

# 基于水文地质勘察的沧州地面沉降监测方法与成因探析

杨宝安

(石家庄七零二地质勘查有限公司, 河北 石家庄 050000)

**摘要** 本文基于区域水文地质勘察成果与地面沉降长期监测数据, 对地面沉降的空间分布特征、累积演化规律及其成因机制进行了系统分析。在识别现有监测与风险判定中存在问题的基础上, 结合地下水开采条件与工程建设需求, 提出了以监测优化、水资源调控和工程适应性控制为核心的地面沉降控制措施, 以期为平原型开发区地面沉降风险管理提供技术参考。

**关键词** 水文地质; 地面沉降; 勘察措施; 监测技术

**中图分类号**: P64; TU47

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.039

## 0 引言

地面沉降作为华北平原地区最具代表性的缓变型地质灾害之一, 其发生发展过程具有隐蔽性强、累积性显著、恢复难度大的特点, 长期以来对区域土地利用安全、城市基础设施稳定性以及重大工程建设形成潜在约束<sup>[1]</sup>。在资源型地区, 长期采矿、排水疏干及地表工程建设等因素不断扰动原有水文地质条件, 导致含水介质应力状态与孔隙结构发生改变, 进而诱发不同程度的地面沉降现象。随着矿业开发方式由地下开采向露天开采转变, 地表剥离规模扩大、排水方式集中化, 使地下水位波动幅度加大, 地表一地下水耦合关系更加复杂, 沉降的形成机理呈现出多因素叠加、时空差异显著的特点。传统地面沉降研究多侧重形变结果描述, 往往忽视水文地质条件在沉降演化中的主控作用, 难以准确解释沉降分布差异及其发展趋势。

## 1 项目概述

### 1.1 项目背景

沧州高新技术产业开发区位于沧州市区西北部, 规划范围东至迎宾大道一带, 西至京台高速西侧, 南至永济路与广顺路, 北至朔黄铁路北侧, 规划面积约 25.99 平方千米。评估区域位于河北平原东部冲积平原亚区范围之内, 其地貌单元主要囊括了微高地、泛滥坡平地以及泛滥洼地等类型。整体地势呈现出平坦开阔的状态, 地面高程一般处于 6.7 ~ 7.8 米之间, 第四系沉积的厚度达到了 450 ~ 490 米。沉积物主要是

以粉质黏土、粉砂以及细砂互层的形式存在, 有典型的多层含水结构方面的特征。

### 1.2 区域水文地质分析

地下水的类型属于第四系松散岩类孔隙水, 它可划分成浅层和深层这两个主要系统, 浅层地下水的埋藏深度大概在 2 ~ 4 米之间, 其补给条件相对而言比较好, 深层地下水的埋藏深度大约是 60 ~ 73 米, 它是区域工业以及市政供水的关键水源。由于受到长期超量开采的影响, 深层地下水的水位持续下降, 区域的水文地质条件总体呈现出补给不足、调节能力较弱的状况, 对地面沉降的敏感性比较高。在上述地质背景条件下, 评估区地下水系统呈现出典型的第四系松散层多含水组结构特征, 不同含水层之间既存在一定的水力联系, 又在隔水层作用下保持相对独立的水动力响应特性。浅层孔隙水主要受大气降水、地表径流及人工回灌影响, 水位变化具有明显的季节性与短周期波动特征, 而深层承压含水层则以区域侧向补给为主, 对开采强度变化极为敏感。

## 2 勘察方法

### 2.1 监测方法与技术路线

评估区地面沉降监测主要依靠区域地面沉降监测网络, 运用水准测量作为主要手段, 并结合历史监测资料来开展时序对比分析, 通过构建稳定的基准点体系, 对沉降量以及沉降速率进行长期跟踪, 较为准确地呈现地面沉降的空间分布格局及其变化趋势。

**作者简介**: 杨宝安 (1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水文地质。

## 2.2 累计沉降量分布特征

依据2015年沧州市地面沉降监测所取得的成果,在评估区域当中,累计地面沉降量整体处于900~1 800毫米的范围之内。不过在局部的一些区域,沉降量超过了1 800毫米,观察累计沉降量等值线的分布状况,可以发现沉降中心呈现出从城区朝着外围逐渐变弱的态势,评估区域处于沉降漏斗的影响范围之内,属于沉降相对比较突出的区域。这样的分布特点和区域深层地下水集中开采的区域高度契合,体现出较大的人为控制特点。

