

doi: 10.12097/gbc.2023.10.008

北京王四营地区地面沉降演化规律及潜力预测模型评价

刘贺, 罗勇, 雷坤超, 田芳, 周丽苹, 王新惠, 田苗壮
LIU He, LUO Yong, LEI Kunchao, TIAN Fang, ZHOU Liping,
WANG Xinhui, TIAN Miaozhuang

北京市地质环境监测所, 北京 100195
Geological Environment Monitoring Institute of Beijing, Beijing 100195, China

摘要:【研究目的】为研究地面沉降演化规律及其沉降潜力,以北京王四营地区为例,结合多源精细化监测数据“由点到面”对该地区地面沉降特征进行分析和对比研究。【研究方法】引入成长曲线沉降模型,通过 MATLAB 构建了多源数据融合的地面沉降潜力评价模型。“点”上以王四营地面沉降站为依托,对分层沉降情况进行机理分析和预测;“面”上以区域水准测量和区域地下水位动态监测数据为依托,对区域沉降演化特征沉降潜力进行评价。【研究结果】①地面沉降主要发生在粘性土层,地面沉降发育情况与粘性土含量成正比,王四营地区浅部地层中沉降量和沉降比例越来越小,而深部地层随着时间沉降量和沉降比例越来越大;丰水期地面沉降速率减缓,枯水期地面沉降速率明显增大;地面沉降和地下水位数据拟合后发现二者具有一定的相关性,随着水位降幅的增大,相关性也随之增大,二者呈正相关。②基岩标-分层标静力水准测量系统与人工水准测量系统对同一监测点数据互校后的误差值非常接近,符合正态分布规律。③预测未来地面沉降,垂向上随着时间的增长,各地层地面沉降开始逐渐衰减,但地层整体残余沉降量仍有 100 mm 左右的发展空间,中深部地层是未来地面沉降发生的主要优势层位,沉降潜力较大;横向上,未来地面沉降趋势与现阶段一致,但速率整体呈减缓趋势。【结论】王四营地区深部地层是主要的沉降“优势”层位,地面沉降所表现出的季节性变形特征与地下水位动态变化趋势有较高相关性,未来该地区沉降将持续减缓。

关键词: 数据融合;地面沉降;演化规律;潜力预测;北京

创新点: 根据北京王四营地区基岩标-分层标与水准测量长序列监测数据,揭示该地区地面沉降特征,建立多源数据融合的地面沉降潜力评价模型,开展分层垂向和区域沉降潜力预测。

中图分类号: P642.26 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)02/03-0364-13

Liu H, Luo Y, Lei K C, Tian F, Zhou L P, Wang X H, Tian M Z. Evaluation of land subsidence evolution law and potential prediction model in Wangsiying area of Beijing. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(2/3): 364-376

Abstract: 【Objective】 In order to research the evolution law of land subsidence and its subsidence potential, take the Wangsiying area in Beijing as an example, the characteristics of land subsidence in Wangsiying area "from point to surface" are analyzed and compared with multi-source fine monitoring data. 【Methods】 The growth curve land subsidence model is introduced, and the land subsidence potential evaluation model based on multi-source data fusion is constructed by MATLAB. Based on Wangsiying ground land subsidence station, the mechanism analysis and prediction of layered land subsidence are carried out on "point"; Based on the regional leveling and dynamic monitoring data of regional groundwater level, the regional land subsidence evolution characteristics and land

收稿日期: 2023-10-27; 修订日期: 2024-03-06

资助项目: 北京市科技计划项目《地面沉降和回弹灾害精准识别预警关键技术与示范应用》(编号: Z231100003823006)、北京市科技计划课题《北京新航城地区地面沉降监控预警关键技术与应用示范》(编号: Z191100001419007)、国家重点研发计划课题《城市群典型沉降区地面沉降发育演变特征及成因机制分析》(编号: 2017YFB0503803)、北京市自然科学基金资助项目《京津高铁差异性沉降区段桩-土变形耦合机制研究》(编号: 8212042)

作者简介: 刘贺(1989-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地面沉降研究。E-mail: liurher@163.com

subsidence potential are evaluated. **[Results]** (1) The land subsidence mainly occurs in the cohesive soil layer, and the development of land subsidence is directly proportional to the content of cohesive soil. The land subsidence amount and the land subsidence ratio of the shallow strata in Wangsiying area are getting smaller and smaller, while the land subsidence amount and the land subsidence ratio of the deep strata are getting larger and larger with time; The land subsidence rate slows down in the wet season and increases significantly in the dry season; After fitting the data of land subsidence and groundwater level, it is found that there is a certain correlation between them. The correlation increases with the increase of water level decline, and the correlation is positive; The development of land subsidence in Wangsiying area is relatively high, and the differential subsidence in the whole area is also very obvious. (2) The error values of the static leveling system of bedrock level and layered level and the manual leveling system for the data of the same monitoring point are very close to each other and conform to the normal distribution law. (3) It is predicted that the future land subsidence will be vertical. With the increase of time, the land subsidence of each layer will gradually decline, but the overall residual subsidence of the stratum still has a development space of about 100 mm. The middle and deep strata are the main "dominant strata" for the future land subsidence, and the land subsidence potential is large; Horizontally, the trend of land subsidence in the future is consistent with that in the current stage, but the overall rate is slowing down. **[Conclusions]** The deep strata in Wangsiying area are the main subsidence "advantageous" layers, and the seasonal deformation characteristics of land subsidence are highly correlated with the dynamic changes in groundwater level. In the future, the land subsidence in this area will continue to slow down.

Key words: data fusion; land subsidence; evolution law; potential prediction; Beijing

Highlights: Based on the long-term monitoring data of the bedrock-layered marker and leveling measurement in Wangsiying area of Beijing, the characteristics of land subsidence in the area are revealed, and a multi-source data fusion land subsidence potential evaluation model is established to carry out vertical and regional subsidence potential prediction in layers.

地面沉降指由于自然因素或者人类工程活动引发的地下松散岩层固结压缩,并导致一定区域范围内地面高程降低的地质现象,属于一种缓变性地质灾害(北京市水文地质工程地质大队,2018)。总体来说,地面沉降的成因以人为因素为主,自然因素次之。人为因素包括过量开采地下水、工程建设等,自然因素包括气候、地层岩性、地质构造、土的次固结沉降等。多年监测成果表明,过量开采地下水是北京市地面沉降的主要诱因,地层岩性及结构特征是产生地面沉降的重要地质背景(于海若等,2020;郭海朋等,2021)。近年来,随着首都城市规模的不断扩大,地面沉降对城市建设与市政规划的影响日趋凸显,一方面,结合历史沉降速率和累计沉降量,可以对地面沉降的演化规律(现状)进行评价;另一方面,未来发展趋势包含影响其变化的各种确定性因素和随机因素的信息,因此,精准预测符合实际情况的地面沉降并研究其沉降机理是准确评价地面沉降的关键,也是目前地面沉降研究的热点。

地面沉降的“优势”层位随着地下水开采层位的变化而变化,二者具有一定的相关性,各地层之间的差异沉降也有较大差异。为精准防控地面沉降,应对各地层沉降情况和地下水开采情况进行精细化判别,针对不同层位沉降特征开展研究。在沉降机理

