

黄河三角洲地区地面沉降驱动因素研究

刘桂卫^{1,2,3}, 黄海军^{1,2}, 杜廷芹⁴, 别君², 陈纪涛⁵

(1. 中国科学院 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 4. 山东省环境保护科学研究设计院, 山东 济南 250013; 5. 黄河水利委员会山东水文水资源局, 山东 济南 250010)

摘要: 黄河三角洲地区地势低平、生态脆弱, 地面沉降使得海水入侵和风暴潮灾害加剧。弄清该区域地面沉降驱动因素, 对油田安全生产和湿地生态保护都有积极的意义。以 20 m 地层为界, 将地面沉降驱动因素分为浅地层和深地层因素。分析了地表荷载增加、地下水和油气开采、沉积物固结压实、新构造运动等对该区地面沉降的驱动作用。此外, 探讨了海平面上升和地震灾害对该区地面沉降的影响。结果表明: 该区地面沉降驱动因素主要为沉积物固结和地下水开采, 但控制范围存在区域性差异; 1969 年地震使该区产生明显地面沉降, 海平面上升使该区地面沉降形势更加严峻。

关键词: 地面沉降; 地下水开采; 固结压实; 黄河三角洲

中图分类号: P642.5; P642.26

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2011)08-0043-08

地面沉降是在自然和人为因素作用下, 由于地壳表层土体压缩而导致区域性地面标高降低的一种环境地质现象, 是一种不可补偿的永久性环境和资源损失^[1]。由于各种自然和人为因素所驱动的地面沉降在深度、时间和范围等方面的不同, 海岸带运动特征有其复杂的区域模式。构造的、第四纪湖泊或浅海沉积的欠固结沉积物的固结作用, 新近沉积物的压实固结、地下水的流失等, 都会产生地面沉降^[2]。只有综合考虑地质、地貌、水文和人类活动等作用, 才能完全清晰地解释地面沉降产生的原因及主要驱动因素, 采取有效的解决手段^[3]。

由于现代黄河三角洲地区复杂的地质构造背景、独特的沉积特征及不同的人类开发活动等, 使得该区地面沉降的影响因素较多, 沉降机理复杂。几十年来, 人们从各自研究的领域对黄河三角洲地面沉降进行了分析。提出新构造运动、沉积物固结压实和人类活动(包括油气及地下水开采等)等为黄河三角洲地面沉降的影响因素^[4-5]。然而, 三角洲地面沉降的主控因素及各要素的影响程度研究还有待深入, 尤其是海平面上升和地震等灾害对该区地面沉降的影响还不明确。本文在综合考虑自然因素和人类活动的基础上, 根据黄河三角洲沉积特征对地面沉降驱动因素进行分层研究, 探讨各沉降因素的影响权重, 以弄清该区地面沉降驱动因素。为以后该区地面沉降机理及预测研究打下基础, 为油田安全开采提

供参考。

1 黄河三角洲地面沉降驱动因素分析

黄河三角洲地区晚侏罗纪以来沉积特征为: 晚侏罗纪-白垩纪, 在济阳拗陷盆地内堆积了厚 1 300~4 800 m 的河湖及滨海相砂岩、泥岩夹油页岩及生物碎屑岩; 中新世—上新世, 区内沉积了 750~1 700 m 的陆相河流砂岩和泥岩; 第四纪沉积了厚约 350 m 的碎屑岩层; 全新世地层厚度一般在 26 m 左右, 主要是第三次海侵后形成的海向层和黄河三角洲沉积层^[6]; 而 1855 年以来形成的现代黄河三角洲沉积厚度一般小于 20 m。新近沉积的松散沉积物仍未完成压实作用, 而年代较久的沉积物已基本完成固结压实过程。由此, 本文以 20 m 地层为界, 将研究区地面沉降分为浅地层沉降(一般在 20 m 以内)和深地层沉降(20 m 至几千米)。浅地层沉降影响因素主要有 1855 年以来新近沉积物的固结压实沉降、地表荷载增加及地下水开采等; 深地层沉降影响因素主要有新构造运动、石油开采等。

收稿日期: 2010-11-10; 修回日期: 2011-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(40676037); 中国科学院重要方向项目资助(kzcx2-ew-207)

作者简介: 刘桂卫(1982-), 男, 黑龙江海伦人, 博士, 主要从事地质遥感应应用研究, 电话: 022-26175770, E-mail: liuguiwei@tsdig.com; 黄海军(1963-), 通信作者, 男, 湖南湘潭人, 研究员, 博士, 主要从事海岸带遥感与地理信息系统研究, E-mail: hjhuang@qdio.ac.cn

