

鲁北平原第四纪沉积特征及地面沉降模式分析

纪洪磊¹⁾, 杨亚宾¹⁾, 张永伟²⁾, 刘苏哲¹⁾, 朱智勇¹⁾

1) 山东省地勘局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 山东德州, 253072;

2) 山东省地质环境监测总站, 济南, 250014

内容提要:地面沉降地质灾害在鲁北平原发展日益严重, 制约着重大工程建设和社会经济发展。本文通过分析区内第四纪沉积展布特征, 结合二等水准测量数据和分层沉降标数据与地面沉降规律, 揭示鲁北平原区地面沉降机理和沉降模式, 为同类型地区进行参考借鉴。①鲁北平原地面沉降主要贡献层为中更新统地层, 滨州 140~320m 地层沉降量约占总沉降量的 62%。②依据沉积相、沉积成因、地层结构、地面沉降驱动机制等因素, 鲁北平原地面沉降可分为山前冲积、洪积平原模式、黄河泛滥冲积平原模式、三角洲冲积、海积平原模式三种模式。

关键词:鲁北平原; 第四纪; 沉积; 地面沉降

华北平原是我国地面沉降地质灾害分布面积最大、类型最复杂的地区之一(Yan Jingsheng, 2014), 鲁北平原处于华北平原南部, 行政区划包括聊城、德州、滨州、东营四地市及济南市的部分地区, 总面积 3.6 万 km², 地处连接京津冀豫的交通要道, 也是山东省重要的粮棉经济产业区(Liu Guiyi, 2001), 日益严峻的地面沉降灾害严重制约了鲁北平原重大工程建设和经济发展。

自 20 世纪 50 年代以来, 省内外学者、地质单位对鲁北平原地面沉降方面做了大量的调查研究工作, 逐步建立了基岩标、分层标、水准标石、CORS 基站, 形成了较为完善的沉降监测网络, 运用 MAPGIS、ArcGIS、MODFLOW 等软件形成了一系列地下水与地面沉降关系模型的研究成果(Yan Jingsheng, 2014), 以往地面沉降研究对地下水与地面沉降的关系比较关注, 对地层沉积特征与地面沉降关系的研究不足(Zhou Yi et al., 2014), 本文在充分利用与研究以往资料的基础上, 根据沉积相、沉积层序、沉积成因及地下淡水分布等因素, 对鲁北平原地面沉降机理进行剖析, 总结鲁北平原地面沉降模式。

1 鲁北平原地质背景

1.1 构造

鲁北平原在大地构造单元上属于华北板块, 古生代时, 受西伯利亚板块向南俯冲、挤压, 产生了一系列近东西向的隆起带和拗陷带。中生代, 太平洋板块向北北西方向俯冲, 华北板块处于左旋剪切应力场, 陆块发生解体, 形成北东或北北东向的构造系列。新生代以来, 太平洋板块俯冲方向由原来的北北西转为北西西向, 产生右旋剪切活动, 导致本区产生强烈拉伸而出现许多同生断裂, 形成呈北东向或近东西向展布, 相间排列的断陷和隆起(Song Mingchun, 2008)。自西而东依次为临清拗陷、埕宁潜断隆、济阳拗陷。自南至北, 博兴潜断陷、东营潜断陷、沾化潜断陷呈北缘断裂南缘超覆的阶梯状排列(图 1)。

1.2 古地理演变

早更新世时期, 新构造运动继承新近纪末期特点(Liu Baojun et al., 1985), 鲁北平原内隆起区继续遭受剥蚀, 拗陷区接受来自南部泰山山区、北部埕宁隆起以及西部太行山区的冲积物, 河流短小, 湖积

注: 本文为滨州市国土资源局 1:25 万滨州市地面沉降监测(2018 年)项目(编号 BZGP-2018-0341)资助成果。

收稿日期: 2019-08-09; 改回日期: 2019-09-10; 责任编辑: 李曼。

作者简介: 纪洪磊, 男, 1984 年生, 工程师, 主要从事水工环地质工作, Email: jhl0543@163.com

引用本文: 纪洪磊, 杨亚宾, 张永伟, 刘苏哲, 朱智勇. 2019. 鲁北平原第四纪沉积特征及地面沉降模式分析. 地质学报, 93(s1): 241~250, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019234.

Ji Honglei, Yang Yabin, Zhang Yongwei, Liu Suzhe, Zhu Zhiyong. 2019. Quaternary sedimentary characteristics and land subsidence model in North Shandong Plain. Acta Geologica Sinica, 93(s1): 241~250.

