

# 基于多项式分布滞后模型的上海市 地面沉降验证与预测

曹伟伟<sup>1</sup>, 李明广<sup>1</sup>, 史玉金<sup>2</sup>, 夏小和<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 土木工程系, 上海 200240; 2. 上海市地质调查研究院, 上海 200072)

**摘要:** [目的] 对上海市地面沉降进行验证与预测, 为地下工程建设和地下水开采格局的科学调整提供参考。[方法] 基于地下水抽灌量、地面沉降和土层分层变形等长期监测数据, 研究地面沉降量与地下水开采量、土层分层变形量之间的相关性, 并结合上海市地面沉降特性及原因, 建立考虑地下水开采量和第4含水层变形量的地面沉降多项式分布滞后模型(PDL模型)。[结果] ①上海市累计地下水开采量、第4含水层累计变形量与累计地面沉降量之间均具有高度的正相关性, 但由于砂土蠕变、弱透水层释水缓慢等原因, 地面沉降相对于地下水开采量和第4含水层变形都有着一定的滞后性; ②采用考虑滞后效应的多项式分布滞后模型预测地面沉降, 其计算结果相对误差较小、拟合效果较好; ③若以当前采灌格局及第4含水层变形量作为参考进行预测, 地面沉降在2019—2024年间将会发生稳定的轻微回弹现象。[结论] 上海市地面沉降与地下水开采量和土层变形量之间有着较高的相关性, 且控制地下水开采能够有效缓解地面沉降的发展。

**关键词:** 地面沉降预测; 地下水抽灌; 随机变量模型; 上海市

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2020)02-0177-05

**中图分类号:** TU196

**文献参数:** 曹伟伟, 李明广, 史玉金, 等. 基于多项式分布滞后模型的上海市地面沉降验证与预测[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 177-181. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.025; Cao Weiwei, Li Mingguang, Shi Yujin, et al. Verification and prediction of land subsidence in Shanghai City using polynomial distribution lag model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 177-181.

## Verification and Prediction of Land Subsidence in Shanghai City Using Polynomial Distribution Lag Model

Cao Weiwei<sup>1</sup>, Li Mingguang<sup>1</sup>, Shi Yujin<sup>2</sup>, Xia Xiaohu<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** [Objective] The land subsidence in Shanghai City was verified and predicted, in order to provide reference for scientific regulations of underground construction and groundwater exploitation. [Methods] Based on monitoring data of groundwater extraction volumes, land subsidence and layered deformation of soils, the correlations between land subsidence and groundwater exploitation, deformation of soils layers were investigated. Based on the characteristics and causes of land subsidence in Shanghai City, a polynomial distribution lag model (PDL model) was established, considering groundwater extraction volumes and deformation of aquifer IV. [Results] ① There was a high positive correlation between cumulative groundwater exploitation, cumulative layered deformation of aquifer IV and cumulative land subsidence. However, due to the creep of sand and slow water release from aquitards, lagging effect existed between land subsidence and groundwater extraction volumes as well as layered deformation of aquifer IV. ② Calculated results using PDL were accurate with small relative error and better fitting effect when verifying land subsidence. ③ Based on

收稿日期: 2019-09-26

修回日期: 2019-10-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“地下工程降水开挖对区域地层变形作用机制的多尺度耦合分析(41602283), 考虑卸荷与渗流作用下深部土多尺度力学行为的软土地层变形机制研究”(41977216); 上海市青年科技启明星项目(19QC1400800)

第一作者: 曹伟伟(1993—), 男(汉族), 江苏省南通市人, 硕士研究生, 研究方向为地面沉降。Email: brian0125@sytu.edu.cn.

通讯作者: 李明广(1987—), 男(汉族), 重庆市人, 博士, 助理研究员, 主要从事岩土工程数值仿真与多尺度计算方面的研究。Email: lmg20066028@sytu.edu.cn.

the current groundwater extraction and recharge pattern and layered deformation of aquifer IV, the prediction showed that slight ground lift would occur in 2019—2024. [Conclusion] There is a high correlation between land subsidence and groundwater extraction volumes and soil deformation in Shanghai City, and controlling groundwater exploitation can effectively alleviate land subsidence.

