

# 地下水开采引发的地面沉降易发性 区划及控制措施

杨 勇<sup>1</sup> 郑凡东<sup>1</sup> 刘立才<sup>1</sup> 窦艳兵<sup>2</sup> 贾三满<sup>3</sup>

(1.北京市水利科学研究所,北京 100048;2.北京市水文总站,北京 100039;3.北京市水文地质工程地质大队,北京 100195;)

**摘要:**北京市地下水严重过量开采,造成了地下水位大幅下降,引发了大面积的地面沉降。为避免更大范围的地面沉降,本文通过选取粘土层厚度、地下水水位下降速率、地下水开采量三个影响因素,根据各自影响程度确定影响因子权重,利用 GIS 叠加方法开展地面沉降易发性分区。结合南水北调水资源配置提出地面沉降防控对策,为地下水开采布局优化及地面沉降防治提供科学依据。

**关键词:**地面沉降;易发性分区;南水北调;防控对策

**中图分类号:**P641.8;P642.26 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)02-0653-06

北京是中国的首都,是政治、文化中心。近年来由于人口增长、城市化进程加快,使得水资源过度开发,导致了地面沉降等地质灾害,严重影响和制约了北京市经济社会可持续发展。在经历了地面沉降形成阶段、发展阶段和扩展阶段后,现阶段北京市地面沉降已经进入快速发展阶段<sup>[1]</sup>,如果继续大规模超采地下水,有可能造成更大范围的地面沉降,产生灾害性后果。

由于南水北调推迟进京至 2014 年,加大了北京市地下水的开采压力<sup>[2]</sup>。为实现水务对经济发展的强有力支撑,依然需要大幅超采地下水。为避免地下水超采引发更大规模的地面沉降,缓解地面沉降的危害程度,急需研究地面沉降易发性分区以及南水北调来水前后地面沉降防治对策。课题成果对于合理调整地下水开采布局,提高地质环境安全,保障轨道交通、建设和安全运营,促进北京市经济建设具有重要意义,并对地面沉降防治管理提供决策依据。

## 1 地面沉降影响因素

地面沉降易发区划分过程中,充分考虑平原区

地下水的水文地质条件及现有地下水开发利用现状,选取粘土层厚度、地下水水位下降速率、地下水开采量三个因素划分地面沉降易发性分区。

### 1.1 粘土层厚度

北京平原区第四纪地层的分布具有典型的山前冲洪积扇特征。山前为以残坡积相与洪坡积相的砂、砾石及粘性土为主构成洪积扇或台地,平原则为冲积相的沉积物构成扇形平原。

总体说来,从西、北部到东、南部,地层的沉积厚度逐渐增大,层次增多。城近郊区第四纪地层厚度由西向东逐渐加厚,但局部变化较为显著。受古地形及地质构造的影响,在下伏基岩面隆起的地区,第四系厚度较小,而在凹陷地区的沉积厚度较大。在八宝山至东直门以南的地区,第四系厚度变化较均匀,由西部的 20 余米,向东渐增至 100 多米。在八宝山北部地区,由于位于第四纪凹陷带,第四系沉积厚度达 200 m 以上。东部来广营、酒仙桥、高碑店以东的地区同样是位于第四纪强烈下陷地区,第四系沉积厚度更大,该区北东边缘的古城、天竺一带,沉积厚度达 700 m 以上。而在城区西郊,因下伏基岩面隆起,

公主坟、白堆子,北郊龙王堂附近的第四系沉积厚度最小。在公主坟和白堆子附近仅 10 余米。

尽管第四纪地层的沉积厚度受基岩起伏的控制,总体而言,在平原区的冲洪积层,由西向东,岩性由粗变细,层次由少变多(图 1)。西部地区以单一砂卵砾石层组成,向东过渡到砂砾石与粘土互层,中粗砂、砂砾石与粘土互层,中细砂、粉砂与粘土互层,主要含水层的颗粒越来越细,含水层层位越来越多。粘土层最厚处集中在昌平马池口、沙河、北七家、朝阳的金盏、楼梓庄以及通州的宋庄等地,粘土层厚度大于 200 m。而山前地带基本由砂卵砾石组成,粘土层厚度小于 50 m<sup>[9]</sup>。由图 1 可以看出,沉降中心区与粘土层厚度大的地区基本一致,粘土层厚度是影响地面沉降的主要内因。

