

SBAS 时序分析技术监测现代黄河三角洲地面沉降

张金芝¹ 黄海军^{2,3} 毕海波^{2,3} 王权⁴

1 鲁东大学资源与环境工程学院,山东 烟台,264025

2 中国科学院海洋研究所,山东 青岛,266071

3 中国科学院海洋地质与环境重点实验室,山东 青岛,266071

4 广州城市信息研究所有限公司烟台分公司,山东 烟台 264003

摘要:本文将 SBAS (small baseline subset) 时序分析技术应用于现代黄河三角洲地面沉降监测。选取覆盖研究区的 39 景 ERS1/2 SAR 数据,提取了 1992 至 2000 年现代黄河三角洲地面沉降速率,结果与水准观测数据基本保持一致,研究发现胜利油田中心开采区最大地面沉降速率可达 -33.2 mm/a。研究表明,黄河三角洲地面沉降主要由石油开采(采油和抽取浅层地下水用于回注)、地下水抽取、地表载荷增加、沉积物固结压实引发,沉积物固结压实和石油开采对现代黄河三角洲地面沉降的贡献显著。

关键词:地面沉降;SBAS 时序分析技术;ERS1/2;现代黄河三角洲

中图法分类号:P236

文献标志码:A

地面沉降是目前普遍的环境地质灾害之一,在地势较低的三角洲地区更为严重。目前,世界主要三角洲地区都面临和经历地面沉降灾害威胁^[1]。例如波河三角洲^[2]、密西西比河三角洲^[3]、尼罗河三角洲^[4]。三角洲地面沉降不仅可导致基础设施破坏、湿地损失、海岸线后退,还可加剧海水入侵和风暴潮等自然灾害^[5-8]。现代黄河三角洲地面沉降平均速率已超过世界海平面上升速率两个数量级,引起了广泛关注^[9]。因此,有效监测地面沉降,分析沉降特征和影响因子对现代黄河三角洲地面沉降的预防和治理尤为重要。

常规地面沉降监测主要依赖于精密水准测量、静态 GPS 测量或动态 GPS 测量,存在工作量大、成本高、效率低等缺点,并且空间分辨率低,覆盖范围较小,很难满足时间尺度、空间尺度需要。合成孔径雷达干涉测量技术 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 是利用对同一地区观测的两景或多景 SAR 影像复数据进行相干处理,获取高精度的三维地形信息及微小形变信息的技术^[10-12],能够实现高时空分辨率、高精度和高空间覆盖的地表形变监测。但是传统的 InSAR 干涉测量技术应用过程中精度和可靠性受

时空互相关、大气效应和 DEM 误差的影响^[13]。为减小上述影响,Casu 等应用 SBAS(small baseline subset) 技术^[14]对意大利 Naples 湾和美国洛杉矶城区的地面沉降提取信息,获得较好的效果(形变速率的标准方差大约是 1 mm/a)^[15]。目前,SBAS 技术在城区地面沉降信息提取方面已经得到广泛应用,但是在非城区等复杂环境中的应用中还需要进一步研究。因此,在现代黄河三角洲面积广、地势低洼、冲淤严重、海岸地貌持续变化、植被茂密、湿地水体广泛分布的复杂背景环境下,本文尝试将 SBAS 时序分析技术应用于现代黄河三角洲地面沉降监测,并与水准观测结果进行对比验证,为复杂背景下的地面沉降监测提供借鉴。

1 研究区概况

现代黄河三角洲(图 1)是 1855 年黄河从黄海改道渤海入海后,随着河口尾闾的摆动淤积形成的冲积扇,以宁海为顶点,北起套尔河口,南至淄脉沟口,面积为 5 400 km²^[16],地形平坦,海拔高度多小于 6 m,坡降平缓,为 1/10 000 左右。黄河曾发生过 8 次大型改道,平均约十年左右发生一次^[17-19]。现

代黄河三角洲包括两部分:一是黄河 1855 年改道以前已经是陆地,后因分流河道流经此处,在其上堆积了三角洲沉积物;二是由黄河携带泥沙不断向海淤积、填海造陆新形成的陆地^[20]。

现代黄河三角洲植被茂密,湿地资源丰富,沿海地区广泛分布盐池和水产养殖池(图 1 中呈深蓝色)。建筑物主要分布在东营市和各小城镇中,其它地区多为农田、荒地或裸地。石油、天然气、卤水和地热等资源丰富,中国第二大油田胜利油田位于此地。

