

大型河口三角洲地面沉降机制研究 ——以黄河三角洲为例

付云霞^{1,2},管勇^{1,2},王晓丹^{1,2},王建收^{1,2},尹政^{1,2},
周晓雪^{1,2},王青^{1,2},徐美君^{1,2}

(1. 山东省地矿局城市地质与地下空间资源重点实验室,山东青岛 266100;

2. 青岛地质工程勘察院(青岛地质勘查开发局),山东青岛 266100)

摘要:世界上诸多大型河口三角洲(简称大河三角洲)均发生不同程度的地面沉降,但因自然和人为因素差异,三角洲地区的沉降机制亦有不同。目前的研究认为,影响大型河口三角洲地面沉降的因素包括沉积物固结压实、构造活动、冻土融化、泥炭氧化、砂土液化、热地幔对流、板块俯冲、均衡作用等自然过程以及地下流体开采、建筑荷载等人类活动,不同时间尺度的地质作用对地面沉降造成的影响程度差异很大。自然沉降往往是一个缓慢累积的过程,而人类活动造成的地面沉降往往速率更快,并表现出一定程度的滞后以及随时间衰减的特征。归纳分析了全球主要大河三角洲地面沉降规律和机理的研究成果,提出了地面沉降的概念模型,并以黄河三角洲为例,通过卫星遥感方法大面积、快速获取现代黄河三角洲的地面沉降信息,定性分析其沉降原因。掌握黄河三角洲地面沉降的时空分布及其诱发因素,对应对全球相对海平面上升以及防灾减灾具有重要意义。

关键词:大河三角洲;沉降机制;自然和人类活动;黄河三角洲

中图分类号:P736

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2021)02-0083-13

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2021.02.001

引用格式:FU Y X, GUAN Y, WANG X D, et al. Research on land susidence mechanisms of mega-river deltas: taking the Yellow River Delta as the case[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(2): 83-95. 付云霞,管勇,王晓丹,等. 大型河口三角洲地面沉降机制研究——以黄河三角洲为例[J]. 海岸工程, 2021, 40(2): 83-95.

全球有约 5 亿人口居住的河口三角洲区域是重要的粮食生产基地和工业发展中心^[1],作为陆海相互强烈作用的地带,三角洲对海平面变化响应敏感^[2-3]。研究表明,世界上大型河口三角洲(以下简称大河三角洲)大都在发生不同程度的地面沉降,沉降速率甚至超过 20 世纪以来的平均海平面上升速率^[4-14]。中国沿海地区发生地面沉降的城市多达 32 个,京津冀和长三角海岸带地区累计地面沉降量大于 2 000 mm 的地区主要有天津、盘锦和上海等^[15-16]。地面沉降和全球海平面上升叠加作用加剧了三角洲地区的海岸侵蚀、海水入侵、湿地退化以及洪涝灾害^[17-18]。1998—2008 年世界上主要大河三角洲被淹没面积达 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$,21 世纪易受洪水淹没的面积将会增加约 50%^[14]。

关于三角洲地面沉降的研究文献很多,但由于沉降原因复杂,对其成因的定量分析及不同成因贡献比尚不甚清楚^[19-20]。如美国密西西比河三角洲的沉降已有较多研究^[10,21-25],但由于监测数据的不足以及监测方法的不确定性,很难对每个沉降因素进行定量评估,而且目前对地面沉降的评估仍然受限于监测和计算方法,导致对地面沉降幅度的估计甚至相差多个数量级。

目前,地面沉降的监测方法主要包括验潮站、GPS 监测站、水准仪、合成孔径干涉雷达等,这些监测方法具有一定程度的局限性和误差,导致对沉降速率的分析在偏差。此外,用潮位计数据来反推构造抬升或者沉

收稿日期:2021-01-19

资助项目:山东省地质矿产勘查开发局地质勘查和科技创新项目——山东省海岸带地质环境演变规律与机制(202003)

作者简介:付云霞(1972—),女,高级工程师,主要从事水工环地质调查方面研究. E-mail: 1037538251@qq.com

(陈靖 编辑)

降速率,但是构造活动往往是千年甚至更长时间尺度的地质过程,因此有限时间的潮位计记录数据有可能是噪音,而并非是稳定的地质过程信号^[26-27]。21世纪以来,卫星遥感方法——合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术逐渐被广泛应用于大面积地表变形的监测^[28],传统的合成孔径干涉雷达(D-InSAR)技术受到植被覆盖以及大气延迟作用的干扰,很难达到毫米级的精度。为了解决传统InSAR技术自身存在的缺陷,时序InSAR技术诞生并逐步取代了传统的D-InSAR技术,成为了目前可靠的地表形变反演方法。其中,较为常用的时序InSAR方法有永久散射体合成孔径雷达干涉测量(PS-InSAR)^[29-30]和短基线子集干涉测量(Small Baseline Subset, SBAS)等技术方法^[31-32]。但由于技术方面的简便和优越性,虽然D-InSAR技术在毫米级地表变形测量上存在缺陷,但其目前的应用范围仍较广^[33-34]。

岩心沉积物放射性¹⁴C测年方法经常被用来计算三角洲的地面沉降速率,如密西西比河三角洲、尼罗河三角洲以及长江三角洲^[35-37],但是这些沉积物可能并不是原位的,导致对沉积速率的估计偏低^[37]。这种现象已经在路易斯安那州南部的地面沉降研究中普遍存在,基于水准测量观测到的沉降速率比数值模拟和¹⁴C测年估算的沉降速率高出一个数量级^[24]。同时,数值模拟方法被广泛应用于评估均衡作用和热地幔对流对沉积沉降的贡献,但是数值模拟方法严重依赖于模型的假设^[38]。因此,在三角洲地区重建冰期/间冰期的演化历史具有相当大的难度,而且地幔对冰盖、水和沉积物的加载和卸载的响应过程尚不清楚。此外,尽管固结压实理论被用来预测沉积物的压实趋势,然而在取样过程中沉积物基本都受到不同程度的扰动,造成沉积物特性测量精度不高^[39-40],给沉积物固结压实的预测带来了一定的难度。

前人研究认为,大河三角洲的地面沉降不应被简单视为浅层的全新世沉积物固结压实。相反,深部的构造活动、均衡作用、板块俯冲、热地幔对流等均可以引起地面沉降。由于这些过程往往是缓慢的、长时间尺度的地质过程,因此很少被视为地面沉降的因素。本文基于前人研究结果,评估了诱发三角洲地面沉降的自然因素和人为因素,提出了地面沉降的概念模型。并以黄河三角洲为例,采用卫星遥感技术,快速获取了大面积地面沉降信息,全面分析了可能的沉降因素,这些结果有助于三角洲地区制定应对海平面上升和防灾减灾对策。

