

现代黄河三角洲地区地面沉降的机理分析

秦伟颖^{1,3}, 庄新国¹, 黄海军²

(1. 中国地质大学 资源学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 3. 江西省煤田地质勘察研究院, 江西 南昌 330001)

摘要: 利用前人在现代黄河三角洲地区进行的大量的野外调查和研究结果, 对黄河三角洲地面沉降与第四系沉积体系、构造之间的对应关系进行了研究。研究结果表明现代黄河三角洲地区地面沉降除了因人类活动导致地面缓慢沉降外, 新构造运动、第四系沉积相的分布也与三角洲沉降存在很好的相关性。研究区沉降区域的分布与主要断裂带相对应, 软土的分布基本上控制了主沉降区的边界。研究结果可为以后三角洲的开发利用和管理以及其他三角洲地面沉降或地质灾害的监测提供必要的基础资料。

关键词: 现代黄河三角洲; 地面沉降; 第四系沉积

中图分类号: P512.2; P642.5; P642.26

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)08-0038-06

地面沉降现象是在经济高速发展过程中不断加大地下资源开发而产生的环境地质问题, 是指区域性地面高程下降的现象, 一般是通过测量地面水准点的高程变换而发现的。三角洲地面沉降引发一系列环境问题: 造成大面积海水入侵, 使三角洲生态环境进一步恶化; 海岸侵蚀加重, 并危及海堤、海港及油田设施等重大工程建筑的安全, 降低各项设施对各类海洋灾害的抵御能力; 导致输油管线变形或断裂, 造成单井出油量减少, 建筑物倾斜、裂缝, 严重影响油田的工程建设^[1]。因此, 对黄河三角洲地区进行地面沉降监测研究是十分必要的。

黄河含沙量高、输沙量大、沉积速率高、河道频繁变迁, 因而沉积环境极不稳定, 而近代黄河三角洲(后仅称黄河三角洲或三角洲)又是国内少有的资源丰富集区。近几十年来, 尽管我国对黄河三角洲演变的研究成果颇丰, 但大都集中在黄河水沙变化, 以及由此而产生的海岸蚀退、海水入侵等环境问题方面, 对地面沉降的研究相对较少。作者利用青岛海洋地质研究所与荷兰合作项目“黄河三角洲现代沉积作用、沉积模式及其古相沉积物中的应用”的研究成果与别君等人通过高程变换得到的黄河三角洲沉降区域图进行对比, 对该区进行了地面沉降机理研究, 以期为以后三角洲的开发利用和管理以及其他三角洲地面沉降或地质灾害的监测研究积累资料和提供依据。

1 第四系地质特征

近代黄河三角洲是 1855 年黄河改道入渤海后淤积而成, 以宁海为顶点, 淄脉沟口为南界, 徒骇河口为西界, 向海伸展到 16 m 等深线附近的扇形堆积体, 由 10 个先后围绕不同时期的河口河道发育的亚黄河三角洲叠置。每个亚黄河三角洲是黄河一次流路形成的一个舌状堆积体, 形成时期延续约 10 a。黄河三角洲地势极为平缓, 自西南向东北倾斜, 地面

坡降 1/10 000 左右。

黄河三角洲在大堤构造单元属中朝准地台一级单元, 华北台坳二级单元, 埕宁隆起和济阳坳陷三级单元^[2]。其为第四系地层覆盖, 全新世地层厚度一般在 26 m 左右, 主要是第一次海侵(全新世海侵)后形成的海相层和黄河三角洲沉积层, 仅底部 2 m 左右为海侵前的陆相河流和湖泊沉积。黄河三角洲成陆晚、土层新, 岩性为细砂、粉砂、黏质粉砂、粉砂质黏土和黏土。据野外地层剖面记载和钻孔描述, 三角洲的下部为前三角洲和三角洲侧缘沉积的黏土质粉砂层, 三角洲上部为河口沙席与河口沙坝及远端沙坝组成的粉砂和极细砂层, 顶部是由河流沉积的黏土质粉砂及粉砂互层^[3]。

