引文格式: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),2026,51(2):249-259.DOI:10.13203/j.whugis20240063

Citation: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,2026,51(2):249-259.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年汛期以来,辽河干支流绕阳河流域近90%的区域遭遇暴雨至大暴雨天气。2022-08-01T10:30:00,绕阳河下游左岸曙四联段发生堤防溃口,引发大面积洪水淹没,对沿河城市及周边区域的房屋、农作物和油田生产设施造成严重损失。除区域性极端强降雨外,地面沉降也是导致本次"2022·8"溃堤洪水事件的重要因素之一。基于ALOS-1与Sentinel-1雷达影像,结合合成孔径雷达干涉及水准监测数据,分析了曙光油田2007-03—2021-11的地面沉降时空分布特征;并利用高分三号雷达数据与水体指数方法解译了溃堤前后的洪水淹没范围,进而分析洪水蔓延过程及受灾土地类型。并通过叠加累积地面沉降与洪水淹没范围,探讨了地面沉降对溃堤发生及洪水发展的影响。研究结果表明:(1)曙光油田开采导致形成一个椭圆形地面沉降漏斗,沉降中心最大速率达-212 mm/a;(2)绕阳河流经该沉降漏斗区,溃堤洪水淹没范围与沉降区高度重叠,溃口处沉降速率达-150 mm/a;(3)地面沉降造成的高程损失削弱了堤防结构安全,导致输油管道更易没于水下,穿堤管道接合部位发生渗水破坏,进而诱发溃口;同时,地面沉降形成的洼地降低了河流泄洪能力,使洪水更易溢出河道并在沉降区域滞留,增加了淹没范围与深度。该研究强调了在洪水风险评估与防洪规划中需综合考虑地面沉降因素,为该类区域的防灾减灾工作提供科学依据。

关键词:绕阳河溃堤;地面沉降;石油开采;洪水淹没;洪水风险

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-09-17

DOI:10.13203/j.whugis20240063 **文章编号**:1671-8860(2026)02-0249-11

Impacts of Land Subsidence on Flood Inundation: An Example of the "2022·8" Levee-Breach in Raoyang River of Liaohe Delta

TANG Wei[1] *CHENG Qing*[1] *CUI Jian*[2] *SUN Xiubo*[2] *WANG Jingli*[3] *GENG Xu*[1]

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: **Objectives**: This study aims to investigate the causes and impacts of the levee-breach event that occurred in Raoyang River in August 2022, with a particular focus on the role of ground subsidence induced by oil extraction. The analysis includes the spatial-temporal characteristics of land deformation and its influence on flood propagation and inundation extent. **Methods**: Time series interferometric synthetic aperture radar (InSAR) processing was carried out using ALOS-1 and Sentinel-1 radar images, supplemented by leveling monitoring data, to analyze ground subsidence in the Shuguang Oilfield from March 2007 to November 2021. The pre- and post-breach flood extents were interpreted using Gaofen-3 radar data and a water index-based method. The inundation process and affected land types were further examined. Cumulative

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

通信作者:孙秀波,硕士,高级工程师。hlisunxb@126.com

ground subsidence was then overlaid with flood inundation areas to assess its impact on levee failure and flood development. **Results:** The findings reveal that:(1) Oil extraction in the Shuguang Oilfield resulted in an elliptical subsidence funnel, with a maximum annual subsidence rate of −212 mm/a at the center. (2) The Raoyang River flows through this subsidence funnel area, and the flood inundation extent closely overlaps with the subsidence region. The subsidence rate at the breach location reached −150 mm/a. (3) Elevation loss due to ground subsidence compromised the structural integrity of the levee, increasing the risk of pipeline inundation and seepage failure at crossing points. The formed subsidence basin reduced river discharge capacity, facilitating overflow, prolonging water retention, and increasing both the extent and depth of flooding. **Conclusions:** This study underscores the importance of incorporating ground subsidence into flood risk assessment and flood control planning. The results provide a scientific reference for regional disaster prevention and mitigation strategies, particularly in areas affected by significant human-induced ground deformation.

