

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2010.06.005

太原市地面沉降数值模拟

董少刚¹,刘白薇²,唐仲华³

(1. 内蒙古大学环境与资源学院, 内蒙古 呼和浩特 010021 2. 内蒙古大学教务处, 内蒙古 呼和浩特 010021 3. 中国地质大学(武汉) 环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 建立了太原市地面沉降模型, 并应用该模型对太原市的地面沉降进行模拟分析。结果表明: ①太原市地下水开采降落漏斗区即为地面沉降严重区; ②从 1989—2008 年间沉降区域急速扩张, 0.5 m 沉降等值线已经把吴家堡、下元、万柏林 3 个严重沉降区连成一片; ③吴家堡沉降区域有向东南方向扩展的趋势, 到 2008 年小店区(太原市重要水源地)沉降量也达到 0.5 m 以上; ④非弹性储水因子对模型计算结果的影响要远远大于弹性储水因子。

关键词 地面沉降; 数值模拟; 敏感性分析; 太原市

中图分类号: P642.26 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2010)06-0019-04

Numerical simulation of land subsidence of Taiyuan City

DONG Shao-gang¹, LIU Bai-wei², TANG Zhong-hua³

(1. College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. Department of Educational Administration, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: A land subsidence model was set up and used to simulate the land subsidence of Taiyuan City. The results of the simulation showed the following: (1) The groundwater descent funnel area was a serious land subsidence area. (2) The land subsidence area expanded rapidly from 1989 to 2008, and the serious land subsidence area of Wujiabao, Xiayuan, and Wanbolin connected through the 0.5 m isoline of subsidence. (3) The land subsidence area of Wujiabao expanded in the southeast direction, and the Xiaodian area (an important water resource area) descended over 0.5 m by 2008. (4) The analysis of parameter sensitivity indicated that the elastic storage factor had a larger impact on the simulation result than the inelastic storage factor.

Key words: land subsidence; numerical simulation; sensitivity analysis; Taiyuan City

过量开采地下水引起的地面沉降已经成为威胁城市发展和人民生活稳定的全球性地质灾害问题。地面沉降所带来的直接危害有城市地下管线扭曲折断、洪涝灾害、建筑物结构破坏、沿海地区海水入侵等。在我国, 已有 45 个城市由于地下水的开采而引起地面沉降, 其中长江三角洲、华北平原和汾渭地堑 3 大区域中的主要城市, 如北京、西安、上海^[1-2]、天津^[3]、太原等, 是当前我国地面沉降最严重的地区。广大科研工作者越来越重视过量抽取地下水引起的地面沉降问题, 并开展了相关的研究, 如李洪然

等^[4-5]应用不同方法对由于水位变化引起的地面沉降问题进行了模拟分析; Teatini 等^[6]对意大利 Ravenna 近一个世纪的地面沉降原因进行了探讨; 王银梅等^[7-8]通过不同的角度对太原市地面沉降进行过研究; 谭荣初^[9]对吴江市地面沉降与过量开采地下水的关系进行了分析; 张桂平等^[10]对沧州市地面沉降原因进行了探讨。

太原市是山西省的政治、经济和文化中心, 是我国的能源重化工基地。该地自 20 世纪 50 年代出现地面沉降以来, 到 2000 年其涉及范围已达 580 km²,

最大沉降量达 2815 mm(吴家堡)。地面沉降已给太原市的开发建设和人民群众生活带来了一系列的危害,严重制约着该地经济的可持续发展。

笔者旨在前人研究工作基础上,基于地面沉降机理,建立太原市地下水流动和地面沉降数学模型,应用数值模拟的方法定量研究地下水开采与地面沉降的关系,并对模型参数的敏感性进行分析。

1 研究区自然地理及水文地质条件

太原市地处山西省中部,太原盆地的北端,三面环山,西部属吕梁山系,东部属太行山系,北部为棋子山。东西两侧山区以断层与盆地直接接触,地形自山区向盆地呈阶梯状下降。边山洪积扇伸入盆地中心,构成宽阔的洪积倾斜平原,盆地中部为宽阔平坦的汾河冲积平原。该盆地北窄南宽,小店以北宽 8~15 km,小店以南宽度大于 30 km。总体地形是:北高南低,东西两侧高,中间低,海拔一般在 770~800 m。太原市地面沉降范围为北起上兰镇、南至西草寨,西起金胜、东至武宿,总面积约 585 km²。

