

地下水数值模拟中的参数随机模拟

刘 猛,束龙仓,刘 波

(河海大学水资源环境学院,江苏 南京 210098)

摘要 :从水文地质参数的随机性出发,以滦河某拟建水源地为例,采用地下水数值模拟软件 GMS 建立了参数随机模拟的数值模型,并求得模型的随机解,计算出模型的水位均值流场和水位标准差分布.结果表明,在模拟非均质含水层二维流动问题中,充分考虑渗透系数和给水度的随机特性的蒙特卡罗法预测结果可靠,比确定性方法更加科学、有效.

关键词 地下水 数值模拟 参数随机模拟 GMS 蒙特卡罗法

中图分类号 :P333.9 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2005)06-0025-03

Stochastic parameter simulation in numerical simulation of groundwater//LIU Meng, SHU Long-cang, LIU Bo (College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :In consideration of the stochastic property of hydrogeological parameters, the groundwater numerical simulation software GMS was adopted to develop a numerical model for stochastic parameter simulation of the water source site to be built near the Luanhe River. The stochastic solution to the model was obtained, and the flow field of average water table and distribution of its standard deviation were calculated. The calculated results show that the Monte-Carlo method, which takes the stochastic property of permeability coefficient and specific yield into full consideration, is superior to the determinate method.

Key words :groundwater ;numerical simulation ;stochastic parameter simulation ;GMS ;Monte-Carlo method

1 地下水水流数学模型的随机性

地下水数值模拟是目前定量研究地下水水资源量的重要手段.地下水水流数学模型的随机性主要表现在:①控制地下水流动和储存的主要介质场参数,如含水层的渗透系数、给水度、孔隙度等,大都通过有限的勘探试验获得,所以这些参数的真实性和代表性总要受到勘探试验在时空分布上的局限.对于同一含水系统,利用不同时间、不同空间的资料很可能会获得不同的水文地质参数,因此只能将这些参数看作是具有某种统计性质的随机变量.②模型定解条件(初始条件和边界条件)也具有随机性,主要来源于测量误差及插值误差.有时边界条件本身就是一个随机过程,如作为边界条件的河流,其水位一般都是随机变化的.③地下水水流模型中包含的源汇项,如人工开采、大气降水入渗等,都是随机变化的.④由于地质及水文地质条件的复杂性,所建立的模型都是客观条件的一种概化和近似,同时对各种资料的处理都存在近似和舍入误差.在这种近似和概化过程中,一些信息的丢失和失真必然会给模

型带来随机误差.

由此可见,描述地下水水流运动规律的参数及处理手段都具有随机性和误差,因此,所建立的数学模型也是随机的,其模拟结果(水头分布)不应是一个确定的结果,而应当看作是具有一定概率分布的随机函数.一般来说,若地下水水流定解问题中控制方程的系数或定解条件中包含随机函数,就称此定解问题为随机地下水定解问题.确定性模型可以认为是随机模型的特例^[1].

2 参数随机模拟模型

在地下水数值模拟中通常使用模型校正的手段来确定水文地质参数,这种方法需要具备足够的实际观测资料.但在实际工作中获得足够的观测资料是比较困难的,因此通过模型校正得到的参数只能认为是曲线拟合参数,可以看作是一种随机变量.基于水文地质参数的这种随机性,Dagan 等提出了随机理论的研究方法^[3,4].地下水随机模拟方法主要有矩方程法和蒙特卡罗(Monte-Carlo)法.矩方程法通过求解有关均值和协方差的随机偏微分方程获得

基金项目 水利部科技创新资助项目(SCX2003-05) 河海大学院士基金资助项目
作者简介 刘猛(1980—),男,辽宁锦州人,硕士研究生,从事地下水资源评价与管理研究.

随机问题的解,而蒙特卡罗法则是通过平均一系列反映含水层实际性质的确定性问题来模拟随机过程的一种计算机模拟方法.

在 GMS(地下水模拟系统,Groundwater Modeling System,简称 GMS)中,参数随机化的实现采用蒙特卡罗法.它假定随机变量的概率分布函数是已知的,且已知随机变量之间的相关结构即协方差函数,可用伪随机数的生成技术产生多组输入变量,然后在每组输入变量基础上运行数值模型,可得若干模型计算结果,从而可获得解的统计估计量^[5].

在 GMS 的参数随机模拟中,假设模型的输入参数(渗透系数、给水度等)是符合一定分布的随机变量(例如,渗透系数被认为是符合对数正态分布的,而给水度服从均匀分布^[6]),然后为每个参数指定均值和标准差,作为该分布的统计特征.在此基础上,对参数做抽样试验.每一次模拟产生一组指定分布参数的随机数组合,在每一组随机数基础上都运行一次 MODFLOW,这样就会产生一系列的解(即水头分布),根据这些解可计算出每个节点上水头的均值、标准差等随机特征.模拟次数越多,选择搜索的置信区间越大.与确定性模型最后求得一个确定的解相比,这种随机解能更真实地反映实际地下水系统的内在不确定性.