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

受复杂地貌与东亚季风气候的共同影响,中国洪涝灾害发生频繁。暴雨引发的洪水具有发生频率高、突发性强、影响范围广、灾害损失大等特点,是自然灾害链中的关键环节,严重威胁沿河城市及周边区域的建筑、农田和基础设施,对人民生命和财产安全构成持续挑战。随着城市化进程不断推进,中国主要河流沿岸的洪泛区人口和资产密度显著提高,洪灾可能造成的经济损失也相应增大。在全球气候变化与海平面上升的背景下,极端强降水事件频发,伴随人类活动对地表的破坏,洪涝灾害风险进一步加剧,防洪减灾工作面临更为严峻的形势。

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。文献[4]认为2005年8月卡特里娜飓风引发的风暴潮造成密西西比河海湾口运河防洪堤被破坏,这与新奥尔良的地面沉降有很大关系。文献[5]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。文献[6]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,文献[1]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外,更关键的是严重的城市地面沉降和洪水泛滥威胁。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,整个城市都面临着洪水泛滥的威胁。

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[8-9]。文献[10]利用合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)和全球导航卫星系统(global navigation satellite system,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。文献[11]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。地面沉降已成为中国沿海城市和海岸带地区的一个重大地质环境问题。文献[12]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。文献[13]利用InSAR技术监测了上海临港新城的地面沉降速率,并基于二维洪水淹没模型预测和评估了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。

辽河三角洲位于辽河与大辽河入海口交汇处,地势低平、河网密布。该地区长期以来深受汛期强降雨和风暴潮影响,沿海低洼地带洪涝灾害频发,防洪形势严峻。该区域的洪水威胁不仅

源于极端降水等自然因素,人类活动引发的地面沉降也对灾情具有显著的加剧作用。已有研究指出,下辽河平原由于地下水与油气资源开采,在1977—2007年间累积沉降超过1.56 m的范围达225 km^2,尤其在曙光、欢喜岭、锦州等油田集中开采区形成了明显的沉降漏斗,最大累积沉降量达3 m[14]。然而,地面沉降作为一种缓变性地表变形,其在洪涝成灾过程中的作用常被忽视,在现有防洪规划中也未得到系统考虑。2022年8月,辽河三角洲绕阳河发生溃堤事件,其洪水淹没区恰好位于曙光油田地面沉降漏斗范围内。地面沉降导致堤防实际高程下降、防洪能力减弱,原设计保证水位之上的堤防安全受到严重威胁。研究表明,溃口区段属于地面沉降高风险堤段,沉降很可能是此次溃堤的关键诱因之一[15]。这一问题已引起辽宁省防汛部门的关注,但目前仍缺乏深入的定性与定量研究。

为此,本文以绕阳河“2022·8”溃堤洪水事件为研究对象,首先采用时序InSAR技术分析油田开采导致的地面沉降时空分布特征;然后基于高分三号SAR影像,利用水体指数法提取洪涝淹没范围;最后通过叠加地面沉降与淹没范围数据,揭示沉降对洪水淹没的影响机制,为区域沉降防控与流域防洪规划提供科学依据。

1　研究区概况

1.1　研究区介绍

辽河三角洲是中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[16]。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[17]。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。绕阳河是辽河的主要支流之一,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 km^2。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月—9月,暴雨洪水多发于7月—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,其中分布有曙光、欢喜岭、锦州3个采油厂。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[14]。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[18]。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的趋势[19]。

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月－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,累积平均降雨量达到541.0 mm,远超常年平均降雨量234.1 mm,位居历史同期最高记录[20]。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年以来的最大洪水记录[20]。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。

8月1日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 m。随着时间推移,至8月3日16时,溃口宽度已扩大至50 m。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里,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2 600台抽油机、5片采油站区及大片农田受淹[22],部分受淹现场见图1。