研究方面,国内外学者从含水层和粘性土层越流机制入手,探讨了相邻含水层和含水层与粘性土层出现水头差时的越流补给和释水固结问题(罗跃等,2015;李兆峰等,2017),认为因水头差出现的越流导致孔隙水压力降低、有效应力增大是分层差异性沉降的主要原因。朱伟武(1991)研究了越流多层含水层系统水力性质的确定方法,并拓广用于研究弱透水性释水和越流的发展态势及含水层系统的压密-沉降特征。武强(2006)通过研究隔水层与含水层之间的孔隙水越流机制,提出了不同地层之间土体形变定量计算方法。孙健(1992)对粘性土释水及越流机制提出了新的见解,并对计算公式中粘性土层的渗透系数、孔隙水压力及含水层之间的水位差等参数进行了分析,认为应作适当修正后才能建立正确的水动力学数学模型。

为了精确评价和预测地面沉降的发生及发展过程,国内外学者针对地面沉降预测方法做了大量研究。目前的沉降预测可分为两大类:一类是数值计算方法,基于确定性的水土模型构建,按水流模型和土体变形模型的耦合形式,又可分为两步计算模型、部分耦合模型、完全耦合模型,如有限单元法、差分法、采用 Biot 固结理论进行数值分析的方法(Karim, 2000)。数值计算方法能够反映抽水引起的

地面沉降成因机理,但数值方法参数难以确定,并且通过经验判别的参数又与现实情况存在较大差距。另一类是基于大量实测数据建立拟合的数学模型,通过大量实测数据反映的数据特点确定合适的数学模型对趋势进行预测,该方法直观、明了,在实际工作中有一定的借鉴意义。该预测模型主要有 2 类:一是预测全过程的数学模型,如成长曲线模型(Gompertz, 1825)、Weibull 模型(王伟和卢廷浩, 2007)等,成长曲线一般有逻辑斯蒂(Logistic curve)曲线方程(朱志铎和周礼红, 2009)和龚帕斯(Gompertz curve)曲线方程(余闯和刘松玉, 2005),此类模型符合事物的生长变化规律,假定沉降具有事物变化发展的一般阶段规律,适用于事物的各种变化发展(梅国雄等, 2004);二是预测工后沉降的数学模型,以对数模型、双曲线模型为代表(杨涛和殷宗泽, 1998; 杨涛等, 2004)。该类模型未能准确反映沉降全过程,因此在实际应用中有一定的局限性。总体来说,在拥有大量实测数据样本的基础上,数学模型较数值计算操作更简便,不需要确定和识别水土耦合模型参数、边界等因素,采用数学模型预测地面沉降有着明显的优势,预测结果更具科学性和合理性。

北京市地面沉降发生已久,历史监测研究工作积累较多,目前已建成包括地面沉降监测站网、水准测量网、GPS 测量网、InSAR 监测网和区域地下水位动态监测网的地面沉降立体化监测网络。经过近 20 年的连续监测,拥有大量的实测样本数据。其中地面沉降监测站网能够实时获取各主要沉降区地面沉降分层监测数据,快速准确地掌握沉降发展变化情况,为查明地面沉降主要贡献层位,开展成因机理研究奠定了基础;水准测量网是北京市地面沉降监测中最重要的区域性监测手段之一,由于其监测精度较高,在北京市地面沉降监测中发挥着重要作用。北京王四营地区自 2004 年监测以来获取了大量的实测数据,以往文献对该地区的沉降历史及现状研究较多,但对未来沉降趋势预测不足,大部分研究局限于该区域水位变化趋势与沉降量定性关系上,缺少定量预测该区域分层沉降的研究。本文“由点到面”对北京市地面沉降演化规律及潜力预测进行研究,“点”上以朝阳区王四营地面沉降站为依托,对分层沉降情况进行机理分析和预测,“面”上以区域水准测量和区域地下水位动态监测数据为依托,

对区域沉降潜力进行评价,有助于更精细化地评估防控效果和更精准化地防控地面沉降。

1 王四营地区地面沉降监测网

王四营地区位于北京市朝阳区温榆河以西,温榆河冲洪积扇规模相对较小,全新世以来受构造运动的影响,永定河由北向南迁移,与永定河冲积扇互相叠置,属于永定河冲积扇,第四系地下水系统属于永定河地下水系统,划分为 4 个含水层组。地势为西北高、东南低,属于华北凹陷盆地,区内主要发育南苑-通县断裂,该断裂是北京迭断陷与大兴迭隆起的分界线,岩性一般为粘性土、细砂及砂砾石层,夹沼泽相泥炭层或有机质淤泥层。王四营地区基岩埋设深度约为 200 m。

北京地面沉降监测系统的五大监测网在北京王四营及附近地区均有分布。在王四营乡座落着王四营地面沉降监测站,王四营站始建于 2004 年,该监测站内建设有多类沉降监测设施(图 1),其中布设基岩标 1 座(标底埋深 198.92 m),分层标 7 座(标底埋深 2.00 m、15.00 m、24.00 m、48.00 m、66.00 m、94.00 m、147.60 m),地下水位动态观测孔 5 眼(滤水管位置:9.20~14.70 m、24.80~46.30 m、64.90~94.00 m、124.10~146.70 m、159.70~182.80 m),孔隙水压力观测孔 3 眼(共监测 3 个层位:21.00 m、56.00 m、106.00 m)。站内建设有 GPS 连续站 1 个和 InSAR 角反射器 1 个。监测站自 2004 年投入运行以来,每天开展自动化监测,各监测设施运行正常,连续稳定地提供了大量监测数据,为地面沉降研究提供了宝贵资料。北京王四营及附近地区还布设有大量水准测量点及临时测量点,这些水准点,每年均开展一次一等水准联测,获取精确的高程变化值。区内也布设有多个 GPS 与水准一体点,每年与其他 GPS 点开展一次 A 级 GPS 网联测工作,获取地表三维形变信息。同时,区内建设有大量地下水分层动态监测井,为查明王四营地区地面沉降与地下水开采之间的响应关系提供重要数据基础(图 2)。

2 精细化监测融合的地面沉降演化规律

2.1 基岩标-分层标分层演化特征

目前实现地面沉降分层动态监测的主要技术手段是基岩标和分层标。通过选择具有代表性地质背景的地区建设基岩标-分层标、地下水位分层监

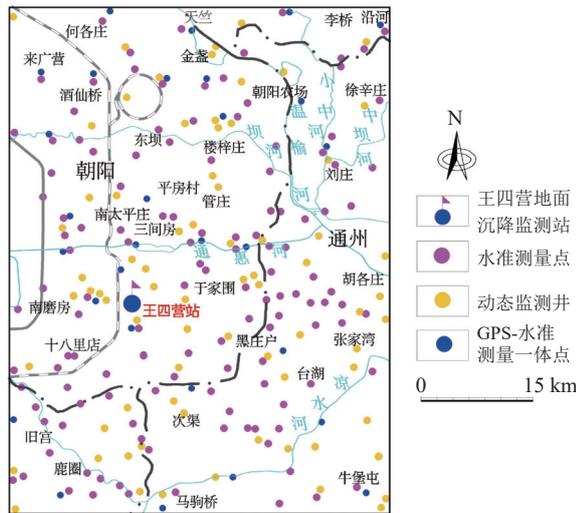


图2 王四营监测站及附近地区地面沉降监测网

Fig. 2 Land subsidence monitoring network of Wangsiying Monitoring Station and its surrounding areas

Ⅲ压缩层组中粉土和粘性土层总厚度超过 53 m, 达到该压缩层组地层总厚度的 56%。

2.1.2 地面沉降与水位季节性变化特征

根据历年沉降情况统计分析(图6), 2006—2021年王四营年度沉降量最小为 4.34 mm, 最大为 67.375 mm。根据季度沉降统计, 第二季度沉降量占全年总沉降量最小比例为 23.03%, 最大比例达 90.58%, 第二、三季度沉降量之和占比最小为 60.14%, 最大为 98.58%, 由此可知沉降主要发生在第二、三季度。根据地下水位(头)季节性分层监测曲线可知, 水位(头)在年初时最高, 此时季节性地面沉降量

