

中国山东平原区和美国大休斯顿地区地面沉降监测与防控对比

张永伟, 王国权, 朱晓伟, 于德杰, 梁 浩, 王晓玮

Comparative study on land subsidence monitoring and control in the Shandong Plain, China and the Greater Houston Area, USA

ZHANG Yongwei, WANG Guoquan, ZHU Xiaowei, YU Dejie, LIANG Hao, and WANG Xiaowei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202301025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望

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

郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 陈晔, 臧西胜, 王云龙, 朱菊艳, 卞跃跃 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 162-171

基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统

Automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings

何健辉, 张进才, 陈勇, 闫星光, 施斌, 魏广庆, 贾立翔, 刘苏平 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 146-153

基于InSAR技术的内蒙古巴彦淖尔市地面沉降演化特征及成因分析

An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR

葛伟丽, 李元杰, 张春明, 张红霞, 王志超, 杨红磊 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 198-206

地面沉降对含水层参数及给水能力的影响研究

A study of the influence of land subsidence on hydraulic parameters and water supply capacity

刘蓉, 曹国亮, 赵勇, 陆垂裕, 孙青言, 严聆嘉, 彭鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 47-47

西北地区地下水水量-水位双控指标确定研究——以民勤盆地为例

A study of the determination of indicators of dual control of groundwater abstraction amount and water table in northwest China: a case study of the Minqin Basin

王晓玮, 邵景力, 王卓然, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 17-24

鄱阳湖平原地下水重金属含量特征与健康风险评估

Health risk assessment of groundwater heavy metal pollution in the Poyang Lake Plain

饶志, 储小东, 吴代赦, 颜春, 陈婷, 何景媛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 31-37



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202301025

张永伟, 王国权, 朱晓伟, 等. 中国山东平原区和美国大休斯顿地区地面沉降监测与防控对比 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 167-178.

ZHANG Yongwei, WANG Guoquan, ZHU Xiaowei, et al. Comparative study on land subsidence monitoring and control in the Shandong Plain, China and the Greater Houston Area, USA[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 167-178.

中国山东平原区和美国大休斯顿地区地面沉降监测与防控对比

张永伟^{1,2}, 王国权³, 朱晓伟^{1,2}, 于德杰^{1,2}, 梁 浩^{1,2}, 王晓玮^{1,2}

(1. 山东省国土空间生态修复中心, 济南 250014; 2. 自然资源部黄河三角洲土地利用安全野外科学观测研究站, 济南 250014; 3. 休斯顿大学地球和大气科学系, 休斯顿 77204)

摘要: 中国山东省平原区和美国大休斯顿地区都存在过量开采地下水引发的地面沉降问题, 休斯顿积累了 100 多年的监测成果和 50 多年防控经验, 与山东省平原区 30 多年来的地面沉降监测与防控经验具有一定的相似性。为进一步推动和加强山东省地面沉降监测与防治、地下水资源管理、数字赋能和数据共享, 文章对两个地区的地面沉降成因、监测技术、地下水管理和地面沉降防控进行了对比分析。结果表明: 过度抽取地下水是导致地面沉降的主要原因, 两地都采取了以限制地下水开采为主的地面沉降管理措施, 当前沉降面积和沉降速率都趋于减小; 两地目前使用的监测方法和技术基本相同, 主要使用精密水准测量、分层标或深孔伸缩仪、全球卫星定位系统和干涉合成孔径雷达技术, 观测点的密度和监测频次都在逐步增加。然而, 两地在观测数据的管理和共享方面存在很大差异。休斯顿地区的地面沉降管理部门主要负责采集数据和协调数据共享, 不承担观测数据的处理和研究任务, 所有的观测数据都向社会开放, 基于观测数据的研究工作主要由美国地质调查局和大学的研究团体承担, 研究成果公开发表; 山东平原区的地面沉降和地下水位监测由自然资源和水利部门承担, 下属的事业单位承担野外观测、数据保管、数据分析和研究, 为制定地下水管理规章制度提供科技支撑, 部门间的数据共享和整合存在一定困难, 限制了对地面沉降的深入系统研究。

关键词: 地面沉降; 监测与防控; 地下水; 中国山东; 美国休斯顿

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)01-0167-12

Comparative study on land subsidence monitoring and control in the Shandong Plain, China and the Greater Houston Area, USA

ZHANG Yongwei^{1,2}, WANG Guoquan³, ZHU Xiaowei^{1,2}, YU Dejie^{1,2}, LIANG Hao^{1,2}, WANG Xiaowei^{1,2}

(1. Shandong Provincial Territorial Spatial Ecological Restoration Center, Jinan, Shandong 250014, China;

2. Observation and Research Station of Land Use Security in the Yellow River Delta, MNR, Jinan,

Shandong 250014, China; 3. Department of Earth and Atmospheric Sciences,

University of Houston, Houston, Texas 77204, USA)

Abstract: Both the Shandong Plain in China and the Greater Houston Area in the United States have land subsidence problems that were caused by excessive groundwater pumping. Houston has accumulated more than

收稿日期: 2023-01-16; 修订日期: 2023-08-14

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 中国国家留学基金项目(留金发[2018]3058号); 山东省财政厅地环专项(鲁财预指[2021]1号)

第一作者: 张永伟(1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事水文地质、环境地质、工程地质和地质灾害监测与防治工作。

E-mail: zyw526@126.com

100 years of monitoring results and more than 50 years of prevention and control experience, which has certain similarities with the ground subsidence monitoring and control experience of Shandong Plain area in the past 30 years. To further promote and strengthen land subsidence monitoring and prevention, groundwater resource management, digital empowerment, and data sharing in Shandong Province, in this article a comparative study was conducted on the causes of land subsidence, monitoring techniques, groundwater management, and land subsidence prevention and control in the Shandong Plain and the Greater Houston Area. The results indicate that excessive extraction of groundwater is the main cause of land subsidence, and land subsidence management measures based on limiting groundwater extraction have been taken. Currently, the area and rate of subsidence are decreasing in both places. The monitoring methods and techniques used in two places are basically the same, mainly using precision leveling surveying, bench mark fixed on different stratum or borehole extensometers, Global Navigation Satellite Systems (GNSS), and Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) techniques, and the density and frequency of observations are gradually increasing. Meanwhile, the management and sharing of observation data is different. The land subsidence management administration agencies in the Houston area are mainly responsible for the collection and sharing of observation data, and do not undertake data processing and research tasks. All observation data are open to the public, and scientific researches based on observation data is mainly undertaken by the U.S. Geological Survey (USGS) and universities. Research results are published on USGS reports or journal articles. Differently, land subsidence and groundwater level monitoring in Shandong Plain are undertaken by the Ministry of Natural Resources and the Ministry of Water Resources, and its affiliated institutions are responsible for field observation, data storage, data analysis and research, as well as formulating regulations for groundwater management. There are certain difficulties in data sharing and integration between departments, which limits in-depth and systematic research on land subsidence.

