

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.011

基于 DFOS 的通州湾地区地面沉降监测与变形分析

卢毅¹, 宋泽卓², 刘瑾², 卜凡², 祁长青²

(1. 自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室(江苏省地质调查研究院), 江苏 南京 210049;

2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 以江苏省通州湾地区 YD002 钻孔为研究对象, 建立了地面沉降 DFOS(distributed fiber optic sensing) 系统, 对该地区第四纪沉积层的变形及地面沉降进行长期监测, 并依据监测数据对该地区地面沉降的现状和趋势进行分析。结果表明: 该地区目前的主要变形来源为抽水层上部承压含水层组垂向释水造成的土层压缩变形, 地层整体呈压缩趋势, 且各压缩层变形与地下水水位变化规律密切相关; 相较于传统分层标, DFOS 技术能够更加精细化地测量土层垂向的压缩-回弹变形。

关键词: 地面沉降; DFOS; 沉积层; 通州湾地区

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)02-0081-08

Land subsidence monitoring and deformation analysis of Tongzhou Bay area based on DFOS

LU Yi¹, SONG Zezhuo², LIU Jin², BU Fan², QI Changqing²

(1. Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Natural Resources
(Geological Survey of Jiangsu Province), Nanjing 210049, China;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Taking the YD002 borehole in Tongzhou Bay area of Jiangsu Province as the research object, this paper establishes a DFOS (distributed fiber optic sensing) system of land subsidence to monitor the deformation and subsidence of Quaternary sedimentary layer in this area for a long time. Based on the monitoring data, the current situation and trend of land subsidence in this area are studied and analyzed. The results show that the main deformation source in this area is the compression deformation of the soil layer caused by the vertical water release of the confined aquifer group in the upper part of the main pumping layer. The whole stratum shows a compression trend, and the deformation of each compression layer is closely related to the variation law of groundwater level. Compared with the traditional layer-wise mark, the DFOS technology can more finely measure the vertical compression and rebound deformation of soil layer.

Key words: land subsidence; DFOS; sedimentary layer; Tongzhou Bay area

地面沉降是指在自然和人为因素的作用下, 地面表层土体发生压缩而导致的地面高程降低的一种地质灾害^[1]。造成地面沉降的原因主要有地质构造运动、地震以及人类活动等, 其中, 由于过度开发地下水资源而造成的地面沉降成为当前地面沉降最为直接的诱因^[2-5]。易发性、渐进性、滞后性、不均匀性及不可逆性等特点也使得地面沉降一旦发生便难以修复, 对人民的生产、生活造成巨大的损失。1891 年, 墨西哥首都墨西哥城由于盲目地大量开采地下水, 形成了前所未有的大面积地面变形区^[6], 这是世界上最早发生该类地质灾害的地区。我国也是饱受地面沉降灾害的国家之一。自 20 世纪 20 年代开始, 长江三角洲主要城市以及天津市平原区、华北平原东部等地区相继发生了较大规模的地面沉降。据相关部门调查统计发现, 由于地面沉降而遭受的直接、间接经济损失累积约为 7 千亿元^[7-8]。

国内外有关学者早期通过分层标和基岩标测量、水准测量、GPS 测量等传统监测技术^[9-13], 以及空间对地监

基金项目: 江苏沿海地区综合地质调查项目(1212011220005); 国家自然科学基金(41877212); 中央高校基本科研业务费专项(B210203037)

作者简介: 卢毅(1983—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事地质灾害监测研究。E-mail: lynju@163.com

通信作者: 刘瑾(1983—), 女, 教授, 博士, 主要从事地质灾害监测与环境地质工程研究。E-mail: jinliu920@163.com

引用本文: 卢毅, 宋泽卓, 刘瑾, 等. 基于 DFOS 的通州湾地区地面沉降监测与变形分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 81-88.

LU Yi, SONG Zezhuo, LIU Jin, et al. Land subsidence monitoring and deformation analysis of Tongzhou Bay area based on DFOS [J].
Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 81-88.

测方法——合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术对地面沉降进行监测^[14-17]。近年来,分布式光缆监测技术以其空间分辨率高、精度高、重复性高等优点开始应用于地面沉降监测^[18]。该技术以光作为载体、光纤作为媒质进行感知和传输外界信号,通过在地层中设置感测元件,从而获取地面沉降过程中的空间动态变化以及随时间变化的信息^[19-20]。王德洋等^[21-26]的研究结果论证了该技术在 地面沉降监测领域具有良好的应用前景。

利用获取的监测数据分析地面沉降的变形发展趋势对控制地面沉降的发展、制定合理的地下水开采规划至关重要,目前常用的方法主要包括数理统计法、数值计算法^[27-28]和准三维计算法等^[29-32]。这些方法受限于地面沉降研究的深度以及相关计算的精细度,计算过程复杂且结果存在着一定的不足。

本文以江苏省通州湾地区 YD002 钻孔为研究对象,通过安装在钻孔中的分布式传感光纤,建立地面沉降分布式光纤感测(distributed fiber optic sensing,DFOS)系统,对该地区第四纪沉积层的变形及地面沉降进行长期的监测,对获得的钻孔断面土层变形分布式信息进行解译,分析该地区地面沉降的现状和趋势。