### 1.2 地下水水位下降速率

根据水位观测点 2005—2010 年数据,并插值得到地下水水位下降年速率,分成 5 个区,其中,年下降速率大于 2.5 m 的地区主要集中在平谷、顺义、昌平和朝阳等地,主要原因在于水厂和应急水源地开

采。而房山与通州等地,地下水水位呈微弱上升趋势(图 2)。

### 1.3 地下水开采量

地下水开采量按照区县统计,包括自备井、水源井、应急水源地,分成 5 个区,其中年开采量大于 1.2 亿 m<sup>3</sup> 集中在顺义北小营地区、平谷王都庄水源地、房山长阳和大兴榆垓等地。年开采量小于 3000 万 m<sup>3</sup> 集中在北京城区(图 3)。

## 2 地面沉降易发性区划及评价

### 2.1 因子权重选择

地面沉降易发性分区将利用 GIS 中的叠加分析功能<sup>[4]</sup>,对粘土层厚度、地下水水位下降速率、地下水开采量 3 个影响因子叠加分析,划分地面沉降易发性分区。

因子的权重选择依据各因子对地面沉降发生的影响程度而定。粘土层厚度是地面沉降发生的决定性因素,由于抽取地下水过程中,粘土层压缩释水,产生沉降,由于其低渗透性,即使水位上升,其沉降