Keywords: land subsidence; monitoring and prevention; groundwater; Shandong, China; Houston, USA

目前世界上有 150 多个国家或地区存在地面沉降, 遍布美洲、亚洲、欧洲、非洲和大洋洲, 日本、美国、意大利、荷兰等国家的地面沉降分布较为广泛。1891 年墨西哥城最早记录地面沉降现象, 美国是目前世界上沉降范围最大的国家之一。中国目前已有 22 个省(区、市)存在地面沉降, 主要分布在长江三角洲、华北平原和汾渭盆地^[1-3]。

山东省地处黄河下游、华北平原的最南端, 北接京津冀一体化区域的南缘^[1-2], 主要平原区面积约为 $6.78 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占全省国土面积的 43.3%。20 世纪 90 年代以来, 平原区出现了不同程度的地面沉降, 主要包括济南、淄博、东营、潍坊、德州、聊城、滨州、济宁和菏泽等 9 个地市(图 1)。黄河山东段、京沪高铁、南水北调部分地段和一些重要工矿区位于地面沉降区或潜在沉降区内, 地面沉降已经成为山东省平原地区最为突出和急需重点防治的地质灾害^[3-4]。

大休斯顿地区是美国最大的地面沉降区之一(图 2), 地面沉降造成的基础设施和房屋结构破坏在二次世界大战之前就已出现。近 100 a 来, 休斯顿地区积累了长期的地下水位和地面沉降观测数据以及地下水

管理和地面沉降防控经验^[5-7]。

中国山东省平原区和美国大休斯顿地区都存在地面沉降问题, 已经对建筑物、道路、桥梁、河流堤坝、机场、油气管线和其他基础设施造成了一定的影

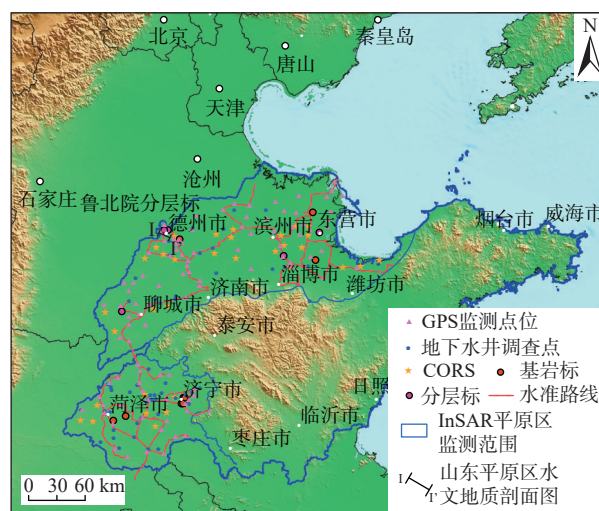


图 1 山东省地面沉降综合监测网络体系

Fig. 1 The comprehensive monitoring network of land subsidence in Shandong province

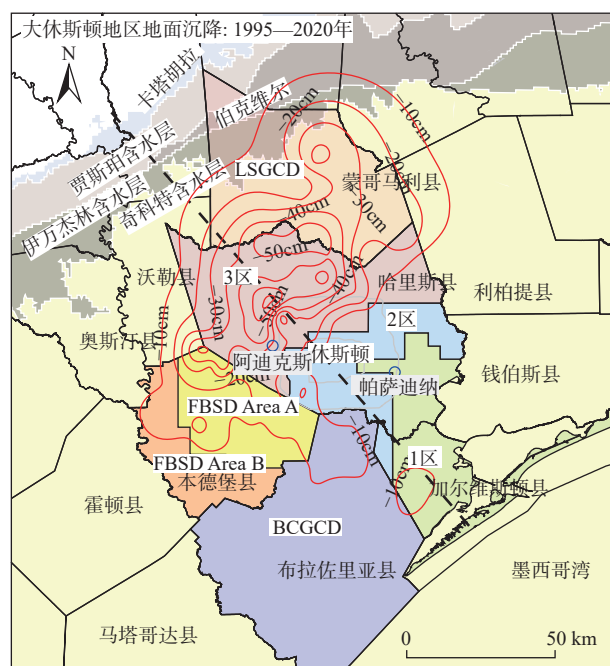


图2 美国大休斯顿地区的主要含水层和地面沉降 (1995—2020) 分布图

Fig. 2 Major aquifers and land subsidence (1995–2020) in the Greater Houston Area, USA

响。两个地区在许多方面都具有相似性,例如水文地质环境,地面沉降形成机理、影响因素、危害和监测防控体系建设等^[3-10]。因此,对中国山东省平原区和美国大休斯顿地区的地面沉降监测与防控进行对比分析,可以为今后地面沉降地质灾害监测与防控工作提供借鉴和参考。

1 研究区概况

1.1 山东平原区

山东省位于中国东部沿海地区,属于暖温带大陆型季风气候区。全省年平均气温 $11.7 \sim 14.0^\circ\text{C}$ 。多年平均年降水量(1951—2021年)为 572 mm,总体上由东南向西北递减。

山东省从山前冲积、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,孔隙比和压缩系数平均值均呈依次递减趋势。

黄河泛滥冲积平原区主要分布在黄河以北的区域。下更新统(Q_{p1})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,含水层顶板埋深 260~360 m;中更新统(Q_{p2})为棕黄、灰黄色粉质黏土、粉土互层,夹粉细砂层,含多层钙质淀积层,具河湖相沉积物特征;上更新

统(Q_{p3})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(Q_h)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^[11]。沉积类型主要为河湖相,沉积面积广阔,地层连续且累积厚度大,部分地段存在侵蚀基准面,出现沉积间断,形成超固结层段(图3),剖面位置见图1。

德州和滨州两地分层标数据表明沉降段主要为中更新统(Q_{p2}),该时期全区湖沼相发育,静水环境下沉积了较厚的细颗粒粉质黏土,形成了多层承压含水层和中-高压压缩性的黏性土层结构,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^[12-13]。中更新统(Q_{p2})一般称为第三含水层(III),顶板埋深 245~385 m,厚 12~25 m,颗粒粒径 0.1~0.25 mm,占 50%~90%,岩性主要为粉细砂、细砂。弱透水层厚 27.6~60.9 m,平均值 41.7 m,孔隙比 0.424~0.534,压缩系数为 $0.078 \sim 0.141 \text{ MPa}^{-1}$ 。

1.2 大休斯顿地区

休斯顿是美国南部德克萨斯州的第一大城市,也是美国第四大城市,位于墨西哥湾沿岸(图2)。大休斯顿地区由哈里斯、加尔维斯顿等9个县组成,总面积约 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。休斯顿气候属于亚热带季风性湿润气候,全年平均气温为 20.7°C ,年平均降雨量为 1 224 mm。

大休斯顿地区位于美国德州东部墨西哥湾沿岸平原未固结的第四纪和新近纪沉积层上,地下含水层系统属于墨西哥湾海岸含水层系统,该地区有3个主要的含水层:奇科特、伊万杰林和贾斯珀^[8](图4),剖面图位置为图2中黑色虚线。

奇科特含水层是三者中最浅和最年轻的,主要由沙子、砂岩和黏土组成。奇科特含水层的年龄范围从更新世早期(Q_{p1})到全新世(Q_h),大约为 200 万年前至 10 万年前。伊万杰林含水层在奇科特之下,主要由沙子、砾石和黏土组成,其年龄范围在上新世(N_2),大约从距今 500 万年开始,距今 200 万年结束。贾斯珀含水层是三者中最深和最古老的,主要由沙子和砾石组成,其沉积时间主要在中新世(N_1)中期,大约从距今 1 000 万年。

奇科特和伊万杰林含水层处于连通状态,而贾斯珀含水层则被伯克维尔封闭单元隔开。伯克维尔隔水层主要由黏土组成,极大地限制了伊万杰林和贾斯珀含水层之间的地下水垂向流动。奇科特和伊万杰林含水层是休斯顿地区的两个主要淡水含水层。奇