现代黄河三角洲在地质构造上位于华北地台次级构造单元埕宁隆起区和济阳坳陷区之间^[21],自晚更新世以来处于构造拗陷区^[22]。黄河带来的巨量沉积物的自重固结和压实作用,以及人类日益频繁的经济活动等因素的影响,黄河三角洲出现明显的地面沉降现象。

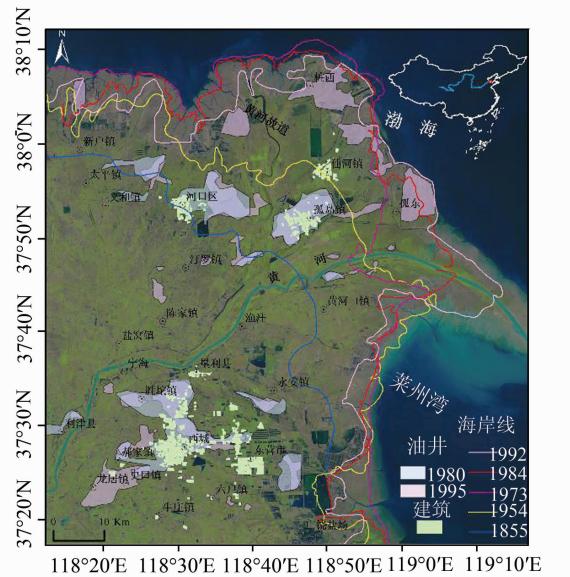


图 1 研究区地理位置和地质背景

(影像获取时间为 1995 年 9 月 18 日)

Fig. 1 Location and Geological Setting of Study Area

2 数据和方法

本研究收集了 39 景(1992 年 5 月到 2000 年 4 月)ERS1/2 升轨 SAR 数据(C 波段,波长 5.6 cm)。现代黄河三角洲上、下两半部分展现在不同景影像中(上半部分:track:132, frame:2835;下半部分:track:132, frame:2853),SAR 数据为估算各种误差项以及提高测量结果的精度提供保障。本文基于 Doris、ROI_PAC 和 StaMPS 等免费软件进行 SBAS 分析。一方面,由于现代黄河三角洲地区地形平坦、海岸侵蚀严重、湿地发育、

大气效应较明显,使得利用 DEM 模拟振幅相位、影像配准和相位稳定象元的提取等 SBAS 分析较为困难。另一方面,由于黄河三角洲平原上存在数量多、覆盖范围广、反射特征稳定的石油钻井平台,可作为候选 SDFP 点,尤其在植被、水体广泛分布稳定散射点较少的低洼湿地区域,有助于提高 SBAS 点密度,从而使 SBAS 技术应用于广阔淤积平原的地面沉降监测成为可能。

数据处理包括以下步骤。

1) 去除地形相位。尽管卫星雷达地形测量(shuttle radar topography mission, SRTM)数据能提供高精度的地形信息,但是该数据在地势低平的三角洲地区模拟地形相位时容易出现错误。因此,本研究将 SRTM 与水深数据进行叠加,以增加高程对比度,达到抑制模拟地形误差的目的;再利用海岸线信息对分析结果进行掩膜,提高低平海岸线附近的校正精度。

2) 精确配准。现代三角洲河口区域向海快速淤积,而废弃河口海岸侵蚀严重,植被茂密,湿地广泛,给不同季节获取的影像相互配准带来极大困难。因此,利用轨道信息对影像中心象元进行计算配准,误差在 30 个像元以内。随后,对影像强度图进行定标,利用自适应中值滤波去除斑点噪声,估计配准多项式。在进行配准处理时,先把待配准的影像进行粗配准,然后分小区块用估计配准多项式进行精配准。最后,对配准困难的小区块,我们将估算出的相邻小区块的象元偏移量应用于该区块。

3) 估算空间相关误差。黄河三角洲地区由于湿地和水体广泛分布,空气湿度较大,大气效应较为显著。因此,本研究通过对相位图解缠数据进行时间域高通滤波和空间域低通滤波处理,实现对大气效应、DEM 残差和轨道误差的估算。

