

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012037](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012037)

华北平原地下水位驱动下的地面沉降 现状与研究展望

郭海朋^{1,2}, 李文鹏², 王丽亚³, 陈 晔⁴, 臧西胜², 王云龙², 朱菊艳², 卞跃跃⁵

(1. 京津冀平原地下水与地面沉降野外科学观测研究站, 北京 100081; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 3. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195; 4. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 5. 中国地质博物馆, 北京 100034)

摘要: 华北平原年地面沉降量大于 50 mm 的严重区面积超过全国总量的 80%, 防治形势严峻, 需要开展有针对性的研究, 为有效防控地面沉降提供科学依据。华北平原建立了较完善的地面沉降监测网络, 基本掌握了地面沉降现状及演化规律, 但受华北平原含水层系统影响因素复杂与时空变化大等因素制约, 对地下水位变化驱动下的土层变形特征及其机制研究迄今仍比较薄弱, 限制了对地面沉降发展趋势的科学研判和预测预警。在总结国内外地面沉降研究进展、基于高时空分辨率监测数据分析华北平原地面沉降现状和发展趋势的基础上, 提出了地下水位变化影响下的地面沉降研究方向。目前, 华北平原地面沉降出现减缓态势, 天津、沧州、衡水等重点城市主城区地面沉降得到有效控制, 但华北平原尤其是河北平原地面沉降总体上仍然处于较快发展阶段, 主要原因是农业灌区地下水开采得不到有效控制。未来华北平原地面沉降研究应聚焦地面沉降机理和预测预警、地下水位回升驱动下的土层变形规律及其对环境的影响、地面沉降区地下水资源属性及地热开发与地面沉降关系等方面。

关键词: 华北平原; 地面沉降; 土层变形; 土-水耦合模型; 含水层系统

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)03-0162-10

Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain

GUO Haipeng^{1,2}, LI Wenpeng², WANG Liya³, CHEN Ye⁴, ZANG Xisheng²,
WANG Yunlong², ZHU Juyan², BIAN Yueyue⁵

(1. *Observation and Research Station of Groundwater and Land Subsidence in Beijing-Tianjin-Hebei Plain, Beijing 100081, China*; 2. *China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China*; 3. *Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China*; 4. *School of Water Resources & Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*; 5. *The Geological Museum of China, Beijing 100034, China*)

Abstract: The North China Plain (NCP) has the greatest area of severe land subsidence, accounting for more than 80% of the total area of severe land subsidence in China. The situation of prevention and control of land subsidence is urgent. Targeted researches are needed to carry out to provide scientific basis for effective prevention and control of land subsidence. A relatively complete land subsidence monitoring network is established in the NCP, and the current status and evolution of land subsidence are basically grasped. However,

收稿日期: 2020-12-16; 修订日期: 2021-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877294); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190679; DD20160235); 京津冀平原地下水与地面沉降野外科学观测研究站资助项目

第一作者: 郭海朋(1979-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质、环境地质研究工作。E-mail: guohaipeng@mail.cgs.gov.cn

due to the limitation of the complex influencing factors and large variation in time and space of aquifer systems, the researches on groundwater-derived deformation characteristics and mechanism of soil layers are relatively weak so far, restricting the scientific evaluation of the development trend of land subsidence and its forecast and early warning. Based on summarizing the research progress of land subsidence at home and abroad, and analysing the current situation and development trend of land subsidence in the NCP with monitoring data of high temporal and spatial resolutions, the research directions of land subsidence under the influence of groundwater level changes are proposed. The land subsidence in the NCP was alleviated, and was effectively controlled in the downtown areas of the major cities such as Tianjin, Cangzhou and Hengshui. However, on the whole, the land subsidence in the NCP, especially in the Hebei Plain, is still in a relatively rapid development stage, because the exploitation of groundwater in the agricultural irrigation areas cannot be effectively controlled. Future researches on land subsidence in the NCP should focus on the land subsidence mechanisms and prediction and early warning, the law of soil deformation driven by groundwater level rise and its impact on the environment, the attributes of groundwater resources in the subsidence areas, and the relationship between geothermal development and land subsidence.

Keywords: North China Plain; land subsidence; deformation of soil layers; soil-water coupling model; aquifer system

地面沉降是世界各地普遍发生的环境地质问题,而地下水动力与土层变形的互馈关系研究是地面沉降区地下水资源量评价的前提,是区域地面沉降预测预警的基础,也是环境地质学科发展的需求。目前国际上关于地下水动力与土层变形互馈机制的研究,主要集中在地下水位驱动下黏性土和砂土变形规律研究,时序沉降数据用于计算区域水文地质参数和校正模型参数,以及土-水耦合模型研究三个方面。华北平原是我国地面沉降影响面积最大的区域,地面沉降对京津冀协同发展、雄安新区、北京城市副中心等国家重大战略区规划和南水北调、高速铁路等国家重大工程区安全运营存在重要影响。地下水位变化与土层变形互馈关系研究,对华北平原地面沉降监测网的优化、监测数据的量化分析、地面沉降模型仿真性和预测预警准确性的提高等方面具有科学意义,可为有效缓解该地区地下水利用引起的地面沉降灾害提供技术支撑。

1 国内外研究现状

1.1 地下水位驱动下黏土和砂土变形规律研究

近几十年来,含水层系统中地下水位变化影响下的土层变形规律受到国内外许多学者的高度关注。例如,He 等^[1]实施了物理模型试验,研究地下水补给和排泄引起的砂层和黏土层变形特征及孔隙水压力变化规律,提出了三种有利于减缓地面沉降发展的地