1 地面沉降自然因素

三角洲地面沉降自然因素包括浅层的沉积物固结压实、深部的构造活动以及均衡调整等地质过程。相对稳定的海平面、低缓的受水盆地、大量的泥沙供应是建造三角洲的三大有利条件。三角洲的形成是一个缓慢、复杂的过程,伴随着沉积物的堆积、压实、固结等过程。其中,沉积物压实沉降伴随着整个三角洲的发育演变过程,是三角洲的固有属性之一。现代河口三角洲多自中全新世(距今8 500~6 500 a)高海平面时开始发育,那时人类尚未规模化居住在三角洲区域,自然因素控制了三角洲的发育演化和地面沉降过程。例如,基于沉积物放射性¹⁴C定年计算的7 500 a以来尼罗河三角洲的沉降速率约为5 mm/a,沉降主要因为沉积物荷载造成的均衡作用以及构造活动等自然因素^[4,17]。

1.1 沉积物固结压实

很多三角洲地区新近沉积的沉积物的固结压实被认为是发生地面沉降的主因^[9-10,24,40-41]。这是因为当新的沉积物覆盖在老沉积物之上,下伏的沉积物由于颗粒间的空隙被压缩导致含水率降低并进而引起地面沉降^[20]。基于1968—1977年基准测量资料计算的美国新奥尔良地区中新世(距今2 300万年)至更新世(距今160万年)地层沉积物固结压实造成的沉降速率达4.6 mm/a^[42]。

确定沉积物的固结压实速率需要知道详尽的沉积物特性和沉积时间,而这2个参数却难以精确获取。纪洪磊等发现处于黄河泛滥冲积平原区的鲁北平原地面沉降的主要贡献层为中更新统多层承压含水层和中高压缩性的黏性土层,其中滨州地区140~320 m地层沉降量约占总沉降量的62%,沉降速率为20~27 mm/a,而140 m以上地层的沉降速率基本一致,约为58 mm/a,被视为整体下沉^[43]。利用蒙特卡洛

(Monte Carlo)方法模拟的密西西比河三角洲沉积物固结压实作用结果显示,压实速率的变化差别达3个数量级,压实速率最高的沉积物主要是泥炭和沙坝的沙,而前三角洲相的泥压实速率最低^[40,42]。

沉积物的固结压实速率应该与沉积物的厚度和年龄相关,有随时间呈非线性衰减趋势。Shi等研究发现黏土层的固结压实是废弃的黄河三角洲叶瓣地面沉降主要原因,其14和20 m厚的黏土层的总固结压实幅度分别为1.44和1.52 m,沉降速率分别需要40和57 a的时间下降到5 mm/a^[7]。同样,密西西比河三角洲全新世沉积物的固结压实速率从过去1 500 a的约5 mm/a下降到目前1.5~2.5 mm/a^[10,22]。

1.2 构造活动

构造活动是一个长时间尺度的地质过程,其控制了沉积盆地的演化^[44-48]。由于地质构造差异,构造活动对三角洲地层垂向运动的影响亦不相同。通常构造活动导致的沉降较小,但长期的累计沉降量仍不容忽视。

长江三角洲平原和孟加拉盆地第三纪沉积物的厚度表现出显著的空间差异性,反映了复杂的沉积和构造沉降过程。中新世以来,长江三角洲和孟加拉三角洲的沉积中心均持续向南移动,沉积物厚度向南逐渐增大^[49-50]。与此相反,欧洲的多瑙河三角洲正在经历构造抬升作用,因此海平面上升对该区域影响不大^[51]。而亚得里亚板块向亚平宁板块俯冲造成意大利波河三角洲发生0.7~1.0 mm/a的沉降^[52]。密西西比河三角洲地面沉降原因复杂,其中构造活动影响较大,特别是局部的断层活动对沉降影响更显著^[22]。

1.3 均衡作用

均衡作用是指地球的地壳荷载变化而发生垂直方向的缓慢形变^[53]。密西西比河三角洲地区冰后期沉积物荷载变化造成岩石圈变形,结合实测资料对比,认为该均衡作用是重要沉降因素^[54]。地质时期密西西比河河谷下段的下切以及沉积物填充带来的加载和卸载效应,产生了均衡抬升和沉降^[23, 55]。尼罗河三角洲北部断层活动和沉积物加载导致的均衡凹陷造成显著的差异沉降,可能是其东部地区全新世沉积物的厚度为西部厚度5倍之多的原因^[5]。

1.4 地震诱发的地面沉降

地震是事件性、低频率的地质事件,可造成厘米级甚至是数米的断层位移,如2011-03-11发生的东日本里氏9级强烈地震,位于震中西北部的宫城县牡鹿半岛向震中所在的东南方向移动了约5.3 m,同时下沉了约1.2 m,这是日本有观测史以来最大的地壳变动记录^[56]。因此,对于位于地震活跃区的大河三角洲而言,地震引发的地面沉降是完全有可能的,如黄河三角洲、尼罗河三角洲以及弗雷尔三角洲等。2010-01-12海地7.0级大地震造成断层沿线剧烈的地表变形,包括北部扇形三角洲60 cm的抬升以及南部山脉40 cm的沉降^[57]。地震导致砂土液化从而造成沉降,这种沉降是不可逆的,对建筑物和其他基础设施有很大的危害。对于三角洲沉积物来说,特别是最新沉积的砂质或者粉砂质沉积物很容易在地震和波浪等荷载的作用下发生液化,从而产生沉降。

