

# 现代黄河三角洲地面沉降对洲体演变的影响

杜廷芹<sup>1,2</sup>, 黄海军<sup>1</sup>, 别君<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 山东省环境保护科学研究所 重点实验室, 山东 济南 250013; 3. 中国海监北海航空支队, 山东 青岛 266033)

**摘要:** 对现代黄河三角洲地区地面沉降的特点和对三角洲发育演变的影响进行了分析研究。分析认为, 现代黄河三角洲地区普遍发生的地面沉降具有多因素和时空不连续性的特点, 给沉降区带来了一系列的危害, 使多种海岸带灾害的破坏和影响加剧; 地面沉降不仅可以造成地面标高损失, 影响三角洲的垂向发育, 还通过改变地面坡降来影响河道的演变和尾闾的摆动, 同时能引起相对海平面上升, 在淹没沿岸低地的同时, 加大潮差和滩面水深, 使沿岸潮流和波浪作用增强, 增加风暴潮的成灾几率, 加速海岸蚀退和滩面冲刷。正确认识三角洲地面沉降对洲体演变的影响机理, 做好科学防范措施, 有利于三角洲的可持续发展。

**关键词:** 黄河三角洲; 地面沉降; 河道演变; 海岸侵蚀

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2011)09-0078-07

近、现代黄河三角洲地区是黄河自 1855 年北归后, 随河口流路的不断改道发育而成的以宁海为顶点, 北起套尔河口, 南至淄脉沟口, 面积约 6 000 km<sup>2</sup> 的扇形淤积区。该区在来自河流、海洋、陆地及人类多重耦合因素的共同作用下, 以独特的延伸速度和发育方式, 形成多种海岸演变状态类型, 成为全世界海岸带淤进蚀退最为活跃的地区之一<sup>[1-2]</sup>。现代黄河三角洲地势低平, 高程资源极其有限, 大部分地面高程都处于 6 m 以下(图 1), 且平均坡降平缓, 仅有万分之一左右, 易遭受海平面上升及风暴潮等灾害的影响<sup>[3]</sup>。由于黄河三角洲特殊的发育背景(构造沉降、松散沉积物)和日益频繁的人类经济活动影响, 三角洲绝大部分区域范围内都发生了不同程度的地面沉降灾害。地面沉降的发展演变过程基本上是不可逆的, 一旦形成便很难恢复, 不仅给沉降区带来众多直接性的危害, 还会诱发一系列其他环境地质灾害, 包括风暴潮灾、湿地淹没、海岸侵蚀、海水入侵、洪涝与污染加剧等。黄河三角洲普遍发生的地面沉降灾害, 迫使地面标高损失, 在全球海平面上升的基础上, 产生了相对上升分量, 增加了该区的相对海平面上升速度, 使多种海岸带灾害的破坏和影响加剧, 不仅直接关系到油田、海堤和海港工程建设, 危及湿地资源和生态环境, 还会成为影响和制约三角洲发育演变的重要因素之一。

## 1 黄河三角洲地面沉降的现状特点

### 1.1 地面沉降现状

现有的地面沉降调查资料显示, 自 20 世纪 50 年代以来, 三角洲绝大部分地区已相继发生了不同程度的地面沉降, 年平均沉降速率范围在几毫米到几十厘米之间不等, 在某些城镇居民区或石油开采区, 还出现了沉降漏斗, 最大沉降速率可高达 200 mm/a<sup>[4-9]</sup>。特别是在 1976 年黄河尾闾变迁后的几年里, 由于沉积物的固结压实作用和油田大规模开发建设的影响, 导致废弃的刁口河河道流域发生了相对急剧快速的地面下降, 平均沉降速率达 53 mm/a。此外, 根据东营市及其周边地区的历次垂直形变监测资料分析发现, 东营市已普遍发生了差异性地面沉降, 沉降速率一般为 10~100 mm/a, 个别地区累计沉降量可达数米<sup>[7-8, 10-11]</sup>。据有关学者预测, 未来的几十年内, 三角洲部分地区仍会以持续下沉为主, 对该区自然环境和社会经济发展的威胁势必会更加严重<sup>[6, 9]</sup>。

收稿日期: 2010-12-11; 修回日期: 2011-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40676037, 40706035); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-207)

作者简介: 杜廷芹(1982-), 女, 山东沂源人, 环境科学专业; 黄海军, 通信作者, 研究员, 博士生导师, 从事海洋地质与环境研究, E-mail: hjhuang@qdio.ac.cn