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。

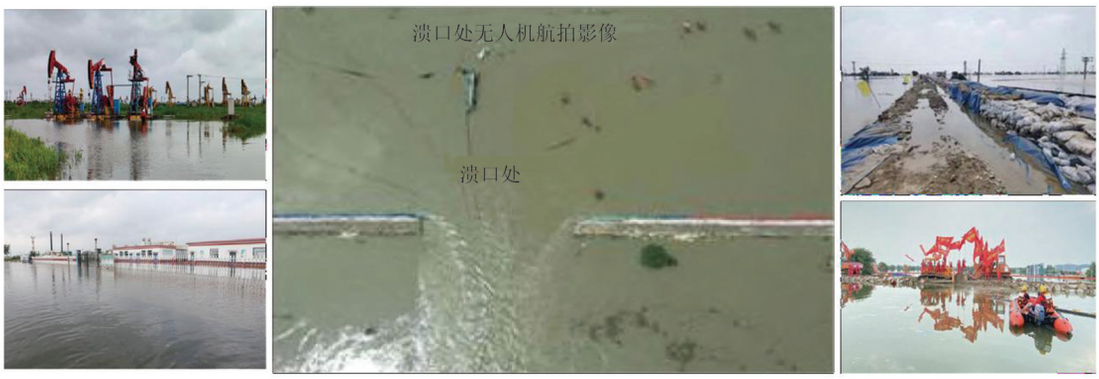


图1 绕阳河“2022·8”溃堤处无人机航拍影像及洪水淹没的部分现场照片(无人机航拍影像来自文献[21])

Fig. 1 Aerial Drone Imagery of “2022·8” Levee-Breach in the Raoyang River and Part Photographs of the Flooded Site (Aerial Drone Images from Reference[21])

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[23],时序处理采用短基线集方法(small baseline subset, SBAS)。具体算法采用GMTSAR中的基于相干性的SBAS方法,该方法对传统SBAS方法进行了改进,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[24]。由于InSAR仅能获取雷达视线向形变,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)和水平东西向形变。对Sentinel-1升降轨数据进行融合时,仅对3个数据集的时间重合部分进行融合,即2017-03—2021-11。

表1 地面沉降提取和分析所用数据集

Table 1 Datasets Used for Land Subsidence Extraction and Analysis

数据集	名称	轨道	Path	Frame	时间范围	月数
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

本文还收集了2013-09—2015-09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1 215 km,共观测了12期数据。

另外,还获取了研究区2个GNSS连续测站后大垮、曙四联的地表形变监测数据,时间范围分别为2020-12—2022-11、2020-12—2022-08,该数据主要用于验证InSAR的地表形变解译精度。ALOS-1、Sentinel-1和水准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,本文获取研究区2022-07-01、2022-08-02和2022-08-04 3期高分三号(GF-3)SAR影像。数据基本信息见表2。

本文使用PIE-SAR软件对3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2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。

表2 用于洪水分析的GF-3数据集

Table 2 GF-3 Dataset Used for the Inundation Analysis

日期	空间分辨率/m	模式	极化方式
2022-07-01	10	FSII	VV/VH
2022-08-02	10	FSII	HH/HV
2022-08-04	10	FSII	HH/HV

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[25]。对预处理后的GF-3 SAR影像的双极化数据进行对数处理,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。