## 2.3 沉降速率变化特征

2015年,评估区域的年均地面沉降速率大概是5~12毫米每年,整体而言处于中低速沉降的区域范围之内。然而,在局部区域,沉降速率相对来说是偏高的,把沉降速率分区图结合起来进行观察可发现,沉降速率在空间方面的变化相对比较平缓,并没有出现极端突变的区域,这种情况说明地面沉降主要是以持续性压密沉降为主,并非是由工程扰动所引发的局部沉降。

## 3 沧州地面沉降监测的问题及成因

### 3.1 监测结果显示沉降长期累积显著,但短期速率对风险识别的指示性不足

从当前已有的监测成果情况分析,沧州市地面沉降呈现出典型的“低速率、强累积”特性,根据《沧州市地面沉降监测网络运行与监测报告》可知,在评估区域内。1970年至2015年期间累计沉降量已经达到了900~1 800毫米,然而在2015年时年均沉降速率仅仅只有5~12毫米每年。从速率指标方面进行观察,其数值处于《地质灾害危险性评估规范》中所规定的“弱—中等发育”区间范围,但是累计沉降量却已然明显超过了强发育判定阈值<sup>[2]</sup>。这就说明仅仅依靠短期沉降速率是很难全面地反映出地面沉降的真实风险水平的。具体实施阶段,运用公式 $H=H_0+V\times Y$ 来对沉降量展开外推推算,到2021年底的时候评估区域累计沉降量预计达到960~1 830毫米,沉降效应呈现出持续放大的态势。由此可看出,当前的监测体系在风险表达方面更容易弱化长期累积效应,对于规划区中远期工程安全的指示能力存在着一定程度的不足,地面沉降发育程度分级与评估区判定结果对比如表1所示。

评估区域在过去5年期间,平均地面沉降速率处于5~12毫米每年的范围。仅从速率指标方面来判断,该数值处于弱发育和中等发育的区间之内,尚未达到强发育所对应的速率阈值标准。然而按照公式推算到2021年年底时,评估区域累计的地面沉降量已经达到了

960~1 830毫米,较大超过了《地质灾害危险性评估规范》中强发育等级所规定的800毫米累计沉降量控制数值<sup>[3]</sup>。这一结果显示出,评估区域地面沉降有典型的“低速率、强累积”特性,其发育程度不可仅仅依据短期的沉降速率来进行判定,而应当以长期的累计变形效应作为主要的控制指标,综合速率以及累计沉降量这两项指标来进行判定,评估区域地面沉降的发育程度应当确定为强发育。

表1 地面沉降发育程度分级与评估区判定结果对比

发育特征	发育程度	近5年平均沉降速率 (mm/a)	累计沉降量 (mm)
分级标准	强发育	$\geq 30$	$\geq 800$
分级标准	中等发育	10~30	300~800
分级标准	弱发育	$\leq 10$	$\leq 300$
评估区现状	—	5~12	960~1830
判定结果	强发育	—	—

### 3.2 沉降空间分布与地下水开采区高度重合,反映人为扰动的主导作用

依据2015年累计沉降量分布图以及沉降速率分区图可发现,沧州市地面沉降中心呈现出较为突出的空间集聚特性。评估区处于区域沉降漏斗的影响范围之内,累计沉降量一般处在900~1 800毫米的区间,局部地区接近甚至超过1 800毫米。沉降等值线整体呈现出椭圆状分布状态,其形态和深层地下水集中开采区高度契合,而与地貌起伏或者构造分区的相关性相对来说比较弱。这样的特征说明,评估区地面沉降并非由单一的自然压密过程所主导,而是在区域尺度上受到人为抽取地下水活动的控制<sup>[4]</sup>。尽管评估区在2015年沉降速率仅仅是5~12毫米每年,还没有表现为高速沉降区,不过在长期深层地下水水位下降的背景之下,体现出沉降中心位置稳定、沉降量持续积累的现状。

### 3.3 水文地质结构条件与地下水超采耦合,是沉降持续发育的根本成因

对水文地质条件展开分析可知,评估区第四系沉积厚度处于450~490米之间,含水层与黏性土层呈现出多层交互分布的状况。深层地下水的埋深达到了60~73米,整体的水文地质条件欠佳,在长期超量开采深层地下水这一行为的作用之下,地下水水位持续下降,使得原本由孔隙水承担的上覆荷载逐渐转移至土骨架,岩土体的有效应力有所增加。就砂层来说,补给恢复后其体积有一定的可逆性,而对于广泛分布的黏性土

层来讲,其孔隙压缩过程有着十分突出的不可逆特性,释水固结一旦发生便很难恢复,最终形成永久性的地面沉降。正是在这种“多层含水系统—黏性土压密—长期抽采”的耦合作用当中,即便沉降速率在某些阶段不高,评估区的地面沉降依然呈现出持续发育且难以自然消减的特征。