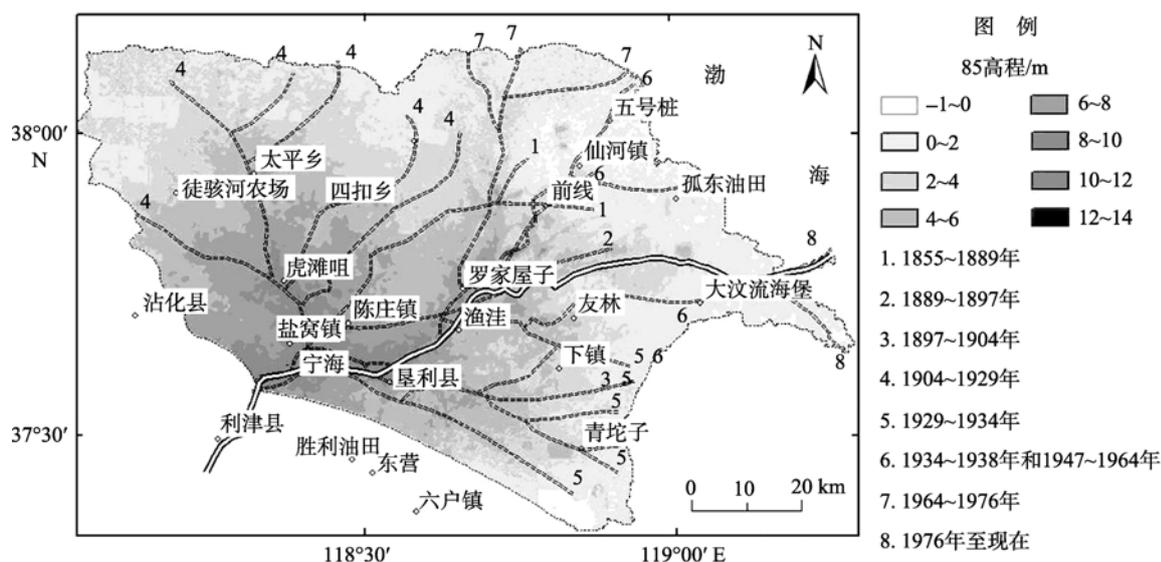


图 1 现代黄河三角洲 2000 年数字高程模型(SRTM-3)与河道变迁

Fig. 1 The DEM of modern Yellow River Delta in 2000 (SRTM-3) and distributary changes

## 1.2 地面沉降特点

综观整个黄河三角洲地面沉降的发生、发展过程和历史现状,除具有明显的缓慢、累进和过程不可逆等特点外,还具有以下两个特征。

### 1.2.1 多因素性

可以导致地面沉降的因素有很多,主要可分为自然因素和人为因素,对于现代黄河三角洲发生的大规模地面沉降,几乎所有能够引起缓慢沉降灾害的影响要素,全都在该区有所体现,包括构造运动、地质体荷载引起的均衡下沉、地震活动影响、沉积物的固结压实作用、海平面上升、油气开采、过度抽取地下水和各类工程建设等<sup>[4, 6, 12]</sup>。

### 1.2.2 时空非连续性

虽然现代黄河三角洲绝大部分地区已相继发生了不同程度的地面沉降,但表现为持续沉降状态的区域不多,绝大多数地区都表现为地面沉降与地表抬升交替出现。在 1956~1980 年间,刁口河流路和徒骇河北部区域地表垂直变化是先抬升后下沉,而清水沟流路、草桥沟两侧和罗家屋子南部区域则都表现为先下沉后抬升,这主要是因为黄河尾间的改道、沉积物的固结压实和人类活动的影响所致<sup>[4]</sup>。由于该区地面沉降范围广、历时长,各影响要素在不同时间、空间域内的影响力相差甚远,致使各区段地面沉降的速度和累计量都存在有较大的时空差异性。

## 2 地面沉降对洲体发育的影响

### 2.1 改变地面标高,影响纵向发育过程

由于黄河下游河段流经地区海拔低,坡降小,河口水深浅,使进入河口地区的大量泥沙淤积,造成河口不断向海淤积延伸和河床的不断抬升,垂向发育剧烈。黄河在宁海以下决口改道共计 50 余次,如此频繁的尾间摆动,使每次新堆积成的亚三角洲叶瓣相互叠置,不断淤积抬升。理论上,随河口流路的不断摆动,会使整个三角洲呈现出具有多个轴线,类似叶脉格架的扇面形态;然而实际上,整个三角洲大致呈现出以东北方向为轴线,中间高、两侧低,以宁海为高程中心,西南高、东北低,缓慢向海倾斜,凸出于渤海的扇面形态(图 1)<sup>[13-14]</sup>。这其中,地表的不均衡沉降,尤其是沉积物的固结压实作用产生的下沉,起到了关键性的作用。地面沉降导致原本有限的高程资源损失,破坏了三角洲的纵向发育过程,具有地表抬升与地面下沉交替进行的现象,形成特殊的垂向发育演变过程。