利用 Hooper^[23]提出的 SBAS 时序分析算法模型^[22]进行数据处理,流程如图 2 所示。首先,生成差分干涉相位图。综合考虑时间基线、空间垂直基线和多普勒质心频率基线三种基线的临界值,以及绝对值之和最小两种因素,选取 1995 年 8 月 2 日的影像为主影像,对研究区进行裁剪,并对主影像进行方位向 20 视、距离向 4 视的多视处理。将主影像与辅影像依次配准并进行干涉处理,去除地形相位影响,共得到 118 景差分干涉相位图。其次,根据小基线集原则生成小基线集干涉图。本研究中的小基线集中干涉图的最大垂直基线是 683 m,最大时间基线 946 d。为了提取散射特性稳定的相干点,将幅度分布指数大于 0.6

且相干性大于 0.3 的像素点筛选为 SDFP (slowly-decorrelating filtered phase pixel) 的候选点。在对空间相关误差和空间非相关视角误差进行估算的基础上,通过估计 SDFP 候选点的相位稳定性,确定稳定性高的 SDFP 点。去除估算的误差并利用三维相位解缠方法进行相位解缠。随后,估算空间相关误差,获得研究区的形变相位。由于覆盖现代黄河三角洲的 SAR 数据量较大,同时为了减小由基线估计不准引入的平地误差,本文将研究区划分为 6 个小区域分别处理。这些小区域之间保留一定象元的重叠区,便于对结果进行拼接^[24]。为了减小提取结果的误差,对重叠区采取均值处理的方法。最后,共获得约 14 万个有效 SDFP 点,这些点主要分布于建筑物、道路、裸地、石油钻井平台等区域。

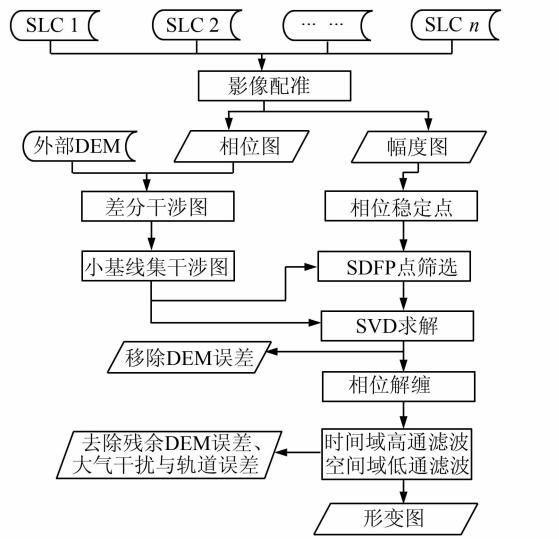


图 2 SBAS 时序分析技术数据处理流程

Fig. 2 Data Processing Flowchart of the SBAS Technique

东营机场(图 3 中标识为“a”的红色矩形区域)于 1985 年建成,在建设过程中对地面进行了夯实处理。建成后至 2001 年前没有投入使用,在黄河三角洲这样的区块面积内,大地构造运动造成的地面沉降速率是相同的,因此假设东营机场在 1992~2000 年期间没有地表形变,东营机场可以被选作三角洲地区地面沉降研究的参考点,从而可对整个研究区的监测结果进行校正。现代黄河三角洲位于稳定的渤海盆地中,形变水平分量可以忽略,因此主要考虑该地区的地表垂直形变。雷达视线方向的形变量可通过 $D_v = D_{LOS} / \cos\theta$, 转换为垂直方向的地面沉降量,其中, θ 为雷达入射角,6 个小区域的雷达入射角分别是 22.16° 、 20.25° 、 22.17° 、 20.63° 、 22.06° 和 20.51° , D_v 和

D_{LOS} 分别代表地面沉降量和雷达视线方向的形变量。

3 沉降速率分析

通过上述处理,获得 1992 年 5 月~2000 年 4 月间现代黄河三角洲(面积约 6000 km^2)地面沉降平均速率(如图 3 所示,负值表示发生了地面沉降)。结果显示现代黄河三角洲地面沉降现象广泛分布,平均沉降速率为 -5.1 mm/a 。地面沉降量在几 mm 至几十 mm 不等,分布极不均匀。其中,在新近形成的陆地、水产养殖池以及盐场附近沉降量较大。在油田形成的沉降漏斗区沉降速率最大达 -33.2 mm/a 。

