

doi: 10.12029/gc20170606

郭海朋, 白晋斌, 张有全, 王丽亚, 石菊松, 李文鹏, 张作辰, 王云龙, 朱菊艳, 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[J]. 中国地质, 44(6): 1115-1127.

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[J]. *Geology in China*, 44(6):1115-1127 (in Chinese with English abstract).

华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究

郭海朋¹ 白晋斌² 张有全³ 王丽亚⁴ 石菊松⁵

李文鹏¹ 张作辰¹ 王云龙¹ 朱菊艳¹ 王海刚¹

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 天津市地质调查研究院, 天津 300191; 3. 首都师范大学, 北京 100048; 4. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195; 5. 中国地质调查局, 北京 100037)

摘要:华北平原是世界上最大的地下水系统之一,地面沉降问题突出。由于沉积环境变化多样、地质条件差异性显著和人类开采活动强烈,使得该地区地面沉降成因机理复杂。本文采用卫星对地观测技术与传统手段相结合,监测地面沉降灾变过程,分析华北平原地面沉降发展历史和现状。结合应力-应变图解法及土工实验研究地面沉降差异性特征及滞后变形成因机理。取得了以下关键认识:(1)华北平原地面沉降空间分布差异性明显,沉降主要分布在平原区第四纪沉积凹陷,呈现东西分带、南北分段特点。地面沉降空间发展部分受到北东向和北西向构造控制。在沧县隆起区,地面沉降也比较发育,主要原因是沧县隆起在第四纪时期构造运动相对不活跃,沉积了较厚的第四系;存在与构造走向一致的 3 期古河道,该地区赋存丰富的地下水资源并被大量开采。(2)地面沉降发生发展与地下水开采历史密切相关,沉降主要压缩贡献层随地下水开采层位变化而变化。北京平原 100 m 以深地层对地面沉降贡献呈增加趋势。天津平原目前地面沉降的主要贡献层来自 300 m 以下地层。(3)气候干旱导致地下水补给量减少,同时增加了地下水的开采,因而是引起地面沉降的重要间接驱动因素。高层建筑荷载、基坑降排水、地热开采对地面沉降的影响应引起足够重视。(4)地面沉降具有很强的滞后性,最大滞后时间可达 25 年。除了渗透固结成因以外,土体蠕变是另外一个重要原因。更新世地层在不同荷载下,蠕变特征明显。沧县隆起晚更新世地层次固结可达到总变形 28.3%。(5)土的物理性质、地下水位变化模式对土层变形特征具有重要影响。不同埋深地层在地下水位变化条件下的变形特征存在较大的差异(弹性、黏弹性、黏弹塑性)。浅部含水组呈现以弹性为主的变形特征。

关键词:华北平原;地面沉降;变形特征;地下水位;滞后

中图分类号:P542.26 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2017)06-1115-13

The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain

GUO Haipeng¹, BAI Jinbin², ZHANG Youquan³, WANG Liya⁴, SHI Jusong⁵, LI Wenpeng¹,
ZHANG Zuochen¹, WANG Yunlong¹, ZHU Juyan¹, WANG Haigang¹

(1. *China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China*; 2. *Tianjin Institute of Geological Survey, Tianjin*

收稿日期:2017-11-01;改回日期:2017-11-24

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20160235, 1212011140022, 12120113011700)和国家自然科学基金项目(41572220)联合资助。

作者简介:郭海朋,男,博士,1979年生,教授级高级工程师,从事水文地质与地面沉降调查研究;E-mail: guohp@mail.cigem.gov.cn。

300191, China; 3. Capital Normal University, Beijing 100048, China; 4. Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China; 5. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: The North China Plain (NCP) is one of the biggest groundwater systems in the world, and land subsidence occurs commonly. Due to diverse sedimentary environments, different geological conditions, and intensive groundwater exploitation, the mechanism of land subsidence is complex. With the help of earth observing technique and traditional monitoring tools, the disaster process of land subsidence was monitored, and the developing history and current situation were analyzed. Combined with strain-stress diagrams and soil mechanics tests, the difference features of land subsidence and the mechanism of hysteretic deformation were analyzed. Some conclusions have been reached: (1) The spatial distribution of land subsidence is significantly distinct. The land subsidence areas are mainly located in the areas of the Quaternary sedimentary depressions, having characteristics of west-east sub-zone and north-south subsection. The spatial development of land subsidence is partially controlled by NE- and NW-trending structures. The land subsidence in the Cangxian uplift is serious in that the tectogenesis is relatively inactive in Quaternary and the loose sediments are very thick. Also, there exist paleochannels of three layers with the same strike as the structures, whose groundwater resource is abundant and has been intensively exploited. (2) The development of subsidence is correlated with the local groundwater exploitation history, and the major contribution layers to the land subsidence have varied with the change of exploited layers. The contribution of the strata below 100m has increased in the Beijing plain. The land subsidence of the Tianjin plain mainly comes from the compression of the strata below 300 m. (3) The drought is an important and indirect factor leading to subsidence by reducing natural recharge and leading to the increase of groundwater exploitation for emergency water supply. Besides, in the groundwater exploitation, much attention should be paid to the effect of the heavy weight of densely constructed buildings, dewatering of foundation pits, and the exploitation of deep geothermal water. (4) The hysteresis of land subsidence is obvious, and the time of hysteresis can last for twenty-five years. Besides the consolidation, the creep is another important reason for the hysteresis. The creep is obvious for the Pleistocene strata, which can reach 28.3% of the total deformation for the Late Pleistocene strata in the Cangxian uplift. (5) The deformation characteristics of the soil layer bear strong relationship to the physical characteristics and change pattern of groundwater levels. The strata at different depths have distinct deformation characteristics such as elastic, visco-elastic, and visco-elastic-plastic deformations. Shallow aquifer groups indicate typical elastic deformation.

Key words: North China Plain; land subsidence; deformation characteristics; groundwater level; hysteresis

About the first author: GUO Haipeng, male, born in 1979, professor, mainly engages in the study of hydrogeology and land subsidence; E-mail: guohp@mail.cigem.gov.cn.

Found support: Supported by China Geological Survey Program (No.DD20160235, No.1212011140022, No.12120113011700) and National Natural Science Foundation of China (No. 41572220).

1 引 言

地面沉降是指由于抽取地下流体等因素引发的地下松散岩层固结压缩并导致一定区域范围内地表高程降低的地质现象,地面沉降作为一种地质灾害已在世界许多国家和地区产生了严重影响(Hu et al., 2004; 薛禹群等, 2006; Shelley et al., 2007; Motagh et al., 2008; Pacheco-Martínez et al., 2013)。本文中的华北平原指太行山以东、燕山以南和黄河以北的平原地区,包括北京、天津和河北三省市平原区,以及山东和河南两省黄河以北平原地区,总面积约 140000 km²,是我国地面沉降速率最

快、影响面积最大的地区。华北平原地区大量开采地下水和油气等资源,尤其是大规模的地下水开采是诱发地面沉降的主要驱动因素。

随着科学技术的进步,地面沉降的监测手段和技术不断提高,使地面沉降研究的深度和广度不断拓展,监测和预警预报机制逐步完善,防治对策措施更加切合实际并产生良好实效。20世纪90年代以来,合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术日渐成熟,成为监测区域地面沉降时空变化的重要技术手段(Stramondo et al., 2008; Khan et al., 2013; Tomas et al., 2014),与GPS、水准和分层标等地表、地下监测互为补充,已经成为华北平原地面沉降监测体系