最小, 随后地下水位(头)开始逐步下降, 季节性地面沉降也逐渐增大, 在枯水期(第二季度末)水位(头)逐渐降至全年最低点, 由于水位(头)的逐渐下降, 地面沉降也逐渐开始达到全年的最大值, 受丰水期(第三季度)影响, 水位(头)开始逐步回升到全年最高点, 地面沉降量也开始由最大值逐渐减小。根据以上分析可知, 在一个水文年内, 地面沉降表现出的季节性形变特征与地下水位动态变化趋势相关性较高。

D1-5 和 D1-4 埋深较浅(分别为 9.20~14.70 m 和 24.80~46.30 m), 水位变化主要受大气降水和人为活动影响, 丰水期和枯水期的补给和排泄相对较快, 而且基本不受人均为开采影响, 因此水位基本保持稳定, 多年水位标高保持在 20 m 和 14 m 上下; D1-3 (64.90~94.00 m)在 2006 年的初始水位标高为 2.0 m, 此后开始持续下降, 一直到 2016 年水位开始出现上升趋势, 2021 年底水位达到 2.37 m; D1-2(124.10~146.70 m)和 D1-1(159.70~182.80 m)的水位变化趋势基本一致, 常年呈下降趋势, 从 2016 年开始, 各含水层特别是中深层承压水开始出现水位回升的现象, 各季度沉降量也呈减小趋势。

2.2 地下水动态变化特征

2.2.1 分层含水系统越流补给机制

地面沉降的发生主要是由于过量开采深层承压水造成的, 过量开采承压水导致地下水位降低, 孔隙水压力减小, 有效应力增大, 可压缩地层在有效应力持续增大的作用下被压缩, 地表产生地面沉降。因此, 水动力条件和地层条件对地面沉降有着最直接

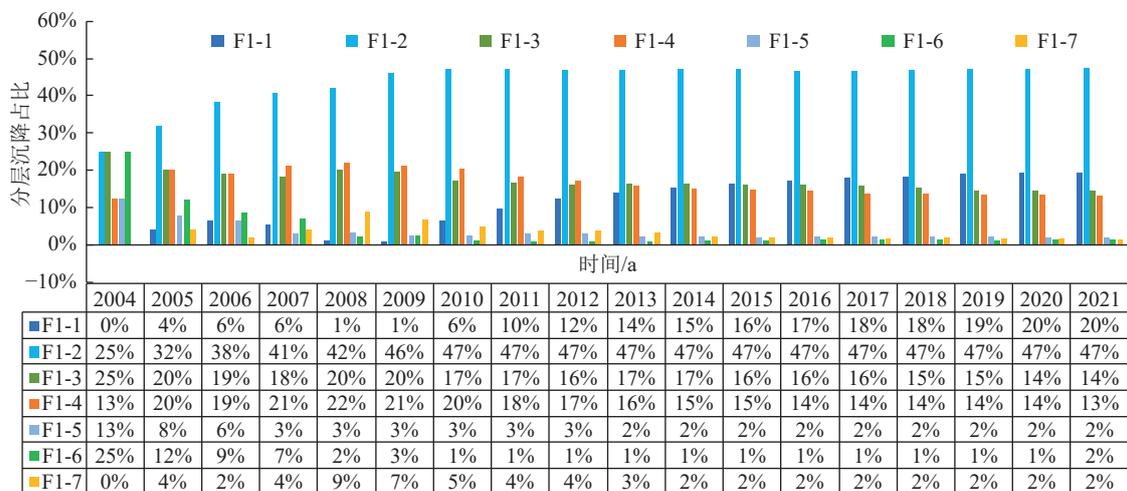


图3 王四营站 2004—2021 年各地层累计沉降贡献量对比图

Fig. 3 Comparison diagram of cumulative land subsidence contribution of various layers at Wangsiying Station from 2004 to 2021

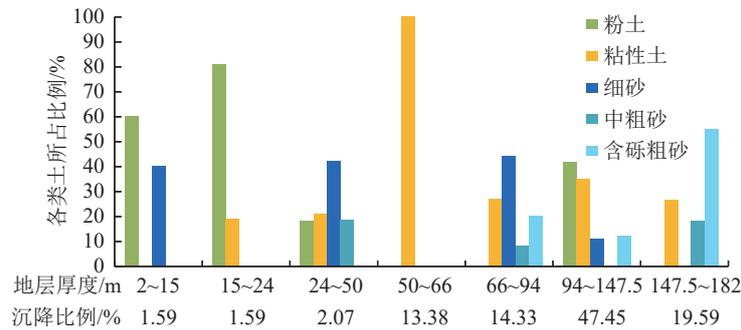


图 4 各地层岩性分布及沉降占比

Fig. 4 Lithology distribution and land subsidence ratio of each layer

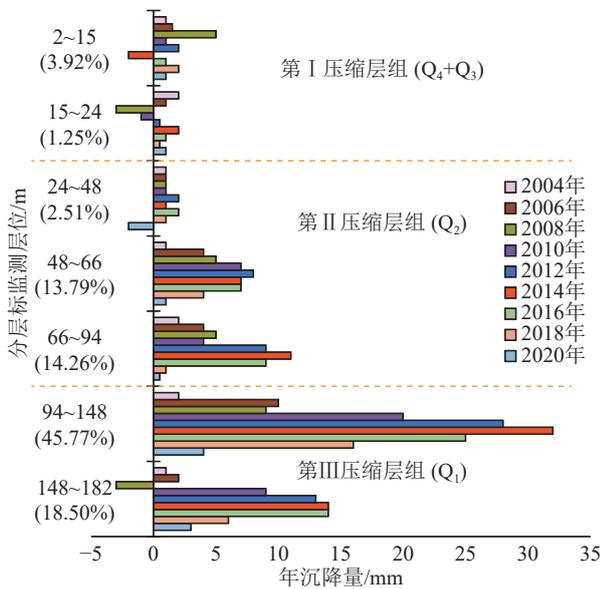


图 5 王四营站 2004—2020 年各地层年度沉降贡献量对比图

Fig. 5 Comparison chart of annual land subsidence contribution of various layers at Wangsiying Station from 2004 to 2020

的影响(刘贺等, 2022)。然后,从站内长序列地下水动态监测和孔隙水压力监测数据系统分析各层之间的水力动态联系,厘清站内地层之间含水系统越流补给机制,研究分层地面沉降与地下水耦合的响应机制。