下水开发模式。郭海朋等^[2]初步总结了天津平原地下水水位变化模式,分析了不同地下水位变化模式下的土层变形特征。总体而言,该领域研究成果主要集中在土层尤其是黏性土层的流变变形特征研究和土层变形应力应变关系定量化研究等方面。

1.1.1 地下水位驱动下土层变形流变特征研究

随着地面沉降问题研究的深入,国内外越来越多研究者逐渐认识到抽水诱发下土层的压缩量中包含了一定比例的流变变形量,不仅黏性土可能发生蠕变^[3-5],砂砾含水层也可能发生蠕变^[6-7]。过去在研究地面沉降时,通常将含水砂土层作为线弹性体处理,或者认为砂土层的变形对地面总沉降的贡献可以忽略不计^[8]。试验结果表明在单调荷载下,砂土的蠕变变形可以达到总变形的 10%^[9]。分层标监测数据也表明,含水砂层的变形不仅包括弹性变形,而且包括塑性变形和蠕变变形^[2,10]。研究人员根据长三角地区大量地面沉降和水位观测资料,结合室内土工试验,揭示了砂土层在不同的应力条件下,有的表现为弹性变形,有的则表现为以塑性变形为主并包含有蠕变的非线性变形特征^[10-12]。李玉岐等^[13]利用自行设计的砂土排灌水试验装置,分析地下水排灌引起的砂样宏观竖向变形及细观移动,结果表明:在砂样排灌水的初期阶段,砂样的结构发生了明显重组,砂样沉降不仅发生在排水时,而且在回灌时继续增加,砂样产生了较大的、不可恢复的塑性和黏性变形;砂样结构达到

相对稳定后,排水时产生的竖向变形变小,而回灌时砂样发生较大的回弹。郭海朋等^[2]通过土体高压固结试验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黏性土体在不同荷载条件下,蠕变特征明显。

1.1.2 地下水位驱动下土层变形本构关系研究

Terzaghi 固结理论是简单的弹性变形模型,由于机理简单和控制方程的线性特征,被广泛应用于土层压缩分析。考虑到过于复杂的黏弹塑性应力-应变模型很难直接用于区域地面沉降模型中,Corapcioglu 等^[14]基于划分主、次固结的黏土固结理论,提出了一维线性黏弹本构关系(Merchant 模型)。吴林高等^[15]在分析抽灌水引起地面沉降的力学机制基础上,得出了广义 Kelvin 本构模型。以上两个模型的适用性都缺乏试验数据验证。Ye 等^[16]通过分析长三角地区土层变形特征,采用修正的 Merchant 模型刻画土层的变形规律,在此基础上建立了三维变参数水流和垂向一维沉降组成的部分耦合模型,对长三角区域的地面沉降进行了模拟。如果能获取土层变形的野外监测和室内试验数据,可能会建立更加贴近实际的土层变形本构模型并用于地面沉降模拟和预测^[17]。Tsai 等^[18]研究提出了一种黏弹塑性模型,该模型由一个黏弹性模型和一个黏塑性模型组成,并由单刀双掷开关控制黏塑性模型的使用,经验证,该模型计算结果具有较小的相对误差。

1.2 时序沉降数据用于计算区域水文地质参数和校正模型参数

利用分层标时序土层变形和地下水位数据反演计算区域水文地质参数已经为大家所熟悉,应力-应变图解法是常用的手段之一。该方法最早由 Riley^[19]提出,根据应力应变关系曲线可求出弹性贮水率和非弹性贮水率,Cleveland 等^[20]提出的图解法可进一步确定垂向渗透系数。叶淑君等^[21]结合上海沉降和水位观测资料,求出了上海地区弱透水层的弹性贮水率、非弹性贮水率和垂向渗透系数,为上海地面沉降的数值模拟提供了较好的初始参数值。Zhang 等^[22]利用北京平原某分层标监测数据计算了弹性贮水率和非弹性贮水率,并与美国加利福尼亚州圣荷昆谷(San Joaquin Valley)的对应参数值进行了相互比较和评价。

区域地面沉降监测技术在过去的几十年经历了较快的发展,其主要监测手段从经典的水准测量发展至日趋成熟的 GPS 技术与合成孔径雷达干涉测量技

术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR),获取了大量的区域地表形变数据^[23-25]。水文地质参数是地面沉降数值模拟过程中必不可少的信息,但由于含水层的非均质等复杂性质,许多水文地质参数的空间分布在现有技术条件下无法快速准确获取,因而利用一些易获取且精度较好的监测数据(如地下水位等)推估难以获取的水文地质参数分布成为了地下水领域的研究热点^[26]。当含水层系统相对简单,不存在地下水位变化和地面沉降之间明显滞后的情况下,区域地面沉降和地下水位监测数据可以用来直接反演计算弹性贮水率、非弹性贮水率等参数,进而可以补齐时间或空间上地下水位观测数据的缺失^[27-29]。Zhuang 等^[30]探索了利用地质统计方法反演求取弱透水层渗透系数、弹性和非弹性贮水率的方法,并成功用于常州某地弱透水层水文地质参数的计算。Zhuang 等^[31]基于欧拉公式,获得了地下水位变化驱动下超固结弱透水层弹性变形的解析解,并用来评估上海某 35.54 m 厚弱透水层的垂向渗透系数和弹性储(释)水率,结果表明该解析方法可以定量解释地面沉降滞后特征并有效评估超固结弱透水层的水力参数。

