

# 北京东部区域地面沉降现状及其发展趋势预测

罗文林<sup>1,2</sup>, 侯伟<sup>2</sup>, 韩煊<sup>2</sup>, 周宏磊<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京市勘察设计院有限公司, 北京 100038)

**摘要:** 东部沉降区是北京地面沉降比较严重的沉降区之一。该区域是北京市未来发展的重点地区之一, 包括了 CBD 及其东扩区, 通州新城。通过对该区域内大量地面沉降历史观测数据、地下水位历史观测数据以及近几年的监测成果进行整理, 分析总结了该区域内地面沉降发生、发展的特点及规律, 并建立了适用于不同地层在多层地下水动态变化条件下的地面沉降计算方法, 编制了计算程序。分析与计算结果表明: 1) 研究区的地面沉降总体上呈现自西向东, 自北向南发展的趋势, 由一个沉降中心逐渐出现多个沉降中心。2) 近几年研究区的地面沉降呈现出沉降面积迅速扩大、沉降速率加快的发展趋势。3) 未来 5 年内研究区西部地区地面沉降比较稳定, 地面沉降继续向东部与南部移动。

**关键词:** 地面沉降; 地下水开采; 一维固结; 沉降计算; 北京市

**中图分类号:** P642.26      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2015)02-0052-08

## Status and prediction of land subsidence in the eastern part of Beijing

Luo Wenlin<sup>1,2</sup>, Hou Wei<sup>2</sup>, Han Xuan<sup>2</sup>, Zhou Honglei<sup>2</sup>

(1. The college of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. National Academician & Masters' Research Office, BGI Engineering Consultants Compang Limited, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The land subsidence areas located in the eastern part of Beijing is one of the most serious land subsidence areas of Beijing. The region is one of the key areas for urban development, including the CBD, Tongzhou new town. Based on the historically monitored data and the new data a detailed analysis was performed on the history and present situation of the land subsidence in these areas, and a settlement calculation method and computer program for different formations in multi-aquifer exploitation condition were established. The results indicate that the land subsidence center move from the west to the east and from the north to the south, and the amount of the land subsidence funnel is increasing as time progressed in the study area. Moreover, the land subsidence is increasing rapidly, and the scope of land subsidence is expanding in recent years. Finally, the land subsidence center move to the east and south continue, and the land subsidence in the western part of the study area keep a low rate in the next five years.

**Keywords:** land Subsidence; groundwater withdrawal; one-dimensional consolidation; calculation of land subsidence; Beijing

地面沉降与北京城市建设、发展和人民生活密切相关, 是城市建设活动中所面临的一个重要地质灾害问题。北京的地面沉降主要发生在市区、东郊、南郊、东北郊、北郊及周边一些城镇。地面沉降具有易发性、缓变性、累进性和不可逆性等特点, 近年来的监测数据表明地面沉降再次快速发展。当大面积地面沉降量达到一定程度后会对城市道路、地下管线设施、地下轨道交通、地面桥涵及地面建(构)筑物的正常使用带来不利影响, 还会使得测绘成果不能反应最新的实际情况, 影响测绘成果的工程应用。

收稿日期: 2014-05-04

基金项目: 北京市科学技术委员会重点资助项目(Z121100005412004); 北京市科技新星计划资助项目(Z131106000413084)

通信作者: 罗文林(1978-), 男, 湖南常德人, 博士生, 高级工程师, 主要从事岩土工程、工程地质方面的设计与研究工作。E-mail: wenlinluo@163.com

北京市东部地区地层以交互沉积的粘性土、砂类土为主,多年来因地下水抽采量较大,形成了以东郊八里庄-大郊亭为中心的沉降漏斗.近年来该地区的沉降速率和沉降区范围还在不断扩大.同时,该地区也是未来北京规划和建设的重点区域(图1),包含了CBD,CBD东扩区和通州新城规划区,区域内分布着已建和在建的多条轨道交通线.因此,开展针对上述区域地面沉降发展的特点、现状以及未来趋势的研究,对该地区的城市建设工程的科学规划、建设与安全运营等具有重大意义.

根据目前的研究,引起研究区地面沉降的主要原因大量超采地下水,城市高层建筑群集中荷载与地质构造因素不是沉降的主要诱因<sup>[1-5]</sup>.抽取地下水引起的地面沉降的模拟和预测始终是地面沉降研究的热点和重点之一.目前地面沉降的计算方法有数理统计方法,一维沉降计算方法,准三维计算方法,基于真三维水流模型的算法以及三维完全耦合模型.

数理统计方法往往要求大量实测资料,在地面沉降监测起步较晚或监测资料较少的城市适用性较差<sup>[6]</sup>.考虑三维渗流和三维固结的完全耦合计算方法从理论上讲是最完善的方法,但是它的缺点是所涉及的参数过多计算工作量大,建模与计算分析时间较长,对大区域地质体刻画能力有限,而难于满足城市规划与建设中地面沉降分析的精度要求<sup>[7]</sup>.