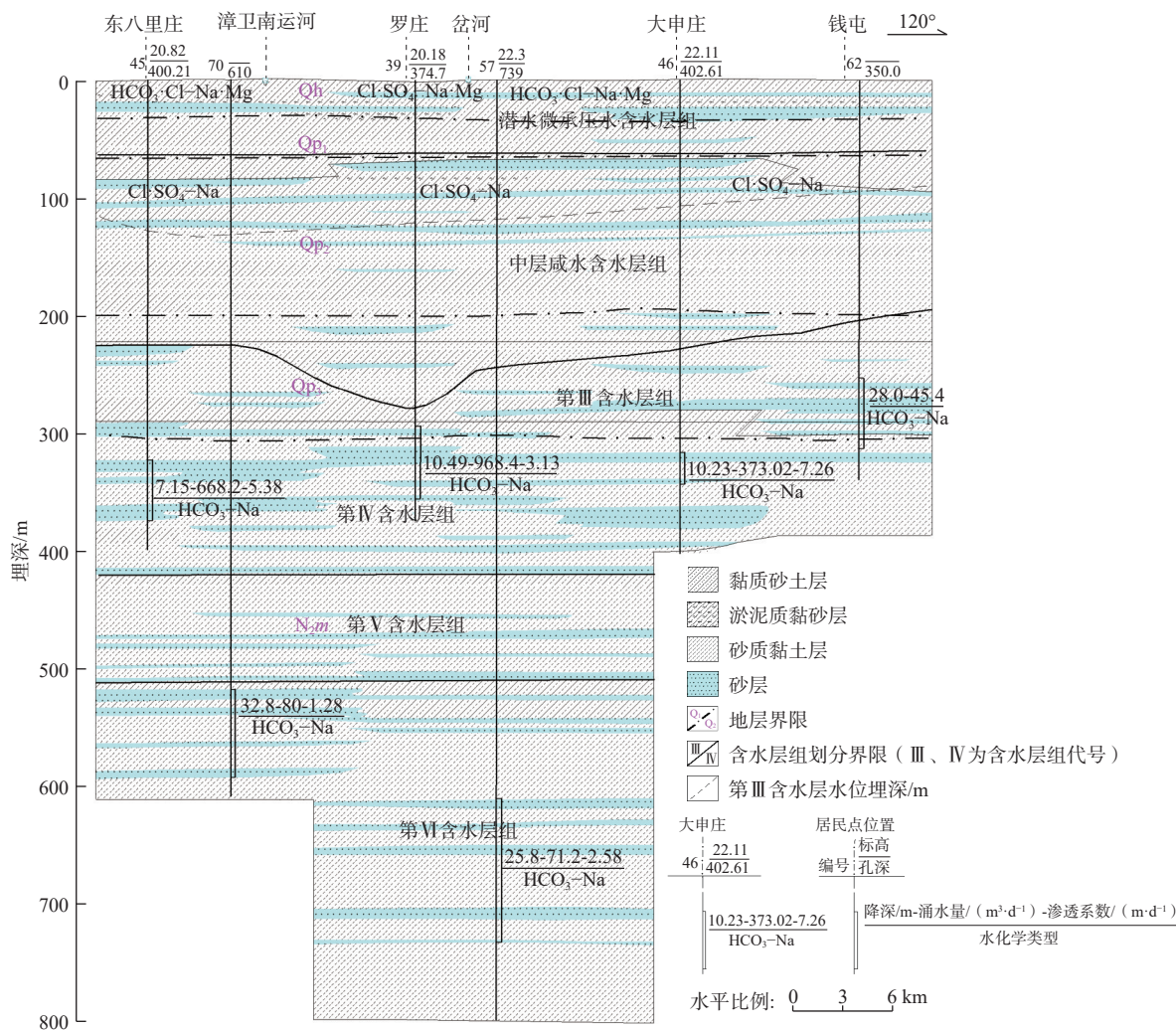


图 3 山东平原区的水文地质剖面图 (根据文献 [3] 改编)

Fig. 3 Hydrogeological section of the Shandong Plain (adapted from Ref.[3])

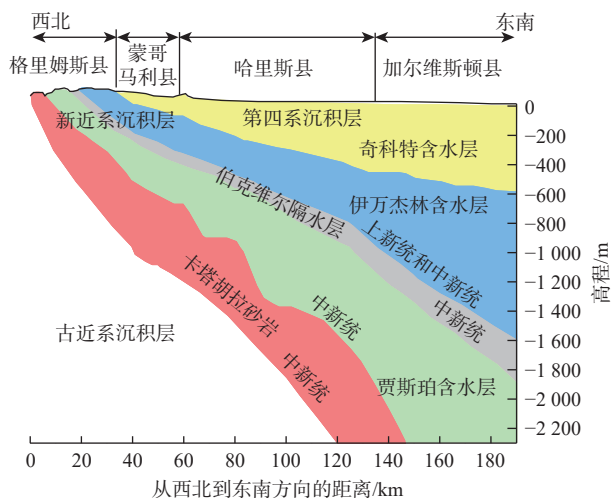


图 4 休斯顿地区含水层系统水文地质剖面 (根据文献 [14] 改编)

Fig. 4 Hydrogeological cross-section of the aquifer system in the Houston area(adapted from Ref. [14])

科特含水层比伊万杰林含水层更具渗透性,其砂层更容易被压缩。伊万杰林含水层是当地工业和公共用途地下水的主要来源。

休斯顿地区地下含水层的厚度从内陆到沿海逐步增加。奇科特为浅层含水层,几乎覆盖整个休斯顿地区(图 2),其厚度从内陆约 100 m 逐步增加到在沿海地带约 500 m。伊万杰林和贾斯珀深层含水层在蒙哥马利县的北部出露地表,距海岸带约 190 km,深层地下水主要通过地表出露区补给。伊万杰林和贾斯珀的宽度在地表出露区约为 200 m,向海岸带逐步增加到约 800 m。伯克维尔隔水层的厚度比较稳定,在 50~100 m 之间。长期的地下水开采导致了地面沉降问题,基于观测数据的研究表明,地表沉降(含水层压缩)主要发生在距地表约 600 m 的含水层内,包括奇科特和伊万杰林的上部^[15]。

2 研究方法和数据来源

2.1 山东平原区

山东省地面沉降专项调查监测工作大约开始于1991年,预警工作开始于2014年。经过多年规划建设,全省初步建立了以地面精密水准、GNSS、基岩标分层标和地下水监测为基础的“多网合一”,点、线、面结合,空、天、地、深联合的地面沉降综合监测网络体系(图1),以InSAR空间观测^[16-17]为辅构成了地面沉降三维立体监测网,实现了2017年以来全省平原区地面沉降的全面连续监测^[9]。

自2017年以来,每年度开展山东省平原区高精度水准测量,共埋设地面沉降二等水准点740个,建设二等水准路线2 660 km,平原区监测密度为每百平方公里1.38个水准点。布设地下水动态监测点574个,地下水自动化监测点按照一定时间间隔(每天采集24次,一天发送1次)向服务器发送水位监测数据,监测密度为每百平方公里1.1个。建设B级GPS监测墩100个,累计开展B级GPS测量1 787点次、收集CORS站点数据超过800点次;建设基岩标7座,分层标8组。国家地壳运动观测网络(CMONOC)在山东省境内运行8个连续GNSS台站(CORS),山东省国土测绘院在山东省境内运行约140台CORS站,连续运行的永久GNSS台站为研究山东平原区地面沉降的时空演化提供了第一手资料。

自2014年以来,山东省国土空间生态修复中心开展地面沉降监测预警系统研究^[3,9,18],先后建立了德州市德城区、滨州市博兴县、潍北平原、菏泽市牡丹区、东营市广饶地区、聊城市等地区三维流固耦合监测预警模型,对山东省地面沉降形成机理、监测预警和防治对策进行了深入研究,形成“政府主导、部门协同、区域联动、分级负责、齐抓共管”的完整监测管理体系。所有调查监测数据作为地面沉降监测基础资料,经汇总后每年度形成山东省地面沉降调查监测与防控工作报告,由山东省自然资源厅报送山东省人民政府和自然资源部。

