

doi: 10.12029/gc20160429

雷坤超, 罗勇, 陈蓓蓓, 等. 北京平原区地面沉降水准监测网点位优化[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1457-1467.

Lei Kunchao, Luo Yong, Chen Beibei, et al. Optimization design of land subsidence levelling network of Beijing Plain[J]. Geology in China, 2016, 43(4): 1457-1467(in Chinese with English abstract).

北京平原区地面沉降水准监测网点位优化

雷坤超¹ 罗 勇¹ 陈蓓蓓² 郭高轩¹ 贾三满³ 田 芳¹ 周 毅¹

(1.北京市水文地质工程地质大队,北京 100195;2.首都师范大学环境过程与数字模拟省部共建国家重点实验室培育基地,北京 100048;3.北京市地质研究所,北京 100120)

摘要:长期超量开采地下水所诱发的地面沉降已经成为北京平原区最主要的地质灾害。文中针对现有水准监测网点位布设存在的不足,分别选取水文地质单元分区、主要开采层地下水位下降速率、可压缩层总厚度 3 类影响要素图件,基于 GIS 空间分析平台,划分北京平原区地面沉降综合影响因素分区,共划分 448 个分区。在此基础上,进行地面沉降水准监测网点位优化设计,新增水准点 220 个。同时,采用地质统计学中克里金插值误差的方差作为精度评价指标,分别绘制监测网优化前后标准差分布等值线图,发现优化后的标准差明显小于优化之前,证明以地质环境背景为依托,利用地面沉降综合影响因素分区图进行水准监测网点位优化设计的方法是可行的,可以作为今后地面沉降监测点布设的基础依据。

关键词:地面沉降;水准网;GIS;影响因素;优化

中图分类号:P642.26 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)04-1457-11

Optimization design of land subsidence levelling network of Beijing Plain

LEI Kun-chao¹, LUO Yong¹, CHEN Bei-bei², GUO Gao-xuan¹,
JIA San-man³, TIAN Fang¹, ZHOU Yi¹

(1. Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing, 100195 China; 2. College of Resources Environment and Tourism Capital Normal University, Beijing, 100048; 3. Beijing Institute of Geology, Beijing 100120 China)

Abstract: Land subsidence induced by long-term excessive groundwater withdrawal has constituted a major geological disasters in Beijing plain. This paper is based on the deficiency of present leveling network, selected three kinds of influence factors, including the partition of hydrology geology unit, the groundwater level decreased rate of main exploitation layers and the total thickness of compressed layers. Based on GIS spatial analysis platform, the partition map of comprehensive affecting factors of Beijing plain is created, and divided into 448 partitions. On this basis, we optimized design the land subsidence leveling network, added 220 leveling points. Using geostatistical Kriging interpolation error variance as the accuracy evaluation index, we drew the standard deviation distribution contour map of land subsidence leveling network, found that the standard deviation of the optimized is lower

收稿日期:2015-07-05;改回日期:2015-11-08

基金项目:北京市科技计划项目(Z131100005613022)、国家自然科学基金重点项目(41130744/D0107)、国家自然科学基金青年项目(41401492/D010702)、北京市自然科学基金(8162043)和北京市地面沉降监测系统年运行费项目(PXM2015_158305_000011)联合资助。

作者简介:雷坤超,男,1986年生,硕士,工程师,长期从事地面沉降与地裂缝监测研究工作;E-mail:leikunchao123@126.com。

than before. Proved that based on the background of geological environment, using the partition map of comprehensive affecting factors to optimize design the land subsidence leveling network is feasible. This method can be used as the basis of construction of leveling points.

Key words: land subsidence; leveling network; GIS; affecting factors; optimize

About the first author: LEI Kun-chao, male, born in 1986, master, engineer, long engages in the study of land subsidence and ground fissure; E-mail: leikunchao123@126.com.

Fund support: Supported by Beijing Municipal Science and Technology Project (No. Z131100005613022), National Natural Science Foundation of China (No. 41130744/D0107, No. 41401492/D010702), Beijing Natural Science Foundation (8162043) and Project of Annual Operation Cost of Land Subsidence Monitoring System in Beijing (No. PXM2015_158305_000011).

1 引 言

超量开采地下水引发的地面沉降已成为全世界广泛关注的地质环境问题^[1]。目前,中国超过50个城市和地区出现了不同程度的地面沉降,主要包括长江三角洲、华北平原和汾渭盆地^[2-3]。地面沉降的快速发展已经成为制约我国经济社会可持续发展的重要因素^[4]。因此,无论是从国家层面,还是地方政府均十分重视地面沉降监测网的建设工作,其中水准监测网是目前地面沉降监测中最为重要的监测手段之一。

截至2013年,北京平原区累计沉降量超过50 mm的区域面积已达4300 km²,约占平原区总面积的68%,最大累计沉降量达到1495 mm。为详细查明平原区地面沉降分布特征及演化规律,对地面沉降的发生、发展进行有效监测,北京市每年均开展区域地面沉降一等水准测量工作,测量里程超过3500 km,并且在主要沉降区内布设水准监测点约500个,采用平均布点原则,点间距离为3~5 km,均匀分布在各沉降区内。但随着平原区地面沉降的快速发展,沉降区范围不断扩大,现有地面沉降水准监测网在监测点数量和点位优化选取等方面日益表现出明显的不足。

据相关文献,地面沉降水准监测网点位优化设计主要基于测绘学、数理统计学等相关理论知识对监测网点位布设数量的冗余性问题进行系统分析,查找监测点布设数量的最优解^[5-7],而综合利用影响地面沉降发生、发展的地质环境背景条件指导监测点布设的相关研究在文献上难以查到。因此,如何将地面沉降监测点的布设与地质环境背景进行有机结合,实现不同地质单元内地面沉降的有效监测,充分发挥监测点的最大监测效益,是目前地面沉降监测过程中亟需解决的难点之一。