1 区域概况

主要研究区位于江苏省南通市通州湾地区(通州湾小洋口),属亚热带海洋性季风气候区,受海洋的调节和季风环流的影响,四季分明。研究区地势平坦,从西南略向东南倾斜,西北部高程为 4.0~5.0 m,东南部高程在 3.2 m 左右;主要地貌为典型的滨海平原,分属三角洲平原区、海积平原区和古河汉区 3 种类型。2006 年以前,该地区的地面沉降量较小,累积沉降量小于 100 mm。随着地表水污染的加剧和城市发展对水资源需求的增加,地下水开采严重,导致该地区地面沉降加剧,局部沉降速率达 10 mm/a。

据此,在通州湾地区设置监测地面沉降的钻孔,其地理坐标为 33°12′01.39″N、120°31′30.25″E(图 1),孔深为 700 m。根据钻孔编录信息和已有研究资料,并依据钻孔土样的埋藏条件和水理特征,将该地区第四纪沉积层划分为 1 个潜水含水层、5 个承压含水层组和 1 个半固结层,具体含水层划分如表 1 所示。因潜水含水层及第Ⅰ承压含水层组水质较差,多为咸水或半咸水,利用价值不大,目前开采较少。该地区地下水开采层次以第Ⅱ承压含水层组为主,其次为第Ⅲ、Ⅳ两个承压含水层组,第Ⅴ承压含水层组开采利用较晚,且勘察研究程度较低。根据长期观测资料显示,该地区主要的地下水补给源为大气降水。



图 1 研究区钻孔位置

Fig.1 Location map of the borehole in the study area

表 1 通州湾地区含水层划分
Table 1 Aquifer division in Tongzhou Bay area

地层	深度范围/m	含水层(组)分布		土性	平均孔隙比
		组	层		
Q ^h	0~23.7		潜水含水层	亚黏土、亚砂土、粉砂	0.785
Q _P ³	>23.7~48.3	第Ⅰ承压含水层组	隔水层(Ad1)	亚黏土	0.845
	>48.3~130.1		含水层(Aq1)	细砂、粉细砂	0.790
Q _P ²	>130.1~138.05	第Ⅱ承压含水层组	隔水层(Ad2-1)	亚黏土、粉土	0.685
	>138.05~179.0		含水层(Aq2-1)	粉细砂	0.696
	>179.0~187.5		透水层(Ad2-2)	亚黏土、黏土	0.645
	>187.5~223.7		含水层(Aq2-2)	粉细砂、中细砂、中粗砂	0.685
Q _P ¹	>223.7~256.2	第Ⅲ承压含水层组	隔水层(Ad3)	黏土、亚黏土	0.731
	>256.2~285.77		含水层(Aq3)	粉细砂、中粗砂	0.568
N	>285.77~313.65	第Ⅳ承压含水层组	隔水层(Ad4)	黏土	0.613
	>313.65~325.05		含水层(Aq4)	粉细砂	0.532
	>325.05~443.18	第Ⅴ承压含水层组	隔水层(Ad5-1)	黏土、亚黏土	0.487
	>443.18~484.75		含水层(Aq5)	含砾中细砂	0.476
	>484.75~531.50		隔水层(Ad5-2)	黏土、亚黏土	0.468
	>531.50~700		半固结层(S-S)	固结成岩	0.459

注:Ad 表示弱透土层,Aq 表示含水层。

2 DFOS 监测方案

根据通州湾地区的地层分布情况及土壤特性,设计了与之匹配的 DFOS 监测系统,具体的监测方案如图 2 所示。为了获取各地层准确的变形数据,选择了 10 m 定点光缆作为监测使用的分布式感测光缆。该光缆采用独特的内定点式设计,可以实现空间非连续、非均匀应变的分段测量。光缆直径为 5 mm,定点间距为 10 m,纤芯数量为 1,具有极好的机械性能和抗拉、抗压性能,能与岩土体、混凝土等结构很好地耦合。本文使用的分布式光纤监测仪为中国电子科技集团公司第四十一研究所生产的 AV6419 型分布式光纤应变测量仪,其最大动态监测范围为 15 dB,应变测量范围为-1.5%~1.5%,应变测量精度为±0.005%。

除此之外,通州湾地区地面沉降 DFOS 监测系统也利用 FBG 传感器对地层中的其他信息进行捕捉和测定。系统在 209 m 处分别设置一个 FBG 渗压计,以监测承压含水层孔隙水压力的变化。由于地表 10 m 以下的地温与地表温度存在较大的差异,因此在 377 m 处设置一个 FBG 温度计对应变光纤进行温度的修正。待封孔材料与周围土体耦合稳定后,地面沉降 DFOS 监测系统开始数据采集。一共进行 8 次数据采集,每次数据采集时间间隔 4 月,各个时间点数据分别记录为 I~Ⅶ。其中,I、Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ以及Ⅶ位于春夏季,Ⅲ、Ⅵ位于秋冬季。