1.1 浅地层沉降影响因素

影响浅地层地面沉降的影响因素包括地表荷载的增加、地下水开采、沉积物固结压实、土壤表层有机质氧化等。黄河三角洲表层土壤以潮土、盐土为主,其次是褐土,少量砂姜黑土和水稻土。土壤缺乏有机质,普遍缺氮,严重缺磷,氮磷比例失调。有机质氧化对该区地面沉降的影响可以忽略。

1.1.1 地表荷载增加对该区地面沉降的影响

该区地表荷载的增加主要为城镇化和大型工厂的建设。根据黄河三角洲地区 1967, 1980 和 1995 年三个时期 1: 50 000 地形图得到数据分析看, 1967~1995 年将近 30a 间黄河三角洲地区城镇化发展迅速, 城镇面积大幅增加。黄河三角洲浅地层沉积物主要由细粒泥砂组成, 下部为黏土质粉砂, 黏土质粉砂软弱易变, 具有很大压缩性, 城镇楼宇的建设必然带来局部的地基下沉, 产生地面沉降。但从城镇分布与该区地表高程变化看, 二者并无明显对应关系, 这种地面沉降只是短期的局部的。

1.1.2 地下水开采对该区地面沉降的影响

黄河三角洲地区地下水水质分布, 仅在小清河以南广饶县境内的井灌区 342 km² 范围内有浅层淡水, 地下水水质较好, 是当地的重要水源。而除井灌区外, 其余的广大地区均属咸淡水混合区和咸水区, 浅层地下水矿化度较高, 均在 5~20 g/L 范围内, 不宜采用, 灌溉形式主要为引黄、引河灌溉。黄河三角洲地区地下水开采主要集中在广饶县小清河以南的井灌区。1975 年以后, 由于连年干旱, 同时对开采地下水缺乏统一的控制管理, 致使该区地下水超量开采, 尤其是部分相对富水区, 工农、城乡竞相开采, 井的密度和深度不断加大, 地下水位大幅度下降。到 2001 年已形成以大王镇政府驻地、稻庄镇政府驻地、县城规划区、石村镇辛桥为中心的 4 个地下水漏斗

区, 其中以大王镇漏斗区中心地下水位最低, 为 -18.40 m。从收集的大王镇西营和陈官(位置见图 1)地下水资料看(表 1), 地下水位从 20 世纪 70 年代平均 14.86 m 和 11.97 m, 下降到近几年(2000 年以后)的 -7.73 m 和 -13.99 m。平均地下水位分别下降 22.59 m 和 25.96 m, 下降速率分别为 0.98 m/a 和 1.13 m/a。通过该区 2007~2008 年 D-InSAR 沉降监测结果对比分析可见(图 1), 小清河以北仅有零星地面沉降区, 且沉降幅度较小; 沉降主要发生在小清河以南地区, 尤其在大王镇周围地区, 沉降速率在 15 mm/a 以上, 呈块状连续分布, 面积约为 105 km²。由以上分析可见, 小清河以南地下水开采漏斗中心区已发生明显的地面沉降现象。

1.1.3 新近沉积物固结压实对地面沉降影响

小清河以南地区沉积物形成时间较久, 基本已完成固结压实作用。小清河以北的扇形地区沉积物主要为 1855 年以来形成的浅层松散沉积物(厚度一般不超过 20 m), 这里主要探讨其固结沉降。杜廷芹^[8]利用一维固结理论, 采用分层总和法计算了黄河三角洲浅层砂土、软体及黏性土的沉降特征, 计算得到新近沉积物平均固结沉降速率约为 15 mm/a。但在实际的压缩过程中, 受孔隙水排放速度及上覆沉积物缓慢累计施加等作用, 固结过程会更加缓慢, 实际沉降速率较计算值要小。由于缺少近期沉积物的土力学和应力变化资料, 很难计算实际的固结沉降速率。根据刘桂仪等^[9]1953~2000 年地面沉降观测资料, 黄河三角洲地区地面沉降速率为 4~8 mm/a, 结合任美镔^[10]给出的现代黄河三角洲沉降速率, 认为目前黄河三角洲浅地层沉积物平均固结压实速率约为 3~4 mm/a。

此外, 利用收集到的 1967, 1995 和 2003 年三个时期的数字高程数据, 分析废弃河口流路地区地面沉降分布情况(图 2)。虽然数据处理中存在几何校正

表 1 大王镇附近地面快速沉降区地下水位变化统计表^[7]

Tab. 1 Changes of groundwater level in the fast land subsidence areas of Dawang town