研究区底部基岩为二叠、三叠系(P-T)的碎屑岩类,埋深由北向南增大,最大埋深达 600 m。新第三

系(N₂)为紫色褐红色黏土砂砾石层及泥灰岩层,上覆于基岩之上,埋深 200~419 m。下更新统(Q₁)以杂色黏土为主,夹薄层砂及砂砾石,为河湖相沉积,顶板埋深 110~150 m;中更新统(Q₂)为冲洪积层,以粉质黏土夹薄层砂为主,汾河古河道以较厚的砂砾石、砂层为主,顶板埋深 30~60 m;上更新统(Q₃)为冲洪积层,汾河冲积平原区在三给以北多为砂卵石、砂及粉质黏土,在三给以南多以冲淤积粉质黏土、粉砂为主;小店和晋阳湖武家庄附近为湖沼相粉砂和淤泥层,顶板埋深 5~25 m;全新统(Q₄)以冲积层为主,主要分布于汾河冲积平原,北部以砂砾石、砂、粉土和粉质黏土为主,中南部及吴家堡地区以粉细砂、细砂、灰褐色粉土为主,厚度 5~25 m。

2 研究区概念模型及数学模型

依据水文地质条件,研究区内地下水径流基本走向是由东、西、北 3 面的山区向汾河河谷汇集,然后向南部排泄。依据钻孔资料揭示的地层特征,研究区内共可概化为 4 个含水层和 4 个弱透土层(易压缩层),各层都是非均质各向异性。由于各弱透土层均不完整,有许多天窗、断层联结各含水层,见图 1)整

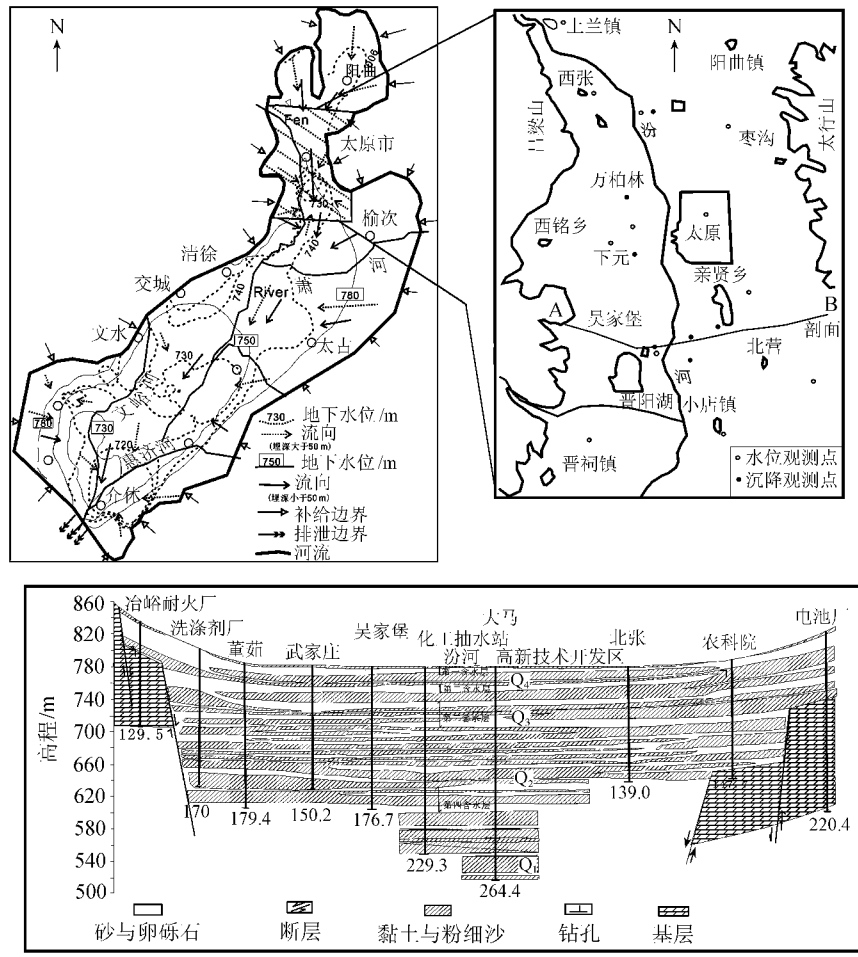


图 1 研究区范围及水文地质剖面(A-B)