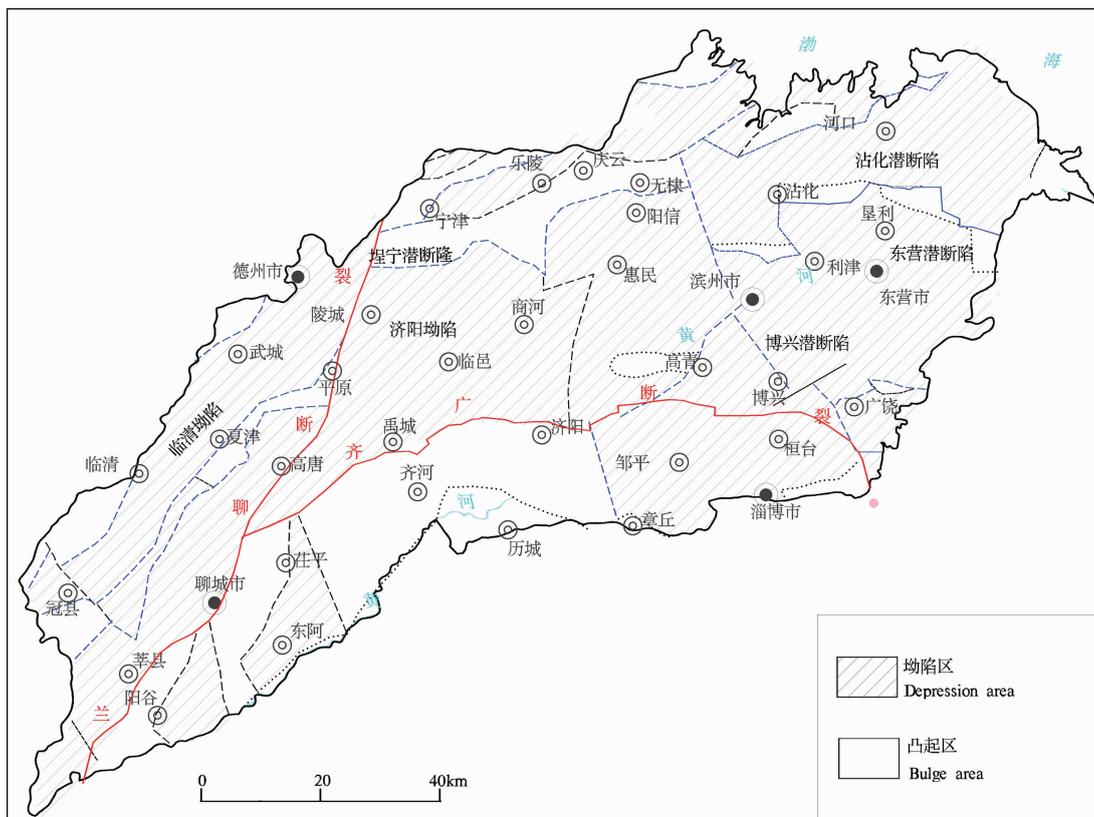


图1 鲁北平原构造图

Fig. 1 Structural map of North Shandong Plain

相较发育,沉积速率缓慢,百万年内沉积厚度30~50m,沉积中心在平原、陵县一带(Wang Guodong, 1989)。

中更新世时期,沉积速率加快,湖积相、冲积相和冲、洪积相发育,拗陷区沉积厚度60~100m,沉积中心在惠民—沾化一带,沉积厚度由西南向东北增厚,期间发生两次海侵,第V海相层埋深在145~160m,海侵边界在无棣、沾化、垦利一线,第IV海相层埋深90~130m,海侵边界在东营区至滨城区南部一线(Wang Guodong, 1989)。

晚更新世,黄河由河南省进入本区,成为塑造鲁北平原的主要地质营力,全区广泛接受沉积,沉积厚度40~50m,晚更新世也发生过两次海侵,第III海相层埋深52~77m,海侵边界在无棣—广饶一线,第II海相层埋深23~46m,海侵边界在滨城区—阳信—乐陵一线。

全新世时期,黄河携大量泥沙数次改道,在平原内广泛沉积了厚20余m的沉积物。全新世第I海相层埋深1~18m,海侵边界在无棣—利津一线(Wang Guodong, 1989)。

1.3 第四纪地层沉积特征

依据钻孔资料,根据地层结构、成因类型和沉积

物来源,鲁北平原地层可分为三个区,山前冲积、洪积平原区,黄河泛滥冲积平原区和三角洲冲积、海积平原区。

山前冲积、洪积平原区:主要分布在东阿县、齐河县、邹平市、博兴县以及广饶县小清河以北,黄河以南的区域。第四系总厚度约160~260m,由北部腹地向南部边缘逐渐变薄。下更新统为冲积、洪积及湖沼相沉积,岩性为棕黄色、褐黄色、棕红色、灰绿色粉质黏土与粉细砂互层,局部见砾石层。中更新统以冲积、洪积物为主,夹少量湖沼相沉积,岩性为灰黄、棕黄色粉质黏土、粉土及粉砂互层;上更新统为山前冲洪积层与平原黄河冲积层过渡带,局部有湖沼相沉积,岩性为灰黄色粉土夹粉质黏土、粉细砂;全新统上部、下部主要为灰黄至黄褐色河流相沉积,中部为灰至灰黑色的湖沼相沉积,底部以灰黄色粉土或粉砂层为标志与上更新统整合接触。

黄河泛滥冲积平原区:主要分布在聊城市、德州市全部以及济南市、滨州市黄河以北的区域。总厚度约260~360m(图2),下更新统为冲积、湖沼相沉积,岩性为棕黄色、褐黄色粉质黏土、粉土及粉细砂互层,发育多层钙质淀积层,表明曾频繁出现沉积间断;中更新统为棕黄、灰黄色粉质黏土、粉土互层,夹

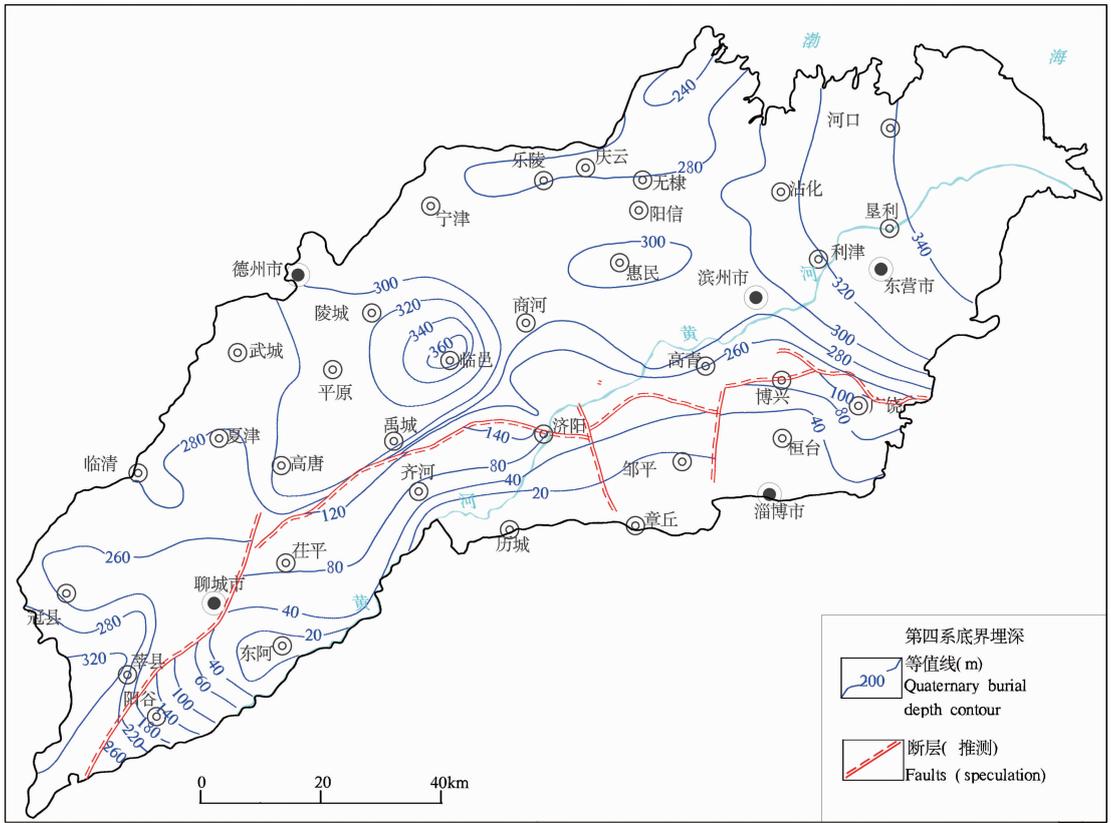


图 2 鲁北平原第四纪厚度等值线图

Fig. 2 Quaternary thickness contour map of North Shandong Plain

粉细砂层,含多层钙质淀积层,具河湖相沉积物特征,东部有二期海相沉积;上更新统主要为黄河冲积物,东部夹两期海相沉积层,岩性主要为粉土与粉砂互层,夹部分粉质黏土,中上部及底部含灰黑色淤泥质层,由西向东略有增大趋势;全新统为黄河冲积陆相沉积层,岩性与上更新统基本相同,但密实性差。