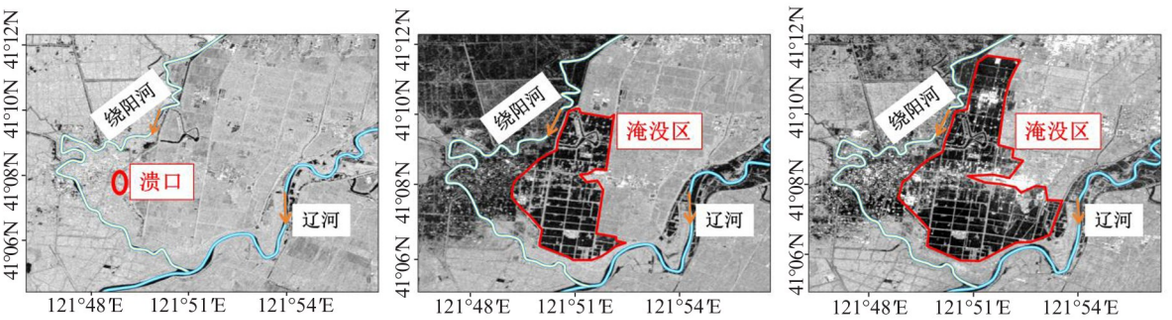


图 2　绕阳河区域GF-3 SAR强度影像图

Fig. 2　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

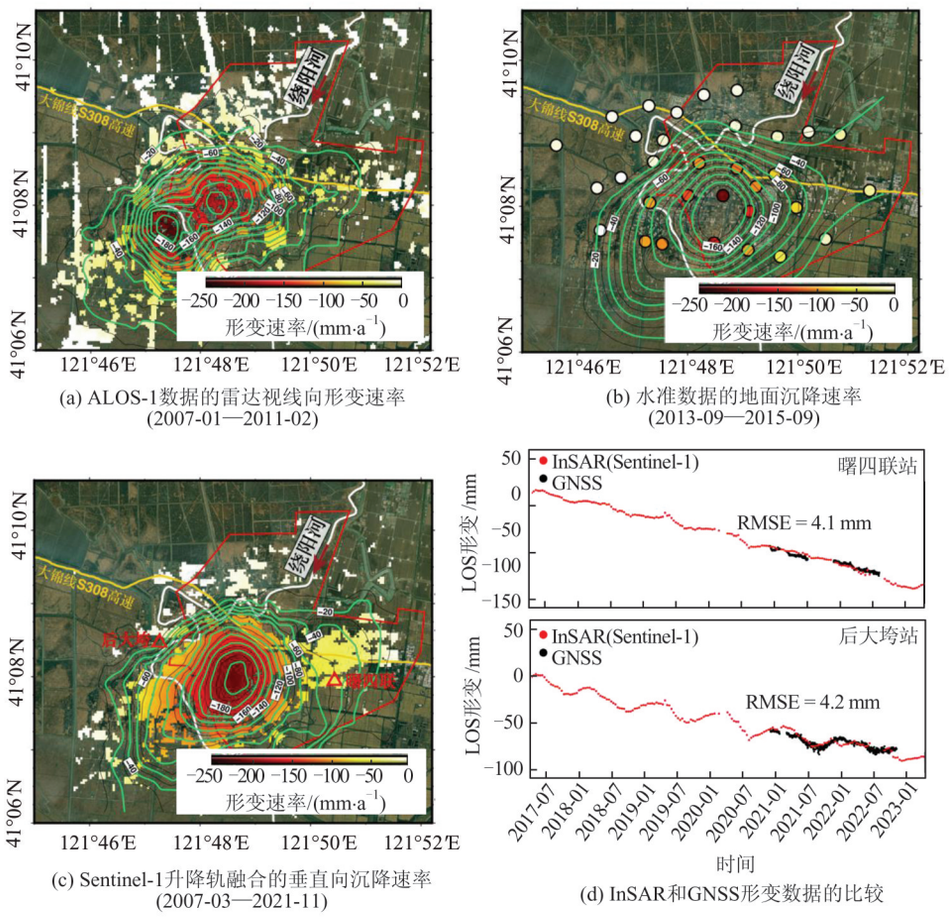
图3为从3种数据源获得的不同时间段曙光油田开采区地面沉降速率。图3中以－10 mm/a为间距绘制了速率等值线,以－20 mm/a的间距进行标注。图3(c)中红色三角形为GNSS测站点位置(后大垮和曙四联)。图3中红色线为曙光油田稠油区块范围,白色线条为绕阳河。曙光油田沉降区存在较明显的朝向沉降漏斗中心的水平移动现象[26],不能简单将InSAR的视线方向形变结果简单投影到垂直向,故本文保留ALOS-1的视线方向形变结果。为了验证InSAR解算的形变结果,利用研究区的GNSS连续运行参考站数据进行比较,考虑到GNSS和InSAR的时间重合性,仅针对Sentinel-1的P98F129升轨数据进行比较。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3(d)为InSAR和GNSS的时间序列对比图,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。

尽管3种形变数据集处于不同时间范围或者不同方向,但三者的沉降形变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。基于地面沉降监测结果,研究发现2007-01—2011-02,ALOS-1的最大年均速率为－230 mm/a;2013-09—2015-09,水准数据的最大年均速率为－207 mm/a;2017-03—2021-11,Sentinel-1融合结果的最大年均速率为－212 mm/a。因为图3(a)为ALOS-1雷达视线向结果,而图3(b)和3(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还是速率最大值都比图3(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 km^2。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。

