

文章编号:2095-6134(2015)02-0192-08

# 永定河生态修复地下水位主控因素与 数值模拟预测不确定性\*

杨小芳<sup>1</sup>, 王明玉<sup>1†</sup>, 王丽亚<sup>2</sup>, 赵建辉<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院大学水系统安全研究中心及资源与环境学院, 北京 100049; 2 北京市水文地质与工程地质大队, 北京 100195;  
3 河南大学计算机与信息工程学院, 河南 开封 475001)  
(2014 年 4 月 24 日收稿; 2014 年 5 月 26 日收修改稿)

Yang X F, Wang M Y, Wang L Y, et al. Investigation of key controlling factors and numerical simulation uncertainty of the groundwater level accompanying with Yongding river ecological restoration[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015, 32(2):192-199.

**摘 要** 河流修复中的补水过程, 可导致周围地下水位抬升进而威胁地下工程与环境的安全. 地下水预测模型不确定性分析, 可为河流生态修复管理决策提供依据. 本文以北京永定河生态修复为例, 采用 GMS 软件建立了区域地下水流数值模型, 用敏感性分析法对地下水流场的主控因素进行了识别, 进而用蒙特卡洛技术研究并获得模型模拟预测结果的不确定性. 本文探讨并提出了大尺度区域地下水预测模型不确定性分析的实用与有效方法.

**关键词** 河流生态修复; 地下水数值模型; 主控因素; 蒙特卡洛模拟技术; 不确定性分析

**中图分类号:** P641      **文献标志码:** A      **doi:** 10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2015. 02. 007

## Investigation of key controlling factors and numerical simulation uncertainty of the groundwater level accompanying with Yongding river ecological restoration

YANG Xiaofang<sup>1</sup>, WANG Mingyu<sup>1</sup>, WANG Liya<sup>2</sup>, ZHAO Jianhui<sup>1,3</sup>

(1 Center for Water System Security & College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
2 Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China;  
3 College of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China)

**Abstract** River ecological restoration with water replenishment could considerably raise groundwater level and might then threaten safety of subsurface engineering and environment, while uncertainty analysis of groundwater level prediction can provide a basis for the effective management of river ecological restoration. Taking the ecological restoration of Yongding River in Beijing as a case, we built a groundwater model and determined the main controlling factors, and then obtained the uncertainty of the simulated groundwater levels by the Monte-Carlo technique. The practical and effective method has been proposed for uncertainty analysis of groundwater numerical model in large

\* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB428804, 2010CB428801)和国家科技重大专项课题(2011ZX05060-005)资助  
† 通信作者, E-mail: mwang@ucas.ac.cn

scale.

**Key words** river ecological restoration; groundwater numerical model; main controlling factors; Monte-Carlo simulation technique; uncertainty analysis

永定河是北京地区的第一大河,境内全长170 km,承担着首都防洪、供水和生态等重要功能。1980年以来,永定河(北京段)出现了河道断流、风沙侵扰、水质下降等生态环境问题<sup>[1]</sup>。为了恢复永定河的重要功能,北京城市总体规划(2004—2020年)将永定河定位为京西绿色生态走廊与城市西南生态屏障<sup>[2]</sup>,进行永定河绿色生态走廊建设工程,对永定河河道进行生态修复并蓄水。然而,因水资源短缺及地下工程与环境安全考虑,在保证河道一定入渗量前提下,需设计安全的河道防渗材料减渗参数。为了达到这一工程目标,需要建立并应用一个可靠的地下水数值模型,分析河道不同减渗条件下地下水入渗状况,明确地下水水位的抬高情况,以便确定永定河生态修复所需补水量及其对地下环境的影响,为河道生态修复方案选取提供决策支持。

地下水数值模拟能够很好地描述地下水流的动态变化,是研究区域地下水资源的重要手段。然而,由于地下水系统是一个具有多因素的复杂系统,表征模型空间特征的水文地质参数、源汇项以及边界条件等参数具有一定的随机性。故用建立的地下水模型来描述地下水水流运动时,由于未考虑地下水流系统的随机性问题,其模拟值和实际的地下水系统之间始终存在一定的差异,这种差异将造成地下水模拟结果的不确定性<sup>[3]</sup>,因此,为了了解模拟结果的不确定性,人们提出将随机理论用于对地下水模型进行分析,即将模型参数视为具有一定空间分布和统计特征的随机变量,建立随机模型并得到模拟结果的概率分布。但如何有效实施,还有待进一步研究。