孔隙水压力指地下水作用于微粒或孔隙之间的压力。孔隙水渗压计主要埋设于粘性土地层中,单位以 kPa 计量,地下水监测计主要埋设于含水砂层中,单位以 m 计量。将孔隙水压力转换为水位标高后可对砂层和粘性土层之间的水位进行对比分析(图 7)。其中,孔隙水压力转换为地下水位埋深按下式换算:

$$h = H - \mu / r_w \quad (1)$$

式中: h 为地下水位深度 (m); H 为孔隙水压力测点埋设深度 (m); r_w 为水的重度 (kN / m); μ 为孔隙水压力测定值 (kPa)。

从各层含水系统水位标高值整体看,地下水水位动态以降水入渗-开采型为主,通过不同压缩层组的动态曲线可以发现,埋深于 9.20~14.70 m 和 24.80~46.30 m 潜水位的 D1-5 和 D1-4 由于受大气降水补给容易,人为开采影响较小,水位相对稳定,变化较小,常年基本保持在同一水位。同时,埋深于 20.00 m 处的 k1-2p 孔隙水压力监测值换算为标高后,与潜水位表现出同样的特征,常年水位相对稳定。k1-2p 较 D1-5 埋深深 5 m,但二者标高相差仅 0.5 m 左右,可以推断含水层向粘性土层发生越流,即水流从底板埋深 14.8 m 的中细砂层向底板埋深 22.10 m 的粉质粘土层越流。k1-2p 水位标高较 D1-4 平均高 5 m 左右,近年标高值有持续增大的趋势,说明粘性土层压缩释水向含水层发生越流,即水流从底板埋深 24.7 m 的粘土层向底板埋深 30 m 的细砂层越流。对比其他层位水位标高,地下水即从水位高值向水位低值越流。埋深于 105.00 m 处的 k1-1p 在 2014 年之前水位标高持续下降,一直接受上部 D1-3 含水层的补给,该层位粘性土层较厚,水资源量亏大于盈,地面沉降持续增加。2014 年之后开始出现上升,水位标高值高于其上部的 D1-3 含水层,可以推断二者之间的越流补给出现了方向性的差异变化,即水流从含水层向粘土层补给开始转变为由粘土层向上部的含水层越流补给,水资源量盈大于亏,该层位沉降趋势也随之减缓。

与此同时,由图 7 可以看出,承压水水头(D1-3、D1-2 和 D1-1)多年呈现下降趋势,水资源补给盈小于亏,但各承压含水层变化趋势一致,中、深层承压

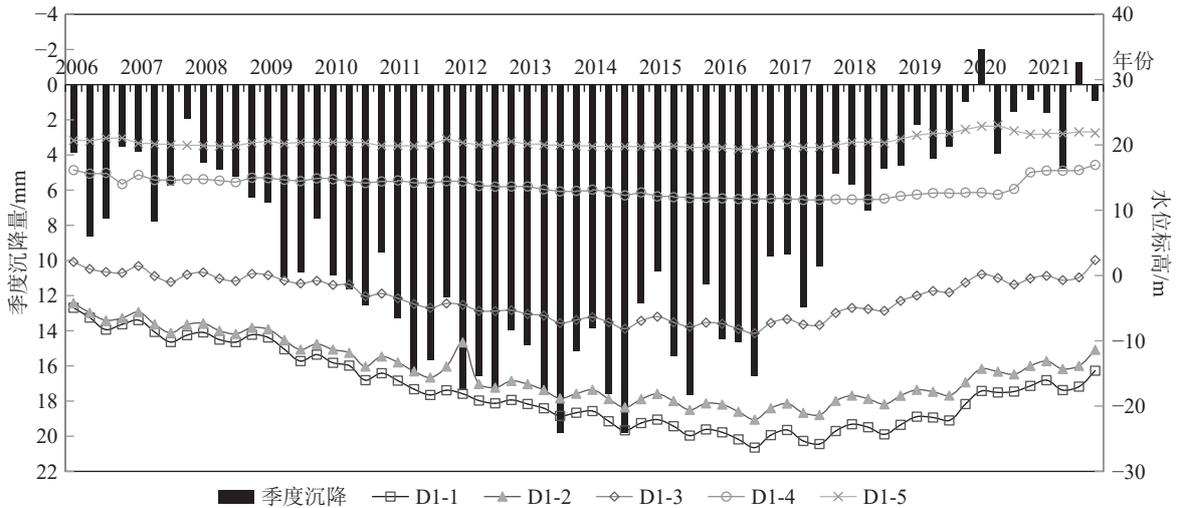


图6 2006—2021年王四营站季节性形变与不同含水层之间关系

Fig. 6 Relationship between seasonal deformation and different aquifers of Wangsiying station from 2006 to 2021

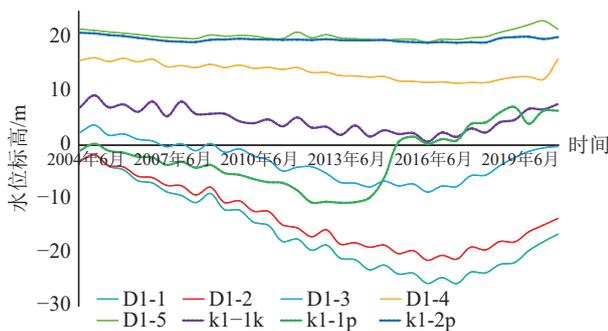


图7 2006—2021年王四营站分层地下水水位动态变化

Fig. 7 Dynamic variation of stratified groundwater level at Wangsiying Station from 2006 to 2021

水位是主要的开采层位,承压水开采后补给相对较慢,2018年之前开采量大于补给量,承压水头表现出持续下降趋势,D1-2和D1-1自监测以来至2018年,水头下降近20m左右,D1-3水头下降近5m左右,这从另一方面解释了该层位是地面沉降的优势层。2018年之后,受地下水补给增多、禁限采等措施因素的叠加,补给量大于开采量,各水头开始呈现出上升的趋势,且上升趋势明显。从而也导致了各层位近年沉降出现明显减缓的趋势。

2.2.2 水位沉降相关关系研究

地下水位随季节呈现出周期性的往复变化,与此同时,地层则在水位往复变化过程中处于加卸荷状态。为研究地下水动态与地面沉降相关关系,选取不同监测层位地下水水位与沉降数据进行分析(图8)。

首先采用地下水位-沉降量的回归方程拟合地面沉降与水位之间的关系,其关系式为:

$$S = \beta_1 H^2 + \beta_2 H + \varepsilon \quad (2)$$

式中: S 表示累积沉降, H 表示水位标高, β_1 、 β_2 、 ε 分别为回归方程系数。王四营监测站地面沉降和地下水位数据拟合后发现,二者具有一定的相关性,相关性随着水位降幅的增大而增大,二者成正相关。自2004年王四营站监测以来,64.90~94.00 m,124.10~146.70 m,159.70~182.80 m地层地下水位呈现逐年下降的趋势,且下降趋势随着含水层埋深的增大而增大,16年间3个地层水位下降幅度分别为13.263 m、21.762 m及26.193 m,由前文可知,在此期间地层一直处于压缩状态,地面沉降一直在发生,由二者相关关系计算得出,这3个地层中地面沉降与水位变幅的相关系数分别为0.8867、0.9373及0.947。由此可见,水位变幅越大,二者相关性越明显。

2.3 监测方法对比

目前地面沉降监测在“点”上以分层标监测为主,“面”上以区域水准测量为主(雷坤超等,2019)。从数据的精度和准确性来讲,2种监测方法各有优势与不足,所以在实际监测工作中,往往是2种方法相互校核。根据多年测量结果分析,测量结果及误差符合正态分布规律。通过分析基岩标-分层标测量系统与一等水准测量的误差值,进而判别其是否符合正态分布的规律。