高分辨率水文地质参数是地面沉降模型实现准确预测的基础,而 InSAR、水准、GPS 等多种手段获取的高时空分辨率地面沉降监测数据使有效校正模型的水文地质参数成为可能。UCODE^[32]是一种基于梯度的自动反演算法,研究人员已经开展了利用 InSAR 解译计算的地面沉降数据和地下水位监测数据并基于 UCODE 进行模型水文地质参数校正的研究^[27,33-34]。Zhang 等^[34]基于 UCODE 并利用 InSAR 获取的高时空分辨率地面沉降数据和地下水位数据校正了含水层导水系数、弹性和非弹性贮水率、断层导水系数等水文地质参数,结果表明联合利用地面沉降和地下水位监测数据校正的模型比仅用地下水位数据校正的模型更符合实际。但是,基于梯度的反演方法主要缺点是计算量大,不能快捷地评估参数,而且预测具有不确定性。

1.3 土-水耦合模型研究

抽排水引起的地面沉降问题实际上就是一个渗流场与应力场耦合的问题,土-水耦合模型按渗流场与应力场结合方式分为不耦合的两步计算模型、部分耦合模型和完全耦合模型。不耦合的两步计算模型分为完全独立的两步,先计算孔隙水压力,再计算变形,

水流及沉降方程中各参数不随时间变化。两步计算模型最初在研究威尼斯的由多层含水层与弱透水层组成的地下水系统因抽水引起的地面沉降问题时提出^[35]。Shearer^[8]以太沙基一维固结理论为基础,在Modflow程序的基础上开发了考虑黏性土层孔隙水压力变化滞后于含水层水位变化的夹层排水模块(IDP),通过沉降计算获取弱透水层的释水,实现了大厚度含水层释水压缩的模拟。部分耦合模型中孔隙水压力和变形分步计算,但两者之间相互影响。含水层水头下降会导致相邻弱透水层中的地下水产生渗流,弱透水层的变形具有明显的非线性特征;同时,土层的孔隙比、压缩性和透水性等参数也随着土体变形量的变化而变化。国内外地面沉降模型大多基于土-水部分耦合模型^[36-39]。完全耦合模型基于Biot固结理论,孔隙水压力和土层变形同时计算,在理论上这种模型最符合沉降物理机制,但是物理场控制方程更为复杂、计算量大、需要参数多,很难在实际问题中应用。近年来研究人员在完全耦合模型的数值计算方法方面进行了探索^[40-41],并将完全耦合模型成功应用于意大利威尼斯、美国拉斯维加斯和中国上海、沧州、德州等地的地面沉降机理研究及模拟预测^[42-46]。骆勇等^[47]分别采用基于渗流-沉降分步计算的土力学经验公式、渗流-沉降部分耦合的GMS软件中SUB模型和基于渗流-沉降完全耦合的COMSOL Multiphysics模型,对疏排水引起的地面沉降进行了模拟计算,研究结果表明,完全耦合模型计算结果更为合理、更符合实际沉降特征。Wang等^[48]探索研究了随机非均质多孔介质中地下水流动和土层变形的动态相互作用。Pham等^[49]基于多孔介质弹性力学理论,开发了程序模块SUB+,可以实现水-应力的完全耦合模拟。TOUGH2是一套功能强大、应用广泛的模拟孔隙或裂隙介质中多相流的系列程序,在水气两相流数值模拟中得到了广泛应用^[50-51]。研究人员以TOUGH2为基础进行二次开发^[52]或者将其与其它地质力学模拟程序结合^[53],实现了地下水流与地质力学的耦合模拟,显示出该程序在土-水耦合模拟方面有广泛的应用前景。

2 华北平原地面沉降现状

我国地面沉降主要发生在华北平原、长江三角洲、汾渭盆地、淮河平原、珠江三角洲、东北平原以及山区断陷盆地等地区,共有22个省(区、市)超过

100个地级以上城市发生地面沉降。其中,华北平原是目前我国地面沉降影响面积最大、沉降速率最快的区域^[54]。华北平原人均水资源量296 m³,为全国人均水资源的1/8,与干旱缺水国家以色列的人均水资源量相当,属于水资源极度短缺地区。因地表水严重短缺,生产生活供水主要依赖地下水^[55],2000年以来,地下水占总供水量的比例达到64%。南水北调工程一定程度上缓解了供水紧张局面,但依然不能满足社会经济快速发展需求。地下水长期超采形成多个地下水降落漏斗,并引发严重的地面沉降,累计沉降量较大地区与深层地下水漏斗区的分布基本吻合,天津、沧州、衡水、德州地面沉降已经连成一片(图1)。依据累计地面沉降量和地面沉降速率两个指标(表1),对京津冀平原地面沉降现状发育程度进行评价,结果表明地面沉降发育程度强的区域主要分布在北京平原东部、天津平原中南部、河北平原沧州、衡水、廊坊、邢台、邯郸等地,总面积达1.4×10⁴ km²(图2)。

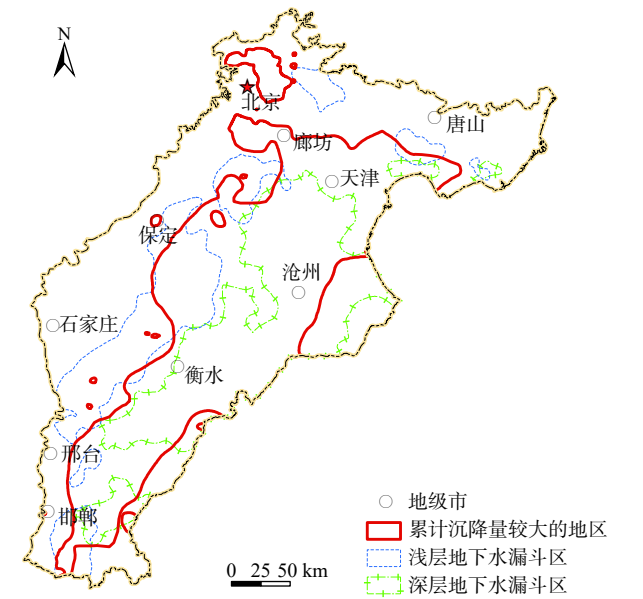


图1 京津冀平原主要浅层和深层地下水漏斗以及累计沉降量较大地区(大于50 cm)分布图

Fig. 1 Distribution of shallow and deep groundwater cones and the area with the cumulative subsidence greater than 50 cm in Beijing—Tianjin—Hebei Plain