### 2.2 改变地面坡降,影响下游河道的演变

#### 2.2.1 改变地面坡降,影响地貌形态

地面的不均衡下沉使黄河三角洲地面比降发生了局部性的改变,在宽广平坦的地面上形成了高低起伏的地貌形态,甚至出现了为数不多的小型盆斗区,如仙河镇和徒骇河农场附近区域(图 1)。现代黄

河三角洲地势低平, 利用该区 DEM 计算得到的坡度结果显示, 坡度多集中在 0.01%~0.04% (图 2), 而在小型盆斗区边缘地面坡降则明显增大, 多大于 0.04%。此外, 在滨海沿岸区, 由于新近沉积物的固结压实作用导致的地面不均衡下沉, 导致现代黄河三角洲边缘坡降差异明显。

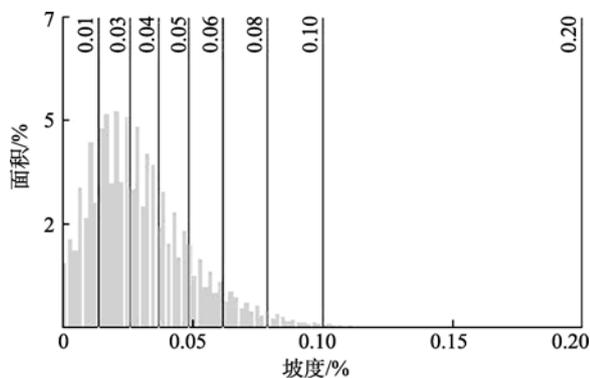


图 2 现代黄河三角洲地面坡度分布

Fig. 2 Slope of the modern Yellow River Delta

### 2.2.2 修改河道纵剖面, 影响下游河道淤积

地形变率可以影响河床的比降和纵剖面的形状, 公式(1)是用综合分析各种因素的方法, 确定的华北平原诸河流的比降与河床质粒径、来沙系数和地壳垂直形变等因素的函数关系<sup>[15]</sup>。

$$J=7.5T^{0.194}D_{50}^{0.57}(\rho/Q)^{0.169}, (r=0.95) \quad (1)$$

其中,  $J$  为河床比降(%),  $D_{50}$  为中值粒径(mm),  $T$  为地形变率(mm/a),  $\rho$  为含沙量( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $Q$  为流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )。根据上式可以看出, 黄河三角洲的不均衡下沉可以改变黄河下游河道的比降, 在来水来沙条件和河床形态及粗糙率等都保持不变的情况下, 重新调整河道的纵剖面形态, 改变河流输沙能力。就黄河而言, 由于其特殊的来水来沙过程、泥沙组成和边界条件, 河流为达到输沙平衡而自动调整河床断面及粗糙率的余地不大, 主要借助于调整比降以期达到输沙平衡, 维持河道稳定, 所以河道比降成为了影响下游河道淤积抬升与加长的主要影响因素。从长时间尺度来看, 现在黄河下游能在高出地面数米的情况下依然持续淤积主要是由于地质历史时期华北平原不断地壳下沉和河口流路的延伸, 而河道比降不能适应现在恶化的来水来沙条件而产生的<sup>[16]</sup>。此外, 从河道纵剖面的流水地貌过程来看, 河流泥沙的输运会产生“移平作用”, 致使河道纵剖面的比降不断减小, 逐渐趋于平缓<sup>[17]</sup>。差异性地面沉降的产生会使黄河下游河道的比降发生改变, 阻滞河道向