个研究区地下水具有统一的水力联系,因而研究区地下水可概化为三维非稳定流动系统。

根据研究区的水文地质概念模型^[11],该区地下水流动数学模型为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + w = \mu_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$h(x, y, z, 0) = h_0(x, y, z)$$

$$h|_{B_1} = f(x, y, z, t)|_{B_1}$$

$$k \frac{\partial h(x, y, z, t)}{\partial n} \Big|_{B_2} = q(x, y, z, t) \Big|_{B_2}$$

式中: k_x, k_y, k_z 分别为 x, y, z 方向上的渗透系数, $L T^{-1}$; h 为水头, L ; w 为源汇项, L^{-1} ; μ_s 为单位储水系数, L^{-1} ; t 为时间, T ; $h_0(x, y, z)$ 为研究区各层初始水头值, L ; $h|_{B_1}$ 为研究区各层的一类边界, $q(x, y, z, t)|_{B_2}$ 为流量边界, k 为边界法线方向上的渗透系数, $L T^{-1}$ 。

本次研究中应用 Modflow 与 Interbed Storage 结合求解地下水流动及地面沉降数学模型。Processing Modflow 软件中,计算地面沉降的子程序包 Interbed Storage 提供了由地下水位下降引起的含水层压缩量的计算公式:

$$\Delta b_e = -\Delta h S_{fe} \quad \Delta b_i = -\Delta h S_{fv}$$

其中 $S_{fe} = S_{ske} b_0$ $S_{fv} = S_{skv} b_0$

式中: Δb_e 为含水层弹性压缩量, m ,正为压缩,负为膨胀; Δb_i 为含水层非弹性压缩量, m ; Δh 为水头变化值, m ; S_{fe} 为用户定义的弹性储水因子,无量纲,与水的容重、含水层厚度以及含水层压缩模量有关; S_{ske} 为骨架成分的弹性储水因子; b_0 为可压缩层的厚度, m ; S_{fv} 为用户定义的非弹性储水因子,无量纲,与含水层体积压缩、水的容重有关; S_{skv} 为骨架成分的非弹性储水因子。

3 结果讨论

太原市地面沉降区域处于盆地内部(太原盆地的一部分),由于其不是一个完整的水文地质单元,以前的研究中,对边界条件很难把握,往往导致模型失真。本次研究中,根据董少刚等^[11]建立的整个太原盆地地下水流动数值模型确定沉降模拟区的边界条件,模拟区的东、西、北边界均设为流量边界,边界流量从太原盆地地下水流动数值模型中获取;南部边界设为水头边界,边界处地下水的流入或流出取决于边界处相邻单元水头变化。

模型中输入的主要数据是含水层的参数,包括模拟范围、地形、各含水层的高程、及储水与压缩系数等。应用有限差分网格充分地离散化整个模拟区域。平面网格尺寸为 $\Delta x = 100 m$, $\Delta y = 100 m$ 。在垂

向上根据岩性的变化共剖分成 8 层,其中第 2、4、6 模拟层的主要成分为黏土与粉砂土,颗粒较细,渗透性差,易于压缩,而第 1、3、5、7 层主要为粗沙与沙砾石,不易压缩。整个研究区被剖分为 21 770 个有效单元格。

汾河与晋阳湖是研究区最主要的地面补给水体,分别应用河流与湖泊模块描述他们的特点。另外雨季降雨补给地下水量估计平均在 0.25 ~ 0.70 mm/d(5 ~ 9 月)。蒸发是该区地下水的主要消耗方式之一,通过水均衡计算确定不同时期的蒸发排泄量输入模型。最后,模型的含水层的参数利用实测值与试错法结合获得。在模型校正过程中,各模拟层的水动力特征不断调整,直到与观测结果符合的较好为止。校正后的含水层参数见表 1。