本文运用GMS模拟软件建立北京市永定河地区地下水流数值模型,识别伴随河流生态修复河道渗漏条件下地下水位的主控参数,并采用蒙特卡洛模拟技术分析主控参数随机化的地下水流模型的不确定性,计算出模拟结果的误差,在后期采用模型进行预报工作时,将误差加入到预报中,可提高模型预报的精度,该项研究为采用模型对研究区进行工程分析提供了决策和管理支撑,可为与该地区类似工程条件下地下水保护与相关环

境问题的解决提供指导作用。

## 1 研究方法及进展

### 1.1 主控因素分析法

主控因素分析是识别对模型计算结果影响最大的参数,在地下水模拟中,主要运用敏感度分析方法来实现<sup>[4]</sup>。敏感性分析方法量化模型参数对模拟结果(地下水水位)的影响程度,进而可分清模型中的主次因素。计算模型中某一参数的灵敏度系数值方法<sup>[5]</sup>如下,保证其他所有参数不变时,使该参数 $k$ 的值由 $a_k$ 变化为 $a_k + \Delta a_k$ ,相应的因变量值由 $y_i(a_k)$ 变为 $y_i(a_k + \Delta a_k)$ , $X_{i,k}$ 为该参数的灵敏度系数,

$$X_{i,k} = \frac{\partial y_i}{\partial a_k} \approx \frac{[y_i(a_k + \Delta a_k) - y_i(a_k)]/y_i}{\Delta a_k/a_k} \quad (1)$$

主控因素分析方法是比较地下水流数值模型中各水文地质参数、源汇项和边界条件的影响程度的有效方法,具有重要作用,通过改变输入地下水流模型的参数取值(增减某一百分比)来分析地下水水位对各种参数的敏感度,目前该方面研究主要集中在分析含水层的渗透系数、给水度、导水系数、边界条件、降雨入渗系数等参数对地下水水位的影响。束龙仓等<sup>[6]</sup>给出参数灵敏度的计算方法,并通过实例分析承压含水层的导水系数对水头降深影响的敏感度。郝静等<sup>[7]</sup>应用敏感性分析方法对北京市朝阳区地下水水流数值模型的参数进行分析,得出渗透系数对研究区地下水流场的影响比给水度大。郭飞等<sup>[8]</sup>采用敏感度分析方法对山东省淄博市大武水源地石油污染物运移的主要影响因素进行分析,并得出控制石油污染物在地下水流中的污染运移方法。

### 1.2 蒙特卡洛方法

20世纪80年代以来,随机理论在国外发展迅速,Freeze<sup>[9]</sup>、Runchal和Sagar<sup>[10]</sup>与Kadi和Brutsaert<sup>[11]</sup>等首先提出并发展了随机理论研究。近十几年,随机理论在中国发展并有所应用,杨金忠等<sup>[12]</sup>对多孔介质中水分及溶质运移的随机理论做了概括和总结性的介绍。李森等<sup>[13]</sup>对地下水动态数值模拟中随机方法的原理、适用条件及存

在的问题做了综述,着重讨论国内外地下水动态随机模型方面的研究和应用进展,并介绍了常用的几种随机估参方法. 吴吉春和陆乐<sup>[14]</sup>总结几种常用的地下水模拟不确定性分析的方法和国内在该方面的研究应用进展. 通过对近些年国内外随机模拟研究分析可知,蒙特卡洛法是目前应用最广的一种随机方法,该方法是将模型中的部分参数作为随机场,并通过数学统计技术,产生参数的随机组合,然后把随机组合分别代入模型,运行模型并得到模拟结果的统计值. 该技术较其他技术来说,不受随机变量选择和范围的限制,并且可计算模型任意节点任意时刻的水头统计值.

近年来国内在有关蒙特卡洛法在地下水模拟不确定性研究方面有较多的应用. 曾献奎等<sup>[15]</sup>采用 Monte-Carlo 技术对一个理想的地下水流模型进行参数识别,并获取了地下水流模型输出的预测概率分布. 徐海珍等<sup>[16]</sup>对北京市平谷区王都庄应急水源地建立基于正交拉丁超立方抽样法的地下水随机模型,得到了具有分布概率的保护范围. 姚磊华等<sup>[17]</sup>采用 Monte-Carlo 模拟技术建立白杨水源地的地下水水流和溶质迁移随机模型,并对浅层地下水位和氯离子浓度进行随机统计和预测. 詹红丽等<sup>[18]</sup>选择大气降水、蒸发等参数作为模型的随机变量,应用随机理论建立圩区地下水位随机模拟模型,分析不同边界条件下的水位统计值. 束龙仓等<sup>[19]</sup>介绍风险分析的概念和方法,并以山东省济宁市地下水资源评价为例,用蒙特卡罗随机模拟法对研究区地下水的允许开采量的确定进行风险分析.