本文在分析研究区现有地面沉降的历史与现状的基础上,建立了适用于不同地层在多层地下水动态变化条件下的地面沉降计算方法,编制了计算程序.该方法密切结合实际工程,易于工程技术人员提供掌握和使用,可以计算承压水和潜水在多层水水位变化条件下引起的沉降,考虑了地面沉降的滞后性因素和由于地下水位回升引起的回弹变形特性.

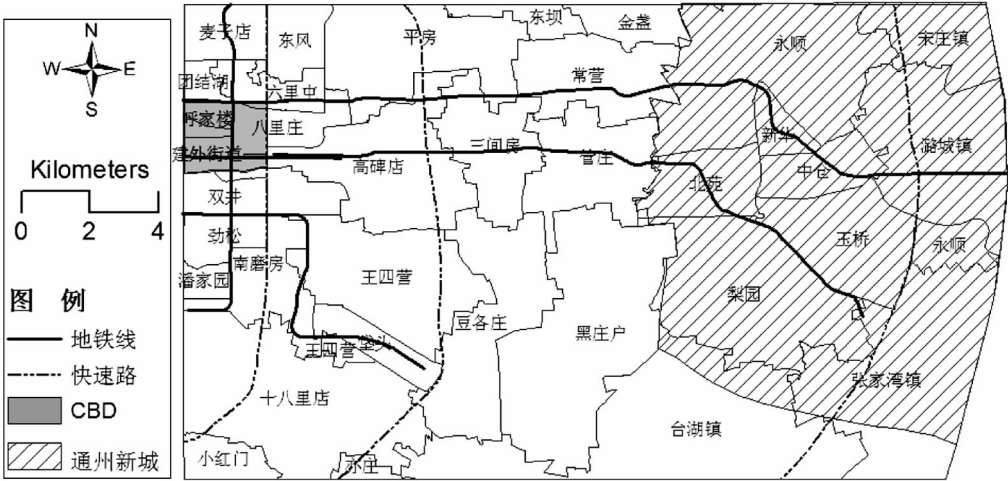


图1 研究区范围

1 地面沉降历史与现状

1.1 地面沉降的历史

地面沉降是北京平原区主要的地质灾害之一,根据历史测量资料,北京市早在1935年就已经发生了地面沉降.当时仅在西单-东单一带<sup>[8]</sup>.随着城市的建设与发展,地面沉降不断扩大,主要发生在市区、东郊、南郊、东北郊、北郊及周围一些卫星城镇.到1999年北京市平原区形成了5个地面沉降中心<sup>[9]</sup>:1)东郊八里庄-大郊亭地面沉降中心;2)东北郊朝阳区来广营地面沉降中心;3)北郊昌平区的沙河-东三旗地面沉降中心;4)顺义平各庄地面沉降中心;5)大兴区庞各庄-榆垓地面沉降中心.

根据相关文献的总结和地面沉降历史监测成果的分析,北京东部地区的地面沉降按其发展过程可以分为5个阶段<sup>[10-11]</sup>,即形成阶段、发展阶段、缓慢发展阶段、扩展阶段(图2).从各阶段地面沉降特征及相应的地下水情况来看(表1),地面沉降的发展和地下水的变化情况表现出较强的相关性<sup>[1-2]</sup>.

研究区的地面沉降“阶段中心”随着时间不断发展变化,总体上呈现自西向东,自北向南发展的趋势,由一个沉降中心逐渐出现多个沉降中心.1960~1967年,地面沉降中心在现在的东四环以内的呼家楼-东八里庄一带,沉降量不大.在1979~1989年出现了东八里庄-大郊亭2个地面沉降较大的中心.在1989~1998年地面沉降中心转移到了东四环与东五环之间的垡头以及东五环外的三间房一带.在2005~2012年出现了三间房-管庄地面沉降中心、黑庄户地面沉降中心.