## 4 地面沉降控制措施

### 4.1 基于水文地质模型构建沉降评价体系

在地面沉降防控工作中,仅依赖沉降监测数据进行结果性判断,往往难以及时识别潜在风险源头,而以水文地质模型为核心构建沉降评价体系,则能够从机理层面提升评价的前瞻性与科学性。针对评估区第四系松散岩类孔隙水多层赋存、深浅含水层水力联系复杂的特点,应在系统水文地质勘查基础上,构建反映含水层结构、补给—径流—排泄条件及开采扰动特征的水文地质概念模型,并进一步引入地下水位动态、含水层压缩性参数等要素,形成服务于沉降分析的量化模型框架。在评价指标体系构建中,应以模型输出的水位变化幅度、垂向水力梯度演化及含水层压缩响应作为基础约束,将地面沉降监测成果嵌入模型进行综合判读。另外,在数据分析阶段,应把累计沉降量作为主控指标,与年均沉降速率一同纳入评估体系,重点关注累计沉降量接近或超过 800 毫米、1 000 毫米等关键阈值的区域。结合已有推算结果,评估区至 2021 年底累计沉降量已达 960 ~ 1 830 毫米,这类区域应优先列为重点管控单元,防止因沉降速率阶段性偏低而低估长期工程风险。

### 4.2 以地下水开采强度控制为核心的水资源结构优化措施

监测资料以及沉降分布特征显示,评估区地面沉降的空间格局和深层地下水集中开采区极为相符,控制沉降发展的关键之处在于降低深层地下水系统持续的应力释放。在实施路径方面,要结合开发区产业结构以及用水需求,对现有的用水结构展开系统调整,逐渐减少对第四系深层地下水的依赖。展开来说,可以依靠引入地表水、再生水以及区域调配水源,替代部分工业和市政深层地下水取水量,同时对现有的取水井实施分区、分层、分时管理,防止在局部区域形成新的水位漏斗,并且要结合地下水水位动态监测成果,建立地下水开采量与地面沉降响应的联动机制,当监测到水位持续下降或者沉降速率出现异常变化时,及时启动限采或者减采措施,从源头削弱黏性土层不可逆压密的持续发展态势。

### 4.3 提升建设工程对不均匀沉降的适应与防控能力

鉴于地面沉降在短期内无法彻底消除这一现实状况,工程适应性控制成为降低沉降危害的关键补充方式,评估区的规划用地类型主要为工业、居住以及市政设施。在建设过程中需充分考量区域沉降背景,于场地处理与结构设计阶段预先留出沉降适应空间,具体的操作办法如下:在场地平整阶段适度抬高建设标高或者预留沉降余量,以此减少长期沉降对室外高程以及排水系统的影响;在结构设计方面,借助提升基础刚度、采用整体性较强的基础形式以及强化上部结构整体性,提高建筑物抵御不均匀沉降的能力;对于关键的市政管线和道路工程,应采用柔性连接或者可调节结构形式,降低沉降差异对使用功能的影响<sup>[5]</sup>。

## 5 结束语

在城镇化与产业集聚持续推进的背景下,地面沉降已不再是单纯的地质现象,而是水资源利用方式、工程建设模式与区域地质条件共同作用的综合结果。通过对沧州高新技术产业开发区地面沉降问题的系统分析可以看出,平原区沉降风险的本质并不体现在短期变形幅度上,而更多表现为长期累积效应与工程适应能力之间的结构性矛盾。基于水文地质条件开展沉降监测与成因分析,有助于突破传统以速率为主的风险认知框架,使地面沉降问题在规划、建设与运行阶段得到前移式管控。将监测数据、地下水调控与工程技术手段协同纳入管理体系,不仅是降低沉降危害的现实路径,也为开发区实现安全开发与可持续利用提供了地质环境层面的支撑。

## 参考文献:

- [1] 田苗壮,赵龙,崔文君,等.南水北调背景下地下水位上升对地面沉降控制与影响:以北京潮白河地下水系统为例[J].中国地质,2023,50(03):872-886.
- [2] 邵景力,白国营,刘翠珠,等.我国地下水管理面临的问题与对策:兼谈地下水“双控”管理[J].水文地质工程地质,2023,50(05):1-9.
- [3] 韩晔,郑玉萍,胡海博,等.多孔非稳定流承压含水层抽水试验典型案例探讨[J].南水北调与水利科技(中英文),2024,22(S01):175-180.
- [4] 蔡德世,郭文涛.新形势下水文地质因素对于地质灾害的影响研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(02):180-183.
- [5] 詹景祥,谢荣安,陈建东,等.高精度地面沉降协同监测方法[J].中国科技成果,2021(15):20.