2 北京市永定河地区地下水模型

2.1 研究区概述

研究区位于北京市永定河冲洪积扇中上游,地理位置包括北京城近郊区、大兴区及通州西半部的部分地区. 永定河冲洪积平原是不同时期多级冲积扇的复合体,水文地质条件好,地下水丰富,研究区为单一透水性地层结构,含水层岩性以卵砾石为主,渗透系数较大,大部分地段直接裸露地表,有利于地下水的补给和调蓄,根据含水层的岩性、结构等特征,可分成单一砂卵砾石含水层和多层砂卵砾石含水层. 研究区地下水补给来源主要有西山岩溶水侧向补给、大气降雨补给和地表河流和水库等渗漏补给以及农业灌溉水入渗回

补等. 排泄方式以人工开采(集中供水水源地)为主,侧向排泄和潜水蒸发为辅,浅层地下水主要接受大气降水和地表河流水库的渗漏补给<sup>[20]</sup>.

2.2 地下水流模型的建立

2.2.1 水文地质概念模型

研究区位于北京市永定河冲洪积扇中上游,模拟范围为:西边以平原和西山山前为界,东部到城区东二环为界,南边以南六环为边界,北部以北五环为边界,总面积约 820 km<sup>2</sup>,模拟范围见图 1. 模拟区内第四系含水层除山前坡积、洪积的亚砂土、碎石外,大部分均由永定河冲洪积砂、卵石、含砾石砂及砂组成;模拟区被划分为 2 个含水层组,第四系潜水含水层和承压含水层. 研究区主要接受山前侧向补给、河渠补给、田间入渗补给、降雨入渗补给、蒸发排泄等. 水文地质参数主要有含水层的渗透系数、潜水含水层的给水度、承压含水层释水系数、大气降水入渗系数、灌溉入渗系数和河道入渗系数等.



图 1 模型范围示意图

Fig.1 Sketch of the model range

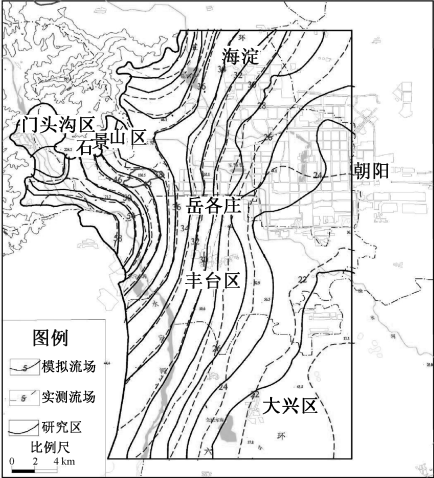
综上所述,研究区含水层分为 2 层,地下水运动方式概化为空间 3 维流动;地下水系统概化为输入和输出随时间变化的非稳定流,水文地质参数随空间变化,概化为非均质各向同性,故研究区地下水运动的数学模型概化为非均质,各向同性,非稳定,3 维潜水—承压地下水流模型.

2.2.2 数值模型

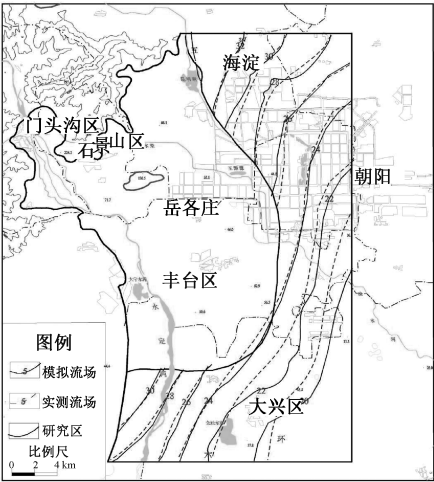
本文采用国际通用的地下水模拟软件 GMS 建立了研究区地下水流模拟模型. 根据研究区含水层结构特征,边界条件和地下水流场等,在垂向上划分为 2 个含水层组,其中第 1 层为潜水含水



层,第2层为承压含水层.在水平面上剖分为250 m×250 m的正方形网格.本文选择1995年1月—1995年12月作为模拟期,共为12个应力期,1个月为一个时间段,每个时间段内包括若干时间步长,利用2005年1月1日—2010年12月31日的实测资料对模型进行验证和调整,潜水含水层和承压含水层的流场拟合情况见图2.基本确定了模型的结构、边界条件和源汇项以及较为合理的参数分布.