的重要组成部分。20世纪90年代以来,我国学者围绕华北平原地面沉降问题深入开展了调查、监测和研究工作,如地面沉降成因、驱动机理和灾变过程以及防治措施等。同时,各地政府对地面沉降日趋重视,其中,北京、天津、沧州等地由于政府关注,对地面沉降调查、监测和理论研究程度较高。北京平原的地面沉降先后经历了形成、发展、扩展和快速发展阶段,从区域上构成了南、北两大片区,形成了7个沉降中心;其中,北部沉降区绝大部分形成于北京拗陷内,近年来沉降逐渐向东北方向扩展,但受冲洪积扇上部单一砂卵砾石地层影响而扩展范围有限(王荣等,2014;姜媛等,2015年;周毅等,2016)。截至2014年北京市平原区年沉降量大于10 mm的区域面积达2583 km²,最大年沉降量144.2 mm(周毅等,2016)。在天津平原地下水长期超采区,部分长期超采的含水组地层处于超固结状态,当水位下降在地层内引起的附加荷载超过超固结值(地层的前期固结压力与自重压力之差),地层仍会产生明显沉降(牛修俊,1998;白晋斌和牛修俊,2010)。由于固结程度较高,且容易获得第一含水层组地下水的越流补给,天津中部平原和滨海平原第二、三含水组深层地下水开采对地面沉降影响较小,为适宜开采层位(王家兵等,2010)。沧州地区是华北平原地面沉降最严重的地区之一,地面沉降主要由深层地下水开采所致,而深层地下水开采量主要集中于第三含水组,该段地层黏性土层的压缩是造成地面沉降的最主要因素;由于地层中矿物成分以塑性比较大的黏土、粉质黏土为主,容易形成永久性沉降(郭永海等,1995;刑忠信等,2004;郭海朋等,2014;Guo et al.,2015)。

近年来,国际上地面沉降领域的最新研究成果主要集中在地面沉降影响因素及风险防控、地面沉降地裂缝模型、地面沉降相关灾害监测技术方法、社会经济影响及其管理对策等方面,在基础理论上和技术方法上都有了较大的发展,更加注重理论模型的探索和新技术新方法的实践(张阿根等,2010)。针对华北平原地面沉降问题,开展了较多的基础性调查工作,本文对笔者近些年开展的地质调查工作进行总结和分析研究,对华北平原地面沉降演化特征和机理取得了一些新的认识,以期对华北平原地面沉降防控工作有所借鉴和推动。

2 华北平原地面沉降演化特征

2.1 地面沉降演化历史

华北平原地面沉降发生发展与各地地下水开采历史密切相关。由于地面沉降影响因素复杂,各地地下水开采利用情况不同,地面沉降发展速率和影响范围在不同空间、时间上具有较大的差异性。20世纪50年代末以前,地面沉降出现并缓慢发展。天津市地面沉降发生于20世纪20年代,成为华北平原因开采地下水产生地面沉降最早的地区,北京在1935年也发现西单至东单一带发生了地面沉降。60年代中期至80年代中期,华北平原地面沉降整体上进入快速发展期。天津市地面沉降快速发展,形成了中心城区、塘沽区、汉沽区及海河下游工业区等沉降中心。河北中东部平原、鲁北平原德州市由于深层地下水的大规模开采,出现了大面积深层地下水降落漏斗,地面沉降的范围不断扩展。北京平原东郊地区形成大郊亭和来广营两个沉降中心,且沉降范围逐步扩展。80年代中期至90年代中期,由于不同地区地下水开采管理措施的不同,地面沉降发展出现地区性差异。天津市实施了三期三年控沉计划,集中治理地面沉降,中心城区、滨海新区地面沉降快速发展趋势逐步得到遏制。河北中东部平原地面沉降仍在继续发展,尤其中小城市和农村地区地下水开采量大幅度增加导致地面沉降范围从城市向农村扩展,并在区域上连片发展。90年代中期之后,地面沉降发展地区性差异仍比较显著。天津市地面沉降进入综合治理阶段,武清杨村、中心城区、塘沽等地面沉降中心沉降得到有效控制,但市区周边及郊县地面沉降发展较快。河北平原除沧州市区的地面沉降有所缓解之外,其余地区地面沉降仍在快速发展。北京平原形成一北一南两大沉降区、五个沉降中心的格局,两大沉降区范围不断向外扩展。据资料显示,天津平原1958年以来累计沉降量超过1 m的面积超过4000 km²,局部超过3 m(王家兵等,2010)。北京平原区1955—2007年最大累计沉降量达1.1 m(Zhang et al.,2014)。沧州市2008年最大累计地面沉降量为2.5 m,沉降量大于1 m的面积约占全区总面积的15%(房浩等,2014)。

2.2 地下水开采与地面沉降空间分布特征

华北平原地面沉降产生的主要驱动因素是过

量开采地下水。利用GRACE卫星数据反演结果显示,长期过量开采地下水导致华北平原在2004—2015年间地下水储量整体呈减少的趋势(图1,表1),仅在丰水年地下水储量有所回升。从山前冲积洪积倾斜平原,至中部冲积湖积平原和东部冲积海积滨海平原,含水层系统由单一含水层逐渐演变为多层,岩性颗粒由粗变细,可压缩黏土层厚度变厚。山前冲洪积扇地区容易接受山前地下水的侧向径流补给,大气降水补给条件也比较好;相反中东部平原地下水补给条件较差,可更新能力低,在相同地下水开采强度下,更容易产生地面沉降。在邯郸

等城市的山前冲积洪积平原区,浅层地下水过量开采是诱发地面沉降的重要因素。华北平原深层地下水漏斗主要分布在中东部平原,目前已经形成了廊坊—天津、沧州和衡水—德州3个深层地下水漏斗群,近40年以来,深层地下水位大幅度下降(图2,表2),其中冀枣衡地下水漏斗水位下降已经超过80 m。华北中东部平原地面沉降严重区与深层地下水漏斗的分布基本吻合,天津、沧州、衡水、德州地面沉降已经连成一片(图3)。

目前,北京、天津中心城区沉降速率均已控制在10 mm/a以内,总体呈微量沉降和局部回弹趋势,但城市周边地区地面沉降速率较大,沉降范围持续扩大。河北省沧州市、衡水市加强了地下水的开发利用管理,沉降速率明显趋缓;其他地区地下水开发利用

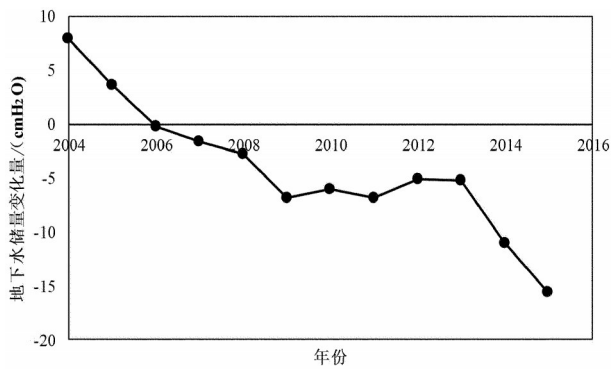


图1 GRACE卫星数据反演的华北平原地下水储量变化曲线
Fig.1 The GRACE-derived change in groundwater storage with time in the North China Plain (NCP)

表1 2004—2015年GRACE卫星数据反演的华北平原地下水储量

Table 1 The GRACE-derived change in groundwater storage from 2004 to 2015

年份	平均储量变化/(cmH ₂ O)
2004	7.95
2005	3.56
2006	-0.17
2007	-1.61
2008	-2.82
2009	-6.92
2010	-6.01
2011	-6.88
2012	-5.13
2013	-5.30
2014	-11.01
2015	-15.63

