



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：地面沉降对洪水淹没的影响—以辽宁绕阳河“2022.8”溃堤洪水为例
作者：唐伟, 程清, 崔健, 孙秀波, 王井利, 耿旭
DOI: 10.13203/j.whugis20240063
收稿日期: 2024-09-28
网络首发日期: 2024-10-15
引用格式: 唐伟, 程清, 崔健, 孙秀波, 王井利, 耿旭. 地面沉降对洪水淹没的影响—以辽宁绕阳河“2022.8”溃堤洪水为例[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240063>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240063

引用格式：

唐伟, 程清, 崔健, 等. 地面沉降对洪水淹没的影响—以辽宁绕阳河“2022.8”溃堤洪水为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024. DOI: 10.13203/j.whugis20240063 (TANG Wei, CHENG Qing, Cui Jian, et al. Impacts of Land Subsidence on Flood Inundation: An Example of the “2022.8” Levee-Breach in Raoyang River of Liaohe Delta[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024. DOI: 10.13203/j.whugis20240063)

地面沉降对洪水淹没的影响—以辽宁绕阳河“2022.8”溃堤洪水为例

唐伟¹ 程清¹ 崔健² 孙秀波² 王井利³ 耿旭¹

1 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京, 100083

2 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳, 110034

3 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳, 110168

摘要: 2022年入汛以来, 辽干支流绕阳河流域近90%区域出现暴雨到大暴雨。绕阳河下游左岸曙四联段堤防于8月1日10时30分出现溃口, 引发大范围洪水淹没, 造成沿河城市及其周边区域的房屋、农作物和油田生产设施损失严重。除了区域性暴雨带来的巨大降雨量之外, 地面沉降是造成绕阳河“2022.8”溃堤洪水淹没的另一个重要因素。基于ALOS-1、Sentinel-1雷达影像进行时序InSAR处理, 并结合水准监测数据, 分析了曙光油田2007年3月至2021年11月的地面沉降时空分布。基于高分三号(GaoFen-3, GF-3)雷达数据和水体指数方法解译得到溃堤前后的洪水淹没范围, 分析洪水蔓延过程及受淹土地类型。最后, 将累积地面沉降与洪水淹没范围进行叠加, 讨论地面沉降对溃堤发生和洪水发展的影响。研究表明:

(1) 曙光油田开采造成一个椭圆形的地面沉降漏斗, 沉降中心最大速率达到-212 mm/a。(2) 绕阳河穿过曙光油田开采沉降漏斗区, 本次溃堤洪水淹没范围与曙光油田地面沉降区高度重叠, 溃堤处的沉降速率达-150 mm/a。(3) 地面沉降所造成的高程损失破坏了相关堤坝的安全稳定性, 输油管道更易浸泡于水位之下, 穿堤管道接合面出现渗水破坏, 引发溃口发生; 地面沉降引起的高程损失使地表形成沉降漏斗, 河流泄洪能力下降, 导致洪水在沉降区域更易出槽、漫溢, 并滞留于沉降漏斗盆地, 增加洪水淹没范围和淹没深度。本研究强调了在洪水风险评估及防洪规划设计中考虑地表高程沉降的重要性, 为区域防洪规划设计提供科学参考依据。

关键词: 绕阳河溃堤; 地面沉降; 石油开采; 洪水淹没; 洪水风险

收稿日期: 2024-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(42374023)。

第一作者: 唐伟, 博士, 副教授, 研究方向为空间大地测量与遥感技术及其应用研究。weitang@cumtb.edu.cn

通讯作者: 孙秀波, 硕士, 高级工程师。hlsunxb@126.com

Impacts of Land Subsidence on Flood Inundation: An Example of the "2022.8" Levee-Breach in Raoyang River of Liaohe Delta

TANG Wei¹, CHENG Qing¹, CUI Jian², SUN Xiubo², WANG Jingli³, GENG Xu¹

1 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China

2. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Shenyang 110034, China

3. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China

Abstract: Since the beginning of the flood season in 2022, nearly 90% of the area of the Raoyang River Basin has experienced torrential to heavy rainfall, causing the largest flood in this basin since 1951. A levee-breach flood of the Shusi section of the left embankment of the Raoyang River occurred at 10:30 am on 1 August, triggering widespread flooding and inundation, and causing serious damage to houses, crops and oil production facilities in cities along the river and their surrounding areas. In addition to the huge amount of rainfall brought by the heavy rainfall, land subsidence may have been an important factor contributing to the inundation of the "2022.8" levee-breach flood in the Raoyang River. **Objectives:** Analyzing the spatial and temporal distribution of land subsidence in the Liaohe delta, and investigating its impacts on the inundation extent of the "2022.8" levee-breach of the Raoyang River. **Methods:** We adopted the coherence-based SBAS (Small Baseline Subset, SBAS) method to process the time series of ALOS-1 and Sentinel-1 SAR data, and combined with the levelling data to obtain the distribution and evolution of land subsidence in the study area in different historical periods. We used surface deformation monitoring data from two GNSS continuous stations in the study area to validate the accuracy of the InSAR-derived surface deformation. Based on three GF-3 SAR acquisitions, we applied the water index to extract the levee-breach flood inundation of Raoyang River and to compute the affected area. The distribution of land subsidence was superimposed on the inundation extent of the flooding to emphasize the importance of taking into account land subsidence in the assessment of flood risk. **Results:** (1) oil extraction caused an elliptical land subsidence funnel in Shuguang oilfield, with a maximum rate of -212 mm/a at the subsidence center. (2) the Raoyang River passes through the Shuguang oilfield subsidence funnel area, the flood inundation extent caused by this dike breach highly overlaps with the ground subsidence area, and the rate of subsidence at the breach of the embankment is -150 mm/a. **Conclusions:** Land Subsidence plays an important role in the occurrence of levee-breach and flood development. On the one hand, the elevation loss caused by land subsidence destroys the safety and stability of embankment, makes it easier for the oil pipeline to be immersed under the water level, and causes seepage damage on the joint surface of the pipeline through the embankment, which triggers the occurrence of the breach; on the other hand, the elevation loss caused by land subsidence results in the formation of a subsidence funnel on the land surface, and reduces the river's capacity to discharge floodwaters, which leads to water more easily to get out of the river, and to be retained in the subsidence funnel basins, increasing the extent and depth of flood inundation. Our study highlights the importance of considering surface subsidence in flood risk assessment, providing a scientific reference for regional flood protection and planning.

Keywords: Raoyang River levee-breach; land subsidence; oil extraction; flood inundation; flood risk

受地貌复杂性和东亚季风因素影响,我国洪涝灾害频繁发生。暴雨引发的洪水具有发生频率高、突发性强、影响范围广、损失严重等特点,成为灾害链的重要组成部分,对沿河城市及周边地区的建筑、农作物和基础设施带来严重影响,危及民众生命和财产安全。随着我国城市化进程的加速,主要河流流域的洪泛区和城市人口、基础设施迅速集聚,洪水导致的损失大幅度上升。在全球气候变暖和海平面上升的背景下,极端强降雨及其引发的洪水事件发生频率增加,加上人类活动对地表的破坏,使洪涝灾害变得更加严重,防汛防洪及减灾任务愈发艰巨。