3 实例应用

3.1 研究区水文地质条件

研究区位于河北省承德县滦河附近,属河谷阶地地貌单元,在此处拟建一个傍河开采地下水的水源地.阶地由河流冲积物构成,以砂卵砾石为主,渗透性好,地下水与河水有着密切的水力联系.潜水含水层中的地下水主要接受大气降水入渗补给和河流侧向入渗补给,以及基岩山区侧向补给.

3.2 水文地质条件概化

模拟区地势西高东低,滦河和老牛河在研究区汇合,向东南流出.地下水受地形地貌及含水层产状控制,主要流向基本和河流流向相同,自西北向东南.模型研究的目标含水层为松散岩类孔隙潜水含水层,地下水流可概化为非均质水平各向同性的潜水含水层中的平面二维流.模型区基岩裂隙发育较好,对河谷间含水层有一定的侧向补给,定义为 MODFLOW 的通用水头边界,其余边界均概化为一类水头边界.

3.3 数学模型的建立

根据上述水文地质概念模型,建立潜水二维流数学模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(K(H-B)\frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K(H-B)\frac{\partial H}{\partial y}\right) + \\ W - Q_E - Q_V = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (x,y) \in D \\ H(x,y,t) \Big|_{\Gamma_1} = H_1(x,y,t) \quad (x,y) \in \Gamma_1 \\ H(x,y,t) \Big|_{t=0} = H_0(x,y) \quad (x,y) \in D \end{cases}$$

式中: H 为潜水水位; B 为潜水含水层底板标高; K 为潜水含水层渗透系数; μ 为潜水含水层给水度; W 为潜水补给强度; Q_V 为潜水开采强度; Q_E 为潜水蒸发强度; H_0 为初始水位; H_1 为一类边界处的地下水水位; D 为模拟区范围; Γ_1 为一类水头边界.

3.4 数值模型的建立

利用 GMS 的 MODFLOW 模块建立数值模型,模拟区面积约 2.2 km^2 ,采用矩形网格剖分,共剖分为 2456 个单元.根据含水层岩性的不同,划分为两个水文地质参数区(图 1).

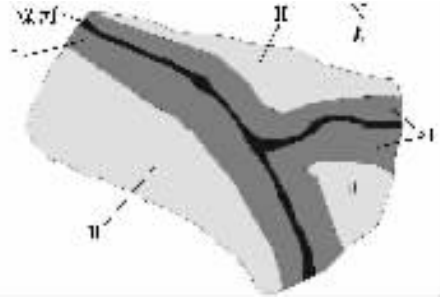


图 1 研究区水文地质参数分区

3.5 随机参数的确定

本次研究主要针对含水层水文地质参数的随机特性,因此把开采井抽水量取为定值输入,并且由于研究区范围较小,下垫面条件变化不大,所以降水补给、蒸散发和边界条件等仍当作确定性参数输入.

利用抽水试验期间的实测资料对模型进行调参校正,通过模型识别反求参数,得到模型的水文地质参数.分区 I 的参数值为:渗透系数 320 m/d ,给水度 0.3.分区 II 的参数值为:渗透系数 280 m/d ,给水度 0.25.

在获得水文地质参数的基础上,确定进行蒙特卡罗法模拟的参数范围和随机变量的统计特征.其中初始值取模型识别阶段得到的参数值,参数取值上、下限分别取为初始值的 75% 和 125%,标准差取为区间长度的 20%,见表 1.

表 1 随机参数的输入设定

分区	渗透系数/ $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$				给水度			
	初始值	下限	上限	标准差	初始值	下限	上限	标准差
I	320	240	400	32	0.3	0.225	0.375	0.03
II	280	210	350	28	0.25	0.188	0.313	0.025

注:渗透系数符合对数正态分布,给水度符合均匀分布.

3.6 随机模型的运行

设定 GMS 进行蒙特卡罗随机模拟 200 次,然后

运行模型对未来开采条件下的地下水水流进行预测. 模拟预测期为 2005 年 1 月到 2008 年 12 月, 预测水源地投入生产后的地下水位变化情况, 运行结束可得到随机生成的参数值 200 组 (见表 2) 及其对应的 200 组解.