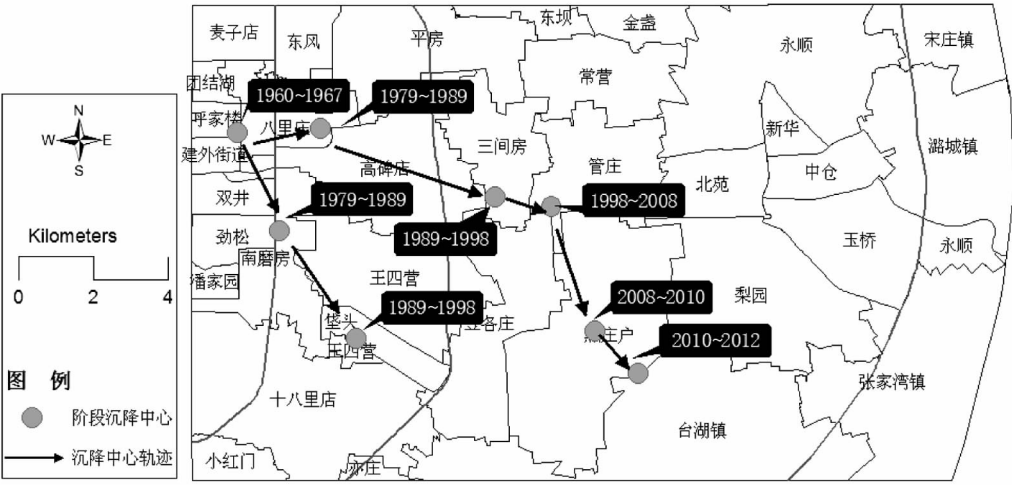


图2 不同时期地面沉降中心的发展变化图

表1 北京东部区域地面沉降的发展概况

发展时期	时间	地面沉降特征	最大累积沉降量/mm	地下水动态
形成阶段	1955 ~ 1966	地面沉降速度较小,最大平均沉降速率约 4.8 mm/a	58	1960 年以前人工开采量小,地下水位较高;1960 年以后,开采量逐年增加,地下水位缓慢下降 <sup>[1]</sup> .
	1966 ~ 1973	地面沉降速度逐渐增大,最大平均沉降速率约 28.2 mm/a	230	
发展阶段	1973 ~ 1983	地面沉降快速发展扩大. 主要特点是沉降速率大,沉降范围相对集中. 最大平均沉降速率约 30.2 mm/a	590	1971 ~ 1979 年,开采量大量增加,地下水位下降速度加快. 1980 ~ 1983 年,连续干旱,地下水超采更为严重,地下水位降至历史最低水平.
缓慢发展阶段	1983 ~ 1987	地面沉降仍在继续发展,沉降区面积扩展迹象不明显. 最大平均沉降速率约 15.5 mm/a	652	1983 ~ 1985 年连续干旱,地下水超采更为严重,地下水位降至历史最低水平. 从 1985 年起实限制采措施. 地下水位下降趋缓.
扩展阶段	1987 ~ 1999	地面沉降速度进一步趋于缓和,但沉降范围在缓慢向东扩展. 最大平均沉降速率约 10 mm/a	722	市区地下水开采量减小,地下水下降明显减缓;远郊区开采量不断增大,地下水位下降较大.
快速发展阶段	1999 ~ 2007	地面沉降再次处于快速发展期,沉降区东移,沉降范围不断扩大,最大平均沉降速率约 80 mm/a	765	市区水位变化趋缓,远郊部分地区地下水位下降严重.

1.2 地面沉降现状

1.2.1 地面沉降速率

根据近几年的监测成果,研究区东部与西部地区地面沉降速率较小,中部的地面沉降速率较大. 东部地区的地面沉降速率在缓慢增大. 西部地区的地面沉降速率呈逐渐减小的发展趋势,总体比较平稳. 中部的地面沉降呈快速发展的趋势.

从研究区最大沉降速率的发展趋势看来,地面沉降仍处在加速发展阶段,沉降速率还有不断增大的趋势,应该引起足够重视.

1.2.2 地面沉降范围

根据北京市《地质灾害危险性评估技术规范》,地面沉降速率大于 30 mm/a 的地区属于地面沉降发育中等的地区,沉降速率大于 50 mm/a 的地区属于地面沉降发育强烈的地区. 本文分析了 2005 ~ 2010 年和 2010 ~ 2012 年 2 个阶段不同沉降速率在研究区内的面积分布与变化情况.

2005 ~ 2009 年研究区大部分地区的沉降速率在 30 ~ 50 mm/a 之间,属地面沉降发育中等. 沉降速率小于 30 mm/a 的地区占研究区面积的 25.3%. 沉降速率大于 50 mm/a 的地区占总面积的 42.3%,其中沉降速率大于 80 mm/a 的地区仅占 7.7%.

2010 ~ 2012 年研究区大部分地区的沉降速率大于 50 mm/a,占总面积的 66.5%,属地面沉降发育强

烈,其中沉降速率大于 80 mm/a,占到了 40.5%. 其次沉降速率 30 ~ 50 mm/a 的地区为 18.9%. 沉降速率小于 30 mm/a 的地区减小到 14.3%.