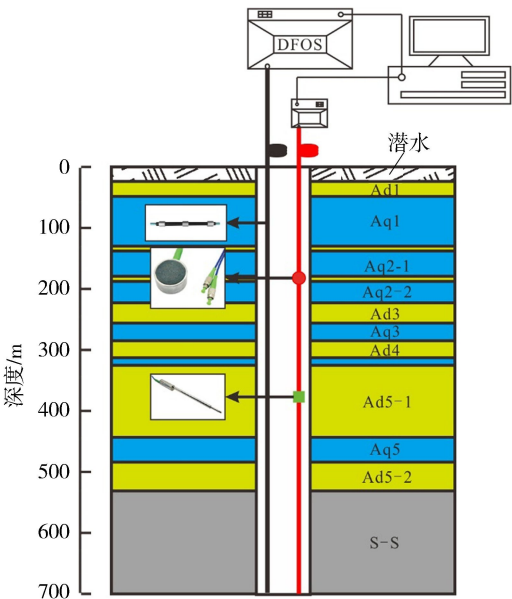


图2 通州湾地区地面沉降 DFOS 监测系统示意图
Fig.2 Schematic diagram of land subsidence DFOS monitoring system in Tongzhou Bay area

3 DFOS 监测结果与分析

3.1 DFOS 应变监测结果

通州湾地区地面沉降监测以进行温度补偿后的初次监测数据作为基准值,其后各监测期内获取的应变与基准数据的差即为该监测期内的应变,如图 3 所示。由图 3 可知,总体上应变变化明显的区域有两个,分别为深度 0~20 m 的区段和深度 500~550 m 的区段,其余区段整体上应变的变化趋于稳定,存在一定的尖峰式波动,变化范围较小。对于深度 0~20 m 的区段,应变最大值在 1000×10^{-6} 左右,变化范围为 $(200\sim1000)\times10^{-6}$,光缆处于拉伸状态。其原因主要归结为地表温度的变化。图 4 为地表 0 m 处光缆应变的变化。由图 4 可知,

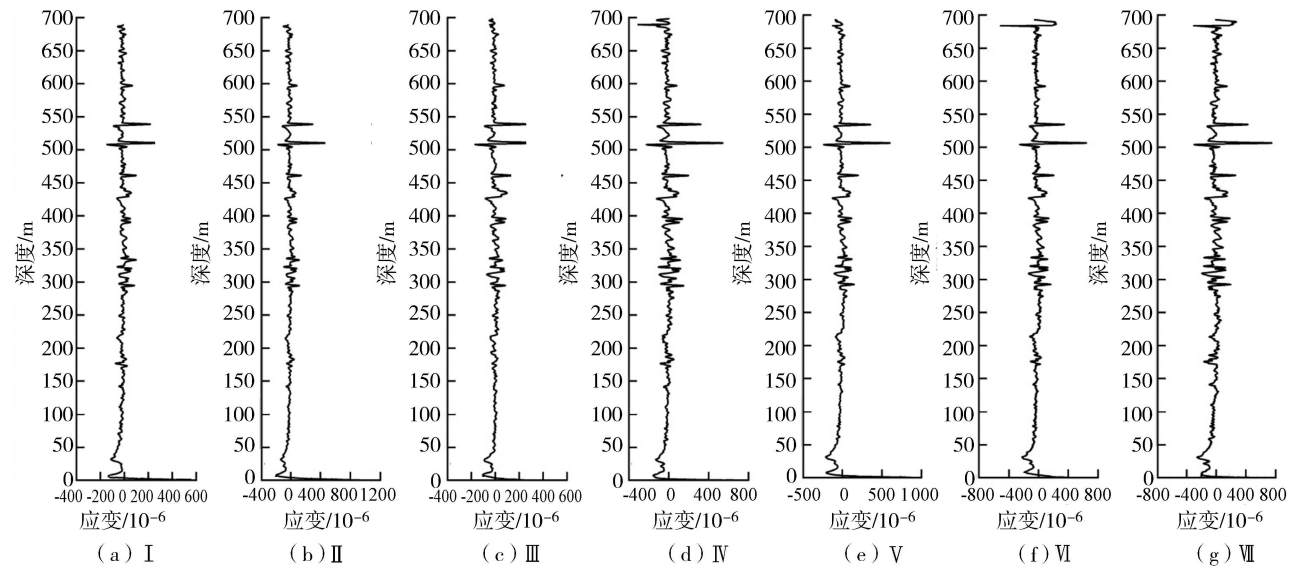


图3 通州湾地区监测期内应变随深度分布曲线

Fig.3 Distribution curve of internal strain with depth during the monitoring period in Tongzhou Bay area

当地表温度升高时,光缆监测到的应变值也随之增大;当地表温度下降时,光缆监测到的应变值则随之减小。这种由于地表温度变化导致光缆应变的变化随着深度的增加而逐渐减小。

对于深度 500 ~ 550 m 的区段,应变呈现正向的两个尖峰状,最大应变值在 $(400 \sim 750) \times 10^{-6}$ 范围,光缆呈现拉伸状态。该区段内的土层位于通州湾地区的半固结层(S-S)上部,随着时间的推移,半固结层逐渐由半固结状态向固结状态转变。在该转变过程中,半固结层中的水分被逐渐排出。这部分水分被半固结层上部的土层(深度 500 ~ 550 m 的区段)吸收,从而使得该区段土层的孔隙水压力增大,有效应力减小,在光缆应变数据中表现为正应变。

