉降,累计最大沉降量达 1.50 m (图 1)。

2 中山市软土地面沉降影响因素

2.1 内在影响因素

(1) 软土工程地质特性:软土的工程地质特征主要表现为:含水量高、孔隙比大、渗透性差、高压缩性、承载力低、易触变流动、变形持续时间长等特点。通常,软土地带地面沉降量的大小与软土沉积时代、软土厚度、埋藏条件及上覆填土厚度大小等密切相关。软土的沉积时代越老、埋深越大、软土与填土层厚度越小的区段,地面形变量越小,对工程的影响越小。

(2) 软土固结程度:软土处于欠固结状态时,受

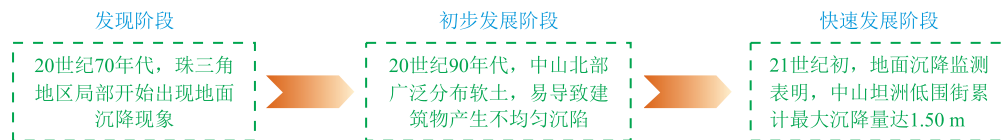


图1 研究区地面沉降发展过程示意

上覆填土影响,颗粒骨架结构会产生改变,应力分布特征也将随之调整,逐渐压密,诱发地面沉降。软土固结程度越好,地面沉降量越小。

2.2 外在影响因素

(1) 地下水开采:研究区地热开发利用及水产养殖导致地下水过量开采,基岩裂隙水地下水位下降。伴随第四系含水层水位变化,引起土层中孔隙水压力降低,导致颗粒间有效应力增加。有效应力的增加,等同于给土层施加一附加应力,使软弱土层受到压缩沉降,诱发地面沉降。

(2) 车辆动荷载:研究区软土分布地带,公路、铁路等交通线路由于车辆动荷载附加应力的影响,导致软弱土体结构改变,产生地面沉降。刚性强度不同的交通线路,尽管在建设过程中都采取了各种有效措施以减少软基路段工后不均匀沉降,但依然难以完全避免工后软基沉降,常造成软土路段普遍存在路面波状起伏、路基侧向位移、路桥接触处桥头跳车、路面开裂等现象。

(3) 建筑物静荷载:软土分布地带修建多层和高层建筑物,由于建筑物静荷载附加应力的作用,软土地基受荷后会出现较高的超静孔隙水压力,这是软土变形延续时间长且具有流变特性的原因。导致软弱土应力调整,结构改变,形成严重的软土地面沉降,尤其是直接建于软土上覆黏性土层之上的低层建筑常与地基整体下沉或歪斜开裂。当荷载不断增加并超过容许承载力或受力不均时,建筑物即开始下沉或倾斜,产生较大的沉降量,严重时甚至倒塌。

3 中山市软土地面沉降类型及成因分析

3.1 中山市软土地面沉降类型

(1) 新近沉积松散堆积物自重固结型

中山范围内平原区,由于地层基底均被第四纪新近沉积的松散堆积物所覆盖,堆积物沉积时间较短,尚未完全密实固结,自然固结现象十分普遍。如中山市坦洲镇群联村拱北自来水厂,楼体与地基脱离,地基水泥台阶呈波浪形,建筑四周地面下沉40~110 cm,形成明显“吊脚楼”,主要表现为新近沉积松散堆积物自重固结型地面沉降类型(图2)。

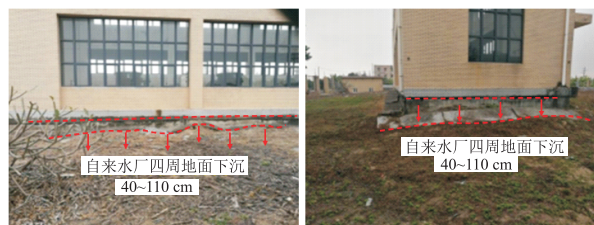


图2 中山市坦洲镇群联村拱北自来水厂地面沉降

(2) 大面积欠固结填土压密固结型

研究区大面积欠固结填土主要分布于靠近丘陵、地台的建筑区,平原上居民区和工业园区及沿海或河道沿岸等地区。地面沉降程度因填土厚度、压密情况而不同。如中山市黄圃港内贸码头,位置靠近南沙港铁路,附近主要是施工材料制作现场,新建厂房不到1 a,部分地基沉降20 mm,墙体裂缝长2~3 m,墙体开裂明显(图3)。