除气候变化及强降雨因素外,文献[1-3]表明一些地区由于自然因素(如构造运动、地震、火山活动、地应力变化、滨海湿地有机碳分解及土体固结等)或人为活动(如地下水开采、油气资源及煤炭开采)引发的地面沉降加剧了洪水灾害的严重程度。特别是在地形平坦、地势低洼的沿海和河口三角洲地带,地面沉降会进一步扩大由海平面上升、潮汐和风暴潮引发的洪水淹没范围。这些区域往往是经济社会发展程度高、人口密集以及工农业发达的地区,洪水灾害所造成的损失会更加巨大。Dixon等^[4](2006)发表在《Nature》期刊上的文章认为2005年8月卡特里娜飓风(Hurricane Katrina)引发的风暴潮造成了密西西比河-海湾口运河防洪堤破坏,这与新奥尔良的地面沉降有很大关系。Wang等^[5](2012)的研究表明,持续多年的地面沉降影响了上海沿海海堤和防洪堤,导致洪泛平原边界的变化。Ouyang等^[6](2020)对2011年日本东北地震引起的地面沉降进行分析,认为如果只考虑降雨因素而不考虑地面沉降的影响,洪水淹没面积会被低估10%左右。在海岸洪水风险评估方面,Fang等^[1](2022)定量评估并揭示了中国沿海地面沉降防控对降低未来中国海岸洪水风险的成效,研究发现洪水损失对沿海地面沉降情景更为敏感,不确定性范围更大。2019年印度尼西亚决定把首都从雅加达迁至东加里曼丹省,其迁都计划除了政治考量和亚洲超大城市共有的城市病(人口密集、拥堵和污染)外,还有一个更为关键的原因:严重的城市地面沉降和海/洪水泛滥威胁。由于多年的地下水超采,雅加达城市地面沉降速率达到5-10 cm/a,在部分地区可达到20 cm/a^[7]。无论是河水上涨还是海平面上升,整个城市都面临着河水/海水泛滥的威胁。

为了监测地面沉降和评估其对洪水淹没的影响,大地测量与遥感技术被广泛应用。例如,Shirzaei and Bürgmann^[8](2018)利用干涉合成孔径雷达(InSAR)和全球导航卫星系统(GNSS)监测旧金山湾区的地面沉降速率,并根据海平面上升速率叠加地面沉降因素预测未来100年的沿海淹没情景。类似地,Catalao等人^[9](2020)也使用InSAR技术监测地面沉降,并结合未来海平面上升的情景来预计新加坡沿海未来的洪水淹没区域。地面沉降已成为我国沿海城市和海岸带地区的一个重大地质环境问题。Tang等人^[10](2021)利用InSAR、GNSS和验潮站观测数据研究了天津沿海地面沉降对相对海平面上升的贡献程度,绘制了天津沿海高空间分辨率的相对海平面上升速率。Yin等人^[11](2019)利用InSAR技术监测上海临港新城的地面沉降速率,并基于二维洪水淹没模型(FloodMap-Inertial)预测和评估海平面上升和地面沉降综合影响下的上海市沿海洪涝风险。

辽河三角洲地处辽河、大辽河入海口交汇处。三角洲地势低平,水系密布。多年来,该地区经常受汛期强降雨和风暴潮影响,沿海低洼地区洪涝灾害频发,流域防洪形势严峻。辽河三角洲易受洪水侵袭,不仅源于极端强降雨等自然因素,该地区人类活动造成的地面沉降问题对洪灾的加剧作用也不容忽视。已有研究发现,下辽河平原由于地下水和油气资源开采导致的累积地面沉降大于1.56 m的面积有225 km²(1977—2007),在曙光、欢喜岭、锦州等油田集中开采区出现严重沉降漏斗,最大累积沉降量高达3 m^[12]。然而,地面沉降具有缓慢性的特点,其在沿海和内陆地区洪涝灾害方面所发挥的影响往往被忽略,在相关的防洪规划设计中也未加以充分考虑。辽河三角洲绕阳河“2022.8”溃堤事件造成的洪水淹没正好位于曙光油田地面沉降漏斗区,地面沉降使得原来建在保证水位之上的堤坝高程降低,防洪能力变弱。有研究分析表明,此次溃口处位于地面沉降高风险堤防区段,地面沉降很可能是引发此次溃堤的主要因素之一^[13]。这一问题引起了辽宁省当地防汛部门的重视,然而却缺乏相关的定性和定量研究。

本文以绕阳河“2022.8”溃堤洪水为例，首先利用 InSAR 技术获取和分析该地区由于油田生产引发的地面沉降时空分布。然后，基于高分三号 SAR 影像采用水体指数法提取绕阳河“2022.8”溃堤洪水的淹没范围。最后，将曙光油田地面沉降分布与该洪水事件的淹没范围进行叠加分析，揭示地面沉降对洪水淹没的影响规律，为当地的油田开采沉降防治和流域防洪规划设计提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 研究区介绍

辽河三角洲是我国著名的河口三角洲，位于下辽河平原南部。该地区具有丰富的油气资源、水资源和湿地资源，是中国沿海自然资源富庶的地区之一^[14]。辽河三角洲东西两侧的山前侵蚀剥蚀平原位于辽西、辽东山地上升区和下辽河平原下沉的过渡地带，地表径流携带大量沉积物冲出山口，形成冲积扇^[15]。

洲内水系发育，主要有辽河水系、绕阳河水系和大、小凌河水系。绕阳河是辽河的一条主要支流，发源于辽宁省阜新县，流经盘锦汇入辽河。河流干流全长 326 km，流域面积约 1.04 万 km²。绕阳河水系内地势平坦，堤防多，河道建筑物多。流域年均降水量 400~650 mm，自西北向东南逐渐增大。降水主要集中在 6-9 月，暴雨洪水多发于 7-8 月，暴雨强度大、历时短，洪水过程多为单峰型。

辽河三角洲是辽河油田主产区，分布有曙光、欢喜岭、锦州、兴隆台、双台子等采油厂（图 1）。在三角洲内，石油采出导致储层压实，引发地表沉降现象非常突出。已有 InSAR 研究结果发现，三角洲内的曙光、欢喜岭和锦州采油厂沉降最为严重，曙光采油厂的年均沉降速率达到约 200 mm/a^[12]。地面沉降引发该地区高程基准点高程损失，防潮堤防洪能力减弱，受潮水涨落影响，开采油井更易被潮水淹没^[16]。另外，叠加地质构造下沉和沉积层压实等自然因素的影响，区域性地面沉降加剧了该地区相对海平面上升趋势^[17]。

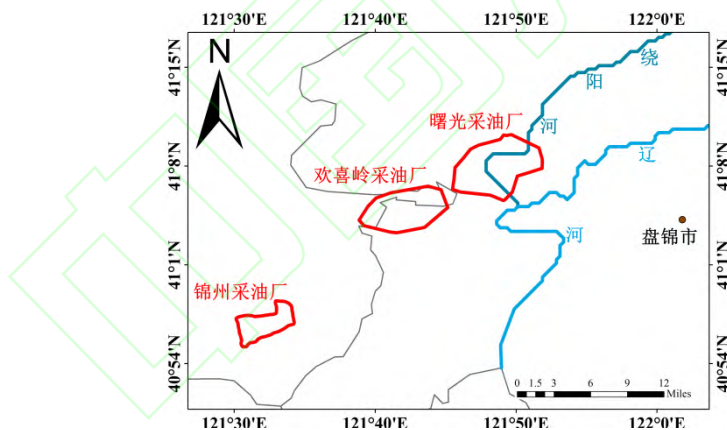


图 1 辽河三角洲采油厂分布图。图中红色多边形表示曙光、欢喜岭和锦州油田

Fig.1 Distribution of oil extraction plants in the Liaohedelta. The red polygons show the location of Shuguang, Huanxiling and Jinzhou oilfields.