分布式光缆监测到的通州湾地区的应变数据符合有效应力原理。根据有效应力原理,含水层中的水分发生流失时,其孔隙水压力减小,有效应力增加,土层发生弹性变形及一定程度的塑性变形,出现压密现象;反之,当含水层中的水分增加时,其孔隙水压力增加,有效应力减小,土层出现回弹现象。当与隔水层邻近的含水层中的水分流失时,隔水层会向含水层垂向排水,该现象会导致隔水层压缩、固结进而形成不可逆的沉降变形。土层的压缩在应变监测数据上表现为负应变,土层的回弹表现为正应变。由于通州湾地区上部地层平均厚度较小,难以发生大规模的压缩或回弹,在应变监测数据上表现为小范围的尖峰式波动;下部地层平均厚度较大,但由于深度较深,地下水开采难度大,故该部分地层变形较小。

分布式光缆轴向变形量可以根据其轴向应变值沿着光缆的轴向进行累加获得。对图 3 中的应变按式(1)计算可获得通州湾地区不同深度土层的变形量:

$$\Delta S = \int_{x_1}^{x_2} \varepsilon(x) dx = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^n f\left(x_1 + \frac{i}{n}(x_2 - x_1)\right) \frac{x_2 - x_1}{n}$$

(1)

式中: ΔS 为分布式光缆在 x_1 与 x_2 两位置之间的变形量; $\varepsilon(x)$ 为 x_1 与 x_2 之间各应变测量点的应变值, 10^{-6} ; i 为定积分计算中变量的下标; n 为 x_1 与 x_2 两位置的分布式光缆进行 n 等分。图 5 为通州湾地区累积的变形量随时间变化曲线。由图 5 可知,随着时间的不断推移,通州湾地区地面沉降呈发展的趋势,地层的压缩变形仍旧在发生。

图 5 中存在着两个地层压缩-回弹的循环,产生这种循环的主要原因为地下水位的波动。在夏季,地下水开采量较大,土层发生压缩变形;在冬季,地下水开采量较小,土层发生回弹变形。除此之外,在第 1 个压缩-回弹循环中,土层的回弹量大于压缩量,这主要是由于监测开始的时间较晚,在监测开始之前的数据无法获取。在第 2 个压缩-回弹循环中可以观察到土层的回弹量小于压缩量,说明该地区的地面沉降呈现继续发展的趋势。

3.2 各地层变形趋势分析

根据表 1 中通州湾地区含水层的划分、图 3 地层的应变及式(1)计算各含水层的变形量,其结果如图 6 所示。由图 6 可知,除去潜水层、第 I 承压含水层组、第 II 承压含水层组和半固结层(S-S)之外,各土层的沉降量大多集中在 $-0.5 \sim 0.5$ mm 范围内,随时间呈现出波动的趋势。潜水层、第 I 承压含水层组、第 II 承压含水层组和半固结层(S-S)随时间变化的幅度较大,变化范围为 $-2.5 \sim 0$ mm。对比四者的数值可以发现,第 I 承压含水层组为该地区最主要的变形地层。

通州湾地区地面沉降 DFOS 监测系统周围建设有一套完整的分层沉降标,沉降标标底距离地面的距离分别为 0 m、253 m、287 m 和 395 m,即沉降标分别位于潜水含水层、Ad3、Ad4 及 Ad5-1 中。将沉降标监测到的数据与其所在地层分布式光缆得到的变形量数据进行比对,其结果如图 7 所示。由图 7 可知,各地层分布

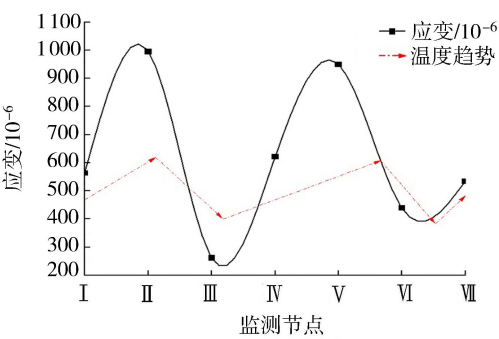


图 4 通州湾地区地表 0 m 处光缆应变的变化
Fig.4 Variation diagram of optical cable strain data on the surface at depth of 0 m in Tongzhou Bay area

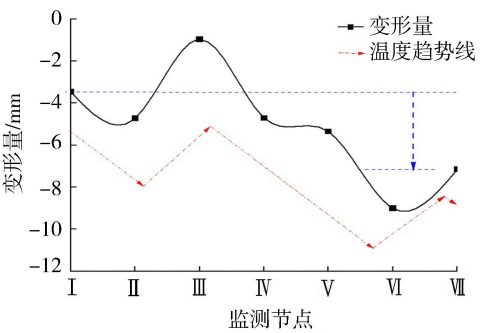


图 5 通州湾地区累积变形量随时间变化曲线
Fig.5 Variation curve of cumulative deformation with time in Tongzhou Bay area