表1 地面沉降现状发育程度评价标准

Table 1 Evaluation standard of the development of land subsidence

分级	强	中	弱
累计沉降量/mm	>1 500	500 ~ 1 500	<500
沉降速率/(mm·a ⁻¹)	>50	30 ~ 50	<30

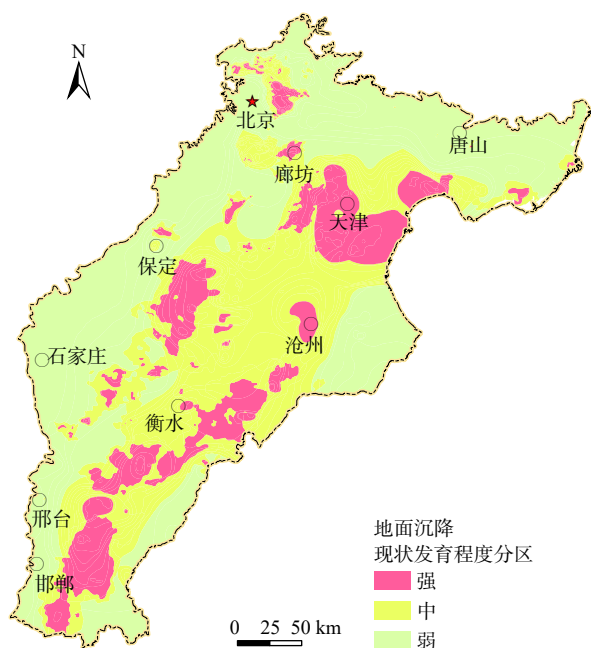


图2 京津冀平原地面沉降现状发育程度分区图

Fig. 2 Zoning map of land subsidence development in Beijing—Tianjin—Hebei Plain

分层标监测数据显示,北京市100 m以下深部地层沉降贡献率为82%,其中天竺、张家湾等地深部地层贡献率超过90%,浅部部分地层出现回弹。天津市300 m以下深部地层贡献率占65%,其中汉沽营城、西青郑庄子等地深部地层贡献率超过70%,浅部部分地层出现回弹。河北省实施深层地下水禁限采的衡水、廊坊等地区,深部地层对地面沉降的贡献率逐渐减少,其中衡水市区150 m以深地层的沉降贡献率由2009—2015年的66%降至2019年的34%。必须高度重视地下水尤其是深层地下水超采问题,开展地面沉降防控,减少经济损失。

近年来,南水北调工程运行行为地下水超采治理提供了置换水源,减少了地下水开采量,工程沿线大中型城市区地下水位下降趋势得到遏制,地面沉降防控取得了初步成效,天津、沧州、衡水等重点城市主城区地面沉降得到有效控制,北京、天津地面沉降严重区面积(本文地面沉降严重区指年沉降量大于50 mm的地区)总体呈现减少趋势(图3)。南水北调进京5年以来,北京地下水位整体处于恢复上升状态,尤其是100 m以浅的含水层,水位回升幅度较大,与2014年相比,平原区地下水位平均上升了3 m,地下水降落漏斗面积减少了38%(图4)。地下水位恢复导致地面沉降减缓,地面沉降严重区面积减少了71%。沧州市自2005年开始实施关停单位自备井的禁采措施,市区

年沉降量已由60~80 mm降至目前的10~15 mm。沧州市区分层标组于2010年6月开始监测,共由五座分层标组成,分别监测第一压缩层(5~69 m)、第二压缩层(69~196 m)、第三压缩层(196~253 m)、第四压缩层(253~375 m)。2014年第一至四压缩层的变形量分别为-2.4, -5.4, -4.6, -8.9 mm(负号表示压缩,正号表示回弹,下同),2019年地面沉降进一步减缓(图5),四个压缩层的变形量分别为+0.6, -2.7, -2.2, +4.2 mm。2013—2018年,河北衡水市主城区年平均

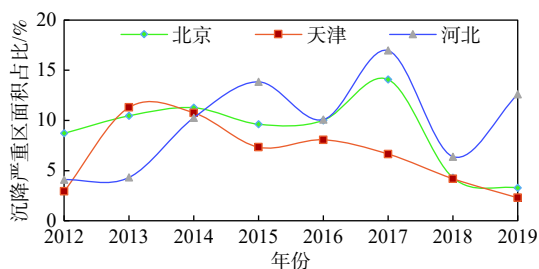


图3 北京、天津和河北平原地面沉降严重区面积占各省(市)平原区面积比例(2012—2019年)

Fig. 3 The ratio between the severe subsidence area and the total area for Beijing, Tianjin and Hebei plain (from 2012 to 2019)