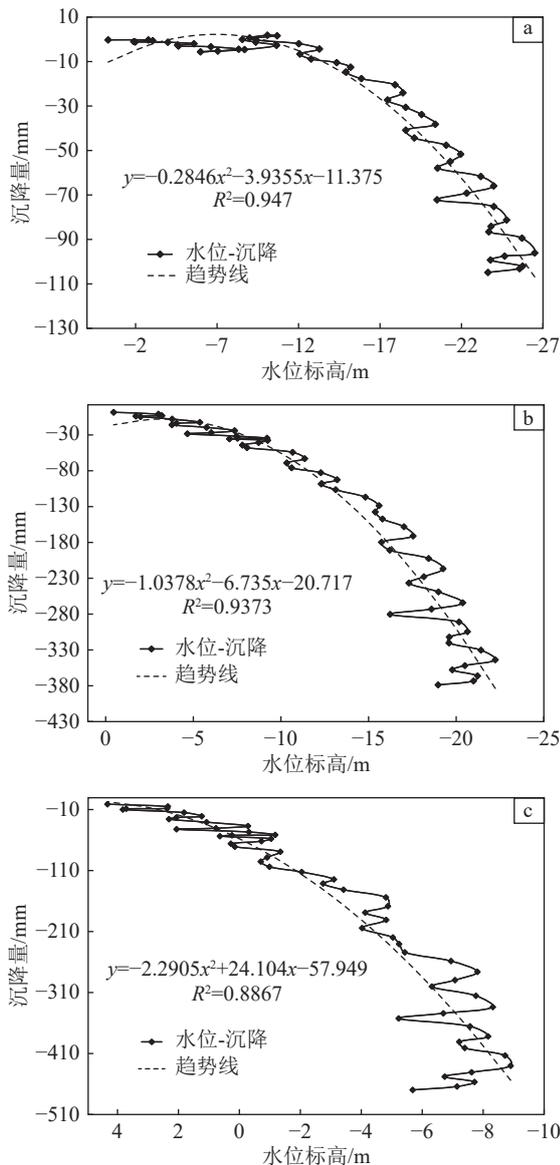


图 8 水位-沉降相关关系

Fig. 8 Correlation between water level and land subsidence

a—64.90~94.00 m 地层; b—124.10~146.70 m 地层;
c—159.70~182.80 m 地层

通过统计分析近 3 年同一监测时点的基岩标-分层标静力水准监测数据与一等水准监测数据的误差值,得到一组对比之后的误差数据(表 1)。利用该组数据,通过 MATLAB 制作 $p-p$ 图(图 9),斜线代表正态分布基准线,互差值越接近该斜线,说明误差越符合正态分布,测量结果越可靠。

从图 9 可以看出,各对比的误差值与服从正态分布的期望值,除个别数据外,基本上都位于参考斜线附近,符合正态分布的特点,可以认为基岩标-分层

表 1 不同监测方法与水准测量互校差值

Table 1 Differences after mutual calibration of different monitoring methods and leveling

监测方法对比	两种监测方法互校后的差值/mm					
基岩标-分层标与	-0.368	0.559	0.19	-0.13	-0.169	0.847
水准测量对比	5.868	3.681	-1.485	0.969	-1.082	0.407
	-1.909	-0.737	2.096	-0.424	-1.399	2.138
	-2.144	1.957	-0.886	-1.25	1.639	-0.112

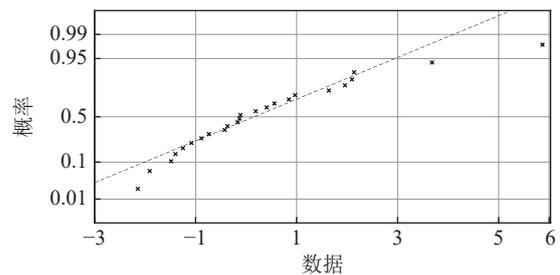


图 9 基岩标-分层标静力水准测量系统与水准测量系统的误差概率图

Fig. 9 Probability chart of the error between the static leveling system and the leveling system

标测量系统与水准测量系统对比的误差数据符合正态分布的规律,说明多源监测手段是科学准确的,为后续潜力预测评价提供了支撑。

3 地面沉降潜力预测模型应用评价

在王四营地区地面沉降优势层位、季节性变化特征等重要指标的基础上,本次建立与之适应的潜力预测模型,以现状为基础对该地区未来地面沉降趋势进行评价,能够更好地掌握该地区未来地面沉降规律。以点带面,基于现状预测未来,是实现地面沉降精准防控的基础。

不同的预测模型各有优势与不足。为了建立与之适用的潜力预测模型,需要综合分析数据样本特点。本文选用预测全过程的数学模型预测地面沉降潜力。

3.1 反“S”形状曲线的数学预测模型

为了建立与之适用的数学预测模型(图 10),需先对沉降-时间关系进行验证,有学者从一维固结角度证明线性加载下沉降-时间曲线呈“S”形(Das, 1983; 卢廷浩, 2002; 梅国雄等, 2004)。根据预测模型,可将地面沉降阶段划分为发生阶段、发展阶段、成熟阶段和达到极限 4 个状态阶段。

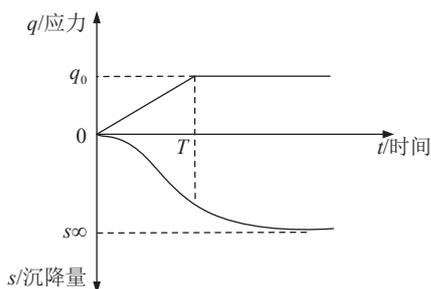


图 10 沉降-时间曲线

Fig. 10 The land subsidence-time curve

q —应力; s —沉降量; t —时间

预测全过程的数学模型有成长曲线模型、Weibull 模型等,具有较强的适用性;根据沉降-时间曲线变化特征,考虑选取成长曲线数学模型预测地面沉降更合理,预测全过程的成长曲线模型数学表达式如下:

$$S = \frac{A_1 - A_2}{1 + (t/t_0)^p} + A_2 \quad (3)$$

式中: S 为 t 时刻成长曲线沉降模型预测的沉降量; A_1 、 A_2 、 p 、 t_0 为待定参数(图 11),该曲线呈典型的反“S”形。该模型符合地面沉降发生—发展—快速发展—衰减—消亡的过程,由该曲线可知,该模型特征与实际沉降监测结果特征一致,说明该模型可以准确地对各地层沉降潜力进行评价,从而实现分层沉降潜力精准预测和分层沉降精准识别与防控。

图 12 是北京市王四营站分层标历年实测沉降曲线。由图 12 可知,实测沉降曲线与上述特征曲线完全吻合,说明成长曲线模型对于预测地面沉降潜力是适用的。同时,从实测曲线可以看出,该站地面沉降先后经历了发生—发展—快速发展—衰减—消亡的过程,目前地面沉降处于衰减阶段。

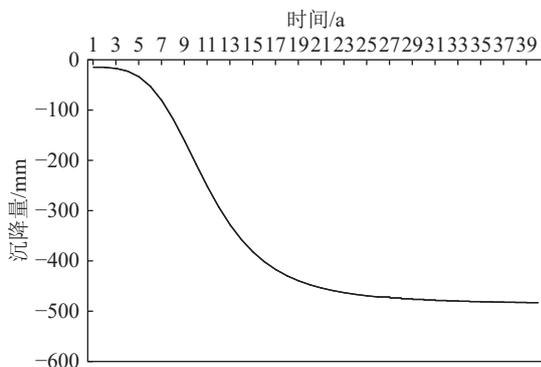


图 11 成长曲线模型特征曲线

Fig. 11 Growth curve model characteristic curve

3.2 分层监测结果拟合验证

依据各分层标历年实测数据,采用 Matlab 软件编写拟合模型代码,对全过程的成长曲线数学模型进行拟合求解,分别得到各监测层位拟合后的模型参数,建立适用各层位的成长曲线预测数学模型,拟合过程见图 13。各层位相关参数见表 2。由表 2 可知,7 个分层标的成长曲线预测数学模型相关系数达到 0.9969~0.9987,相关性极高,说明实测数据拟合后的成长曲线预测数学模型准确可靠。