(a) 潜水含水层



(b) 承压含水层

图2 研究区2005年12月潜水含水层和承压含水层流场拟合图

Fig.2 Flow field fitting map of unconfined aquifer (a) and confined aquifer (b) of the study area in December of 2005

3 模型主控因素识别

由以往的主控因素分析实例可以看出,不同地区由于水文地质条件、边界条件及源汇项等因

素的差异,导致不同地区的水流数值模型中相同的参数对模拟结果的影响程度通常是不一样的.姚磊华等<sup>[17]</sup>的研究显示边界条件对模拟结果影响最大,而在束龙仓等<sup>[6]</sup>的分析中则显示含水层的给水度和边界处渗透系数对模拟结果影响最大.本模型具有尺度大和河道入渗等特殊条件,故有必要对本模型进行主控因素分析,识别出模型的主控因子,为以后相似条件下的地下水模型的建立提供调查方向.本次识别出的主控因子将直接作为蒙特卡洛模拟的随机参数.

由以往研究经验可知,模型构建过程中外部参数源汇项、边界条件及内部参数渗透系数、给水度等因素具有较大的不确定性,因此本文主要对渗透系数、给水度、边界条件、降雨入渗系数、灌溉回补系数、河道入渗补给强度等参数进行灵敏度分析,识别出对模拟结果影响较大的参数.按照方程(1),将参数值分别增大、减小10%和20%,其他参数保持不变,每改变一次参数值,运行一次模型,并输出各区与参数变化相对应的单元格的水头值,作为灵敏度分析的依据,可得出参数的灵敏度系数.计算结果见表1.

表1 参数灵敏度系数

Table 1 Sensitivity coefficients of parameters					
参数	减小 20%	减小 10%	增加 10%	增加 20%	平均 值
灌溉回补系数	0.008 9	0.008 9	0.009 4	0.009 1	0.009 1
降雨入渗补给强度	0.014 0	0.013 0	0.014 0	0.014 0	0.013 8
河道入渗补给强度	0.017 3	0.017 3	0.017 8	0.017 2	0.017 4
潜水层渗透系数	0.010 5	0.010 0	0.009 0	0.008 0	0.009 4
承压层渗透系数	0.006 5	0.006 6	0.006 3	0.006 1	0.006 4
给水度	0.017 3	0.016 7	0.015 2	0.017 3	0.016 6
贮水率	0.007 0	0.007 3	0.007 2	0.007 1	0.007 2
流量边界	0.005 0	0.004 8	0.005 6	0.005 4	0.005 2
水头边界	0.002 2	0.001 3	0.001 3	0.002 1	0.001 7

由表1可见,降雨入渗系数、河道入渗补给强度、潜水含水层的渗透系数、给水度等参数对该模型的影响较大,流量边界、水头边界、承压含水层的渗透系数和贮水率等影响较小,且在预测模型中取值确定性较大,结合各参数的获取过程,可知潜水含水层的渗透系数、给水度、降雨入渗率和河道入渗补给强度4个参数是该模型的主控因素,可将这些参数作为蒙特卡洛分析的随机变量,其

他参数视为确定性参数.

## 4 蒙特卡洛随机模拟

### 4.1 随机变量及模拟次数的确定

上文对所建立的模型进行了主控因素识别, 潜水含水层的渗透系数、给水度、降雨入渗率和河道入渗补给强度 4 个参数是该模型的主控因素, 故选定这 4 个参数作为随机变量. 由于本次模型建立的主要目的是研究永定河地下水入渗回补对地下水位的影响, 因此选择沿河区域的潜水含水层的渗透系数、给水度、降雨入渗率和河道入渗补给强度分区作为本次研究的随机参数. 潜水含水层的渗透系数、给水度分别有 7 个分区, 降雨入渗率和河道入渗补给强度分别有 5 个和 4 个分区, 因此一共选择 23 个分区的参数作为随机变量.

运行模拟的次数由不确定相互影响的输入变量数决定, 最少可为随机变量数的 1.5 倍, 一般为几百次, 对大多数模型来说, 200 ~ 500 次运行即可满足条件<sup>[21]</sup>. 本次研究在采用蒙特卡洛随机模拟时, 分别采用 10 次、25 +  $n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots, 14$ ) 次实现, 对随机模型的结果进行统计分析, 得到各次随机模拟的水位均值, 再将某一观测点的实测水位和均值水位作对比, 计算各应力期的水位误差,  $r = h^* - h$  ( $h^*$  为实测水位,  $h$  为计算水位), 最后用绝对值平均误差 MAE 和误差均方根 RMSE 来衡量误差的大小<sup>[22-23]</sup>, 它们综合考虑了误差的偏差和离散程度.

$$\begin{aligned} \text{MAE} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i|, \\ \text{RMSE} &= \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

通过对各个应力期的水位误差进行统计计算, 得到 MAE 和 RMSE 的分布图 (图 3). 从图中可以看到, 在 200 次左右实现时 MAE 和 RMSE 值基本达到稳定, 由于本模型模拟范围较大, 选取的随机变量较多, 考虑到计算机的性能和计算时间等问题, 综合确定本次模拟次数为 300 次.