3.2　绕阳河“2022·8”溃堤洪水淹没分析

图4为从3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2022-07-01,GF-3 SAR影像。把2022-07-01的GF-3影像作为灾前影像(溃堤发生于8月1日),2022-08-02－2022-08-04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,结果如图4(a)、4(b)所示。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日—4日期间的洪水蔓延图,结果如图4(c)、4(d)所示。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。

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 km^2,受淹田地面积为14.1 km^2



(a) ALOS-1数据的雷达视线向形变速率 (2007-01—2011-02)

(b) 水准数据的地面沉降速率 (2013-09—2015-09)

(c) Sentinel-1升降轨融合的垂直向沉降速率 (2007-03—2021-11)

(d) InSAR和GNSS形变数据的比较

图3 曙光油田地面沉降速率

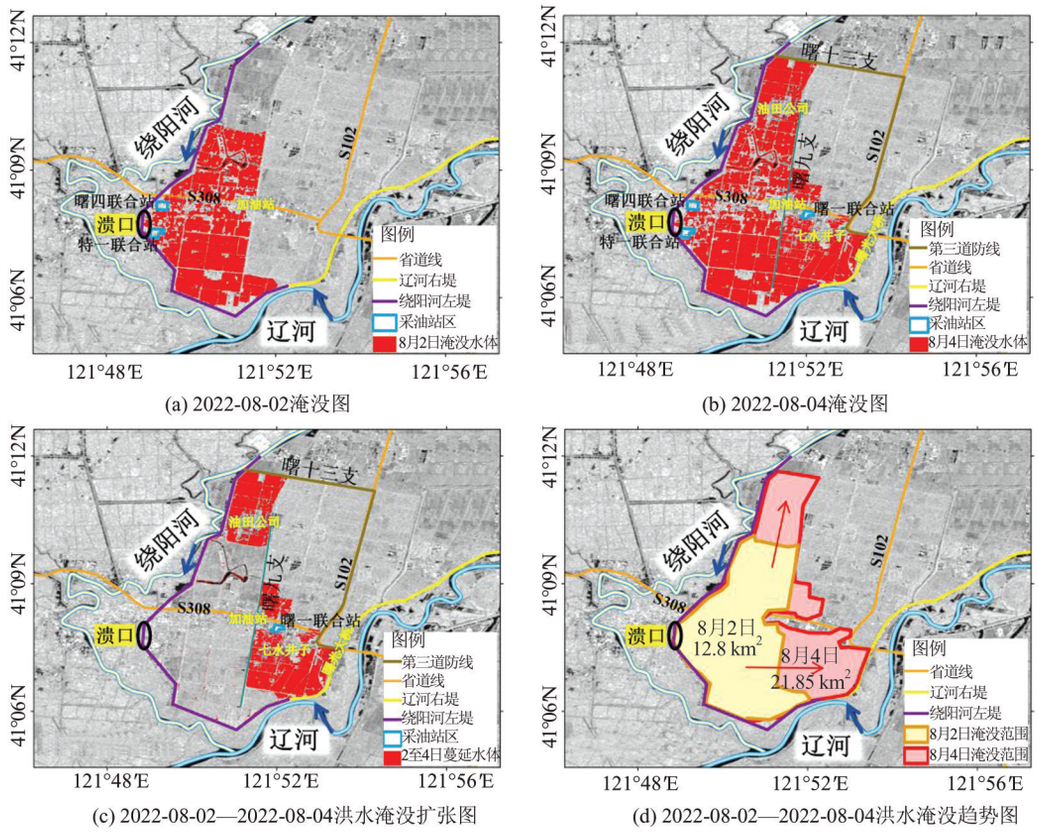
Fig. 3 Land Subsidence Velocity Rates over the Shuguang Oilfield

(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—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、S102线和曙十三支连接绕阳河左堤与辽河右堤,形成了一个封闭圈.如图4(c)所示,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5所示,地表高程的降低对洪水淹没的影响可分为3种情形:(1)情形一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,积水面积增大、淹没水深增加。(2)情形二为排水系统、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[27]。(3)情形三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。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[28]。

由图3可看出,绕阳河从曙光油田开采沉降区穿越,进一步对比图3和图4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