**Keywords:** land subsidence prediction; groundwater exploitation; random variable model; Shanghai City

上海市位于长三角洲,地下水资源丰富,自 20 世纪 60 年代便开始地下水资源开采活动<sup>[1]</sup>,引起了严重的地面沉降现象<sup>[2]</sup>。90 年代左右城市建设加速,市政工程、房屋建筑增加的同时地面沉降由于地下水的大量开采也加速发展,这对城市安全造成了严重威胁。因此,对地面沉降的监控与预测尤为重要,其不仅可作为地下工程建设的参照,也可作为调整地下水开采格局提供参考。

目前有很多针对地面沉降预测模型的研究,主要包括确定性模型、随机统计模型和人工智能模型等<sup>[3]</sup>。其中,随机统计模型依赖于长期监测数据,与渗流模型、土体变形模型等确定性模型相比虽然无法解释水土作用机理,但模型简单、计算简便,适用于宏观地面沉降预测。常见的随机统计模型包括回归模型、生命回旋模型、时间序列模型等。范珊珊<sup>[4]</sup>、王淼<sup>[5]</sup>、潘云<sup>[6]</sup>等运用线性回归法分别对北京和天津进行了地面沉降预测,结果表明采用累计量进行预测时能够达到较为精确的预测效果。刘毅<sup>[7]</sup>采用泊松回旋法从定性定量两个角度对上海市地面沉降进行了预测并验证了方法的可行性。但由于含水层砂土蠕变<sup>[8]</sup>和弱透水层释水缓慢<sup>[9]</sup>等原因,地面沉降与抽灌水量、地下水位等均存在一定的滞后关系,上述方法没有考虑滞后效应对预测结果的影响。郇小龙<sup>[10]</sup>、吴蓉<sup>[11]</sup>、冯羽<sup>[12]</sup>等分别建立了自回归分布滞后模型、Preisach 滞后模型和阿尔蒙预测模型,验证了模型预测地面沉降的精度。凌胜任也采用了 Logistics 模型<sup>[13]</sup>和 PDL 模型<sup>[14]</sup>对某地区进行了预测,预测结果也较为理想。

上海市具有大量长期地面沉降和水位监测的数据,但目前考虑上海市地面沉降诱因及滞后效应的随机统计预测模型应用较少,因此本文在分析上海市地面沉降、地下水开采量和土体变形的基础上,考虑滞后效应建立了相应的 PDL 模型并验证了模型的适用性,且对未来上海市地面沉降作出了相关预测。

## 1 地下水开采下上海市地面沉降滞后现象分析

20 世纪 70 年代以后上海市进行了开采格局的调整,目标采水层由第 2,3 含水层向第 4,5 含水层转移,一定程度上减轻了地面沉降。但由于 90 年代城市建设加速,大量地下水被开采导致地面沉降加速。如图 1 所示,为地面沉降与地下水开采量之间的关系。

从图 1 可以看出,年地面沉降值的波动现象较明显,且在 1995 年之前年地面沉降与年抽水量的变化趋势一致。1994 年年抽水量达到峰值,但地面沉降的峰值却在 1997 年达到,且后一个地面沉降的极值点同样比抽水量极值点滞后了 5 a 左右,此时第 4,5 含水层成为目标开采层且总体开采量较大,由于相邻隔水层释水缓慢、砂土蠕变<sup>[15]</sup>等原因,地面沉降与开采量之间出现了明显的滞后效应。根据图 1 累计量变化图计算二者的 Pearson 相关系数为 0.975,说明累计地面沉降和累计地下水开采量之间存在着较高的正相关性,因此在建立随机变量模型时地下水开采量可以作为地面沉降的解释变量。