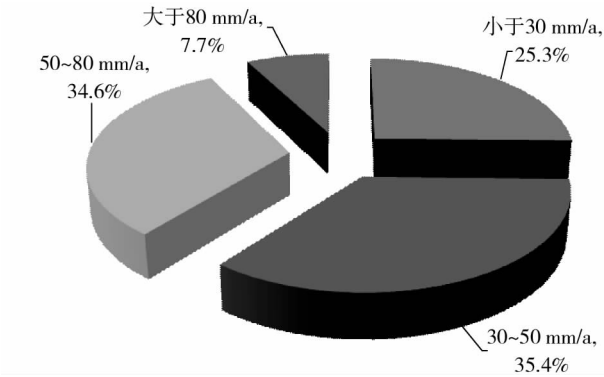


图3 2005 ~ 2009 年研究区不同沉降速率的面积分布比重

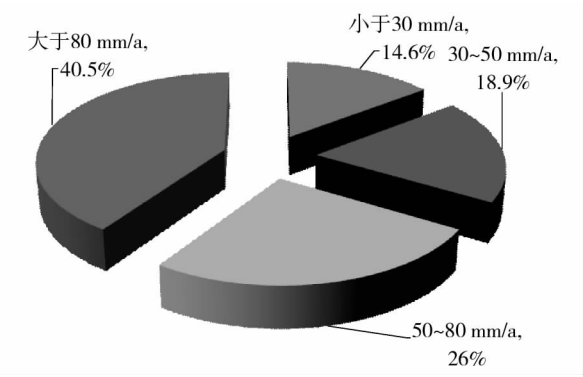


图4 2010 ~ 2012 年研究区不同沉降速率的面积分布比重

2 ALSSES 地面沉降计算方法

地下水的超采是引起北京市地面沉降的主要原因. 北京市地下水条件复杂,东部为多含水层,主要包括层间水潜水和承压水. 其中,承压水又可分为浅层承压水、中深层承压水以及深层承压水等<sup>[1]</sup>. 由于地下水位开采层位的不同,不同含水层组的水位变化也不尽相同,它们对地面沉降的影响程度也不同. 为了能够反映北京地区复杂的地层和地下水特点对地面沉降的影响,本文基于一维固结理论,建立了适用于不同地层在多层地下水动态变化条件下的地面沉降计算方法,并利用 Fortran95 语言编制了计算程序. 该程序可以计算承压水和潜在在多层水水位变化条件下引起的沉降,合理考虑了地面沉降的滞后性因素,也能计算由于地下水位回升引起的回弹变形特性. 不仅适用于大区域的地面沉降计算,也可用于工程建设场区地下水位变化引起的地面沉降计算.

2.1 计算方法的基本原理

孔隙水压力变化是引起沉降的主导因素,由于含水层与粘性土层(相对隔水层)颗粒大小、排列结构等不同,导致其固结变形性质存在较大的差别<sup>[12]</sup>.

粘性土层的沉降是由于相邻含水层边界的超孔隙水压力变化导致粘性土向含水层释水而引起的土层压缩固结变形. 受粘性土渗透性、孔隙比以及压缩性等因素的影响,粘性土的固结时间差别很大,一般用固结度表示.

在单面排水条件下,粘性土的平均固结度可近似表示为

$$U = 1 - \frac{5.8}{\pi^2} \exp[-\pi^2 T_v/4]. \tag{1}$$

式中:  $T_v = \frac{C_v t}{H^2}$ ,  $C_v = \frac{k(1 + e_0)}{\gamma_w \alpha_v}$ ,  $C_v$  为土的固结系数,  $t$  为固结时间,  $H$  为粘性土层厚度,  $k$  为土的渗透系数,  $e$  为土的初始孔隙比,  $\alpha_v$  为土的压缩系数,  $\gamma_w$  为水的容重.

在双面排水条件下,粘性土的平均固结度可近似表示为

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp(-\pi^2 T_v/4). \tag{2}$$

某一时刻粘性土的固结沉降量  $S_t$  计算公式为

$$S_t = U_t S_\infty. \tag{3}$$

式中:  $S_\infty$  为最终固结沉降量.

含水层和压缩层沉降机理不同,由于含水层超孔隙水压力消散较快,沉降很快完成,可近似无时间效应,故采用最终沉降的计算结果.

$$S = \frac{\Delta h \gamma_w H_w}{E_s}. \tag{4}$$

式中,  $E_s$  为地层的压缩模量,  $\Delta h$  为水位下降高度,  $H_w$  为含水层的初始厚度.

在地面沉降与地下水位变化的滞后性方面采用细化粘性土层和含水层的方法. 合理反映了粘性土层的释水固结特征.

地下水位回升会引起地面沉降的回弹. 地面沉降的回弹以含水层的弹性回弹为主. 本文在进行地面沉降回弹计算时以回弹模量替代压缩模量, 回弹模量的取值可根据试验结果和地区经验确定. 本文建议在北京地区砂卵石地层的回弹模量可取压缩模量的 3~4 倍.