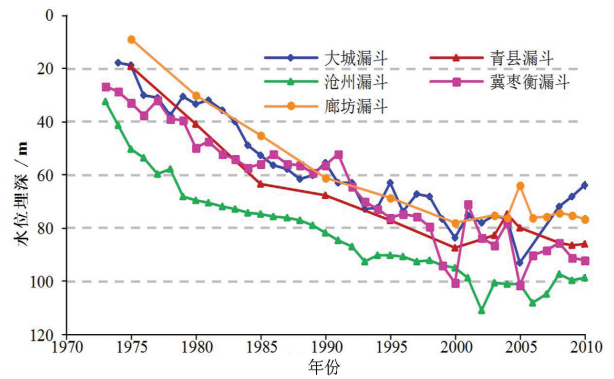


图2 华北平原主要深层地下水漏斗水位埋深变化历时曲线
Fig.2 Change of water level depths in centers of several major deep groundwater depression cones in the NCP

表2 1975—2010年华北平原主要深层地下水漏斗水位埋深变化

Table 2 Change of water level depths in centers of several major deep groundwater depression cones from 1975 to 2010 in the NCP

年份	水位埋深/m				
	大城	青县	沧州	冀枣衡	廊坊
1975	18.6	19.4	50.1	32.8	8.9
1980	33.2	40.7	69.7	50.0	30.1
1985	52.7	63.4	74.8	55.9	44.9
1990	55.4	67.5	81.8	56.5	61.1
1995	62.9	76.9	90.4	76.1	68.6
2000	83.7	87.6	95.1	100.8	78.2
2005	92.8	80.1	101.1	101.4	63.8
2010	64.0	86.0	98.9	92.3	76.6

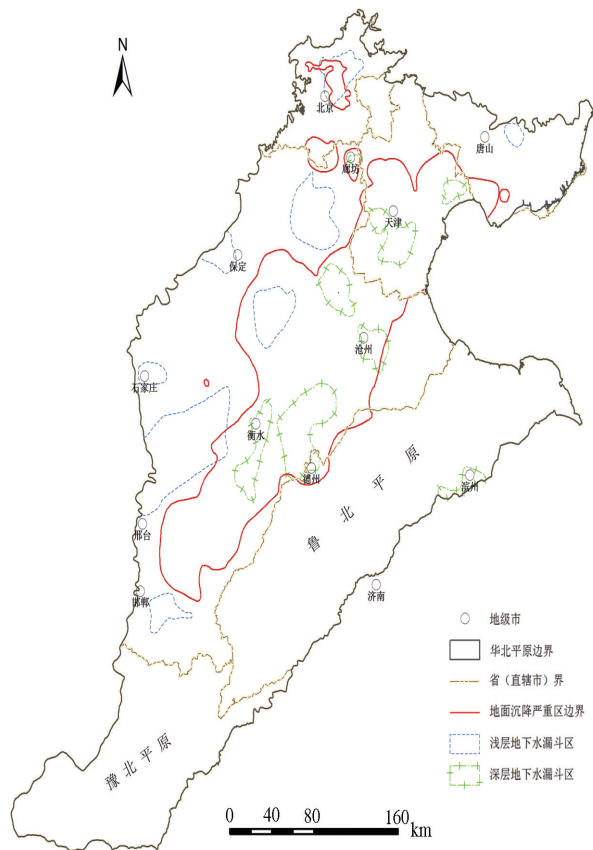


图3 华北平原主要浅层和深层地下水漏斗以及地面沉降严重区分布图

Fig.3 Distribution of the depression cones of shallow and deep groundwater, and major land subsidence area in the NCP

管理程度相对较低,许多县市地下水超采严重并导致地面沉降快速发展。鲁北平原一些县市地面沉降发展较快,形成区域上零星分布的沉降漏斗。豫北平原沉降速率相对较小,以轻微沉降为主。

3 华北平原地面沉降机理讨论

3.1 构造和第四系沉积条件是影响地面沉降发展的重要因素

华北平原地面沉降空间分布差异性明显,沉降主要分布在平原区第四纪沉积凹陷内,呈现东西分带、南北分段特点。华北平原内部盖层表现出明显的复杂断块结构,以断裂为界将华北平原分为北京拗陷、冀中拗陷、沧县隆起、黄骅拗陷、埕宁隆起、临邑拗陷、临清拗陷、渤中拗陷8个构造区。受掀斜式断块差异运动的作用,在不同的断块构造区里,第四系底部埋深差异较大,形成多个北东向第四纪凹

陷带,第四纪时期北西向断层活跃,也局部形成北西向第四纪沉积凹陷带。第四系沉积环境和沉积厚度分布与地面沉降空间分布有较好的一致性(图4),廊固拗陷、武清拗陷和北京拗陷(顺义拗陷)内皆发育北东向沉降带,表明第四系沉积条件差异是影响地面沉降空间发展的一个重要因素。以北京平原区为例,第四纪以来由于断块升降运动,形成了一系列第四纪凹陷(沙河、后沙峪、东坝—天竺、俸伯及平谷),凹陷内发育多层含水层系统,随着这些地区中深层地下水的开采,诱发了地面沉降,因而沉降空间上多分布于这些第四纪沉积凹陷内。

在沧县隆起区,地面沉降也呈带状沿构造轴部北东向分布,发育程度较高,分析其原因主要有:(1)第四纪时期构造运动不活跃,上覆第四系沉积物厚度达350~450 m,沧县隆起区与西北侧冀中拗陷第四系沉积层厚度差异不大;(2)沧县隆起区存在与断层走向近一致的三期古河道(吴忱等,1986),水质及富水性条件较好,是地下水开采井群分布的主要地区,中深层地下水的开采导致了沧县隆起地区地面沉降比较发育。

华北平原地面沉降空间发展受到构造控制。北京平原区地面沉降空间发展受到北西向的南口—孙河断裂(西段)、来广营凸起带,北东向黄庄—高丽营断裂(北段)、南苑—通县断裂(北段)和大兴凸起影响。其中在来广营凸起和大兴凸起地区,受西山隆起作用的影响,第四系晚更新世地层被剥蚀掉,区域尺度上缺失第二含水层,地面沉降发育较弱,区域上水文地质单元的不连续是控制该地区地面沉降发展的重要影响因素。黄庄—高丽营断裂(北段)、南苑—通县断裂(北段)正断型断层带大大限制了地面沉降的空间扩展。InSAR结果表明,在河北泊头地区沧东断裂对地面沉降控制作用比较明显,这为认识断裂发育深度和断层活动特性提供了较好的指示作用。

3.2 气候变化是影响地面沉降的重要间接因素

人口增长和经济发展导致了地下水过量开采,是华北平原地面沉降产生的主要诱因,这一点已经成为共识,但人们往往忽略或低估了气候对地面沉降的间接影响。气候干旱对地下水位下降有双重影响,一方面是干旱造成地下水补给量的减少;另一方面,干旱期间为了满足供水需求,从而抽取更