(a) 2022-08-02淹没图　(b) 2022-08-04淹没图

(c) 2022-08-02—2022-08-04洪水淹没扩张图　(d) 2022-08-02—2022-08-04洪水淹没趋势图

图 4　绕阳河“2022·8”溃堤洪水淹没范围图

Fig. 4　Inundation Extent Map of the “2022·8” Levee-Breach Flood in the Raoyang River

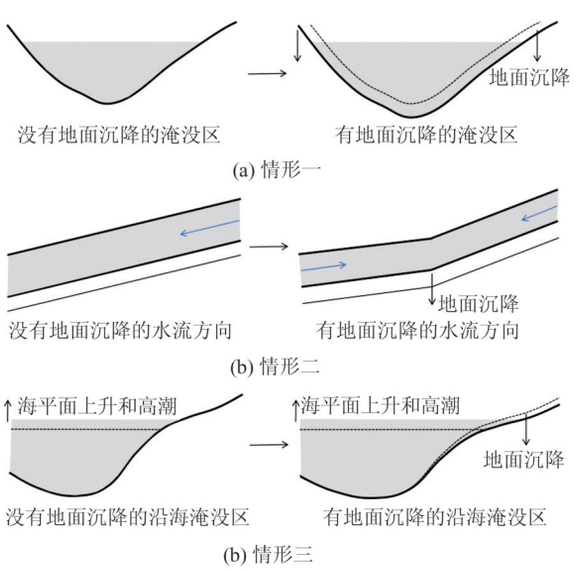
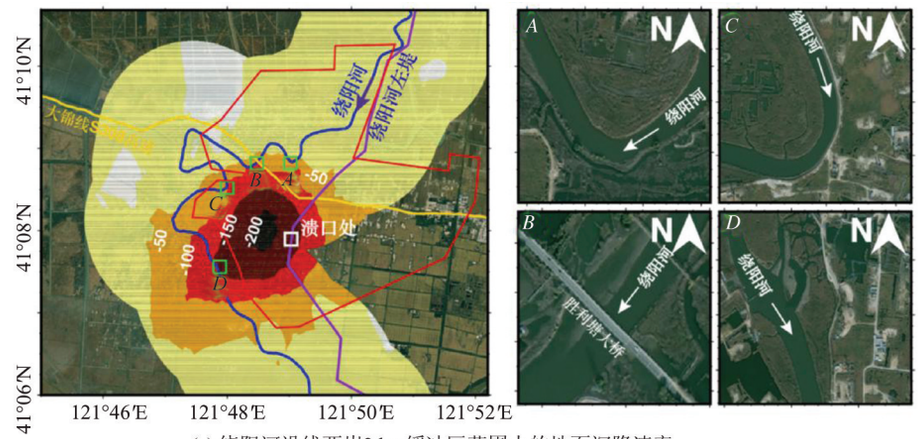