本文在综合分析平原区地面沉降多种影响因素基础上,基于GIS空间分析平台,划分北京平原区地面沉降综合影响因素分区。以此为基础,进行地面沉降水准监测网点位优化设计。同时,采用地质统计学中克里金插值算法分别计算监测网点位优化前后标准差分布情况,定量评价监测点布设的合理性,为今后地面沉降水准监测点的布设提供基础依据。

2 研究区概况

北京市位于华北平原西北边缘,地形总体西北高,东南低,东南部为平原区,由五大水系(拒马河水系、永定河水系、北运河水系、潮白河水系、蓟运河水系)联合作用形成冲积扇群构成。平原区第四纪沉积物分布广泛,厚度变化很大,从西北向东南,从山前向平原,第四系厚度逐渐增大,层次增多,沉积物颗粒逐渐变细。在西、北部的山前地带和河流冲洪积扇的中上部,第四系厚度为20~40 m,为单一的砂、卵砾石层或砂、卵砾石顶部覆盖薄层黏性土。在冲洪积扇中下部、冲积平原地区,由于新构造运动的影响,使之接受了巨厚的沉积物,厚度达到数百米,在沉积凹陷中心最厚达1000余米,岩性也逐渐过渡为砂、砂砾石、黏性土层相互交错出现^[8-12]。

与上述第四系沉积特征相对应,北京平原区含水层系统从西北向东南逐渐由单一含水层向多层含水层系统过渡,在垂向上可划分为3个主要含水岩组:第一含水岩组(潜水层和浅层承压含水层)为第四系全新统和上更新统冲洪积物,底板埋深约25 m和80~100 m;第二含水岩组(中深层承压含水层)为第四系中更新统,含水层为多层结构,岩性以中粗砂为主,部分含砾,底板埋深300m左右;第三含水岩组(深层承压含水层)为第四系下更新统,为多层结构,以中粗砂、砾石为主,底界为第四系基底^[13]。

北京平原区内包含多条断裂,主要的第四纪活动断裂有北东(北北东)向的黄庄—高丽营断裂、顺义断裂、南苑—通县断裂、夏垫—马坊断裂和北西向的南口—孙河断裂。平原区地面沉降的发生、发展受到几大活动断裂的控制并与第四纪沉积物的厚度、岩性及结构特征密切相关,主要发生在几大活动断裂交接部位的沉积凹陷中心,以及几大河流所形成的冲洪积扇中下部地区^[14]。北京平原区地面沉降分布特征与上述地质环境背景在空间展布形态上具有较好的一致性(图1)。基于以上地质环境背景,北京市地面沉降监测点的布设主要集中在冲洪积扇群中下部的多层含水层结构区,在冲洪积扇顶部单一结构区内并没有布设沉降监测点(图2)。

3 研究方法

3.1 地面沉降综合影响因素分区方法

地面沉降综合影响因素分区是反映地面沉降变化特征在空间上的划分,综合了影响地面沉降的多种因素,主要包括:地形地貌、含水层结构特征、地下水系统分区、主要开采层地下水位下降速率以及可压缩层总厚度等,对各种因素进行综合分析后绘制3张要素图,分别为水文地质单元分区图、主要开采层地下水位下降速率分区图和可压缩层总厚度分区图。基于GIS空间叠置分析功能,将3张要素图进行系统叠加得到地面沉降综合影响因素分区图。其基本思想是利用布尔运算上“or”关键字,即输入图层or叠加图层,将原来的图形要素分割成新要素,新要素综合了原来两层或多层的属性。

其数学表达式为:

$$\{x|x \in A \cup B\} \quad (A, B \text{ 为输入的两个图层}) \quad (1)$$

地面沉降综合影响因素分区图中的每个分区均包含了影响地面沉降发生、发展的全部属性信息。因此,在利用该图进行监测点布设时,需保证每个分区内至少应有一个地面沉降监测点,以便监测不同地质单元内地面沉降细节变化特征。同时,在监测点布设过程中还需综合考虑分区内重要构筑物及重大线性工程分布情况,结合《地面沉降水准测量规范(DZ/T0154-95)》中的布点要求,即:监测区内普通水准点间距为0.5~1.5 km,非监测区间距为2~4 km,重点勘查区(沉降区)水准点密度平均为每平方千米至少1~1.5点,非重点勘查区平均每平方千米至少0.5~1.0点,开展地面沉降水准监测点的布设。