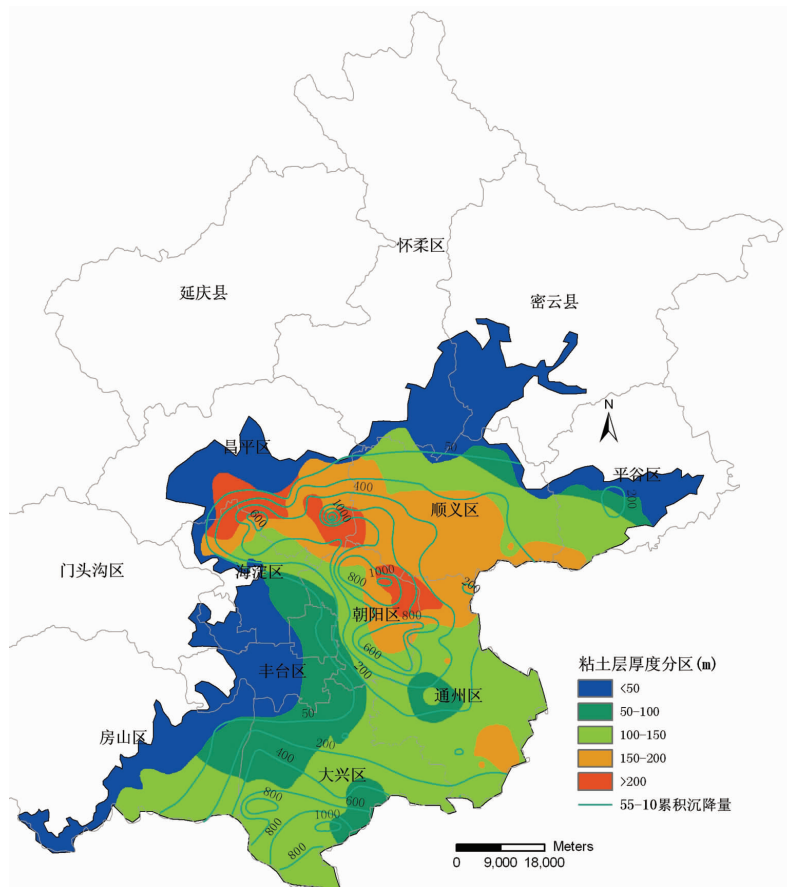


图 1 北京平原区粘土层厚度分区图

Fig.1 The subregions of clay layer thickness in Beijing plain

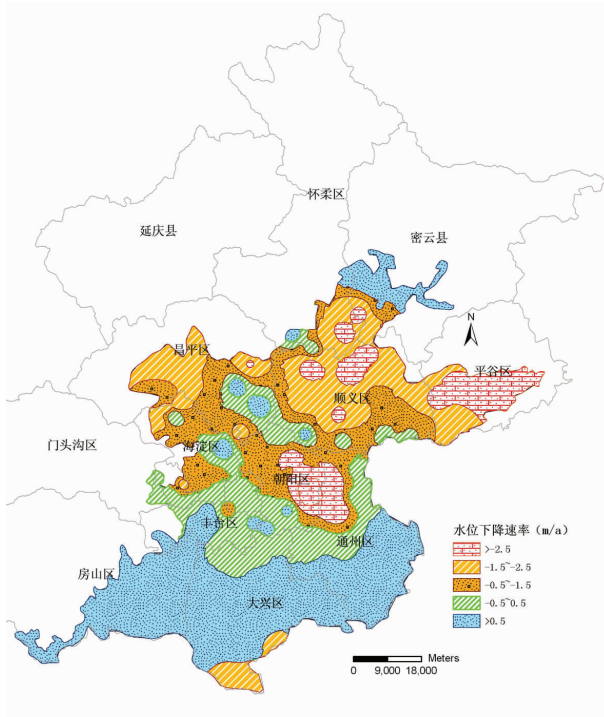


图 2 北京平原区地下水水位下降速率分区图

Fig.2 The subregions of groundwater drawdown rate in Beijing plain

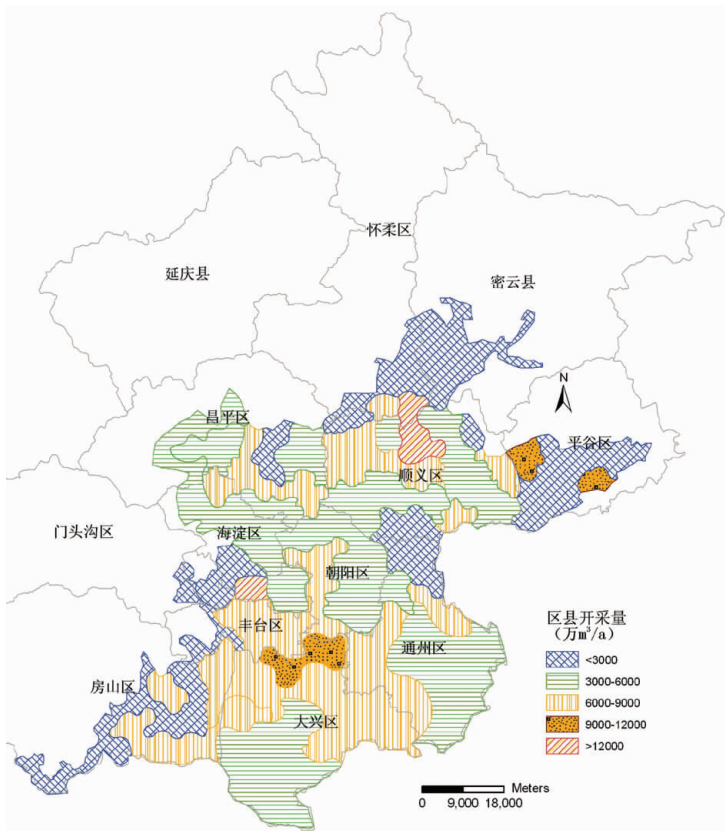


图 3 北京平原区各乡镇开采量分区图

Fig.3 The subregions of groundwater exploitation in every town of Beijing plain

也难以恢复。因此,在地面沉降易发性划分时,需要重点考虑粘土层厚度分区。为此,粘土层厚度权重范围在 50%~70%。

地下水水位下降速率与地层结构和渗透性相关,是地面沉降诱发性因素,因此,地下水水位下降速率权重范围 20%~40%。地下水开采量是该地区的开采程度,也是地面沉降诱发因素之一,并非地面沉降的决定性因素,因此,其权重范围为 5%~15%。