表 1 岩层属性参数

| 含水层 | $K_h / (m \cdot d^{-1})$ | $K_v / (m \cdot d^{-1})$ | 水流模型有效孔隙度 | 单位储水系数 (m^{-1}) | 弹性储水因子 | 非弹性储水因子 |
|-----|--------------------------|--------------------------|-------------|---------------------|--------|---------|
| 1 | 5 ~ 10 | 1 ~ 2 | 0.2 ~ 0.4 | 0.07 | 0.08 | 0.12 |
| 2 | 0.3 ~ 1 | 0.06 ~ 0.15 | 0.1 ~ 0.3 | 0.0006 | 0.21 | 1.70 |
| 3 | 2 ~ 6 | 0.05 ~ 1 | 0.2 ~ 0.45 | 0.0005 | 0.47 | 0.93 |
| 4 | 0.4 ~ 1.1 | 0.07 ~ 0.2 | 0.25 ~ 0.35 | 0.0001 | 0.11 | 0.38 |
| 5 | 7 ~ 16 | 1 ~ 3 | 0.35 ~ 0.45 | 0.0004 | 0.06 | 2.10 |
| 6 | 0.1 | 0.02 | 0.25 | 0.00002 | 0.15 | 0.50 |
| 7 | 0.7 | 0.15 | 0.20 | 0.00001 | 0.12 | 0.06 |
| 8 | 0.08 | 0.02 | 0.01 | 0.00001 | 0.02 | 0.03 |

注: K_h 为水平渗透系数; K_v 为垂向渗透系数。

3.1 地下水流域及地面沉降分析

随着太原市经济的发展,越来越多的地下水被应用于生产生活。大量抽取地下水导致整个研究区地下水位不断下降,特别是在吴家堡、下元、西张等地形成了大面积的地下水降落漏斗。地下水位的下降导致含水层压缩,而形成的地面沉降面积,已经达到 580 km²。这意味着,大面积的岩层直接覆盖于漏斗之上。随着抽水影响范围内的地下水含水层的储量被不断地消耗,地下水位将继续下降,漏斗面积将不断扩大。地下水降落漏斗的面积取决于抽水强度、抽水时间、含水层的储水特点及导水性。地下水降落漏斗的形成会造成大面积的地下水位下降、改变地下水的流向、减少基流量、使地表水体大量渗漏等。

本次研究中,首先应用稳定流模拟以获取非稳定流模拟中需要的初始水头,然后应用非稳定流进行一个较长时间的模拟,以观测分析各模拟层的水头随时间变化的规律。这个非稳定流模型模拟时间为 28 年(1981—2008 年),共分为 336 个应力期,时间步长为 1 d。

总共有 12 个长观孔应用于地下水流动模型的拟合和检验,统计检验结果:相对均方差为 3.09;平均误差为 2.36,这表明观察值与计算值符合的较好。

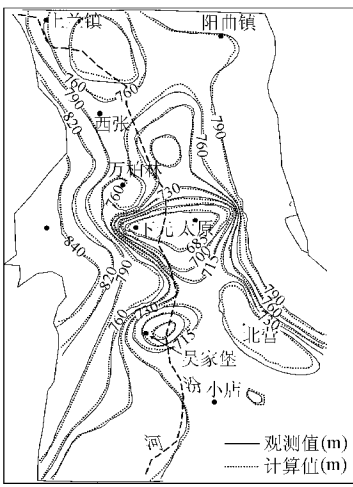


图2 实测水位等值线与计算水位等值线比较(1989年)

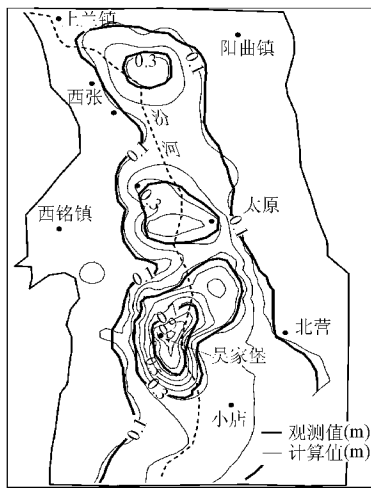


图3 地形累计沉降量的检测值与计算值比较(1989年)

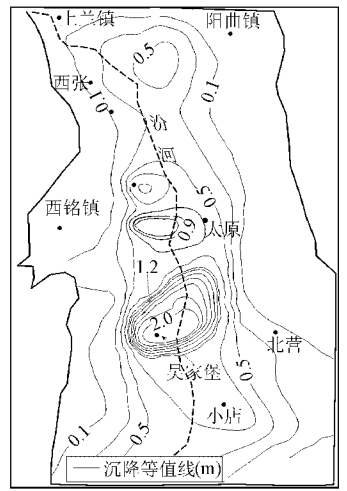


图4 地面沉降模拟预测等值线(2008年)

同时应用同一时刻的观测水位等值线与计算水位等值线比较(图2),从总体上检验模型的合理性。从检验结果看,模型已经成功地再现了模拟期的地下水位的时空变化规律(例如,地下水位、地下水降落漏斗的降深及位置等)。