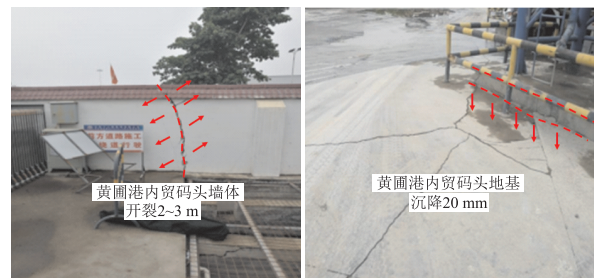


图3 中山市黄圃港内贸码头地面沉降

(3) 地下水水位下降导致压密固结型

研究区西江沿岸及坦洲镇区,水产养殖业大量开采地下水以供水产养殖,平原区软弱类土分布广泛并且厚度大,故本类型实际上是在开发利用地下水与软弱类土自重固结共同作用产生。由于平原区大量抽采地下水引起水位下降,加速软弱土层中水分排出,致使原来一直缓慢自重固结的软弱类土固结速度加快,加速地面沉降。中山市西江沿岸地面沉降区,主要为第四系松散堆积层软土为主,少量砂砾、中粗砂,地下水赋存条件差,地下水富水性中等。研究区内地下水开采主要用于水产养殖,具有十分明显的季节性,地下水短期内大量集中开采导致含水层中地下水疏干,含水层固结压密。随着含水层中地下水疏干后,由软土层向外缓慢释水,加速软土

固结,形成地面下沉现象。地下水开采量较大的地区主要位于中山市板芙镇西部-横栏镇-坦洲镇等水产养殖业为主的区域,其地面沉降灾害现象多分布在野外鱼塘周边道路旁。

(4) 交通线路车辆动荷载压密固结型

研究区内交通线路车辆动荷载压密固结诱发地面沉降主要是在软弱类土,上部施加动荷载产生附加应力。如道路和堤坝等地,在过往车辆的动荷载作用下,路面(或堤坝)整体下沉,雨季被水浸淹,或者路面与具有桩基础的桥梁(或水闸)间存在明显不均匀沉降,导致路面(堤坝)与桥梁衔接处下沉拉裂,形成陡坎,经多次修补后,路面与桥梁间形成斜坡。如中山市南头镇南头轻轨站,在过往车辆的压缩、自重压缩下出现地表部分下沉,地面呈线状开裂,基底部分掏空,上下错断,最大沉降量 470 mm,沉降面积 600 m²,沉降速率 4.3 mm/a(图 4)。

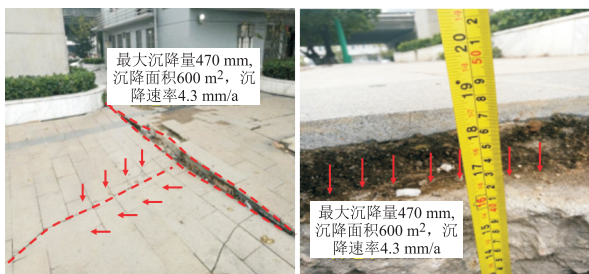


图 4 中山市南头镇南头轻轨站地面沉降

(5) 地面建筑物静荷载压密固结型

地面建筑物静荷载压密固结诱发地面沉降主要是在软弱类土,上部附加静荷载,如构筑(建筑)物、堆土等物体的重力作用,致使下部软弱类土受压产生固结效应。建筑物荷载直接加载于软土层上,中山市坦洲镇群联村群联综合市场,多年来在楼房荷载及自重应力共同作用下产生地面沉降。群联市场楼体周边出现整体下沉现象,下部严重掏空,楼体距离地面高 50~130 cm,水管错断现象明显,部分台阶出现明显裂缝,地面下沉严重(图 5)。

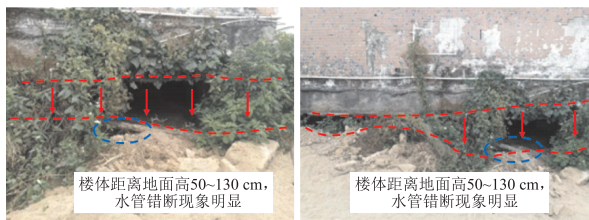


图 5 中山市坦洲镇群联村群联市场地面沉降

3.2 中山市软土地面沉降成因分析

地面沉降通常可分为瞬时沉降、固结沉降和次

固结沉降 3 个阶段。研究区内地面沉降主要受软弱类土自重应力、上部大面积填土产生附加应力、地下水水位下降产生附加应力、交通线路车流量产生的动态附加应力、上部建筑物产生的附加应力等单一或多种应力叠加作用诱发,其内在地面沉降成因如下(图 6)。