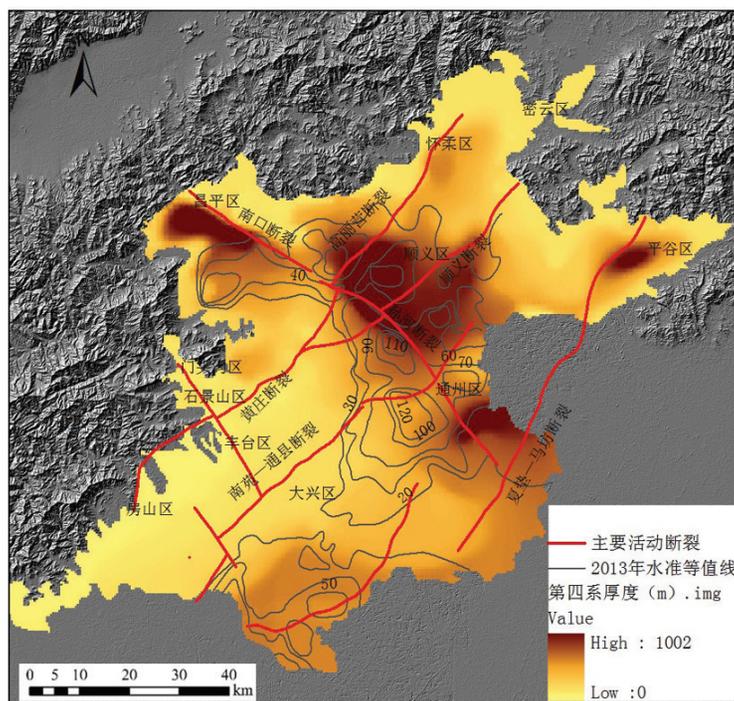


图1 北京平原区地质背景条件
Fig.1 Geologic background of Beijing plain

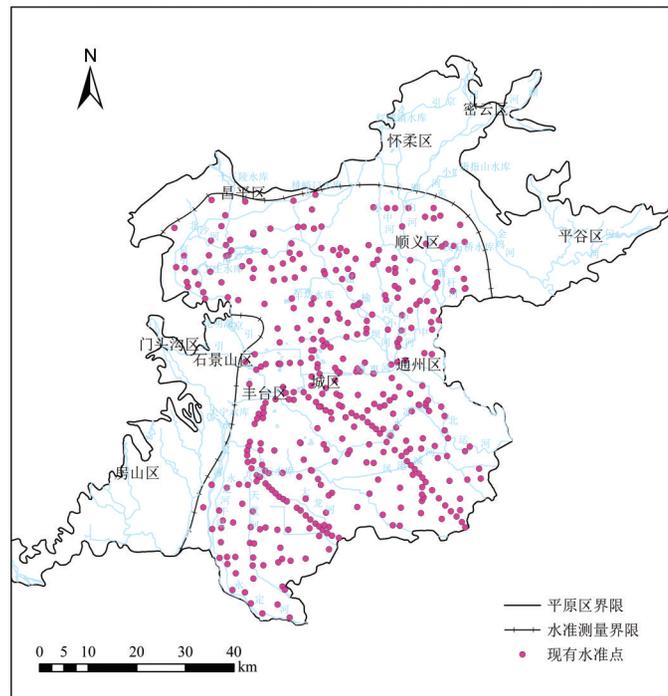


图2 北京平原区水准点分布位置
Fig.2 Distribution of leveling points in Beijing plain

3.2 精度评价方法

利用地面沉降综合影响因素分区图布设完沉降监测点之后,需要对监测网点位布设的合理性进行精度评价。其中,克里金插值误差的方差可以作为评价监测网质量的一个标准^[15]。其特点是:计算插值误差的方差只与监测点的个数和位置(监测网的密度)、空间相关结构(方差函数)有关,而与实测值无关^[15-16]。因此,可以预先设计地面沉降监测网的密度,并且以克里金插值误差方差最小值为目标函数进行监测网点位的优化设计。

基本原理如下,克里金插值 Z_0^* 定义为观测值的加权平均值:

$$Z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_0^i Z_i \quad (2)$$

插值的精度定义为插值的误差的方差:

$$\text{var}(Z_0^* - Z_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_0^i \gamma(\chi_i - \chi_0) + \mu \quad (3)$$

式中 Z_0^* 为克里金插值; Z_i 表示在位置 χ_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的观测值; λ_0^i 为克里金权值; $\gamma(\chi_i - \chi_0)$ 为方差函数(Variogram)值; μ 为拉格朗日乘子。

4 结果分析

4.1 地面沉降综合影响因素分区图编制

4.1.1 水文地质单元分区图

水文地质单元分区图是由地形地貌图、含水层结构特征图和地下水系统分区图叠加而成。其中,地形图根据北京平原区数字高程模型DEM数据绘制地形等高线,再转换成地形高程分区图;地貌图把北京平原区划分为一级阶地、二级阶地、山前高台地和近代河床及漫滩4种地貌类型;含水层结构特征图根据北京平原区含水层特征划分为单层结构区、双层结构区和多层结构区3种类型;地下水系统分区图是在横向上将北京平原划分为5个地下水子系统,分别为:拒马河—大石河冲洪积扇孔隙水子系统、永定河冲洪积扇孔隙水子系统、温榆河冲洪积扇孔隙水子系统、潮白河冲洪积扇孔隙水子系统、蓟运河冲洪积扇子系统。基于GIS空间叠置分析功能,将以上3种因素进行综合、叠加得到平原区水文地质单元分区图(图4)。将北京平原区共划分成62种不同的类型区。

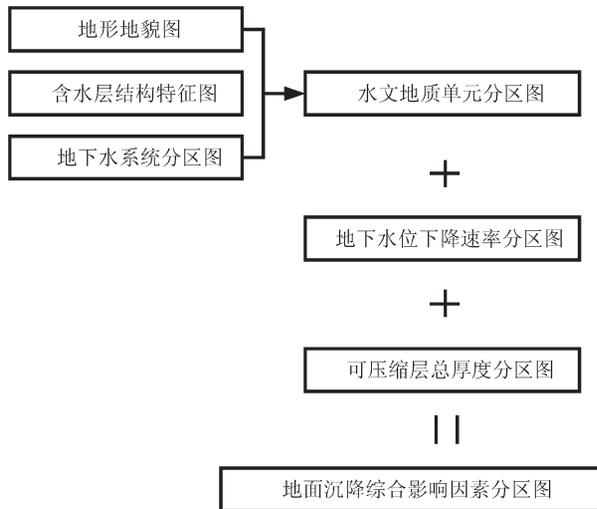


图3 地面沉降综合影响因素分区技术路线图
Fig.3 Technology road map of comprehensive affecting factors of land subsidence partition