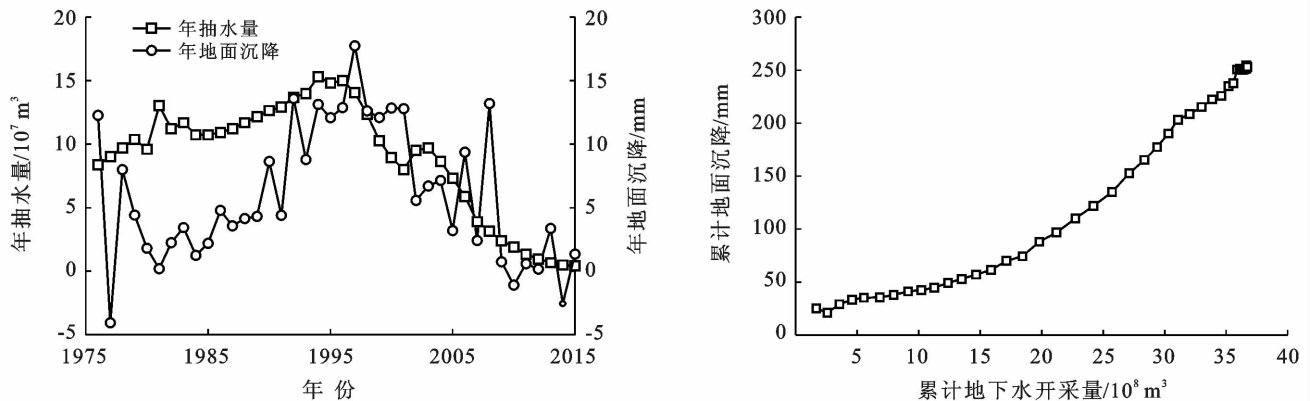


图 1 上海市地面沉降与地下水开采量关系

从土层分层变形角度来看,地下水在不同含水层的开采均造成相应含水层的水位下降,进而引起土层的压缩变形。根据张云<sup>[2]</sup>等人的研究,第 4 含水层的变形在整体地面沉降中所占比例达到了 50% 以上,部分地区甚至达到了 70% 左右,成为影响地面沉降的主要变形层。且自地下水开采格局调整后,第 4 含水层的变形对于地下水开采表现出明显的滞后效应,

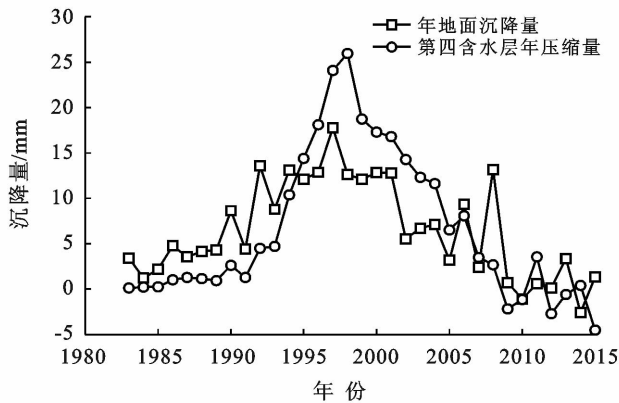
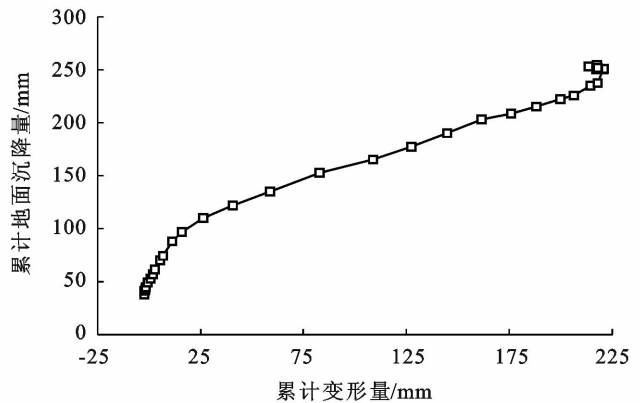


图 2 上海市地面沉降与第 4 含水层变形关系

因此在预测地面沉降时考虑第 4 含水层的变形规律非常重要。图 2 为第 4 含水层年变形量和年地面沉降量关系以及第 4 含水层累计变形量和累计地面沉降变形图,计算累计量之间的 Pearson 系数为 0.988,表明累计地面沉降和第 4 含水层累计变形量之间同样存在着较高的正相关性,因此第 4 含水层变形量也可作为地面沉降的解释变量。



## 2 多项式分布滞后模型建立

鉴于以上分析,地面沉降量与抽水量及第 4 含水层变形量之间均存在一定的相关性和滞后性,因此可以考虑建立多项式分布滞后模型,对地面沉降趋势进行验证及预测。由于抽水量对于第 4 含水层变形具有影响,为了消除这种自变量之间的相互影响,在建模时从总抽水量中减去了第 4 含水层的抽水量。

### 2.1 模型简介

对于时间序列数据而言,如果模型中包含的解释变量滞后,则模型为分布滞后模型。对于上海市地面沉降而言,由于开采格局和土体性质等因素影响,地面沉降与地下水抽灌量、土体变形之间均存在滞后效应,因此本文重点考虑了累计地下水开采量和第 4 含水层累计变形对累计地面沉降的影响,建立相应的 PDL 模型为:

$$Y_t = c + \sum_{i=0}^M \beta_i H_{t-i} + \sum_{i=0}^N \gamma_i S_{t-i} + \mu_t \quad (1)$$