1.2 绕阳河“2022.8”溃堤洪水基本情况

自 2022 年汛期以来，辽河流域遭遇多次洪水侵袭，导致辽河干流全线出现超警戒水位现象。尤其在 6-7 月，辽干支流绕阳河流域经历了 3 轮区域性暴雨天气过程，累计平均降雨量达到 541.0 mm，远超常年平均降雨量 234.1 mm，位居历史同期最高纪录^[18]。绕阳河淤河盖站的实测水位自 6 月 29 日至 8 月 27 日始终保持在超警戒水位以上，其中 7 月 31 日至 8 月 4 日更是出现持续超保证水位现象。7 月 31 日 18 时，水位达到最高值，成为自 1951 年以来的最大洪水纪录^[18]。辽河上游河道坡度较大，暴雨洪水具有峰值高、流量大、持续时间短的特点，洪水在上游地区汇集并迅速下泄。盘锦市境内河道弯曲，坡度减缓，加之入海口海潮的顶托作用，洪水下泄速度明显降低，河道水位迅速上升，在很大程

度上加大了河道的防洪压力。此外，洪水流经盘锦市时流动路径变得复杂，流速降低导致洪水携带的泥沙等杂物沉积下来，加剧了河道的淤积问题。

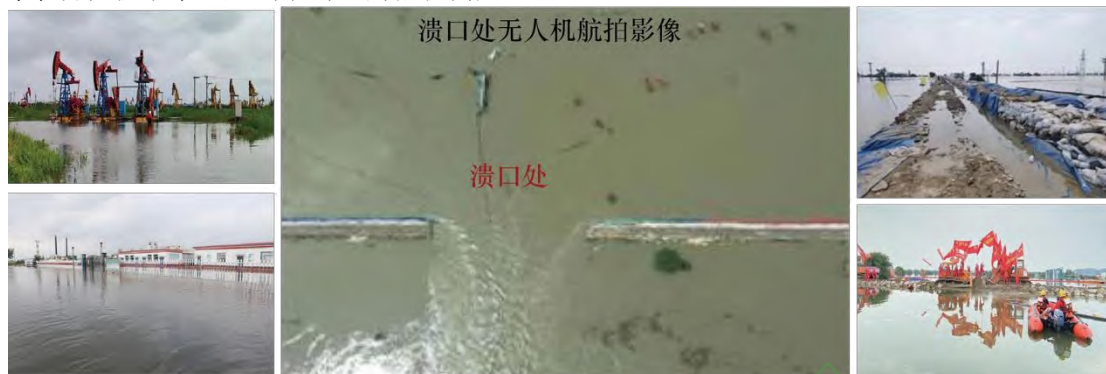


图2 绕阳河“2022.8”溃堤处无人机航拍影像及洪水淹没的部分现场照片。无人机航拍影像来自文献^[19]。

Fig.2 Drone aerial imagery of the "2022.8" levee-breach in the Raoyang River and photographs of part of the flooded site. Aerial drone images from literature [19].

8月1日上午10时，绕阳河下游左岸曙四联段堤防遭遇溃口，初始溃口宽度约为20米（图2）。随着时间推移，至8月3日下午16时，溃口宽度已扩大至50米。此次溃口虽未导致人员伤亡，但对辽河油田等国家重点基础设施造成严重损失。经初步分析，发生溃口的绕阳河堤坝位于辽河油田曙光采油厂的厂区内，洪水的淹没区范围与曙光油田沉降区范围高度重叠，油田开采导致的地面沉降导致防洪堤破坏、高程损失，继而使得河堤防洪能力变得更加脆弱。溃堤洪水造成曙光油田采油区近2600台抽油机、5片采油站区及大片农田受淹^[20]，部分受淹现场见图2。

2 地面沉降和洪水淹没遥感提取

2.1 研究区地面沉降提取

为了获取研究区地面沉降分布，本文收集了研究区2007-2011年的ALOS-1数据和2016-2021年的Sentinel-1数据，数据基本信息见表1。Sentinel-1影像有3个数据集，1个为升轨，2个为降轨；升轨数据集（Path 98 Frame 129，简称为P98F129）时间范围为2017年3月至2023年4月，共172期；降轨数据（Path 3 Frame 455，简称为P3F455）时间范围为2016年12月至2021年11月，共121期；另一降轨数据集（Path 76 Frame 453，简称为P76F453）时间范围为2016年10月至2021年11月，共135期。

本文采用GMTSAR软件对所有SAR数据集进行干涉处理生成干涉图^[21]，时序处理采用的是短基线集方法（Small Baseline Subset, SBAS）。具体算法采用GMTSAR中的基于相干性的SBAS方法，该算法对传统SBAS算法进行了改进，将相干性信息融入最小二乘解算方程，抑制失相干目标的噪声影响^[22]。由于InSAR仅能获取雷达视线向形变（Line of sight, LOS），本文关注的是垂直向沉降，所以通过升降轨数据集的融合分解得到垂直向形变（沉降）和水平东西方向形变。对Sentinel-1升降轨数据的融合时，仅对三个数据集的时间重合部分进行融合（2017年3月至2021年11月）。

表1 地面沉降提取和分析所用数据集

Tab.1 Data sets used for land subsidence extraction and analysis

| 数据集 | 名称 | 轨道 | Path | Frame | 时间范围 | 数量 |
|-----|-------------|----|------|-------|-----------------|-----|
| SAR | ALOS-1 | 升轨 | 437 | 810 | 2007.01-2011.02 | 23 |
| | Sentinel-1A | 升轨 | 98 | 129 | 2017.03-2023.04 | 172 |

| | | | | | | |
|------|-------------|----|----|-----|-----------------|------------|
| | Sentinel-1B | 降轨 | 3 | 455 | 2016.12-2021.11 | 121 |
| | Sentinel-1B | 降轨 | 76 | 453 | 2016.10-2021.11 | 135 |
| 水准 | - | - | - | - | 2013.09-2015.09 | 35 个点/12 期 |
| GNSS | 后大垮 | - | - | - | 2020.12-2022.11 | 天解 |
| | 曙四联 | - | - | - | 2020.12-2022.08 | 天解 |

本文还收集到了 2013 年 9 月至 2015 年 9 月的水准测量沉降监测数据，该数据为当地为了建立油田地面沉降档案而进行的二等水准测量工作，水准点位置主要位于研究区内的曙光油田，水准路线长度 1215 千米，共观测了 12 期数据。

另外，还获取了研究区 2 个 GNSS 连续测站的地表形变监测数据，该数据主要用于验证 InSAR 的地表形变解译精度。ALOS-1、水准和 Sentinel-1 数据的时间范围不同，通过三者的监测结果可了解研究区地面沉降不同历史时期的分布和演变规律。

2.2 基于 SAR 提取洪水淹没范围

为了提取绕阳河下游左岸曙四联段“2022.8”溃口洪水淹没范围，并统计受灾面积，本文获取了研究区 2022 年 7 月 1 日、8 月 2 日和 8 月 4 日的三期高分三号 SAR (GF-3) 影像。数据基本信息见表 2。GF-3 SAR 影像的成像模式均为 FSII (精细条带 2) 模式，空间分辨率为 10 m。

表 2 绕阳河“2022.8”溃堤洪水灾害淹没分析所用的 GF-3 数据集

Tab.2 GF-3 dataset used for the inundation analysis of the "2022.8" levee-breach flood disaster in the Raoyang River.

| 数据 | 日期 | 空间分辨率 | 模式 | 极化方式 |
|------|----------|-------|------|-------|
| GF-3 | 20220701 | 10 | FSII | VV/VH |
| GF-3 | 20220802 | 10 | FSII | HH/HV |
| GF-3 | 20220804 | 10 | FSII | HH/HV |

本文使用 PIE-SAR 软件对三景 GF-3 影像进行预处理，包括复数数据转换、多视、滤波、地理编码等过程，其中滤波方式选择的是 5×5 窗口的 Frost 滤波，此滤波方式具有良好的去噪效果和保留边缘细节的能力。经预处理后的 SAR 强度影像图如图 3 所示，可明显看出绕阳河溃堤前后水体的变化(水体为光滑表面，后向散射弱，SAR 影像上对应区域的强度值低，呈现暗色调)。7 月 1 日为溃堤发生前，SAR 影像无淹没现象；8 月 2 日为溃堤后第一天，绕阳河左岸区域淹没水体范围明显增加；8 月 4 日为溃堤后第三天，淹没水体区域进一步增加。堤坝溃口使得绕阳河洪水向东侧漫溢积聚，因此本文选择绕阳河左堤东侧的区域为溃堤洪水研究区进行洪水的提取。

为了充分利用 GF-3 影像的双极化数据，精确提取出水体淹没区域，采用基于双极化数据的水体指数计算公式进行水体范围的自动化提取^[23]。对预处理后的 GF-3 SAR 影像的双极化数据作对数处理，通过波段运算生成水体指数影像图和像素分布直方图。该法与经验阈值法相比，增强了水体和非水体的对比，直方图双峰更加明显，有利于最佳分割阈值的选取。