2.2 不同地下水开采条件下的地面沉降计算

在地下水的开采中, 存在对单一含水层开采和多含水层开采的不同情况. 根据开采强度的不同, 存在单一含水层或多层出现局部疏干的情况. 本文根据不同的地下水类型、排水条件等对沉降计算公式分别进行讨论.

2.2.1 单面排水条件

1) 开采潜水层地下水

上部潜水含水层初始的孔隙水压力分布如图 5 中  $ab$  线所示, 粘性土中的孔隙水压力沿  $bc$  分布. 当地下水位下降由  $h_0$  下降至  $h_1$  时上部含水层的孔隙水压力较小, 有效应力增加, 孔隙水压力沿  $de$  分布. 粘性土顶面的孔隙水压力减小了  $u_1 = \gamma_w(h_0 - h_1)$ , 粘性土开始向含水层中释水, 随着粘性土中超孔隙水压力的逐渐消散, 土层发生固结变形, 孔隙水压力最终沿着  $ec$  分布. 下部含水层的孔隙水压力不变(图 5).

在降水过程中上部含水层的沉降计算公式为

$$S = \frac{\gamma_w}{E_s} \left[ \frac{(h_0 - h_1)^2}{2} + (h_0 - h_1)(h_1 - z_2) \right]. \tag{5}$$

式中:  $S$  为沉降量,  $h_i$  为水位标高,  $z_i$  为地层的标高,  $u$  为孔隙水压力,  $H$  为相对隔水层厚度.

粘性土层的最终沉降计算公式为  $S_\infty = \frac{\gamma_w a_v}{1 + e_0} \frac{(h_0 - h_1)(z_2 - z_3)}{2}.$  (6)

某一时刻粘性土的固结沉降量由式(2)、式(3)进行计算.

在开采潜水含水层时, 水位降低会引起总应力的减小从而产生一部分卸荷回弹<sup>[13]</sup>. 但远小于有效应力的增量, 故本文采用总应力不变进行分析.

2) 开采承压含水层

开采粘性土层上部承压含水层时, 开采前上部含水层与粘性土层的初始孔隙水压力如图 6 中  $abc$  线分布. 随着地下水的开采承压水头逐渐降低. 在地下水位下降至含水层顶板之前(如下降至  $h_1$ ), 上部含水层的孔隙水压力沿  $de$  分布, 粘性土顶面的孔隙水压力减小了  $u_1 = \gamma_w(h_0 - h_1)$ , 粘性土开始向上部含水层中释水, 随着粘性土中超孔隙水压力的逐渐消散, 土层发生固结变形, 孔隙水压力最终沿着  $ec$  分布.

在这种情况下, 上部含水层的沉降计算公式为

$$S = \gamma_w \frac{(h_0 - h_1)(z_1 - z_2)}{E_s}.$$
 (7)

粘性土层的最终沉降计算公式为

$$S_\infty = \frac{\gamma_w a_v}{1 + e_0} \frac{(h_0 - h_1)(z_1 - z_2)}{2}.$$
 (8)

如上部含水层的水位由  $h_0$  下降至  $h_2$ , 含水层的承压性消失. 上部含水层的孔隙水压力沿  $fg$  分布, 粘性土顶面的孔隙水压力减小了  $u_1 = \gamma_w(h_0 - h_2)$ , 粘性土层中孔隙水压力最终沿着  $gc$  分布(图 6). 在承压水头低于含水层顶标高时含水层的压缩厚度会随水位的降低而减小. 在水位承压性变化前后的沉降应分开计算, 粘性土层的沉降计算方法不变.

此时, 上部含水层的沉降计算公式为

$$S = \frac{\gamma_w}{E_s} \left[ \frac{2h_0 - z_1 - h_2}{2} (z_1 - h_2) + (h_0 - h_2)(h_2 - z_2) \right]. \tag{9}$$

粘性土层的最终沉降计算公式为

$$S_\infty = \frac{\gamma_w a_v}{1 + e_0} \frac{(h_0 - h_2)(z_2 - z_3)}{2}.$$
 (10)

某一时刻粘性土的固结沉降量由式(2)、式(3)进行计算.

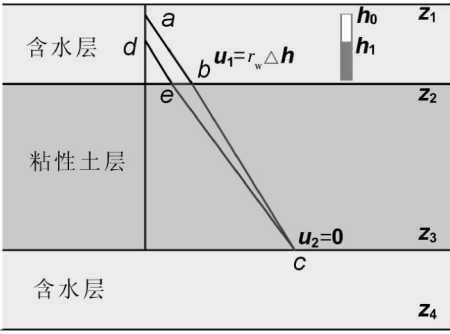


图 5 潜水含水层开采的孔隙水压力变化

当开采粘性土下部承压含水层时,含水层与粘性土层的计算分析方法与此相同,不再进行详述.