2.2 美国大休斯顿地区

休斯顿地区地面沉降观测可追溯到1906年,早期主要依靠重复的水准测量和深孔伸缩仪。自20世纪90年代以来主要依靠GNSS和InSAR。

20世纪初期,当地地面沉降管理部门联合美国国家大地测量局(USGS)建立了广泛的一级和二级水准观测网,先后建立了超过2000多个基准点,覆盖了休

斯顿的大部分地区。基准点的多次观测数据在美国国家大地测量局(NGS)和USGS的文献报告中有完整的记录。USGS根据水准测量结果绘制了一系列的地面沉降等值线图,为制定地面沉降控制措施提供了重要依据^[19]。

20世纪70年代和80年代初,USGS在休斯顿地区先后安装了13个深孔伸缩仪,在2017年新建了1个深孔伸缩仪,目前在12个观测点运行14台深孔伸缩仪(图5)。深孔收缩仪同时记录从地表到伸缩仪底部的沉积物压缩或回弹量和地下水位的变化。早期的13个深孔伸缩仪已经积累了半个世纪的连续观测数据,为研究地面沉降和季节性地面变形的机理提供了宝贵的第一手资料^[20-21]。

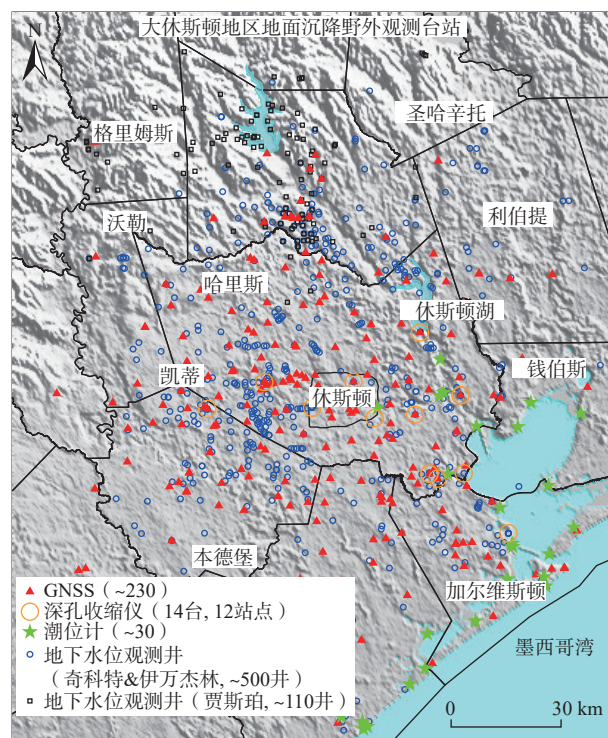


图5 休斯顿地区的地面沉降和地下水位监测台网

Fig. 5 Land subsidence and groundwater level monitoring network in the Greater Houston Area

20世纪90年代以来,GNSS逐渐取代了传统的水准测量,成为休斯顿地区沉降监测的主要方法。休斯顿是最早采用GNSS技术进行城市地质灾害监测的地区之一。截至2022,哈里斯-加尔维斯顿(Harris-Galveston)地面沉降管理区(HGSD)联合当地多家机构,在休斯顿地区运行一个由250个永久台站组成的GNSS台网,台站的平均间隔约为15 km(图5),台网为监测当前的地面沉降提供了第一手数据,已成为目

前地面沉降灾害监测的重要手段^[22]。

自 2000 年以来, InSAR 已成为一种强大的地面变形观测工具。InSAR 数据已被广泛用于地表变形(如滑坡、下沉、断层)的观测研究。与 GNSS 测量相比, InSAR 技术具有成本低、监测范围广, 空间分辨率高等优势。在休斯顿地区, 密集的 GNSS 观测数据为解析 InSAR 观测结果提供了可靠的校准数据, 二者结合可实现在时间和空间上的连续监测。近年来, USGS 和多所大学的研究团队已经利用 InSAR 数据研究了休斯顿地区地面沉降的时空演化^[23-25], 研究结果对城市规划 and 基础设施建设具有重要意义。

3 结果和分析

3.1 地面沉降历史和现状

3.1.1 山东平原区

山东平原区的地面沉降问题可以追溯到 20 世纪 90 年代初, 地面沉降已经造成了一系列的工程、环境

和社会问题。由于地面沉降, 地面高程不断降低, 城区的内涝现象变得日趋严重; 不均匀的地面沉降导致城市基础设施(如路面、桥梁和地下管线)和一些房屋频繁出现破坏, 给人们的生活和城市的发展带来了极大的威胁。为了应对地面沉降及其引起的次生灾害问题, 自 2000 年以来, 管理部门采取了限制地下水开采等措施, 一定程度上缓解了地面沉降, 特别是自 2015 年南水北调工程调水到山东后, 沿线地区地面沉降的面积和速度都明显减缓。南水北调工程的实施缓解了华北平原对地下水的需求, 有效减缓了华北平原区的地面沉降问题^[26]。

近 10 a 的监测结果显示, 鲁北平原地面沉降主要分布在德州齐河(约 6 cm/a)、博兴—广饶(约 13 cm/a)、黄河入海口(约 12 cm/a)、淮北平原(约 10 cm/a)、淄博桓台(约 14 cm/a)等 5 个地区; 鲁西平原地面沉降规模相对较小(约 3~5 cm/a), 主要发育在菏泽郓城、鄄城、单县区和济宁金乡等地^[9](图 6)。

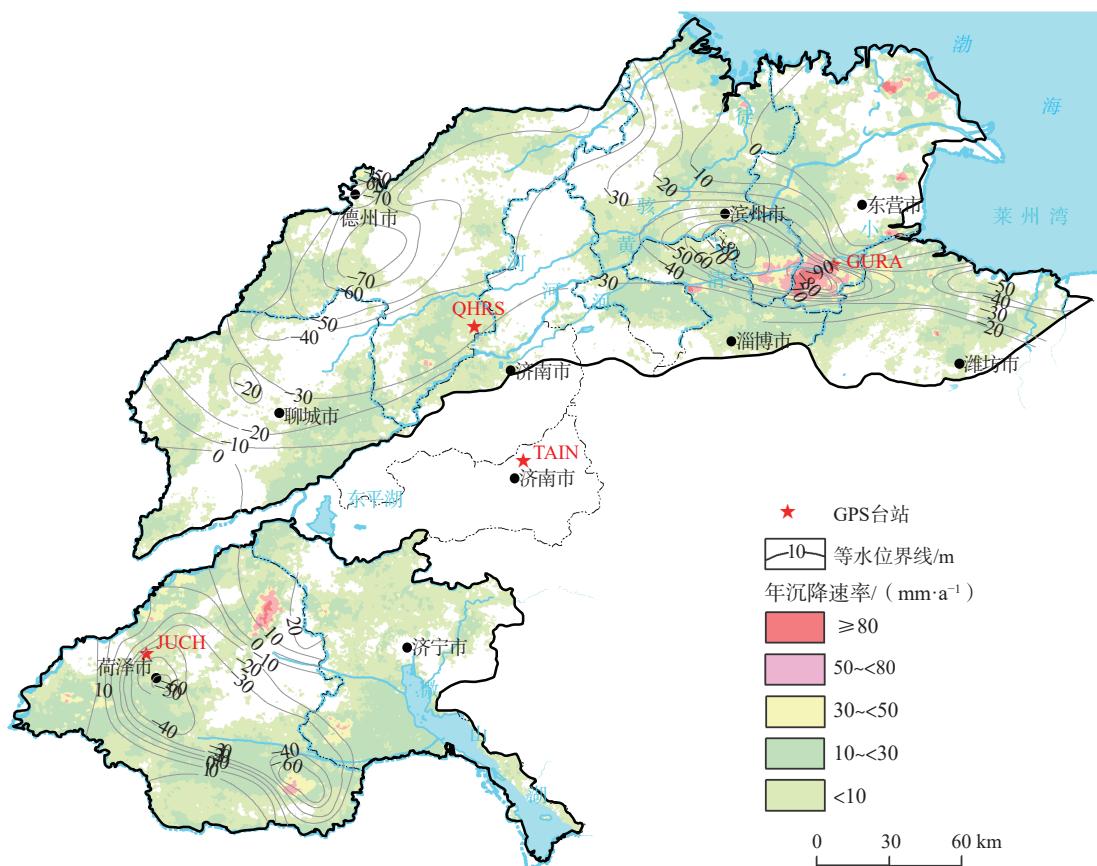


图 6 山东省平原区地面沉降速率与深层地下水等水位线图 (2020—2021 年)