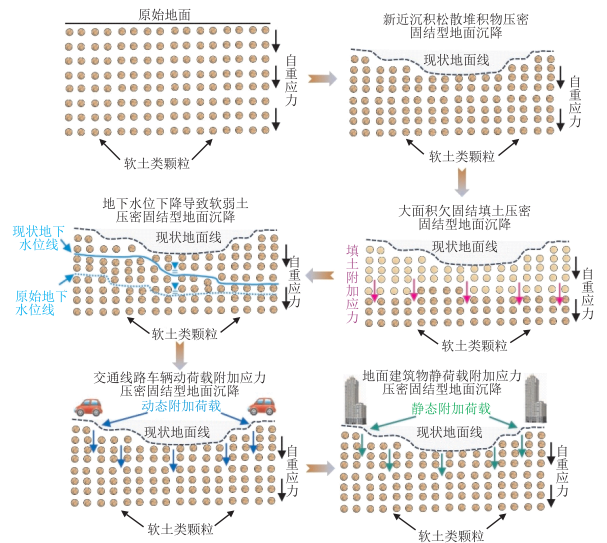


图 6 中山市软土地面沉降成因

(1) 新近沉积松散堆积物压密固结型地面沉降
天然状态下,新近沉积松散堆积物软土类颗粒在自身重力作用下蠕变,颗粒间有效应力增加,土层逐渐被压密并产生缓慢的压缩固结。在一定深度范围内的土体竖向有效自重应力为其上部土层厚度与有效重度之积,由于压缩固结导致地面沉降。

(2) 大面积欠固结填土压密固结型地面沉降
中山市翠亨新区内围海造地填土和工程建设填土自 20 世纪 80 年代开始一直持续至今。滨海城市大面积欠固结填土会对原有软土产生附加应力作用,填土之下的软弱类土体除受自身重力影响外,还受上覆填土附加应力影响。附加应力的作用使得下伏软弱类土体颗粒间的有效应力增加,产生压密固结,进而诱发地面沉降。

(3) 地下水水位下降导致软弱土压密固结型地面沉降

研究区内由于水产养殖大量开采地下水导致地下水位下降,由于区内地下水以潜水-微承压水为主,地下水水位下降主要改变软弱类土体应力结构。宏观上地下水位下降改变了第四系潜水承压含水层的水头压力,局部水位下降形成降落漏斗,致使贮存地下水的含水层孔隙压力产生变化;同时随着土体有效应力相应增大,导致软土类地层被压密,形成地面沉降。微观上,超采地下水引起地下水水位下

降,使得原本应由地下水承受的应力不断转嫁至土壤颗粒骨架上;同时由于地下水溶解、离子交换等作用,土壤颗粒受到侵蚀,致使颗粒本身强度降低,同时所受应力增加,加速土层压缩固结过程,形成地面沉降。

(4) 交通线路车辆动荷载附加应力压密固结型地面沉降

研究区交通线路路基若直接修建于软弱类土体之上,那么土体所受的附加应力将主要来源于上部路基的自重和长期车流碾压产生的动态附加应力两部分。其中,长期车流碾压产生的动态附加应力会改变软弱类土体的颗粒骨架结构和有效应力分布,引起交通线路地面沉降。对于刚性较大的路面结构,会对车辆动荷载产生扩散作用,路面沉降较为均匀,但仍会有波状起伏;而对于刚性较小的路面结构,车辆动态荷载对局部路面产生冲击力作用,直接破坏路面,致使路面坑洼不平。

(5) 地面建筑物静荷载附加应力压密固结型地面沉降

研究区建筑物直接修建于软弱类土体之上时,其自重荷载将直接以静态荷载附加应力的形式作用于软弱类土体上。经过较长时间的作用,软弱类土体内部的颗粒骨架结构调整,有效应力环境改变,软弱类土被压密固结而产生地面沉降,导致其上建筑物形成“矮楼”“吊脚楼”等。