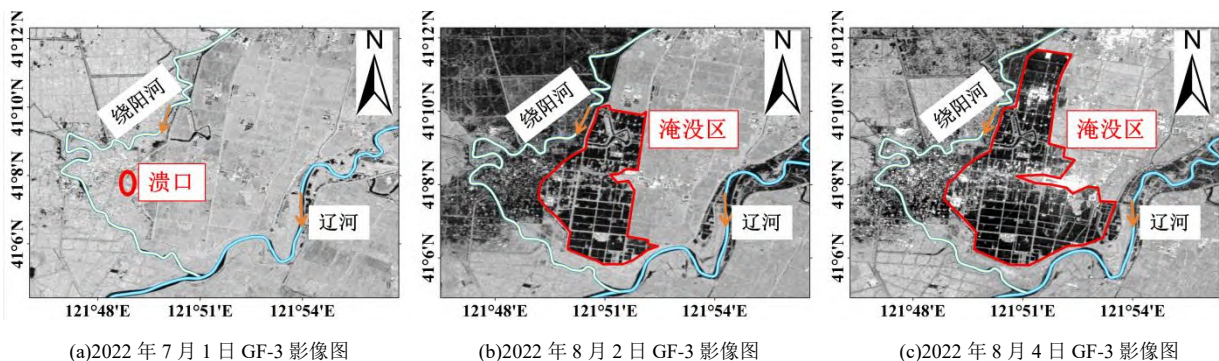


图 3 绕阳河区域 GF-3 SAR 强度影像图

Fig.3 GF-3 SAR intensity image of the Raoyang River region

3 结果分析与讨论

3.1 地面沉降结果与分析

图 4 为从三种数据源获得的不同时间段曙光油田开采区地面沉降速率（图 4a 为 ALOS-1 雷达视线向速率，图 4b 为水准点沉降速率，图 4c 为 Sentinel-1 升降轨融合后的垂直向速率）。曙光油田沉降区存在较明显的朝向沉降漏斗中心的水平移动现象^[24]，不能简单将 InSAR 的 LOS 向形变结果简单投影到垂直向，故本文保留 ALOS-1 的 LOS 向形变结果。为了验证 InSAR 解算的形变结果，利用研究区的 GNSS 连续运行参考站数据进行比较，考虑到 GNSS 和 InSAR 的时间重合性，仅针对 Sentinel-1 的 P98F129 升轨数据进行比较。首先，将 GNSS 的三维形变转为 P98F129 数据的雷达视线向，然后对两者的时序形变进行比较（图 4d）。可看出，在 GNSS 的两个测站上两者时序形变非常吻合，形变量差异的 RMSE 均小于 5 mm，说明本文 InSAR 沉降解算结果的可靠性。

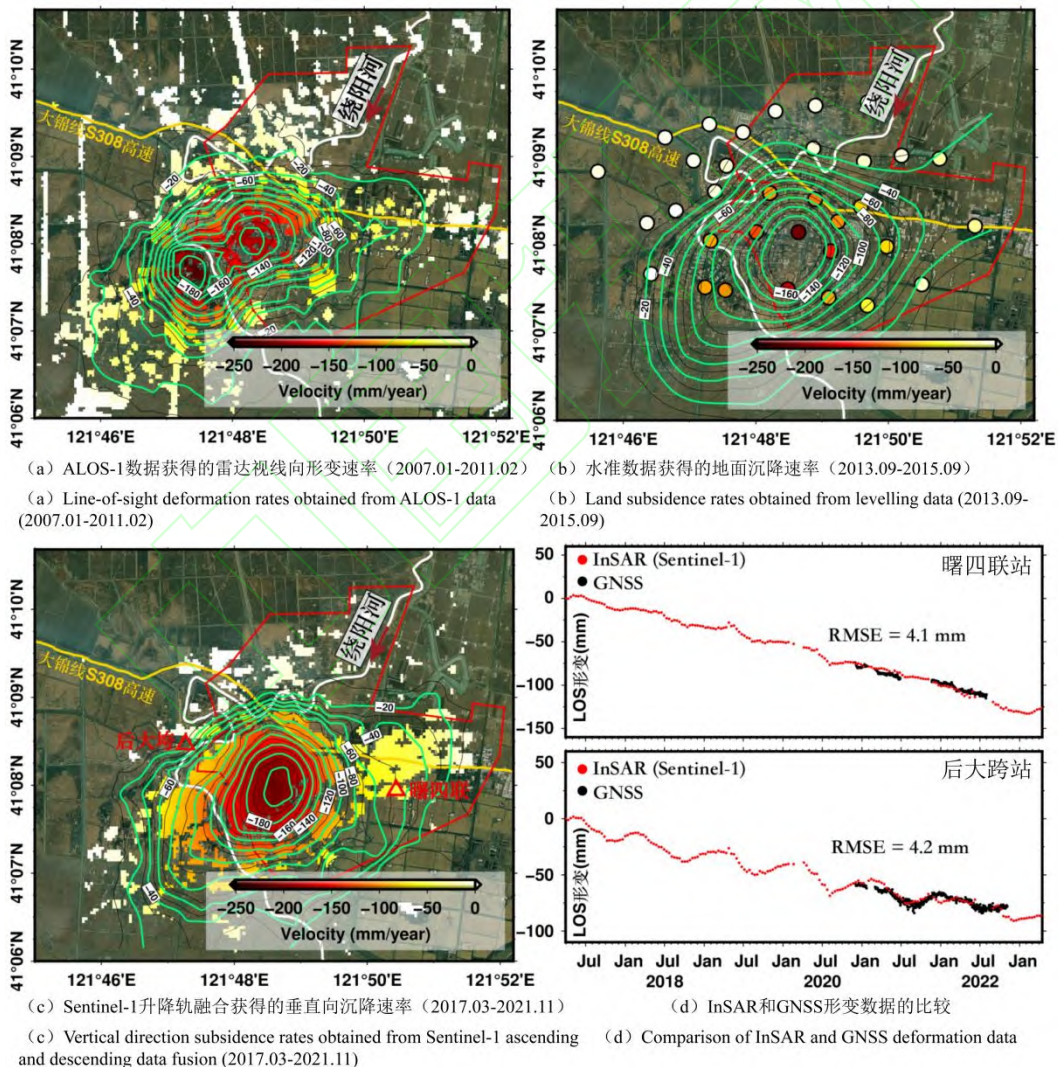


图 4 曙光油田地面沉降速率。图中以-10 mm/a 为间距绘制了速率等值线，以-20mm/a 的间距进行标注。图 (c) 中红色三角形为 GNSS 测站点位置（后大垮和曙四联）。图中红色线为曙光油田稠油区块范围，白色线条为绕阳河。

Fig.4 Land subsidence rates over the Shuguang oilfield. Rate contours are plotted in the figure with a contour interval of -10 mm/a and labelled at every -20 mm/a. The red triangles in the figure (c) show the two GNSS site locations. The red line in the figure shows the extent of the thick oil block in

the Shuguang oilfield, and the white line shows the Raoyang River.