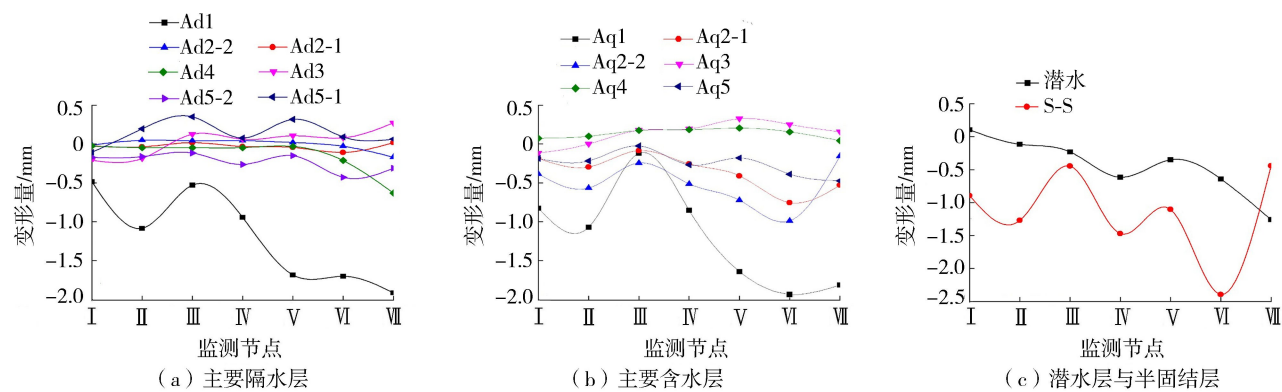


图 6 通州湾地区各含水层变形量
Fig. 6 Deformation of each aquifer in Tongzhou Bay area

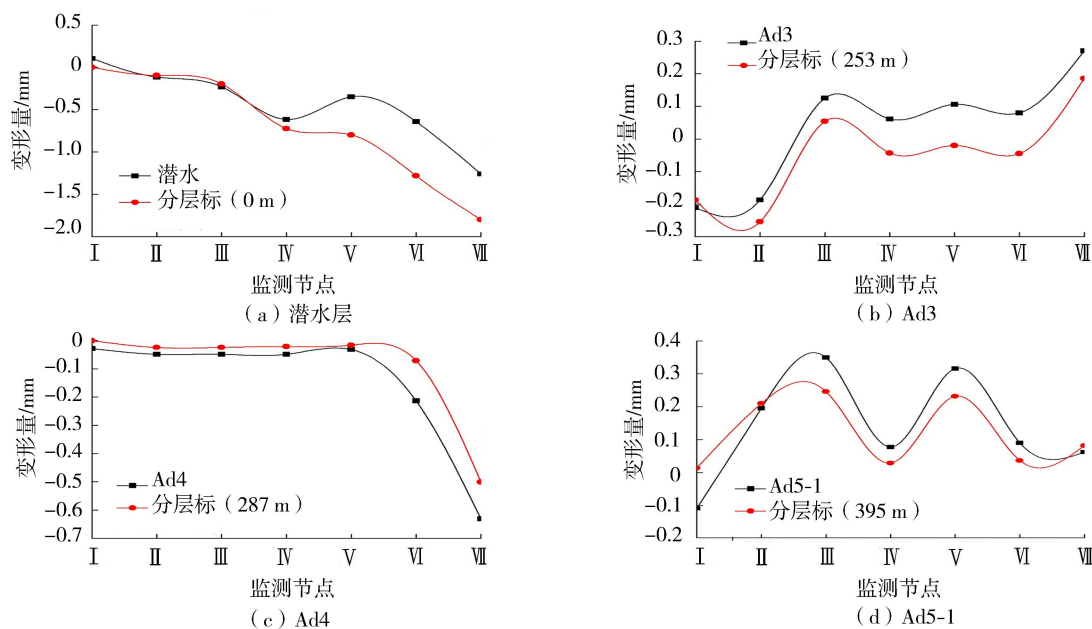


图 7 通州湾地区各地层沉降标变形数据与分布式光缆变形量数据对比
Fig. 7 Comparison of deformation data of subsidence markers in each layer and deformation data of distributed optical cables in Tongzhou Bay area

式光缆得到的变形量数据与沉降标获得的数据随时间呈现大致相同的变化趋势,两者之间的绝对差值在 0.1 mm 左右,说明分布式光缆监测与传统地面沉降监测方法获得的结果具有一致性,但分布式光缆的结果在剖面上显示更加精细化。

3.3 地面沉降与地下水位变化关系

地下水位的变化是影响江苏省沿海地区地面沉降最重要的因素,地面沉降的产生与发展都与地下水的开采存在着密切的关系。图 8 为通州湾地区各地层变形量与主要抽水层水位间的关系。由图 8 可知,主要抽水层的水位在整个监测周期内经历了两次下降-升高的过程,造成这种现象的主要原因为地下水的抽取。Ⅲ和Ⅶ两个监测时间位于秋冬季节,地下水抽取量较少,地下水水位抬升,其余监测时间位于春夏季节,地下水抽取量较大,地下水水位下降。