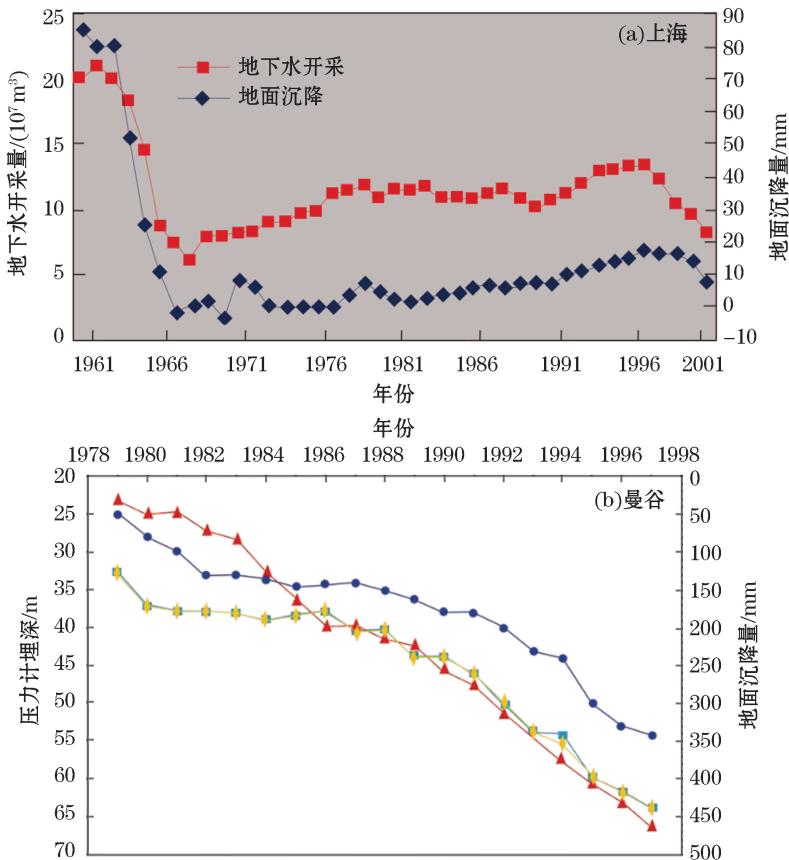
2 人为诱发型地面沉降

地下资源开采、建筑荷载以及砂土液化均可引发三角洲的地面沉降,也称之为诱发型地面沉降。这种沉降不规律、不规则,但其速率远大于自然因素造成的沉降。

2.1 地下流体资源开采

世界诸多大型河口三角洲越来越多地受到人类活动的影响,特别是居住人口数量较大的几个三角洲。地下水、石油、天然气等资源的开采导致沉积物孔隙压力的减小从而发生压实,形成了漏斗状的地面沉

降^[58]。位于长江三角洲的上海以及位于泰国湄南河三角洲的曼谷均因为地下水超采造成明显的地面沉降(图1)^[59-61]。20世纪中期至2002年,上海地区地面沉降累积达到2.63 m^[11];1978年以来,曼谷累积地面沉降量已高达数米(图1b)。



注:图 b 中不同的曲线代表不同的观测地点

图 1 地下水开采与地面沉降的关系

Fig.1 Relationship between the land subsidence and the underground water mining

地下水开采引起的沉降可以发生在砂质(或粉砂质)含水层以及黏土质的弱含水层,往往形成锥状沉降等值线。其中,含水层变形引起的沉降是弹性的,当水位恢复的时候地面沉降亦得以部分恢复^[62],但弱含水层的变形是不可逆的。因此,地下水开采导致的地面沉降可以通过地下水回灌来控制,当地下水水位恢复到最初状态的时候,弹性变形的绝大部分可以被恢复。例如,长江三角洲、意大利波河三角洲、泰国湄南河三角洲由地下水开采引起的地面沉降均通过控制地下水开采量、改变开采的含水层以及人工回灌等措施得以控制^[11,59,63]。

地下油气资源开采造成的地面沉降是由于岩石储层内的应力消耗,这种沉降的时空分布与开采深度和岩石储层的性质关系很大^[64]。通常,砂岩储层比泥岩储层压缩性更高。油气开采能够引起每年数厘米的地面沉降,其累积沉降可达数米^[65]。意大利的波河三角洲在20世纪已经累积沉降了3.7 m,其中80%的沉降是由于20世纪六七十年代甲烷气的开采造成。尼罗河三角洲由于地下碳氢化合物开采造成的沉降速率高达25~123 mm/a^[66]。

地下流体资源开采造成的地面沉降与开采深度、流体储层的性质、开采量等多个地质因素有关。因难以测量位于地下深部沉积物或者岩石的相关参数,所以对地面沉降趋势的直接预测很难实现,目前多依赖于数值模拟方法^[67-68]。

2.2 建筑荷载

在人口密度较大的三角洲地区,大量建筑荷载加速了沉积物固结沉降,如密西西比河三角洲地区的新奥尔良^[69]、加拿大的弗雷泽三角洲^[13]以及长江三角洲的上海^[60]。

新奥尔良人工海岸大堤已累积下沉超过1 m^[69],黄河三角洲近岸海堤自重引起每年几厘米的地面沉降^[70],沉降造成海堤在强风暴潮作用下易于被破坏。加拿大弗雷泽三角洲浅层全新世沉积物固结压实造成1~2 mm/a的缓慢沉降,而建筑荷载造成的沉降速率达3~8 mm/a。荷载造成的沉降速率往往表现出20 a以内的指数性衰减,这与沉积物固结压实理论相符^[13]。

2.3 其他因素

三角洲沉积物中多富含泥炭,泥炭氧化造成有机质含量的降低,也可引发地面沉降。在过去150 a间,美国萨克拉门托-圣华金河三角洲由于泥炭氧化造成局部沉降速率可达2~5 cm/a,远高于其他自然因素造成的沉降^[71]。近几十年来气候变暖加速了永久冻土的融化,由此引发北半球高纬度地区地面沉降^[72]。位于西伯利亚北极地区的勒拿河三角洲(Lena River Delta)也正处于这种沉降的风险中^[73]。北美北极地区,冻土融化造成的沉降可能会加剧麦肯齐三角洲(Mackenzie Delta)的洪灾^[74]。

3 大河三角洲地面沉降诱因分析

综上所述,大河三角洲地区地面沉降的诱因包括自然过程和人类活动因素,主要包括沉积物固结压实、构造活动、板块俯冲、均衡作用、冻土融化、泥炭氧化、地下流体资源开采、建筑荷载等。基于这些地质过程发生的空间范围,归纳提出了地面沉降的概念模型(图2)。由图2可知,沉降过程不仅仅是浅层的沉积物固结压实,也可能包含了地球深部的多个地质过程。

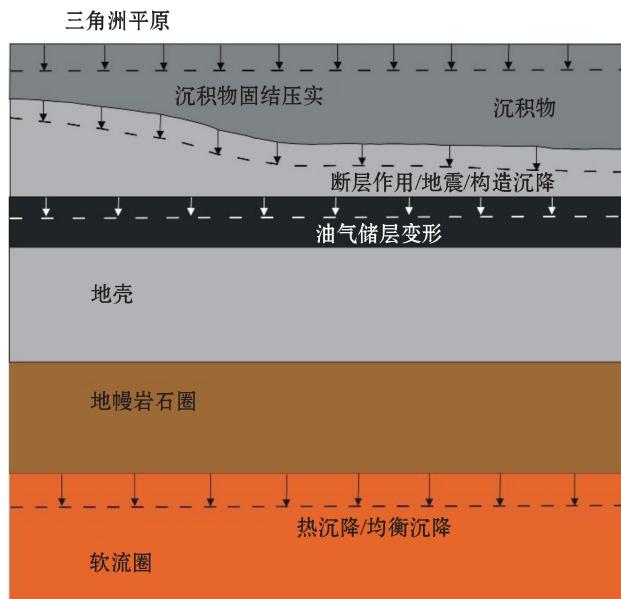


图2 三角洲地面沉降概念模型

Fig.2 Conceptual model for land subsidence in mega-river deltas

在世界范围内,不同三角洲的地面沉降速率以及沉降诱因差异很大。对于大部分三角洲而言,地面

沉降是多个地质过程综合作用的结果。自然因素造成的沉降往往是缓慢的、长时间尺度的过程,其速率往往是毫米每年量级。而人为诱发性的沉降往往作用时间较短,但是速率远超自然因素带来的沉降。因此,就快速沉降的三角洲而言,其沉降主因往往是人类活动。基于前人研究成果,分析了世界上主要三角洲的沉降要素(表 1)。