地 点	年 代	多年平均水位 (m)	最高水位		最低水位		平均下降 值 (m)	平均下降 速度 (m/a)
			时间 (年-月)	水位 (m)	时间 (年-月)	水位 (m)		
大王镇西营	20 世纪 70 年代	14.86	1976-09	16.56	1977-06	12.75	22.59	0.98
	近几年	-7.73	2003-02	-6.81	2002-07	-9.37		
大王镇陈官	20 世纪 70 年代	11.97	1975-01	14.01	1978-06	8.02	25.96	1.13
	近几年	-13.99	2001-06	-7.70	2001-07	-20.82		

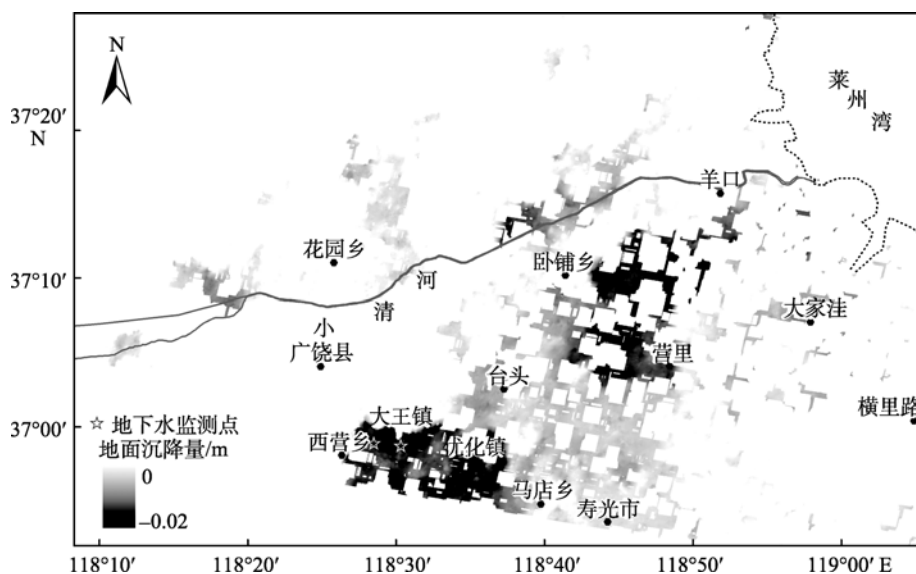


图 1 小清河以南地下水开采区 2007~2008 年 D-InSAR 沉降监测

Fig. 1 Land subsidence surveyed by D-InSAR in the groundwater exploitation areas from 2007 to 2008