2.2.2 双面排水条件

1) 上下部都为承压含水层

粘性土及上下部含水层的初始孔隙水压力如图 7 中  $abcd$  线所示. 同时开采上下部承压含水层,在含水层的水头小于含水层顶板标高以前(假定在  $h_1$  与  $h_4$ ),上下部含水层中的孔隙水压力减小,分别沿  $ef$ ,  $gh$  分布. 粘性土顶部与底部的孔隙水压力的减小,粘性土向上下含水层释水. 随着粘性土中的超孔隙水压力逐渐消散,土层发生固结变形,孔隙水压力最终沿着  $fg$  分布.

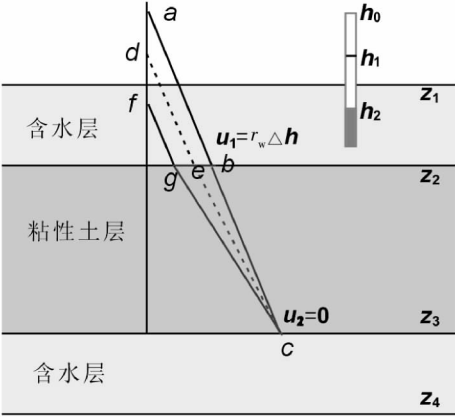


图 6 上部承压含水层开采时孔隙水压力变化  
此时,上部含水层的沉降计算公式为

$$S = \gamma_w \frac{(h_0 - h_1)(z_1 - z_2)}{E_s} \tag{11}$$

下部含水层的沉降计算公式为

$$S = \gamma_w \frac{(h_3 - h_4)(z_3 - z_4)}{E_s} \tag{12}$$

粘性土层的最终沉降计算公式为

$$S_\infty = \frac{\gamma_w a_v}{1 + e_0} \frac{h_0 - h_1 + h_3 - h_4}{2} (z_2 - z_3) \tag{13}$$

某一时刻粘性土的固结沉降量由式(2)、式(3)进行计算.

如含水层的水位分别由  $h_0, h_3$  下降至  $h_2, h_5$ , 上部含水层的承压性消失. 含水层的孔隙水压力分别沿  $ij, kn$  分布. 粘性土中的孔隙水压力最终沿着  $jk$  分布.

此时,上部含水层的沉降计算公式为  $S = \frac{\gamma_w}{E_s} \left[ \frac{2h_0 - z_1 - h_2}{2} (z_1 - h_2) + (h_0 - h_2)(h_2 - z_2) \right]$ .

下部含水层的沉降计算公式为  $S = \gamma_w \frac{(h_3 - h_5)(z_3 - z_4)}{E_s}$ .

粘性土层的最终沉降计算公式为  $S_\infty = \frac{\gamma_w a_v}{1 + e_0} \frac{h_0 - h_2 + h_3 - h_5}{2} (z_2 - z_3)$ .

某一时刻粘性土的固结沉降量由式(2)、式(3)进行计算.

如随着地下水的开采,下上部含水层承压性都消失,此时粘性土的沉降方法不变. 下部含水层沉降的计算方法参考后续介绍.

2) 上部为潜水层开采、下部为承压含水层开采

粘性土及上下部含水层的初始孔隙水压力如图 8 中  $abcd$  线所示. 含水层的水位分别由  $h_0, h_3$  下降至  $h_1, h_4$  时,上部含水层的孔隙水压力沿  $ef$  分布,下部含水层的孔隙水压力沿  $gh$  分布. 粘性土中孔隙水压力消散后最终沿  $fg$  分布.

此时,上部潜水含水层的沉降计算与式(5)相同.

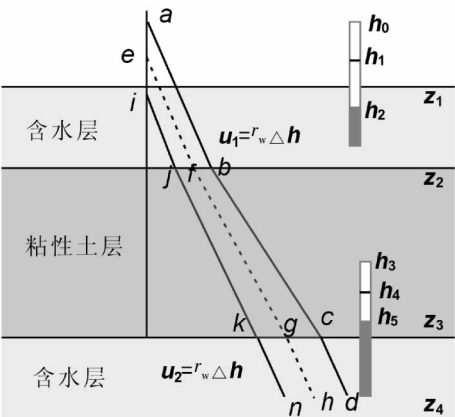


图 7 同时开采上下承压含水层时孔隙水压力变化

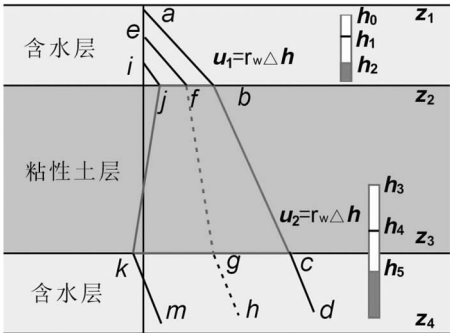


图 8 上部为潜水层开采、下部为承压含水层开采时孔隙水压力变化

下部含水层在水位降至含水层顶板以上时,含水层的沉降与式(12)相同,粘性土的最终沉降与式(13)相同.如下部含水层水位降至含水层顶板以下时,含水层的沉降计算公式为