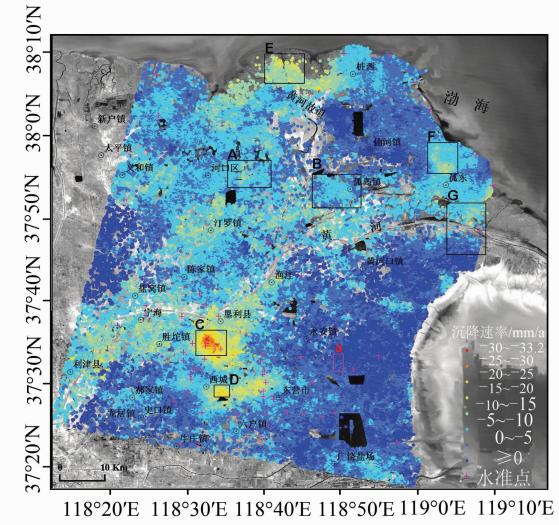


图 3 黄河三角洲地区 1992~2000 年地面垂直沉降速率(mm/a)(底图为 1995 年 3 月 10 日 Landsat TM 影像)

Fig. 3 The Map of Subsided Velocities at Yellow River Delta During 1992-2000 (mm/a)

选取沉降量相对较大的矩形区域分别标记为 A、B、C、D、E、F、G(如图 3 所示),并计算各个区域内地面沉降的平均速率。由监测结果可知,黄河三角洲地面沉降沿黄河两岸分布,沉降较严重的地区主要集中在东营市区及其周边,黄河故道河口、现行河口、小城镇和油田区都有明显沉降。

从空间分布来看,现代黄河三角洲地面沉降与泥沙淤泥形成的陆地分布一致(如图 3 中的 E、F 和 G 区域)。黄河故道河口(区域 E)是 1964~1976 年间黄河携带的泥沙淤积形成的陆地,其平均沉降量为 -14.1 mm/a ,最大沉降速率为 -20.8 mm/a 。现行黄河口(区域 G)成陆不到 40 年,平均沉降速率为 -5.7 mm/a ,最大沉降速率为 -15.9 mm/a 。此外,1988 年 7 月围绕孤东油田建成孤东大堤,从海中围垦出新的陆地(包括区

域 F)。矩形区域 F 平均沉降速率为 -8.7 mm/a , 最大沉降速率为 -17.5 mm/a 。新近形成的陆地成陆时间较短, 沉积物含水量高, 密度低, 孔隙比大, 压缩系数大, 承载力低, 易于压缩, 这些因素导致新生陆地易于发生地面沉降。新近沉积物固结压实是影响现代黄河三角洲地面沉降的重要的自然因素, 总体而言, 三角洲成陆时间越晚的区域, 其平均地面沉降速率越大。

现代黄河三角洲地面沉降分布也与石油开采区保持一致。东营市位于黄河三角洲腹地, 各沉积层形成年代较早, 沉积物自然固结压实过程已基本完成, 区内地质构造相对稳定, 地壳升降活动甚微, 研究时间段内并无重大构造活动发生。黄河三角洲地区 1980 年和 1995 年油田分布情况见图 1, 该区域地面沉降漏斗的发生主要受石油开采活动(采油和抽取浅层地下水用于回注)控制。胜利采油厂(区域 C)是胜利油田的中心, 拥有巨厚油层, 自 1964 年以来, 长期进行高强度开采活动, 已成为地面沉降最严重的地区, 该区域平均沉降速率为 -21.0 mm/a , 最大沉降速率为 -33.2 mm/a 。另外, 耿家井附近现河采油厂(区域 D)也出现较大地面沉降, 该区域平均沉降速率为 -19.5 mm/a , 最大沉降速率达到 -26.2 mm/a 。河口油田(区域 A)和孤岛油田(区域 B)于 70 年代初开始采油, 虽然进行了较长时间的石油开采, 但是开采量相对前两个油田要少的多, 地面沉降相较而言不太明显, 平均沉降速率分别为 -8.8 mm/a 和 -5.8 mm/a , 最大沉降速率分别为 -15.6 mm/a 和 -12.2 mm/a 。此外, 孤东和桩西油田于 80 年代末开始石油开采活动, 石油开采活动持续的时间较短, 且后期合理规划开采, 这两个区域地面沉降还没有完全显现, 平均沉降速率分别为 -5.9 mm/a 和 -4.6 mm/a , 最大沉降速率分别为 -14.2 mm/a 和 -16.2 mm/a 。油田区发生地面沉降的主要原因在于长期高强度超量油气开采导致的储油层压力下降, 油气区和黏土层压缩, 从而导致地面沉降的发生。另外, 石油开采过程中就近抽取浅层地下水回注, 进一步加剧了油田及其附近区域的地面沉降, 甚至远远超过油气抽取的作用强度。