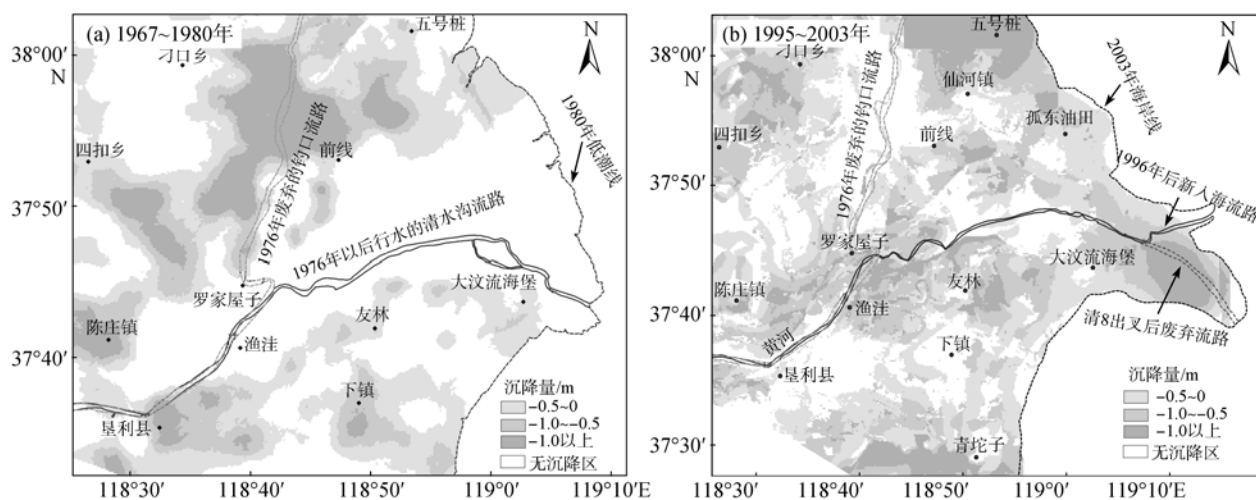


图 2 废弃黄河河口流路地区地面沉降发展趋势

Fig. 2 Trend of land subsidence in the abandoned Yellow River mouth areas

和空间插值等误差, 但其所呈现的地面形变趋势是可信的。1967~1980 年段, 1976 年废弃的钓口流路区域发生了快速的地面沉降, 沉降幅度大都在 1 m 以上(图 2a); 而 1995~2003 年段, 钓口流路大部分地区已没有明显的地面沉降发生, 沉降区沉降幅度一般在 0.5 m 以下。但在此期间, 1996 年清 8 出叉后废弃的现行河口流路地区则出现了明显的地面沉降, 沉降幅度在 1 m 以上(图 2b)。由此可见, 黄河河口流路区域在废弃初期(5 a 内)会发生明显的地面沉降现象, 而后沉降幅度逐渐减小, 沉降一般在流路废弃后 30 a 左右完成。分析其原因主要为新近沉积物固

结沉降所致, 沉积物固结沉降经历一个由快到慢的过程。师长兴等^[11]认为钓口河三角洲废弃已有 20 a 多, 但海岸仍然没有自然稳定下来, 可能与沉积物自然固结压缩有一定关系。

1.2 深地层沉降影响因素

该区深地层地面沉降主要由地壳垂直运动及油气开采引起。地壳垂直运动引起的地面沉降, 与其他因素引起的局部地面沉降性质不同, 二者的准确区分, 对研究区域地表形变的发生发展机制、趋势预测等都具有重要的意义。油气开采引起的地面沉降在该区域的研究刚刚开始, 研究其沉降机理对油田区

生态环境保护有很大的现实意义。

1.2.1 新构造运动对该区地面沉降的影响

黄河三角洲地区位于郯庐断裂带西侧,区内次级断裂发育,多为NW-SE走向。李广雪等^[12]通过钻孔的联合对比剖面,揭示出本区晚更新世以来的新构造运动表现为二凹夹一隆的构造特征,黄河三角洲地区位于第一拗陷区。本区第三纪开始即出现整体地壳沉降,第四纪以来表现为继承性缓慢下沉。而这种地壳沉降带有区域均衡性的特征,不同于局部的地面沉降。冯浩鉴等^[13]从混合形变量中提取出中国东部地区构造运动引起的形变量(图3),黄河三角洲地区地壳下沉速率为1~2 mm/a。李延兴等^[14]根据现代地壳垂直运动划分中国大陆活动地块边界,在划分出的3个II级地块中,华北地块处于微弱的下沉状态,全区平均下沉速率为2 mm/a。二者所得结果基本一致。构造运动的方向和速率往往长时间保持不变,可认为黄河三角洲第四纪以来新构造运动沉降速率为2 mm/a。

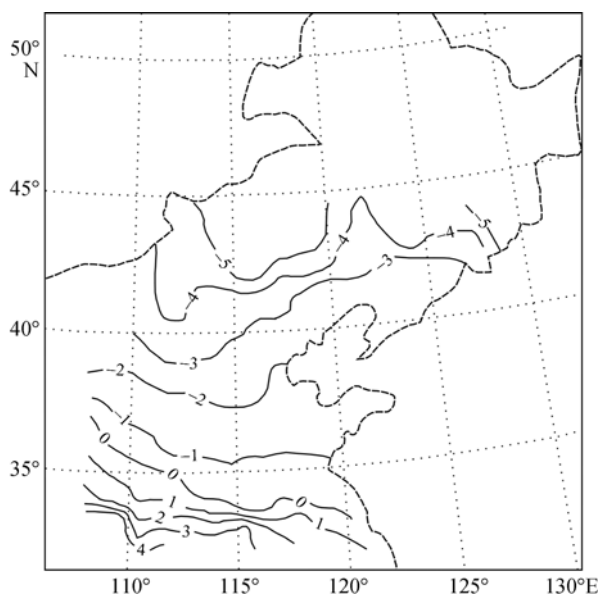


图3 华北地块地壳垂直运动速率等值线图^[13]

Fig. 3 The rate of the crustal vertical movement in the northern part of China

1.2.2 石油开采对该区地面沉降影响

现代黄河三角洲位于济阳断陷和埕宁隆起交界处。济阳断陷盆地在早第三纪堆积了厚几千米的河湖及滨海相砂岩、泥岩夹油页岩及生物碎屑岩。下第三系被深埋,促使有机质演化,形成油气田。自1964年胜利油田正式投入开发建设以来,该区已累计生产原油9.36亿t,生产天然气399.35亿m³。油