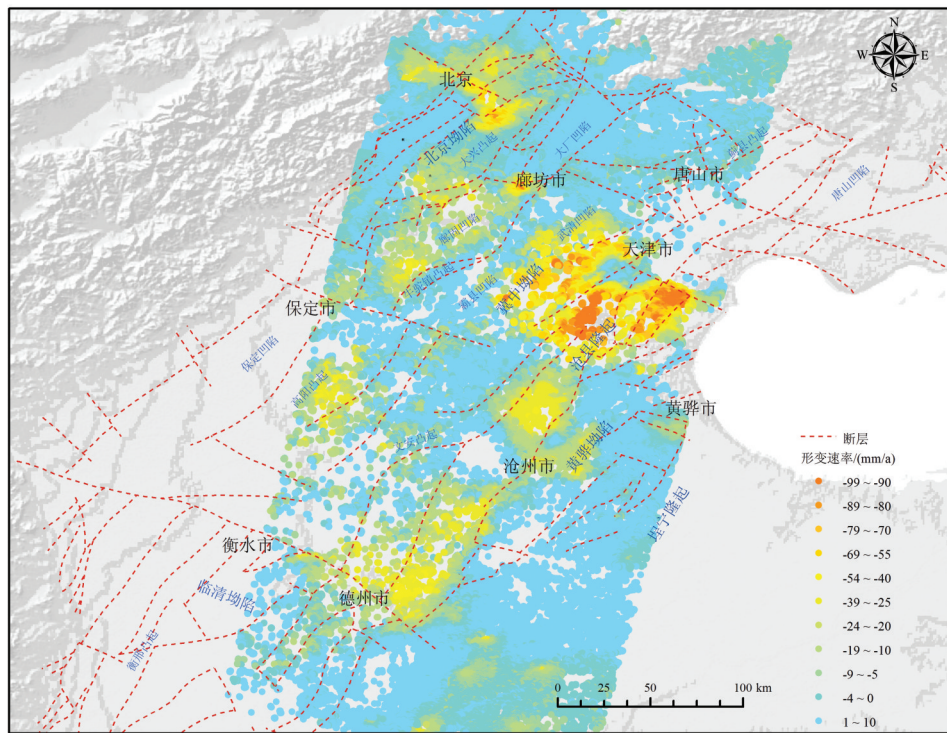


图4 华北平原区域地质构造及地面沉降速率分布图(2003—2010)

Fig.4 Subsidence rate map of 2003—2010 overlying a shaded relief map containing geological features in the NCP

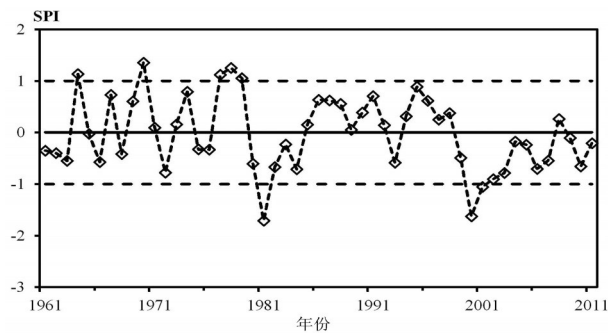


图5 根据北京平原14个气象站降水数据计算的年标准化降水指数(1961—2011年)

Fig.5 SPI index for average annual total rainfall of 14 meteorological stations from 1961 to 2011 in the Beijing plain

多的地下水来弥补地表水供水的不足。在干旱的双重影响下,地下水位必将大幅度下降,气候也成为引起地面沉降的重要间接因素。以北京市平原为例,利用14个地面气象监测站逐月降水资料为基础计算了标准化降水指数(SPI)。SPI=0表示正常年,SPI<-1表示干旱年,SPI>1表示湿润年。图5表明1980—1984年和1999—2011年均均为连续的干旱

周期,其中,2001—2005年和2006—2010年的平均降雨量仅为410.4 mm和486.2 mm(表3)。1999—2011年连续12年的干旱周期与北京平原地面沉降快速发展阶段吻合,表明气候干旱是导致地面沉降发展的重要间接因素。

同样,降雨量增加会减缓地面沉降发展。2016年京津冀地区是丰水年,年降雨量较2015年增加100 mm,同时受地下水超采综合治理、南水北调受水区地下水压采等因素影响,地面沉降发展趋势得到了初步遏制。

3.3 地面沉降主要压缩层随地下水开采层位变化而改变

华北平原地面沉降主要由地下水开采引起,地面沉降的发展是伴随着地下水的开采不断发展的,压缩量大的地层多为区域地下水主要开采层位或相邻弱透水层。北京地区潜水和浅层承压水开采量较小,地下水位相对稳定,地层压缩量较小。随着近年来局部地区深层地下水开发程度提高,深层地下水水位呈现

表3 1961—2010年北京平原平均降水量变化
Table 3 The average annual rainfall from 1961 to 2010 in the Beijing plain

年份	平均降水量/mm
1961—1965	564.4
1966—1970	603.6
1971—1975	490.2
1976—1980	645.4
1981—1985	527.5
1986—1990	632.4
1991—1995	636.4
1996—2000	500.3
2001—2005	410.4
2006—2010	486.2

持续下降的趋势,100 m以深地层的压缩量占总沉降量的比重总体呈增大趋势,表明引起沉降的主要压缩层位已向深部地层转移(图6)。

天津平原第四系孔隙水垂向上为咸-淡水双层结构。依据沉积物的组成及开发利用条件等可将第四系孔隙水划分为四个含水组:第一含水组相当于全新统和上更新统,底界深度一般在70 m以内;第二含水组相当于中更新统,底界深度在180~220 m;第三含水组大致相当于下更新统上段,底界深290~310 m;第四含水组相当于下更新统下段,在隆起区尚包括部分新近系含水层,底界深度370~430 m。第一含水组属于浅层地下水系统,以咸水为主,

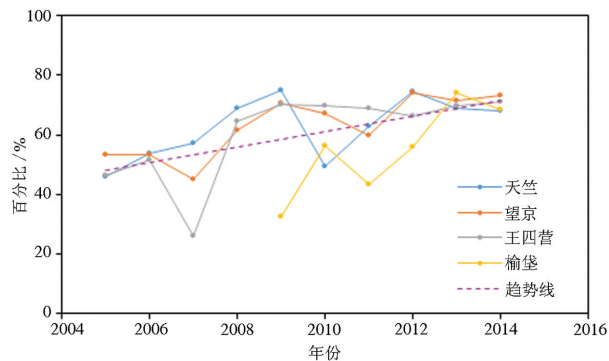


图6 北京平原主要沉降区100 m以深地层对地面沉降的贡献变化趋势

Fig.6 The temporal percentage of the deformation for the strata at depths of more than 100m in total settlement in the Beijing plain

基本不开采,第二至第四含水组属深层地下水系统。近年来天津平原300 m以下深部地层是地面沉降主要压缩贡献层(表4),并且西青、汉沽等地区深部地层的形变贡献有所增加。

3.4 人类工程活动、地热等因素对地面沉降的影响不容忽视

华北平原大规模工程活动集中在城市中心城区和沿海地区,建筑基坑降水和密集高层建筑荷载等因素对地面沉降影响日益突出,应引起关注。天津河西区新八大里地区由于大规模基坑排水工程施工,导致周边区域地面沉降加剧,2015年沉降速率由之前的年均20 mm骤增到72 mm。近年来大型建筑越来越多,基坑开挖越来越深,虽然影响面积小,但对局部地区的沉降是不可忽视的因素。根据建筑物长观资料,天津地区浅基础年沉降10~15 mm,深基础年沉降5~10 mm。沧州市中心城区年沉降量普遍保持在10 mm以下,但市区西边恒大城市等楼盘附近年沉降量高达20~30 mm。

华北平原石油、天然气和地热开发对地面沉降有一定影响。天津塘沽分层标监测数据表明,2011—2014年塘沽地区地热开采层压缩量占总沉降量的比例达20%(李红等,2017)。由于目前华北平原地面沉降分层标的主要监测层位是第四系地层,因而不能定量研究地面沉降与深层地下流体开采的关系。华北平原地热资源丰富,深入研究深部地热层扰动向浅表层传递的地质力学过程与致灾机理,将会为京津冀协同发展区深部地热资源的绿色开发利用提供决策支持。