表 2 蒙特卡罗模拟生成的部分参数值

渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)		给水度	
分区 I	分区 II	分区 I	分区 II
275.8145	275.3602	0.324318	0.248124
260.1228	289.7255	0.322903	0.239258
320.2747	271.0019	0.329644	0.229453
291.4366	280.6634	0.293207	0.261852
315.5430	270.4127	0.261333	0.225416
246.6237	250.8619	0.327846	0.236883
380.4557	276.9579	0.316187	0.257732
287.2245	282.5614	0.340272	0.271856
263.1243	249.6350	0.289872	0.209560
295.5077	286.5028	0.326112	0.256754
371.3345	278.2045	0.242357	0.233567
349.5243	257.2287	0.342245	0.197126

利用 GMS 的数据处理工具对得到的 200 组解进行统计分析, 求得预测水位的均值和标准差. 绘制出模型 (2005 年 1 月) 的初始流场及预测出的 2008 年 12 月底的水位均值和标准差等值线图 (见图 2~4). 由标准差等值线图可以看出, 在开采井附近和靠近山前基岩出露的模型边界处, 预测水位的标准差比河谷阶地处稍大. 这和开采井附近水位梯度大, 以及基岩边界处水文地质条件变化复杂的实际情况相吻合.

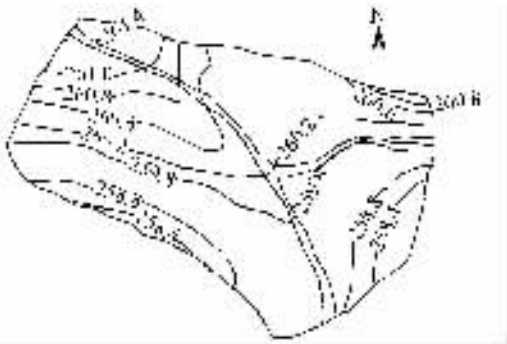


图 2 2005 年 1 月的初始水位等值线 (单位: m)

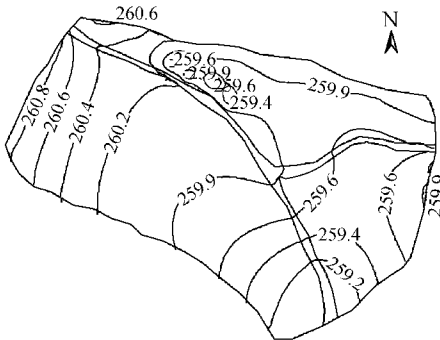


图 3 2008 年 12 月预测水位均值等值线 (单位: m)
通过分析计算结果可以知道, 在研究区内, 预测

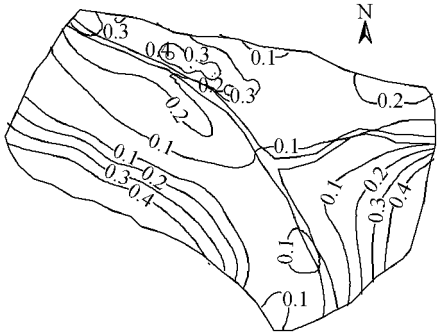


图 4 2008 年 12 月预测水位标准差等值线 (单位: m)
水位标准差普遍较小, 最大不超过 0.5 m. 说明预测出的水位是可靠的, 有一定的实际应用价值, 该模型可以用于未来水位变化情况的预测及地下水资源量的风险评价, 为傍河开采地下水方案的制定提供科学依据.

4 结 论

- a. 由于水文地质参数的随机性, 地下水数值模拟模型具有很大的随机性, 确定性模型只是其中的一个特例. 因此, 采用参数随机模拟模型能更真实地逼近客观的水文地质条件.
- b. 原则上, 随机抽样模拟次数越多, 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. 但是, 由于随机解是通过求解一系列不同参数组合的水流模型获得的, 需要进行偏微分方程求解的多次重复运算, 往往需要花费大量时间, 占用大量磁盘空间, 对计算机的性能要求较高.
- c. 参数随机模型最终模拟的效果依赖于对初始参数的估计, 而如何利用有限的观测资料, 给出随机参数的统计特征, 使数值模型可以准确地刻画含水层本身的内在随机特性, 还有待进一步的研究.

参考文献:

[1] 姚磊华. 非平稳随机地下水流模拟 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (增刊): 16—21.
[2] 祝晓彬. 地下水模拟系统 (GMS) 软件 [J]. 水文地质工程地质, 2003, 30 (5): 53—55.
[3] 杨金忠, 蔡树英, 叶自桐. 区域地下水溶质运移随机理论的研究与进展 [J]. 水科学进展, 1998, 9 (1): 85—971.
[4] Dagan G. Stochastic modeling of groundwater flow by unconditional and conditional probabilities, 1, Conditional simulation and the direct problem [J]. Water Resources Research, 1982, 18 (4): 813—833.
[5] 孙讷正. 地下水污染——数学模型和数值方法 [M]. 北京: 地质出版社, 1989.
[6] 孙维志, 韩华. Monte-Carlo 随机有限体积法在深圳市杨木坑水源地的应用 [J]. 工程勘察, 2000 (3): 20—22.

(收稿日期: 2005-06-20 编辑: 骆超)