### 4.2 随机参数的随机化实现

随机参数的随机化实现即随机变量的生成, 该步骤是随机模拟过程中的关键一步, 它直接决定了所建的随机模型能否充分合理地体现地下水流系统的随机特性<sup>[24]</sup>. 在 GMS 软件系统中, 可采用蒙特卡罗法来实现参数的随机化. 该技术首先

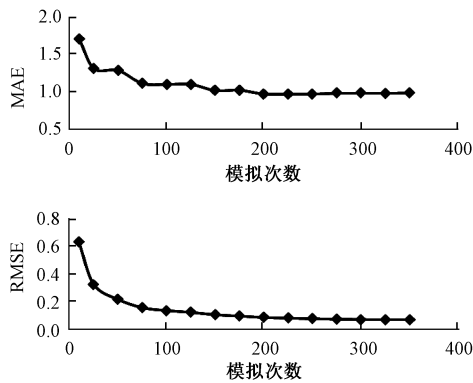


图 3 不同模拟次数下观测孔水位 MAE 和 RMSE 比较  
Fig. 3 Comparison of observation well's water level between MAE and RMSE with different simulation times

选择模型输入随机变量, 并设定随机输入变量的概率分布函数, 根据随机变量的初值和概率分布函数用随机数的生成技术产生一定数量的实现, 并得到  $N$  组随机输入变量的组合实现, 然后对每组输入变量运行数值模型, 最终获得  $N$  组的模型计算结果, 并对模型进行统计分析.

本次模拟取确定模型校正识别阶段得到的参数值作为初始值, 假设参数都服从正态分布, 参数值上下限分别取为初始值的 50% 和 150%, 标准差取为区间长度的 20%, 该变化范围设置能较好地覆盖模型参数的可能误差.

根据各参数的分布特征, 表 2 根据各参数的初始值设定了其均值、标准差和上下限, 采用随机数生成器将每一分区的每一参数实现 300 个随机值, 共得到 6 900 个随机参数, 并将参数的实现按照分区进行随机组合, 最后得到 300 组随机参数组合样本. 图 4 和图 5 为第 1 个分区生成随机参数的统计特征.

### 4.3 随机模拟的结果及不确定性分析

采用随机理论进行地下水动态模拟预测时, 区域范围内地下水位的动态变化情况, 以及由随机因素而产生的波动幅度是人们真正关心的问题. 前文得到了随机参数的 300 组随机组合, 根据前文模拟次数的设定, 本次采用 GMS 软件完成随机模拟运算, 将随机生成的 300 组参数组合值代入模型, 并运行模型, 得到对应的 300 组随机水位解. 利用数据处理工具对得到的 300 组解进行统计分析, 图 6 绘制了按照河道蓄水条件后<sup>[25]</sup>, 研究区 2015 年 10 月底和 2020 年 10 月底的水位均值图. 再利用数据处理工具对得到的随机解进行

表 2 随机参数的输入设定

Table 2 Input of random parameters					
参数	分区	均值	下限	上限	标准差
渗透系数/ (m/d)	1	300	150	450	60
	2	300	150	450	60
	3	300	150	450	60
	4	200	100	300	40
	5	100	50	150	20
	6	80	40	120	16
	7	60	30	90	12
给水度/ 无量纲	1	0.1	0.05	0.15	0.02
	2	0.1	0.05	0.15	0.02
	3	0.3	0.13	0.39	0.052
	4	0.2	0.115	0.345	0.046
	5	0.2	0.1	0.3	0.04
	6	0.015	0.0075	0.0225	0.003
	7	0.1	0.05	0.15	0.02
河道入渗补给强度/ (m/d)	1	0.005 328	0.002 664	0.007 992	0.001 066
	2	0.154 135 2	0.077 068	0.231 203	0.030 827
	3	0.002 704 8	0.001 352	0.004 057	0.000 541
	4	0.004 464	0.002 232	0.006 696	0.000 893
降雨入渗补给强度/ (m/d)	1	0.000 491	0.000 368	0.000 614	0.000 049
	2	0.000 621	0.000 466	0.000 777	0.000 062
	3	0.000 513	0.000 385	0.000 641	0.000 051
	4	0.000 263	0.000 197	0.000 329	0.000 026
	5	0.000 376	0.000 282	0.000 47	0.000 038