图 8(a)反映了隔水层变形量与主要抽水层水位变化的关系。Ad2-1、Ad2-2 和 Ad4 在整个监测周期内变形量趋向于 0,Ad3、Ad5-1 和 Ad5-2 在整个监测周期内存在一定的变形量,但数值较小。对于 Ad2-1 和 Ad2-2,两者厚度均较小,且两者的平均孔隙比相对较小(表 1),变形可能性也相对较小。对于 Ad4、Ad5-1 和 Ad5-2,三者虽然厚度较大,但其与主要抽水层的距离较远且平均孔隙比相对较小(表 1),变形量也相对较小。Ad1 由于临近主要抽水层 Aq1,且其具有较大的平均孔隙比与厚度,从而造成 Ad1 变形量较大,同时,Ad1 的变形随着时间的变化呈现压缩-回弹的循环趋势。Ad3 虽然临近主要抽水层 Aq2-1 和 Aq2-2,但由于

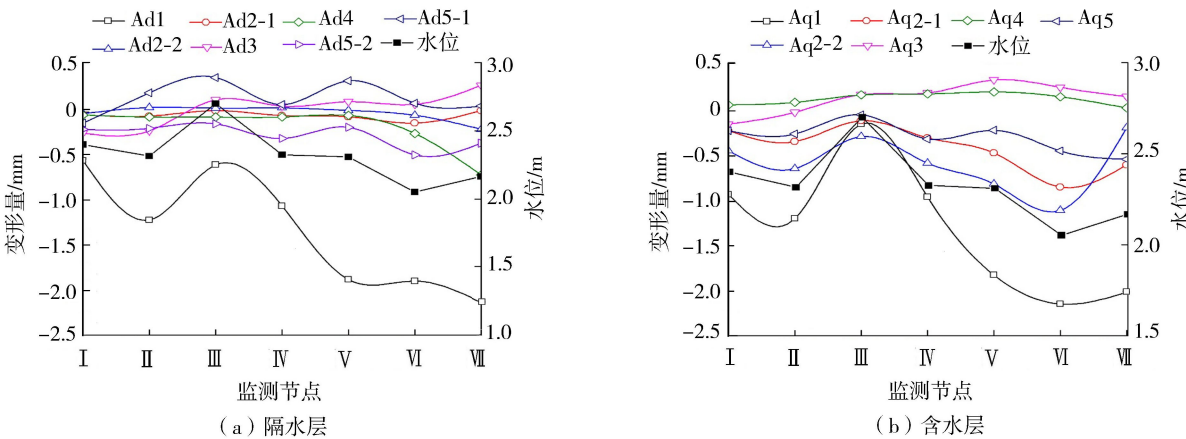


图8 通州湾地区各地层变形量与主要抽水层水位间的关系

Fig. 8 Relationship between deformation of each layer and water level of main pumping layers in Tongzhou Bay area
自身平均孔隙比和厚度较小,因此变形量相对较小。

图8(b)反映了含水层变形量与主要抽水层水位变化的关系。Aq3 和 Aq4 的变形量趋向于 0,这主要是因为 Aq3 和 Aq4 不是主要的抽水层。Aq5 存在一定的变形,但数值较小,变形的主要原因为其自身水位的变化。Aq2-1 和 Aq2-2 为通州湾地区主要的抽水层,水位变化造成两者发生了较大的变形。但由于 Ad2-1 和 Ad2-2 的厚度较小,其变形量小于 Aq1。Aq1 作为通州湾地区主要的地下水抽水层,具有较大的平均孔隙比(表 1)和厚度,多种原因使得 Aq1 发生了较大的变形。

3.4 地层变形趋势分析与评价

地面沉降是一个随着时间不断发展的地质现象,存在一个产生—发展—消亡的过程,不同地区的土层可以处于地面沉降发展的相同阶段,同一地区的不同土层也可以处于地面沉降发展的不同阶段。除此之外,不同阶段的土层具有不同的变形潜力和趋势。

表 2 为通州湾地区各承压含水层组截至最后一次监测数据测量的变形量统计。其中,地层变形指数定义如下:

$$A = \frac{S}{D} \tag{2}$$

式中:A 为地层变形指数,可用于地层变形趋势的评价,mm/m;S 为该地层的累计变形量,mm;D 为该地层的厚度,m。

由表 2 可知,在隔水层中,主要的变形层为

Ad1,其厚度为 24.6 m,变形量为-1.91 mm,占总变形量的 35.10%,处于压缩状态;含水层中,主要的变形层为 Aq1,其厚度为 81.8 m,变形量为-1.81 mm,占总变形量的 33.27%,处于压缩状态;其余各层存在一定的压缩或回弹变形,但占比较少。由此可知,当前状态下通州湾地区的主要地面变形成因为第 I 承压含水层组(Ad1 和 Aq1)水分排出造成的压缩变形。由表 2 可知,对于隔水层,其地层变形指数从大到小为 Ad1、Ad4、Ad2-2、Ad3、Ad5-2、Ad2-1、Ad5-1(约为 0),即在隔水层中 Ad1 的变形可能性最大,而 Ad5-1 则基本上不发生变形。对于含水层,Aq1 具有最大的变形可能性,且由于 Aq1 是该地区最厚的含水层,其变形潜力较大。

表 2 通州湾地区各承压含水层组变形量统计

Table 2 Statistical table of deformation of each confined aquifer group in Tongzhou Bay area