由陆向海, 含水层厚度不大, 但具有不断增厚的变化规律, 含水层的沉积物粒度由粗变细, 层数由少变多, 富水性由强变弱, 皆为第四系松散层孔隙水。冲积平原的浅层含水层岩性以粉、细砂为主, 分布规律受黄河古河道的制约。在整个三角洲, 不同年代的相对粗粒的河道、河口砂坝和远端坝沉积上下叠置, 多层结构, 常被相对细粒的前三角洲及烂泥湾的粉砂质黏土和黏土分隔, 因而造成黄河三角洲地区地下水含水层连续性相对较差。

2 地面沉降的特征

由别君等人根据三角洲地区 1956 年、1967 年、1980 年三个时期的 1:5 万地形图生成三个时期的数字高程模型(DEM)对比分析高程变化所获得的黄河三角洲地面垂直形变速率图可以看出, 黄河三角洲

收稿日期: 2006-12-20; 修回日期: 2008-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(40676037)

作者简介: 秦伟颖(1983-), 女, 河南开封人, 硕士, 从事海洋地质方面的应用研究, 电话: 15070066123, E-mail: qinweiyang123@163.com

沉降总趋势是由黄河河道两侧向东西两个方向沉降幅度逐渐减少,在 20 世纪 50~90 年代期间,至少有 80% 的区域曾出现过地面沉降现象。其中三个沉降最甚:(1) 位于研究区北部盐窝镇与虎滩咀之间,1967 年黄河入海河道以西;(2) 位于下镇至清水沟一带,1967 年黄河以东,1956 年之后新建黄河农场;(3) 位于黄河三角洲南边界,滥洪河至淄脉沟一带。2001 年刘桂仪等^[4]根据有关部门在青州-东营进行的地面沉陷(1953~2000 年)观测资料,黄河三角洲地区普遍存在地面沉陷,年沉降量一般为 4~8 mm,位于东营市区及附近石油开采区,年平均沉陷量 10 mm 左右”。2002 年山东省鲁北地质工程勘察院^[1]对东营地面沉降进行了一次水准测量,东营市周围“全区年平均沉降量为 63 mm”。李广雪等^[5]认为造成三角洲整体下沉的主要因素是构造、均衡、压实下沉和海平面上升,这些因素耦合下沉量比较大,估计未来 10 a 将下沉 80 cm,大大降低了已有工程设计标准,同时,将陆地测量基准系统破坏。

3 地面沉降的机理分析

3.1 第四系与地面沉降

地层的结构是发生地面沉降的内在因素。一般认为,第四系的岩性结构、物理力学性质指标、厚度变化、黏土的分布对地面沉降的发生发展有重要的影响。黄河三角洲地区地处渤海之滨,具有软土的沉积环境,呈片状分布着软土。包括烂泥湾相沉积,岩性以粉质黏土为主;二是滨海湖相沉积,为淤泥或淤泥质土。软土分布于研究区东北部滨海、河口-刁口码头一带,利津县罗镇-黄河故道西、垦利县下镇东部,另外在利津县明集-广南水库一线呈不连续片状、碟状分布。与别君等所做的 1980~1995 年的黄河三角洲沉降区域图叠加对比结果显示,软土的分布区 50% 以上发生了沉降(图 1)。即使在此年段未发生沉降的软土区域,如下镇,在 1956~1967 年已发生过严重沉降。因此,可以说软土的分布基本上控制了主沉降区的边界。