表 1 主要大河三角洲沉降诱因

Table 1 Statistics on the factors inducing the land subsidence in the major mega-river deltas in the world

沉降诱发因素	三角洲	来源文献	沉降诱发因素	三角洲	来源文献
沉积物固结压实	所有三角洲	—	地下资源开采	地震	弗雷尔三角洲 [13]
	长江三角洲	[49], [19]		密西西比河三角洲	[6], [77]
	尼罗河三角洲	[4]		波河三角洲	[63]
	孟加拉三角洲	[50]		湄南河三角洲	[59]
	罗纳河三角洲	[45]		长江三角洲	[11]
	密西西比河三角洲	[22]		黄河三角洲	[1]
	波河三角洲	[52], [63]		尼罗河三角洲	[66]
	黄河三角洲	[75]		莱茵河三角洲	[71]
构造活动	亚马逊河三角洲	[47]	泥炭氧化	萨克拉门托三角洲	
	尼罗河三角洲	[5]		弗雷尔三角洲	[13]
	密西西比河三角洲	[54]		密西西比河三角洲	[69]
	莱茵河三角洲	[76]		黄河三角洲	[70]
均衡作用	勒拿河三角洲	[73]	建筑荷载	长江三角洲	[60]
	麦肯齐三角洲	[74]			
冻土融化					

注:“—”表示无数据

4 黄河三角洲地面沉降分析

现代黄河三角洲地区是我国成陆时间最短的河口三角洲,随着三角洲的发育演化以及城市化进程的不断发展,该地区地面沉降现象较为显著。黄河三角洲北部是地面沉降较为严重的沉降区之一,多年来大规模的石油开采及中浅层卤水开采导致该地区的沉降速率和范围显著增大^[78-80]。自 20 世纪 80 年代开始对黄河三角洲地面沉降进行监测,并不断进行完善,河口区内各地市都建立了地面沉降监测网络。为了分析黄河三角洲北部河口区地面沉降的现状及发展趋势,原山东省地矿局第二水文地质工程地质大队于 2002 年 8 月建立了东营市城区地面沉降监测网,2016—2017 年的测量数据显示,现代黄河三角洲河口地区普遍存在地面沉降现象,东部地面沉降量普遍大于西部,平均沉降量为 37.0 mm,在东营市仙河镇北存在 1 个沉降量接近 80 mm 的沉降中心^[81]。近年来,现代黄河三角洲地面沉降监测、形成机理、防治、预警等方面的工作取得了一定的成果,但由于复杂的地质构造背景、独特的沉积特征及人类开发活动程度差异等因素,使得该区地面沉降机理较复杂。

4.1 数据处理与分析

目前,欧空局的 ERS-1 和 ERS-2 卫星以及世界其他发达国家的卫星可提供 C 波段的 SAR 图像,而日本 ALOS 卫星提供的 PALSAR 影像是 L 波段,在植被覆盖率较高的地区,有一定的穿透力,可以克服或者减弱失相干的影响,因此 L 波段的 PALSAR 影像比 C 波段的 SAR 影像更能准确反映地表的高程信息。由于

黄河入海口区域为冲积平原,植被覆盖率较高,传统的C波段ERS或者ENVISAT的影像在该区域失相干非常严重,很难得到可靠的数据。

因此本研究收集了10景L波段的ALOS/PALSAR雷达影像,取其中4对空间基线较好(轨道和大气延迟相对较小)的影像进行差分干涉(D-InSAR)数据处理,影像获取时间分别是2006-10-12,2007-02-27,2007-11-30和2010-01-20。用GAMMA软件将雷达影像进行二轨D-InSAR处理;先经过图像的配准、重采样,生成干涉图,去除平地和地形相位,以及滤波和相位解缠后获得影像的地表形变图,再通过坐标转换把雷达影像从雷达坐标系转化到了地图坐标系,最终得到地表形变图。

2006-10-12和2007-02-27两景影像时间相差大约5个月,地表形变图像的相干性良好(图3)。影像覆盖区域内地形整体形变较小,主要表现为局部的快速沉降,特别是三角洲北部近刁口乡区域(紫色区域),出现明显的沉降漏斗,最大达到40 mm。另外,黄河现行流路以南东营城区(紫色区域)也有较大范围的整体沉降。黄河现行流路及其周围(黄色区域)表现出微弱的抬升,可能与湿地的自然加积以及人类工程活动有关。2007-11-30和2010-01-20两景影像时间基线相差大于2 a,地表形变图像的相干性较差,特别是海边区域由于海水的侵蚀,已经基本失相干,只有局部区域保持相干。由图3可知,整个三角洲整体沉降不明显,主要表现为局部沉降,特别是三角洲北部,出现很明显的沉降漏斗,并且累计沉降达到80 mm,年沉降速率为20~30 mm/a。其他区域沉降相对缓慢,累计沉降小于30 mm,大部分区域年平均沉降速率为10 mm/a。

黄河水利委员会于20世纪八九十年代以来在黄河三角洲完成的水准测量结果显示,黄河废弃入海口至刁口河流路沿岸、黄河现行流路沿岸和现代黄河三角洲东南区域的平均沉降速率为26.7,22.6和21.0 mm/a^[82]。山东省地矿局鲁北地质工程勘察院地面沉降水准测量结果显示,2002年12月至2008年6月,东营区西部沉降量大于东部,整体呈现不均匀的分布特点。东营区沉降量大于150 mm的区域面积为15 km²,沉降速率为28.2 mm/a^[82]。ERS1和ERS2 SAR数据显示,1992—2000年东营市区最大地面沉降速率为33.2 mm/a,河口油田(刁口乡附近)和孤岛油田(仙河镇附近)平均地面沉降速率为8.8和5.8 mm/a,最大分别为15.6和12.2 mm/a^[83]。

综上所述,由遥感资料分析得到的黄河三角洲不同区域的沉降速率与水准测量结果处于同一个数量级,比较相近。但是,在黄河三角洲不同区域、不同时期其沉降速率是不同的,沉降趋势亦有不同,在监测数据量有限以及各种误差因素的制约下,三角洲的地面沉降时空分布依然没有呈现出明显的规律性。

4.2 地面沉降因素分析

目前,黄河三角洲的地面沉降机制尚未得到统一认识,分析可能的沉降因素为:

1)沉积物压实

作为黄河三角洲沉积主体的三角洲平原相和前缘相沉积物粒度组成以粉砂为主,前三角洲相则以黏土为主。其中,前三角洲相及海相的黏土层累计厚度达14 m,该黏土层的固结压实在初期的40 a内将累计压缩1.4 m(压实速率平均可达35 mm/a),之后速率将降低到5 mm/a左右^[7]。1855年以来,黄河携带巨量的泥沙迅速在渤海堆积造陆,新堆积的沉积体含水率高,建造时间短,因此固结压实过程不可避免。图3和图4所示沉降较为明显的刁口乡便位于1964—1976年黄河行河入海区域,1976年河道改道废弃后泥沙供应断绝,松散沉积层的固结压实可能是其沉降较为明显的主要因素之一。

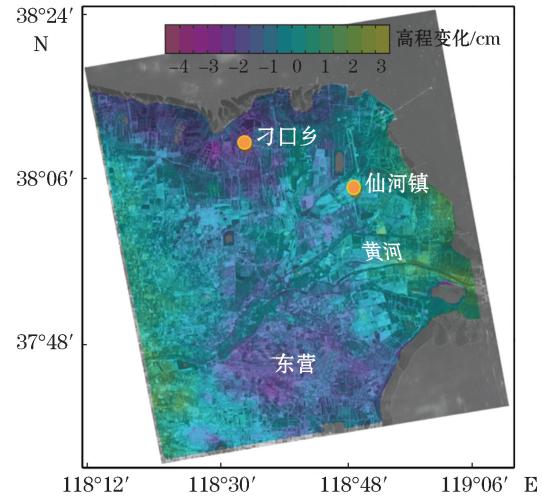


图3 2006-10-12—2007-02-27 黄河三角洲地表形变
Fig.3 The surface deformation of the Yellow River Delta obtained from Oct. 12th, 2006 to Feb. 27th, 2007

2) 地下流体资源开采

黄河三角洲地下水多为卤水和咸水,淡水资源主要分布在小清河以南区域。小清河以北区域地下水开采量有限,主要是工业用水。而小清河以南区域的淡水资源过度开采严重,地下水位严重下降。2005—2019年,滨州地区(黄河三角洲地面沉降典型地段)的6期地面沉降监测数据和水文地质条件分析结果显示,该地区石油开采加剧了部分区域的沉降趋势,但区内地面沉降产生的主要因素是过量开采深层地下水和新近沉积地层压缩,并以此为基础构建了地面沉降预测模型^[84]。

石油开采是否已造成黄河三角洲的地面沉降尚无定论,而且从各种监测结果来看,也没有发现明显的沉降漏斗。分析认为,黄河三角洲的储油层深度往往超过千米,储油层在采油以后的应力调整往往需要一个较长的时间,考虑到石油开采沉降的滞后效应以及黄河三角洲石油储层的性质,石油开采极有可能引发地面沉降,而且一旦发生,其沉降速率和沉降幅度将远远超过自然因素造成的沉降,胜利油田石油开采区地面沉降速率有可能会达到10 mm/a左右^[85]。因此,石油开采是今后黄河三角洲地面沉降研究需要特别关注的因素。

图3所示黄河现行河道两侧刁口和东营市区较为明显的沉降背后,地下流体资源的开采起到了不可忽视的作用,如刁口区域制盐业发达对地下卤水的需求、东营市区对地下淡水资源的需求都非常大。

3) 构造沉降

整个现代黄河三角洲地处渤海南部,郯庐断裂带以西,其北部位于莱州湾坳陷带以内,而南部则位于济阳坳陷带内,基底构造格局表现为由断层带控制的凸起和凹陷所组成。该区第三纪开始出现整体地壳沉降,第四纪以来表现为继承性区域性缓慢下沉^[86],地壳下沉速率为1~2 mm/a^[87]。由1955—1988年的地面垂直形变数据可知,在30多年内,黄河三角洲仍以下降为主,东营河口地区地面沉降速率为3~4 mm/a^[81]。可见,构造沉降因素在现代黄河三角洲地区地面沉降过程中的贡献率不高。

4) 地震

对地面沉降的影响,地震可造成厘米级甚至是数米的断层位移,还可导致砂土及粉土的液化。砂土及粉土在震动荷载(如波浪、地震等)的作用下易于液化,从而造成土体强度失效并产生沉降。粉土广泛分布于黄河三角洲平原及水下三角洲沉积物中,在地震的作用下易于液化。1969年渤海7.4级地震造成了研究区黄河大坝裂缝、沉陷,系与粉土的液化有关。黄河三角洲周边分布深大断裂构造,在历史上强震时有发生。此外,地震过程中可造成地下流体孔隙压力的改变,造成流体层的变形或者坍塌。黄河三角洲大规模的石油开采已大大改变了地下流体的原始应力状态,虽然采取了人工注水等措施,但在强烈地震的作用下,地下储油层的应力状态可能发生突发性的改变,造成储油层的体积减小而发生沉降。而且,这种应力的改变也可能诱发断层的再次活动,造成一定程度上的二次沉降。

5) 人类工程活动

在采油区周围,庞大的采油工程设施易导致地面沉降。在近海,防波堤自重产生的沉降累计已超过1 m,如黄河海港周围大坝在10 a内沉降超过1 m,沉降速率>10 cm/a^[70]。因此,在开发黄河三角洲的过程中,应充分考虑建筑物自重荷载导致软土地基产生沉降的问题。

5 结语

三角洲地面沉降是一个复杂的地质现象,包含了人类活动和自然因素作用下不同时间和空间尺度的地

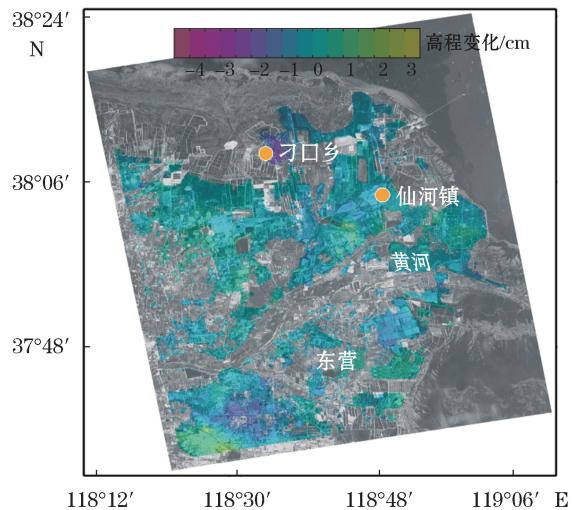


图4 2007-10-30—2010-01-20 黄河三角洲地表形变

Fig.4 The surface deformation of the Yellow River Delta obtained from Nov. 30th, 2007 to Jan. 20th, 2010

质过程,从浅层沉积物固结压实到地球深度的地幔对流。自然因素造成的地面沉降是缓慢的、不可控的,作用的时间尺度至少是数十甚至是数千年乃至百万年,其每年沉降量大致小于厘米级。而诱发性地面沉降是短时间的,其沉降速率远超过自然因素造成的沉降,并且往往表现出明显的时间滞后以及随时间的衰减。充分了解三角洲的沉降因素对于了解其沉降机制至关重要,也为制定全球海平面上升应对措施提供了科学依据。