现代黄河三角洲地面沉降分布与地下水开采区和城镇建设区也具有较好的一致性。现代黄河三角洲地下水主要为咸水, 只有南部小部分区域是上部咸水下部淡水区, 不能用作生活和农业用水, 主要用作晒盐和石油开采过程中的油井注水。例如, 六户镇为上咸下淡水区, 各沉积层自然固结

压实过程已大致完成, 2000 年前石油开采活动较少, 六户镇地面沉降的主要原因便是深层地下水开采。因此, 该镇在 1991-01-1~1997-07-01 年间深层地下水位下降了 30 m, 深层地下水位下降速率超过 4 m/a , 对应的地面沉降的平均速率是 -5.2 mm/a , 最大沉降速率是 -11.3 mm/a 。在欠固结或半固结土层分布区, 地下水开采导致孔隙水压力降低, 土层随着静水压的减小而固结压实, 必然导致地面沉降。

现代黄河三角洲沿海岸线分布有大量盐田和养殖池。很多沿海盐场也偏向于抽取浅层地下水晒盐, 导致地面沉降。例如, 广饶盐场建立于 1959 年, 开采量由 80 年代的一千万立方米上升到 90 年代的二千万立方米, 地面沉降平均速率为 -5.1 mm/a , 最大沉降速率为 -13.6 mm/a 。

地表荷载增加也是导致黄河三角洲地区地面沉降的原因之一。这主要是城镇建设导致地表负荷增加所致。现代黄河三角洲的人口和建筑物主要分布在东营市区、河口区、垦利、孤岛、仙河等城镇, 这些地区的沉降速率在 $-4 \sim -7 \text{ mm/a}$ 左右。

4 可靠性验证

本文利用水准点数据对上述 SBAS 时序分析技术获得的地面沉降结果进行验证(见图 4)。水准点的监测时间段和观测期数分别为: 73R1: 1992~1994(2 期); 76BM1: 1992~1997(8 期); 65L3: 1990~2000(3 期); ZJ76L1: 1990~1998(3 期); ZQ76L1: 1990~1993(4 期); 76BM2: 1990~1997(9 期); 76R1: 1982~1997(8 期); II-1~II-4: 1964~2002(4 期); S4~S59: 1990-10~1999-11(2 期); III-1~III-3: 2000~2007(2 期); IV-1~IV-9: 2001~2004(4 期); D7~D36 和 YD14: 2002-12~2008-06(6 期)。由于该区域具有形变缓慢、范围大和相邻时间段沉降速率变化不大的特点, 因此相邻时间段的 SBAS 点结果与相邻水准点之间沉降速率可以进行比较。本文利用与距离 SBAS 点最近的水准数据(共 51 个水准点数据)来进行结果验证。结果显示水准点与 SBAS 监测结果间的中误差达 6.1 mm , 这包括了 SBAS 监测误差、水准点监测误差以及地面沉降的时间和空间差异。其中, 相距最近的一个水准点(相距约 120 m, 共进行 6 期水准观测)与 SBAS 点的形变曲线与水准点的相同时间段的形变曲线相似(见图 5), 中误差为 2.6 mm 。此外, SBAS 技术获取的结果与其他科研工作者的利用其他方法观测到的结果在