输沙平衡纵剖面转化, 从而延长流水地貌的塑造过程。

### 2.2.3 改变侵蚀基准面, 造成河道的溯源冲淤

由河流侵蚀基准面的升降引起的冲刷或淤积称为河道的溯源冲淤<sup>[18]</sup>。河流受水盆地区域的地面沉降造成河流侵蚀基准面的相对抬升, 产生溯源淤积, 进而影响下游部分河段的冲淤演化, 这与河口延伸在下游河道的冲淤演变过程中起到了相近的作用。在黄河三角洲地面均衡下沉发生的同时, 河口基准面会相对抬升, 这时河道需要重新调整比降来维持输沙平衡, 必然会使沉降区的河道发生淤积和水位抬升, 以降低该处河道的比降; 同样为达到输沙平衡, 需要临近河道继续发生递归淤积, 不断向前发展造成溯源堆积, 从而加重黄河下游河道的淤积。因受人为因素严格控制, 黄河下游河道侧向发育范围很小或根本不可能, 因此, 通过其侧向运动来适应基准面变化的可能性不大, 而往往只能借助于溯源冲淤来完成, 所以在黄河下游, 侵蚀基准面相对抬升引起溯源堆积作用的影响范围较大<sup>[15, 19]</sup>。此外, 尽管海平面为最基本的侵蚀基准面, 但在很多情况下, 局地及暂时性的基准面仍然起一定作用。三角洲上河道流经区域的局部沉降可以造成与河流改道而使水流落差加大的相同作用, 导致局地基准面的暂时下降, 而产生暂时性的溯源冲刷, 河口溯源冲刷的距离可用下式求得<sup>[15]</sup>。

$$L=\frac{\Delta h}{(\lambda_j-1)J_0} \quad (2)$$

式中,  $L$  为溯源冲刷距离,  $\Delta h$  为下端的冲刷深度,  $\lambda_j$  为计算冲刷后的比降  $J$  与初始比降  $J_0$  的比值。在溯源冲刷完成后, 下端河床发生溯源淤积, 其距离应约等于溯源冲刷距离。另外, 由地面沉降引起的侵蚀基准面升降, 除可以使河道发生溯源冲淤之外, 还会造成河流横断面特征、河床糙度、河流弯曲系数等要素的调整。

### 2.3 改变河道比降, 影响黄河尾间的摆动

黄河三角洲的演化表明, 河流改道是三角洲生长发展的过程和途径<sup>[14]</sup>。黄河尾间之所以频繁摆动, 主要是因为旧河道发育的后期阶段, 由于河道的持续淤积抬升和流路的逐渐延伸加长, 致使河道比降减小, 输沙能力减弱, 当河流比降减小到流路改道的临界值时, 河口及分流河道因淤积严重, 在汛期不能适应泄洪排沙的要求, 水流便冲破自然堤或人工堤的约束, 在沿河岸的低洼地寻找新的路径入

海<sup>[20-21]</sup>。河道两侧因差异性地面下沉而产生的低洼地可以为河流的决口改道创造适宜条件。另外,在整个近代黄河三角洲的发育过程中,虽然是由自上而下逐渐向海推移的,但是在每一个具体流路的演变阶段上,三角洲摆动顶点又是从下而上的演进<sup>[21]</sup>。这种双向共生的三角洲发育总过程,势必会使原废弃的亚三角洲重新被黄河选择为入海路径成为可能。黄河三角洲错综复杂的分流河道变迁和叶瓣相互叠置的格局,显示了河流改道后,先前被废弃的亚三角洲,经地表松散沉积物固结压实等沉降作用之后,其地表高程降低,比降加大,当现行流路充分发育成熟以致衰亡,向下一次改道演进时,由于新形成的亚三角洲比降小,入海路径长,废弃三角洲叶瓣会被黄河重新启用,形成新的入海流路。

### 2.4 引起局地海平面上升,加剧沿岸侵蚀

潮流、波浪和风暴潮作用对黄河三角洲沉积物的再悬浮、再搬运起重要作用,是三角洲蚀退的主要动力。相对海平面上升,将引起潮流和波浪等水动力条件的变化,加剧海岸侵蚀,使多种海岸带灾害的破坏和影响加剧,形成错综复杂的灾害网(图 3)。根据已有研究资料表明,现代黄河三角洲沿岸的相对海平面上升主要是自然因素产生的地面沉降所致<sup>[7,9]</sup>。1965~1988年间,自然地面沉降在相对海平面上升

速率中约占 70%,预计 1996~2050 年间,因全球海平面上升速率的增大,自然地面沉降所占份额将会减小到 50%左右,但随着人为地面沉降因素的加大,地面沉降在相对海平面上升速率中仍占主导地位<sup>[3,7]</sup>。黄河三角洲地面沉降使局地海平面相对上升,在淹没沿岸低地的同时,可以使沿岸潮流、波浪和风暴潮作用增强,加速海岸蚀退。