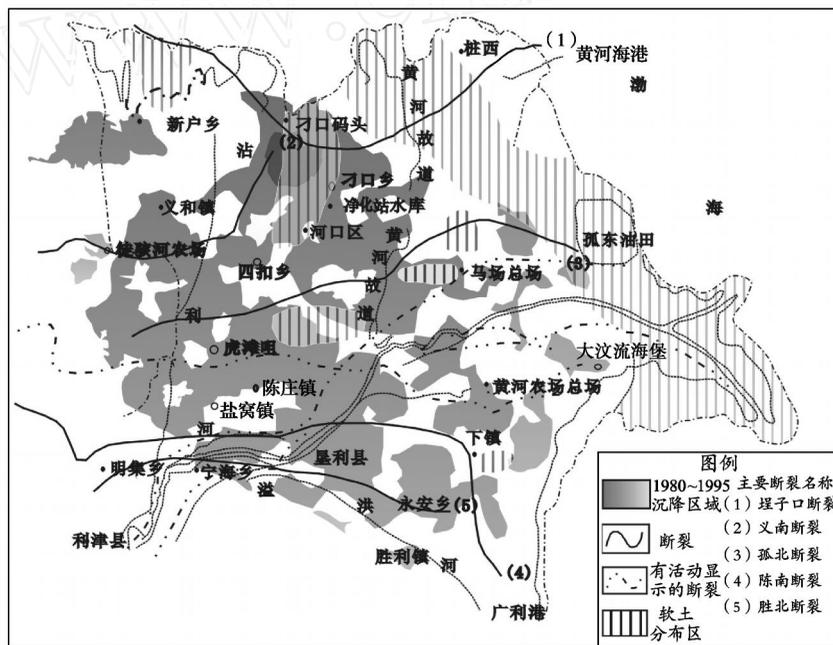


图 1 1980~1995 年黄河三角洲沉降区域与软土断裂带分布对比

Fig. 1 Comparison between land surface subsidence and the distribution of soft clay in the Yellow River delta from 1980 to 1995

相比之下,孔隙度、压缩系数等力学性质指标同样反映出压缩性的明显变化。区内软土具有含水量高,孔隙比大,压缩性高,承载力低,在荷载作用下变形较大等特点。胜利埕岛地区位于老的黄河三角洲叶瓣上,1988 年(即三角洲废弃 12 a 后)对浅海地层进行测试,发现含水量大于 40%^[5]。这些沉积物大多未固结且含水量高,在达到完全固结之前,造成地层极不稳定,在受压不均的情况下,容易发生流变或蠕变,必然会发生沉降。黄河三角洲沉积有厚达数千米的的新生界沉积物。在这些沉积物中,可压缩性黏性土层占 60% 以上。根据对黄河海港大坑地层剖

面的测量,结合三角基准点对比,从 1974 年形成到 1988 年,压实下沉速率约每年 5 cm^[5]。

欠固结的淤泥质粉质黏土当水位降低时,发生塑性释水压密,水位恢复后,土层不回弹,所引起的地面沉降是永久的,不可消除。而砂层不具有黏聚力,但压密变形量比黏性土要小得多,由于砂层压密而造成地面沉降,水位恢复后砂层回弹,沉降可消除,砂层释水压密为弹性变形,所引起的地面沉降为暂时性的地面沉降。黄河三角洲沉积按其沉积物类型可分为两大层:下部的黏土质粉砂层和上部的粉砂极细砂层^[6]。利用 1985 年到 1989 年中国地质矿

产部海洋地质研究所与荷兰的合作项目“黄河三角洲现代沉积作用、沉积模式及其在环境和沉积物中的应用”的阶段研究成果中的黄河三角洲地区的钻孔资料总结出黄河三角洲 1855 年以来沉积的等沙厚度分布。从黄河三角洲 1855 年以来沉积的等沙厚度分布和 1956~1995 年沉降区域对比结果看,沉降中心的含沙厚度明显小于非沉降区的含沙厚度,甚至缺失(图 2,3,4)。相应的黏性土的厚度随着含

沙厚度的减少而增加,这反映了引起永久沉降的可压缩层厚度的增加。同时,三角洲部分沉积的垂向序列是一种不稳定结构,在沉积物粒度上表现为上粗下细的逆粒序,在密度上,由于含水量高,颗粒细,造成前三三角洲沉积物密度低于上部,出现密度倒挂现象^[5]。黄河三角洲特有的第四系沉积体系为沉降的发生创造了内在条件。因此,第四系结构是引起黄河三角洲差异性沉降的根本原因。