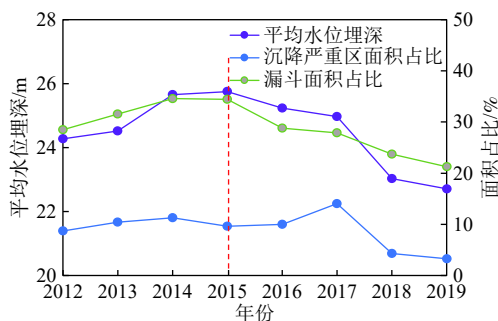


图4 北京平原地面沉降严重区、地下水漏斗面积占平原区总面积比例与平均水位埋深(2012—2019年)

Fig. 4 The ratio of area of severe subsidence and groundwater depression cones to the total plain area and the average water-level depth for Beijing plain (from 2012 to 2019)

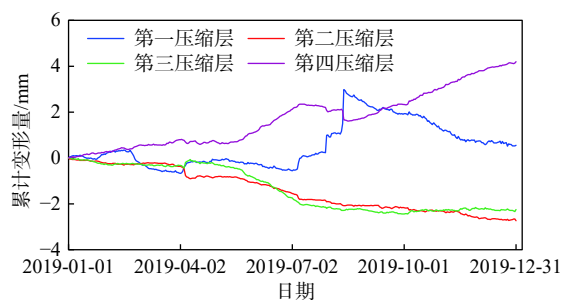


图5 沧州市区各压缩层累计变形随时间变化曲线(2019年)

Fig. 5 The temporal variation of the deformation of different compression layers in the downtown of Cangzhou (2019)

沉降量由 15 mm 减至 10 mm。衡水分层标主要监测第一压缩层(41~150 m)、第二压缩层(150~267 m)、第三压缩层(267~401 m), 其中第一压缩层对应浅层含水层组, 第二、三压缩层对应深层含水层组。2009 年 10 月—2015 年 8 月, 第一至三压缩层的平均变形速率为 -19.3, -31.3, -6.1 mm/a, 对地面沉降量的贡献率分别为 34%、55%、11%。衡水地区从 2014 年开始进行地下水超采区综合治理, 大幅压减地下水开采量, 衡水市城区禁采深层地下水, 深层地下水水位下降减缓甚至回升, 有效遏制了地面沉降的快速发展。2019 年第一至三压缩层的变形量减至 -10.9, -3.4, -2.1 mm, 对地面沉降量的贡献率为 66.2%、20.8%、13%, 主要压缩层位从之前的以第三、四含水层组为主逐步转变为以一、二含水层组为主。

虽然华北平原地面沉降出现减缓态势, 北京、天津、河北沧州等治理区地面沉降速率大幅下降, 但华北平原尤其是河北平原地面沉降总体上仍然处于较快发展阶段, 地面沉降防控形势依然严峻。为满足农业用水需求, 山前平原超采浅层地下水, 中东部平原的衡水、沧州等地超采深层地下水, 农业区超采是当前华北平原地面沉降严重的主要影响因素之一。2019 年河北全省平均降水量 437.6 mm, 比 2018 年减少 71.6 mm, 为确保农业生产, 加大了灌溉期地下水开采力度, 使农灌区地下水位普遍下降。据中国地质调查局地下水位统测数据, 2019—2020 年, 华北平原浅层和深层地下水位平均分别下降 0.6 m 和 1.0 m, 水位下降区主要分布在农业灌区, 加剧了地面沉降发展。目前, 华北平原地面沉降严重区面积超过全国沉降严重区总面积的 80%, 沉降速率较快地区主要分布在北京朝阳与通州交界处, 天津武清、静海、西青、北辰, 河北廊坊、沧州、保定、衡水、邯郸等地。河北雄安新区、北京城市副中心等存在地面沉降严重区, 京津城际、京沪高铁等高速铁路穿越地面沉降严重区, 应予以高度重视。

3 研究展望

地下水位变化驱动下的土层变形特征及其机制研究仍属国内外地面沉降研究的前沿课题。如前所述, 土层变形规律、水文地质参数反演校正和土水耦合模型应用等三个研究方向联成一个统一的整体, 近年来在基础理论上有了较大的发展, 在技术方法上更加注重利用 InSAR 等新技术、新方法获取的数据开展研究, 为华北平原地面沉降防治研究提供了很好的经

验借鉴。同时, 华北平原具有独特的水文地质条件, 是我国含水层结构最为复杂的大型平原, 受长期地下水超采等人类活动影响, 形成了世界上面积最大的地下水降落漏斗和最严重的地面沉降区。不同地区地质条件的复杂性和时空上的差异性导致许多研究结论可能无法在该地区适用, 需要不断提高地下水与地面沉降监测技术水平与监测精度, 因地制宜地开展相关研究工作。在总结地下水位变化模式和土层变形规律的基础上, 研究地面沉降差异性特征及变形成因机理, 将大幅提升华北平原地面沉降机理的认识水平, 极大促进环境地质学科发展, 为地面沉降防灾减灾提供重要技术支撑。

(1) 深化地面沉降机理和预测预警研究。华北平原构建了地面沉降监测网, 监测面积达 $9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 覆盖了京津冀整个平原区; 其中, 建成基岩标 14 个, 分层标 31 组, 水准监测点 3 677 个, GPS 监测点 272 个, 地下水监测井 5 000 余眼, InSAR 实现了京津冀平原区全覆盖连续动态监测。由于沉积过程、沉积相、地层岩性及应力加载过程条件(地下水位变化模式)等不同, 华北平原不同埋深土层在地下水位变化影响下的变形特征存在较大差异。多年积累的地下水位、土层变形等信息对于地面沉降预测预警来说无疑十分宝贵, 可是迄今对这些数据缺乏科学化、规律化的分析和提炼, 没有对不同地下水位变化模式下土层变形规律这一关键问题进行系统的研究。如何联合利用室内土工试验和基于现场调查监测数据的数理分析揭示土层变形应力应变规律? 如何量化这一规律从而形成简单实用的土层变形本构关系, 甄别诱发地面沉降快速发展的地下水位及其下降速率等地面沉降控制指标? 如何将土层变形本构模型与地下水流模型耦合用于地面沉降监测预警? 对这些科学问题的解决, 直接关系到对华北平原地面沉降形成机理的认识, 也是区域地面沉降预测预警的迫切需求, 有助于因地制宜地提出有针对性的地面沉降防控措施。图 6 概括了地下水位变化驱动下土层变形规律的研究思路。