3.3 分层沉降趋势预测

通过各地层的成长曲线数学模型对各地层沉降进行预测,得到各地层未来沉降的发展趋势(图 14)。随着时间的增长,各地层地面沉降开始逐渐衰减,20 年之后各地层基本不再显著沉降。各地层预测模型的参数见表 2,目前地面标标杆沉降量为 628 mm,各地层累计沉降量中 F1-2 地层最大,为 298 mm,在整个地层沉降中占比达到 47.45%。通过对 7 个地层的沉降预测模型拟合求解,可以看到 7 个层位的预测模型相关系数 R^2 达到 0.9969~0.9987,相关性极好。通过对未来分层沉降进行预测,未来地面标累计沉降量最大值达到 729.700 mm 左右,相较于当前地面标累计沉降量 628 mm,该地层整体残余沉降量仍有 100 mm 左右的发展空间。通过分层预测累计沉降看,埋深在 94.00~147.60 m 处的 F1-2 地层累计沉降量最大,最终可达到 348.437 mm 左右,占整体地层沉降比例的 47.75%,未来仍有 50.4365 mm 的残余沉降量,其次是埋深在 147.60~185.30 m 处的 F1-1 和埋深在 48.00~66.00 m 处的 F1-4,预测残余沉降量也较大,分别可以达到 13.2305 mm 和 21.2523 mm。由此说明,这些层位仍有较大的沉降发展空间。

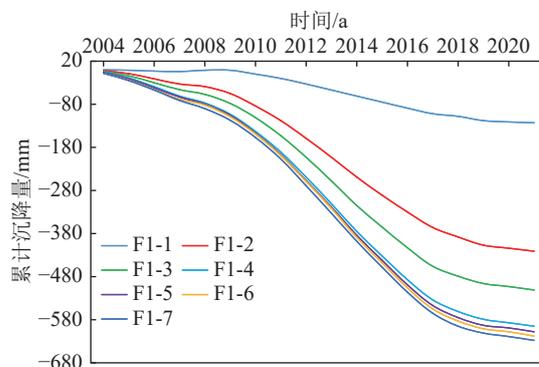


图 12 王四营站分层标历年实测沉降曲线

Fig. 12 Measured land subsidence curve of layered standard of Wangsiying station over the years

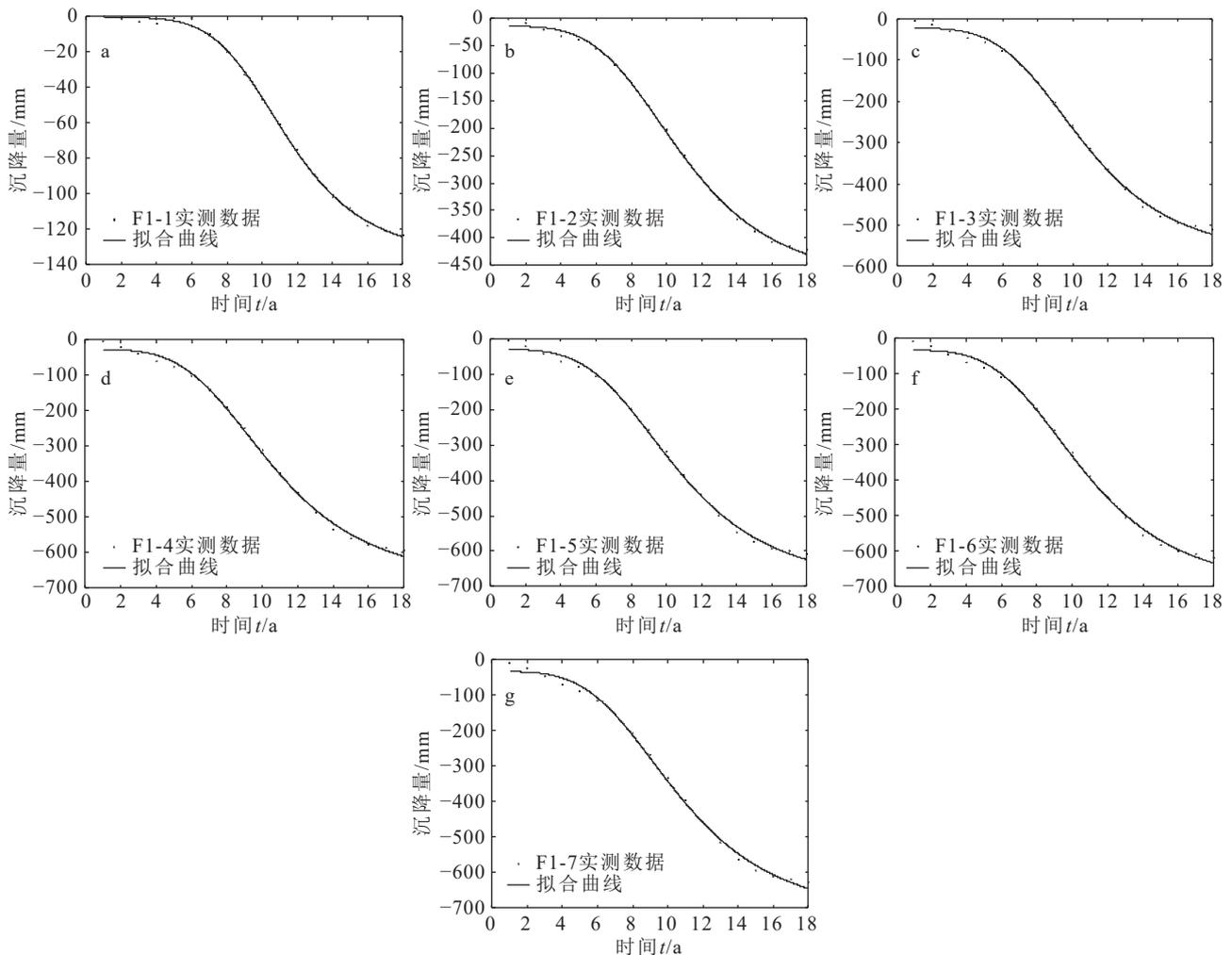


图 13 王四营站各分层标生长曲线拟合模型

Fig. 13 Measured land subsidence curves of layered standard of Wangsiying Station over the years

间,是未来地面沉降发生的主要优势层位,也是未来需要长期关注的重点层位。未来可以针对这些重点层位进行精准防控,从而更加高效地遏制地面沉降的发展潜力。

3.4 区域沉降趋势预测

根据前述地面沉降成长曲线模型,结合区内历年水准点实测沉降数据,对区内所有水准点分别进行模型拟合求解,与此同时,因 2021 年和 2022 年实测沉降数据已经获得,根据 2021 年和 2022 年实测数据对各水准点建立的预测模型进行精度验证与校核。为使精度评价数据具有代表性,选取 2021 年和 2022 年区域沉降中心部分实测数据与预测模型数据进行精度验证校核,精度评价结果见表 3,代表点最大差值绝对值为 2.64 mm,最小为 0.32 mm。从预测模型角度看,精度误差可以满足区域沉降速率预测

要求。

根据各水准点的预测模型对未来 10 年北京王四营地区平均沉降速率进行预测,预测结果见图 15。由图 15 可知,未来该区仍然是地面沉降速率相对较大的地区,但整体呈减缓的趋势。其中,预测未来 10 年区内平均沉降速率最大的地区位于朝阳金盏地区。另一片区域位于朝阳黑庄户—通州台湖—次渠—张家湾一带,未来 10 年区内平均沉降速率超过 20 mm/a。王四营监测站未来 10 年区域平均沉降速率小于 5 mm/a,依然位于沉降漏斗边缘地带。该地区地面沉降速率总体呈现减缓趋势,但单点沉降速率量值较大,是地面沉降未来重点关注的地区。