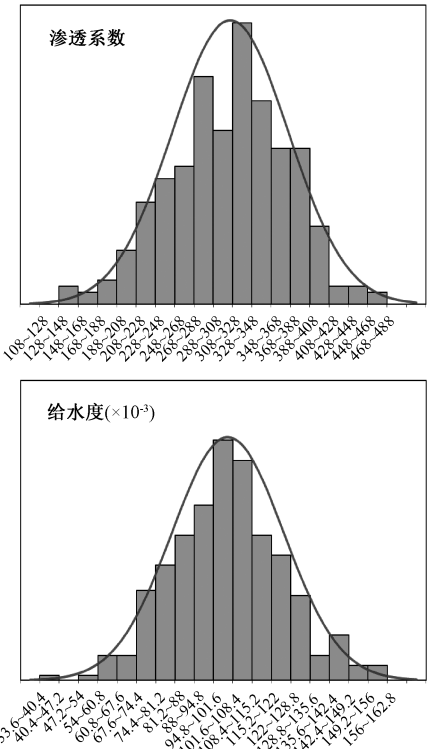


图 4 第一分区渗透系数、给水度频数分布直方图及曲线图

Fig. 4 Distribution histogram and diagram of the hydraulic conductivity and the specific yield in the first partition

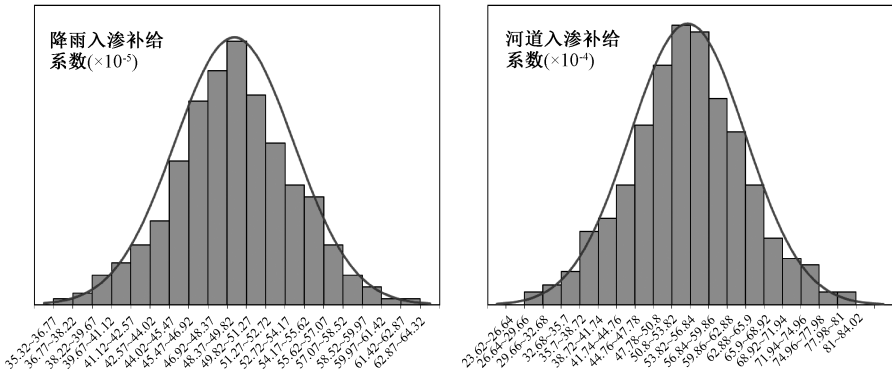


图 5 第一分区降雨入渗率、河道入渗补给强度频数分布直方图及曲线图

Fig. 5 Distribution histogram and diagram of the rainfall infiltration rate and the river infiltration recharge intensity in the first partition

统计分析,求得各预测时段地下水水位的均值、标准差以及概率区间的水位上下限值,并绘制出随机水位解的频数直方图和曲线图,实现模型不确定性的量化及直观表示,图 7 展示了某一节点处 2011 和 2015 年水位频数直方图和曲线图。

本文重点是对模型的不确定性进行定量的表征,因此需要对这 300 组随机水位解进行统计分析,计算出平均水位变化的标准差,该值反映数据

相对于平均值的离散程度,这样就获得了模型结果的不确定性定量表征<sup>[22]</sup>。平均水位变化标准差计算方法如下

$$\text{Std. Deviation} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (3)$$

式中: $x_i$  为单个样本, $\bar{x}$  为样本平均值。

统计分析结果表明,平均水位变化标准差为

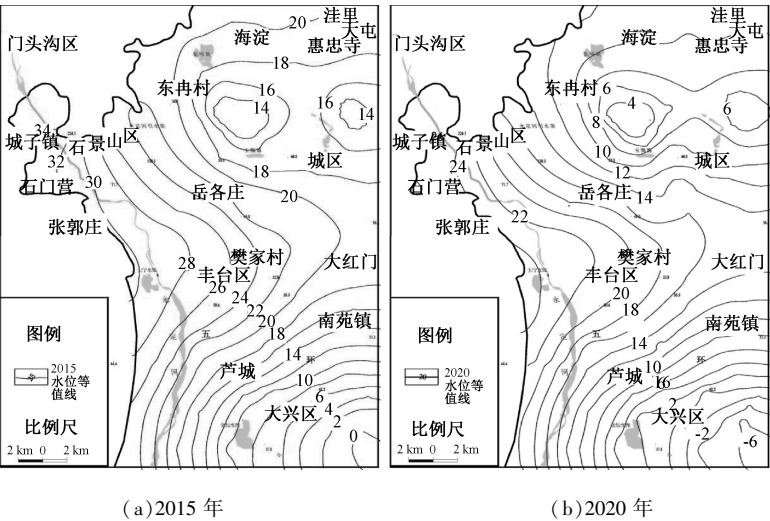


图 6 河道蓄水后地下水水位均值分布图

Fig. 6 Distributions of the average groundwater level after the river storage in 2015 (a) and 2020 (b)