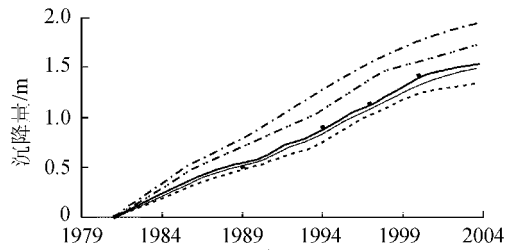
共有7个地面沉降观测点应用于沉降模型的拟合及检验,表1列出了通过计算与实测校正后的各层参数。把模拟初期(1981年)的地表作为0沉降时刻,图3是从1981—1989年的累积地面沉降计算等值线与测量等值线的比较,总体上该时刻的观测值与计算值在地面沉降的趋势与影响面积上已经很相似。图4是预测的到2008年时的累积沉降量。对比图2、图3可见,地下水降落漏斗区也是地面沉降严重的区域,但并不是完全一致,这可能是由于黏土层分布的不均一引起的。模拟结果显示,从1989—2008年间沉降区域急速扩张,0.5m沉降等值线已经把吴家堡、下元、万柏林3个严重沉降区连成一片。吴家堡沉降区域有向东南方向扩展的趋势,到2008年小店区(太原市重要水源地)沉降量也达到0.5m以上。

3.2 参数敏感性分析

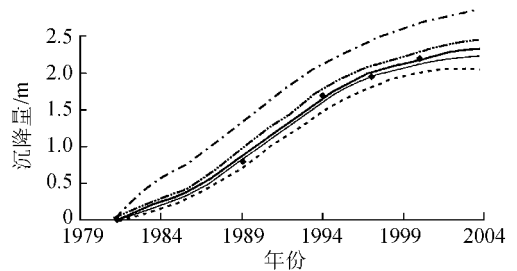
敏感性分析是为了确定模型中某个参数对模型的影响程度。往往采用保持其他参数不变而仅以一定的比例改变模型中的某一个参数的大小,分析其对计算结果的影响程度。对于地面沉降模型来说,一般通过对比参数改变前后的沉降曲线,分析参数的敏感性。通过敏感性分析可以确定哪个参数对模型的计算结果影响较大。在本次研究中主要对弹性储水因子与非弹性储水因子进行了敏感性分析。图5为下元与吴家堡观测点显示的非弹性储水因子增加100%与减少20%、弹性储水因子增加200%与减

少20%的模拟结果。从参数改变前后的沉降量变化看,非弹性储水因子对模型的影响程度要远远大于弹性储水因子。因此在地面沉降模型研究中,对非弹性储水因子的合理选取非常重要。

- 观测值
- 计算值
- 非弹性储水因子减少20%
- 弹性储水因子减少20%
- 非弹性储水因子增加100%
- 弹性储水因子增加200%



(a)下元



(b)吴家堡

图5 地面沉降计算值与观测值比较

4 结论

建立了太原市三维地下水流动及一维地面沉降模型,同步模拟了由于过量的抽取地下水而导致的地下水位与地面沉降的变化过程。通过检验表明,在整个模拟期内该模型能够成功地再现研究区真实的地下水流动及地面沉降过程。模拟结果显示,过量的开采地下水对太原市地面沉降有显著的影响。从1989—2008年间沉降区域急速扩张(下转第36页)

表 6 昆明市用水效率变化

| 年份 | 用水总量/ 万 t | GDP 总量/ 亿元 | 万元产值 用水量/ m ³ | 年份 | 用水总量/ 万 t | GDP 总量/ 亿元 | 万元产值 用水量/ m ³ |
|------|--------------|------------------|--------------------------------|-------------|--------------|------------------|--------------------------------|
| 2001 | 26600 | 497 | 54 | 2005 | 36949 | 781 | 47 |
| 2002 | 26622 | 539 | 49 | 2006 | 40295 | 887 | 45 |
| 2003 | 26553 | 601 | 44 | 5年增 长率/% | 51.5 | 78.5 | -16.7 |
| 2004 | 26553 | 695 | 38 | | | | |