Fig. 6 Land subsidence rates and deep groundwater level contour lines in the Shandong Plain (2020–2021)

图 7 列举了东营市广饶县(GURA)、菏泽市城区(JUCH)和德州市齐河县(QHRS)3 个 CORS 站记录到

的地面沉降时程(2011—2015 年)。地面沉降数据由文献^[27]提供。参考框架为华北稳定参考框架(NChina

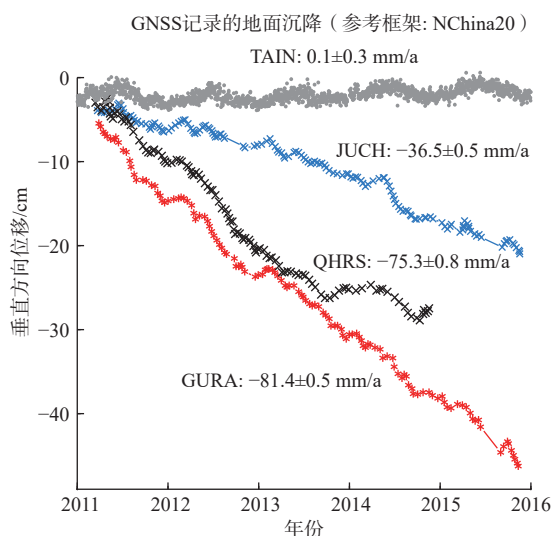


图7 山东平原沉降区的3个CORS站地面沉降时序

Fig. 7 Land subsidence time series recorded by three CORS located in the subsidence area in Shandong Plain

20) [28]。TAIN 位于泰安, 安装在基岩上, 没有记录到地面沉降。

GURA 位于黄河三角洲平原区东营市广饶县, 记录到平均 $(81.4 \pm 0.5) \text{ mm/a}$ 的地面沉降速率(2011—2015 年), $\pm 0.5 \text{ mm/a}$ 为 95% 置信度 [5]。广饶地区的水准测量数据表明从 2002—2008 年的平均沉降速率为 65.0 mm/a , 比 2011—2015 年的沉降速率小。随着近年来限制地下水的开采, 广饶县深层地下水位不断回升, 承压含水层沉降量明显减小, 二者具有明显相关性(图 8), 表明深层地下水开采是导致地面沉降的主要因素。黄河三角洲平原黄河入海口区域中深层卤水开采也是造成地面沉降的重要因素。关于地热开发利用与地面沉降的关系方面需要结合山东已建成的深层分层标监测成果进行深入研究 [9]。

JUCH 位于鲁西平原菏泽市城区, 记录到平均 $(36.5 \pm 0.5) \text{ mm/a}$ 的地面沉降速率(2011—2015 年)。区内地下水水位降落漏斗与地面沉降漏斗的变化过程具有空间位置上的一致性, 在时间上地面沉降漏斗的发展比地下水位漏斗的发展具有一定的迟滞性。

QHRS 位于鲁北平原德州市齐河县, 记录到平均 $(75.3 \pm 0.8) \text{ mm/a}$ 的地面沉降速率(2011—2014 年)。根据水准测量结果, 德州城区 1991—2021 年累计沉降量约 165 cm, 是目前在山东省境内监测到的最大累计沉降量值, 近 30 年的平均沉降速率 55 mm/a , 过量开采埋深 300~500 m 的深层地下水是德州区内地面沉降形成的主要原因 [9]。

德州市 2014 年建设了一组分层标, 位于鲁北地质

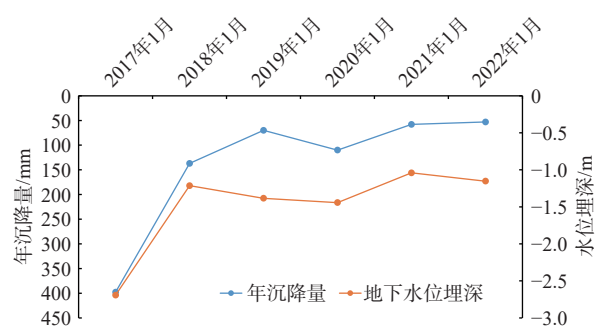


图8 广饶县北面地面沉降年沉降量与承压含水层地下水水位历时曲线(根据文献[9]改编)

Fig. 8 Annual land subsidence and groundwater level changes with time in the confined aquifer in North Guangrao County (adapted from Ref.[9])

工程勘察院大门东南绿化带内(图 1), 命名为“鲁北院分层标”, 包含 1 个地面标和 3 个深孔标, 钻孔深度分别为地下 60, 300, 500 m。根据该分层标 2015—2020 年监测数据, 地表到地下 60 m 含水层没有发生明显的压缩, 累积的压缩量约 7 mm, 60~300 m 含水层的累积压缩量为 106 mm, 300~500 m 含水层的累积压缩量为 84 mm(图 9)。精密水准测量表明, 地面标沉降(总压缩量)与地表到 500 m 含水层的压缩量基本一致, 约为 197 mm, 表明 500 m 以下的含水层基本没有被压缩。地面沉降的平均速率为 3~4 cm/a, 主要由 60~300 m 和 300~500 m 含水层的压缩所致, 分别占地面沉降的 54% 和 43% [9]。

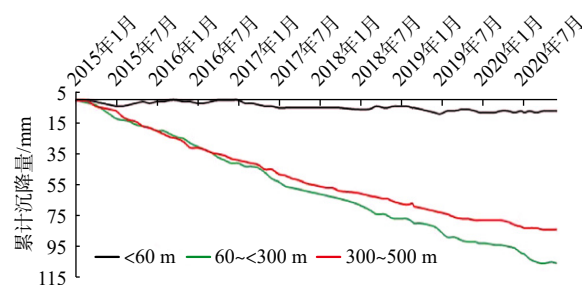


图9 德州市“鲁北院分层标”记录到的含水层压缩(沉降)曲线
Fig. 9 Aquifer compaction curves recorded by the Lubei Extensometer Station in Dezhou City

3.1.2 大休斯顿地区

休斯顿地区地面沉降最早报道于 20 世纪 20 年代, 已超百年。20 世纪 60 年代, 包括市中心、休斯顿船道沿线和加尔维斯顿湾地区在内的东南部地区的快速沉降速度达到了每年数厘米的水平, 20 世纪 80 年代末, 约有 $10\,000 \text{ km}^2$ 的区域沉降超过了 30 cm, 在休斯顿东南部工业区的累积沉降达到 3 m 左右 [6]。

自20世纪70年代末限制地下水开采以来,休斯顿东南部的整体沉降速率大幅下降,20世纪90年代初,休斯顿东南部(1区和2区,见图2)的沉降已停止。20世纪80年代以来,随着城市向内陆的扩张,地面沉降开始向休斯顿西北部迁移,2021年西北部部分地区的累积沉降量已经达到2.5 m(图10)^[7],阿迪克斯(Addicks)和帕萨迪纳(Pasadena)深孔伸缩仪的位置见图2。根据2015—2020年的GPS和InSAR观测数据,当前大休斯顿地区沉降速度大于2 cm/a的区域约20 km²;沉降速度在1~2 cm/a的区域约2 400 km²;沉降速度在5~10 mm/a的区域约为5 800 km²^[23]。