式中: $c$  为常数项; $\mu_t$  为满足线性回归模型古典假设的随机误差项; $Y_t$  为地面沉降当期预测值; $H_{t-i}$  为累计地下水开采量历史值; $S_{t-i}$  为第 4 含水层累计变形历史值; $\beta_i$  累计地下水开采量影响因子参数; $\gamma_i$  为第 4 含水层累计变形影响因子参数; $M$  为地下水开采量滞后期数; $N$  为第 4 含水层变形滞后期数。在实际建模过程中,为了减小随机误差方差性的影

响,可以考虑将自变量和因变量取对数处理。由于年地面沉降正负值均有出现无法取对数计算,因此本文在建模过程中自变量和因变量统一采用累计值进行处理。

### 2.2 滞后期数确定

对于滞后期数,可以通过理论大致确定,但在很多复杂情况下无法直接通过理论得到,而需要通过对样本数据的分析及相应的判定方法和准则才能确定合理的滞后期数。本文采用修正的可决系数法和赤池信息准则、施瓦茨准则来进行滞后期数的判定,其方法都是通过添加滞后变量使得可决系数及两个判定值不再减小为止。

2.2.1 修正可决系数法 普通可决系数  $R^2$  统计量一般可以用来衡量模型估计值对实际值拟合的好坏,其描述了因变量的波动性,且  $R^2$  值越大表明模型对于因变量的拟合效果越好。但如果仅仅依据  $R^2$  增加而将某一变量作为解释变量加入模型,有可能出现新增变量降低自由度的情况,对于整体判断模型的优度不够准确,因此使用修正后的可决系数  $\bar{R}^2$  作为确定滞后期数的依据,具体表达式为

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{\text{RSS}/(T-k-1)}{\text{TSS}/(T-1)} = 1 - (1-R^2) \frac{T-1}{T-k-1} \quad (2)$$

式中: $T$  为样本容量; $k$  为自变量个数。

2.2.2 赤池信息准则和施瓦茨准则 在确定具体滞后期数时需通过遵循赤池信息准则(AIC)和施瓦

茨准则 (SC) 来判定, 其检验过程同样是在模型中逐期添加滞后变量, 直到 AIC 和 SC 的值不再降低为止, 即选择使二值达到最小的滞后期数。一般来说, 赤池信息准则适用于小样本数据分析, 二者的表达式为:

$$AIC = \ln\left(\frac{RSS}{T}\right) + \frac{2k}{T} \quad (3)$$

$$SC = \ln\left(\frac{RSS}{T}\right) + \frac{k \ln T}{T} \quad (4)$$

式中: RSS 表示残差平方和;  $T$  为样本容量;  $k$  为自变量的个数

在具体确定滞后期数时, 往往综合考虑各项指标的影响, 本文在考虑赤池信息准则和施瓦茨准则的同时也参考了修正后的可决系数  $\bar{R}^2$ , 最终确定模型合理的滞后期数。

### 2.3 影响因子确定

对于滞后期数已知的分布滞后模型, 可以通过经验加权法、阿尔蒙多项式法等进行修正, 以消除多重共线性的影响。本文采取阿尔蒙多项式确定影响因子, 用一个关于滞后期  $i$  的次数较低的  $m$  多项式逼近, 该多项式为:

$$\beta_i = \alpha_0 + \alpha_1 i + \alpha_2 i^2 + \alpha_3 i^3 + \dots + \alpha_m i^m \quad (5)$$

( $i=0, 1, 2, 3, \dots, n$ )

将阿尔蒙多项式变换代入模型并整理, 模型变为如下形式:

$$Y_t = c + \alpha_0 Z_{0t} + \alpha_1 Z_{1t} + \alpha_2 Z_{2t} + \dots + \alpha_m Z_{mt} + u_t \quad (6)$$

式中:  $Z_{0t} = H_t + H_{t-1} + H_{t-2} + \dots + H_{t-i}$

$$Z_{1t} = H_{t-1} + 2H_{t-2} + 3H_{t-3} + \dots + iH_{t-i}$$

$$Z_{2t} = H_{t-1} + 4H_{t-2} + \dots + i^2 H_{t-i}$$

⋮

$$Z_{mt} = H_{t-1} + 2^m H_{t-2} + \dots + i^m H_{t-i}$$

对于公式(5), 在满足古典假定的条件下, 可用最小二乘法进行估计。将估计参数代入阿尔蒙多项式, 就可以求出原模型参数估计值。但在实际的应用过程中, 多项式的次数  $m$  通常取得较低, 且不超过滞后期数, 一般可取 2 或者 3 进行计算, 很少情况会超过 4, 本文取  $m=2$ 。