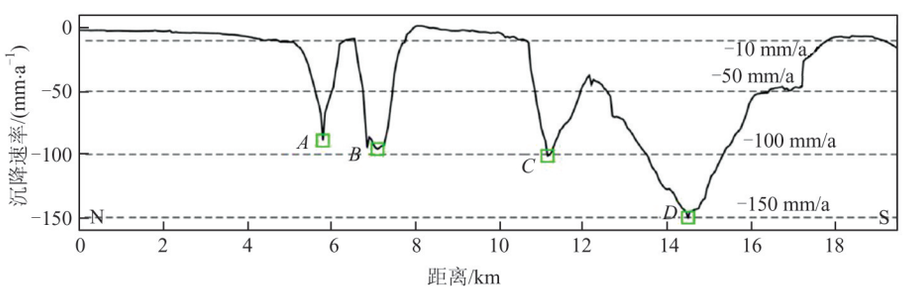
图 5　地面沉降对洪水淹没的影响

Fig. 5　Impact of Land Subsidence on Flood Inundation

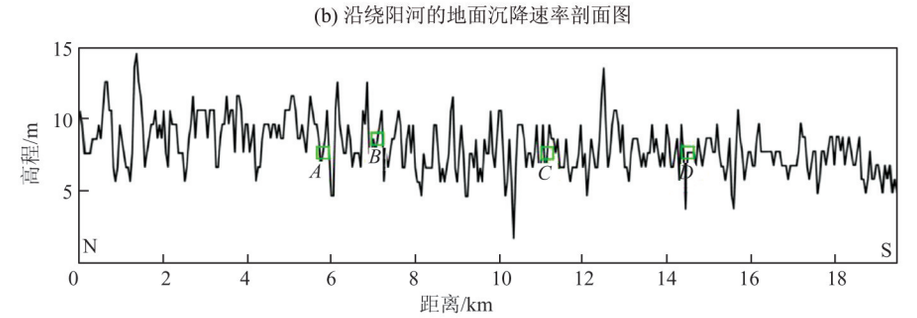
的垂直沉降结果中提取了绕阳河干流及左堤沿线 2 km 范围内的地面沉降速率,对其进行了插值并绘制沿绕阳河的地面沉降速率剖面,结果如图 6 所示。绕阳河穿越沉降速率大于－10 mm/a 地面沉降区的河道从北部的胜利塘段到南部的辽河路附近;穿越沉降速率大于－50 mm/a 地面沉降区的河道从北部的胜利塘大桥到南部的鼎翔水利风景区附近;穿越沉降速率大于－100 mm/a 地面沉降区的河道从北部的东郭苇场红旗分场到南部的杜一支与绕阳河交界附近。图 6(a)为绕阳河沿线两岸 2 km 缓冲区的地面沉降速率,沉降速率区间用不同的颜色表示,图中标注了速率区间的边界值,紫线为绕阳河左堤,红线区域为绕阳河“2022·8”溃堤洪水淹没范围,白色方框为绕阳河左堤曙四联段 2022-08-01 溃堤决口位置,A、B、C 和 D 为 4 个沉降速率中心位置,右侧是对应的高分辨率光学影像图。图 6(b)为沿绕阳河的地面沉降速率剖面图,横轴代表图 6(a)中从北到南沿线距离。绕阳河沉降速率介于[－150, －100]mm/a 的河道长度大约 1.9 km,沉降速率介于(－100, －50]mm/a 的河道长度大约为 4.1 km,沉降速率介于(－50, －10]mm/a 的河道长度约 4.2 km。绕阳河在图 6 中的 D 位置处沉降速率最大,达到－150 mm/a。按[－150,－100]mm/a 的速率计算,绕阳河从 2007—2023 年的 17 年间有 1.9 km 的河道及沿线区域沉降了 1.7～2.5 m。从图 6(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－150 mm/a 的速率计算,溃口



(a) 绕阳河沿线两岸2 km缓冲区范围内的地面沉降速率



(b) 沿绕阳河的地面沉降速率剖面图



(c) 沿绕阳河的地面高程

图6 绕阳河流域地面沉降及高程剖面图

Fig. 6 Land Subsidence and Elevation Profile of the Raoyang River Basin

处的高程从2007—2023年之间减少了2.55 m,而该区域海拔高程本身就较低(介于1.5～15 m之间,见图6(c)),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展示了累积地面沉降量与绕阳河8月2日洪水淹没的空间叠加图。堤坝溃口位于辽河油田曙光采油厂的厂区里,溃堤洪水导致曙光采油厂大批采油井被淹,油井基础设施被损坏、油井关闭等严重影响了辽河油田的生产产量。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2022-08-01一条输油管道沿穿堤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]。由图6(a)可以看出溃口处的地面沉降速率达到−150 mm/a,2007—2023年累积沉降量达到2.5 m。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

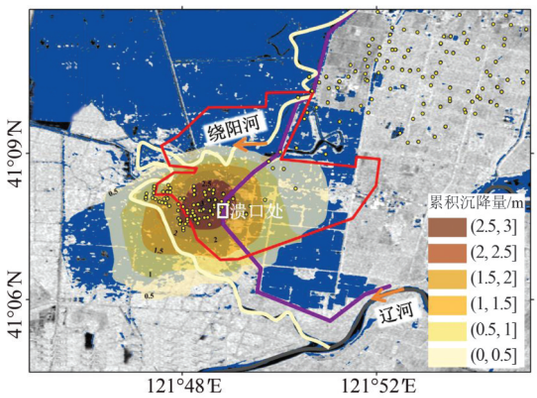


图 7　曙光油田累积地面沉降量(2007—2023 年)与绕阳河“2022•8”溃堤洪水淹没范围叠加图

Fig. 7　Overlay of Cumulative Land Subsidence (2007—2023) in the Shuguang Oilfield and Flood Inundation of the “2022·8” Levee-Breach of the Raoyang River