通过不同影响因子权重比选划分地面沉降易发区<sup>[5,6]</sup>,在影响因子权重范围内,首先确定一个权重,调整其他因子权重,利用 GIS 划分地面沉降,再与实测地面沉降范围对比,选取最符合实际地面沉降范围的一组影响因子,确定其权重。对选定的各因子分级赋值,赋值越高,表示地面沉降易发性越高,各因子的权重及其分值见表 1。

据表 1,将粘土层总厚度分成 5 个级别,粘土层厚度越大,地面沉降越易发生,赋予的分值越高,反之赋予的分值越低。将地下水水位下降速率和地下水开采量分为 5 个级别,其数值越大,赋予的分值越高;反之,分值越低。

## 2.2 易发性分区划分及评价

地面沉降易发性分区充分利用 GIS 的叠加分析功能,将各图层网格化,网格间距为 100 m×100 m,通过软件分别计算出各单元中各因子的分值与权重的乘积,并求和,得到各单元的综合评分,如公式所示。

$$ConV_{ij} = \sum_{k=1}^3 P_k V_{ij,k}$$

式中:  $ConV_{ij}$  为第  $(i,j)$  单元的综合评分;  $P_k$  为第  $k$  层的权重;  $V_{ij,k}$  为第  $k$  层第  $(i,j)$  单元对应因子分级的分值。

按照综合评分值进行五级分区,形成地面沉降易发性分区(图 4)。五级分区依次为不易沉降区、一般沉降区、中等沉降区、较易沉降区、易发沉降区。

### (1) 不易沉降区

该区集中在山前冲洪积扇顶部地区,主要分布于怀柔、密云、房山、昌平等山前地带。由于该区的含水层结构较为单一,含水层介质为砂卵砾石层,富水性较强,过量开采地下水不易引发地面沉降。

### (2) 一般沉降区

一般沉降区集中在昌平区、房山黄村、长阳、平

表 1 地面沉降易发性分区的因子分级及分值  
Table 1 The grades and values of the factors in land subsidence susceptibility zoning

因子	权重	因子分级	分值
粘土层总厚度(m)	60%	>200	5
		150-200	4
		100-150	3
		50-100	2
		<50	1
地下水水位 下降速率(m/a)	30%	<-2.5	5
		-2.5~-1.5	4
		-1.5~-0.5	3
		-0.5~0.5	2
		>0.5	1
地下水开采量 分区(万 m <sup>3</sup> )	10%	>12000	5
		9000~12000	4
		6000~9000	3
		3000~6000	2
		<3000	1

谷等地。该区含水层夹有粘土层,富水性较好,如果有节制的超量开采地下水,一般不会发生地面沉降。

### (3) 中等沉降区

该区主要分布在冲洪积扇的中部地区,地层结构为含水层、粘土层互层,富水性一般,过量开采地下水将会引起地面沉降,但范围较小。

### (4) 较易沉降区

较易发沉降区主要分布在顺义、朝阳、昌平、大兴和通州的东南部。该区处于冲洪积扇的中下部,富水性较差,粘土层可压缩性强,过量开采地下水较易引起地面沉降。

### (5) 易发沉降区

易发沉降区主要分布在昌平北七家、朝阳金盏、顺义天竺、后沙峪以及大兴榆垓等地。该区可压缩性粘土层厚度大,水位下降速率快,过量开采地下水易引发地面沉降。

## 3 地面沉降控制措施建议

由于地下水超采是产生地面沉降的主要原因,因此,进行地下水资源合理配置是缓解地面沉降的有效措施。综合国内外地面沉降控制措施,针对北京市水资源利用现状,提出北京市地面沉降控制措施。