$$S = \frac{\gamma_w}{E} [(2h_3 - h_5 - z_3)(z_3 - z_4) + 1]$$
, 粘性土的最终沉降公式为

$$S_{\infty} = \frac{\gamma_w a_v}{1 + e_0} \frac{(h_3 - h_5)(z_2 - z_3)}{2}.$$

2.3 计算方法的验证

本文采用北京市天竺地面沉降监测站的地面沉降分层标 F3-5 的观测数据进行了对比分析<sup>[14]</sup>. 根据监测结果,2004.4~2009.11 水位下降总计 14 m,地面沉降量达 130 mm 左右. 图 9 是计算与实测结果对比情况,由于计算中未考虑 2004 年 4 月以前水位变化对沉降的影响(无水位观测数据),故前期计算结果小于实测值. 随着前期水位变化对沉降的影响逐渐减小,计算结果和实测结果逐渐趋于一致.

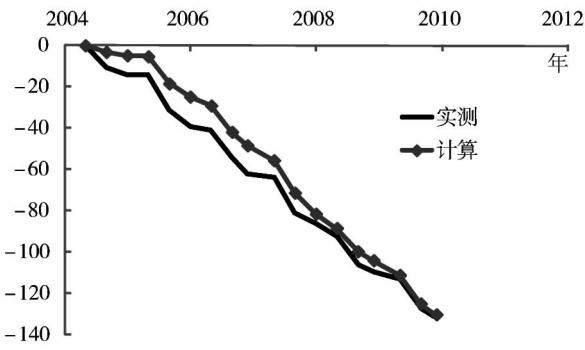


图 9 地面沉降计算与实测结果对比

3 地面沉降发展趋势预测

本文首先对未来 5 年(2014~2018 年)的地面沉降进行分析预测,然后根据目前北京市的水资源利用现状及未来发展规划,对研究区中远期的地面沉降发展趋势进行探讨.

3.1 未来 5 年地面沉降发展预测

1) 地下水位的预测

随着政府和社会对地下水资源的保护措施的不断加强,北京地区地下水的开源与节流措施并举,北京市地下水水位在未来存在普遍上升的可能,但依据目前的城市规划建设规模,近期的地下水开采量不会发生大的变化. 研究区大部分地区的地下水水位尤其是深层地下水会继续下降.

本文根据多年的地下水位分层监测数据对研究区的多层地下水位进行了拟合分析,对近期的地下水位变化进行了预测. 限于篇幅本文不对地下水位的分析与预测情况进行详细介绍. 根据预测结果,2014~2018 年研究区浅层地下水位变化不大,中深层地下水的降落漏斗主要在管庄-通州一带,有向南延伸与豆各庄漏斗中心连通的趋势. 深层地下水的降落漏斗主要在管庄-梨园-张家湾一带.

2) 地面沉降发展预测

根据研究区 2014~2018 年地下水位的预测结果,本文分析了 2014~2018 年研究区的地面沉降的发展情况. 根据计算结果,未来 5 年研究区西部地区地面沉降比较稳定,地面沉降继续向东部与南部移动,发生地面沉降较大的地区主要是三间房、管庄、豆各庄、黑庄户、王四营以及梨园与台湖地区,预计最大地面沉降将接近 600 mm.