4.1.2 地下水位下降速率分区图

地面沉降的发生、发展与区域地下水位的变化密切相关,根据平原区地面沉降监测站内多年分层监测资料显示:目前,北京市地面沉降主要贡献层位分布在100~180 m范围内,与第四系孔隙水主要开采层位十分吻合。因此,地下水位下降速率是进行地面沉降研究必须考虑的重要因素。地下水位下降速率分区图是根据地下水主要开采层位,利用平原区第二承压含水层(顶底板高度为100~180 m)水位观测点2009—2013年数据,以水位下降或上升1 m为等值线间距,插值得到地下水位下降年速率分区图(图5),共划分成7个区。

4.1.3 可压缩层总厚度分区图

北京平原区第四系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、砾石及黏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^[17]。地层沉积厚度从西、北到东、南逐渐增大,层次逐渐增多,颗粒逐渐变细。可压缩层总厚度分区主要依据北京平原区第四系地层的沉积时代、成因类型、岩性、结构、厚度、物理力学性质等,将粉质黏土、黏土或粉土为主的间夹薄层粉砂或粉细砂的地层概化为压缩层^[18]。北京平原区第四系沉积层共划分为3个压缩层组,即第一压缩层组(Q_4+Q_3),第二压缩层组

(Q_2)和第三压缩层组(Q_1),分别将3个压缩层组顶底板之间的厚度进行累加计算得到可压缩层总厚度分区图(图6)。由于冲洪积扇顶部及中上部为单一含水层结构区,第四系沉积物主要为单一砂卵砾石层,颗粒粗,厚度大,抗压强度高,可压缩性低,不易产生压缩变形。因此,本次绘制的可压缩层总厚度分区图并没有考虑该区域。经多年地面沉降监测资料分析发现,地面沉降发育较为严重的地区可压缩层厚度也较大,两者之间吻合较好。因此,可压缩层厚度是影响地面沉降的主要因素之一,本次以可压缩层垂向变化20 m为等间距,共划分成11个分区。

4.1.4 地面沉降综合影响因素分区图

通过对平原区地面沉降多种影响因素进行综合分析,分别绘制了水文地质单元分区图、主要开采层地下水位下降速率分区图和可压缩层总厚度分区图3类要素图件。基于GIS空间叠置分析功能,将3张要素图件进行系统叠加得到地面沉降综合影响因素分区图。本次共划分了448个地面沉降综合影响因素分区(图7)。

4.2 点位优化设计与精度评价

4.2.1 监测点优化设计

根据地面沉降水准监测网点位优化设计方法,以地面沉降综合影响因素分区图为基础进行新增监测点选取。首先,将现有水准点投影到地面沉降综合影响因素分区图上,然后在没有监测点分布的分区内,结合《地面沉降水准测量规范(DZ/T0154-95)》以及区内重要构筑物和重大线性工程等重要基础设施分布情况布设新的监测点。目前,北京平原区现有地面沉降水准监测点共497个,在地面沉降综合影响因素分区图上布设新的监测点220个(图8)。本次地面沉降监测网点位优化设计主要集中在几大冲洪积扇的中下部地区,在单一含水层结构区并没有布设新的地面沉降监测点。

4.2.2 精度评价

利用地面沉降综合影响因素分区图进行新增水准监测点选取之后,需要对监测网点位布置的合理性进行精度评价。文中采用克里金插值误差的方差作为水准监测网优化前后精度评价指标。在地质统计学分析中,克里金插值算法是建立在一定的假设基础上,其在一定程度上要求所有数据值具