3.5 土层变形特征与土的物理性质、固结程度和地下水位变化模式关系密切

3.5.1 土层变形滞后明显

华北平原分层标监测数据表明,地面沉降具有很强的滞后性,即使地下水位停止下降甚至抬升,地面沉降仍将持续。滞后时间的长短决定于地层结构(黏性土层的厚度、水平连续性)、矿物组成和土体固结程度等因素。华北平原地面沉降滞后主要是由于低渗透性弱透水层(或夹透镜体含水层)延迟排水和土体次固结压缩所致。华北平原内沧州市地面沉降主要是由超采第三含水组的深层地下水引起的,该含水组上段地层(第三压缩层)回弹常滞后于水位回升1~2个月时间(图7),主要原因是

表4 2004—2013年天津平原各地层的变形量占比(%)

Table 4 Percentage of the deformation for different strata in the Tianjin plain (2004-2013)

地层	大直沽		西青		汉沽	
	2004—2008	2009—2013	2004—2008	2009—2013	2004—2008	2009—2013
浅层	6.99	4.00	1.26	0.58	7.84	5.20
第一组	9.18	6.64	0.09	0.42	23.47	15.00
第二组	8.25	4.02	15.70	15.11	20.50	5.83
第三组	7.08	24.18	42.47	16.66	5.70	11.11
第四组及以下	58.50	61.21	40.47	67.23	54.90	62.79

该含水组存在较厚且水平连续分布的弱透水层,含水层水位回升后,弱透水层孔隙水压力消散需要较长时间。2010年秋季至2014年春季,第三含水组上段水位在波动中略有回升,但地层压缩变形持续增加(图8,表5),说明土层不仅存在残余塑性变形,可能还有随时间发展的蠕变变形。分层标数据分析表明,天津平原不同含水组土层变形存在明显滞后,如果黏性土与砂层交互成层,单层厚度不大,形成双面排水,滞后时间为7~15年;如果地层以巨厚的黏性土层为主,夹薄砂层,滞后时间大于25年,甚至更长。塘沽第二含水组地层为黏性土与砂互层,总厚度黏性土大于砂层。20世纪80年代初,地下水开始减采,特别是1985年第一期三年控沉计划实施之后,二组开采量明显减小,水位开始回升,但此时弱透水层滞后排水仍然进行,同时可能伴随蠕变效应,土体压缩变形持续发生,持续的时间大约有10年。

饱和黏性土渗透性较小,超孔隙水压力消散需

要一定时间。为了进一步分析含水层系统滞后响应机理,开展了室内土体固结试验,结果表明冀中坳陷内武清凹陷地区及沧县隆起地区中晚更新世地层土体在不同荷载条件下,蠕变特征明显。图9是沧州沉降区69 m深粉质黏土试样各级荷载下变形随时间变化的蠕变曲线。同时,国内外研究表明不仅黏土可能发生蠕变,砂砾含水层也可能发生蠕变(张云等,2011; Zhang et al., 2012; Wang et al., 2013; 薛禹群等,2006; Craig, 2004)。

通过对华北平原冀中坳陷和沧县隆起典型地区土体固结试验表明,华北平原地面沉降滞后现象除了渗透固结成因以外,土体蠕变是另外一个重要原因。冀中坳陷内天津杨村地区及沧县隆起沧州地区更新世地层土体蠕变特征明显,早更新世地层蠕变分量相对较小,占总形变5.9%~16.9%,主要原因是该层位土体固结程度较高,多处于超固结状态;中更新世、晚更新世地层土体蠕变可占压缩变

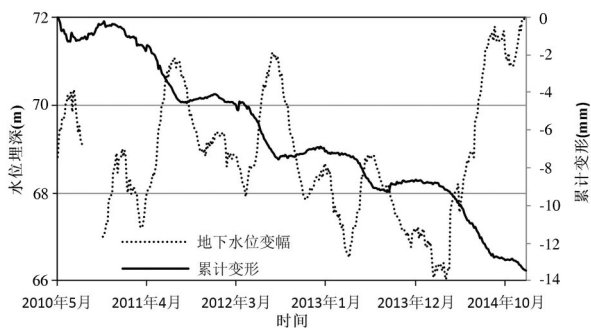


图7 沧州市区第三压缩层地下水埋深和地层累计变形随时间变化曲线

Fig. 7 The temporal variation of the groundwater level depth and deformation of the third compression layer in the downtown of Cangzhou

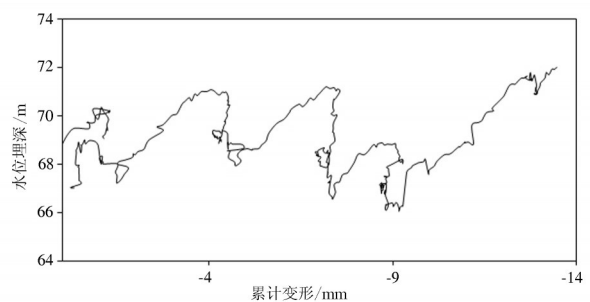


图8 沧州市区第三压缩层地下水埋深和地层累计变形相关曲线

Fig. 8 The relation curve between the groundwater level depth and deformation of the third compression layer in the downtown of Cangzhou

表5 2010—2014年沧州市区第一和第三压缩层地下水埋深和累计变形

Table 5 The groundwater level depth and deformation of the first and the third compression layers from 2004 to 2013 in the downtown of Cangzhou

年份	月份	第一压缩层		第三压缩层	
		水位埋深/m	累计变形/mm	水位埋深/m	累计变形/mm
2010	7—9	3.2	-2.3	69.6	-1.1
	10—12	3.9	-5.3	67.7	-0.4
2011	1—3	4.8	-9.2	68.3	-1.0
	4—6	5.5	-14.6	68.8	-2.3
	7—9	3.4	-12.2	70.6	-4.2
	10—12	2.4	-11.0	69.2	-4.2
2012	1—3	2.2	-10.4	68.9	-4.5
	4—6	4.7	-13.9	69.3	-5.7
	7—9	3.5	-12.5	70.3	-7.4
	10—12	2.3	-11.8	68.2	-7.1
2013	1—3	2.0	-11.4	67.8	-7.2
	4—6	2.2	-11.5	67.8	-7.9
	7—9	1.7	-10.0	68.2	-9.1
	10—12	1.8	-10.9	67.1	-8.7
2014	1—3	2.2	-11.6	66.5	-8.9
	4—6	3.5	-14.2	68.2	-10.2
	7—9	4.0	-15.6	71.0	-12.2
	10—12	3.1	-14.4	71.4	-13.0

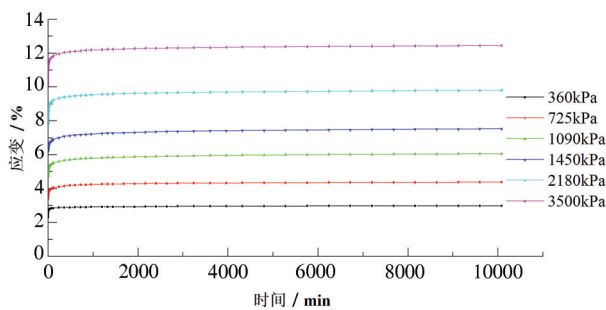


图9 沧州沉降区69 m深粉质黏土试样蠕变曲线
Fig. 9 The creep curve for silt clay at 69 m depth in the subsidence area of Cangzhou