4 基于时序 InSAR 遥感监测的中山市软土地面沉降特征

4.1 2015 年~2018 年地面沉降监测

利用 Sentinel-1 雷达数据,以 D-InSAR 为基础,生成干涉图集,通过 PS 方法选择稳定的散射目标,对相干目标点相位信息进行解算,从而获取相干目标点年度地面沉降信息。2015 年 6 月~2018 年 6 月中山市地面沉降监测结果表明,中山市存在明显的地面沉降现象,地面沉降主要沿江分布,越靠近海域平原区地面沉降越显著;地面沉降速率大且影响范围广的区域分布于中山市的坦洲镇,最大沉降速率为 35 mm/a(图 7)。

4.2 2019 年~2020 年地面沉降监测

2019 年 6 月~2020 年 6 月基于 InSAR 的中山市地面沉降监测结果表明:地面沉降主要沿河流分布,越靠近海域平原区地面沉降越显著;东北部沿洪奇沥水道和西南部沿磨刀门水道形成明显的沉降带,越向下游靠海区域地面沉降更为明显(图 8);监

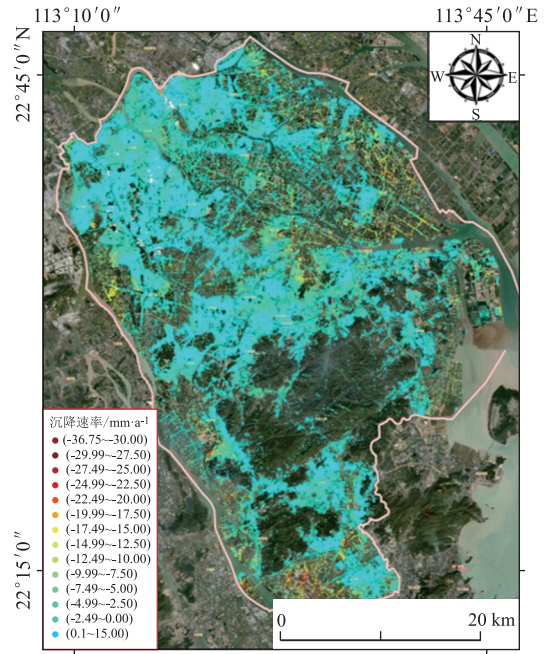


图 7 中山市 InSAR 调查地面沉降速率 (2015 年 6 月~2018 年 6 月)

测时段内,坦洲镇地面沉降影响范围最广,区内最大沉降速率超过 38 mm/a,也是全市地面沉降速率最快的区域;全区分布有由工程建设等人类活动诱发的零星小范围较快速沉降中心,如古镇镇开元批发城和利和灯博中心周边,东区街道白沙湾工业区和翠亨新区等。

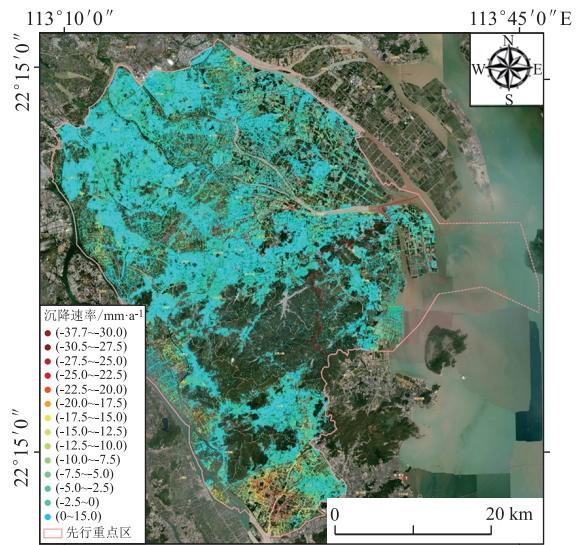


图 8 中山市 InSAR 调查地面沉降速率 (2019 年 6 月~2020 年 6 月)

4.3 中山市地面沉降速率分析

基于 InSAR 栅格数据获取各级沉降影响范围统计结果表明,中山市地面沉降速率大于 30 mm/a 的区域面积为 0.07 km²,主要分布于坦洲镇;大于

20 mm/a 小于 30 mm/a 的区域为 11.68 km², 分布区域有坦洲镇、神湾镇、横栏镇、南朗镇、板芙镇、民众街道、大涌镇、东区街道、黄圃镇、三角镇和火炬开发区街道, 各镇均存在大于 10 mm/a 的沉降区域(表 1)。