沉降分布和沉降量大小上都基本吻合^[7,20,25-28]。考虑到受该区水准点变形的影响,以及点和面之间的比较,位置和观测时间的差异,可以认为本文

利用SBAS时序分析技术提取的黄河三角洲地面沉降信息与第三方验证数据较为一致。

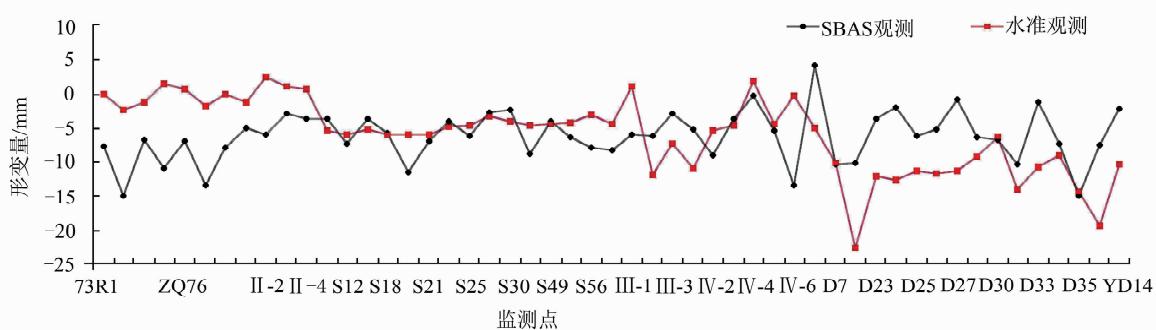


图4 SBAS时序分析技术与水准监测结果比较

Fig. 4 Comparison Between Results from SBAS Time-series Analysis and Leveling Measurements

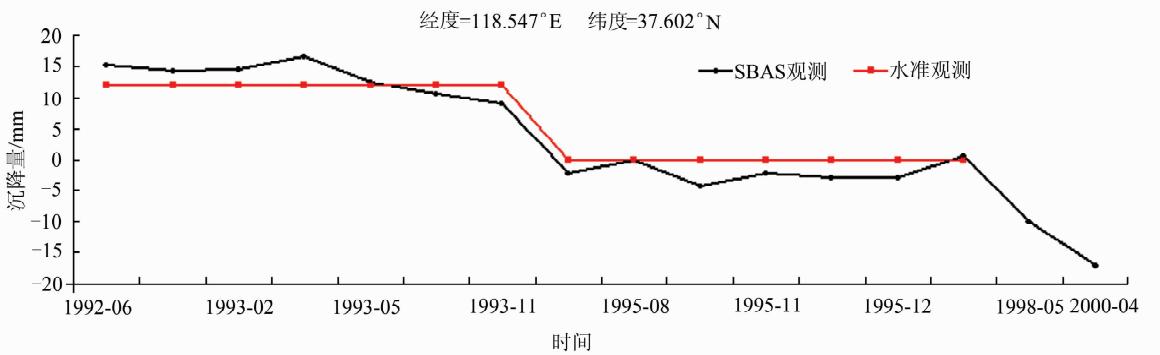


图5 相邻位置SBAS点与水准点时间序列形变比较

Fig. 5 Comparison Between SBAS Data and Adjacent Measurements from Leveling Point About Deformation Rate

5 结语

本文利用SBAS时序分析技术研究现代黄河三角洲地区地面沉降,为现代黄河三角洲地面沉降监测提供高空间分辨率和时间序列形变信息。通过与水准观测数据比较表明SBAS技术提取的黄河三角洲地面沉降结果可靠。结果表明,现代黄河三角洲地面沉降灾害时空分布特征与石油开采(采油和抽取浅层地下水用于回注)、沉积物固结压实、地下水抽取、地表载荷增加等多种因素密切相关。研究发现,沉积物固结压实和石油开采对地面沉降的影响较为显著,其中新废弃的三角洲叶瓣沉积物的自然固结压实对地面沉降的贡献量为-14.1 mm/a;石油开采活动使得局部区域沉降加剧,东营城区早期长时间高强度石油开采对地面沉降的贡献量达到-21.0 mm/a。此外,由于地表荷载增加,一般城区建设对地面沉降的贡献量在-4.7 mm/a左右,广饶盐场抽取地下卤水晒盐引发的地面沉降速率为-5.1 mm/a。

致谢:感谢Hooper提供StaMPS软件,荷兰Delft理工大学提供Doris软件及精密轨道数据;感谢ESA提供SAR数据,USGS提供SRTM数据。

参考文献

- [1] Syvitski J P. Deltas at Risk [J]. *Sustainability Science*, 2008, 3(1): 23-32
- [2] Teatini P, Tosi L, Strozzi T. Quantitative Evidence That Compaction of Holocene Sediments Drives the Present Land Subsidence of the Po Delta, Italy [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 2011, 116(B8): 407-417
- [3] Tornqvist T E, Wallace D J, Storms J E A, et al. Mississippi Delta Subsidence Primarily Caused by Compaction of Holocene Strata [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(3): 173-176
- [4] Aly M H, Klein A G, Zebker H A, et al. Land Subsidence in the Nile Delta of Egypt Observed by Persistent Scatterer Interferometry [J]. *Remote Sensing Letters*, 2012, 3(7): 621-630