#### 2.4.1 潮差加大,使潮流冲刷作用增强

潮流作用强度是由涨落潮流速度和潮差大小决定的。三角洲滨海区高潮发生的时间顺序是自西向东随时向先后依次出现; M<sub>2</sub>(38°08'41"N, 119°03'57"E)分潮无潮点及其周围不大的范围内为正规日潮区,由此向南、向西逐渐向半日潮过渡; 神仙沟以北潮波节点附近潮差最小,仅有 0.4 m,由此沿三角洲岸线向西、向南潮差均逐渐增大; 在 M<sub>2</sub>分潮无潮区和现行黄河口外附近各有一个强流区,且涨落潮流速不等,在近岸形成了伴随有独特潮流场的复杂潮汐现象<sup>[13, 22-23]</sup>。三角洲地面的均衡沉降会使周围海区海平面相对上升,使潮位进一步提高,造成潮波变形,潮位、潮流的相位差将会增大,加大潮差。这种由地面沉降引起的相对海平面上升还会因潮位增高以及潮流速度由于底摩擦减小而加大的原因,使潮流作用增强,潮滩侵蚀、堆积过程旺盛,从而导致现代侵蚀岸段的冲刷作用进一步加强。

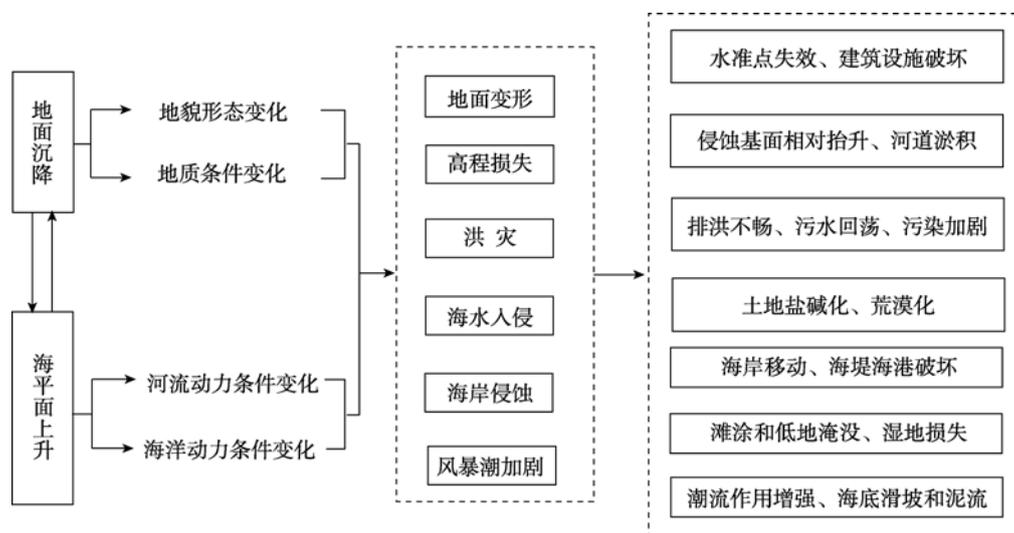


图 3 地面沉降加剧海岸带灾害链网

Fig. 3 Hazard interlink of land subsidence in the coastal area

#### 2.4.2 波浪作用增强,破坏海岸的稳定性

地面沉降引起相对海平面上升,使滩面水深加大,波浪的破碎和扰动作用增强,导致沿岸侵蚀加

剧。据波浪动力学理论,波能与波高的平方成正比,潮滩上的最大波高约为水深的 0.5 到 1 倍,而波能在近岸浅水区中的传输速度则与水深的平方根成正比,

所以,当岸外水深增加1倍时,波浪作用的强度可以增加5.6倍。波浪的破碎和扰动作用可以掀动滩面泥沙,破坏海岸的稳定性,是三角洲海岸侵蚀的重要因素。

有关学者在飞雁滩海岸侵蚀机理的研究中发现,该区全年有51.1%的波浪在0~0.64m的浅水带破碎,-2m水深以浅处为波浪的高频率破碎带和扰动带,导致0m水深附近成为蚀退速率最高的部位<sup>[22]</sup>。黄河三角洲沿岸相对海平面上升,造成0m水深线后退,波浪的高频率破碎带和扰动带顺潮滩逐渐上