地层	D/m	S/mm	累计变形量占比/%	A/(mm·m ⁻¹)
Ad1	24.6	-1.91	35.10	-7.77
Aq1	81.8	-1.81	33.27	-2.22
Ad2-1	7.95	0.02	-0.32	0.22
Aq2-1	40.95	-0.53	9.72	-1.29
Ad2-2	8.5	-0.17	3.15	-2.02
Aq2-2	36.2	-0.16	2.86	-0.43
Ad3	32.5	0.27	-4.97	0.83
Aq3	29.57	0.16	-2.89	0.53
Ad4	27.88	-0.63	11.59	-2.26
Aq4	11.4	0.04	-0.79	0.38
Ad5-1	118.13	0.06	-1.15	0.05
Aq5	41.57	-0.47	8.70	-1.14
Ad5-2	46.75	-0.31	5.73	-0.67

4 结 论

a. 通州湾地区目前的主要变形来源为抽水层上部承压含水层组垂向释水造成的土层压缩变形。其成因为:主要抽水层的隔水顶板厚度较小,且上覆一个厚度较大的含水层。当抽水层水分流失时,上覆含水层

发生水分垂向运动,造成上覆承压含水层组地层的压缩变形。

b. 通州湾地区地层的变形呈现夏季压缩、冬季回弹的趋势,这与主要抽水层水位的变化具有一致性。但地层回弹量小于压缩量,地层整体表现出压缩的趋势。对各层变形趋势进行分析可知,第 I 承压含水层组具有较大的压缩可能性。

c. 与传统分层标技术比较,DFOS 技术具有突出的全分布式监测优势,可精细化测量土层垂向的压缩-回弹等变形,为研究地面沉降机理、评价土层压缩变形趋势提供了一种先进的监测手段。

参考文献:

- [1] 张阿根,杨天亮. 国际地面沉降研究最新进展综述[J]. 上海地质,2010,31(4):57-63. (ZHANG Agen, YANG Tianliang. Latest progress review of research on international land subsidence[J]. Shanghai Geology,2010,31(4):57-63. (in Chinese))
- [2] 杨天亮,许言. 国际地面沉降与城市安全研究动态:第一届国际城市地质学术研讨会综述[J]. 上海国土资源,2017,38(2):1-3. (YANG Tianliang, XU Yan. Research trends in international land subsidence and urban security: an overview of the first international symposium on urban geology[J]. Shanghai Land & Resources,2017,38(2):1-3. (in Chinese))
- [3] 于海若,宫辉力,陈蓓蓓,等. 京津冀地区地面沉降研究进展与思考[J]. 测绘科学,2020,45(4):125-133. (YU Hairuo, GONG Huili, CHEN Beibei, et al. The advance and consideration of land subsidence in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Science of Surveying and Mapping,2020,45(4):125-133. (in Chinese))
- [4] 陈建生,韩莉文,马芬艳. 苏北深层地下水接受下伏玄武岩地下水补给[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):1-8. (CHEN Jiansheng, HAN Liwen, MA Fenyan. Deep groundwater in northern Jiangsu receives recharge from underlying basaltic groundwater[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):1-8. (in Chinese))
- [5] 冯志祥. 江苏省地下水超采区的分类及治理[J]. 水资源保护,2017,33(5):117-122. (FENG Zhixiang. Classification and management of groundwater over-development area in Jiangsu Province[J]. Water Resources Protection,2017,33(5):117-122. (in Chinese))
- [6] GONG X, GENG J, SUN Q, et al. Experimental study on pumping-induced land subsidence and earth fissures: a case study in the Su-Xi-Chang region, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2020,79(9):4515-4525.
- [7] 卢毅,宋泽卓,于军,等. 基于 BOFDA 的砂-黏土互层垂向变形物理模型试验研究[J]. 高校地质学报,2019,25(4):481-486. (LU Yi, SONG Zezhuo, YU Jun, et al. Physical model test of vertical deformation of sand-clay layers based on the BOFDA [J]. Geological Journal of China Universities,2019,25(4):481-486. (in Chinese))
- [8] 张卫东. 城市地面沉降灾害经济评估[C] //中国地质矿产经济学会. 资源·环境·产业:中国地质矿产经济学会2003年学术年会论文集. 北京:中国大地出版社,2003:638-643.
- [9] 陈明忠. 地面沉降监测一孔多用标技术关键与应用实效[J]. 上海国土资源,2012,33(3):61-65. (CHEN Mingzhong. Key technologies and diversified purposes of single-hole land subsidence monitoring[J]. Shanghai Land & Resources,2012,33(3):61-65. (in Chinese))
- [10] 王启耀,彭建兵,蒋臻蔚,等. 西安典型段地面沉降分层标观测及数值模拟[J]. 岩土力学,2014,35(11):3298-3302. (WANG Qiyao, PENG Jianbin, JIANG Zhenwei, et al. Numerical simulation and layer wise mark monitoring of land subsidence and ground fissures of typical section in Xi'an[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(11):3298-3302. (in Chinese))
- [11] 刘欢欢,张有全,王荣,等. 京津高铁北京段地面沉降监测及结果分析[J]. 地球物理学报,2016,59(7):2424-2432. (LIU Huanhuan, ZHANG Youquan, WANG Rong, et al. Monitoring and analysis of land subsidence along the Beijing-Tianjin high-speed railway (Beijing section) [J]. Chinese Journal of Geophysics,2016,59(7):2424-2432. (in Chinese))
- [12] 齐波,牛文明. 天津滨海新区分层标监测系统技术研究[J]. 水文地质工程地质,2011,38(6):44-48. (QI Bo, NIU Wenming. A technological study of the monitoring system for layer wise mark in the Tianjin Binhai New Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2011,38(6):44-48. (in Chinese))
- [13] 王利,张勤,范丽红,等. 北斗/GPS 融合静态相对定位用于高精度地面沉降监测的试验与结果分析[J]. 工程地质学报,2015,23(1):119-125. (WANG Li, ZHANG Qin, FAN Lihong, et al. Experiment and results of high precision land subsidence monitoring using fused BDS/GPS data and static relative positioning[J]. Journal of Engineering Geology,2015,23(1):119-125. (in Chinese))
- [14] 陈炳乾. 面向矿区沉降监测的 InSAR 技术及应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2015.
- [15] 云烨,吕孝雷,付希凯,等. 星载 InSAR 技术在地质灾害监测领域的应用[J]. 雷达学报,2020,9(1):73-85. (YUN Ye, LYU Xiaolei, FU Xikai, et al. Application of spaceborne interferometric synthetic aperture radar to geohazard monitoring[J]. Journal of Radars,2020,9(1):73-85. (in Chinese))