田开采导致的地面沉降出现在国内外许多大型油田,如美国的Wilmington油田,我国的大庆油田等。在胜利油田地区,刘桂仪等^[9]研究得到东营区及附近石油开采区地面沉降速率在10 mm/a左右,而别君等^[4]得到宁海东南地面沉降区位于油田开采核心区,二者都认为石油开采对地面沉降产生一定的影响。本文通过济阳断陷内油田分布与该区1967~1995年地形数据获得的地面沉降资料进行叠加分析可见(图4),油田开采与地面沉降区二者没有直接的对应关系,部分沉降区位于油田开采区,其余则位于油田开采区外。结合上述研究成果,认为油田开采对该区沉降产生了局部影响,加剧了部分地区的沉降趋势。受资料所限,油气开采对沉降的影响还需进一步研究,应着重研究油气开采对储层岩石骨架及空隙压力变化的作用,进而探讨油藏地层压实对地面沉降的影响。

2 其他影响因素

2.1 海平面绝对上升对该区地面沉降的影响

《2009年中国海平面公报》显示,近30 a来,中国沿海海平面总体呈波动上升趋势,平均上升速率为2.6 mm/a,其中渤海海平面平均上升速率为2.3 mm/a。海平面上升速率呈加快的趋势,国家海洋局预计,未来30 a,中国沿海海平面将继续保持上升趋势,将比2009年升高80~130 mm。海平面上升速率最高将达到4.3 mm/a,与任美铎^[10]计算得到2030年现代黄河三角洲理论海平面上升速率将达到4.5 mm/a基本一致。据此,估算到2050年现代黄河三角洲绝对海平面上升量可达16~18 cm。海平面的绝对上升使得现代黄河三角洲的地面沉降形势和危害变得更为严峻。其长期的累积效应将加剧风暴潮、海岸侵蚀、海水入侵、土壤盐渍化和咸潮等海洋灾害的致灾程度。

2.2 地震对该区地面沉降的影响分析

强地震常使震中附近地区地面大幅度沉降^[15]。如1976年唐山大地震使得唐山下沉655 mm,目前唐山地区地表垂直形变面貌基本上是1976年大地震时造成的^[16];黄河三角洲地区也是一个现代地震活动强烈的地区,1969年渤海海底曾发生7.4级地震,1975年有营口7.3级大地震,1976年有唐山7.8级大地震。但营口与唐山地震震中距离现代黄河三角洲地区较远,对其地面沉降影响不大。但1969年渤海海底地震可能对该区地面沉降产生影响。