黄河三角洲地区地面沉降机制较为复杂,深层地下水开采和新近沉积地层压缩是最为重要的诱因,但石油开采和人工荷载带来的影响也不容忽视。目前,我们对大河三角洲地面沉降的认识仍存在很多不足,掌握其地面沉降机制需要长时间序列、包含地表和地下的实测数据的支持,也需要包括卫星遥感、水准测量、钻孔伸缩计等多种监测、观测方法的相互验证。

参考文献

- [1] SYVITSKI J P M, SAITO Y. Morphodynamics of deltas under the influence of humans[J]. *Global and Planetary Changes*, 2007, 57(3/4): 261-282.
- [2] ERICSON J P, VÖRÖSMARTY C J, DINGMAN S L, et al. Effective sea-level rise and deltas: causes of change and human dimension implications[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 50(1): 63-82.
- [3] BLUM M D, ROBERTS H H. Drowning of the Mississippi Delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(7): 488-491.
- [4] STANLEY D J. Subsidence in the northeastern Nile Delta: rapid rates, possible causes, and consequences[J]. *Science*, 1988, 240(4851): 497-500.
- [5] STANLEY D J, WARNE A G. Nile Delta: recent geological evolution and human impact[J]. *Science*, 1993, 260, 5108: 628-634.
- [6] MORTON R A, BERNIER J C, BARRAS J A, et al. Historical subsidence and wetland loss in the Mississippi Delta Plain[J]. *Gulf Coast Association Societies Transactions*, 2005, 55: 555-571.
- [7] 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.
- [8] SHI X Q, WU J C, YE S J, et al. Regional land subsidence simulation in Su-Xi-Chang area and Shanghai City, China[J]. *Engineering Geology*, 2008, 100(1/2): 27-42.
- [9] TÖRNQVIST T E, BICK S J, BORG K, et al. How stable is the Mississippi Delta?[J]. *Geology*, 2006, 34(8): 697-700.
- [10] TÖRNQVIST 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.
- [11] WU J C, SHI X Q, XUE Y Q, et al. The development and control of the land subsidence in the Yangtze Delta, China[J]. *Environmental Geology*, 2008, 55(8): 1725-1735.
- [12] BECKER R H, SULTAN M. Land subsidence in the Nile Delta: inferences from radar interferometry[J]. *The Holocene*, 2009, 19(6): 949-954.
- [13] MAZZOTTI S, LAMBERT A, KOOIJ M V, et al. Impact of anthropogenic subsidence on relative sea-level rise in the Fraser River Delta[J]. *Geology*, 2009, 37(9): 771-774.
- [14] SYVITSKI J P M, KETTNER A J, OVEREEM I, et al. Sinking deltas due to human activities[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(10): 681-686.
- [15] YIN P, LIN L J, CHEN B, et al. Coastal zone geo-resources and geo-environment in China[J]. *Geology in China*, 2017, 44(5): 842-856. 印萍,林良俊,陈斌,等.中国海岸带地质资源与环境评价研究[J].中国地质,2017,44(5):842-856.
- [16] DUAN X F, XU X G, WANG R B. Land subsidence and its influencing factors in Tianjin coastal area[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(6): 1071-1076. 段晓峰,许学工,王若柏.天津沿海地区地面沉降及其影响因素[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(6):1071-1076.
- [17] BAUMANN R H, DAY J J W, MILLER C A. Mississippi Deltaic wetland survival: sedimentation verse coastal submergence[J]. *Science*, 1984, 224: 1093-1095.
- [18] DAY J J W, GIOSAN L. Survive or subside?[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(3): 156-157.
- [19] STANLEY D J, CHEN Z Y. Yangtze delta, eastern China: 1. Geometry and subsidence of Holocene depocenter[J]. *Marine Geology*, 1993, 112(1/4): 1-11.

- [20] SYVITSKI J P M. Deltas at risk[J]. *Sustainability Science*, 2008, 3(4): 23-32.
- [21] MORTON R A, TILING G, FERINA N F. Causes of hot-spot wetland loss in the Mississippi Delta plain[J]. *Environmental Geosciences*, 2003, 10(2): 71-80.
- [22] DOKKA R K. Modern-day tectonic subsidence in coastal Louisiana[J]. *Geology*, 2006, 34(4): 281-284.
- [23] BLUM M D, TOMKIN J H, PURCELL A, et al. Ups and downs of the Mississippi Delta[J]. *Geology*, 2008(9), 36: 675-678.
- [24] MECKEL T A. An attempt to reconcile subsidence rates determined from various techniques in southern Louisiana[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(15/16): 1517-1522.
- [25] MORTON R A, BERNIER J C. Recent subsidence-rate reductions in the Mississippi delta and their geological implications[J]. *Journal of Coastal Research*, 2010, 26(3): 555-561.
- [26] EMERY K O, AUBREY D G. Tide-Gauge Records[J]. *Science*, 1991, 254: 448.
- [27] DAVIS J L, MLTROVICA J X. Glacial isostatic adjustment and the anomalous tide gauge record of eastern North America[J]. *Nature*, 1996, 379: 331-333.
- [28] GALLOWAY D L, HOFFMANN J. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology[J]. *Hydrogeology Journal*, 2007, 15: 133-154.
- [29] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Nonlinear Subsidence rate estimation using permanent scatters in differential SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2002, 38(5): 2202-2212.
- [30] WANG Y K. Research and application of PSInSAR technology on the land subsidence monitoring[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, 43(4): 209-213. 王寅珂. PSInSAR 技术在地面沉降监测中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(4): 209-213.
- [31] 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): 2375-2383.
- [32] LI H, HU B, LIAO J. Monitoring the surface deformation of core cities in the Guangdong—Hong Kong—Macao Greater Bay area based on SBAS technology[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2020, 29(3): 46-50. 李慧, 胡波, 廖佳. 基于 SBAS 技术监测粤港澳大湾区核心城市地表形变[J]. 测绘工程, 2020, 29(3): 46-50.
- [33] LI L, WANG N. Introduction and analysis of common methods for determination of urban land subsidence[J]. *Ground Water*, 2019, 41(5): 90-91. 李陆, 王宁. 城市地面沉降判定常见方法介绍与分析[J]. 地下水, 2019, 41(5): 90-91.
- [34] XING L P, MAO X B, MU H B. Monitoring and analysis of ground subsidence in Zibo mining area[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, 43(6): 201-207. 邢立鹏, 毛绪波, 牟海波. 淄博矿区地面沉降监测与分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(6): 201-207.
- [35] STANLEY D J, GOODFRIEND G A. Recent subsidence of the northern Suez Canal[J]. *Nature*, 1997, 388: 335-336.
- [36] CHEN Z Y, STANLEY D J. Sea-level rise on eastern China's Yangtze Delta[J]. *Journal of Costal Research*, 1998, 14(1): 360-366.
- [37] STANLEY D J, HAIT A K. Deltas, radiocarbon dating, and measurements of sediment storage and subsidence[J]. *Geology*, 2000, 28(4): 295-298.
- [38] PETERSEN K D, NIELSEN S B, CLAUSEN O R, et al. Small-scale mantle convection produces stratigraphic sequences in sedimentary basins[J]. *Science*, 2010, 329: 827-830.
- [39] GAMBOLATI G, GATTO P, FREEZE R A. Predictive simulation of the subsidence of Venice[J]. *Science*, 1974, 183: 849-851.
- [40] MECKEL T A, BRINK U S T, WILLIAMS S J. Current subsidence rates due to compaction of Holocene sediments in southern Louisiana[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(11): L11403.
- [41] MECKEL T A, TEN BRINK U S, WILLIAMS S J. Sediment compaction rates and subsidence in deltaic plains: numerical constrains and stratigraphic influences[J]. *Basin Research*, 2007, 19(1): 19-31.
- [42] DOKKA R K, SELLA G F, DIXON T H. Tectonic control of subsidence and southward displacement of southeast Louisiana with respect to stable North America[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(23): L23308.
- [43] JI H L, YANG Y B, ZHANG Y W, et al. Quaternary sedimentary characteristics and land subsidence model in North Shandong Plain [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(Suppl.1): 241-250. 纪洪磊, 杨亚宾, 张永伟, 等. 鲁北平原第四纪沉积特征及地面沉降模式分析[J]. 地质学报, 2019, 93(增1): 241-250.
- [44] CHEN Z Y, STANLEY D J. Yangtze Delta, eastern China: 2. Later Quaternary subsidence and deformation[J]. *Marine Geology*, 1993, 112(1/4): 13-21.
- [45] VELLA C, PROVANSAL M. Relative sea-level rise and neotectonic events during the last 6500 yr on the southern eastern Rhône Delta, France[J]. *Marine Geology*, 2000, 170(1/2): 27-39.
- [46] SORIA J M, ALFARO P, FERNÁNDEZ J, et al. Quantitative subsidence-uplift analysis of the Bajo Segura Basin (eastern Betic Cordil-