(3) 提升对华北平原地下水资源属性的认识。地下水动力与土层变形的互馈关系研究是地面沉降区地下水资源量评价的前提条件。以华北中东部平原为例, 深层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。近 40 年以来, 深层地下水位最大累计降幅已经超过 100 m, 目前天津、沧州、衡水、德州深层地下水漏斗已经连成一片, 面积超过 $2.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。华北平原深层地下水

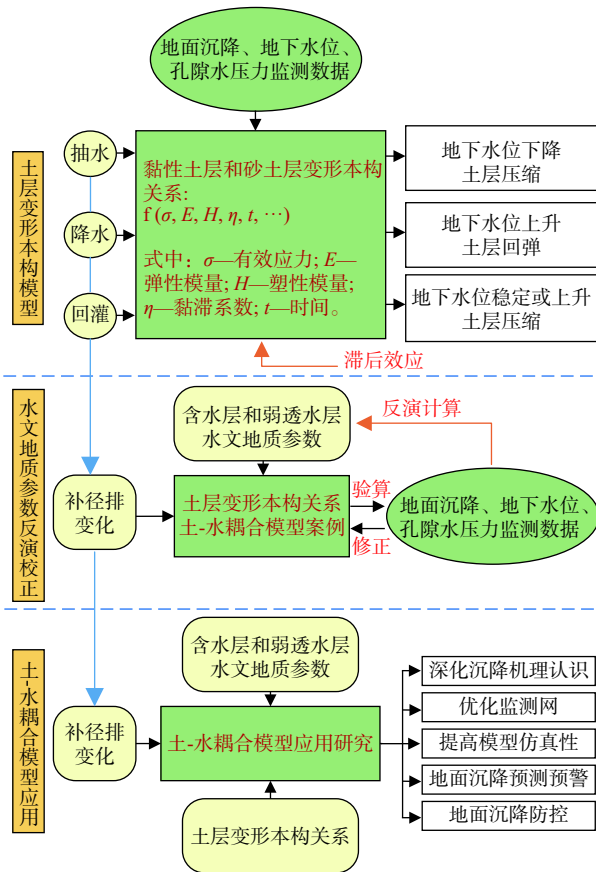


图 6 地下水位变化驱动下土层变形规律研究思路

Fig. 6 Research ideas on groundwater-derived deformation law of soil layers

开采量中含水层和弱透水土层压密释水量所占比例达 40.1%~43.8%，沧州地区高达 57.6%^[56]。正确评价地面沉降区地下水资源量，需要充分利用地面沉降观测数据，科学确定沉降层位、沉降量与地下水开采量的定量关系。

(4) 加强地热开发与地面沉降关系研究。京津冀地区地热资源开发始于 20 世纪 70 年代初，21 世纪以来开发利用规模不断扩大，目前我国地热资源开发利用程度最高的地区，主要开发新近系明化镇组、馆陶组、古近系东营组 3 个孔隙热储层和寒武-奥陶系、蓟县系 2 个岩溶热储层。地热水开发利用对地面沉降的影响目前尚无定论，主要原因是缺少观测数据和研究成果支持。深入研究地热水开发引起的水位变化与土层变形的关系，提出合理的水位控制指标，可以为实现地热资源持续利用和地面沉降有效控制提供理论依据和数据支撑。

参考文献 (References) :

[1] HE G F, YAN X X, ZHANG Y, et al. Experimental study

on the vertical deformation of soils due to groundwater withdrawal[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(7): 04020076.

- [2] 郭海朋, 白晋斌, 张有全, 等. 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*, 2017, 44(6): 1115 - 1127. [GUO Haipeng, BAI Jinbin, ZHANG Youquan, et al. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. *Geology in China*, 2017, 44(6): 1115 - 1127. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张云, 薛禹群, 吴吉春, 等. 饱和黏性土蠕变变形试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 672 - 676. [ZHANG Yun, XUE Yuqun, WU Jichun, et al. Experimental study of creep deformation of saturated clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 672 - 676. (in Chinese with English abstract)]
- [4] SIVASITHAMPARAM N, KARSTUNEN M, BONNIER P. Modelling creep behavior of anisotropic soft soils[J]. *Computers & Geotechnics*, 2015, 69: 46 - 57.
- [5] SEXTON B G, MCCABE B A, KARSTUNEN M, et al. Stone column settlement performance in structured anisotropic clays: the influence of creep[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(5): 672 - 688.
- [6] ENOMOTO T, KOSEKI J, TATSUOKA F, et al. Creep failure of sands exhibiting various viscosity types and its simulation[J]. *Soils & Foundations*, 2015, 55(6): 1346 - 1363.
- [7] 主灿, 张云, 何国峰, 等. 天津滨海新区抽水引起地面沉降现场试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(2): 159 - 164. [ZHU Can, ZHANG Yun, HE Guofeng, et al. In-situ tests of land subsidence caused by pumping in the Tianjin Binhai New Area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2): 159 - 164. (in Chinese with English abstract)]
- [8] SHEARER T R. A numerical model to calculate land subsidence, applied at Hangu in China[J]. *Engineering Geology*, 1998, 49(2): 85 - 93.
- [9] AUGUSTESEN A, LIINGAARD M, LADE P V. Evaluation of time-dependent behavior of soils[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2004, 4(3): 137 - 156.
- [10] ZHANG Y, XUE Y Q, WU J C, et al. Mechanical modeling of aquifer sands under long-term groundwater withdrawal[J]. *Engineering Geology*, 2012, 125: 74 - 80.