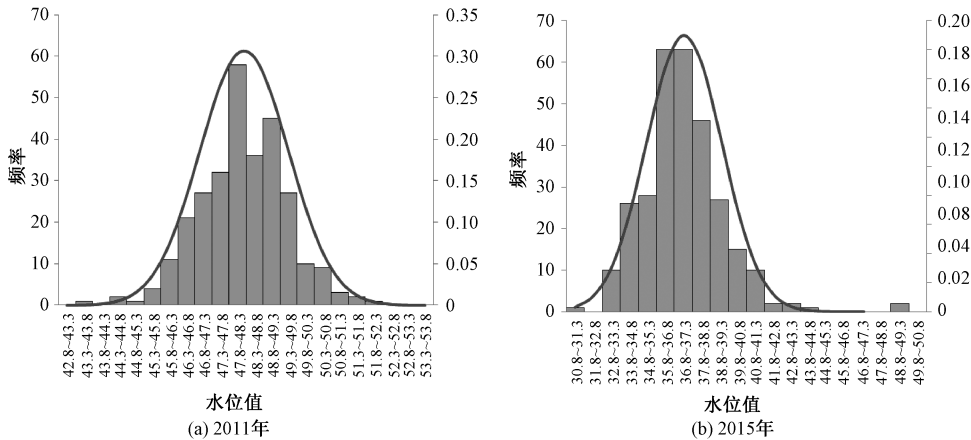


图 7 2011 和 2015 年水位频数分布直方图及曲线图

Fig. 7 Distribution histogram and diagram of the node level frequency in 2011 and 2015

1. 13,95% 概率区间的水位上下限上下变幅平均值为 4.39。案例区研究范围约为 820 km<sup>2</sup>,地下水水位变动较大,模型初始参数值的获取综合考虑了代表性野外水文地质试验、经验值、大量地下水水位实际长期观测资料和系统综合的模型参数反演,而在不确定性分析中模型参数的输入变化范围能较好地覆盖模型参数的可能误差,不确定分析结果具有较好的合理性,可用该随机模型进行预测分析工作。

4.4 讨论

影响地下水数值模拟结果不确定性的因素很多,如何从众多的因素中筛选出影响模型的主控参数是模型分析的关键。原则上,随机模拟次数越多,获得的随机解越能真实地反映地下水水流系统的随机特征<sup>[26]</sup>。本文选择 4 个参数共 23 个随

机参数分区,参数的随机组合较多,模型较为复杂,故模拟次数越多对运算时间和计算机性能的要求就越高。因此,本文通过计算各应力期水位绝对值平均误差和误差均方根来确定较为稳定的模拟次数,有效避免了确定随机模拟次数的随意性。

本文提出采用灵敏度分析法对模型的主控因素进行识别,并将识别出的主控参数作为模型的随机参数,避免了随机参数选择的盲目性,可为类似大区域复杂地下水流模型随机参数的选择提供一种有效途径。通过本次研究梳理出一套预测不确定性分析的有效工作流程:1) 建立能够描述和刻画研究区地下水流的数值模型;2) 对所建立的模型的主控因素进行识别和分析,主控参数作为随机参数;3) 采用蒙特卡洛方法建立主控参数随机化的随机模型;4) 分析水位绝对值平均误差和



误差均方根随模拟次数的变化,确定适宜的随机模拟实现次数;5)统计随机水位解的平均变化标准差和95%概率区间水位变化上下限,实现模型不确定性的定量化表示。

## 5 结论

本文针对建立的永定河生态修复地下水流数值模型,采用敏感度分析和蒙特卡洛技术对模型的主控参数进行识别,并建立了主控参数随机模型,定量表征了地下水位预测模型的不确定程度。尤其提出应优先确定模拟预测主控参数,进而获得适宜的随机模拟实现次数,至此可避免随机参数选择上的随意与过多,使得分析结果既可靠,同时可节省大量时间与计算机资源。该套方法与流程可为类似复杂的地下水流模型的不确定性分析提供一种行之有效的途径。

具体来说,针对伴随永定河生态修复河流补水而导致周围地下水流场变化,从大量影响因素中识别出潜水含水层的渗透系数、给水度、河道入渗补给强度和大气降水入渗补给系数为地下水位预测模型的主控参数。通过应用本文所提出的不确定性分析流程,得出所建立的地下水位模拟预测不确定性为:平均水位变化标准差为1.13,95%概率区间的水位上下变幅平均值为4.39。该不确定性量化结果具有较好可靠性,可为永定河生态修复提供相关管理决策依据。