- lera, Spain): tectonic control on the stratigraphic architecture[J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 140(3/4): 271-289.
- [47] RODGER M, WATTS A B, GREENROYD C J, et al. Evidence for unusually thin oceanic crust and strong mantle beneath the Amazon Fan[J]. *Geology*, 2006, 34(12): 1081-1084.
- [48] MÜLLER R D. Sedimentary basins feeling the heat from below[J]. *Science*, 2010, 329: 769-770.
- [49] CHEN Z Y. Yangtze delta subsidence[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 2001, 22: 95-101. 陈中原. 长江三角洲之沉降[J]. 火山地质与矿产, 2001, 22(2): 95-101.
- [50] UDDIN A, LUNDBERG N. Miocene sedimentation and subsidence during continent-continent collision, Bengal basin, Bangladesh[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 164(1/2): 131-146.
- [51] LOVETT R A. Global warming won't affect all world's deltas[J/OL]. *Nature*, 2009. <https://doi.org/10.1038/news.2009.1077>.
- [52] CARMINATI E, DOGLIONI C, SCROCCA D. Apennines subduction-related subsidence of Venice (Italy)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(13): 501-504.
- [53] STANLEY D J, WARNE A G. Worldwide initiation of Holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise[J]. *Science*, 1994, 265: 228-231.
- [54] HUTTON E W H, SYVITSKI J P M. Sedflux-2.0: an advanced process-response model that generates three-dimensional stratigraphy [J]. *Computers and Geosciences*, 2008, 34(10): 1319-1337.
- [55] IVINS E R, DOKKA R K, BLOM R G. Post-glacial sediment load and subsidence in coastal Louisiana[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(16): 1-5.
- [56] March 11th Earthquake in Japan[EB/OL]. [2021-01-05]. [https://baike.baidu.com/item/3·11 日本地震/7903324?fr=aladdin](https://baike.baidu.com/item/3·11%20日本地震/7903324?fr=aladdin). 3·11 日本地震[EB/OL]. 3·11 日本地震[2021-01-05]. [https://baike.baidu.com/item/3·11 日本地震/7903324?fr=aladdin](https://baike.baidu.com/item/3·11%20日本地震/7903324?fr=aladdin).
- [57] HASHIMOTO M, FUKUSHIMA Y, FUKAHATA Y. Fan-delta uplift and mountain subsidence during the Haiti 2010 earthquake[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(4): 255-259.
- [58] FIELDING E J, BLOM R G, GOLDSTEIN R M. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(17): 3215-3218.
- [59] PHIEN-WEJ N, GIAO P H, NUTALAYA P. Land subsidence in Bangkok, Thailand[J]. *Engineering Geology*, 2006, 82(4): 187-201.
- [60] WEI Q L. Land subsidence and urban water management in Shanghai[D]. Dissertation, Delft University of Technology, 2006.
- [61] ZHANG Y, XUE Y Q, WU J C, et al. Characteristics of aquifer system deformation in the Southern Yangtze Delta, China[J]. *Engineering Geology*, 2007, 90(3/4): 160-173.
- [62] CHEN C T, HU J C, LU C Y, et al. Thirty-year land elevation change from subsidence to uplift following the termination of groundwater pumping and its geological implications in the Metropolitan Taipei Basin, Northern Taiwan[J]. *Engineering Geology*, 2007, 95(1/2): 30-47.
- [63] CARMINATI E, MARTINELLI G. Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relatively impact of natural and anthropogenic causation[J]. *Engineering Geology*, 2002, 66(3/4): 241-255.
- [64] HETTEMA M, PAPAMICHO E, SCHUTJENTS P. Subsidence delay: field observations and analysis[J]. *Oil and Gas Science and Technology*, 2018, 57(5): 443-458.
- [65] SZOSTAKCHRZANOWSKI A, CHRZANOWSKI A, ORTIZ E. Modeling of ground subsidence in oil fields[J]. *Technical Science*, 2006, 9: 133-146.
- [66] ABAM T K S. Regional hydrological research perspective in the Niger Delta[J]. *Hydrological Sciences*, 2001, 46(1): 13-25.
- [67] CHRISTIAN J T, HIRSCHFELD R C. Subsidence of venice: predictive difficulties[J]. *Science*, 1974, 17: 1185.
- [68] KOSLOFF D, SCOTT RF, SCRANTON J. Finite element simulation of Wilmington oil field subsidence: I. Liner modeling[J]. *Tectonophysics*, 1980, 65(3/4): 339-368.
- [69] DIXON T H, AMELUNG F, FERRETTI A, et al. Subsidence and flooding in New Orleans[J]. *Nature*, 2006, 441: 587-588.
- [70] LI G X, ZHUANG K L, JIANG Y C. Engineering stability of the deposition bodies in the Yellow River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(2): 21-26. 李广雪, 庄克琳, 姜玉池. 黄河三角洲沉积体的工程不稳定性[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(2): 21-26.
- [71] REED C. Where sinking land meets rising water[J/OL]. *Global Change*, 2009, 74: 32-35. [2021-01-10] <http://www.igbp.net/download/18.1b8ae20512db692f2a680007108/1376383103720/NL74-deltas.pdf>.
- [72] SERREZE M C, WALSH J E, CHAPIN F S, et al. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment [J]. *Climatic Change*, 2002, 46(1/2): 159-207.
- [73] NELSON F E, ANISIMOV O A, SHIKLOMANOV N I. Subsidence risk from thawing permafrost[J]. *Nature*, 2001, 410: 889-890.
- [74] MORSE P D, BURN C R, KOKELJ S V. Near-surface ground-ice distribution, Kendall Island Bird Sanctuary, western Arctic coast,

Canada[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2009, 20(2): 155-171.