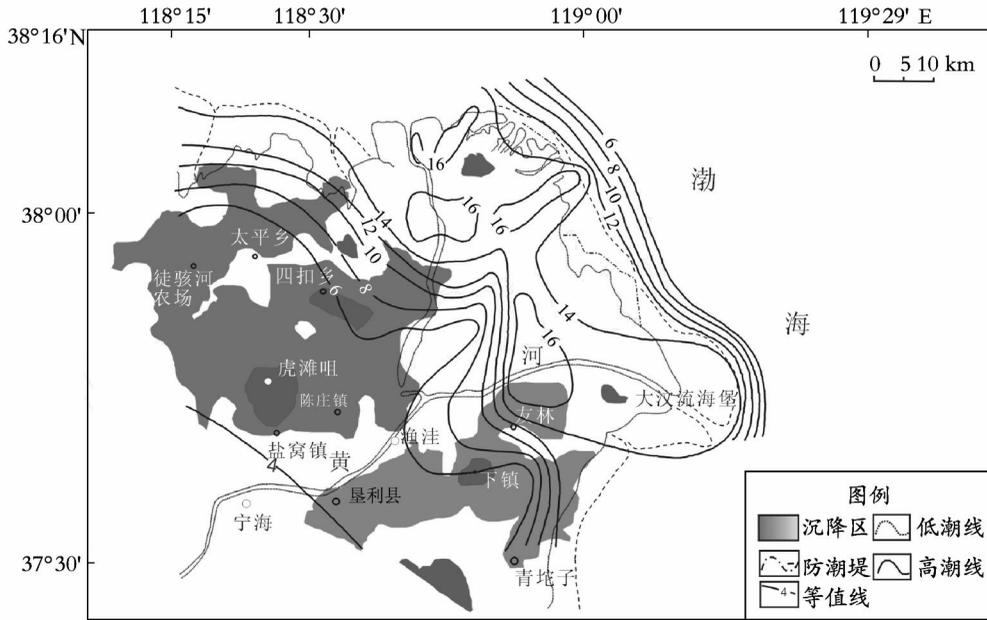


图 2 1956~1980 年黄河三角洲沉降区域与黄河三角洲等砂厚度对比

Fig. 2 Comparison between land surface subsidence and the sand thickness isopach in the Yellow River delta from 1956 to 1980

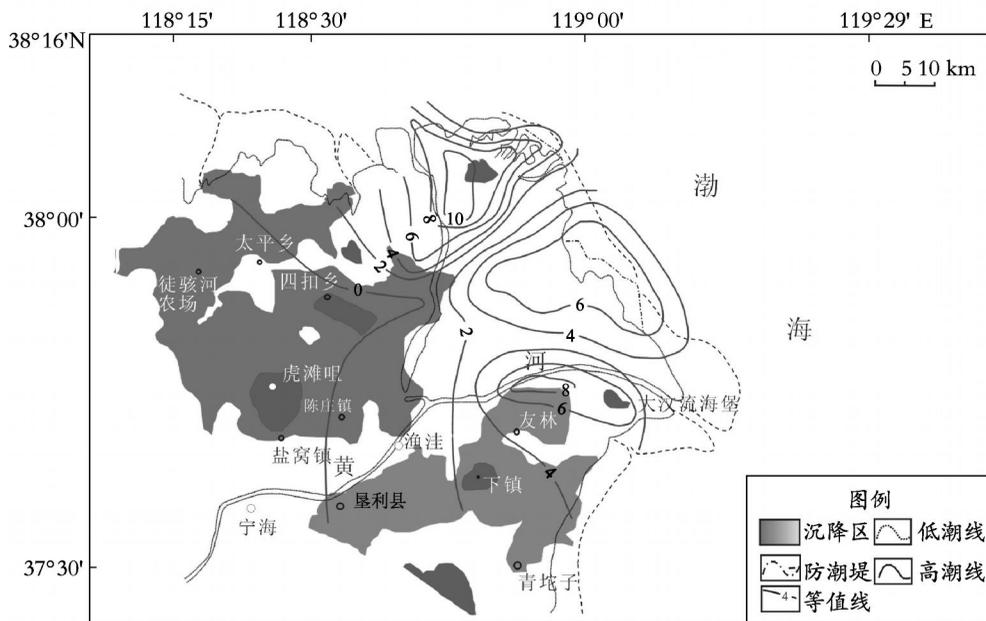


图 3 1956~1980 年黄河三角洲沉降区域与黏土质粉砂层厚度对比

Fig. 3 Comparison between land surface subsidence and the clayey silt thickness isopach in the Yellow River delta from 1956 to 1980