尽管三种形变数据集处于不同时间范围或者不同方向上（ALOS-1 为雷达视线向），但三者的形变（沉降）在空间形态和速率量级上非常接近，说明该区域至少从 2007 年开始一直持续沉降。实际上，曙光油田于 1973 年开始钻探，1975 年投入开发，但历史上该区域从何时开始沉降，尚无公开资料可参考。从本文结果来看，2007 年 1 月至 2011 年 2 月，ALOS-1 的最大年均速率为-230 mm/a（图 4a）；2013 年 9 月至 2015 年 9 月，水准数据的最大年均速率为-207 mm/a（图 4b）；2017 年 3 月至 2021 年 11 月，Sentinel-1 融合结果的最大年均速率为-212 mm/a（图 4c）。因为图 4(a)为 ALOS-1 雷达视线结果，而图 4(b)和(c)都为垂直方向的沉降速率，因此后两者无论是沉降中心位置和速率最大值都比图 4(a)更为相似。空间上，曙光油田开采区地面沉降漏斗呈现近似椭圆形，椭圆长半轴呈 NE-SW 向，速率为-10 mm/a 的等值线形成的椭圆长半轴长度约为 9 km，短半轴长度约为 5 km，面积为 140 km²。时间上，不同时段沉降速率较为接近，多年来地表以较为稳定的速率持续沉降，漏斗边缘区有季节波动(图 4d)。

3.2 绕阳河“2022.8”溃堤洪水淹没分析

图 5 为从三期 GF-3 影像提取的绕阳河“2022.8”溃堤洪水淹没范围图，底图均为 2022 年 7 月 1 日 GF-3 SAR 影像。把 2022 年 7 月 1 日 GF-3 影像作为灾前影像（溃堤发生于 8 月 1 日），2022 年 8 月 2 日和 8 月 4 日影像作为灾后影像，将灾后影像与灾前影像求差提取堤坝溃口洪水淹没范围(图 5a 和 b)。将 8 月 4 日的淹没水体减去 8 月 2 日的淹没水体得到 8 月 2-4 日期间的洪水蔓延图(图 5c 和 d)。将得到的洪水淹没范围与土地利用类型叠加，发现堤坝溃口淹没区的土地利用类型主要是湿地和田地，并统计受淹田地范围和面积。

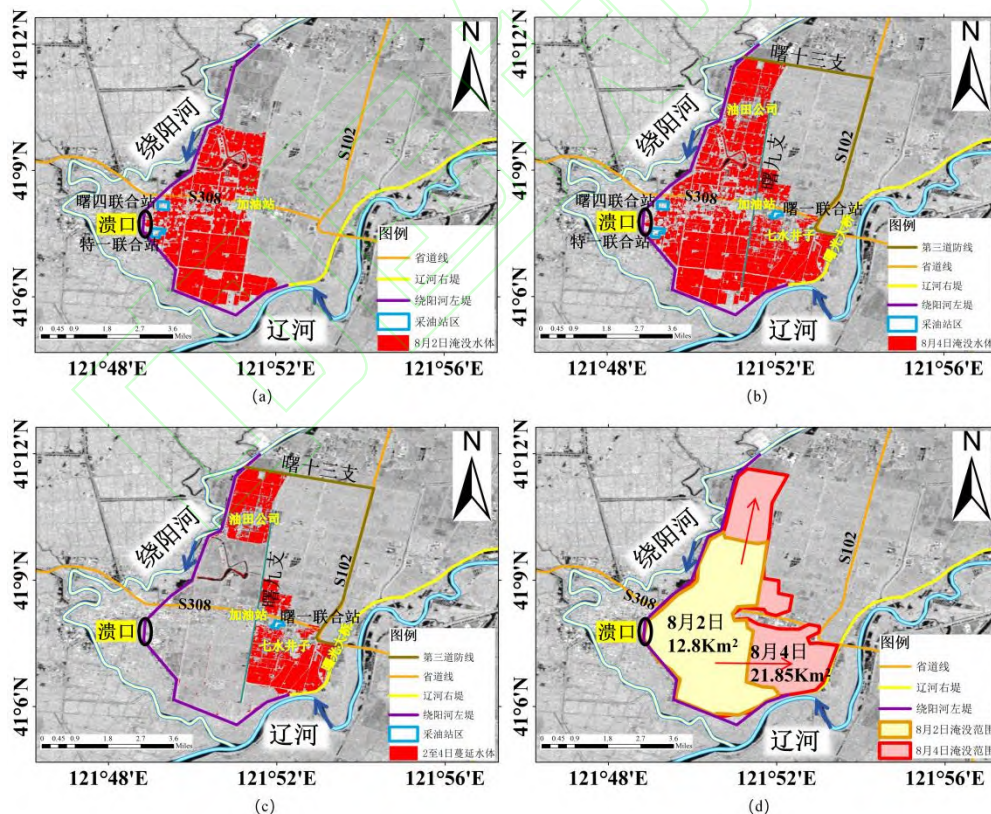


图 5 绕阳河“2022.8”溃堤洪水淹没范围图。(a) 2022 年 8 月 2 日淹没图。(b) 2022 年 8 月 4 日淹没图。(c) 2022 年 8 月 2 日至 8 月 4 日洪水淹没扩张图。(d) 2022 年 8 月 2 日至 8 月 4 日洪水淹没趋势图。

Fig.5 Inundation extent map of the "2022.8" levee-breach flood in the Raoyang River. (a) Inundation map on 2-August 2022. (b) Inundation map on 4-August 2022. (c) 2-August to 4-August 2022 flood inundation expansion map. (d) 2 August to 4 August 2022 flood inundation trend map.

从提取结果来看,溃口造成盘锦市绕阳河左岸曙四联段大锦线 S308 高速公路附近淹没,8月2日淹没面积为 16.69 km²,受淹田地面积为 14.1 km²(占比为 84.5%)。8月4日洪水淹没面积为 22.03 km²,受淹田地面积为 19.3 km²(占比为 87.6%)。8月1日堤防溃口后,洪水淹没区自西向东逐渐扩大。8月2日至4日,洪水向东漫过 S308 高速公路运输石油加油站右侧,淹没七水井子附近区域,于辽河的西河处流入辽河。同时,洪水沿曙九支向北蔓延,淹没盘锦辽河油田公司附近区域。8月4日上午,盘锦市防汛抗旱指挥部联合市水利勘探设计院完成了第三道防线施工,全线堤高为 5 m,第三道防线从曙光大桥开始,沿大锦线、102 线和曙十三支直通绕阳河大坝,形成了一个封闭圈(见图 5c 黄色实线),其主要作用是阻挡溃口洪水蔓延,减少淹没范围,将损失降到最低。

4 地面沉降对洪水淹没的影响探讨

理论上,洪水易发地区的地面沉降会导致洪水淹没范围的扩大和淹没水深的增加。如图 6 所示,地表高程的降低对洪水淹没的影响可分为 3 种情形:第一种情形为当地表出现地面沉降漏斗形成下沉盆地时,地势变得低洼,使积水面积增大、淹没水深增加(图 6a);第二种情形为排水系统、运河和河流系统在跨越地面沉降区域处高程降低,使得河道比降变缓,水流模式发生改变。持续性地面沉降降低了河道的泄洪能力,泄洪量相同时河道水位逐渐升高,造成受地面沉降影响区域的洪水淹没范围增大^[25](图 6b);第三种情形为在沿海地区受海平面上升和涨潮叠加地面沉降的共同作用下,沿海区洪水泛滥变得更加严重(图 6c)。地面沉降会加剧沿海地区的洪灾风险,与风暴潮交互作用时加剧洪水向内陆的侵袭。与内陆相比,沿海地区的洪水淹没对地面沉降更敏感。在未来地面持续沉降的情景下,地面沉降将占洪水淹没效应的主导地位,因此在预测沿海洪涝潮灾时必须考虑地面沉降^[26]。