## 参考文献

- [ 1 ] 尹钧科.论永定河与北京城的关系[J].北京社会科学,2003(4):12-18.
- [ 2 ] 于淼,魏源送,刘俊园,等.永定河(北京段)水资源、水环境的变迁及流域社会经济发展对其影响[J].环境科学学报,2011,31(9):1 817-1 825.
- [ 3 ] 薛禹群.地下水动力学[M].北京:地质出版社,1997:39-43.
- [ 4 ] 高安虎,王明玉,王慧芳.南水北调中线总干渠焦作段两侧地下水六价铬污染风险研究[J].中国科学院大学学报,2013,30(6):763-769.
- [ 5 ] 杜守营,鹿帅,杜尚海.基于GMS的地下水流数值模拟及参数敏感性分析[J].中国农村水利水电,2013(8):77-80.
- [ 6 ] 束龙仓,王茂枚,刘瑞国,等.地下水数值模拟中的参数灵敏度分析[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(5):491-495.
- [ 7 ] 郝静,张永祥,薛潇,等.地下水流数值模型内部参数灵敏度分析[J].人民黄河,2013,35(6):83-86.
- [ 8 ] 郭飞,朱学愚,刘建立,等.山东淄博裂隙岩溶水中污染物运移的数值模拟及治污措施[J].水利学报,2004(7):57-63.
- [ 9 ] Freeze R A. A stochastic conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in uniform homogeneous media[J]. Water Resource Research, 1975, 11(5): 725-741.
- [ 10 ] Sagar B, Runchal A. Hydraulic conductivity of fractured rock: effect of fracture size and data uncertainties[J]. Water Resource Research, 1982, 18(2): 266-274.
- [ 11 ] Kadi EL A I, Brutsaert W. Applicability of effective parameter for unsteady flow in uniform homogeneous aquifers[J]. Water Resource Research, 1985, 21(20): 183-198.
- [ 12 ] 杨金忠,蔡树英,黄冠华,等.多孔介质中水分及溶质运移的随机理论[M].北京:科学出版社,2000.
- [ 13 ] 李森,陈家军,叶慧海,等.地下水动态数值模拟中随机方法研究进展[J].勘察科学技术,2006(2):20-24.
- [ 14 ] 吴吉春,陆乐.地下水模拟不确定性分析[J].南京大学学报:自然科学版,2011,47(3):227-233.
- [ 15 ] 曾献奎,王栋,吴吉春.地下水流概念模型的不确定性分析[J].南京大学学报:自然科学版,2012,48(6):746-752.
- [ 16 ] 徐海珍,李国敏,张春全,等.基于OLHS随机模拟的地下水源地保护区划分[J].吉林大学学报:地球科学版,2011,41(增刊1):259-302.
- [ 17 ] 姚磊华,罗煥炎,张茂省.白杨水源地潜水水质的 Monte-carlo 随机模拟[J].长春科技大学学报,1998,28(3):296-302.
- [ 18 ] 詹红丽,李霞,刘杰.圩区地下水位随机模拟模型及应用研究[J].中国农村水利水电,2007(2):139-144.
- [ 19 ] 束龙仓,陶玉飞,刘佩贵,等.考虑水文地质参数不确定性的地下水补给量可靠度计算[J].水利学报,2008,39(3):346-350.
- [ 20 ] 郇环,王金生,翟远征,等.北京平原区永定河冲洪积扇地下水水化学特征与演化规律[J].地球学报,2011,32(3):357-366.
- [ 21 ] Meinrath G, Ekberg C, Landgren A, et al. Assessment of uncertainty in parameter evaluation and prediction[J]. Talanta, 2000(51): 231-246.
- [ 22 ] 崔亚丽,王婉丽,杨广元.基于LHS方法的地下水随机模拟及开采量风险性评价[J].地学前缘,2010,17(6):134-140.
- [ 23 ] 蒋小伟,万力,杜强,等.基于地质统计学的NDVI图像估值技术[J].地学前缘,2008,15(4):72-79.
- [ 24 ] 阳艾利.基于模拟的地下水石油污染风险评估与修复过程优化技术研究[D].北京:华北电力大学,2013.
- [ 25 ] 北京市水文地质工程地质大队.地下水入渗回补影响研究[R].北京:北京市水文地质工程地质大队,2012.
- [ 26 ] 刘猛,束龙仓,刘波,等.地下水数值模拟中的参数随机模拟[J].水利水电科技进展,2005,25(6):25-27.