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。

5　结　语

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 2007-03—2021-11 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数字高程模型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。研究结论如下:

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 km^2。时间上,从 ALOS-1、水准和 Sentinel-1 的结果来看,从 2007—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, −100]mm/a 的长度约 1.9 km,据此计算绕阳河从 2007—2023 年的 17 年间有 1.9 km 的沿线区域沉降了 1.7～2.5 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—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。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 2022-08-01 一条输油管道沿穿堤接合面出现渗水破坏,引发溃口发生;同时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 Y, 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 Y, LIANG C R, 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, 16: 8431-8441.

[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: 587-588.

[5] WANG J, GAO W, XU S Y, 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(3): 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[M]//Intelligent Systems for Crisis Management: Geo-Information for Disaster Management (Gi4DM) 2012. Heidelberg: Springer, 2013.

[8] 鲁朝朝, 陈蓓蓓, 宫辉力, 等. 南水北调前后京津城际铁路北京段地面沉降演化特征[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 1959-1968.
LU Zhaozhao, CHEN Beibei, GONG Huili, et al. Evolution Characteristics of Land Subsidence in Beijing Section of Beijing-Tianjin Intercity Railway Before and After the South-to-North Water Diversion Project[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(12): 1959-1968.

[9] 杨梦诗, 廖明生, 常玲, 等. 城市场景时序InSAR形变解译: 问题分析与研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1643-1660.
YANG Mengshi, LIAO Mingsheng, CHANG Ling, et al. Interpretation of Multi-Epoch InSAR Deformation for Urban Scenes: A Problem Analysis and Literature Review[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1643-1660.

[10] 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): 221-234.

[11] 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.

[12] TANG W, ZHAN W, JIN B W, 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.

[13] YIN J, ZHAO Q, YU D P, 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.

[14] 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(5): 450-452.
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.

[15] 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]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(3): 270-282.
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]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2024, 22(3): 270-282.

[16] 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(1): 43-46.
TIAN Hui, GONG Yan, LIANG Xiujuan, et al. Study on Dynamic Monitoring of Groundwater in Liaohe Delta Area[J]. *Ground Water*, 2019, 41(1): 43-46.

[17] 刘大为. 辽河-大凌河三角洲四百年来的演化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
LIU Dawei. Study on the Evolution of the Liaohe-Daling River Delta in the Past Fou Hundred Years[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019.

[18] 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(4): 201-202.
JU Fei. Necessity of Elevation Survey in Shuguang Oil Production Plant of Liaohe Oilfield[J]. *Ground Water*, 2014, 36(4): 201-202.

[19] 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, 1998, 20(2): 73-82.
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.

[20] 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.
DING Zhixiong, LÜ 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.

[21] 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(2): 35-39.
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(2): 35-39.

[22] 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(5): 23-25.
JIN Shengyue, LIU Longfei, LIU Mingbo. Satellite Remote Sensing Monitoring of Flood Disaster in Raoyang River, Liaoning Province[J]. *Disaster Reduction in China*, 2023(5): 23-25.

[23] SANDWELL D, MELLORS R, TONG X P, et al. Open Radar Interferometry Software for Mapping Surface Deformation[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2011, 92(28): 234.

[24] TONG X P, 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.

[25] 郑建, 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.
JIA Jian, QIU Mengling, JIA Xuesong, et al. Monitoring of Flood Submerged Depth Based on High Score No. 3 Image[J]. *China Flood & Drought Management*, 2022, 32(S1): 4-8.

[26] 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), 2024, 49(8): 1422-1433.
GONG Zhiqiang, TANG Wei, JIANG Jinbao, 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*, 2024, 49(8): 1422-1433.

[27] 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(2): 20-23.
CHEN Xiaocheng, TAO Yu. Influence of Land Subsidence on Flood Discharge Capacity of River Channel[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2023(2): 20-23.

[28] 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]. 水利水运工程学报,2024(3):42-51.
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]. *Hydro-Science and Engineering*, 2024(3): 42-51.