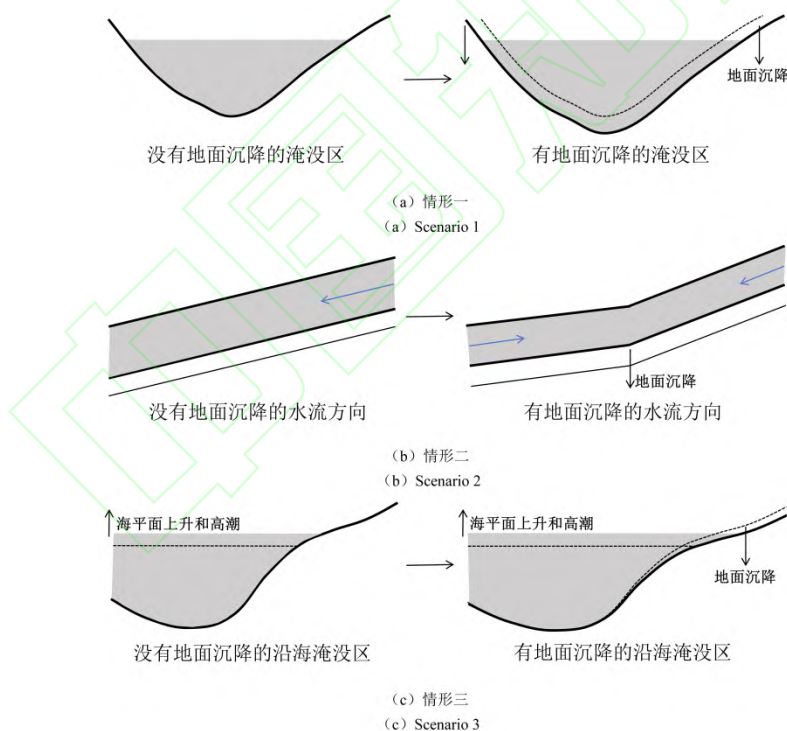


图 6 地面沉降对洪水淹没的影响

Fig.6 The impact of land subsidence on flood inundation

从图 4 可看出绕阳河刚好穿越曙光油田开采沉降区,进一步对比图 4 和图 5 可知,绕阳河“2022.8”溃堤洪水淹没范围与地面沉降区在空间上高度重叠,地面沉降所造成的高程损失对洪水淹没的影响不可忽视。本文从 Sentinel-1 融合的垂直沉降结果中提取了绕阳河干流及左堤沿线 2 km 范围内的地面沉降速率,对其进行了插值并绘制沿绕阳河的地面沉降速率剖面(图 7)。绕阳河穿越地面沉降区(沉降

速率大于-10 mm/a)的河道从北部的胜利塘段到南部的辽河路附近(北部起始点经纬度: 121.825° 41.153°, 南部终点经纬度: 121.821° 41.102°)。穿越地面沉降区(沉降速率大于-50 mm/a)的河道从北部的胜利塘大桥到南部的鼎翔水利风景区附近。穿越地面沉降区(沉降速率大于-100 mm/a)的河道从北部的东郭苇场红旗分场到南部的杜一支与绕阳河交界附近。从图 7(b)统计出, 绕阳河沉降速率介于[-150 mm/a, -100 mm/a]的河道长度大约 1.9 km, 沉降速率介于[-100 mm/a, -50 mm/a]的河道长度大约 4.1 km, 沉降速率介于[-50 mm/a, -10 mm/a]的河道长度约 4.2 km。绕阳河在图 7 中的 D 位置处(经纬度: 121.798° 41.126°)沉降速率最大, 达到-150 mm/a。按[-150 mm/a, -100 mm/a]的速率计算, 绕阳河从 2007 年至 2023 年的 17 年间有 1.9 km 的河道及沿线区域沉降了 1.7 m-2.5 m。从图 7 (a) 中溃口所处的位置来看, 溃口处与 D 位置的沉降速率相同, 按照-150mm/a 的速率计算, 溃口处的高程从 2007 至 2023 年之间减少了 2.55 米。而该区域海拔高程本身就较低(介于 1.5 米-15 米之间, 见图 7c), 如此大的地面沉降所造成的高程损失对河床的梯度、水流都会产生很大变化, 影响洪水流动方向和水流速度, 高程的损失也降低了河道堤坝原来设计的防洪能力, 从而加剧了洪涝灾害的严重程度。

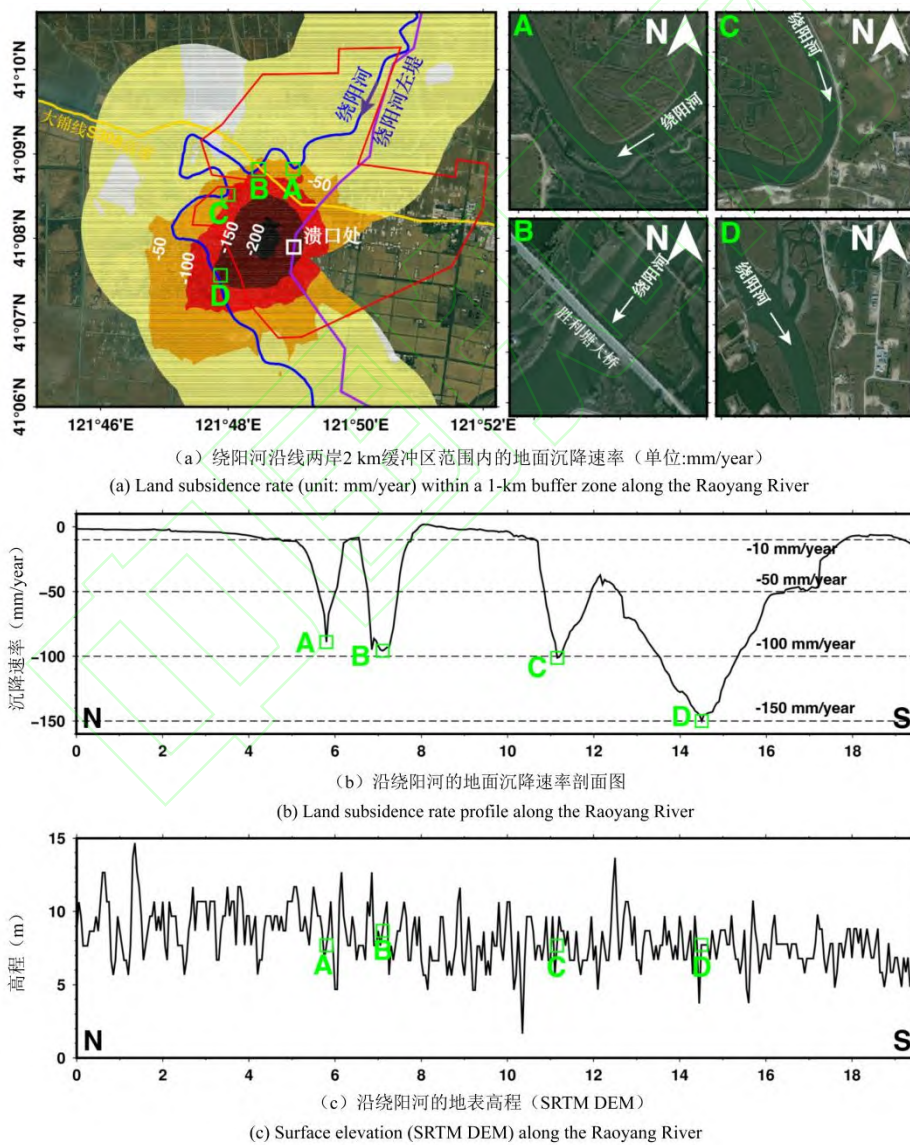


图 7 绕阳河流域地面沉降及高程剖面图。A、B、C 和 D 为绕阳河沿线地面沉降速率中心位置(图 a 中的绿色方框), 右上角为这四个区域对应的高分辨率光学影像图。图 7a 中的白色方框为绕阳河左堤曙四联段 2022 年 8 月 1 日溃堤决口位置。

Fig.7 Land subsidence and elevation profile of the Raoyang River Basin. A, B, C and D are the locations of the centre of the rate of land subsidence

along the Raoyang River (green boxes in Fig.7a), and the corresponding high-resolution optical images of these four areas are shown in the upper right corner. The white box in Fig.7 indicates the location of the "2022.8" levee-breach on the Raoyang River.