## 3 实例分析

现根据上述公式推导过程, 考虑累计抽水量和第 4 含水层累计变形量建立多项式分布滞后模型。本文基于 1989—2010 年监测数据进行建模, 通过 2011—2018 年的结果对比验证该方法对于上海市地面沉降预测分析的合理性及适用性, 在此基础上对 2019—2024 年的地面沉降进行预测。

### 3.1 确定多项式分布滞后模型

根据上述研究及监测数据, 首先确定各多项式的滞后期数, 再根据阿尔蒙多项式变化求得累计地下水开采量和第 4 含水层累计变形的影响因子参数, 最后根据时间序列运用 EViews 软件求得多项式分布滞后模型。在确定滞后期数时, 根据 EViews 软件可判定两个自变量的最大滞后期为 3, 在此基础上根据判定准则对滞后期数进行进一步确定, 结果如表 1 所示。从表中可看出, 当选取抽水量滞后期数为 3, 第 4 含水层变形量滞后期数为 2 时可使调整后  $R^2$  最大而 AIC 和 SC 值最小。

表 1 抽水量及第 4 含水层沉降量滞后期数表

抽水量	第 4 含水层变形	调整后 $R^2$	AIC	SC
3	3	0.9999	-4.923	-4.575
2	3	0.9989	-4.917	-4.569
3	2	0.9994	-5.532	-5.184
2	2	0.9996	-5.531	-5.183

在确定滞后期数和相应参数后即可求得上海市地面沉降多项式分布滞后模型, 计算公式为:

$$\begin{aligned} \ln Y_t = & -2.5157 - 0.6844 \ln H_t + 0.42 \ln H_{t-1} \\ & + 0.7107 \ln H_{t-2} + 0.1878 \ln H_{t-3} + 0.1397 \ln S_t \\ & - 0.2245 \ln S_{t-1} + 0.1933 \ln S_{t-2} \end{aligned} \quad (7)$$

### 3.2 结果分析

通过公式(7)可以计算出 1993—2018 年的地面沉降值, 结果如图 3 所示。由 1993—2018 年累计沉降量的计算值与实际值分析对比可知, 计算值与实际值非常接近, 其中 1993—2018 年的建模阶段相对误差为 0.05%~2.18%, 2011—2018 年的预测阶段相对误差在 1.9%~4.19%, 拟合效果较为理想。由 1993—2018 年年地面沉降计算值与实际值对比分析可知, 计算值与实际变化趋势一致, 可见 PDL 模型可以较为准确地反映出沉降滞后的现象。

### 3.3 地面沉降预测

由上述分析可知, PDL 模型充分考虑了上海地面沉降相对地下水抽取和第 4 含水层沉降的滞后性, 且具有较好的拟合效果, 因此可以采用该方法对未来地面沉降进行预测。现假设地下水开采格局与第 4 含水层变形量与当前一致, 由此建立表达式对地面沉降进行预测。结果发现, 在该种情况下, 2019—2024 年间地面将会发生持续稳定的轻微回弹现象, 可见近年来控制地下水开采量对减轻地面沉降具有较为明显的效果。

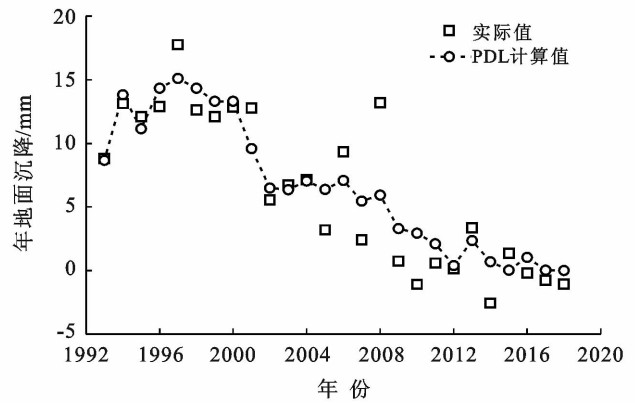
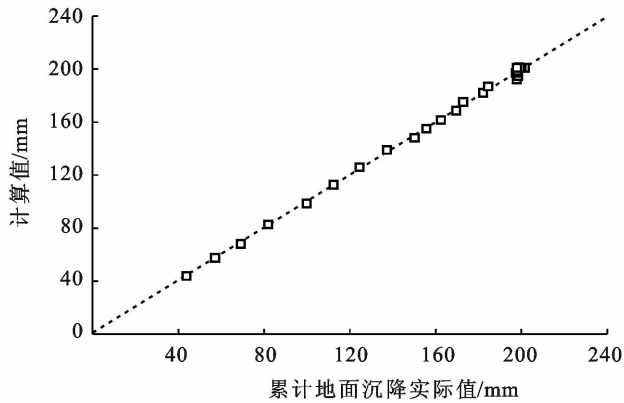