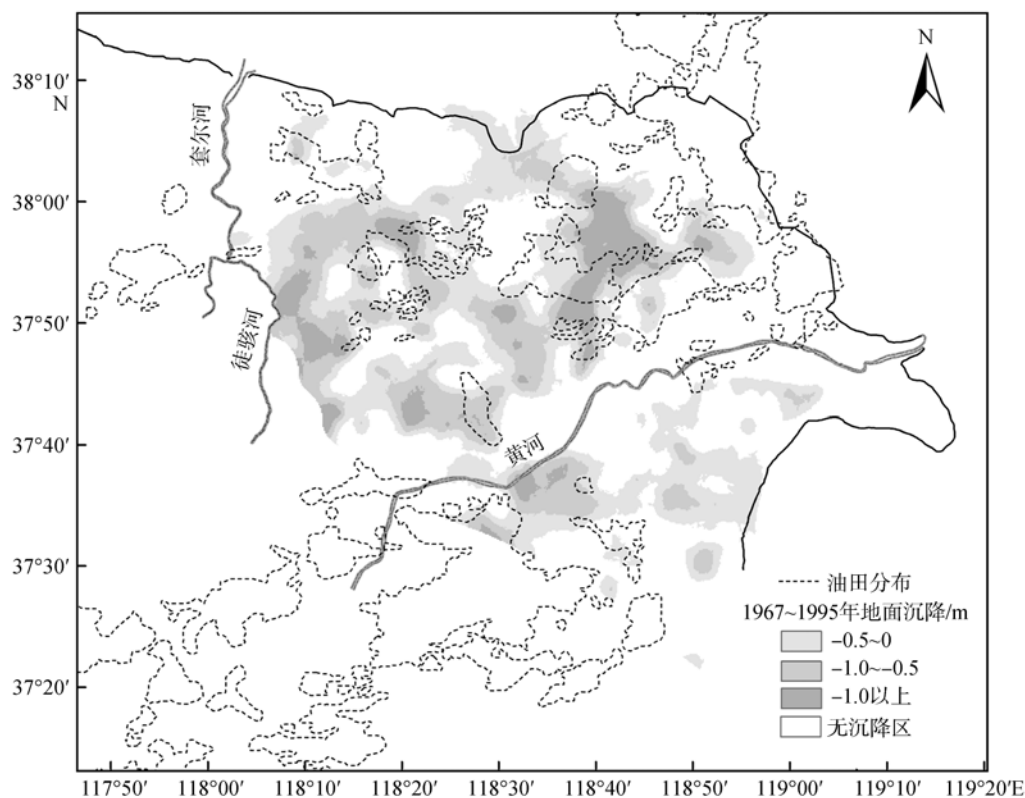


图4 油田开采区与1967~1995年地面沉降区的对比

Fig. 4 Comparison between the land subsidence and the oil exploration area from 1967 to 1995

本文选用黄河三角洲地区4个二等水准点(位置见图5)高程重复测量数据作为研究基础,探讨地震对该区地面沉降的影响。4个二等水准点1964, 1983, 1994和2002年的高程变化见图6, 1964~1983年段4个二等水准点都出现了不同程度的下沉, II-1, II-2, II-3和II-4分别下沉了163, 157, 146和154 mm, 认为主要为1969年渤海海底地震所致。但地震影响后, 四个二等水准点高程变化升降不一, 其中II-1和II-4点持续下沉, 而II-2和II-3点出现了回弹变形。通过对比四个二等水准点基底沉积物特征, 发现II-1和II-4水准点分布在厚度为8 m的软土区, 而II-2和II-3水准点浅地层基底则没有软土存在, 主要为砂性土层和黏土层(图5)。不同沉积物受地震影响后表现出不同的特征: 砂性土层和黏土层在地震中液化和固结, 而后出现回弹变形; 软土中黏粒含量较高, 颗粒间的水胶联结和静电引力与分子引力联结, 而使其具有明显的触变性, 使其在较低的强度下受到破坏后也难以恢复^[17]。在地震作用下, 该区软土发生触变变形, 叠加固结作用, 表现为先快后慢的持续沉降过程。因此, 地震产生

的实际地面沉降量较1964~1983年II-1和II-4点沉降量小, 但比同时期II-2和II-3点沉降量大。该时期II-1和II-4点平均地面沉降量为158 mm, II-2和II-3点平均地面沉降量为151 mm, 可以推断1969年渤海地震造成黄河三角洲地区地面沉降量在151~158 mm之间。魏光兴^[18]指出1969年地震使该区256 m长的黄河大堤发生沉陷, 沉陷深度达20~30 cm。与本文计算结果基本一致。可见地震这种突发灾害对该区地面沉降影响较大, 一次强震所致沉降量甚至相当于自然状态下十几年的沉降结果。所以, 在大量松散沉积物存在的沿海低平原地区, 尤其是河口三角洲等地, 要十分重视强震带来的地面沉降问题。

3 进一步研究展望

随着黄河三角洲战略地位的不断提高和社会经济的不断发展, 加深对黄河三角洲地区地面沉降过程及影响研究有着非常重要的现实意义。许多问题的研究还需要进一步深入, 主要体现在以下几个方面。

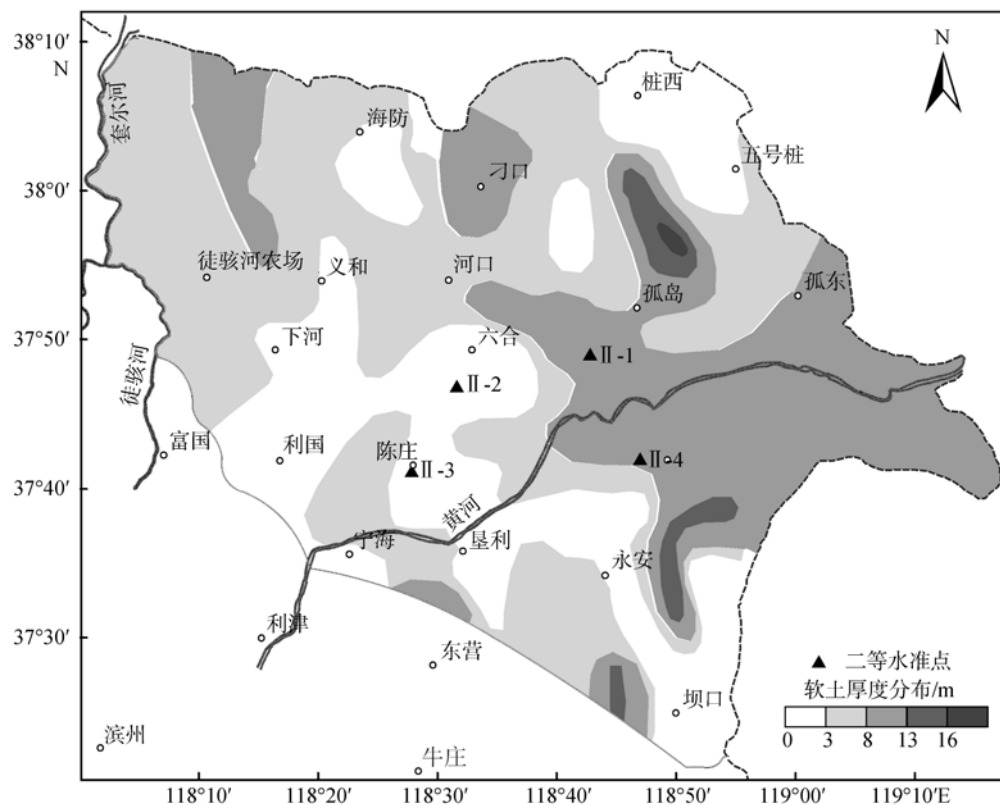
图5 黄河三角洲软土分布与二等水准点位置^[19]