三角洲冲积、海积平原区:主要分布在滨州市沾化区东部、东营市大部分区域。总厚度约 300~340m,下更新统为冲积相、湖沼相沉积,岩性为黄灰色、黄褐色粉质黏土、粉细砂。中更新统为冲积相、滨海相沉积,岩性为灰黄色粉质黏土、粉土、粉砂、细砂。上更新统地层,属冲积相、滨海相沉积。岩性多为灰黄色粉土和粉砂,颗粒较细。全新统属河流相、海相沉积,岩性一般为黄灰色粉土、粉细砂,厚 22m 左右,中部见灰黑色淤泥层。

2 深层地下水及地面沉降现状

2.1 深层地下水现状

鲁北平原深层地下水受西部太行山区和南部泰沂山区补给,总体上由西南向东北运移。1980 年,区内除德州市和滨州市形成小面积的降落漏斗外,

其它地区流面平直、流线分布均匀,在齐河、济阳、乐陵、惠民地区形成自流区。

经过四十多年的开采,深层地下水位大幅下降,形成了以临清市、茌平县、德城区、齐河县、滨城区、博兴县和广饶县为中心的区域性深层地下水降落漏斗,漏斗中心水位埋深 95~130.3 m(表 1),等水位线 -70~-90 m(图 3)。

表 1 研究区地下水降落漏斗中心井点水位埋深表
Table 1 Depth of water level at central well point of groundwater depression funnel in study area

序号	位置	井深(m)	水位埋深(m)
1	聊城东昌府东城街道	600	105.8
2	茌平县信发街办	550	112.3
3	高唐县梁村镇	400	130.3
4	临清市新华路街办	460	117
5	德城区运河街道办事处	800	155
6	临邑县邢侗街道办事处	600	95
7	齐河县开发区	300	108
8	博兴县锦秋街道办事处	550	110.5
9	滨城区水利花园	500	103.8
10	博兴县店子镇	500	71.0
11	广饶县鲁北输油罐区	600	105.4

2.2 基于二等水准测量的地面沉降现状

2.2.1 沉降速率

研究区沉降速率大于 50 mm/a 的地区主要分

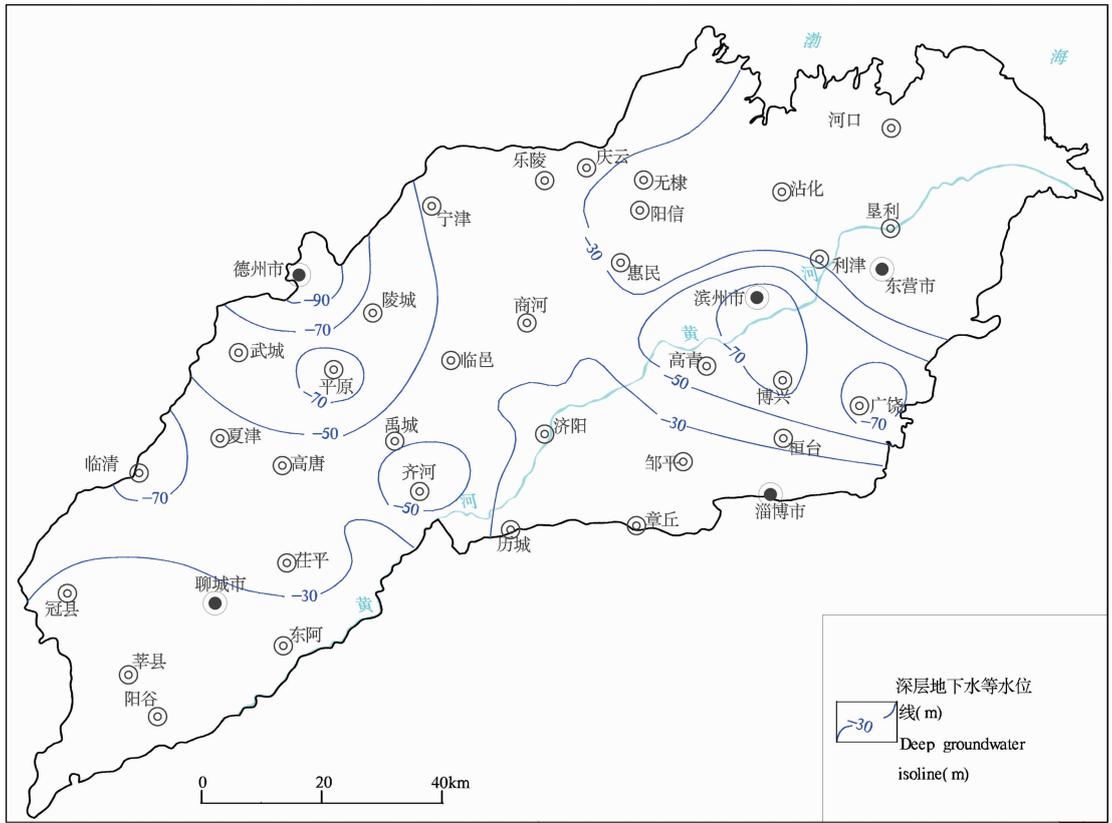


图3 鲁北平原深层地下水等水位线图

Fig. 3 Isohydrogram of deep groundwater in north Shandong Plain

布在德城区、茌平县、博兴县、广饶县, 30~50 mm/a 的地区主要分布在德城区、陵城区、茌平县、齐河县、博兴县、广饶县。10~30 mm/a 的地区主要分布在禹城市、临邑县、临清市、惠民县、滨城区、博兴县、东营区等地市(图4)。其余大部分地区沉降速率小于10 mm/a(Duan Xiaofei et al., 2018)。

2.2.2 累计沉降量

全区各地起测年份和测量期次均不一致, 德州市沉降监测较早, 1992年完成了第一轮地面沉降测量工作, 聊城市、滨州市、东营市地面沉降监测稍晚, 始于2000年前后。