图 3 地面沉降计算值与实际值对比

## 4 结论

(1) 对上海市而言,累计地面沉降与累计抽水量和第 4 含水层累计变形之间都具有较高的正相关性,且抽水量和第 4 含水层变形量与地面沉降之间存在着滞后关系。

(2) 建立的 PDL 模型充分考虑了地下水开采量和第 4 含水层变形对于地面沉降的滞后影响,且通过建模分析发现,地面沉降的计算值与实际值之间的相对误差很小,基本在 3% 以内,计算结果也能够较好地反映出地面沉降的变化规律,验证了 PDL 模型对于上海市地面沉降分析预测的适用性。

(3) 在考虑当前开采量和第 4 含水层变形量不变的情况下对 2019—2024 年地面沉降进行了预测,结果发现 2019—2024 年间地面将会发生持续稳定的轻微回弹,可见控制地下水开采对于减轻地面沉降具有较为显著的作用。

(4) 本文基于上海市长期监测数据,结合上海市地面沉降的特征,改进了以往 PDL 沉降预测仅考虑单项影响因素的方法,同时考虑了地下水抽灌量和土层变形两个重要因素对于上海市地面沉降的影响。但由于近年来工程建设等原因对于地面沉降的影响权重逐步增大,在未来的工作中可以考虑加入工程建设等因素建立相应表达式,对上海市地面沉降做出更为合理和精准的预测。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 张建伟,胡克,岳玮,等.上海城区地面沉降及其对地下水采灌量的响应[J].长江流域资源与环境,2016,25(4):567-572.

[2] 张云,薛禹群,叶淑君,等.地下水水位变化模式下含水砂

层变形特征及上海地面沉降特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(3):103-109.

- [3] 刘江侠,张建中,刘波.滨海地区地下水开采对地面沉降的影响分析[J].海河水利,2013(1):3-5.
- [4] 范珊珊,郭海朋,朱菊艳,等.线性回归模型在北京平原地面沉降预测中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(1):70-74.
- [5] 王淼,陆阳,郑玉萍,等.基于线性回归分析的地下水开采与地面沉降相关关系研究:以天津市为例[J].中国水运,2015,15(7):108-110.
- [6] 潘云,潘建刚,宫辉力,等.天津市区地下水开采与地面沉降关系研究[J].地球与环境,2004(2):36-39.
- [7] 刘毅,龚士良.上海市地面沉降泊松旋回长期预测[J].中国地质灾害与防治学报,1998(2):77-82.
- [8] 张云,薛禹群,施小清,等.饱和砂性土非线性蠕变模型试验研究[J].岩土力学,2005(12):1869-1873.
- [9] 罗跃,叶淑君,吴吉春,等.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,2015,21(2):243-254.
- [10] 郇小龙,甄宗坤.基于自回归分布滞后模型的地面沉降预测[J].测绘工程,2015,24(9):59-61,65.
- [11] 吴蓉,李成柱.基于 Preisach 滞后模型的地面沉降预测分析[J].水文地质工程地质,2013,40(6):98-100.
- [12] 冯羽,马凤山,魏爱华,等.考虑滞后作用的地面沉降阿尔蒙分布预测模型[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(4):117-121.
- [13] 凌胜任.Logistic 模型在地面沉降预测中的应用[J].测绘工程,2016,25(4):78-80.
- [14] 凌胜任.多项式分布滞后模型在地面沉降预测中的应用[J].测绘工程,2016,25(3):64-67.
- [15] 李明霞,张云.地下水控采条件下上海土层变形特征研究[J].上海国土资源,2014,35(4):17-20.