图 8 展示了累积地面沉降量与绕阳河 8 月 2 日淹没洪水的空间叠加图。堤坝溃口位于辽河油田曙光采油厂的厂区内，溃堤洪水导致曙光采油厂大批采油井被淹（图 8），造成油井基础设施损失、油井关闭等严重影响了辽河油田生产产量。对该区域而言，淹没范围与沉降区范围高度重叠，油田开采引发的地面沉降对本次绕阳河溃堤洪水的发生和发展主要体现在两个方面。第一，地面沉降尤其是不均匀沉降导致应力场的变化，使得堤坝的安全稳定性被破坏，增加了堤防损坏的可能性。实际上，该区域存在大量穿堤输油管道，地面沉降引起的高程降低导致这些穿堤管道更易浸泡于水位之下，出现渗漏破坏的可能性增加，导致 2022 年 8 月 1 日一条输油管道沿穿堤管接合面出现渗水破坏^[18]，最终引发大坝溃口发生。第二，地面沉降引起的高程降低使得该区域本就地势低洼的地表形成沉降漏斗，加之绕阳河在此处深槽狭窄，蜿蜒曲度大，洪水下泄速度慢，导致洪水在此更易出槽、漫溢，并滞留于沉降漏斗盆地，增加洪水淹没范围和淹没深度^[18]。从图 7a 看出溃口处（图中白色小方框）的地面沉降速率达到 -150 mm/a ，2007 至 2023 年累积沉降量达到 2.5 m（图 8）。另外，该处区域整体地势较低，沉降也导致路面出现破坏现象，再加上环境较为复杂，道路抢通工作面临极大困难，也加剧了洪涝灾害程度。再加上绕阳河和辽河河势不断变化，辽河上游原本弯曲的河道变直有利于水流，但下游防冲刷工程对上游来水有顶冲作用，不利于绕阳河出流，在一定程度上加剧了洪水的积聚和漫溢。

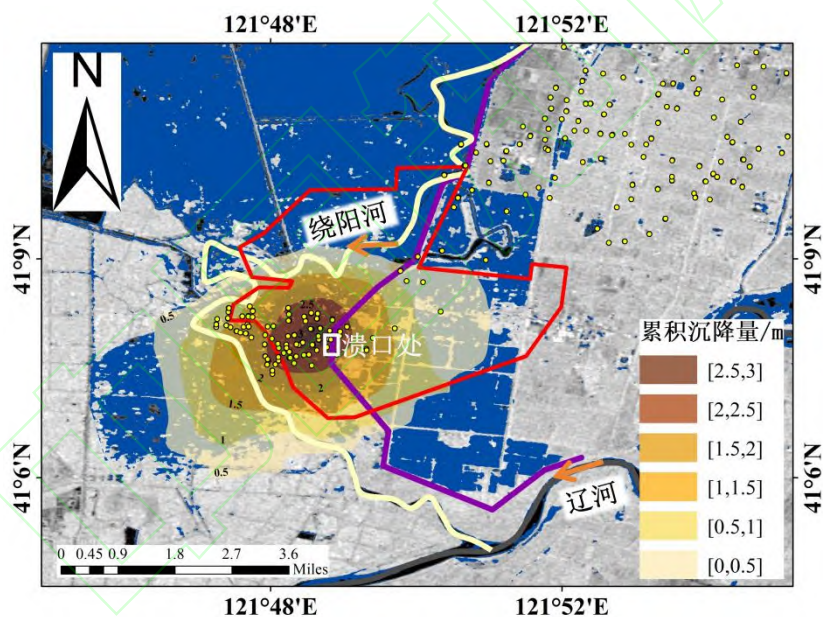


图 8 曙光油田累积地面沉降量（2007 年至 2023 年）与绕阳河“2022.8”溃堤洪水淹没范围叠加图。底图为 2022 年 7 月 1 日 GF-3 SAR 影像。图中黄色圆点代表曙光油田采油井位置。

Fig. 8 Overlay of cumulative land subsidence (2007-2023) in Shuguang oil field and flood inundation of the "2022.8" levee-breach of the Raoyang River. The yellow dots in the figure indicate the locations of oil wells.

5 结论

2022 年入汛以来，辽河三角洲受区域持续性暴雨影响，绕阳河下游左岸曙四联段堤防 8 月 1 日出现溃口，引发大范围洪水淹没。除了强降雨带来的巨大降雨量之外，位于区域内的曙光油田开采导致的地面沉降是造成绕阳河“2022.8”溃堤洪水发生和发展过程不可忽视的一个重要因素。本文对地面沉降对于此次溃堤洪水所发挥的作用展开了研究。基于时序 InSAR 技术处理了 ALOS-1、Sentinel-1 雷达影

像数据,并联合水准测量数据,分析了区域内2007年3月至2021年11月的地面沉降时空分布。采用水体指数法处理溃堤前后的GF-3雷达数据,获得了溃堤洪水淹没范围及蔓延过程。基于绕阳河沿线两岸2 km缓冲区范围内的地面沉降和DEM数据讨论了地面沉降对河道高程、排水的影响,进一步将累积地面沉降分布与洪水淹没范围进行叠加,分析地面沉降对洪水淹没范围的影响。本文取得的主要结论如下:

(1) 曙光采油厂由于石油采出造成储层压实,引发了严重的地面沉降。空间上,地面沉降漏斗近似椭圆形,速率为-10 mm/a的等值线形成的闭合椭圆长半轴长度约为9 km,短半轴长度约为5 km,面积为140 km²。时间上,从ALOS-1、水准和Sentinel-1的结果来看,从2007年至2021年地表以较稳定的线性速率持续下降,沉降中心最大速率达到-212 mm/a。

(2) 绕阳河穿过曙光油田开采沉降区,绕阳河两岸沿线沉降速率介于[-150 mm/a, -100 mm/a]的长度约1.9 km,据此计算绕阳河从2007年至2023年的17年间有1.9 km的沿线区域沉降了1.7 m-2.5 m。该区域海拔高程本就较低,如此大的地面沉降所造成的高程损失对河床的梯度、水流模式产生很大变化,高程损失也降低了河道堤坝原来设计的防洪能力,加剧了洪涝灾害的严重程度。

(3) GF-3雷达数据解译的绕阳河“2022.8”溃堤洪水淹没范围与曙光油田地面沉降区高度重叠,溃堤口处的地面沉降速率达到-150 mm/a,2007至2023年累积沉降量达到2.5 m。

(4) 地面沉降对此次溃堤的发生和洪水的发展产生的影响体现在两个方面:1)地面沉降破坏了相关堤坝的安全稳定性,高程损失使穿堤管道更易浸泡于水位之下,导致2022年8月1日一条输油管道沿穿堤接合面出现渗水破坏,引发溃口发生;2)地面沉降引起的高程降低使得该区域本就地势低洼的地表形成沉降漏斗,河流泄洪能力下降,使原来建在保证水位之上的堤坝高程降低,导致洪水在沉降区域更易出槽、漫溢,并滞留于沉降漏斗盆地,增加洪水淹没范围和淹没深度。

随着全球气候变暖,极端天气事件发生的趋势愈发明显,洪涝灾害的强度和频率也逐渐增加。对于沿海地区,海平面上升叠加地面沉降影响,所面临的洪水淹没风险增大。在应对气候变化导致的洪水风险管理及相关防洪规划设计中,应把地面沉降作为一个重要因素加以考虑。针对辽河三角洲而言,为应对洪涝灾害修建防护堤坝是目前简便易行的措施,但是在地面沉降影响下堤坝的防护作用逐渐降低。三角洲内分布着辽河油田大量特种油井,作为一项国家重要的基础设施,在石油开采的同时应加强地面沉降监测预警,评估其对区域防洪的影响,同时加强对地面沉降重点区的河道、河堤进行巡查和治理,从而有效防止堤坝渗漏、溃坝发生。

参考文献

- [1] Fang J, Nicholls R J, Brown S, et al. Benefits of subsidence control for coastal flooding in China[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 6946.
- [2] Li P, Wang G, Liang C, et al. InSAR-derived Coastal Subsidence Reveals New Inundation Scenarios over the Yellow River Delta[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023.
- [3] Takagi H, Thao N D, Anh L T. Sea-level rise and land subsidence: impacts on flood projections for the Mekong Delta's largest city[J]. *Sustainability*, 2016, 8(9): 959.
- [4] Dixon T H, Amelung F, Ferretti A, et al. Subsidence and flooding in New Orleans[J]. *Nature*, 2006, 441(7093): 587-588.
- [5] Wang J, Gao W, Xu S, et al. Evaluation of the combined risk of sea level rise, land subsidence, and storm surges on the coastal areas of Shanghai, China[J]. *Climatic change*, 2012, 115: 537-558.
- [6] Ouyang M, Ito Y, Tokunaga T. Local land subsidence exacerbates inundation hazard to the Kujukuri Plain, Japan[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2020, 382: 657-661.
- [7] Abidin H Z, Andreas H, Gumilar I, et al. On the roles of geospatial information for risk assessment of land subsidence in urban areas of Indonesia[J]. *Intelligent Systems for Crisis Management: Geo-information for Disaster Management (Gi4DM) 2012*, 2013: 277-288.
- [8] Shirzaei M, Bürgmann R. Global climate change and local land subsidence exacerbate inundation risk to the San Francisco Bay Area[J]. *Science advances*, 2018, 4(3): eaap9234.
- [9] Catalao J, Raju D, Nico G. InSAR maps of land subsidence and sea level scenarios to quantify the flood inundation risk in coastal cities: The case of Singapore[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(2): 296.
- [10] Tang W, Zhan W, Jin B, et al. Spatial variability of relative sea-level rise in Tianjin, China: Insight from InSAR, GPS, and tide-gauge observations[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 2621-2633.