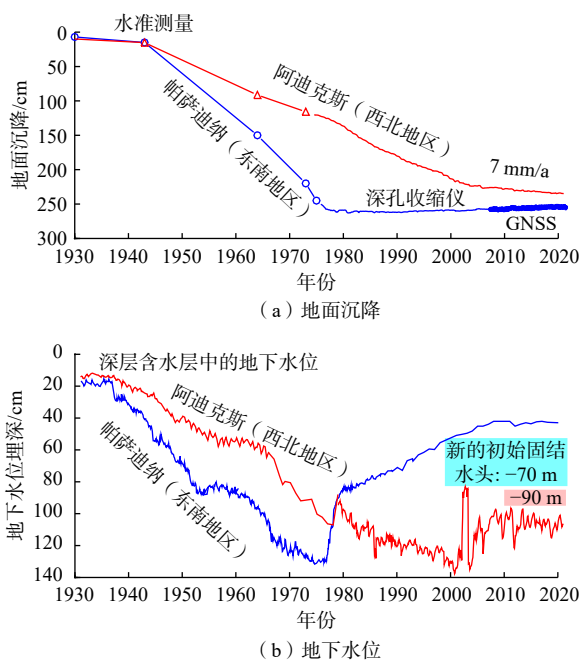


图10 休斯顿地区东南部和西北部的地面沉降和地下水位变化历史对比

Fig. 10 Comparisons of land subsidence and groundwater level changes in the southeast and northwest regions in Greater Houston Area

3.2 地下水管理与地面沉降防控措施

经过长期的观测和研究,两地都认识到过度抽取地下水是导致地面沉降的主要原因。因此,两地都建立了一套基于限制地下水开采的地面沉降防控体系,包括监测地下水位、调整地下水开采量、推广地表水的使用、节约用水等措施。同时,两地也注重加强科学研究,探索更加科学、可持续的地下水和地表水开发和利用方式。

3.2.1 山东平原区

近年来,山东省人民政府先后发布实施了《山东省地面沉降防治规划》《山东省地面沉降控制区划

定方案》,山东省人民政府批复发布了《山东省地质灾害防治规划(2021—2025年)》,省自然资源厅等11部门发布实施了《山东省地面沉降综合防治总体规划(2021—2035年)》,为山东省“十四五”以及到2035年的地面沉降防治工作提出了要求。

目前,山东省的地下水资源管理职责由水利部门负责;地面沉降监测职责由自然资源部门履行。自然资源部门负责组织监测地下水过量开采引发的地面沉降等地质问题。

山东省继续加大地面沉降科学防治力度,确保与前期规划工作无缝衔接,与京津冀一体化区域地面沉降联防联控工作无空白对接。强化地面沉降分区管控^[29],明确地方各级人民政府在地面沉降综合防治工作中的主体地位。强化山东平原区地面沉降联防联控工作机制,省相关部门做好指导监督,共同推进地面沉降防治工作。

加强地面沉降防治管理体系建设,建立省、市地面沉降防治联动机制,协调推进跨省、跨市地面沉降防治工作,实现地面沉降监测与防治的整体联动。充分运用地面沉降控沉指标的倒逼机制,促进调整地下水严重超采区、地面沉降重点防治区的耕地用途、矿业权、水权设置,有序实现地质环境、地下水休养生息,促进省际、地区间建立地面沉降联防联控的横向生态补偿制度^[9]。

3.2.2 美国大休斯顿地区

为解决地面沉降问题,德克萨斯州议会在1975年创建了哈里斯-加尔维斯顿(Harris-Galveston)地面沉降管理区(HGSD),这是美国第一个专门治理地面沉降的管理部门。在1975年之前,休斯顿地区地下水的开采没有受到监管。自成立以来,HGSD开始制定地下水法规以减少地下水抽取量。第一个地下水监管计划于1976年实施,之后在1985年、1992年、1999年和2013年更新。HGSD和USGS目前在休斯顿地区运行约700个地下水位连续观测井(图5),部分观测井有近百年的连续观测历史,长期的地下水位监测数据为改进和完善地下水监管计划提供了宝贵的第一手资料。HGSD当前的监管方案(2013)将哈里斯县(Harris)和加尔维斯顿县(Galveston)分为三个监管区域:1区、2区和3区(图2)。HGSD执行的具体地下水管理措施包括以下3个方面。

(1)地下水减量计划:HGSD要求所有用水大户(每年用水超过1.2万吨)制定并实施自己的地下水减量计划,以逐步减少地下水使用量。目前1区的地下

水开采限制在不超过总需水量的 10%, 2 区不超过 20%。3 区的地下水开采量在逐年减少, 目标是在 2025 年将地下水开采限制到总用水量的 40%, 在 2035 年前将地下水开采量限制到总用水量的 20%。

(2) 监测和报告: 所有大量使用地下水的用户都必须安装和维护地下水位监测设备, 以跟踪地下水位并向管理部门提供数据。此外, 用户必须提交年度报告, 详细说明他们的用水情况、节水措施和对自已的地下水减量计划的执行情况。

(3) 节水: 管理部门通过各种计划和倡议来推广节水, 提倡开展水资源的回收和再利用, 推广使用节水技术, 减少人类活动对地下水资源的消耗。

基于 HGSD 在治理加尔维斯顿 (Galveston) 县和哈里斯县 (Harris) 地面沉降成功经验, 德克萨斯州立法机构于 1989 年创建了本德堡县 (Fort Bend) 地面沉降管理局 (FBSD), 于 2001 年创建了孤星 (Lone Star) 地下水保护管理局 (LSGCD), 2005 年创建了布拉佐里亚县 (Brazoria) 地下水保护管理局 (BCGCD) (图 2) 和其他一系列地下水和地面沉降管理部门, 这些管理机构都采用和 HGSD 相似的地下水管理办法。他们为大量使用地下水的用户发放许可证, 并根据用水量收取相应的费用。这些费用是管理机构获得运行经费的主要渠道, 州政府和地方政府并没有为管理机构提供经费。为了确保地下水资源的可持续利用和地面的稳定性, 这些管理机构还制定了详细的用水规定和节水措施, 并有权通过罚款或其他行政手段来贯彻节水措施的执行。同时, 这些管理机构也积极开展宣传和教育工作, 提高公众对水资源管理的认识, 鼓励公众节约用水, 保护水资源, 从而实现可持续发展。

3.3 监测数据管理与共享

3.3.1 山东平原区

中国大陆地壳运动观测台网 (CMONOC) 在山东境内运行 8 个连续观测 GNSS 台站 (CORS), 观测数据可向国家地震科学数据中心 (<https://data.earthquake.cn>) 申请得到。山东省国土测绘院等地方机构运行约 140 个 CORS 站和超过 100 个定期观测 GNSS 台站。山东境内的 GNSS 数据由山东省国土测绘院统一管理。山东省国土空间生态修复中心负责地面沉降的监测, 定期向山东省国土测绘院申请 GNSS 数据 (<http://www.sdgc.gov.cn>), 委托自然资源部大地测量数据处理中心处理 GNSS 数据, 得到各台站的三方向位移时序。由于数据保密等原因, 其他研究机构很难得到原始的 GNSS 数据, 处理后的地面位移时序也很少公开发表,

因此, 基于 GNSS 的地面沉降研究在科技文献中并不多见。

山东境内有地面沉降监测基岩标 7 座, 分层标 8 组, 所取得的数据由相关地质勘查单位或地市自然资源部门管理。目前, 山东省自然资源厅正在整合各单位的基岩标和分层标监测数据, 拟纳入全省科技管矿平台系统。