形14.3%~28.3%，其中沧县隆起晚更新世地层次固结最大可达总压缩变形的28.3%(图10)。因此，在华北平原开展重大工程建设及地面沉降中长期预

报时，忽略土体蠕变变形，会引起较大误差。应根据含水层组地下水水位、孔隙水压力和最大前期固结应力，分析实际工作区土体所处变形阶段，考虑是否加入蠕变变形分析。

3.5.2 土层变形特征差异性显著

华北平原不同地区由于经历沉积过程、沉积相的不同，以及地层岩性及应力加载过程条件(地下水水位变化模式)等不同，不同埋深土层在地下水水位变化下的变形特征存在较大的差异，呈弹性、黏弹性和黏弹塑性变形(Zhang et al., 2014)。其中，山前平原的北京天竺地区、中东部平原的天津中心城区以及滨海的沧州地区浅部含水组呈现以弹性为主的变形特征(图11)。沧州市区第一压缩层对应第一含水组和第二含水组上段，含水层水位呈季节性波动，其平均值基本上保持不变或略有下降，弱透水层或夹透镜体含水层相应地经受着反复加卸载的作用，随着循环次数增加，土层变形呈现弹性变形为主的形变特征(图12，表5)。

1985年以后，随着天津中心城区开采量的不断减少，特别是第二含水组减采的幅度更大，水位明显回升，相应弱透水层由于变形滞后效应，持续压缩5~7年，随后弱透水层随着地下水水位波动表现出以弹性变形为主的特征，应加强机理研究。2000年以后塘沽地区第三含水组和汉沽第二含水组均出现回弹现象。

3.5.3 土的固结程度是影响地层压缩的重要指标

欠固结地层在自重压力作用下固结尚未完成，这类地层即使没有任何外部荷载，在自重荷载作用下，仍将缓慢地固结排水，使地层缓慢压缩而引起地面沉降。对于正常固结地层，只要有外部附加荷载或水位下降，便可引起地层压密，从而导致地面沉降。超固结地层只有在附加荷载大于前期固结压力和自重压力的差值时，才产生明显的压密变形而引起地面沉降。华北平原上更新统及全新统地层多处于正常固结状态，东部滨海地区第一海相地层处于欠固结状态。而深部地层由于地下水水位大幅下降，相应弱透水层或透镜体中孔隙水逐渐排出，有效应力增加，地层在持续压缩以后多呈超固结状态。因而在相同的应力变化条件下，浅部土层更容易产生较大的压缩量。沧州市区第一压缩层包括第一含水组和第二含水组上段，主要分布咸

水,地下水开采量小,但是2010年5月至2014年此压缩层对地面沉降的贡献达21%。该段地层呈正常固结或局部呈欠固结状态(图13),初步认为较大的地层压缩量与该地区土层的固结程度关系密切。

3.5.4 地下水位变化模式对土层变形特征具有重要影响

华北平原不同土层表现了不同的变形特征。同时相同土层在不同地区(降落漏斗不同部位)、不同水位变化模式下也有着不同的变形特征。这也是区域差异性地面沉降的主要原因之一。天津平原地面沉降尤为典型,该地区地下水水位变化大体有3种模式:水位在反复升降中持续下降、水位在一定变幅范围内反复升降、水位在反复升降中持续上升。表6总结了天津平原不同地下水位变化模式下的地层变形特征。

总体来讲,地下水位下降条件下,黏性土层及砂层都处于压密变形状态而引起地面沉降,但黏性

土层的变形比砂层大的多,所以,黏性土层是引起地面沉降的主要地层;地下水位回升后,砂层的变形基本无滞后现象,黏性土层的变形滞后明显。

4 结 论

(1)华北平原地面沉降空间分布差异性明显,沉降主要分布在平原区第四纪沉积凹陷,呈现东西分带、南北分段特点。同时,地面沉降空间发展部分受到构造控制,包括北西向的南口—孙河断裂(西段)、北东向黄庄—高丽营断裂(北段)、南苑—通县断裂(北段)和沧东断裂(中段)影响。在沧县隆起区,地面沉降也比较发育,呈带状沿隆起构造轴部北东向展布,主要原因是沧县隆起在第四纪时期构造运动相对不活跃,沉积了较厚的第四系沉积物(350~450 m);存在与构造走向一致的三期古河道,该地区赋存丰富的地下水资源并被大量开采。

(2)华北平原地面沉降发生发展与各地地下水

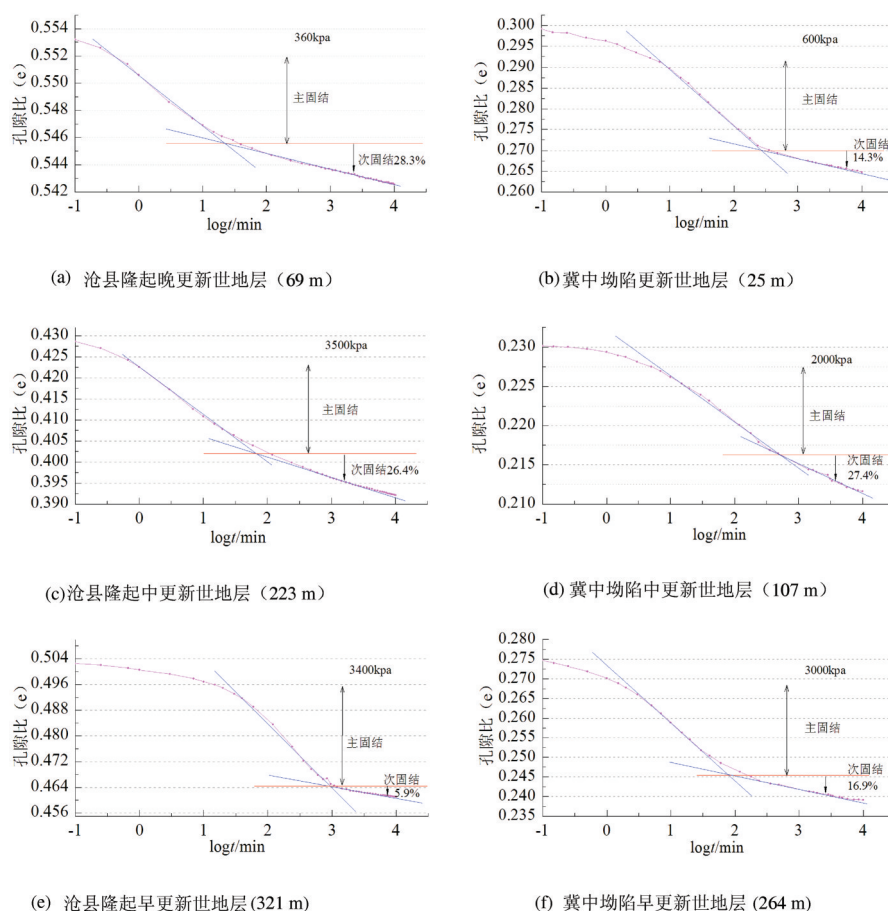


图10 应变时间关系曲线

Fig. 10 Time-compression curve derived from consolidation tests

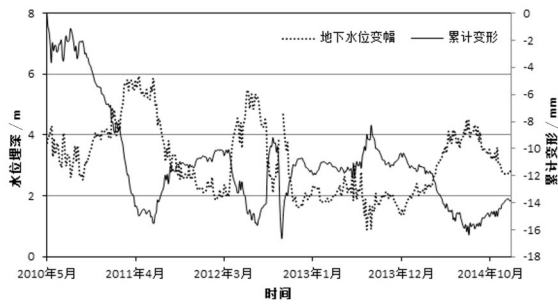


图 11 沧州市区第一压缩层地下水水位埋深和地层累计变形时间变化曲线

Fig. 11 The temporal variation of the groundwater level depth and deformation of the first compression layer in the downtown of Cangzhou