- [11] Yin J, Zhao Q, Yu D, et al. Long-term flood-hazard modeling for coastal areas using InSAR measurements and a hydrodynamic model: The case study of Lingang New City, Shanghai[J]. Journal of Hydrology, 2019, 571: 593-604.
- [12] Sun Qifa, Tian Hui, Zhang Kuo. Study on the History of Land Subsidence in Lower Liaohe River Plain[J]. Geology and Resources, 2014, 23(5): 450-452.(孙岐发,田辉,张扩.下辽河平原地区历史地面沉降情况研究[J].地质与资源,2014,23(05):450-452.)
- [13] Meng Lingwei, Lu Yizhu, Song Wenlong, et al. Research and application of early monitoring of river and lake levee breach hidden danger based on remote sensing[J/OL]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research:1-13[2024-05-13].(孟令维,卢奕竹,宋文龙,等.基于遥感数据的河湖堤防溃口隐患早期监测研究与应用[J/OL].中国水利水电科学研究院学报(中英文):1-13[2024-05-13].)
- [14] Tian Hui, Gong Yan, Liang Xiujian, et al. Study on Dynamic Monitoring of Groundwater in Liaohe Delta Area[J]. Ground water,2019,41(01):43-46.(田辉,宫妍,梁秀娟等.辽河三角洲地区地下水动态监测研究[J].地下水,2019,41(01):43-46.)
- [15] Liu Dawei. Study on the Evolution of the Liaohe - Daling River Delta in the Past Four Hundred Years[D]. China University of Geosciences (Beijing), 2019.DOI:10.27493/d.cnki.gzdzy.2019.000173.(刘大为.辽河-大凌河三角洲四百年来的演化研究[D].中国地质大学(北京),2019.DOI:10.27493/d.cnki.gzdzy.2019.000173.)
- [16] Ju Fei. The Necessity of Elevation Citation in Shuguang Oil Extraction Plant of Liaohe Oilfield[J]. Ground Water,2014,36(04):201-202.(鞠飞.辽河油田曙光采油厂高程引测的必要性[J].地下水,2014,36(04):201-202.)
- [17] Liu Yuefeng, Wu Lun, Han Mukang, et al. Assessment of Trend and Impacts of Sea Level Rise in the Liaohe River Delta[J]. Haiyang Xuebao, 1998, 20(2): 73-82.(刘岳峰,邬伦,韩慕康等.辽河三角洲地区海平面上升趋势及其影响评估[J].海洋学报(中文版),1998,(02):73-82.)
- [18] Ding Zhixiong, Lv Juan, Li Na et al. Simulation inversion and analysis on “2022.8” levee-breach flood in Raoyang River of Liaoning Province[J]. China Flood & Drought Management,2022,32(11):64-69.DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2022430.(丁志雄,吕娟,李娜等.辽宁省绕阳河“2022.8”溃堤洪水模拟反演及分析[J].中国防汛抗旱,2022,32(11):64-69.DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2022430.)
- [19] Zhang Yunshuo, Guan Qingsong, Song Wenlong et al. Emergency monitoring and analysis of unmanned aerial vehicles for the breach of the Raoyang River in Liaoning Province in 2022[J]. China Flood & Drought Management,2023,33(02):35-39.DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2023039.(张芸硕,关青松,宋文龙等.2022年辽宁省绕阳河溃口无人机应急监测分析[J].中国防汛抗旱,2023,33(02):35-39.DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2023039.)
- [20] Jin Shengyue, Liu Longfei, Liu Mingbo. Satellite Remote Sensing Monitoring of Flooding in the Raoyang River in Liaoning Province[J]. Disaster Reduction in China,2023,(05):23-25.(金晟玥,刘龙飞,刘明博.辽宁省绕阳河洪涝灾害卫星遥感监测[J].中国减灾,2023,(05):23-25.)
- [21] Sandwell D, Mellors R, Tong X, et al. Open radar interferometry software for mapping surface deformation[J]. 2011.
- [22] Tong X, Schmidt D. Active movement of the Cascade landslide complex in Washington from a coherence-based InSAR time series method[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 186: 405-415.
- [23] Jia Jian, Qiu Mengling, Jia Xuesong, et al. Flood inundation depth monitoring based on GF-3 imagery[J]. China Flood & Drought Management,2022,32(S1):4-8.DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2022579.(郝建,邱梦凌,贾学松等.基于高分三号影像的洪水淹没水深监测[J].中国防汛抗旱,2022,32(S1):4-8.DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2022579.)
- [24] GONG Zhiqiang, TANG Wei, JIANG Jimbao, et al. Monitoring and Modeling of Land Subsidence in Liaohe Delta Oilfield Based on Time Series InSAR Technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, DOI: 10.13203/j. whugis20220162. (龚志强, 唐伟, 蒋金豹, 等. 基于时序 InSAR 技术的辽河三角洲油田地面沉降监测与建模[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220162)
- [25] Chen Xiaocheng, Tao Yu. Influence of land subsidence on flood discharge capacity of river channel[J]. Water Sciences and Engineering Technology,2023(02):20-23.(陈晓成,陶宇.地面沉降对河道泄洪能力影响分析[J].水科学与工程技术,2023(02):20-23.)
- [26] Huang Guangwei, Guo Chengchao, Cai Huayang, et al. Designing factorial experiments to investigate the impact of land subsidence on flood inundation in coastal areas during storm surges[J/OL]. Hydro-Science and Engineering:1-11[2024-05-13].(黄光玮,郭成超,蔡华阳,等.沿海地面沉降对风暴潮作用下洪水淹没影响的析因试验[J/OL].水利水运工程学报:1-11[2024-05-13].)

网络首发:

标题: 地面沉降对洪水淹没的影响—以辽宁绕阳河“2022.8”溃堤洪水为例

作者: 唐伟, 程清, 崔健, 孙秀波, 王井利, 耿旭

收稿日期: 2024-09-28

DOI:10.13203/j.whugis20240063

引用格式:

唐伟, 程清, 崔健, 等. 地面沉降对洪水淹没的影响—以辽宁绕阳河“2022.8”溃堤洪水为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,DOI: 10.13203/j.whugis20240063(TANG Wei, CHENG Qing, Cui Jian, et al. Impacts of Land Subsidence on Flood Inundation: An Example of the “2022.8” Levee-Breach in Raoyang River of Liaohe Delta[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,DOI:

10.13203/j.whugis20240063)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

基于时序 InSAR 技术的辽河三角洲油田地面沉降监测与建模

龚志强, 唐伟, 蒋金豹, 李辉, 张鑫, 耿旭, 卫星

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(8): 1422-1433.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220162>

南水进京后利用升降轨 InSAR 解译北京地面沉降发展态势

张双成, 张雅斐, 司锦钊, 罗勇, 余静, 雷坤超, 许强

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(8): 1337-1346.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210554>

南水北调前后京津城际铁路北京段地面沉降演化特征

鲁朝朝, 陈蓓蓓, 宫辉力, 周超凡, 史珉, 曹锦

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 1959-1968.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210214>