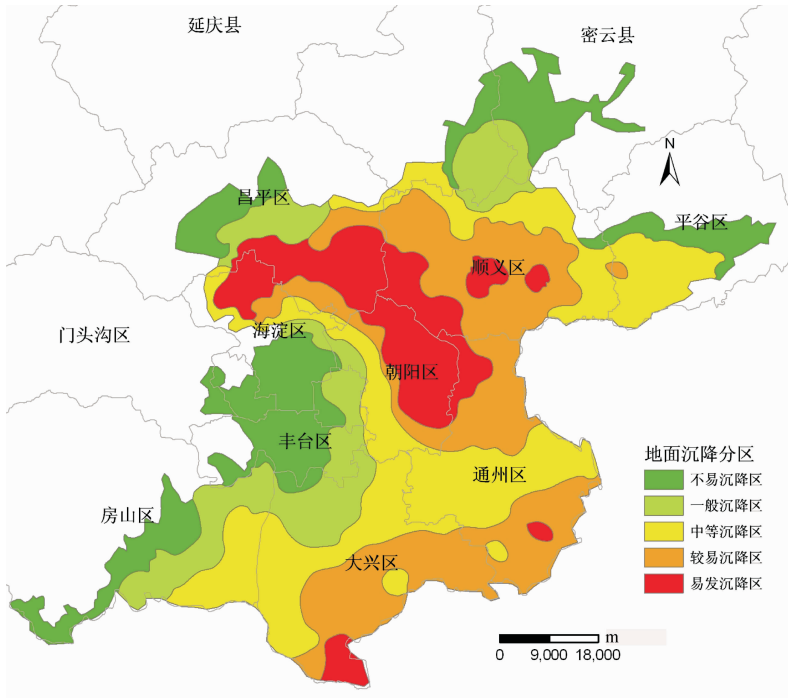


图 4 北京平原区地面沉降易发性分区

Fig.4 Land subsidence susceptibility zoning in Beijing plain

### 3.1 南水北调进京前水资源配置建议

#### (1) 稳定供水能力

挖掘当地水资源供水潜力和加大其他水源利用力度,在地面沉降易发区严格控制地下水开采量,有条件的地区在满足经济社会发展需水要求的前提下,适当压采地下水超采量。中心城自备井在尽可能保证现状供水能力不严重衰减的情况下可基本维持现状供水量。对顺怀、平谷、张坊及马池口等水源地实施续采改造工程,稳定供水能力。

#### (2) 继续加大再生水的利用量,保证环境用水需求

合理用水、优水优用,地下水和优质地表水主要用于人们生活饮用水,对于城市环境、绿化、河湖等用水,充分利用再生水资源。

#### (3) 利用外调水源

利用京石段应急调水工程从河北调水。建立与河北省调水机制,落实调水方案,确保密云、官厅水库来水量。

### 3.2 南水北调进京后水资源配置建议

利用南水北调水供水,进一步减少水源地供水,在地面沉降易发区减采地下水,涵养地下水,恢复地下水位,减缓地面沉降。

#### (1) 补偿调节密云水库

利用以南水北调和密云水库为双水源的水厂,丰枯互济,在南水北调可以多供水时尽可能使用南水北调的水,使密云水库多存水,少放水。

#### (2) 逐步加大压采地下水超采量

遵循先压深层承压水、后压浅层地下水;先压地面沉降易发区、后压较易发区;先压生产用水、后压生活用水;先压工业用水、后压农业用水的压采次序,循序渐进地实施受水区地下水压采工作。重点压减地面沉降易发区的地下水开采量。使地下水有一个较快的恢复期,缓解地面沉降。

#### (3) 回灌地下水

在冲洪积扇顶部等易于回灌地区,将一部分南水北调水进行人工回灌,增加地下水补给量,涵养和恢复地下水,缓解地面沉降。

## 4 结论

(1) 考虑粘土层厚度、地下水开采量、地下水下降速率三种影响因素,利用 GIS 技术划分地面沉降易发分区。将北京平原区划分为五个区域,依次为不易沉降区、一般沉降区、中等沉降区、较易沉降区、易发沉降区。易发性沉降区主要分布在昌平北七家、朝阳金盏、顺义天竺、后沙峪以及大兴榆垓等地。该