山东省地下水监测分别由山东省水利厅、自然资源厅和生态环境厅按各自工作职责和服务范围组织实施。水利系统地下水监测为地下水管理的水量和水位双控目标服务, 主要监测地下水集中供水水源地的地下水位。自然资源部门监测地下水过量开采引发的地面沉降等地质问题, 主要在地面沉降、地面塌陷、地裂缝、植被退化等地质灾害或者生态损害的区域、地下水地球化学成分变化区、地质环境问题分布区、海 (咸) 水入侵区等监测地下水动态变化, 从自然资源管理角度, 对地下水管理实施监督和为水资源确权提供基础数据。生态环境部门主要对地下水水质和水污染方面进行监测, 履行地下水污染监管职责。

目前全省自然资源部门负责管理国家级地下水位长测点 655 处, 省级长测点 353 处, 机民井统测点 1 300 处。国家级和省级长测点安装 ZKGD2000-M 型地下水位监测仪获取数据, 频率为每天 24 次, 数据传输方式为 GPRS 无线网络。根据产权不同, 国家级数据传输到国家级地下水信息中心, 通过地质云省级地下水监测信息节点与山东省共享 (图 11), 省级数据传输到山东省地下水动态监测管理系统, 各系统内数据经整编后可定制下载。统测点数据采用钢尺水位计人工监测实时获取, 监测频率为每天 2 次, 经整编汇总后直接使用。

3.3.2 美国大休斯顿地区

目前休斯顿地区有 250 台 GNSS 连续观测站, 其中约 110 个台站由 HGSD 运营, 其他台站由休斯顿大学、德州交通部等机构运营, 运营机构通过互联网向公众免费共享原始数据。HGSD 委托休斯顿大学处理休斯顿境内的 GNSS 数据, 得到相对于当地稳定参考框架 (Houston20) 的三方向位移时序^[30]。目前约 150 个台站有超过 10 年的连续观测数据。HGSD 通过其官方网站 (<https://hgsubsidence.org>) 向社会共享所有位移时序和地面沉降分析结果, 提供强大的数据查询、可视化和下载功能, 例如地下水位和地面沉降等值线图。

休斯顿地下水位的监测由美国地质调查局承担, 目前定期测量约 700 个水井的水位, 多数水井每月测

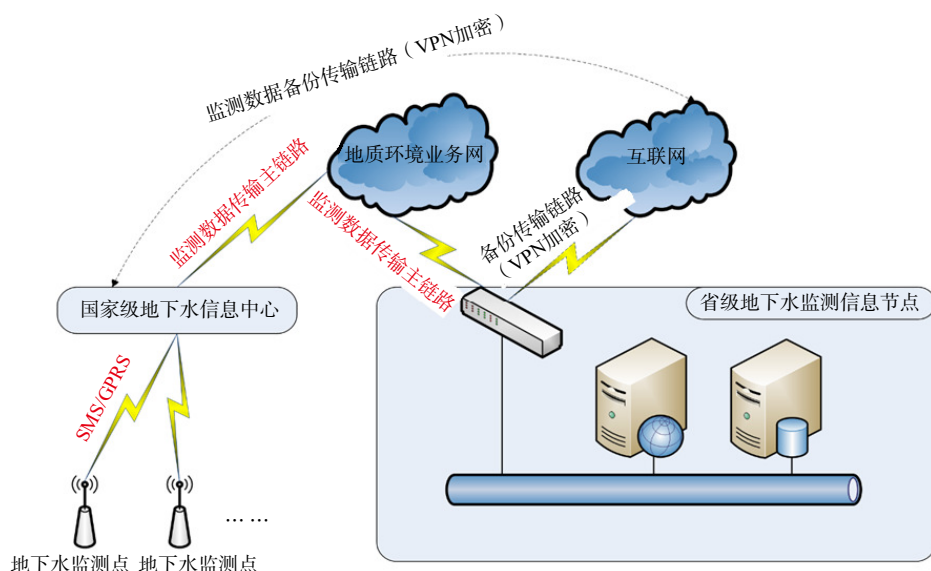


图 11 地下水位监测数据获取流程示意图

Fig. 11 Flowchart of groundwater monitoring data acquisition process

量 1 次,少数水井是实时监测。USGS 通过的国家水资源信息系统(NWIS)网站(<https://nwis.waterdata.usgs.gov/nwis>)向公众开放所有的水位观测数据,提供数据搜索、查询、可视化和下载功能。此外,USGS 还负责运营 14 个深孔伸缩仪,每个台站每月收集地下水位和深孔伸缩仪数据 1 次,所有数据通过 USGS 的网站(<https://www.sciencebase.gov>)向公众开放。HGSD 等地面沉降管理机构每年向 USGS 支付一定的费用,USGS 每年向 HGSD 提交年度报告,详细分析近年来地下水位和地面沉降的变化及发展趋势。

4 结论

中国山东平原区和美国大休斯顿地区含水层地质条件相似,均位于未固结的新近系和第四系沉积层上,承压含水层的厚度相当可观,在山东平原区达 800 m,在休斯顿内陆约为 1 000 m,在海岸带超过 2 000 m。地下水资源对于这两个地区都非常重要,曾经是两地农业、工业和生活用水的主要来源,为当地的经济的发展做出了重要贡献。两地地面沉降主要由距地面约 500 m 的含水层的压缩产生。地下水过量开采是导致两地地面沉降的主要原因,两地都采取了一系列的地下水位监测和管理措施。

两地都认识到长期连续观测的重要性,目前所使用的地面沉降观测方法和技术手段基本相同,两地都建立了密集的地下水位和地面沉降观测体系,地面沉降观测和监测手段主要包括精密水准测量、分层标或深孔伸缩仪、GNSS 和 InSAR。休斯顿地区的监测面

积相对较小,监测范围集中,观测站点密度大,历史长,连续性好;山东平原区的观测台网建设近年来快速发展,监测面积大、范围广,监测站点的密度和监测周期均在逐步提高。此外,两地管理部门都采取了多种措施来减缓地面沉降速度,如限制地下水开采、加强地表水水资源管理、推广高效灌溉和节约用水等措施,目前两地都呈现沉降面积和沉降速度减小的态势。

两地地下水和地面沉降管理和防控措施有相似之处,但也存在差异。休斯顿成立了专门的沉降管理区,协调地下水和地面沉降的长期观测,所有原始观测数据通过互联网对公众开放。管理机构只负责野外观测、收集数据和共享原始数据,不提供观测数据的处理和分析任务,不承担科研经费。科学研究工作主要由美国地质调查局和大学的研究团队完成,研究成果公开发表。地面沉降管理部门会定期汇总最新的研究成果并更新地下水管理方案。

山东地面沉降监测和地下水管理分属自然资源部和水利部门。自然资源部门负责组织监测地面沉降和沉降区地下水位,水利部门负责管理地下水的开采和地表水的分配,并主要监测水源区的地下水位。地面沉降观测台站和地下水观测井由不同的机构和部门建设和管理,每个部门一般都有自己的研究人员负责数据处理和分析,一些机构可能担心数据的安全性或者是由于数据产权问题,分享数据很谨慎,从而导致了部门间很难整合长期的观测数据,也限制了大学和科研院所的研究人员获取观测数据。相比较于休

斯顿地区的地面沉降研究,虽然山东平原区地下水位监测井和 GNSS 台站的数量和观测历史相当可观,但是山东平原区基于地下水位观测和 GNSS 的地面沉降观测的研究成果相对较少。可喜的是,近年来我国基于 InSAR 的地面沉降研究发展很快,研究程度越来越深入。

近年来,中国已经制定了一套相当完善的科技数据共享政策,但数据共享问题仍然是限制深入研究地面沉降问题的主要因素,建议管理部门贯彻相关法规和政策,提供必要的技术和资源支持,落实科技数据共享,从而推动对地面沉降等问题的深入研究。

致谢:在此感谢国家留学基金委、山东省自然资源厅、中国地质环境监测院、自然资源部第二大地测量队、自然资源部大地测量数据处理中心、山东省国土测绘院、山东省煤田地质规划勘察研究院、山东省煤田地质局物探测量队、金田产业发展(山东)集团有限公司和山东省鲁北地质工程勘察院等单位所提供的大力支持和帮助!