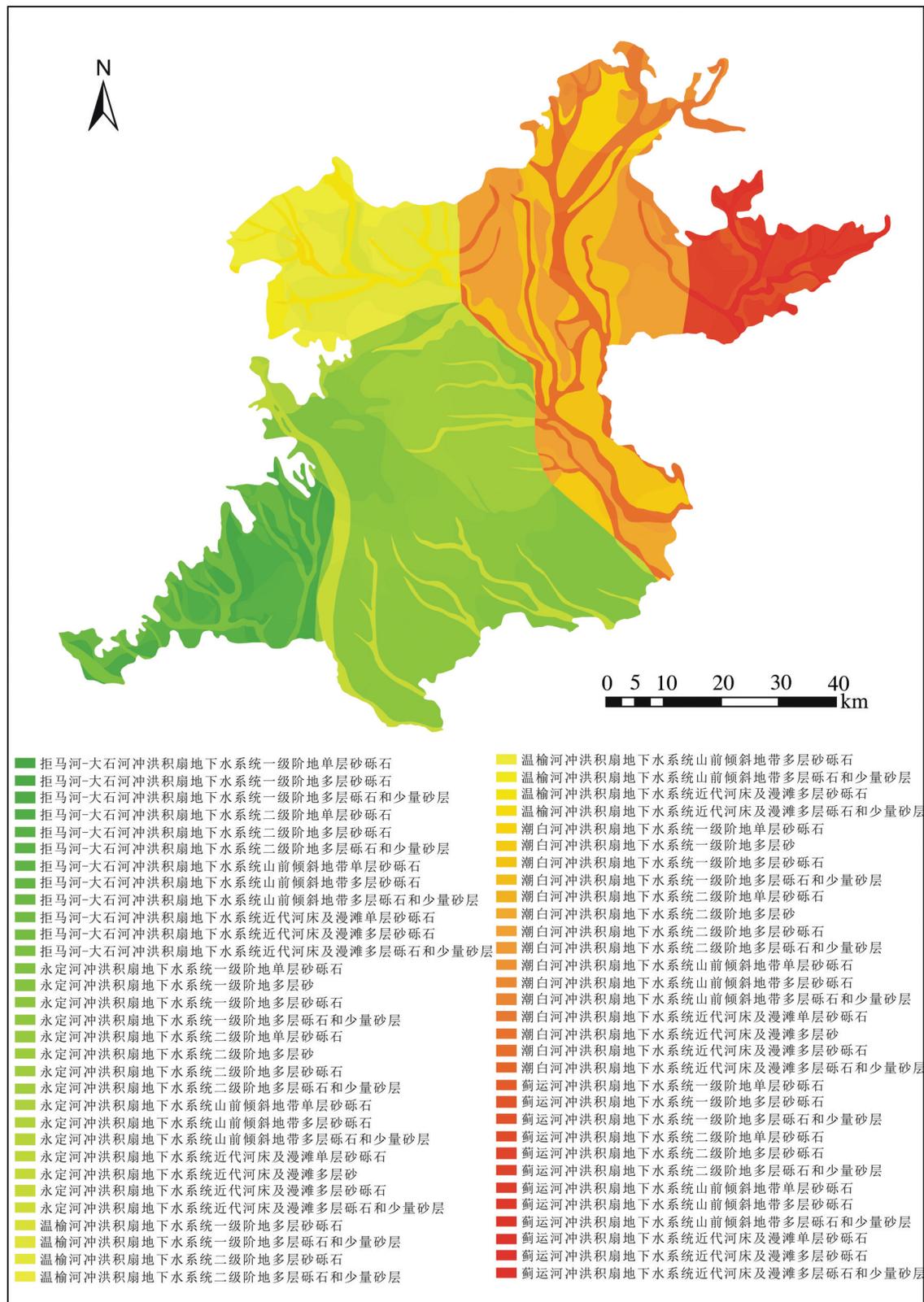


图4 北京平原区水文地质单元分区图
Fig.4 Hydrogeological unit partition map of Beijing plain

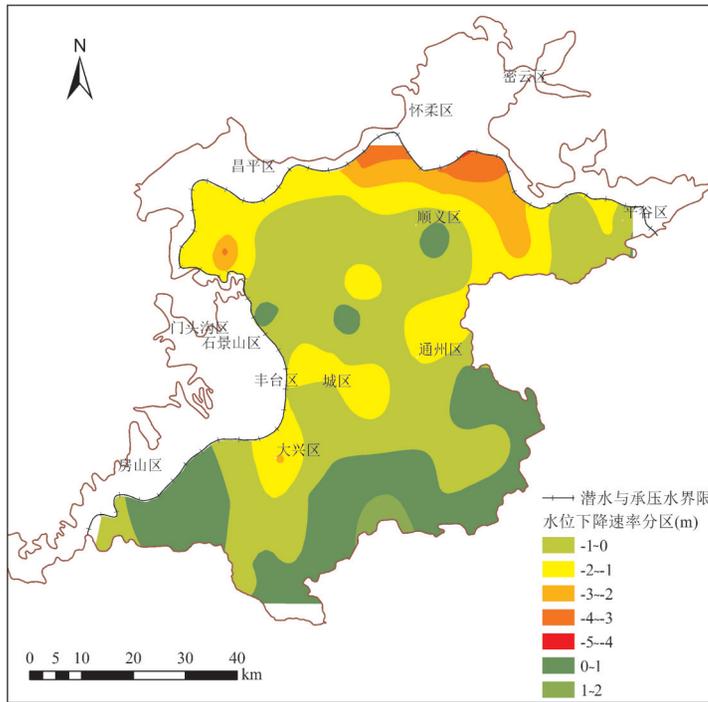


图5 北京平原区主要开采层水位下降速率分区图

Fig.5 Drawdown rate of water level partition map of main production layer of Beijing plain