从累积沉降量上分析, 区内存在两个沉降中心(图4), 一处位于德城区, 中心点沉降量为1187 mm。1991~2010年地面累计沉降量, 500 mm 沉降量等值线位于武城-平原-陵城一线, 300 mm 沉降量等值线位于夏津-高唐-禹城-临邑-宁津一线, 形成了不断向东南扩展的区域性沉降漏斗。

另一个沉降中心位于广饶县县城, 2002~2016年地面累积沉降量为1605 mm, 受深层地下水开采量增大影响, 沉降速率仍呈增大趋势, 沉降量超过800 mm 的区域位于广饶县城, 500 mm 沉降量等

值线位于桓台-博兴-广饶一线。

滨城区2005~2019年地面累计沉降量, 中心点沉降量为435 mm, 沉降速率有减缓趋势。博兴县沉降中心位于博兴县南部店子镇, 2005~2019年地面累计沉降量, 中心点沉降量为881 mm, 500 mm 沉降量等值线位于吕艺镇-博兴县城一线, 并持续北移。

2.2.3 分层沉降特征

德州市分层标相对高程监测数据表明0~60 m 地层相对沉降量约2 mm/a, 占总沉降量的4%; 60~300 m 地层多年平均沉降速率为20 mm/a, 占总沉降量的50%, 300~500 m 地层多年平均沉降速率为19 mm/a, 占总沉降量的46%, 60~500 m 是德州市地面沉降的主要层位(Duan Xiaofei et al., 2018)。

博兴5处分层标, 深度分别为5m、60m、140m、260m、320m(图5), 2015年、2016年、2019年三期监测数据显示, 5m、60m、140m 地层沉降速率基本一致, 约为58 mm/a, 260m 和320m 地层沉降速率相近, 分别为20 mm/a、27 mm/a。140 m 以上地层沉降速率基本一致, 即其可以看作一个整体下沉, 140~260m 深度段的中更新地层贡献了主要的沉