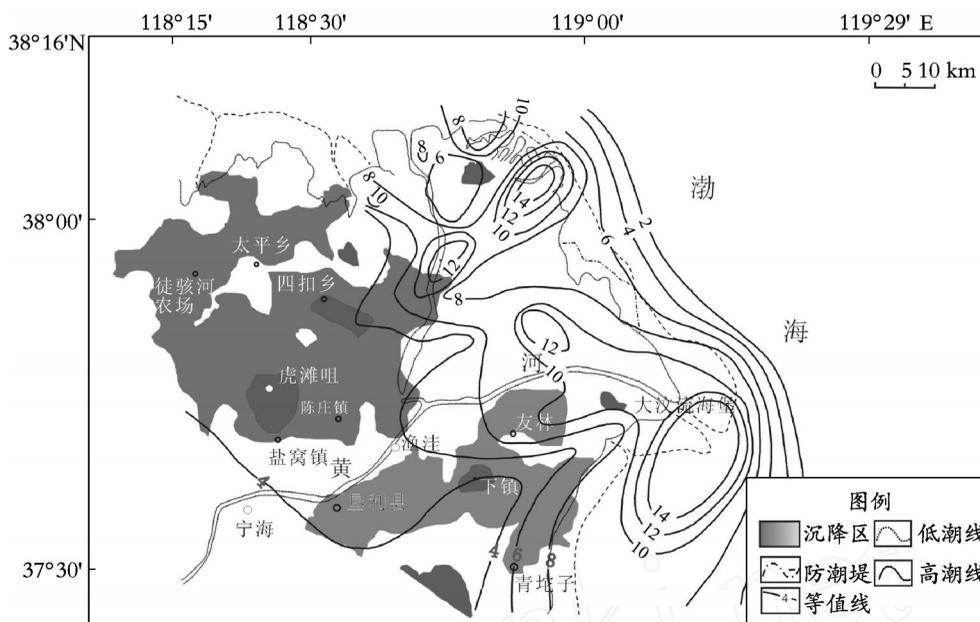


图 4 1956~1980 年黄河三角洲沉降区域与粉砂层厚度对比

Fig. 4 Comparison between land surface subsidence and the silt sand thickness isopach in the Yellow River delta from 1956 to 1980

3.2 新构造运动与地面沉降

黄河三角洲在大地构造单元上属华北沉降盆地次级构造单元埕宁隆起区和济阳拗陷区,其构造的基本形式为一自中生代以来周边被深断裂围限的负向地质构造单元。其北西为埕宁隆起,南为鲁西隆起,东及东北为庙西拗陷,具有西南收敛,东北散开的旋扭构造特征。四级构造单元,自北向南有埕子口凸起、车镇凹陷、无棣凸起、义和庄凸起、沾化凹陷、陈庄凸起、青坨子凸起、东营凹陷和广饶凸起等,交错排列,并互相叠置。区内受 NE-NNE, E-W 和 NW-NNW 三组主要断裂的切割,主要有埕子口断裂、义南断裂、孤北断裂、陈南断裂、胜北断裂。

黄河三角洲地区属地壳持续下降区,其第四纪新构造运动的主要特征是继承中生代以来的继续缓慢下沉。新构造运动强烈,地壳处于继续下降,沉降幅度大,新生界沉积厚度 1 500~2 000 m,断裂活动性发育,近 EW 向的断裂控制凸起凹陷的边界,现今地面变形强烈,沉降率 3~5 mm/a,地壳不稳定^[2]。构造沉降增大了地面沉降值。同时,1855 年以来形成的地质体荷载,能够造成地层均衡下沉,这种作用的最终表现形式往往与构造下沉难以区分,两者联合作用造成三角洲下沉速率达每年 2 cm^[5]。