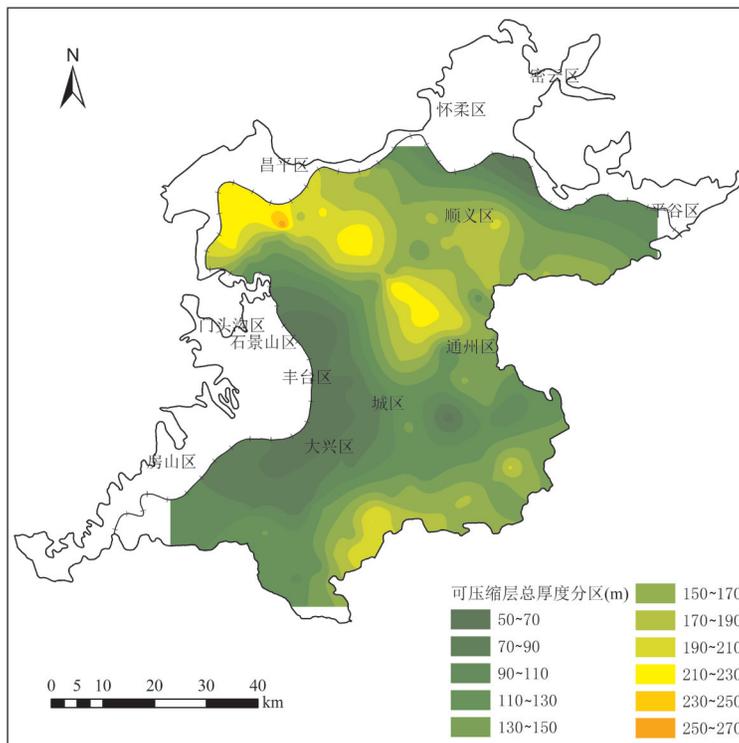


图6 北京平原区可压缩层总厚度分区图

Fig.6 The total thickness partition map of compressed layers of Beijing plain

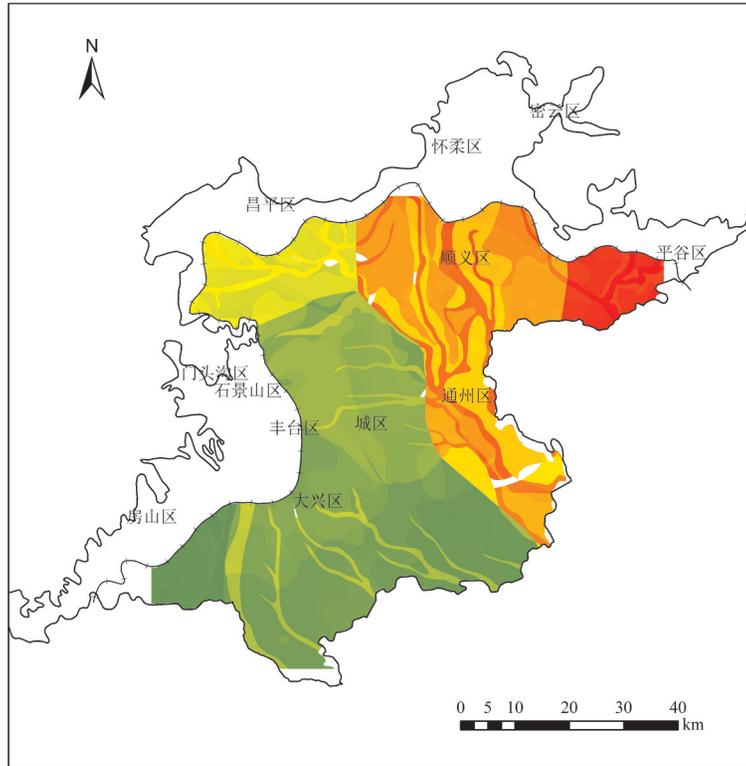


图7 北京平原区地面沉降综合影响因素分区图

Fig.7 Partition map of comprehensive affecting factors in Beijing plain

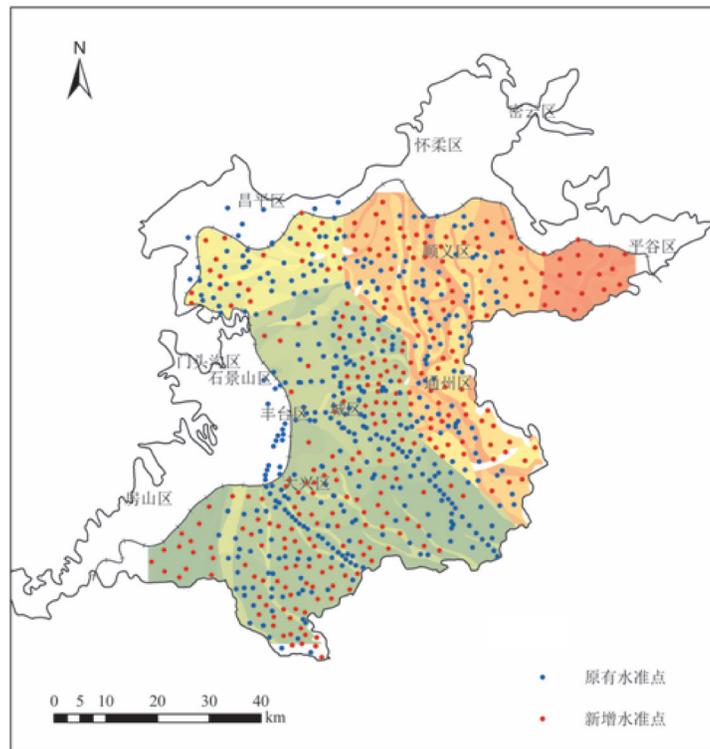


图8 北京平原区地面沉降监测点优化设计图

Fig.8 Optimization design of land subsidence monitoring of Beijing plain

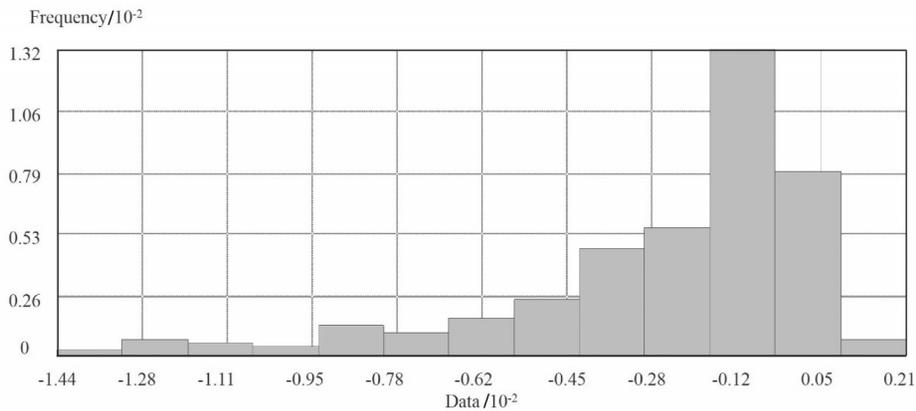


图9 地面沉降水准监测点高程变化量统计直方图

Fig.9 Statistic histogram of height variation of land subsidence leveling points

有相同的变异性,同时所用假设数据都服从正态分布。因此,在应用克里金插值算法评价地面沉降监测网点位优化选取结果之前,需要对所采用的插值数据进行前期分析,检验数据的分布特征,查明选用数据是否服从正态分布。由于克里金插值误差的方差只与监测点的个数和位置有关,而与实测值无关。因此,文中选取北京平原区2013年现有地面沉降水准监测点高程变化量进行插值分析,结果如图9所示。