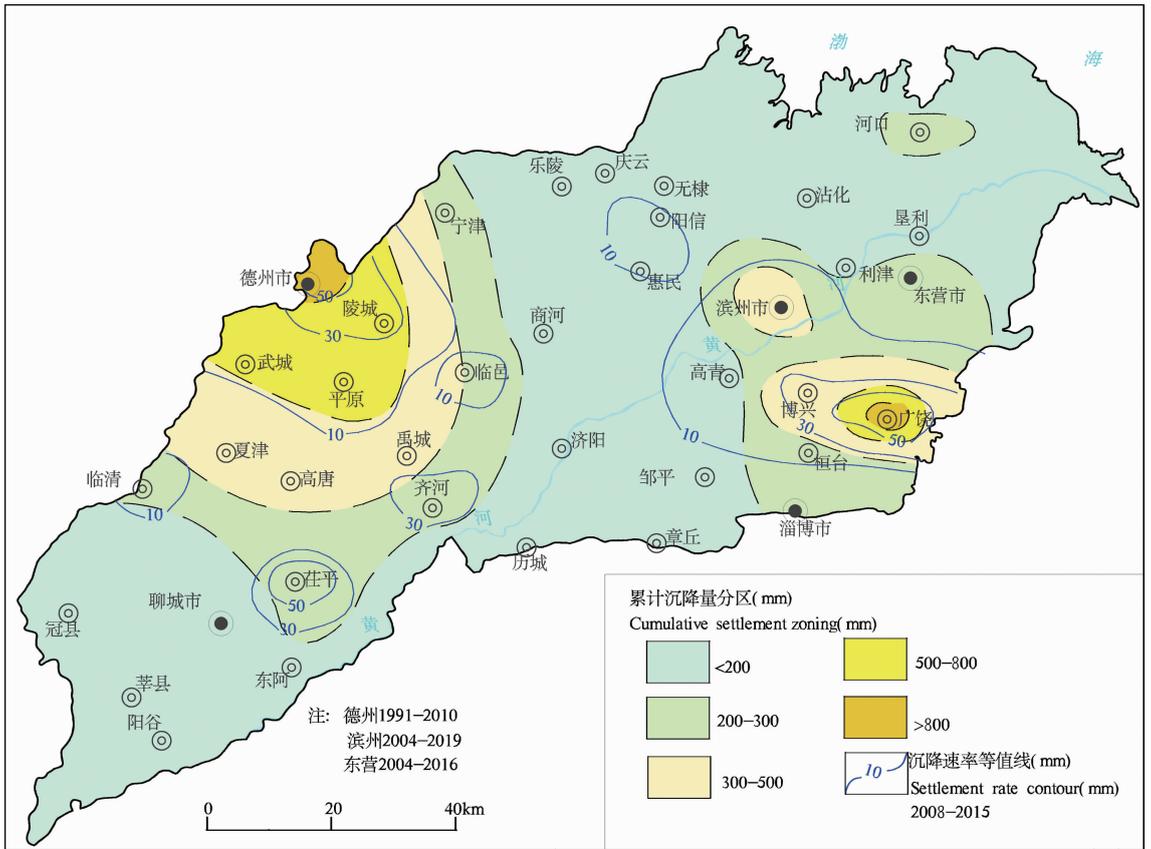


图 4 鲁北平原地面沉降现状图

Fig. 4 Land subsidence map of North Shandong Plain

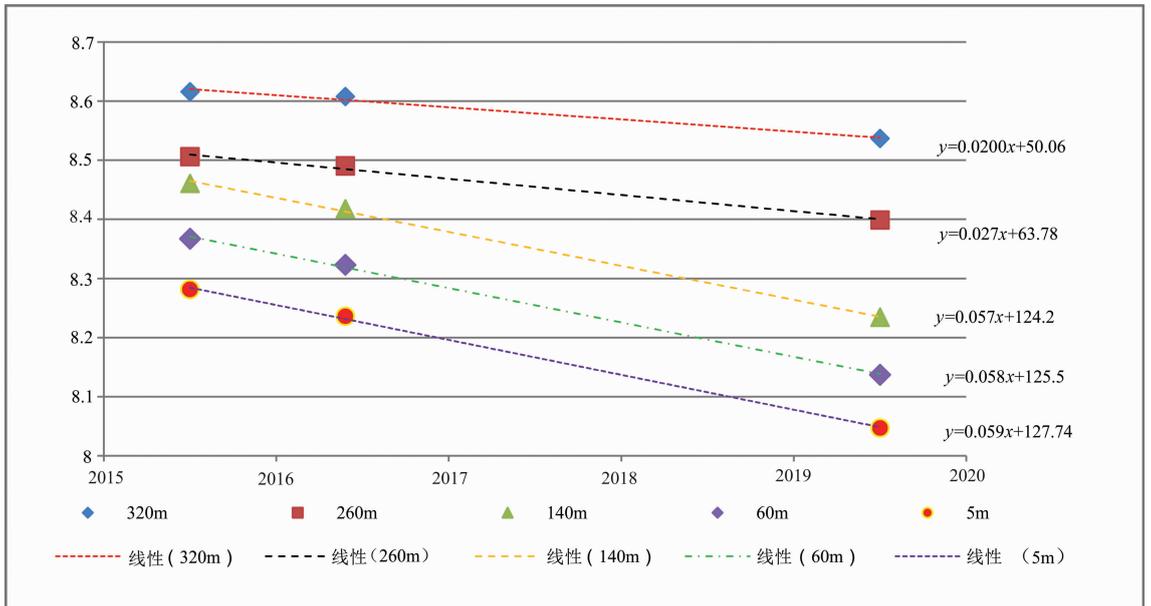


图 5 滨州地面沉降分层沉降特征图

Fig. 5 Layered subsidence charts of land subsidence in Binzhou

降量,约占总沉降量的 50%,260m~320m 深度段地层沉降量约占总沉降量的 12%,320m 以下地层沉降量约占总沉降量的 34%,140m 以上地层沉降

量仅占总沉降量的 4%。这与王荣(Wang Rong et al., 2014)等通过分层沉降标监测,阐述北京八仙庄地区地面沉降主要贡献为中更新统地层,约占

70%左右的结论相一致。

3 地面沉降机理及影响因素分析

3.1 地面沉降机理

地面沉降的实质是抽取含水层中的水,造成承压含水层中超静孔压消散,有效应力增加引起地层压密释水。地层压密包含两方面,一方面是含水砂层的压密,另一方面是弱透水层的释水压密。弱透水层压密固结微观机理主要是基于太沙基固结理论或比奥固结理论的粘性土的渗透固结理论(Yan Jingsheng, 2014; Duan Xiaofei et al., 2018)。粘性土有效应力增加,压密释水过程中,孔隙度减小,压缩量也逐渐减小。由于粘性土的可塑性,当外部荷载消失,粘性土可以回弹恢复一定形变量,表现出回弹变形特征。当再次施压,超过先期固结压力时,粘性土又表现出再压缩的特征,压缩量和回弹量逐渐衰减。

砂层压密主要是抽水使得砂层有效应力增加,颗粒间产生剪应力,使得颗粒沿着接触面相互滑移错动,小砂粒填充到孔隙中,砂层颗粒重新排列,发生变形,随着砂粒逐渐填满孔隙,应变逐渐变缓,随后表现出砂粒蠕变以及破碎特征,粒径和级配是影响砂层压密的重要因素。Budhu 和 Adiyaman 提出了基于 Cosserat 力学体系的地面沉降理论,沈水龙等基于该力学体系,考虑水力梯度变化在砂土层中产生剪应力,从含水层受力机理的角度解释了含水层持续变形增大和变形滞后的发生机理,以及细颗粒流失作用对地面沉降的影响(Shen Shuilong et al., 2014)。

3.2 地面沉降影响因素分析

诸多研究表明,除受新构造运动外,超量开采地下水、开采地下矿产、工程建设和土层次固结等都是产生地面沉降的影响因素。

3.2.1 地质构造与地面沉降的关系

工作区在大地构造上属于华北地台,是一个新构造运动相对稳定的区域,区内由构造运动引起的地下面下沉速率在 2~3mm/a 之间,虽然沉降速率较小,但其持续时间长,累计沉降量大。区内主要有临清拗陷区、济阳拗陷区和鲁中南隆起区三个三级构造单元,每一级构造单元内又分为数个次级构造单元,地质构造较为复杂。地面沉降主要分布在凹陷内,呈现东西分带、南北分段的特点(Guo Haipeng et al., 2017)。地面沉降空间分布与本区构造格局、第四系沉积环境、沉积厚度分布呈较好的一致

性。临清市-德城区地面沉积中心呈北东向在临清凹陷内展布,滨城区-博兴县-广饶县地面沉降中心南北向分布在博兴潜断陷和东营潜断陷内。受聊城-兰考断裂和齐河-广饶断裂等构造控制,古河道带呈北东向展布,除南部隆起区外,各凹陷区内第四系沉积厚度差异不大,较好的富水条件使其成为地下水主要开采区,为地面沉降发育提供了基础。

3.2.2 开采地下水与地面沉降的关系

长期监测数据表明,地面沉降是随着地下水位持续下降而不断扩展的,其产生和发展过程与地下水水位变化过程基本保持同步或略为滞后,总体呈正相关关系。2014年~2019年博兴县深层地下水水位下降,博兴县地面沉降呈增长趋势。滨城区由于引用黄河水便利,减少了地下水开采,水位略有回升,但是由于地面沉降的滞后性,地面沉降仍呈缓慢下降状态。鲁北平原各地市自上世纪 80 年代以来,大力开采地下水,地下水水位逐年下降,逐渐演化为地下水降落漏斗。地下水降落漏斗首先在德城区、博兴县和滨城区发现,这三个区域也最先出现地面沉降现象。地下水降落漏斗和地面沉降在区内分布范围一致,地下水降落漏斗中心与地面沉降中心基本吻合(图 3、图 4),其演变历史相近,表明本区开采地下水是产生地面沉降的重要影响因素。

3.2.3 地层结构及力学性质与地面沉降的关系

地面沉降量随水位埋深增大而增大,在同一沉降区规律明显,但也存在因为开采层位不同,以及地层结构、岩性、厚度等原因,造成地下水水位最低点与地面沉降量最大点不一致的情况,如下图 6、表 2。对比博兴县和滨城区两个沉降区的沉降值,相同水位埋深情况下,滨城区沉降量要比博兴县沉降量小。究其原因,滨城区由于中深层地下水为咸水,开发利用价值不大,深层淡水开采层位一般为 400~500m,博兴县地下水资源丰富,淡水开采层位一般为 350~400m,滨城区地下水水位埋深较深,博兴县地下水水位埋深较浅。宏观上地层孔隙度和压缩系数是呈随深度逐渐递减的,所以地层越深,由于自重应力作用,其自身固结度较高,越难以压缩引起沉降,反之,稍浅的地层更容易引起沉降。

孙琳等(Sun Lin et al., 2012)通过华北地区土体压缩变形试验表明,岩性是影响黏土和粉质黏土变形量大小的主要原因,深层粉质黏土分为快速变形和缓慢稳定两个阶段。博兴县城地段含水层厚度小、层数少,可压缩粘性土平均厚度约为 80m,压缩层粘性土平均压缩系数为 0.13MPa^{-1} ,平均孔隙比