移。现代黄河三角洲地势低平,利用该区DEM计算得到的坡度结果显示,坡度多集中在0.01%~0.04%(图2),即使是微弱的地面沉降,0m水深线也会大规模地后退,潮流输沙和波浪掀沙作用将会重新塑造海滩剖面,加剧海岸侵蚀。

### 2.4.3 风暴潮灾害加剧,改造海岸形态

黄河三角洲地处渤海南岸,受地形和风浪的影响,该区风暴潮灾害尤为强烈。黄河三角洲的侵蚀作用模式表明,已废弃三角洲岸段在蚀退后期,风暴潮作用可以对其进行改造,在高潮线附近堆积起贝

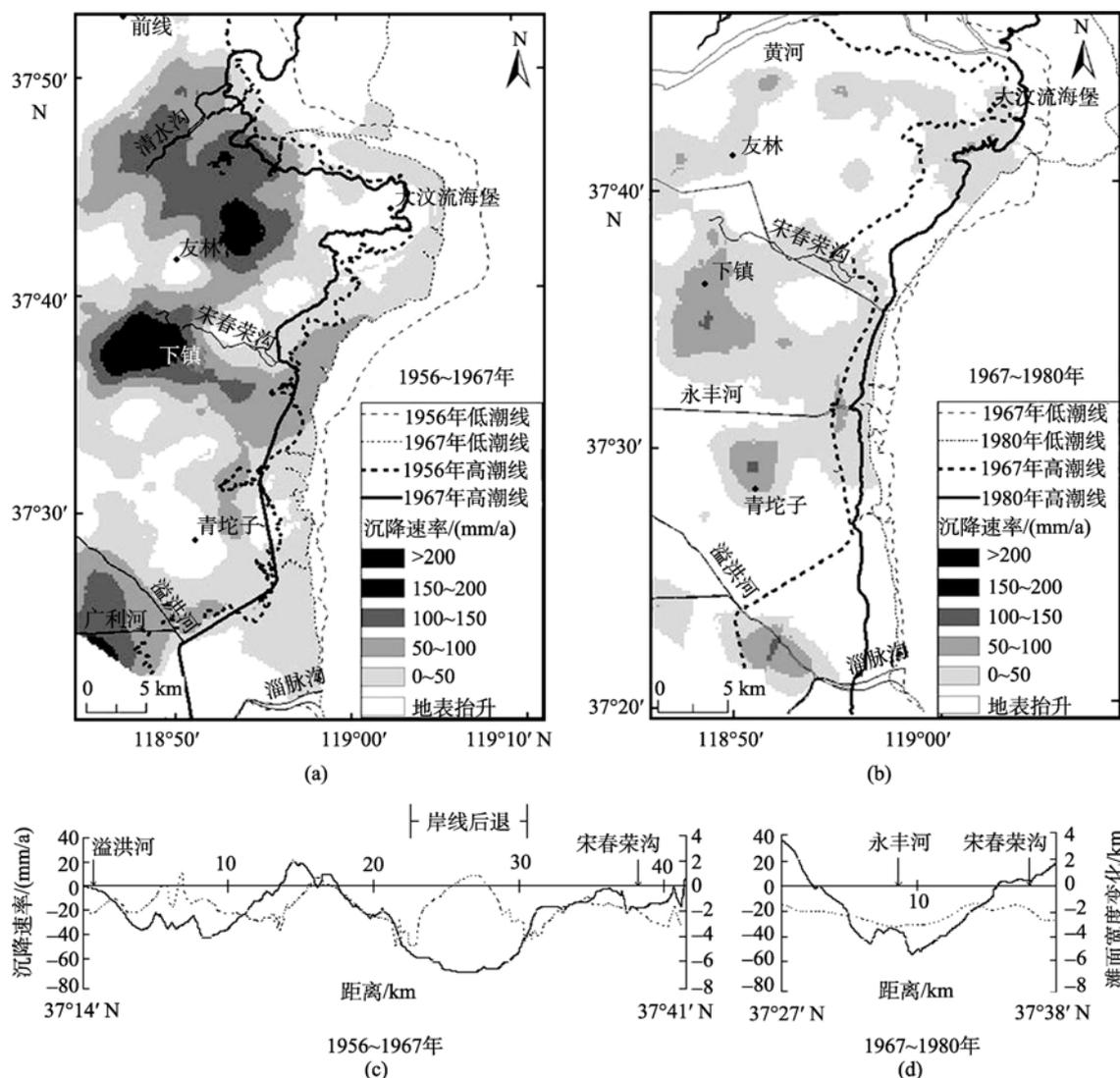


图4 黄河三角洲沿岸地面垂直形变速率和潮滩变化

Fig. 4 Distribution of vertical surface displacement rate and change of the coastline in the Yellow River Delta (a), (b) 分别表示 1956~1967 年、1967~1980 年黄河三角洲地面垂直形变速率和岸线变化; (c), (d) 分别表示 1956~1967 年、1967~1980 年潮滩宽度与地面垂直形变速率之间的关系(实线表示沉降速率,虚线表示潮滩宽度变化) (a) and (b) Distribution of vertical surface displacement rate and change of the coastline from 1956 to 1967 and 1967 to 1980, respectively; (c) and (d) The relationship between the tidal flats and the vertical surface displacement rate from 1956 to 1967 and 1967 to 1980, respectively (solid line: subsidence rate; dashed line: change of the coastline width)

壳砂堤。地面沉降致使局地海平面上升,使各种特征潮位相应增高,水深增大,波浪作用增强,增加了大于某一值的风暴增水出现频次,增加风暴潮成灾几率;此外,若风暴潮增水和高潮位叠加,将出现更高的风暴高潮位,增大风暴潮强度,加剧风暴潮灾,改造海岸形态,对海岸造成强烈侵蚀。