表 1 中山市各级沉降影响范围统计结果

序号	沉降速率/mm·a ⁻¹	影响面积/km ²
1	-35~-30	0.070
2	-30~-20	11.680
3	-20~-10	58.060
4	-10~0	1 730.19
5	合计	1 800.00

4.4 中山市地面沉降区划分

根据中山市地面沉降区域地理位置分布特征, 可将研究区划分为: 北部沉降区、中部沉降区、西部沿江-南部沉降区、翠亨新区沉降区和较稳定区。对各沉降分区包括的行政区最大沉降速率、平均沉降速率、相干点目标数及区内相干点目标密度等进行统计。其中, 最大沉降速率为该区/镇范围内相干点目标解算的最大沉降速率, 平均沉降速率以插值生成的面域栅格数据进行统计。上述各区域中以西部沿江-南部沉降区地面沉降影响最为显著, 之后依次为北部沉降区、中部沉降区、翠亨新区沉降区(表 2)。

表 2 中山市各镇(街道)区沉降状况统计结果

沉降区带	序号	区/镇	面积/km ²	最大沉降速率/mm·a ⁻¹	平均沉降速率/mm·a ⁻¹	相干点数	点密度/个/km ²
北部沉降区	1	三角镇	70.34	-27.70	-0.79	23 774	338
	2	民众镇	125.24	-32.22	-1.75	26 993	216
	3	黄圃镇	88.60	-27.79	-0.66	34 026	384
中部沉降区	4	港口镇	71.21	-23.23	-1.60	23 447	269
	5	东区街道	73.40	-28.26	-0.55	19 121	319
	6	东升镇	75.44	-23.33	-0.34	35 639	371
	7	火炬开发区	85.45	-19.44	-0.23	36 803	431
	8	西区街道	25.29	-15.43	-0.37	12 912	511
	9	沙溪镇	52.38	-16.67	-0.71	22 329	275
	10	石岐街道	22.71	-18.91	-0.16	14 399	623
	11	阜沙镇	35.45	-16.65	-0.65	13 446	379
西部沿江-南部沉降区	12	坦洲镇	129.96	-37.67	-8.00	36 099	278
	13	板芙镇	79.27	-26.75	-2.02	16 930	214
	14	神湾镇	60.50	-35.65	-2.53	11 394	188
	15	横栏镇	75.41	-23.91	-1.26	29 602	393
	16	大涌镇	40.68	-20.11	-0.78	14 145	348
	17	古镇镇	52.06	-17.11	-0.47	24 235	466
翠亨新区沉降区	18	翠亨新区	237.76	-26.04	-0.79	38 204	164
较稳定区	19	东风镇	56.36	-14.85	-0.71	27 952	396
	20	环城街道	49.34	-16.55	-0.47	14 148	722
	21	三乡镇	93.94	-21.35	-0.56	33 471	356
	22	五桂山镇	101.47	-10.45	-0.55	9 321	92
	23	南头镇	25.85	-14.64	-0.54	16 878	653
	24	小榄镇	71.89	-9.28	-0.11	47 107	655
	全区		1 800.00	-37.67	-1.37	582 375	324

4.5 中山市软土地面沉降发育程度分区

依据地面沉降易发危险性分区及地面沉降现状危害程度分区结果, 确定中山市软土地面沉降防治分区: 分为重点防治区、次重点防治区、一般防治区。其中地面沉降重点防治区有 6 个亚区, 总面积为 177.993 km², 占全区陆域总面积的 14.10%; 地面沉降次重点防治区有 15 个亚区, 面积为 667.064 km², 占全区陆域总面积的 52.86%; 地面沉降一般防治区有 12 个亚区, 面积为 416.877 km², 占全区

陆域总面积的 33.04%。各级危险区、亚区特征见图 9、表 3。

5 结论

本文通过现场调查和基于时序 InSAR 的遥感监测对中山市软土地面沉降概况、影响因素、沉降类型、沉降特征及成因进行研究, 得出结论如下:

(1) 中山市软土地面沉降受内在因素和外在因素的共同影响, 内在因素主要为软土的工程地质特



图 9 中山市地面沉降防治分区

表 3 中山市地面沉降防治分区统计

分区及代号	面积 /km ²	占全区面积/%	亚区及代号	面积 /km ²	占全区面积/%
重点防治区 I	177.993	14.1	Ⅰ ₁	39.801	3.15
			Ⅰ ₂	12.476	0.99
			Ⅰ ₃	5.348	0.42
			Ⅰ ₄	32.234	2.55
			Ⅰ ₅	0.478	0.04
			Ⅰ ₆	87.656	6.95
次重点防治区 II	667.064	52.86	Ⅱ ₁	119.747	9.49
			Ⅱ ₂	80.9	6.41
			Ⅱ ₃	101.789	8.07
			Ⅱ ₄₋₁	17.519	1.39
			Ⅱ ₄₋₂	14.615	1.16
			Ⅱ ₄₋₃	8.994	0.71
			Ⅱ ₄₋₄	1.677	0.13
			Ⅱ ₄₋₅	1.166	0.09
			Ⅱ _{5、Ⅱ_{6、Ⅱ₇}}	103.886	8.23
			Ⅱ ₈	69.175	5.48
			Ⅱ ₉	43.822	3.47
一般防治区 III	416.877	33.04	Ⅲ ₁	48.677	3.86
			Ⅲ ₂	56.265	4.46
			Ⅲ ₃	45.907	3.64
			Ⅲ ₄	96.106	7.62
			Ⅲ ₅	57.221	4.53
			Ⅲ ₆₋₁	1.667	0.13
			Ⅲ ₆₋₂	0.933	0.07
			Ⅲ ₆₋₃	0.408	0.03
			Ⅲ ₆₋₄	1.533	0.12
			Ⅲ ₆₋₅	0.71	0.06
			Ⅲ ₆₋₆	4.222	0.33
			Ⅲ ₇	91.32	7.24
			Ⅲ ₈	11.908	0.94
合计	1 261.934	100		1 261.934	100.0

性、软土固结程度,外在因素主要为地下水开采、车辆动荷载和建筑物静荷载。中山市软土地面沉降类型包括:新近沉积松散堆积物自重固结型、大面积欠固结填土压密固结型、地下水位下降导致压密固结型、交通线路车辆动荷载压密固结型和地面建筑物静荷载压密固结型。中山市软土地面沉降不同类型对应成因为:受自重应力、动、静荷载附加应力、地下水位波动导致软弱土体颗粒骨架改变、有效应力重分布,产生压密固结,诱发地面沉降灾害。

(2) 基于时序 InSAR 遥感监测的中山市软土地面沉降特征为:2015 年~2018 年中山市最大沉降区位于坦洲镇,最大沉降速率为 35 mm/a;2019 年~2020 年中山市坦洲镇地面沉降影响范围最广,沉降速率最快,区内最大沉降速率超过 38 mm/a;中山市地面沉降区分为北部沉降区、中部沉降区、西部沿江-南部沉降区、翠亨新区沉降区和稳定区 5 个大区;中山市软土地面沉降防治分区分为重点防治区、次重点防治区、一般防治区。

(3) 中山市软土地面沉降防治措施建议为:对于附加荷载引起的地面沉降,建议地基处理设计时,应考虑上部结构加强上部结构的刚度和强度,以增加建筑物对地基不均匀变形的适应能力;对于地下水开采引起的地面沉降,建议限制地下水开采或向含水层人工注水。

参考文献

[1] 王双,严学新,揭江,等.珠三角平原区软土分布与地面沉降相关性分析[J].上海国土资源,2019,40(2):75-79.

[2] Kakar N, Zhao C, Li G, et al. GNSS and Sentinel-1 InSAR Integrated Long-Term Subsidence Monitoring in Quetta and Mastung Districts, Balochistan, Pakistan[J]. Remote Sensing, 2024,16(9):1521-1524.

[3] 王双,严学新,揭江,等.珠江三角洲平原区地面沉降影响因素分析[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(5):98-104+112.

[4] 张丽娜,宋瑞庆,宋鑫友,等.地铁快速建设期苏州主城区地面沉降时序 InSAR 分析[J].大地测量与地球动力学,2024,44(9):945-950.

[5] Shikai A, Liang Y, Ying X, et al. Ground subsidence monitoring in based on UAV-LiDAR technology: A case study of a mine in the Ordos, China [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources,2024,10:57.

[6] 沙特,罗勇,雷坤超,等.基于分布式光纤传感技术的北京宋庄地面沉降和地裂缝综合监测[J].地质通报,2024,43(5):859-867.