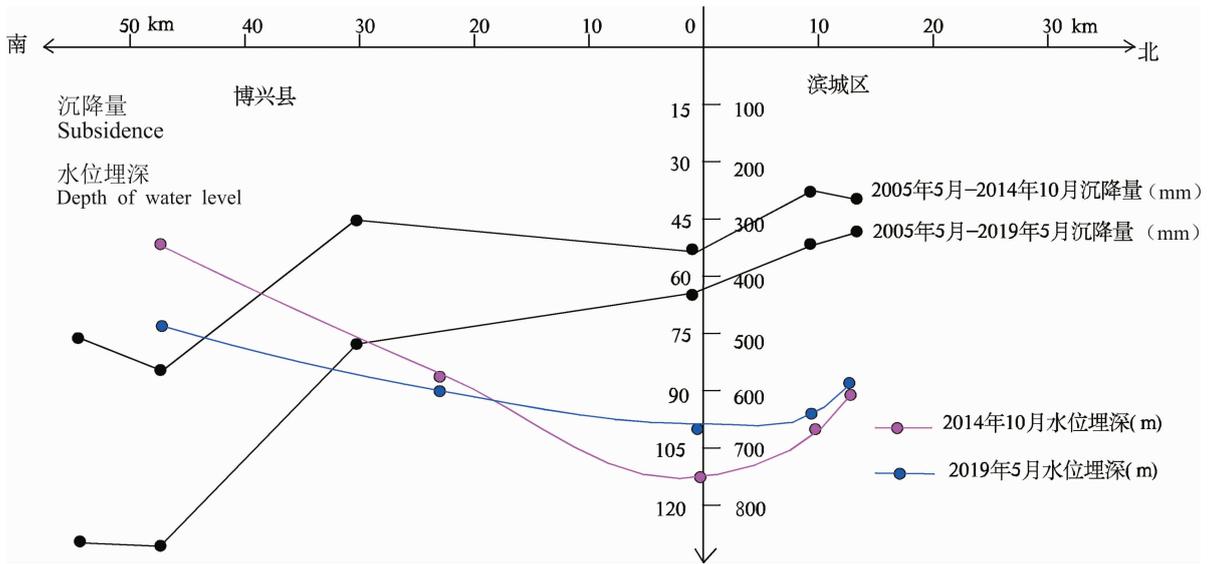


图 6 地下水与地面沉降关系图

Fig. 6 Relationship between groundwater and land subsidence

为 0.76;滨城区含水层厚度大、层数多,可压缩粘性土厚度相对偏小,为 42m,压缩层粘性土平均压缩系数为 0.11MPa^{-1} ,平均孔隙比为 0.60。地层结构和地层力学性质的差异,导致在相同水位埋深条件下,地面沉降量却不相同,地层结构和地层力学性质是产生地面沉降的另一重要因素。

表 2 地面沉降量与水位埋深统计表

Table 2 Statistics of land subsidence and water level depth

编号	2014 水位埋深(m)	累计沉降量(mm)	编号	2019 水位埋深(m)	累计沉降量(mm)
B2	/	-517	B3	/	-878
B3	56	-578	B3	74	-881
B6	89	-315	B6	91	-517
B19	112	-335	B19	103	-435
B35	98	-258	B35	95	-324
B36	90	-272	B36	90	-320

3.2.4 其他影响因素对地面沉降的影响

开采地下矿产易产生地面塌陷,工作区地下采矿活动较少,相对区域性地面沉降,其影响范围较小。工程建设活动一般在地表以下 60m 深度范围内,鲁北平原内聊城、德州、滨州、东营等城市仅少部分工程建设活动位于 60m 以下,上述分层标数据,表明 140m 以上地层沉降量较小。

黄河三角洲地区软土层广泛分布,约占三角洲地区 50%以上,透水性极差,高压缩性土层易导致地面沉降的发生。2004~2009 年广饶县沉降区域中心点平均沉降速率为 74.0mm/a,东营区沉降中心点平均沉降速率为 26.4mm/a。2004 年~2012 年,广饶县沉降区中心平均沉降速率为 113mm/a,

东营区沉降中心平均沉降速率为 32.6mm/a,呈增加趋势。在黄河三角洲地区,欠固结土也是影响地面沉降的另一重要因素。

此外,油气开采区与地面沉降分布区具有较高的重叠率,目前开展地热、油气开采与地面沉降关系研究较少,肖国强(Xiao Guoqiang, 2014)获取了天津塘沽地区明化镇组-馆陶组地热开采层引起的地面沉降占总沉降量的 20.2%,地热、油气开采对地面沉降的影响程度有待进一步研究佐证。

3.3 地面沉降与第四纪沉积特征的关系

构造控制了本区第四系沉积展布特征,本区地面沉降中心均位于断陷内,地面沉降分布与构造、第四系沉积环境、沉积厚度分布呈较好的一致性。统计 78 眼钻孔资料,本区第四纪沉积特征按地层分区阐述如下:

山前冲积、洪积平原区:含水层顶板埋深 136.0~290.0m,厚度 8.6~32.5m,平均值 17.0m,见表 3,颗粒粒径 0.5~0.25mm 占 40%~60%,岩性主要为中砂、细砂。弱透水层厚度 23.1~115.5m,平均值 57.0m,孔隙比 0.490~0.583,平均值 0.533,压缩系数 a_{1-2} 为 0.096~0.163 MPa^{-1} ,平均值 0.129 MPa^{-1} 。含水层受冲洪积扇制约,呈扇状或片状分布,单层厚度差异大,含水砂层粒径较大,多期冲、洪积扇同黄河冲积扇同期增长,扇体相互叠置,自扇轴部向两侧的扇间地带,含水层颗粒由粗变细,层次逐渐增多,单层厚度则渐次变薄,扇缘部位形成湖沼相沉积,为地面沉降提供了良好的发育环境。

表3 第四系沉积特征指标平均值一览表

Table 3 Average values of Quaternary sedimentary characteristics

地层分区	含水层 厚度(m)	弱透水 层厚度(m)	孔隙比	压缩系数 a_{1-2} (MPa^{-1})
山前冲积、洪积平原区	17.0	57.0	0.533	0.129
黄河泛滥冲积平原区	19.0	41.7	0.490	0.111
三角洲冲积、海积平原区	17.6	26.2	0.458	0.095