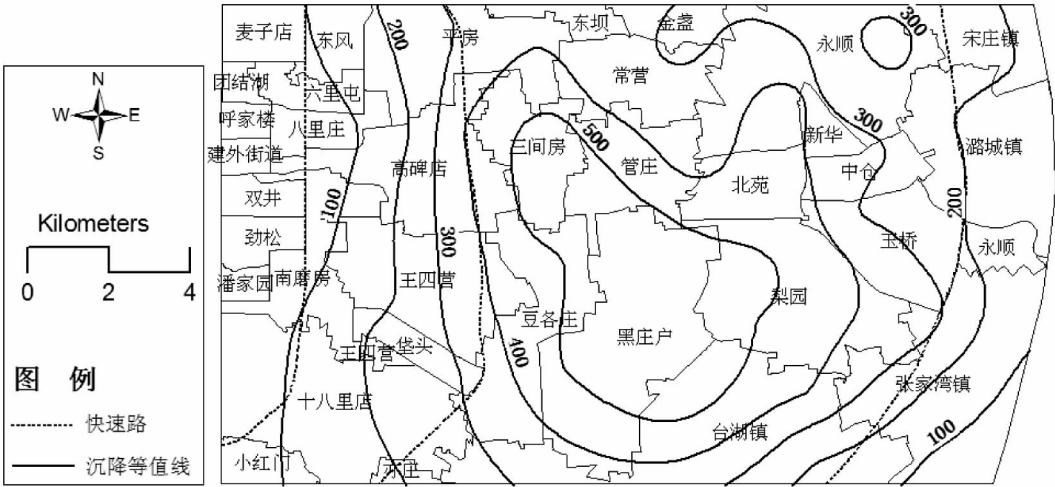


图 10 2014~2018 年研究区地面预测

### 3.2 中远期地面沉降发展探讨

中远期地面沉降的预测与北京市地下水的变化趋势密切相关. 由于地下水位的变化趋势和变化速率与城市发展规划、社会学、经济学等一系列复杂因素有关,但也存在很多不确定性.

根据《北京市“十二五”时期水资源保护及利用规划》,“十二五”期间北京将建立最严格的水资源管理制度,全面推进节水型社会建设,确保全市水源安全、供水安全、水环境安全和防洪安全. 虽然随着政府和社会对地下水资源的保护措施的不断加强,北京地区地下水的开源与节流措施并举,再加上2014年底南水北调的进京,北京市地下水水位在未来存在普遍上升的可能. 同时也必须看到,北京的城市建设仍处于快速发展期,人口不断增加,北京地区近期地下水仍处于下降期.

综合上述分析,研究区中远期的地面沉降仍会继续发展,但会在一定程度上得到控制,地面沉降的速率将逐渐趋缓.

## 4 结论

1)研究区的地面沉降“阶段中心”随着时间不断发展变化,总体上呈现自西向东,自北向南发展的趋势,由一个沉降中心逐渐出现多个沉降中心.

2)近几年研究区的地面沉降呈现出沉降面积迅速扩大、沉降速率加快的发展趋势. 地面沉降速率已经接近甚至超过了当前国内外地面沉降问题比较严重的地区,应该引起足够重视.

3)基于北京地区复杂的地层和地下水特点,本文基于一维固结理论,建立了适用于不同地层在多层地下水动态变化条件下的地面沉降计算方法,并编制了计算程序. 计算结果与地面沉降监测结果的对比分析表明了计算方法的有效性.

4)根据地面沉降的预测结果,2014~2018年研究区西部地区地面沉降比较稳定,地面沉降继续向东部与南部移动,发生地面沉降较大的地区主要是三间房、管庄、豆各庄、黑庄户、王四营以及梨园与台湖地区,预计最大地面沉降将接近600 mm.

## 参考文献:

- [1] Luo W L, Shen X K, Zhou H L, et al. Study of the features and the influential factors of land subsidence in the eastern part of Beijing, China[J]. ASCE Geotechnical Special Publications, 2014(152): 208-2018.
- [2] 罗文林, 沈小克, 周宏磊, 等. 北京东部区域地面沉降对城市规划与建设的影响研究[C]//第四届全国岩土与工程学术大会论文集, 北京: 中国岩石力学与工程学会等, 2013.
- [3] 贾三满. 北京地面沉降机理研究初探[J]. 城市地质, 2007, 1(2): 20-26.
- [4] 王若柏, 周伟, 李凤林. 天津地区构造沉降及控沉远景问题[J]. 水文地质工程地质, 2003(5): 12-17.
- [5] 周建伟, 李菊凤, 周爱国, 等. 济宁市城区地面沉降的成因和规律性探讨[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2005, 20(1): 6-9.
- [6] 许烽霜, 余恕国, 沈水龙. 地下水开采引起地面沉降预测方法的现状与未来[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(3): 352-356.
- [7] 叶栋成. 安徽省阜阳市地面沉降模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [8] 孙承志, 高云安, 胡晓天, 等. 北京市东郊地面沉降分析[J]. 岩土工程界, 2002, 11(5): 27-29.
- [9] 贾三满. 北京市地面沉降发展及对城市建设的影响[J]. 城市地质, 2006, 2(1): 13-18.
- [10] 董得茂, 叶超, 周作鑫, 等. 北京地面沉降现状形成机理与控制对策[C]//全国地面沉降学术研讨会论文集, 上海: 上海市地质调查研究院, 2002.
- [11] 北京市地质矿产勘查开发局. 北京地质灾害[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 147-165.
- [12] 金玮泽, 骆祖江, 陈兴贤, 等. 地下水渗流与地面沉降耦合模拟[J]. 地球科学, 2014, 39(5): 611-618.
- [13] 周载阳. 地下水开采引起地面沉降的机理研究[J]. 工程勘察, 2012(3): 22-26.
- [14] 杨艳, 贾三满, 王海刚. 北京平原区地面沉降现状及发展趋势分析[J]. 上海地质, 2010, 116(4): 23-28.