- [75] HUANG L R, HU H M, YANG G H. Sea level change along the western and south 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, 胡慧民, 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.
- [76] BLOM R G, IVINS E R, KLEMMAN V, et al. Subsidence of river delta systems and enclosed basins caused by multi-decadal to millennial scale sediment and ocean loading[J]. Geophysical Research Abstracts, 2010, 12, EGU2010-13526.
- [77] MORTON R A, BERNIER J C, BARRAS J A. Evidence of regional subsidence and associated interior wetland loss induced by hydrocarbon production, Gulf Coast region, USA[J]. Environmental Geology, 2006, 50(2): 261-274.
- [78] XU L W, HUANG H J, LIU Y X, et al. Impact of artificial construction on land subsidence in the Yellow River Delta region[J]. Coastal Engineering, 2015, 31(3): 33-43. 徐丽雯, 黄海军, 刘艳霞, 等. 黄河三角洲地区人工建筑对地面沉降的影响研究[J]. 海岸工程, 2015, 31(3): 33-43.
- [79] TAN J Y, HUANG H J, LIU Y X. Estimation of sediment compaction and its contribution to land subsidence in the Yellow River Delta [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(5): 33-38. 谭晋钰, 黄海军, 刘艳霞. 黄河三角洲沉积物压实固结及其对地面沉降贡献估算[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(5): 33-38.
- [80] LIU Y, LI P Y, FENG A P, et al. Groundwater dynamic evolutions and relationship between groundwater level and land subsidence in the Yellow River Delta[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(11): 1555- 1565. 刘勇, 李培英, 丰爱平, 等. 黄河三角洲地下水动态变化及其与地面沉降的关系[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 39(11): 1555- 1565.
- [81] WANG K F, JI G S. Land subsidence situation and characteristics in the north Yellow River Delta (Estuary Region)[J]. Yellow River, 2020, 42(5): 120-125. 王奎峰, 姬广胜. 黄河三角洲北部河口区地面沉降现状特征[J]. 人民黄河, 2020, 42(5): 120-125.
- [82] LIU Y. Spatiotemporal evolution of land subsidence and mechanism discussion in the Yellow River Delta, China[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013: 53-60. 刘勇. 黄河三角洲地区地面沉降时空演化特征及机理研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2013: 53-60.
- [83] ZHANG J Z, HUANG H B, BI H B, et al. Monitoring ground subsidence in the modern Yellow River Delta based on SBAS time-series analysis[J]. Geomatics and information Science of Wuhan University, 2016, 41(2): 242-248. 张金芝, 黄海军, 毕海波, 等. SBAS 时序分析技术监测现代黄河三角洲地面沉降[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(2): 242-248.
- [84] LIU S Z, TIAN C, ZHU Z Y, et al. Mechanism research and prediction warning of land subsidence in typical sections of the Yellow River Delta[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(Suppl.1): 251-260. 刘苏哲, 田晨, 朱智勇, 等. 黄河三角洲典型地段地面沉降机理研究及预测预警[J]. 地质学报, 2019, 93(增 1): 251-260.
- [85] LIU G Y, ZHUANG X L. Environmental geological problems and sustainable economic development of oil and gas resources in the Yellow River Delta[J]. Shanghai Geology, 2001(Suppl.): 36-38. 刘桂仪, 张兴乐. 黄河三角洲油气资源开发的环境地质问题与经济可持续发展[J]. 上海地质, 2001(增): 36-38.
- [86] LI G X, ZHUANG Z Y, HAN D L. Stratigraphic sequences and characteristics 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): 161-166. 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): 161-166.
- [87] LI Y X, YANG G H, YANG S D, et al. Preliminary division of active block boundary in Chinese mainland based on recent vertical crustal movement[J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(1): 11-16. 李延兴, 杨国华, 杨世东, 等. 根据现代地壳垂直运动划分中国大陆活动地块边界的尝试[J]. 地震学报, 2001, 23(1): 11-16.

Research on Land Subsidence Mechanisms of Mega-River Deltas: Taking the Yellow River Delta as the Case

FU Yun-xia^{1,2}, GUAN Yong^{1,2}, WANG Xiao-dan^{1,2}, WANG Jian-shou^{1,2},
YIN Zheng^{1,2}, ZHOU Xiao-xue^{1,2}, WANG Qing^{1,2}, XU Mei-jun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Urban Geology and Underground Space Resources, Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Qingdao 266100, China;

2. Qingdao Geo-engineering Exploration Institute (Qingdao geological exploration and Development Bureau), Qingdao 266100, China)

Abstract: Land subsidence happens to different extend in many mega-river deltas (MRD) in the world. However, the subsidence mechanisms of the delta areas differ due to the differences in natural and anthropogenic forces. The current researches hold that the factors that affect the land subsidence of the mega-river deltas include both the natural processes such as sediment consolidation and compaction, tectonic activities, permafrost melting, peat oxidation, sand liquefaction, thermal mantle convection, plate subduction, equalization action, etc. and the human activities such as underground resource and/or fluid mining, building loads, and so on. The influence of the geological actions of different time scales on the land subsidence of the delta varies greatly. The natural subsidence is often a slow accumulation process, whereas that caused by the human activities is usually faster in speed and characterizes with a certain degree of lag and decay over time. Research results of the law and mechanisms of the land subsidence of the major mega-river deltas in the world are summarized and a conceptual model for the land subsidence is proposed. By taking the Yellow River Delta as the example, the information about the land subsidence of the modern Yellow River Delta has been acquired fast and in a larger area by using remote sensing technology and the reason for causing the land subsidence has been analyzed. Grasping the spatial and temporal distribution and inducing factors of the land subsidence of the Yellow River Delta is of great significance for responding the global relative sea level rise and disaster prevention and mitigation.

Key words: mega-river delta; sinking mechanism; natural and anthropogenic process; Yellow River Delta

Received: January 19, 2021