4 结论

(1)王四营地区地面沉降主要发生在 100 m 以

表2 王四营站各分层标沉降潜力预测模型参数

Table 2 Parameters of the land subsidence potential prediction model of each layered standard at Wangsiying Station

分层标	F1-1	F1-2	F1-3	F1-4	F1-5	F1-6	F1-7	
地层	中细砂 粘土	粘土 细砂	中粗砂 粘土	粘土	中粗砂 粘土	粉粘	粉土 中细砂	
观测层位埋深/m	147.60~185.30	94.00~147.60	66.00~94.00	48.00~66.00	24.00~48.00	15.00~24.00	2.00~15.00	
观测层初始厚度/m	37.7	53.5	28	18	24	9	13	
当前标杆沉降量	-123	-421	-511	-595	-608	-618	-628	
当前各层累计沉降量/mm	-123	-298	-90	-84	-13	-10	-10	
当前累计沉降量占总沉降百分比	19.59%	47.45%	14.33%	13.38%	2.07%	1.59%	1.59%	
模型参数 (见公式(3))	A_1	-0.6717	-14.66	-22.4	-28.01	-30.01	-33.79	-34.18
	A_2	-136.3	-485.7	-583.4	-689.4	-703.3	-712.9	-731.9
	p	5.14	4.03	4.05	3.802	3.816	3.855	3.72
	t_0	11.45	10.95	10.69	10.63	10.6	10.64	10.64
评价参数	相关系数 R^2	0.9987	0.9986	0.9979	0.9974	0.9973	0.9972	0.9969
	误差项自由度 d_{fe}	14	14	14	14	14	14	14
	均方根 r_{mse}	1.9668	6.6205	9.8388	12.6073	13.0732	13.5393	14.2547
预测稳定阶段	标杆沉降量/mm	-136.231	-484.667	-582.317	-687.569	-701.496	-711.162	-729.700
	各层预测累计沉降量/mm	-136.231	-348.437	-97.650	-105.252	-13.926	-9.666	-18.539
	各层预测累计沉降占总沉降百分比	18.67%	47.75%	13.38%	14.42%	1.91%	1.32%	2.54%
	各层残余沉降量/mm	-13.2305	-50.4365	-7.6499	-21.2523	-0.9264	0.334	-8.5387

表3 2021年与2022年实测沉降量与模型预测沉降量对比

Table 3 Comparison between measured land subsidence and model predicted land subsidence in 2021 and 2022

点号	2021年		差值	2022年		差值
	实测值/mm	预测值/mm		实测值/mm	预测值/mm	
点1	-58.50	-57.42	-1.08	-44.60	-42.67	-1.93
点2	-30.90	-28.96	-1.94	-24.00	-23.01	-0.99
点3	-56.20	-53.56	-2.64	-50.00	-47.96	-2.04
点4	-51.20	-52.43	1.23	-36.50	-36.18	-0.32
点5	-40.00	-38.07	-1.93	-37.13	-36.00	-1.13
点6	-3.80	-5.69	1.89	-0.30	-2.63	2.33
点7	-5.70	-4.21	-1.49	-3.56	-5.13	1.57
点8	-13.90	-14.90	1.00	-11.60	-11.03	-0.57

深第三压缩层组(监测层位 94~182 m)层位, 占比近 70%, 浅部地层中沉降量和沉降比例变小, 而深部地层随着时间沉降量和沉降比例变大, 埋深在 94.00~147.60 m 处的 F1-2 地层累计沉降量最大, 达到 298 mm, 在各层位中占比达到 47.45%, 是该区地层中主

要的沉降优势层位。目前各层位沉降占比基本稳定, 说明地面沉降已经进入稳定发展阶段。

(2)季节性变化特征方面, 在一个水文年内, 地面沉降表现出的季节性形变特征与地下水位动态变化趋势呈较高的相关性, 丰水期地面沉降速率减缓, 枯水期地面沉降速率明显增大, 2006—2021 年年度沉降量 4.34~67.375 mm, 第二季度沉降量占全年总沉降量的 23.03%~90.58%, 第二、三季度沉降量之和占全年总沉降量的 60.14%~98.58%。地面沉降和地下水位具有相关性, 随着水位降幅的增大, 相关性也随之增大, 二者成正相关。

(3)预测未来地面沉降, 垂向上随着时间的增长, 各地层地面沉降开始逐渐衰减, 但地层整体残余沉降量仍有 100 mm 左右的发展空间, 埋深在 94.00~147.60 m 处的 F1-2 地层最终可达到 348.437 mm 左右, 占整体地层沉降比例达到 47.75%, 未来仍有 50.4365 mm 的残余沉降量, 其次是埋深在 147.60~185.30 m 处的 F1-1, 预测残余沉降量也可以达到 13.2305 mm。说明中深部地层是未来地面沉降

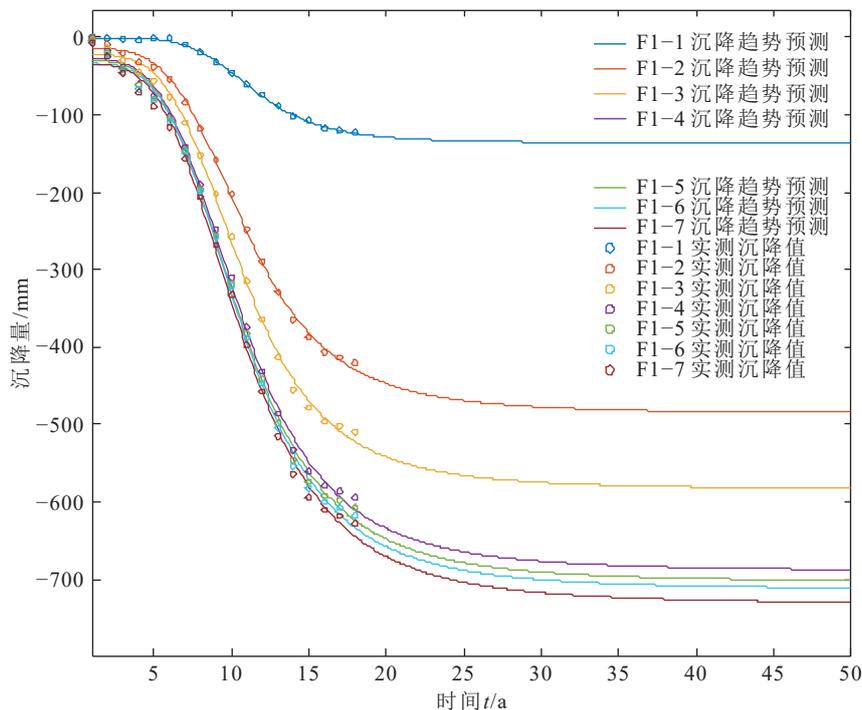


图 14 王四营站各分层标未来发展趋势预测

Fig. 14 Prediction of the future development trend of each layered standard at Wangsiying Station