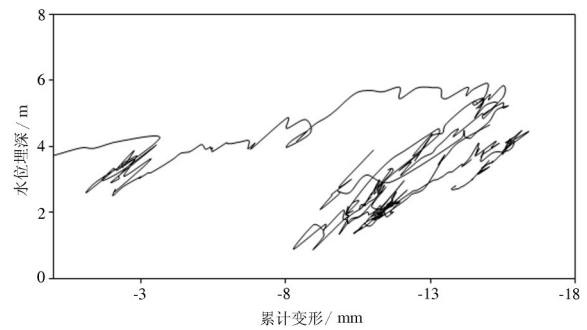


图 12 沧州市区第一压缩层地下水水位埋深和地层累计变形关系曲线

Fig. 12 The relation curve of the groundwater level depth and deformation of the first compression layer in the downtown of Cangzhou

表 6 天津平原不同地下水位变化模式下的土层变形特征

Table 6 The deformation characteristics of different soil layers under different change patterns of groundwater levels in the Tianjin plain

地层	水位变化模式	变形特征	原因分析
浅层含水组	地下水位回升直至稳定	压缩速率减缓, 最终地层随地下水反复升降呈弹性变形状态	以中心城区为代表, 岩性组合为黏土、粉质黏土、粉细砂交互成层。地层属正常固结。地下水位上升导致地层有效应力减小
	地下水位稳定	地层持续压缩变形, 压缩速率未见明显减缓	以汉沽为代表, 岩性组合为粉质黏土、粉土、粉细砂交互成层, 单层厚度不大。地层以正常固结为主, 局部欠固结。欠固结土的自然沉降或蠕变等因素综合作用的结果, 有待进一步研究
深层含水组	反复升降中持续下降	黏性土层和砂层长期处于压密变形状态; 砂层变形量远小于黏性土层	地下水位下降导致地层有效应力增加, 土颗粒间排列趋紧密, 表现为沉降
	一定变幅范围内反复升降	黏性土层: 地下水位刚进入反复升降时, 地层仍处于压密变形状态, 最终地层趋于弹性变形状态 砂层: 当水位进入反复升降状态时, 砂层的变形随之进入弹性变形状态, 基本无滞后	水位变化导致有效应力改变, 颗粒间的紧密排列有一部分可以恢复, 黏性土恢复较慢表现为滞后, 砂层随即表现为弹性变形特征
	反复升降中持续上升	地层处于压密变形状态, 压缩速率逐渐减缓, 之后地层随水位的波动仅有小幅度压缩、回弹	地层的岩性为黏性土与砂互层, 地面沉降具滞后效应, 滞后时间的长短与地层结构有关, 黏性土厚度越大, 土层变形的滞后时间越长

开采历史密切相关。由于地面沉降影响因素复杂, 各地地下水开采利用情况不同, 地面沉降发展速率和影响范围在不同空间、时间上具有较大的差异性。华北平原引起地面沉降的主要压缩层随地下水开采层位的变化而变化, 北京平原 100 m 以深地层对地面沉降的贡献呈增加趋势。天津平原目前地面沉降的主要贡献层来自 300 m 以下地层。目

前, 北京、天津中心城区地面沉降已经得到有效控制, 但城市周边地区地面沉降速率较大。河北平原、鲁北平原许多县市地下水超采严重并导致地面沉降快速发展。

(3) 气候干旱导致地下水补给量减少, 同时增加了地下水的开采, 因而是引起地面沉降的重要间接驱动因素。反之, 降雨量增加将有效减缓地面沉

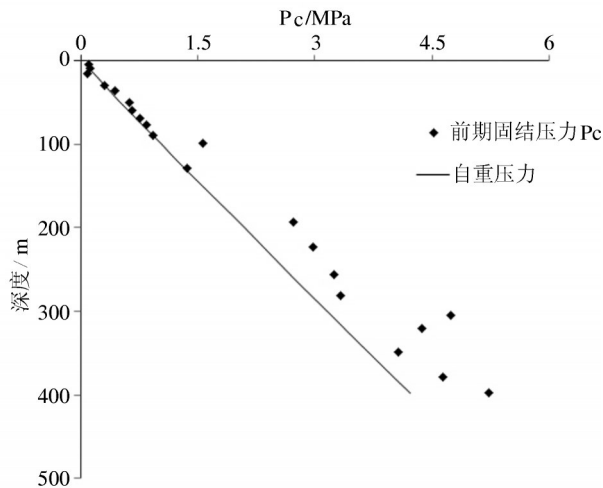


图 13 沧州市区前期固结压力随深度变化图

Fig. 13 Change of P_c with depth in the downtown of Cangzhou

降的发生、发展。基坑降排水、高层建筑荷载对地面沉降的影响应引起足够重视。为了保证京津冀地区丰富地热资源的绿色开发利用,应加强地热对地面沉降影响的监测与研究。

(4)华北平原地面沉降具有很强的滞后性,分层标、孔隙水压力和地下水水位监测结果表明,即使地下水水位停止下降甚至抬升,地面沉降仍将持续。天津平原地层压缩滞后时间可超过25年,甚至更长。华北平原地面沉降滞后主要是由于低渗透性弱透水层(或夹透镜体含水层)超孔隙水压力消散需要较长时间;同时,土体固结试验结果表明冀中拗陷内武清凹陷地区及沧县隆起地区中晚更新世地层土体在不同荷载条件下,蠕变特征明显。

(5)土的物理性质、地下水水位变化模式对土层变形特征具有重要影响。华北平原不同埋深地层在地下水水位变化条件下的变形特征存在较大差异(弹性、黏弹性、黏弹塑性)。其中,山前平原的北京天竺地区、中东部平原的天津中心城区以及滨海的沧州地区浅部含水组呈现以弹性为主的变形特征。值得注意的是,天津市第二承压含水组在地下水水位由持续下降转为反复升降的动态时,相应弱透水层由于变形滞后效应,持续压缩5~7年,随后随着地下水水位波动表现出以弹性变形为主的特征,应进一步开展工作,分析其应力加载历史对变形特性影响。

致谢:北京市水文地质工程地质大队、河北省

地矿局第四水文工程地质大队、河北省地质环境监测院等单位,中国地质调查局水文地质环境地质部郝爱兵、北京师范大学胡立堂在成文过程中给予了帮助和指导,在此一并致以诚挚的谢意。