[16] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline different SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.

[17] BERARDINO P, COSTANTINI M, FRANCESCHETTI G, et al. Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy) [C] //Symposium on Remote Sensing and Monitoring of Landslides held at the European-Geophysical-Society 26th General Assembly. Nice, France: Engineering Geology, 2003, 68(1-2): 31-51.

[18] 席均. 地面沉降变形分布式光纤传感监测技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.

[19] 朱涛, 靳伟, 何祖源. 光纤传感核心技术与前沿研究: 专题导读[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 4. (ZHU Tao, JIN Wei, HE Zuyuan. Core technology and frontier research of optical fiber sensing: topic introduction[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(9): 4. (in Chinese))

[20] ZHU H, SHI B, ZHANG J, et al. Distributed fiber optic monitoring and stability analysis of a model slope under surcharge loading [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(4): 979-989.

[21] 王德洋, 朱鸿鹄, 吴海颖, 等. 地层塌陷作用下埋地管道光纤监测试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1125-1131. (WANG Deyang, ZHU Honghu, WU Haiying, et al. Experimental study on buried pipeline instrumented with fiber optic sensors under ground collapse[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1125-1131. (in Chinese))

[22] KIHARA M, HIRAMATSU K, SHIMA M, et al. Distributed optical fiber strain sensor for detecting river embankment collapse [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2002, E85C(4): 952-960.

[23] 张诚成. 传感光缆与土体变形耦合性试验与评价模型研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.

[24] LIU S, GU K, ZHANG C, et al. Experimental research on strain transfer behavior of fiber-optic cable embedded in soil using distributed strain sensing[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(10): 04021190.

[25] SUN Y, XUE Z, HASHIMOTO T, et al. Distributed fiber optic sensing system for well-based monitoring water injection tests: a geomechanical responses perspective[J]. Water Resources Research, 2020, 56(1): e2019WR024794.

[26] WU J, JIANG H, GU K. Application of distributed fiber optic sensing technique in land subsidence monitoring[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(5): 587-597.

[27] 马青山, 骆祖江. 沧州市地下水开采-地面沉降数值模拟[J]. 水资源保护, 2015, 31(4): 20-26. (MA Qingshan, LUO Zujiang. Numerical simulation of groundwater exploitation and land subsidence in Cangzhou City [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(4): 20-26. (in Chinese))

[28] 姬建, 夏嘉诚, 张哲铭, 等. 污水管线渗漏诱发地面下陷数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 406-412. (JI Jian, XIA Jiacheng, ZHANG Zheming, et al. Numerical analysis of ground subsidence induced by leakage of sewage pipeline[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 406-412. (in Chinese))

[29] 熊春宝, 李法超. 指数曲线模型预测基坑周边地面沉降[J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(4): 4-6. (XIONG Chunbao, LI Fachao. The exponential curve method model for predicting foundation settlement in the base pit vicinity[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2011, 34(4): 4-6. (in Chinese))

[30] NARUSE H, UCHIYAMA Y, KURASHIMA T, et al. River levee change detection using distributed fiber optic strain sensor[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2000, 83(3): 462-467.

[31] 李传勋, 江留慧. 抽降水引发的弱透水层非线性固结解析解[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 106-114. (LI Chuanxun, JIANG Lihui. Analytical solutions for nonlinear consolidation of aquitard induced by the dropping of groundwater table[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3): 106-114. (in Chinese))

[32] 骆祖江, 张鑫, 田小伟. 沧州市地面沉降灾害预测预警[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 365-373. (LUO Zujiang, ZHANG Xin, TIAN Xiaowei. Prediction and early warning of Cangzhou land subsidence disaster[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 365-373. (in Chinese))