- [5] Liu Guiwei, Huang Haijun, Du Tingqin, et al. Effective Factors of Land Subsidence in the Yellow River Delta [J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(8): 43-50 (刘桂卫, 黄海军, 杜廷芹, 等. 黄河三角洲地区地面沉降驱动因素研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(8):43-50)
- [6] Du Tingqin, Huang Haijun, Bie Jun. Land Subsidence in the Modern Yellow River Delta and Its Impacts Upon Its Evolvement [J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(9):78-84 (杜廷芹, 黄海军, 别君. 现代黄河三角洲地面沉降对洲体演变的影响[J]. 海洋科学, 2011, 35(9):78-84)
- [7] Bie Jun, Huang Haijun, Fan Hui, et al. Ground Subsidence of the Modern Yellow River Delta and Its Causes [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(4):29-35 (别君, 黄海军, 樊辉等. 现代黄河三角洲地面沉降及其原因分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(4):29-35)
- [8] Syvitski J P, Kettner A J, Overeem I, et al. Sinking Deltas Due to Human Activities [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(10):681-686
- [9] Higgins S, Overeem I, Tanaka A, et al. Land Subsidence at Aquaculture Facilities in the Yellow River Delta, China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(15):3 898-3 902
- [10] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry [J]. *Nature*, 1993, 364(6 433):138-142
- [11] Massonnet D, Thatcher W, Vadon H. Detection of Postseismic Fault-Zone Collapse Following the Landers Earthquake [J]. *Nature*, 1996, 382(6 592): 612-616
- [12] Zebker H A, Rosen P A, Goldstein R M, et al. On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: The Landers Earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 1994, 99(B10):19 617-19 634
- [13] Dong Yusen, Linlin G, Hsingchun C, et al. Mine Subsidence Monitoring by Differential InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* 2007, 32 (10):888-891(董玉森, 林琳 G, 赫生春 C, 等. 基于差分雷达干涉测量的矿区地面沉降监测研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32 (10):888-891)
- [14] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A New algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2 375-2 383
- [15] Casu F, Manzo M, Lanari R. A Quantitative Assessment of the SBAS Algorithm Performance for Surface Deformation Retrieval from DInSAR Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102 (3):195-210
- [16] Liu Y, Huang H J. Characterization and Mechanism of Regional Land Subsidence in the Yellow River Delta, China [J]. *Natural Hazards*, 2013, 68(2):687-709
- [17] Xue C T. Historical Changes in the Yellow-river Delta, China [J]. *Marine Geology*, 1993, 113 (3/4):321-330
- [18] Liu Y X, Huang H J, Qiu Z F, et al. Detecting Coastline Change from Satellite Images Based on Beach Slope Estimation in a Tidal Flat [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23:165-176
- [19] Shi C X, Zhang D, You L Y, et al. Land Subsidence as a Result of Sediment Consolidation in the Yellow River Delta [J]. *Journal of Coastal Research*, 2007, 23(1):173-181
- [20] Du Tingqin. Study on the Characteristics of Land Subsidence in the Mordern Yellow (Huanghe) River Delta [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences , 2009 (杜廷芹. 现代黄河三角洲地区地面沉降特征研究[J]. 北京:中国科学院研究生院, 2009)
- [21] Zheng T Y, Zhao L, Chen L. A Detailed Receiver Function Image of the Sedimentary Structure in the Bohai Bay Basin [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2005, 152(3):129-143
- [22] Li Guangxue, Zhuang Zhenyu, Han Deliang. Stratigraphic Sequences and Characterist Ics of Geological Environment Since the Late Period of Last Glacial Age Along Southern Shore of Bohai Sea [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao* , 1998, 28(1):165-170 (李广雪, 庄振业, 韩德亮. 末次冰期晚期以来地层序列与地质环境特征——渤海南部地区沉积序列研究[J]. 青岛海洋大学学报, 1998, 28(1):165-170)
- [23] Hooper A. A Multi-temporal InSAR Method Incorporating Both Persistent Scatterer and Small Baseline Approaches [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(16): 302-307
- [24] Luo Sanming, Du Kaifu, Wan Wenni, et al. Ground Subsidence Rate Inversion of Large Temporal and Spatial Scales Based on Extended PSInSAR Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* , 2014, 39(9):1 128-1 134 (罗三明, 杜凯夫, 万文妮, 等. 利用 PSInSAR 方法反演大时空尺度地表沉降速率[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(9):1 128-1 134)
- [25] Wang Xiaogang, Zou Zuguang, Wang Xiuqin, et al.