现代黄河三角洲的海岸侵蚀主要表现为岸线后退和滩面冲刷两种形式。前者主要发生在废弃黄河三角洲两侧,或目前尚无坚固防护工程的岸段;后者在多数岸段均有发生,目前三角洲沿岸多数地段因为修筑了人工防潮堤,岸线能保持稳定或向海延伸,但是潮滩和浅海海底却会处于强烈的冲刷状态,直至水深十几米处,海底浅滩基本处于冲淤动态平衡状态<sup>[24]</sup>,侵蚀结果是潮滩的宽度变窄,高程降低,坡度加大。如图 1 所示,宋春荣沟以南主要是 1897~1904 年和 1929~1934 年宋春荣沟和永丰河流行河期间形成的亚三角洲。该区沿岸自 20 世纪中期开始相继修筑了人工堤坝,高潮线基本趋于稳定或向海推进,但是从图 4(a), (b) 可以明显地看出,原潮滩在 1956~1980 年间受到不同程度的侵蚀,低潮线急剧后退,滩面宽度逐渐变窄。将沿高潮线提取的地面垂直形变和滩面宽度变化信息相叠加,可以看出,除高潮线发生后撤的岸段之外,二者之间存在着明显的相关性,地面沉降速率高的岸段,滩面宽度变化量也大(图 4(c), (d))。特别是 1967~1980 年间,虽然大多数岸段地表表现为抬升区,但从图 4 中不难看出,在高潮线向海推进的同时,低潮线在沉降区后撤,抬升区则基本保持不变,如宋春荣沟以北和滋脉沟以北部分岸段,这都体现了局部地表形变对海岸侵蚀的影响。

### 3 结语

现代黄河三角洲地区特殊的自然地理条件,使该区地面沉降除具有缓慢、累进和过程不可逆的特点之外,同时具有多因素性和时空差异性的特点,不仅加大了对三角洲生态环境的危害,同时也给该区地面沉降的监测、管理和综合防止都带来了一定的困难。三角洲地面沉降对洲体演变的影响主要表现在以下三个方面:(1)通过改变地面标高和坡降,影响下游河道的冲淤演变;(2)差异性的地面标高损失,影响河流的尾间摆动及废弃三角洲叶瓣被重新启用的可能性;(3)通过增加相对海平面上升的份额,在淹没沿岸低地的同时,促使沿岸潮流、波浪和风暴

潮作用增强,加速海岸蚀退和潮滩冲刷。

黄河三角洲地面沉降引发的一系列环境地质效应,严重影响了三角洲地区的生态环境和社会经济的高速发展。因此,正确认识三角洲地面沉降对自然环境要素的影响机理,做好科学防范措施,将是紧迫而长期的任务。