参考文献 (References):

- [1] 郭海朋,李文鹏,王丽亚,等.华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望[J].水文地质工程地质,2021,48(3):162-171. [GUO Haipeng, LI Wenpeng, WANG Liya, et al. Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 162-171. (in Chinese with English abstract)]
- [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] 张永伟.华北平原德州地面沉降成生机理、监测预警与可控性研究[D].济南:山东大学,2014. [ZHANG Yongwei. Study on formation mechanism, monitoring and early warning and controllability of land subsidence in Dezhou, North China Plain[D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张永伟,邵明,肖敏.山东省地面沉降监测与防治工作进展[J].山东国土资源,2018,34(8):62-66. [ZHANG Yongwei, SHAO Ming, XIAO Min. Progress in monitoring and prevention of land subsidence in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(8): 62-66. (in Chinese with English abstract)]
- [5] WANG Guoquan. The 95% confidence interval for GNSS-derived site velocities[J]. Journal of Surveying Engineering, 2022, 148(1): 04021030.
- [6] KASMAREK M C, GABRYSCH R K, JOHNSON M R. Estimated land-surface subsidence in Harris County, Texas, 1915-17 to 2001[R]. Scientific Investigations Map-3097. Reston, VA: U. S. Geological Survey, 2009.
- [7] WANG Guoquan. New preconsolidation heads following the long-term hydraulic-head decline and recovery in Houston, Texas[J]. Groundwater, 2023, 61(5): 674-691.
- [8] BAKER E. Stratigraphic and hydrogeologic framework of part of the coastal plain of Texas[R]. Austin, TX: U. S. Geological Survey, 1977
- [9] 张永伟,杨培杰,梁浩,等.山东省地面沉降调查监测与防控报告[R].济南:山东省国土空间生态修复中心,2022. [ZHANG Yongwei, YANG Beijie, LIANG Hao, et al. Land subsidence investigation, monitoring and prevention and control report in Shandong Province[R]. Ji Nan: Shandong Provincial Territorial Spatial Ecological Restoration Center, 2022. (in Chinese)]
- [10] 刘贺,罗勇,雷坤超,等.北京新航城地区地面沉降演化规律及多源监测方法对比研究[J].地质科技通报,2023,42(1):398-406. [LIU He, LUO Yong, LEI Kunchao, et al. Evolution of land subsidence and comparative study on multi-source monitoring methods in New Airlines City of Beijing[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(1): 398-406. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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)]
- [12] 纪洪磊,杨亚宾,张永伟,等.鲁北平原第四纪沉积特征及地面沉降模式分析[J].地质学报,2019,93(增刊1):241-250. [JI Honglei, YANG Yabin, ZHANG Yongwei, et al. Quaternary sedimentary characteristics and land subsidence model in North Shandong Plain[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(Sup 1): 241-250. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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)]
- [14] ELLIS J, KNIGHT J E, WHITE J T, et al. Hydrogeology, land-surface subsidence, and documentation of the gulf coast land subsidence and groundwater-flow (GULF) model, southeast Texas, 1897–2018[R]. Austin, TX: U. S. Geological Survey, 2023.
- [15] YU Jiangbo, WANG Guoquan, KEARNS T J, et al. Is there deep-seated subsidence in the houston-galveston area?[J]. *International Journal of Geophysics*, 2014, 2014: 1 – 11.
- [16] 丁朋朋, 贾超, 韩瑶, 等. 时序 InSAR 技术的潍北平原地面沉降分析 [J]. *测绘科学*, 2021, 46(8): 135 – 140. [DING Pengpeng, JIA Chao, HAN Yao, et al. Analysis of land subsidence in Weibei plain based on time series InSAR method[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(8): 135 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [17] HAN Yao, ZHAO Yang, ZHANG Yongwei, et al. Monitoring and analysis of land subsidence in modern Yellow River Delta using SBAS-InSAR Technology[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 643(1): 012166.
- [18] 狄胜同, 贾超, 张少鹏, 等. 华北平原鲁北地区地下水超采导致地面沉降区域特征及演化趋势预测 [J]. *地质学报*, 2020, 94(5): 1638 – 1654. [DI Shengtong, JIA Chao, ZHANG Shaopeng, et al. Regional characteristics and evolutionary trend prediction of land subsidence caused by groundwater over exploitation in North Shandong of the North China Plain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(5): 1638 – 1654. (in Chinese with English abstract)]
- [19] GABRYSCH B R K, PECK D L. Ground-water withdrawals and land-surface subsidence in the Houston-Galveston Region, Texas, 1906-80[R]. Austin, TX: U. S. Geological Survey, 1982.
- [20] KEARNS T J, WANG Guoquan, BAO Yan, et al. Current land subsidence and groundwater level changes in the Houston metropolitan area (2005–2012) [J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2015, 141(4): 1 – 16.
- [21] WANG Guoquan. Seasonal subsidence and heave recorded by borehole extensometers in Houston[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2023, 149(1): 04022018.
- [22] AGUDELO G, WANG Guoquan, LIU Yuhao, et al. GPS geodetic infrastructure for subsidence and fault monitoring in Houston, Texas, USA[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2020, 382: 11 – 18.
- [23] LIU Yuhao, WANG Guoquan, YU Xiao, et al. Sentinel-1 InSAR and GPS-integrated long-term and seasonal subsidence monitoring in Houston, texas, USA[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(23): 6184.
- [24] BAWDEN G, JOHNSON M R, KASMAREK M C, et al. Investigation of land subsidence in the houston-galveston region of texas by using the global positioning system and interferometric synthetic aperture radar, 1993-2000[R]. Reston, VA: U. S. Geological Survey, 2014.
- [25] 曲菲霏, 杨成生, 张勤. 基于 MT-InSAR 技术的城市活动断层定位与监测——以美国休斯顿地区为例 [J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(4): 617 – 631. [QU Feifei, YANG Chengsheng, ZHANG Qin. Monitoring and identification of active faults in urban areas using MT-InSAR technology: A case of Houston area, USA[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(4): 617 – 631. (in Chinese with English abstract)]
- [26] YU Xiao, WANG Guoquan, HU Xie, et al. Land subsidence in Tianjin, China: before and after the south-to-north water diversion[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(6): 1647.
- [27] GUO Chunxi, NIE Jianliang, TIAN Jie, et al. Vertical ground displacements in the Shandong Province derived from long-term GNSS and leveling surveying[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 64(7): 1388 – 1397.
- [28] 鲍艳, 王国权, 于笑, 等. 华北稳定参考框架 NChina20 的建立及应用 [J]. *中国地震*, 2020, 36(4): 788 – 805. [BAO Yan, WANG Guoquan, YU Xiao, et al. Establishment and application of stable North China reference frame: NChina20[J]. *Earthquake Research in China*, 2020, 36(4): 788 – 805. (in Chinese with English abstract)]
- [29] JIA Chao, ZHANG Yongwei, HAN Jingmin, et al. Susceptibility area regionalization of land subsidence based on extenics theory[J]. *Cluster Computing*, 2017, 20(1): 53 – 66.
- [30] WANG Guoquan, GREUTER A, PETERSEN C M, et al. Houston GNSS network for subsidence and faulting monitoring: data analysis methods and products[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2022, 148(4): 04022008.

编辑: 王支农