黄河泛滥冲积平原区:含水层顶板埋深 245.0~385.0m,厚度 12.8~25.5m,平均值 19.0m,颗粒粒径 0.25~0.10mm 占 50%~90%,岩性主要为粉细砂、细砂。弱透水层厚度 27.6~60.9m,平均值 41.7m,孔隙比 0.424~0.534,平均值 0.490,压缩系数 a_{1-2} 为 0.078~0.141 MPa^{-1} ,平均值 0.111 MPa^{-1} 。德州和滨州两地分层标数据表明沉降段主要为中更新世地层,该时期全区湖沼相发育(Zhang Zonghu et al., 1997),静水环境下沉积了较厚的细颗粒粉质黏土(Chen Gang et al., 1994; Wang Haifeng et al., 2016),形成了多层承压含水层和中~高压缩性的粘性土层结构,开采深层地下水,区域水头下降,静水压力降低,导致地层有效应力增加,从而造成地面沉降。

三角洲冲积、海积平原区:含水层顶板埋深 345.0~394.0m,厚度 13.3~21.6m,平均值 17.6m,颗粒粒径 0.25~0.10mm 占 40%~80%,岩性主要为粉细砂、细砂。弱透水层厚度 22.8~36.2m,平均值 26.2m,孔隙比 0.412~0.503,平均值 0.458,压缩系数 a_{1-2} 为 0.081~0.104 MPa^{-1} ,平均值 0.095 MPa^{-1} 。深层地下水开采主要集中在广饶县,广饶县位于山前冲积、洪积平原区和三角洲冲积、海积平原交接地带。三角洲冲积、海积平原其他地区深部为咸水,地下水开采量不大,浅层新近沉积的中~高压缩性的欠固结土层是影响三角洲冲积、海积平原地面沉降的重要因素。

从山前冲积、洪积平原区、黄河泛滥冲积平原区到三角洲冲积、海积平原区,含水层顶板埋深逐渐变深,含水砂层粒径由粗变细,孔隙比和压缩系数 a_{1-2} 平均值均呈依次递减趋势,但黄河泛滥冲积平原区含水层平均厚度和弱透水层含水层平均厚度均最大。差异性的沉积特征,造成了三个区地面沉降成因机理上的差异。

4 讨论

地面沉降既有共性也有差异特征,依据沉积相、沉积成因、地层结构、地面沉降驱动机制等因素(Shi

Jiansheng et al., 2006; Zhang Yongwei, 2014),鲁北平原地面沉降可分为三种模式。

4.1 山前冲积、洪积平原模式

沉积类型主要为冲、洪积扇,多期扇体相互叠置,颗粒较粗,水动力条件较好,扇缘发育湖沼相沉积。地面沉降驱动机制由含水层中径流渗透力增大导致砂层剪切变形和弱透水层有效应力增加引起地层压密两部分组成。抽水使含水层水位分布不均衡,层间水平径流渗透力增大,径流使细颗粒在粗颗粒孔隙中移动流失,颗粒孔隙增大,砂粒遭受剪切错动,砂层排列更紧密;抽水导致超静孔压消散,在上覆地层压力下有效应力增加,弱透水层压密释水。博兴县、广饶县地面沉降属于该类型。

4.2 黄河泛滥冲积平原模式

沉积类型主要为河湖相,沉积面积广阔,地层连续,地层累计厚度大,部分地段存在侵蚀基准面,出现沉积间断,形成超固结层段。地面沉降驱动机制主要为超静孔压消散,有效应力增加,弱透水层的压密释水。水位降幅和抽水含水层底部不(弱)透水层厚度是影响该种地面沉降类型的主要因素。临清市、德州市、滨城区地面沉降属于该类型。

4.3 三角洲冲积、海积平原模式

沉积类型主要为湖沼相、滨海相,地层连续,岩性主要为粉土、粉细砂,地层孔隙大,地层沉积年代较晚,分布有大范围的软土,属咸水分布区,地下水开采量小,城市建设规模大,油气、地热资源开发利用程度较高。地面沉降驱动机制主要为以城市建设、地面荷载叠加引起浅层欠固结土层压密变形为主,自然固结及构造沉降也是该种类型的另一影响因素。该种沉降模式代表地段为东营区和河口区。

5 结论

(1)鲁北平原内存在两个沉降中心,一处位于德城区,中心点 1992~2010 年沉降量为 1187mm。另一个沉降中心位于广饶县县城,2002~2016 年沉降量为 1605mm。

(2)滨州 5m、60m、140m 地层沉降速率基本一致,约为 58mm/a,260m 和 320m 地层沉降速率相近,分别为 20mm/a,27mm/a。140~260m 深度段的中更新地层贡献了主要的沉降量,约占总沉降量的 50%,260m~320m 深度段地层沉降量约占总沉降量的 12%,320m 以下地层沉降量约占总沉降量的 34%,140m 以上地层沉降量仅占总沉降量的 4%。

(3)依据沉积相、沉积成因、地层结构、地面沉降驱动机制等因素,鲁北平原地面沉降可分为山前冲积、洪积平原模式、黄河泛滥冲积平原模式、三角洲冲积、海积平原模式三种模式。

致谢:本文在撰写和研究中得到中国地质科学院水文地质环境地质研究所赵华研究员的指导和帮助,以及作者单位段晓飞、刘志涛、王浩、孙晓晓的支持,在此一并致谢。

References

- Chen Gang, Li Ping, Li Congxian. 1994. Characteristics and significance of late Quaternary buried alluvial fan deposits along the coastal zone of Rongcheng, Shandong Province. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 14(1): 43~49 (in Chinese with English abstract).
- Duan Xiaofei, Sun Xiaoxiao, Yang Yabin, Liu Yi. 2018. Present condition and mechanism analysis on land subsidence in northern Shandong Plain. *Shandong Land and Resources*, 34(10): 86~93 (in Chinese with English abstract).
- Guo Haipeng, Bai Jinbin, Zhang Youquan, Wang Liya, Shi Jusong, Li Wenpeng, Zhang Zuochen, Wang Yunlong, Zhu Juyan, Wang Haigang. 2017. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain. *Geology in China*, 44(6):1115~1127(in Chinese with English abstract).
- Liu Baojun, Zeng Yunfu. 1985. *Lithofacies Palaeogeography Basis and Working Methods*. Beijing: Geological Publishing House, 92 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guiyi. 2001. Basic characteristics of deep groundwater and groundwater environment in Lubei Plain. *Geology of Shandong*, 17(5) 43~47 (in Chinese with English abstract).
- Shi Jiansheng, Guo jiao, Sun Yanmin, Sun Yi, Chen Yinsheng. 2006. Spatial analysis of the relation between deep groundwater exploitation and land subsidence in Beijing-Tianjin-Hebei-Dezhou Plain Area. *Geological Review*, 52(6): 805~808 (in Chinese with English abstract).
- Sun Lin, Wang Xiuyan, Wang Mingyu, Li Jinqiu, Wang Chengmin, Zhang Lin, Zhang Min and Wang Ying. 2015. Soil compression deformation characteristics of typical profiles in the North China Plain. *Journal of Engineering Geology*, 23(S1): 145~150.
- Song Mingchun. 2008. Tectonic framework and tectonic evolution of the Shandong Province. Ph. D dissertation of Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Shen Shuilong, Xu Yeshuang. 2014. Investigation of the mechanism associated with recent land subsidence in Shanghai. *Shanghai Land & Resources*, 35(04): 12~16 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guodong. 1989. Quaternary palaeogeographic evolutions of northern Shandong Plain. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 9(2): 61~68 (in Chinese with English abstract).
- Wang Rong, Luo Yong, Yang Yan, Zhou Yi, Liu Mingkun. 2014. Land subsidence on the Wenyu River alluvial fan, Beijing. *Shanghai Land & Resources*, 35(4): 44~48 (in Chinese with English abstract).
- Wang Haifeng, Yang Jianping, Pang Xiaolin, Jia Juntao, Liu Ling. 2016. Stratigraphic structure and sedimentary evolution during late Quaternary in Lubei Plain. *Acta Sedimentologica*