为了研究地面沉降与活动断裂之间的内在联系,根据别君等人所作的 1980~1995 沉降区域图与研究区断裂构造叠合,其结果见图 1,可以看出地面沉降与活动断裂之间具有如下对应关系:(1)沿着陈

南断裂带及其附近与所指的下镇至清水沟一带新建黄河农场沉降区相对应;(2)胜北断裂带、孤北断裂带大致上控制了主沉降区的边界,即盐窝镇与虎滩咀之间的沉降区域;(3)埕子口断裂带、义南断裂带沿线的沉降量也比较大;断裂带经过地带均有沉降,其中有草桥沟口沉降量比较大。

3.3 人类活动与地面沉降

长期过量抽取地下流体如地下水、石油、天然气等引起土层压缩而引起地面沉降,也是黄河三角洲地区地面沉降不可忽视的原因之一。

厚层松散细粒土层的存在构成了地面沉降的物质基础。黄河三角洲地区分布有厚层松散或未固结的第四系和新近系沉积物,这些沉积物多为淤泥质黏土,含水量可达 60% 以上,孔隙比大、强度低、压缩性强、易于发生塑性流变。根据土的固结理论,土体覆盖层荷载引起的总压力由孔隙水、弱含水层土颗粒和含水层骨架共同承担。当大量抽取地下水时,含水层中地下水压力降低,淤泥质黏土隔水层孔隙中的弱结合水压力差加大,使孔隙水流入含水层,有效压力加大,结果发生黏性土层的压缩变形。随着地下水的抽取,承压水位降低,含水层本身及其上、下相对隔水层中孔隙水压力减小,地层压缩导致地面发生沉降。

黄河三角洲地下水降落漏斗主要分布在黄河以南,并且形成了浅层、中深层、深层多级地下水降落漏斗^[7]。至 1980 年已形成了以广饶县稻庄镇为中心和以石村镇为中心的两个降落漏斗。1980 年以后

漏斗中心逐渐南移,两漏斗连通,形成了以稻庄、花园为中心的东西向槽状漏斗。在漏斗中心区,1975~1997年22年间地下水位下降了28 m,年均下降 $1.27\text{ m}^{[7]}$ 。随着区内地下水开采的持续,区内地面沉降将不断加剧。同时黄河三角洲的经济发展是以石油(如孤东、桩西、河口油田等,其他还有几个小油田)开发为基础,油田覆盖范围内出现地面沉降的几率都接近50%。

与此同时,由于工程建设及经济和生活需要,城市规模的扩大,黄河三角洲的沿黄河一线和沿海岸一带,有许多防洪工程和拦海大坝,其规模相当大,另外还有工业残渣、碎料,还有城市、乡镇周围产生的固体生活垃圾等。这些人为堆积的速度是极快的,远大于自然力所形成的堆积速率,这必将引起因地表荷载产生的地面沉降。如黄河三角洲1980~1995年间的沉降中心区,虎滩咀、下镇乡附近都有较密集的堤坝、拦水坝以及滚水坝,这样势必导致由堤坝的压实加速自然岩土压实速率引起工程性地面沉降。对黄河海港周围大坝的水准测量,结合大坝建设时高程、周围三角基准点、验潮资料对比,发现大坝在10 a内下沉1 m多,速率达到每年10 cm以上^[5]。孤东油田在围堤时,部分堤段在施工过程中曾出现过每昼夜下降2 m的情况^[3]。同时有关资料表明,沉降严重的区域基本上都是相对黄河三角洲的人口密集地区,如盐窝镇与虎滩咀之间的沉降区域的人口密度达到300~500人/ km^2 。

4 结论

综合上述讨论的各种因素对地面沉降的影响,根据黄河三角洲地区的实际条件,可得到如下结论:

- (1) 黄河三角洲地质环境较复杂,既分布有活动性断裂,又有新生代巨厚的沉积物和海相的淤泥(淤泥质的软土层),特别是黏土或粉质黏土厚度较大的地区,加之上部沉积物形成年代较新,自重固结过程尚未完成,自然沉降不可避免。同时由于深部黏性土层的滞后压密引起的地面下沉也不容忽视。尽管其导致的地面沉降量不大,但在黄河三角洲目前处于微量沉降的情况下,自然沉降量不可忽视。
- (2) 黄河三角洲地区地面沉降机理复杂,由多种因素引起,但人类因素在地面沉降中已经起了不可忽视的作用。从沉降区域图中可知,沉降区域大多分布在人口密集区,未来地面沉降区也将集中在人类活动集中地,人类经济活动的影响将使本区沉降速率加快。
- (3) 胜北断裂带、孤北断裂带地区集中了水源地和人类活动区,易受人类影响,有可能是未来地面沉降的主要沉降区。同时现有资料证明陈南断裂带附近地

面沉降量也相对较大,该断裂沿线将是地面沉降高发区。

由于地面沉降机理复杂多变,黄河三角洲沉积环境极不稳定,本区更为详细的地面沉降状况的获得,必须进行更高精度的柱状样品采集和地面高程测量,以及高新技术如INSAR遥感影像的利用。

致谢:本文在数据处理过程中得到了青岛海洋地质研究所丁东教授的悉心指导,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 宋波,王德生,王锦丽,等.东营地面沉降监测[J].地矿测绘,2004,20(1):34-36.
- [2] 山东省地矿局第二水文地质工程地质大队.黄河下游(山东区段)工程地质调查报告[R].山东:山东省地矿局第二水文地质工程地质大队,1995.
- [3] 成国栋,薛春汀.黄河三角洲沉积地质学[M].北京:地质出版社,1997.48-98.
- [4] 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.
- [5] 李广雪,庄克琳,姜玉池,等.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.
- [6] 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,1991.82-93.
- [7] 张效龙,孙永福,刘敦武,等.黄河三角洲地区地下水分析[J].海洋地质动态,2005,21(6):26-28.
- [8] 成国栋,薛春汀,周永青,等.黄河三角洲地区晚更新世晚期及全新世地层[J].海洋地质与第四纪地质,1987,7(增刊):63-73.
- [9] 任美镔.中国的三大三角洲[M].北京:高等教育出版社,1994.45-47.
- [10] 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].成果与方法,2004,20(5):51-54.
- [11] 地质矿产部海洋地质研究所.黄河三角洲全新世演化及环境地质[R].青岛:地质矿产部海洋地质研究所,1995.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 刘杜娟.中国沿海地区地面沉降问题思考[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(4):87-90.
- [15] 程义吉.黄河河口研究与治理实践[M].郑州:黄河水利出版社,2001.100-104.
- [16] 林国龙,袁善铭,宋志杰,等.黄河三角洲国土资源[R].东营:黄河三角洲国土规划办公室,1986.205-208.

Mechanism analysis of land surface subsidence in the modern Yellow River Delta

QIN Wei-ying^{1,3}, ZHUANG Xin-guo¹, HUANG Hai-jun²

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Jiangxi Research Institute of Coal Geological Exploration, Nanchang 330001, China)

Received: Dec. 20, 2006

Key words: the modern Yellow River Delta; land surface subsidence; Quaternary strata

Abstract: Based on the results of the field investigation and research on the modern Yellow River Delta done by the former, the correlativity between the depositional system of Quaternary, tectonics and land surface subsidence in the modern Yellow River delta is studied. The results showed that the land surface subsidence in the modern Yellow River Delta is related to the neotectonism movement and the distribution of sedimentary facies of Quaternary, as well as the anthropic activity. The distribution of the subsidence extent has a good relationship with the distribution of the main fault belt; the distribution of soft clay almost controls the main subsidence borderline.

(本文编辑:刘珊珊)