References

- Bai Jinbin, Niu Xiujun. 2010. Cenozoic consolidation characteristics and land subsidence in Tianjin [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 21(1): 42-46 (in Chinese with English abstract).
- Craig R F. 2004. Soil mechanics [M], 7th edn. Spon Press, Taylor & Francis Group, London and New York.
- Fang Hao, He Qingcheng, Zhao Tingting, Wu Aihua. 2014. Construction of a risk assessment index system for land subsidence in Cangzhou City [J]. Shanghai Land & Resources, 35(2):9-12 (in Chinese with English abstract).
- Guo Haipeng, Ding Guoping, Zhu Juyan, Tian Xiaowei, Lei Jiantao, Wang Yunlong. 2014. Compression deformation and permeability characteristics of clay in land subsidence area of Cangzhou [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 36(5): 111-117 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yonghai, Shen Zhaoli, Zhong Zuoshen, Wang Dongsheng. 1995. The property of deep-lying groundwater resources in Hebei plain and its reasonable evaluation in view of land subsidence [J]. Earth Sciences, 20(4): 415-420 (in Chinese with English abstract).
- Guo Haipeng, Zhang Zuochen, Cheng Guoming, Li Wenpeng, Li Tiefeng, Jiao Jiu Jimmy. 2015. Groundwater-derived land subsidence in the North China Plain [J]. Environmental Earth Sciences, 74:1415-1427.
- Hu R L, Yue Z Q, Wang L C, Wang S J. 2004. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China [J]. Engineering Geology, 76:65-77.
- Jiang Yuan, Tian Fang, Luo Yong, Wang Rong, Yang Yan. 2015. Research on the relationship between groundwater level and layered subsidence in typical regions of Beijing [J]. South-North Water Transfers and Water Science & Technology, 13(1): 95-99 (in Chinese with English abstract).
- Khan A S, Khan S D, Kakar DM. 2013. Land subsidence and declining water resources in Quetta Valley, Pakistan [J]. Environmental Earth Science, 70(6):2719-2727.
- Li Hong, Xiao Guoqiang, Yang Jilong, Zhao Changrong, Xiao Yi. 2016. Precise identification of land-subsiding layers and reconstruction of subsidence process in Tianjin Binhai New Area [J]. Geological Bulletin of China, 35(10):1646-1652 (in Chinese with English abstract).
- Motagh M, Walter T R, Sharifi M A, Fielding E, Schenk A, Anderssohn J, Zschau J. 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation [J]. Geophysical

- Research Letters, 35(16):1029–1039.
- Niu Xiujun. 1998. Characteristics of Strata Consolidation and Land Subsidence Controlling by Critical Water Level [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 9(2): 68–74 (in Chinese with English abstract).
- Pacheco–martínez J, Hernández–marín M, Burbey T J et al. 2013. Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México [J]. Engineering Geology, 164:172–186.
- Shelley E O, Ossa A, Romo M P. 2007. The Sinking of Mexico City: Its Effects on Soil Properties and Seismic Response [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27: 333–343.
- Stramondo S, Bozzano F, Marra F et al. 2008. Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations [J]. Remote Sensing of Environment, 112:3160–3172.
- Tomas R, Romero R, Mulas J. 2014. Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain [J]. Environmental Earth Science, 71(1):163–181.
- Wang Fei, Miao Linchang, Lu Weihua. 2013. Sand creep as a factor in land subsidence during groundwater level recovery in the southern Yangtze River delta, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 72: 273–283.
- Wang Jiabing, Li Ping, Zhang Baiming, Wang Yabin. 2010. Allowable groundwater withdrawal and its determination basis in Tianjin Plain [J]. Earth Science Frontiers, 17(6): 221–226 (in Chinese with English abstract).
- Wang Rong, Luo Yong, Yang Yan, Zhou Yi, Liu Mingkun. 2014. Land subsidence on the Wenyu River alluvial fans, Beijing [J]. Shanghai Land & Resources, 35(4):44–48(in Chinese with English abstract).
- Wu Chen, Wang Zihui, Xu Qinghai. 1986. The shallow buried paleochannels in Hebei plain [J]. Acta Geographica Sinica, 41(4): 332–340.
- Xing Zhongxin, Li Hexue, Zhang Shu, Gao Hongqiang. 2004. Surface subsidence and its countermeasures in Cangzhou City [J]. Geological Survey and Research, 27(3):157–163 (in Chinese with English abstract).
- Xue Yuqun, Zhang Yun, Ye shujun, Wu Jichun; Li qinfen. 2005. Land subsidence in China [J]. Environmental Geology, 48(6): 713–720.
- Xue Yuqun, Zhang Yun, Ye shujun, Wu Jichun; Wei Zixin, Li qinfen, Yu Jun. 2006. Research on the problems of Land subsidence in China [J]. Geological Journal of China Universities, 48(6): 713–720 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Youquan, Gong Huili, Gu Zhaoqin. 2014. Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in the plain of Beijing city, China[J]. Hydrogeology Journal, 22:397–409
- Zhang agen, Yang Tianliang. 2010. Latest progress review of research on international land subsidence [J]. Shanghai Geology, 31(4): 57–63 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yun, Xue Yuqun, Wu Jichun, He Jiajia, Wang Huimin. 2011. Experimental study of creep deformation of saturated clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 32(3): 32(3):672–676(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yun, Xue Yuqun, Wu Jichun, Wang Huimin, He Jiajia. 2012. Mechanical modeling of aquifer sands under long– term groundwater withdrawal [J]. Engineering Geology, 125:74–80.
- Zhou Yi, Luo Yun, Guo Gaoxuan, Luo Yong, Lei Kunchao, Wang Rong. 2016. A study of the characteristics of land subsidence and the main control factors in the alluvial plain: A case study of Beijing plain[J]. Geological Bulletin of China, 35(12):2100–2110 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白晋斌,牛修俊. 2010. 天津新生界固结特征与地面沉降[J]. 中国地质灾害与防治学报, 21(1): 42–46.
- 郭海朋,丁国平,朱菊艳,田小伟,雷建涛,王云龙. 2014. 沧州地面沉降区黏土压缩变形和渗透特征研究[J]. 武汉理工大学学报, 36(5): 111–117.
- 郭永海,沈照理. 1995. 从地面沉降论河北平原深层地下水资源属性及合理评价[J]. 地球科学, 20(4):415–420.
- 房浩,何庆成,赵婷婷,吴爱华. 2014. 沧州市地面沉降风险评价指标体系构建研究[J]. 上海国土资源, 35(2):9–12.
- 姜媛,田芳,罗勇,王荣,杨艳. 2015. 北京典型地区分层地面沉降与地下水位变化关系[J]. 南水北调与水利科技, 13(1): 95–99.
- 李红,肖国强,杨吉龙,赵长荣,肖艺. 2016. 天津滨海新区地面沉降层位的精准识别[J]. 地质通报, 35(10): 1646–1652.
- 牛修俊. 1998. 地层的固结特征与地面沉降临界水位控沉[J]. 中国地质灾害与防治学报, 9(2):68–74.
- 王家兵,李平,张百鸣,王亚斌. 2010. 天津平原地下水可开采量与确定依据[J]. 地质前缘, 17(6): 221–226.
- 王荣,勇,杨艳,周毅,刘明坤. 2014. 北京温榆河冲洪积扇地面沉降特征及机理研究[J]. 上海国土资源, 35(4):44–48.
- 吴忱,王子惠,许清海. 1986. 河北平原的浅埋古河道[J]. 地理学报, 1986, 41(4): 332–340.
- 邢忠信,李和学,张熟,郜洪强. 2004. 沧州市地面沉降研究及防治对策[J]. 地质调查与研究, 27(3):157–163.
- 薛禹群,张云,叶淑君,吴吉春,魏子新,李勤奋,于军. 2016. 我国地面沉降若干问题研究[J]. 高校地质学报, 12(2): 153–160.
- 周毅,罗郎,郭高轩,罗勇,雷坤超,王荣. 2016. 冲洪积平原地面沉降特征及主控因素——以北京平原为例[J]. 地质通报, 35(12): 2100–2110.
- 张阿根,杨天亮. 2010. 国际地面沉降研究最新进展综述[J]. 上海地质 31(4): 57–63.
- 张云,薛禹群,吴吉春,何佳佳,王惠敏. 2011. 饱和黏性土蠕变变形试验研究[J]. 岩土力学, 32(3):672–676.