- Sinica*, 34(1): 90~101 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Guoqiang. 2014. Study on mechanism of clayey soil by high pressure consolidation and process of land subsidence: a case study of the G2 geologic drill-hole in Tianjin Binhai New Area. Ph. D dissertation of China University of Geosciences.
- Yan Jingsheng. 2014. The progress on prevention and control research of land subsidence and the analysis on the regularities in typical area in Shandong Province. *China Population, Resources and Environment*, 24(11): 194~198 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zonghu, Shi Dehong, Ren Fuhong. 1997. Evolution of Quaternary groundwater system in North China Plain. *Science in Chinese (Series D)*, 27(2): 168~173 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongwei. 2014. Formation mechanism, monitoring and warning, controlling research of subsidence of Dezhou in North China Plain. Ph. D dissertation of Shandong University (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yi, Tianfang, Yang Yan. 2014. Quaternary characteristics and layout of layered boreholes for land subsidence in Beijing. *Shanghai Land & Resources*, 35(04): 90~93 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 陈刚,李萍,李从先. 1994. 山东荣成沿岸晚第四纪埋藏冲积扇的沉积特征及意义. *海洋地质与工程地质*, 14(1):43~49.
- 段晓飞,孙晓晓,杨亚宾,刘毅. 2018. 鲁北平原地面沉降现状与机理分析. *山东国土资源*, 34(10):86~93.
- 郭海鹏,白晋斌,张有全,王丽亚,石菊松,李文鹏,张作辰,王云龙,竹菊艳,王海刚. 2017. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究. *中国地质*, 44(6):1115~1127.
- 刘宝君,曾允孚. 1985. *岩相古地理基础和工作方法*. 北京地质出版社, 92.
- 刘桂仪. 2001. 鲁北平原深层地下水基本特征与水环境问题. *山东地质*, 17(5)43~47.
- 石建省,郭娇,孙彦敏,孙毅 陈银生. 2006. 京津冀德平原区深层水开采与地面沉降关系空间分析. *地质论评*, 52(6):805~808.
- 孙琳,王秀艳,王鸣宇,李金秋,王成敏,张琳,张敏,王莹. 2015. 华北平原典型剖面土体压缩变形特征. *工程地质学报*, 23(S1):145~150.
- 宋明春. 2008. 山东省大地构造格局和地质构造演化. 中国地质科学院博士学位论文.
- 沈水龙,徐焯霜. 2014. 上海地区地面沉降新特征的发生机制分析. *上海国土资源*, 35(04):12~16.
- 王国栋. 1989. 鲁北平原第四纪古地理的演变. *海洋地质与第四纪地质*, 9(2). 61~68
- 王荣,罗勇,杨艳,周毅,刘明坤. 2014. 北京温榆河冲积扇地面沉降特征及机理研究. *上海国土资源*, 35(4):44~48.
- 王海峰,杨剑萍,庞效林,贾军涛,刘玲. 2016. 鲁北平原晚第四纪地层结构及沉积演化. *沉积学报*, 34(1)90~101.
- 肖国强. 2014. 深部粘性土高压固结机理与地面沉降过程研究—以天津滨海新区 G2 孔为例. 中国地质大学博士学位论文.
- 颜景生. 2014. 山东省地面沉降防治研究工作进展及典型区地面沉降规律分析. *中国人口·资源环境*, 24(11)194~198.
- 张宗祜,施德鸿,任福弘. 1997. 论华北平原第四系地下水系统之演化. *中国科学(D辑)*, 27(2)168~173.
- 张永伟. 2014. 华北平原德州地面沉降成生机理_监测预警与可控性研究. 山东大学博士学位论文.
- 周毅,田芳,杨艳. 2014. 北京地区第四纪沉积特征与沉降监测标孔布设. *上海国土资源*, 35(04)90~93.

Quaternary sedimentary characteristics and land subsidence model in North Shandong Plain

JI Honglei ^{*1)}, YANG Yabin ¹⁾, ZHANG Yongwei ²⁾, LIU Suzhe ¹⁾, ZHU Zhiyong¹⁾

1) *The Second Hydrogeological Engineering Geological Brigade of Shandong Geological Survey Bureau (Shandong North Shandong Geological Engineering Survey Institute), Shandong Dezhou 253072;*

2) *Shandong Geological Environment Monitoring Station, Shandong Jinan 250014*

** Corresponding author: jhl0543@163.com*

Abstract

Ground subsidence geological hazards are becoming more and more serious in North Shandong Plain, which restricts the construction of major projects and social and economic development. Based on the analysis of the distribution characteristics of Quaternary sediments, combined with the second-class leveling data and stratified subsidence scale data and the law of land subsidence, this paper reveals the mechanism and mode of land subsidence in the North Shandong Plain, which can be used as a reference for similar areas. (1) The main contributing layer of land subsidence in the North Shandong Plain is the Middle Pleistocene stratum, and the subsidence of 140~320 m stratum in Binzhou is about 62% of the total subsidence. (2) According to sedimentary facies, sedimentary origin, stratigraphic structure and driving mechanism of land subsidence, land subsidence in North Shandong Plain can be divided into three models: piedmont alluvial model, flood plain model, Yellow River flood alluvial plain model, delta alluvial model and marine plain model.

Key words: North Shandong Plain; Quaternary; sedimentation; land subsidence