- [11] WANG F, MIAO L C, LU W H. 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*, 2013, 72: 273 – 283.
- [12] 薛禹群, 张云. 长江三角洲南部地面沉降与地裂缝[J]. 华东地质, 2016, 37(1): 1 – 9. [XUE Yuqun, ZHANG Yun. Land subsidence and land fissures in the southern Yangtze River Delta[J]. *East China Geology*, 2016, 37(1): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李玉岐, 张啸地, 翁天泉, 等. 排灌水引起砂土层沉降的宏细观试验分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2015, 21(6): 795 – 802. [LI Yuqi, ZHANG Xiaodi, WENG Tianquan, et al. Macro-meso test analysis of sand subsidence caused by withdrawing and recharging water[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2015, 21(6): 795 – 802. (in Chinese with English abstract)]
- [14] CORAPCIOGLU M Y, BRUTSAERT W. Viscoelastic aquifer model applied to subsidence due to pumping[J]. *Water Resources Research*, 1977, 13(3): 597 – 604.
- [15] 吴林高, 缪俊发. 抽灌水作用下土层变形及应力-应变本构律的研究[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1995, 20(5): 581 – 588. [WU Lingao, MIAO Junfa. Soil layer deformation and determination of the constitutive law on the stress-strain of soils under pumping-recharge[J]. *Journal of Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1995, 20(5): 581 – 588. (in Chinese with English abstract)]
- [16] YE S J, XUE Y Q, WU J C, et al. Modeling visco-elastic-plastic deformation of soil with modified Merchant model[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(5): 1497 – 1504.
- [17] GAMBOLATI G, TEATINI P. Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 3922 – 3955.
- [18] TSAI, M S, HSU K C. Identifying poromechanism and spatially varying parameters of aquifer compaction in Choushui River alluvial fan, Taiwan[J]. *Engineering Geology*, 2018, 245: 20 – 32.
- [19] RILEY F S. Analysis of borehole extensometer data from central California[J]. *Land subsidence*, 1969, 2: 423 – 431.
- [20] CLEVELAND T G, BRAVO R, ROGERS J R. Storage coefficients and vertical hydraulic conductivities in aquitards using extensometer and hydrograph data[J]. *Groundwater*, 1992, 30(5): 701 – 708.
- [21] 叶淑君, 薛禹群, 张云, 等. 上海区域地面沉降模型中土层变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 140 – 147. [YE Shujun, XUE Yuqun, ZHANG Yun, et al. Study on the deformation characteristics of soil layers in regional land subsidence model of Shanghai[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(2): 140 – 147. (in Chinese with English abstract)]
- [22] ZHANG Y Q, GONG H L, GU Z Q, et al. Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in the plain of Beijing city, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22(2): 397 – 409.
- [23] AMIGHPEY M, ARABI S. Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2016, 4: 1 – 8.
- [24] CASTELLAZZI P, MARTEL R, GALLOWAY D L. Assessing Groundwater Depletion and Dynamics Using GRACE and InSAR: Potential and Limitations[J]. *Groundwater*, 2016, 54(6): 768 – 780.
- [25] CHAUSSARD E, MILILLO P, BÜRGMANN R, et al. Remote sensing of ground deformation for monitoring groundwater management practices: Application to the Santa Clara Valley during the 2012 –2015 California drought[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(10): 8566 – 8582.
- [26] ZHOU H, GÓMEZ-HERNÁNDEZ J J, LI L. Inverse methods in hydrogeology: Evolution and recent trends[J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 63: 22 – 37.
- [27] HOFFMANN J, GALLOWAY D L, ZEBKER H A. Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(2): SBH 5-1 – 5-10.
- [28] REEVES J A, KNIGHT R, ZEBKER H A, et al. Estimating temporal changes in hydraulic head using InSAR data in the San Luis Valley, Colorado[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(5): 4459 – 4473.
- [29] BÉJAR-PIZARRO M, MARTÍN P E, HERRERA G, et al. Evaluation of the potential of InSAR time series to study the spatio-temporal evolution of piezometric levels in the Madrid aquifer[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015, 372: 29 – 32.
- [30] ZHUANG C, ZHOU Z F, ILLMAN W A, et al.