通过统计直方图可以看出,2013年度地面沉降水准监测点高程变化值近似服从正态分布,符合克里金插值的要求。同时,对选用数据其他相关信息进行了统计分析,如表1所示。

在对选用的点位数据进行前期分析之后,分别绘制地面沉降水准监测网点位优化前后标准差等值线图(图10,图11)。可以看出,优化后的水准监测点克里金插值的残值误差明显小于优化前,证明监测点布设是合理的。

5 结 论

(1)文中综合考虑北京平原区地面沉降多种影响因素,分别绘制了水文地质单元分区图、主要开采层地下水位下降速率分区图以及可压缩层总厚度分区图三类影响要素图件。采用GIS空间分析技术,将各要素图件进行系统叠加,编制完成了北京平原区地面沉降综合影响因素分区图,共划分448个分区。

(2)以地面沉降综合影响因素分区图为基础,进行了水准监测点点位优化选取研究,新增水准点

表1 地面沉降水准监测点高程变化量统计信息

Table 1 Statistic information of height variation of land subsidence leveling points

| 统计项 | 数值 |
|---------|---------|
| 现有水准点个数 | 497 |
| 最小值 | -144.2 |
| 最大值 | 21.1 |
| 平均值 | -25.764 |
| 标准差 | 36.134 |
| 峰度 | 5.4972 |
| 偏态 | -1.6489 |
| 1/4分位数 | -34.53 |
| 中数 | -15.1 |
| 3/4分位数 | -5.2 |

220个。以克里金插值误差的方差作为精度评价指标,绘制了优化前后标准差分布等值线图,发现优化后的水准监测网标准差明显小于优化之前的水准网,证明利用地面沉降综合影响因素分区图进行水准监测网点位优化设计是可行的,可以作为今后地面沉降监测点布设的基础依据。

地面沉降水准监测点的合理布设对于正确揭示地面沉降分布特征及演化规律具有重要作用。只有优化的水准监测网才能详细获取地面沉降形变信息,达到有的放矢的监测目的。本文虽然对地面沉降水准监测网点位优化设计方法进行了探讨,但由于北京平原区地层结构的复杂性,在未来的研究中,需进一步考虑地层结构、地下水漏斗区分布、地下水开采强

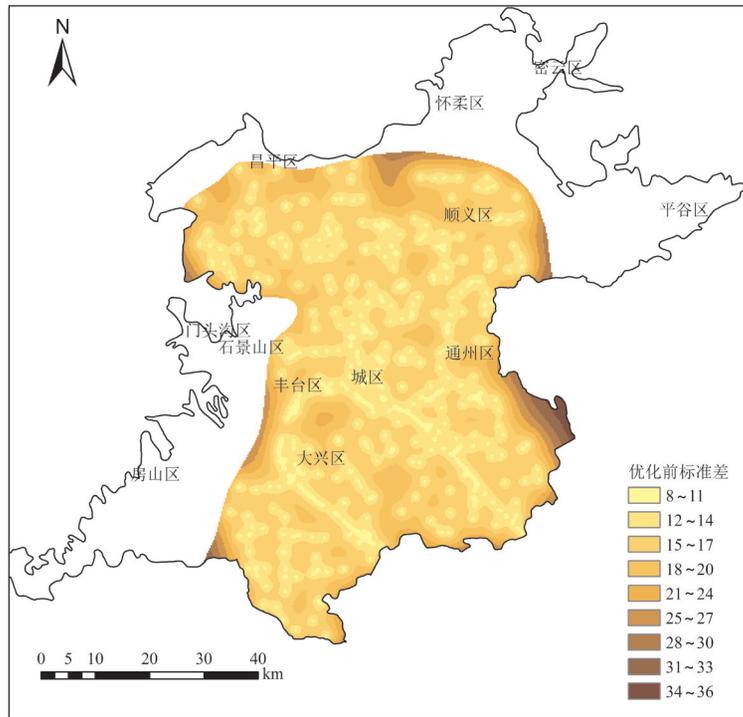


图10 优化前水准点标准差等值线图

Fig.10 Contour map of Kriging interpolation error of existing network of leveling

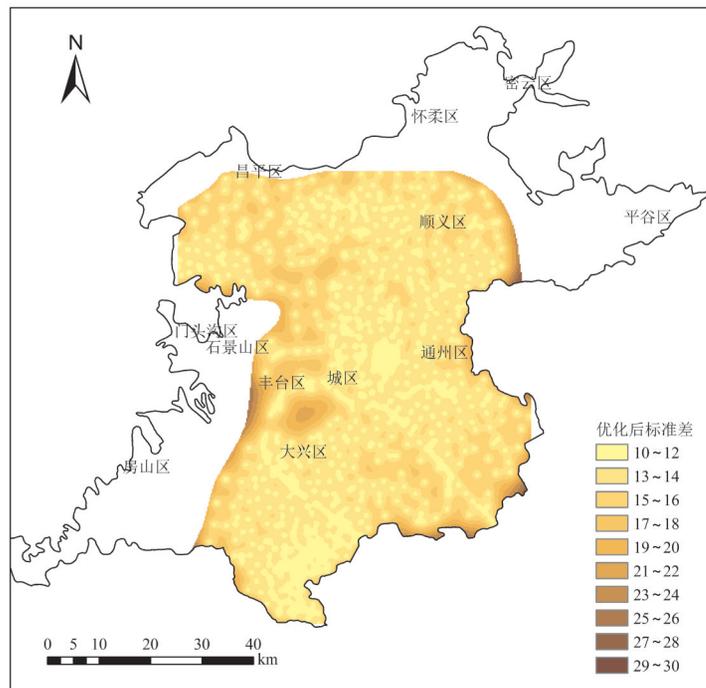


图11 优化后水准点标准差等值线图

Fig.11 Contour map of Kriging interpolation error of newly designed network of leveling