Fig. 5 The positions of the second-level benchmarks and soft clay distributing in the Yellow River delta

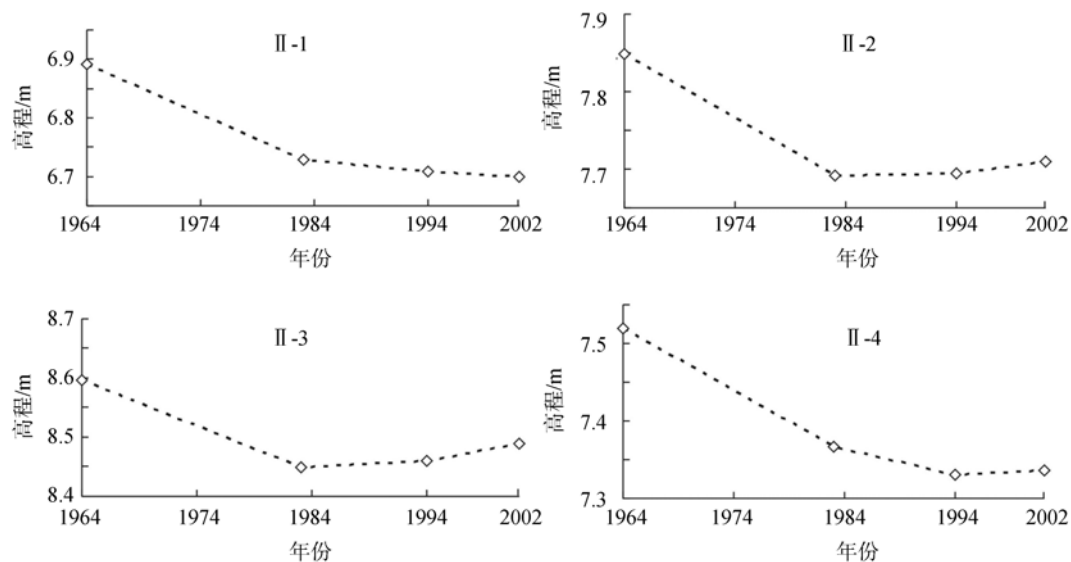


图6 二等水准点高程变化

Fig. 6 Elevation changes of the second-level benchmarks

3.1 加强地面沉降监测及预测

应当强化该区地面沉降的长期监测, 差分 GPS、D-InSAR 等高技术手段的应用需在时序上加以延长,

短期的沉降监测无法说明长期的变化趋势。该区地下水位变化带有明显的季节性, 使地面沉降过程变得更为复杂; 加强土力学实验研究, 弄清该区沉降机理, 加强沉降预测。

3.2 开展地面沉降对环境的影响研究

地面沉降对环境的影响越发引起人们的关注,尤其在地势低平的海岸带地区。然而,地面沉降和日益频繁的人类活动对黄河三角洲洲体发育和黄河流路变迁的驱动作用等研究,亟待深入开展;地面沉降对黄河三角洲岸滩蚀退及防护措施影响的研究,目前还处于初级阶段;开展该区地面沉降的环境效应研究,对整个三角洲地区的经济建设和防灾减灾政策的制定都有重要作用。

3.3 深化多因素耦合下成灾风险分析

在全球变暖的大背景下,综合考虑地面沉降与风暴潮等灾害之间的耦合关系,探讨其对三角洲滨海湿地生态系统、海岸侵蚀、咸水入侵等的影响,对成灾风险的评价和预测有着积极的作用。尤其是考虑多种因素耦合作用下,黄河三角洲的发育演化模式研究还有许多工作要做。