- Geostatistical inverse modeling for the characterization of aquitard heterogeneity using long-term multi-extensometer data[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 12024.
- [31] ZHUANG C, ZHOU Z F, ILLMAN W A, et al. Parameter estimation of an overconsolidated aquitard subjected to periodic hydraulic head variations within adjacent aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124555.
- [32] POETER E P, HILL M C. Documentation of UCODE: A Computer Code for Universal Inverse Modeling[R]. Denver, Colorado: DIANE Publishing. , 1998.
- [33] ZHANG M, BURBEY T J, NUNES VDS, et al. A new zonation algorithm with parameter estimation using hydraulic head and subsidence observations[J]. *Groundwater*, 2014, 52(4): 514 – 524.
- [34] ZHANG M, BURBEY T J. Inverse modelling using PS - InSAR data for improved land subsidence simulation in Las Vegas Valley, Nevada[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30: 4494 – 4516.
- [35] GAMBOLATI G, FREZZE R A. Mathematical simulation of the subsidence of Venice: Theory[J]. *Water Resource Research*, 1973, 9(3): 721 – 733.
- [36] 于军, 吴吉春, 叶淑君, 等. 苏锡常地区非线性地面沉降耦合模型研究[J]. *水文地质工程地质*, 2007, 34(5): 11 – 16. [YU Jun, WU Jichun, YE Shujun, et al. Research on nonlinear coupled modeling of land subsidence in Suzhou, Wuxi and Changzhou areas, China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(5): 11 – 16. (in Chinese with English abstract)]
- [37] THOANG T T, GIAO P H. Subsurface characterization and prediction of land subsidence for HCM City, Vietnam[J]. *Engineering Geology*, 2015, 199: 107 – 124.
- [38] MAHMOUDPOUR M, KHAMEHCHIYAN M, NIKUDEL M R, et al. Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran[J]. *Engineering Geology*, 2016, 201: 6 – 28.
- [39] 刘蓉, 曹国亮, 赵勇, 等. 地面沉降对含水层参数及给水能力的影响研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 47 – 54. [LIU Rong, CAO Guoliang, ZHAO Yong, et al. A study of the influence of land subsidence on hydraulic parameters and water supply capacity[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 47 – 54. (in Chinese with English abstract)]
- [40] TSAI T L. A coupled one-dimensional viscoelastic-plastic model for aquitard consolidation caused by hydraulic head variations in aquifers[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29: 4779 – 4793.
- [41] ASADI R, ATAIE-ASHTIANI B. Numerical modeling of subsidence in saturated porous media: A mass conservative method[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 54: 423 – 436.
- [42] HERNANDEZ-MARIN M, BURBEY T J. Fault-controlled deformation and stress from pumping-induced groundwater flow[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 428 – 429: 80 – 93.
- [43] 骆祖江, 王琰, 田小伟, 等. 沧州市地下水开采与地面沉降地裂缝模拟预测[J]. *水利学报*, 2013, 44(2): 198 – 204. [LUO Zujang, WANG Yan, TIAN Xiaowei, et al. Simulating and forecasting of groundwater exploitation, land subsidence and ground fissures in Cangzhou City[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(2): 198 – 204. (in Chinese with English abstract)]
- [44] 贾超, 张国荣, 王嘉斌, 等. 地下水开采诱发地面沉降研究及其工程应用: 以山东德州地区为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2015, 37(4): 102 – 110. [JIA Chao, ZHANG Guorong, WANG Jiabin, et al. Study on land subsidence induced by groundwater extraction and its engineering application: Taking Dezhou area of Shandong as an example[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, 37(4): 102 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [45] CASTELLETTO N, GAMBOLATI G, TEATINI P. A coupled MFE poromechanical model of a large-scale load experiment at the coastland of Venice[J]. *Computers & Geosciences*, 2015, 19: 17 – 29.
- [46] YE S J, LUO Y, WU J C, et al. Three-dimensional numerical modeling of land subsidence in Shanghai, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(3): 695 – 709.
- [47] 骆勇, 祝晓彬, 郭飞, 等. 不同方法求解疏排水引起的地面沉降对比研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(5): 150 – 157. [LUO Yong, ZHU Xiaobin, GUO Fei, et al. A comparative study of land subsidence caused by drainage with different methods[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(5): 150 – 157. (in Chinese with English abstract)]
- [48] WANG S J, HSU K C. Dynamic interactions of groundwater flow and soil deformation in randomly heterogeneous porous media[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 499: 50 – 60.

- [49] PHAM H T, RÜHAAK W, SCHUSTER V, et al. Fully hydro-mechanical coupled Plug-in (SUB+) in FEFLOW for analysis of land subsidence due to groundwater extraction[J]. *SoftwareX*, 2019, 9: 15 – 19.
- [50] GUO H P, JIAO J J, WEEKS E P. Rain-induced subsurface airflow and Lisse effect[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44: W07409.
- [51] GUO H P, JIAO J J. Theoretical study of the impact of tide-induced airflow on hydraulic head in air-confined coastal aquifers[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2010, 55(3): 435 – 445.
- [52] HU L, WINTERFELD P H, FAKCHAROENPHOL P, et al. A novel fully-coupled flow and geomechanics model in enhanced geothermal reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 107: 1 – 11.
- [53] 熊小锋, 施小清, 吴剑锋, 等. 弹塑性变形条件下抽水引起的地面沉降三维数值模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(2): 151 – 159. [XIONG Xiaofeng, SHI Xiaoqing, WU Jianfeng, et al. 3D numerical simulation of elasto-plastic land subsidence induced by groundwater pumping[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(2): 151 – 159. (in Chinese with English abstract)]
- [54] GUO H P, ZHANG Z C, CHENG G M, et al. Groundwater-derived land subsidence in the North China Plain[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1415 – 1427.
- [55] 王丽亚, 郭海朋. 连续干旱对北京平原区地下水的影 响[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(1): 1 – 6. [WANG Liya, GUO Haipeng. Effects of continuous drought on groundwater in Beijing plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(1): 1 – 6. (in Chinese with English abstract)]
- [56] 朱菊艳, 郭海朋, 李文鹏, 等. 华北平原地面沉降与深层地下水开采关系[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(3): 165 – 169. [ZHU Juyan, GUO Haipeng, LI Wenpeng, et al. Relation between land subsidence and deep groundwater yield in the North China Plain[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(3): 165 – 169. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华

实习编辑: 宗 爽