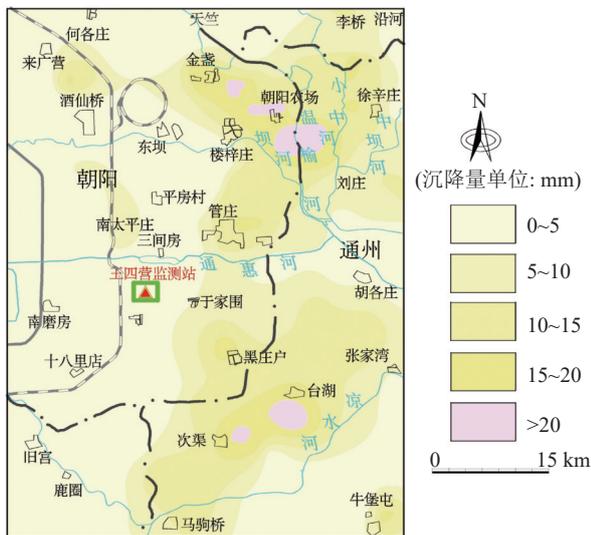


图 15 北京王四营地区未来 10 年(2021—2030 年)平均地面沉降预测速率分析图

Fig. 15 Analysis chart of average land subsidence prediction rate in Wangsiying area of Beijing in the next ten years (2021—2030)

发生的主要优势层位, 沉降潜力较大; 横向上, 未来北京王四营地区地面沉降趋势与现阶段一致, 但速率整体呈减缓的趋势, 预测未来 10 年区内平均沉降速率最大地区位于朝阳金盏地区。

致谢: 在成文过程中北京市地质环境监测所地面沉降研究中心团队提供了支持, 审稿专家提供了宝贵的意见, 在此一并表示衷心的感谢。

References

Das B M. 1983. Advanced soil mechanics[M]. New York: McGraw-Hill Book Company.

Gompertz B. 1825. On the function expressive of the law of human mortality and on a new method of determining the value of life contingencies[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences: 513-585.

Karim M R. 2000. Analysis of Biot's consolidation using element free galerkin method[D]. Singapore: National University of Singapore: 1-98.

Beijing Hydrogeological Engineering Geological Brigade (Beijing Geological Environment Monitoring Station). 2018. Ground subsidence in Beijing[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Yu H R, Gong H L, Chen B B, et al. 2020. Progress and reflection on land subsidence research in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Surveying and Mapping Science, 45(4): 125-133, 141 (in Chinese with English abstract).

Guo H P, Li W P, Wang L Y, et al. 2021. Current situation and research prospect of land subsidence driven by groundwater level in the North China Plain[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 48(3): 162-171 (in Chinese with English abstract).

- Luo Y, Ye S J, Wu J C, et al. 2015. Analysis of soil deformation characteristics under the condition of significant groundwater level rise in Shanghai[J]. Journal of Geological Sciences, 21(2): 243–254 (in Chinese with English abstract).
- Li Z F, Zhou Z F, Li M Y, et al. 2017. Hydraulic parameter response law during water release process in weakly permeable layers[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 45(4): 340–344 (in Chinese with English abstract).
- Zhu W W. 1991. Study on hydraulic and compressive properties of overflowing aquifer systems[J]. Journal of Earth Sciences (China University of Geosciences), (1): 95–104 (in Chinese with English abstract).
- Wu Q, Xie H L, Zhao Z M, et al. 2006. Study on the deformation mechanism of weakly permeable layers[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, (3): 207–210 (in Chinese with English abstract).
- Sun J. 1992. Overflow and cohesive soil water release in deep pore water resource evaluation[J]. Geology of Anhui Province, (3): 46–50 (in Chinese with English abstract).
- Wang W, Lu T H. 2007. Model analysis of soft foundation settlement prediction based on Weibull curve[J]. Geotechnical Mechanics, 28(4): 803–807 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Z D, Zhou L H. 2009. Application of logistic model for predicting the whole process settlement of soft soil roadbeds[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 31(6): 965–969 (in Chinese with English abstract).
- Yu C, Liu S Y. 2005. Application of Gompertz Model for predicting embankment settlement[J]. Geotechnical Mechanics, 26(1): 82–86 (in Chinese with English abstract).
- Mei G X, Zai J M, Yin Z Z, et al. 2004. Proof of the "S" shape of the settlement time curve[J]. Geotechnical Mechanics, 25(1): 20–22 (in Chinese with English abstract).
- Yang T, Li G W, Yang W Q. 2004. Prediction of settlement of graded embankment based on hyperbolic method[J]. Geotechnical Mechanics, 25(10): 1551–1554 (in Chinese with English abstract).
- Yang T, Yin Z Z. 1998. Composite constitutive finite element analysis of settlement of composite foundation[J]. Geotechnical Mechanics, 19(2): 19–25 (in Chinese with English abstract).
- Liu H, Cui W J, Luo Y, et al. 2022. Changes in land subsidence, groundwater level, and pore water pressure in Tianzhu, Beijing based on layered monitoring[J]. Geological Bulletin of China, 41(4): 692–701 (in Chinese with English abstract).
- Lei K C, Ma F S, Luo Y, et al. 2019. Stability study of reference datum for land subsidence monitoring network in Beijing plain area[J]. Advances in Geophysics, 34(5): 1757–1769 (in Chinese with English abstract).
- Lu T H. 2002. Soil mechanics[M]. Nanjing: Hohai University Publishing House (in Chinese).
- Mei G X, Zai J M, Yin Z Z, et al. 2004. Proof of S-shaped settlement time curve from the perspective of one-dimensional consolidation theory[J]. Geotechnical Mechanics, (1): 20–22 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 北京市水文地质工程地质大队(北京市地质环境监测总站). 2018. 北京地面沉降[M]. 北京: 地质出版社.
- 郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 等. 2021. 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, 48(3): 162–171.
- 雷坤超, 马凤山, 罗勇, 等. 2019. 北京平原区地面沉降水准监测网参考基准稳定性研究[J]. 地球物理学进展, 34(5): 1757–1769.
- 李兆峰, 周志芳, 李明远, 等. 2017. 弱透水层释水过程中水力参数响应规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 45(4): 340–344.
- 刘贺, 崔文君, 罗勇, 等. 2022. 基于分层监测的北京天竺地面沉降、地下水位与孔隙水压力变化规律[J]. 地质通报, 41(4): 692–701.
- 卢廷浩. 2002. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社.
- 罗跃, 叶淑君, 吴吉春, 等. 2015. 上海市地下水位大幅抬升条件下土层变形特征分析[J]. 高校地质学报, 21(2): 243–254.
- 梅国雄, 宰金珉, 殷宗泽, 等. 2004. 沉降-时间曲线呈“S”型的证明[J]. 岩土力学, 25(1): 20–22.
- 孙健. 1992. 深层孔隙水资源评价中的越流和粘性土释水[J]. 安徽地质, (3): 46–50.
- 王伟, 卢廷浩. 2007. 基于 Weibull 曲线的软基沉降预测出模型分析[J]. 岩土力学, 28(4): 803–807.
- 武强, 谢海澜, 赵增敏, 等. 2006. 弱透水层变形机理的研究[J]. 北京科技大学学报, (3): 207–210.
- 杨涛, 李国维, 杨伟清. 2004. 基于双曲线法的分级填筑路堤沉降预测[J]. 岩土力学, 25(10): 1551–1554.
- 杨涛, 殷宗泽. 1998. 复合地基沉降的复合本构有限元分析[J]. 岩土力学, 19(2): 19–25.
- 于海若, 官辉力, 陈蓓蓓, 等. 2020. 京津冀地区地面沉降研究进展与思考[J]. 测绘科学, 45(4): 125–133, 141.
- 余闯, 刘松玉. 2005. 路堤沉降预测的 Gompertz 模型应用研究[J]. 岩土力学, 26(1): 82–86.
- 朱伟武. 1991. 越流含水层系统水力性质及压缩性质的研究[J]. 地球科学-中国地质大学学报, (1): 95–104.
- 朱志铎, 周礼红. 2009. 软土路基全过程沉降预测的 Logistic 模型应用研究[J]. 岩土工程学报, 31(6): 965–969.