区可压缩性粘土层厚度大,水位下降速率快,过量开采地下水易引发地面沉降。

(2)提出了合理调整南水北调进京前后地下水开采布局等地面沉降防治措施。南水北调来水前,在地面沉降易发区控制地下水开采量。南水北调来水后,循序渐进地实施受水压地下水压采工作,重点压减地面沉降易发区的地下水开采量。在南水北调水充裕的条件下,实施地下水回灌,恢复地下水水位,缓解地面沉降。

### 参考文献(References):

- [1] 田芳,郭萌,罗勇,等.北京地面沉降区土体变形特征[J].中国地质,2012,39(1):236-242.  
Tian Fang, Guo Meng, Luo Yong, et al. The deformation behavior of soil mass in the subsidence area of Beijing [J]. *Geology in China*, 2012, 39(1):236-242(in Chinese with English abstract).
- [2] 田雨,雷晓辉,孙甲岚,等.南水北调通水前北京市水资源情势及应对措施[J].南水北调与水利科技,2011,9(2):60-63.  
Tian Yu, Lei Xiaohui, Sun Jialan, et al. Current situation and corresponding solutions of water resource carrying capacity in Beijing before the completion of South-to-North Water Diversion Project [J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9(2):60-63(in Chinese with English abstract).
- [3] 刘予,叶超,贾三满.北京市平原地面沉降区含水岩组合可压缩层划分[J].分析研究,2007,2(1):10-15.  
Liu Yu, Ye Chao, Jia Sanman. Division of water-bearing zones and compressible layers in Beijing's land subsidence areas[J]. *Analysis and Research*, 2007, 2(1):10-15(in Chinese with English abstract).
- [4] 王国良.地面沉降危险性分级标准初探[J].上海地质,2006,(4):39-43.  
Wang Guoliang. Preliminary studies on dangerous grading standard of land-subsidence [J]. *Shanghai Geology*, 2006, (4):39-43 (in Chinese with English abstract).
- [5] 陈蓓蓓.北京地区地面沉降监测及风险评估研究[D].北京:首都师范大学,2009.  
Chen Beibei. Research on Land Subsidence Monitoring and Risk Assessment in Beijing area [D]. Beijing:Capital Normal University, 2009(in Chinese with English abstract).
- [6] 姜媛,贾三满,王海刚.北京地面沉降风险评估与管理[J].中国地质灾害与防治学报,2012,23(1):55-60.  
Jiang Yuan, Jia Sanman, Wang Haigang. Risk assessment and management of land subsidence in Beijing Plain [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2012, 23 (1):55-60(in Chinese with English abstract).

## Susceptibility zoning and control measures on land subsidence caused by groundwater exploitation

YANG Yong<sup>1</sup>, ZHENG Fan-dong<sup>1</sup>, LIU Li-cai<sup>1</sup>, DOU Yan-bing<sup>2</sup>, JIA San-man<sup>3</sup>

(1. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing, 100048, China; 2. Beijing Hydraulic Center, Beijing 100039, China; 3. Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China)

**Abstract:** Excessive artificial extraction of groundwater has caused the continuous decline of groundwater levels and, as a result, triggered a large area of land subsidence. To avoid a wider range of land subsidence, the authors used the clay layer thickness, the drawdown rate of groundwater level and groundwater exploitation as three impact factors to carry out studies. In accordance with their respective extent of impact, the impact factor weights were determined, the overlay method in GIS was used to divide land subsidence into susceptibility zoning. In combination with water resource allocation of South-to-North water transfer, this paper has proposed the control measures on land subsidence, thus providing a scientific basis for layout optimization of groundwater exploitation and land subsidence.

**Key words:** land subsidence; susceptibility zoning; South-to-North water transfer; control measures

**About the first author:** YANG Yong, male, born in 1983, doctor, long engages in the study of groundwater resources; E-mail: steven\_yy@163.com.