4 结论

综合分析所得资料和前人研究成果,得到以下几点认识:(1)黄河三角洲地区地面沉降受自然和人为因素共同影响。但主控因素存在区域差异性:在小清河以北地区主要受构造运动和浅地层沉积物固结沉降影响,平均沉降速率在4~5 mm/a之间;在小清河以南地区主要受地下水开采影响,目前,地下水超采漏斗中心区沉降速率在10~25 mm/a之间;(2)石油开采加剧了局部地面沉降趋势。1969年渤海地震导致黄河三角洲地区产生15 cm左右的地面沉降。此外,全球变暖使得该区在未来40年内绝对海平面上升16~18 cm。可见,地震灾害和全球变暖使该区地面沉降形势更加严峻。

黄河三角洲地面沉降研究还处于初级阶段,地面沉降的监测及其对环境的影响研究亟待深入。

参考文献:

[1] 崔振东,唐益群.国内外地面沉降现状与研究[J].西北地震学报,2007,29(3):275-278.

[2] van Asselen S, Stouthamer E, van Asch T J. Effects of peat compaction on delta evolution: A review on processes, responses, measuring and modeling [J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92(1-2): 35-51.

[3] Tosi L, Teatini P, Carbognin L, et al. Using high reso-

lution data to reveal depth-dependent mechanisms that drive land subsidence: The Venice coast, Italy [J]. Tectonophysics, 2009, 474: 271-284.

[4] 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.

[5] 秦伟颖,庄新国,黄海军.现代黄河三角洲地区地面沉降的机理分析[J].海洋科学,2008,32(8):38-43.

[6] 成国栋,薛春汀.黄河三角洲沉积地质学[M].北京:地质出版社,1997.

[7] 于治通.莱洲湾南岸淄河下游咸水入侵调查与研究[D].青岛:中国海洋大学,2006.

[8] 杜廷芹.现代黄河三角洲地区地面沉降特征研究[D].青岛:中国科学院海洋研究所,2009.

[9] 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,B12:36-38.

[10] 任美镠.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.

[11] 师长兴,尤联元,李炳元,等.黄河三角洲沉积物的自然固结压实过程及其影响[J].地理科学,2003,23(2):175-181.

[12] 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].中国海洋大学学报,1998,28(1):161-166.

[13] 冯浩鉴,顾旦生,张莉,等.中国东部地区地壳垂直运动规律及其机制研究[J].测绘学报,1998,27(1):16-23.

[14] 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,2001,23:11-16.

[15] 任美镠.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.

[16] 应绍奋,沈永坚,郭良迁.渤海沿岸地区的现代构造运动[J].中国地震,1986,2(1):29-34.

[17] 冯秀丽,沈渭栓,杨荣民,等.现代黄河水下三角洲软土沉积物工程地质特性[J].青岛海洋大学学报,

- 1994, s3: 132-137.
- [18] 魏光兴, 孙昭民. 山东省自然灾害史[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [19] 田洪水, 肖俊华, 赵淑慧, 等. 黄河三角洲软土的特征及地基处理方法[J]. 山东建筑工程学院学报, 2003, 18: 24-27.

Effective factors of land subsidence in the Yellow River Delta

LIU Gui-wei^{1,2,3}, HUANG Hai-jun^{1,2}, DU Ting-qin⁴, BIE Jun², CHEN Ji-tao⁵

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 4. Shandong Academy of Environmental Science, Jinan 250013, China; 5. Hydrology and Water Resources Bureau of Shandong, Jinan 250010, China)

Received: Nov., 10, 2010

Key words: land subsidence; groundwater exploitation; sediment consolidation; the Yellow River Delta

Abstract: The Yellow River Delta with the low terrain has a fragile eco-system. Land subsidence has led to serious seawater intrusion and storm surge disaster. Studying the effective factors of land subsidence in the area is helpful for oil field safety and ecological conservation of wetland. With the 20 meters depth stratum as the boundary, the effective factors of land subsidence in the Yellow River Delta were divided into two categories, shallow and deep. The effective factors like the increased surface load, groundwater and oil exploitation, sediment consolidation, and neotectonics were discussed in this paper. Furthermore, the effects of sea-level rise and earthquake were also studied. Our results showed that sediment consolidation and groundwater exploitation, which dominated different areas subsidence, were the two main factors for land subsidence. The earthquake at 1969 had led to significant land subsidence, and sea-level rise made the subsidence situation more severe.

(本文编辑: 刘珊珊)