- al. Analysis on Effect Factors of Land Subsidence in Dongying District [J]. *Shandong Land and Resources*, 2006, 22(5):50-53 (王小刚, 邹祖光, 王秀芹, 等. 东营市城区地面沉降影响因素[J]. 山东国土资源, 2006, 22(5):50-53)
- [26] Huang Liren, Hu Huimin, Yang Guohun. Sea Level Change Along the Western and Southern Coast of Bohai Sea and Recent Crustal Vertical Movement in Adjacent Area [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1991, 11(1):1-9 (黄立人, 胡惠民, 杨国华. 渤海西、南岸的海面变化及邻近地区的现代地壳垂直运动[J]. 地壳形变与地震, 1991, 11(1):1-9)
- [27] Zhang Bo, Liu Guiyi, Fan Liqin, et al. Environmental Problems and Its Prevention Countermeasures of Underground Water in South of Huanghe Delta [J]. *Shandong Land and Resources*, 2004, 20(5):51-54 (张波, 刘桂仪, 范立芹, 等. 黄河三角洲南部地下水环境问题与对策[J]. 山东国土资源, 2004, 20(5):51-54)
- [28] Liu Guiwei, Huang Haijun, Du Tingqin, et al. Effective Factors of Land Subsidence in the Yellow River Delta [J]. *Marine Sciences* 2011, 35(8):43-50 (刘桂卫, 黄海军, 杜廷芹, 等. 黄河三角洲地区地面沉降驱动因素研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(8):43-50)

Monitoring Ground Subsidence in the Modern Yellow River Delta Based on SBAS Time-series Analysis

ZHANG Jinzhi¹ HUANG Haijun^{2,3} BI Haibo^{2,3} WANG Quan⁴

1 School of Resources of Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China

2 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

3 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

4 Digital Cities Institute Co., Ltd. Yantai Branch, Yantai 264003, China

Abstract: Land subsidence in the modern Yellow River Delta at high spatial and temporal resolution was deduced from SBAS time-series analysis of ERS1/2 data. The experimental results show that land subsidence in the modern Yellow River Delta is widespread and unevenly distributed with large differences. The average subsidence rate is -5.1 mm/yr , while the highest subsidence rate of -33.2 mm/yr occurring in the subsidence funnel formed by an oil field. The InSAR results are shown to be reliable, when compared with leveling survey measurements. Ground based leveling measurements included 53 leveling points were used to evaluate the accuracy of our SBAS time-series analysis results with a consistent deformation trend between the two sets of results. A comparison between leveling points and their nearest SBAS points at the same time interval showed they were in complete agreement, while the mean square error between them was at the mm level. The main influencing factors differ by region. Severe land subsidence however, is caused by oil extraction including extracting nearby shallow groundwater used for artificial water injection after oil exploitation and sediment consolidation. Oil exploitation was the main influencing factor and responsible for the rapid, patchy subsidence evident at Dongying city, Hekou district, Gudao town, Zhuangxi, and the Gudong oilfield. Groundwater extraction for making salt and oilfield water injection is likely responsible for land subsidence in the Lihu township and at the Guangrao salt pan. Increased surface load aggravated land subsidence in the old urban district of Dongying city, and sediment consolidation might be considerable after the lobe is abandoned.

Key words: land subsidence; SBAS; ERS1/2; Yellow River Delta

First author: ZHANG Jinzhi, PhD, specializes in remote sensing and geography information system. E-mail: jinzhizhang@ldu.edu.cn

Corresponding author: HUANG Haijun, PhD, professor. E-mail: hjhuang@qdio.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41276082, 41406215.