度等多种影响因素,不断完善研究成果。

参考文献(References):

- [1] Galloway D L, Hudnut K W, Ingebritsen S E, et al. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(10): 2573–2585.
- [2] 殷跃平, 张作辰, 张开军. 我国地面沉降现状及防治对策研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2005, 16(2): 1–8.
Yin Yueping, Zhang Zuochen, Zhang Kaijun. Land subsidence and countermeasures for its prevention in China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2005, 16(2): 1–8(in Chinese with English abstract).
- [3] 何庆成, 刘文波, 李志明. 华北平原地面沉降调查与监测[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(2): 195–209.
He Qingcheng, Liu Wenbo, Li Zhiming. Land subsidence survey and monitoring in the North China Plain[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(2): 195–209(in Chinese with English abstract).
- [4] 薛禹群, 张云, 叶淑君. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 585–593.
Xue Yuqun, Zhang Yun, Ye Shujun. Land subsidence in China and its problems [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 585–593(in Chinese with English abstract).
- [5] 虞定麒. 水准网优化设计的方法[J]. *勘察科学技术*, 1989, (2):43–48.
Yu Dingqi. Methods of optimal design of leveling networks[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1989, (2): 43–48(in Chinese with English abstract).
- [6] Xu P L, Grafarend E. A multi-objective second-order optimal design for deforming networks[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 120(3):577–589.
- [7] 董国凤, 张蕾, 赵全, 等. 天津市塘沽区地面沉降监测网络优化[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, 31(11): 1015–1017.
Dong Guofeng, Zhang Lei, Zhao Quan, et al. Land subsidence monitoring network optimization at Tanggu in Tianjin[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(11):1015–1017(in Chinese with English abstract).
- [8] 蔡向民, 郭高轩, 栾英波, 等. 北京山前平原区第四系三维结构调查方法研究[J]. *地质学报*, 2009, 83(7): 1047–1057.
Cai Xiangmin, Guo Gaoxuan, Luan Yingbo, et al. Quaternary geological features of Beijing Piedmont Plain using 3-D structural method [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(7):1047–1057 (in Chinese with English abstract).
- [9] 蔡向民, 栾英波, 郭高轩, 等. 北京平原第四系的三维结构[J]. *中国地质*, 2009, 36(5): 1021–1029.
Cai Xiangmin, Luan Yingbo, Guo Gaoxuan, et al. 3D Quaternary geological structure of Beijing plain [J]. *Geology in China*, 2009, 36(5): 1021–1029(in Chinese with English abstract).
- [10] 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).
- [11] 栾英波, 蔡向民, 郭高轩, 等. 北京平原区新5孔岩心特征及地层初步划分[J]. *中国地质*, 2011, 38(2): 495–503.
Luan Yingbo, Cai Xiangmin, Guo Gaoxuan, et al. Core characteristics and preliminary stratigraphic classification of the New-5 Hole in Beijing Plain[J]. *Geology in China*, 2011, 38(2): 495–503(in Chinese with English abstract).
- [12] 蔡向民, 郭高轩, 张磊, 等. 北京城湖泊的成因[J]. *中国地质*, 2013, 40(4): 1092–1098.
Cai Xiangmin, Guo Gaoxuan, Zhang Lei, et al. The origin of lakes in Beijing City[J]. *Geology in China*, 2013, 40(4):1092–1098(in Chinese with English abstract).
- [13] 贾三满, 王海刚, 赵守生, 等. 北京地面沉降机理研究初探[J]. *城市地质*, 2007, 2(1): 20–26.
Jia Sanman, Wang Haigang, Zhao Shousheng, et al. A tentative study of the mechanism of land subsidence in Beijing[J]. *City Geology*, 2007, 2(1):20–26(in Chinese with English abstract).
- [14] 雷坤超, 陈蓓蓓, 贾三满, 等. 基于PS-InSAR技术的北京地面沉降特征及成因初探[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(8): 2185–2189.
Lei Kunchao, Chen Beibei, Jia Sanman, et al. Formation and genetic mechanism of land subsidence based on PS-InSAR technology in Beijing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(8):2185–2189 (in Chinese with English abstract).
- [15] 周仰效, 李文鹏. 区域地下水监测网优化设计方法[J]. *水文地质工程地质*, 2007, 34(1):1–9.
Zhou Yangxiao, Li Wenpeng. Design of regional groundwater level monitoring networks[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(1):1–9(in Chinese with English abstract).
- [16] 董殿伟, 林沛, 晏婴, 等. 北京平原地下水水位监测网优化[J]. *水文地质工程地质*, 2007, 34(1):10–19.
Dong Dianwei, Lin Pei, Yan Ying, et al. Optimum design of groundwater level monitoring network of Beijing Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(1):10–19(in Chinese with English abstract).
- [17] 杨勇, 郑凡东, 刘立才, 等. 地下水开采引发的地面沉降易发性区划及控制措施[J]. *中国地质*, 2013, 40(2): 653–658.
Yang Yong, Zheng Fandong, Liu Licai, et al. Susceptibility zoning and control measures on land subsidence caused by groundwater exploitation[J]. *Geology in China*, 2013, 40(2):653–658(in Chinese with English abstract).
- [18] 刘予, 叶超, 贾三满. 北京市平原地面沉降区含水岩组和可压缩层划分[J]. *城市地质*, 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]. *City Geology*, 2007, 2(1):10–15(in Chinese with English abstract).