#### 参考文献:

- [1] 尹延鸿,周永青,丁东. 现代黄河三角洲海岸演化研究[J]. 海洋通报, 2004, 23(2): 32-40.
- [2] 张惠,颜世强,刘桂仪. 黄河三角洲的形成和演变[J]. 山东国土资源, 2003, 19(6): 44-47.
- [3] 任美镔. 海平面上升与地面沉降对黄河三角洲影响初步研究[J]. 地理科学, 1990, 10(1): 48-57.
- [4] 别君. 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 肖笃宁,韩慕康,李晓文,等. 环渤海海平面上升与三角洲湿地保护[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 237-246.
- [8] 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, 增刊: 36-38.
- [9] 任美镔. 黄河长江珠江三角洲近 30 年海平面上升趋势及 2030 年上升量预测[J]. 地理学报, 1993, 48(5): 385-393.
- [10] 宋波,王德生,王锦丽. 东营地面沉降监测[J]. 地矿测绘, 2004, 20(1): 34-36.
- [11] 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.
- [12] 薛禹群,张云,叶淑君,等. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 585-593.
- [13] 庞家珍,姜明星. 黄河河口演变(I)—(一)河口水文特征[J]. 海洋湖沼通报, 2003, 3: 1-13.
- [14] 成国栋. 黄河三角洲现代沉积作用及模式[M]. 北京:地质出版社, 1991: 2, 105-106.
- [15] 钱意颖,叶青超,周文浩. 黄河流域环境演变与水沙运行规律研究[M]. 北京:中国建材工业出版社, 1993: 53-76.

- [16] 师长兴. 黄河下游持续淤积原因地质历史分析[J]. 人民黄河, 1997, 2: 57-60.
- [17] 尹学良, 陈金荣. 黄河下游河道纵剖面形成概论及持续淤积的原因[J]. 人民黄河, 1993, 2: 1-4.
- [18] 师长兴. 黄河河口延伸与下游淤积关系研究中的问题分析[J]. 地理科学, 2005, 25 (2): 183-189.
- [19] 魏合龙, 李广雪, 周永青. 侵蚀基准面变化对河流体系的影响[J]. 海洋地质动态, 1995, 5: 4-6.
- [20] 成国栋. 黄河三角洲沉积地质学[M]. 北京:地质出版社, 1997: 48-65.
- [21] 庞家珍, 司书亭. 黄河河口演变 I .近代历史变迁[J]. 海洋与湖沼, 1979, 10(2): 136-141.
- [22] 陈沈良, 张国安, 陈小英. 黄河三角洲飞雁滩海岸的侵蚀及机理[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(3): 9-14.
- [23] 季子修, 蒋自巽, 朱季文, 等. 海平面上升对长江三角洲和苏北滨海平原海岸侵蚀的可能影响[J]. 地理学报, 1993, 48(6): 516-526.
- [24] 冯秀丽, 吴世强, 林霖, 等. 黄河三角洲埕岛近岸海域悬浮泥沙运动[J]. 海洋科学, 2003, 27(12): 66-70.

## Land subsidence in the modern Yellow River Delta and its impacts upon its evolvement

DU Ting-qin<sup>1, 2</sup>, HUANG Hai-jun<sup>1</sup>, BIE Jun<sup>3</sup>

(1. Institute of Oceanology, Key Laboratory of Marine Geology and Environment, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Shandong Academy of Environmental Science, Key Laboratory, Jinan 250013, China; 3. North China Sea Airborne Detachment of China Marine Surveillance, State Oceanic Administration Peoples Republic of China, Qingdao 266033, China)

**Received:** Dec., 11, 2010

**Key words:** the modern Yellow River Delta; land subsidence; riverbed deposition; coastal erosion

**Abstract:** The causes for the evolvement of the modern Yellow River Delta have been a main topic for a long time. Recent studies have shown that the entire modern Yellow River Delta has experienced complicated patterns of land subsidence. Our study analyzed the characteristics and impacts of the land subsidence, and particularly discussed the effect to the development of the delta. Factors including structural geology, the sediment consolidation, and human activity have simultaneously affected the pattern of land subsidence over the highly developed Modern Yellow River Deltaic area but with various degrees of effect as a function of region and time. Subsidence has induced marked environmental geologic changes, including coastal erosion, storm surge disaster enhanced, and salt water incursion. Its impact is particularly critical because of the flat low-lying topography and the presence of a thick soft silt layer at the ground surface. The accumulating land subsidence can change the surface slope, consequently influencing the riverbed and estuary evolution. Additionally accumulating land subsidence has increased the rise of the relative sea level, changed the models of coastal erosion, forced the coastline retreat landward, and narrowed the tidal flats at an accelerating rate with the strengthened hydrodynamic action. The land subsidence in the Yellow River Delta will continue owing to the time-dependent consolidation behavior of the soft silt layer and anthropic activity; therefore, the further research on the land subsidence is urgently needed to be actualized.

(本文编辑: 刘珊珊)