[7] 张永伟,王国权,朱晓伟,等.中国山东平原区和美国大休斯顿地区地面沉降监测与防控对比[J].水文地质工程地质,2024,

- 51(1):167-178.
- [8] Li X, Tao Q, Chen Y, et al. Monitoring of land subsidence by combining small baseline subset interferometric synthetic aperture radar and generic atmospheric correction online service in Qingdao City, China[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2024, 18(1):014506.
- [9] 高峰, 赵团芝, 王文军, 等. 宁波市地面沉降现状分析及风险评估[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(6): 127-135.
- [10] 顾春生, 杨磊, 闵望, 等. 江苏常州地面沉降监测与发展趋势分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(2): 82-91.
- [11] 闵望, 龚绪龙, 陆华, 等. 连云港地面沉降监测与驱动因素协同分析[J]. *测绘科学*, 2023, 48(4): 161-171.
- [12] 陈玉林, 匡翠林, 戴吾蛟, 等. 广州南沙区 GPS 地面沉降监测数据处理[J]. *大地测量与地球动力学*, 2015, 35(5): 849-852.
- [13] 方海伦, 胡荣荣, 邱雨欣. 基于 PS-InSAR 技术的宁波市地面沉降监测研究[J]. *地质灾害与环境保护*, 2023, 34(4): 50-55.
- [14] I. M N, Roberto T, Javier V, et al. Monitoring land subsidence induced by tectonic activity and groundwater extraction in the eastern Gediz River Basin (Türkiye) using Sentinel-1 observations [J]. *Engineering Geology*, 2023, 327, (20): 107343.
- [15] 张树衡, 赵萍, 王宁, 等. 集成 DInSAR 与 SBAS InSAR 的淮南丁集煤矿地面沉降监测[J]. *地质科学*, 2023, 58(4): 1521-1534.
- [16] 赵昌龙, 吴琦. 地下水监测在城市建成区地面沉降分析中的应用——以深圳市某工业园区为例[J]. *华北自然资源*, 2023(5): 97-100.
- [17] Wei H S, Bin S, Dan Z, et al. Monitoring land subsidence with the combination of persistent scatterer interferometry techniques and distributed fiber optic sensing techniques: A case study in Suzhou, China[J]. *Natural Hazards*, 2023, 116(2): 2135-2156.
- [18] Zaicheng X, Wei X, Zhenhua Z, et al. Research on monitoring and stability evaluation of ground subsidence in gypsum mine goaf [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 10: 1097884.
- [19] 王德洋, 朱鸿鹄, 吴海颖, 等. 地层塌陷作用下埋地管道光纤监测试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(6): 1125-1131.
- [20] 潘伟强. 软土地区管幕群顶管施工地面沉降监测与分析[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(S1): 201-204.
- [21] 戴宜韦, 吴希文, 闵新颖, 等. 利用时间序列 InSAR 技术对珠江三角洲主要城市进行地面变形监测研究[J]. *广东工业大学学报*, 2019, 36(4): 92-98.
- [22] 聂运菊, 计玉芳, 熊倩. SBAS-InSAR 技术的广州市地面沉降监测[J]. *北京测绘*, 2022, 36(11): 1501-1507.
- [23] 林广坤. 基于时序 InSAR 的广州南沙区地面沉降监测及影响因素分析[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- [24] 刘自荣, 甘智慧, 李飞, 等. 基于 PS-InSAR 技术的佛山三龙湾地区地表形变监测与分析[J]. *测绘通报*, 2024, (S1): 242-246+270.
- [25] Zhang P, Qian X, Guo S, et al. A New Method for Continuous Track Monitoring in Regions of Differential Land Subsidence Rate Using the Integration of PS-InSAR and SBAS-InSAR[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(13): 3298.
- [26] Ao M, Wang C, Xie R, et al. Monitoring the land subsidence with persistent scatterer interferometry in Nansha District, Guangdong, China[J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(3): 2947-2964.
- [27] 王华, 喻永平, 蒋利龙. 利用合成孔径雷达干涉监测广州佛山地面沉降[J]. *测绘科学*, 2014, 39(7): 67-71.

作者简介: 李长山(1988—), 男, 硕士, 水工环地质工程师, 主要从事水工环地质工作。E-mail: 1026849621@qq.com