注 :GDP 为当年价 ,由于原数据统计口径不同 ,2001—2004 年为推算值。

5 结 语

昆明市城市发展进程目前正处于加速阶段。然而 ,昆明市作为全国 14 个严重缺水城市之一 ,多年平均水资源量仅 8.2 亿 m³ ,且降水年内季节分布不均 ,年际波动大。同时 ,由于 20 世纪 80 年代以来昆明市作为云南省的主要工业基地 ,工业发展对水环境造成了严重污染 ,城区所依伴的滇池水质已由 70 年代的Ⅲ类变成了如今的劣Ⅴ类。水资源短缺和水环境问题已成为制约昆明市发展的主要“瓶颈”。

由于城市人口增长 ,经济发展以及城市建设用地的增加 ,城市水资源和水环境承受着巨大压力。本地水资源已无法满足城市发展的需要 ,不得不进行远距离调水为昆明市供水提供保障 ,掌鸠河调水标志着客水资源已开始替代本地水资源 ,也使得昆

明市水资源供需结构发生了相应的变化。随着昆明市的进一步发展 ,城市用水将越来越依赖于远距离调水 ,区域间的争水现象也将越来越突出。由于云南省地质灾害频繁 ,远距离调水存在一定的风险 ,应相应加强对远距离调水的管理 ,并随时做好应急准备。在远距离调水的同时 ,应积极开展昆明市雨水利用的研究与推广 ,以缓解水资源紧缺、城市内涝以及径流污染等问题。

参考文献 :

- [1] 宋全香,左其亭,杨峰.城市化建设带来的水问题及解决措施[J].水资源与水工程学报,2004,15(1):56-58.
- [2] 白永平.区域工业化与城市化的水资源保障研究[M].北京:科学出版社,2004.
- [3] 牟海省,刘昌明.我国城市设置与区域水资源承载力协调研究刍议[J].地理学报,1994,49(4):32-36.
- [4] 陈定贵,吕宪国,周德民.长春城市发展下的水资源演变特征[J].干旱区资源与环境,2008,22(5):144-148.
- [5] 李伯根.控制滇池生态环境的关键[J].水资源保护,2002(1):18-21.
- [6] 赵剑强.城市地表径流污染与控制[M].北京:中国环境科学出版社,2002,3.
- [7] 赵剑强,闵敏,刘珊,等.城市路面径流污染的调查[J].中国给水排水,2001,17(1):33-35.

(收稿日期:2009-10-08 编辑:徐娟)

(上接第 22 页)

0.5 m 沉降等值线已经把吴家堡、下元、万柏林等 3 个严重沉降区连成一片。吴家堡沉降区域有向东南方向扩展的趋势,到 2008 年小店区(太原市重要水源地)沉降量也达到 0.5 m 以上。通过敏感性分析发现,非弹性储水因子对模型计算结果的影响要远远大于弹性储水系数。模型可以应用于预测太原市控制地下水开采后地下水位的变化与含水层的压缩及恢复情况。

参考文献 :

- [1] 李勤奋,方正,王寒梅.上海市地下水可开采量模型计算及预测[J].上海地质,2000(2):36-43.
- [2] CHAI J C, SHEN S L, ZHU H H, et al. Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai[J]. Geotechnique, ICE, UK, 2004, 54(3):143-148.
- [3] 吴铁钧,金东锡.天津地面沉降防治措施及效果[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(2):6-12.

- [4] 李洪然,张阿根,叶为民.参数累积估计灰色模型及地面沉降预测[J].岩土力学,2008,29(12):3417-3421.
- [5] 于广明,张春会,潘永站,等.采水地面沉降时空预测模型研究[J].岩土力学,2006,27(5):759-762.
- [6] TEATINI P, FERRONATO M, GAMBOLATI G, et al. A century of land subsidence in Ravenna, Italy[J]. Environ Geol, 2005, 47: 831-846.
- [7] 王银梅.太原市地面沉降的机理与防治[J].太原理工大学学报,1998,29(6):599-602.
- [8] 孙自永,马腾,马军,等.太原市地层空间异质性对地面沉降分布的影响[J].岩土力学,2007,28(2):399-403.
- [9] 谭荣初.吴江市地面沉降与开采地下水关系的研究[J].水资源保护,2002(2):48-50.
- [10] 张桂平,洪万才.沧州市地面沉降初探[J].水资源保护,2003(2):54-55.
- [11] 董少刚,唐仲华,马腾,等.太原盆地地下水数值模拟研究[J].水资源保护,2009,23(2):25-27.

(收稿日期:2009-11-18 编辑:徐娟)