

参数随机模拟在地下水溶质运移数值模拟中的应用

吴晓艳, 熊正为, 彭小勇, 邹晓亮, 杨博豪

(南华大学 城市建设学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 从水文地质参数的随机性出发, 以我国南方某大型铀尾矿库为例, 采用GMS软件(地下水模拟系统)建立了参数随机模拟的数值模型, 分析了渗透系数的空间变异性对地下水溶质运移的影响。结果表明: 渗透系数的空间变异性对地下水溶质运移结果有较大的影响。在其它条件都相同的情况下, 随着渗透系数标准差的增大, 污染物运移的范围扩大, 污染物浓度标准差等值线图变得越来越不规则, 污染物质心位置偏离面源中心。

关键词: 随机模拟; GMS软件; 渗透系数; 空间变异性; 溶质运移; 地下水

中图分类号: P641.8; X523

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)06-0058-04

Application of stochastic parameter simulation to groundwater numerical simulation of solute transport

WU Xiaoyan, XIONG Zhengwei, PENG Xiaoyong, ZOU Xiaoliang, YANG Bohao

(College of Urban Construction, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: In consideration of the stochastic property of hydrogeology parameter, the groundwater modeling system GMS software was adopted to develop a numerical model for stochastic parameter simulation of a large uranium tailings impoundment in South China. The effect of the spatial variability of permeability coefficient on solute transport in groundwater was analyzed. Results show that the spatial variability of permeability coefficient exerts great effects on the results of solute transport in groundwater. At the same conditions, along with the increase of the standard deviation of hydraulic conductivity stochastic field, the range of contaminant migration expand, contour maps of the standard deviation for pollutant concentration become more and more irregular. Meanwhile, the centroid position of contaminant deviates the center of non-point source.

Key words: stochastic simulation; GMS; permeability coefficient; spatial variability; solute transport; groundwater

地下水数值模拟是目前分析地下水资源和地下水环境变化的重要手段。以往的数值模型多采用确定性方法建立, 但是, 地下水含水层的几何条件复杂多变, 各种水文地质参数都呈现一定的空间变异性, 致使污染物在地下水中的运移具有较大的不确定性。为此, 人们提出了随机理论方法, 随机理论方法可以在有限的条件数据下, 从宏观和统计的角度描述地下水溶质运移的空间变异规律。自20世纪80年代以来, 随机理论方法已被广泛的应用于渗透系数的空间变异性及地下水运动及溶质迁移问题的研究中^[1]。Freeze^[2]通过统计大量饱和带渗透系数和孔隙度的空间变异特征, 认为多孔介质渗透系数的空间变异性可以用对数正态分布来描述, 这一结论被后来的研究进

一步证实并获得广泛的应用^[3]。

水文地质参数的空间变异性是影响地下水运动和溶质迁移过程不确定性的主要因素。其中, 渗透系数的空间变异性最大, 其最大值与最小值相差可达13个数量级^[1]。与渗透系数相比, 孔隙率、给水度及其它水文地质参数的空间变异性可忽略不计, 因此本文仅考虑渗透系数的空间变异性对地下水溶质运移的影响。

GMS(地下水模拟系统, Groundwater Modeling System)是目前国际上较流行的综合性地下水软件包, 它是由多模块组成的, 可进行地下水流模拟、溶质运移模拟、反应运移模拟、随机模拟等。

收稿日期: 2012-07-23; 修回日期: 2012-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(11075072)

作者简介: 吴晓艳(1988-), 女, 湖南湘潭人, 硕士研究生, 研究方向为水处理理论与技术。

通讯作者: 熊正为(1963-), 男, 湖南沅江人, 教授, 硕士生导师, 主要从事水处理理论与技术研究。

1 水文地质参数的随机性

一方面,水文地质参数如含水层的渗透系数、孔隙率、给水度等,大都是通过有限的勘探试验获得的,这些参数的真实性和代表性受勘探试验在时空分布上的局限,难以代表任意尺度下地质参数的真实特征或性质。另外,由于人的主观认知问题以及对各种资料的处理都存在近似和舍入误差,必然会给模拟模型带来随机误差。另一方面,在地下水数值模拟中通常使用模型校正的方法来确定水文地质参数,这种方法需要足够多的实际观测资料,但是在实际工作中获得足够多的观测资料是比较困难的,通过模型校正得到的参数只是曲线拟合结果,拟合结果也具有一定的随机性^[4]。

2 参数随机模拟模型

参数随机模拟模型的建立是以已知的信息为基础,以随机函数为理论,应用随机模拟方法,产生等概率、高精度的地质参数分布模型^[5]。

随机模型作为预测地下水多孔介质中水流和溶质运移的有利工具,最早始于 Warren 和 Price^[6] (1965) 的 Monte - Carlo (蒙特卡罗) 模型研究,此模型假定随机变量的概率分布函数和随机变量之间的协方差函数已知,用伪随机数的生成技术生成多组输入变量,然后对每组随机变量进行数值模拟,得到相应的若干模型计算结果,并获得所有解的统计估计量^[5]。在 GMS 中,参数随机化的实现主要采用蒙特卡罗法^[7]。在 GMS 中的参数随机模拟中,首先要以参数随机场的统计特征(平均值、标准差)作为输入。设定随机场实现的次数,对随机参数做抽样试验。然后,根据生成的参数随机场,运行对应条件下的水流模型(MODFLOW)和溶质运移模型(MT3D),以获得研究区污染物的浓度分布场。本研究中的随机参数为渗透系数。

3 实例应用

3.1 研究区概况

研究区为我国南方某大型铀尾矿库,尾矿库被 A 江由北、南、西三个方向环绕,沿 A 江东侧发育有三级阶地,该三级阶地的含水岩组、孔隙率、渗透系数等水文地质参数差异较大。因此,将研究区划分为三个水文地质参数区。图 1 为研究区平面及网格剖分图,研究区总面积约为 62.2 km²。研究区地势东高西低,地下水总体流向为由东向西,其内发育有第四系松散沉

积物孔隙含水层和红层孔隙裂隙水含水层,它们相互联系,有着完整的地下水补给、径流、排泄条件,构成一个相对独立的地下水系统。

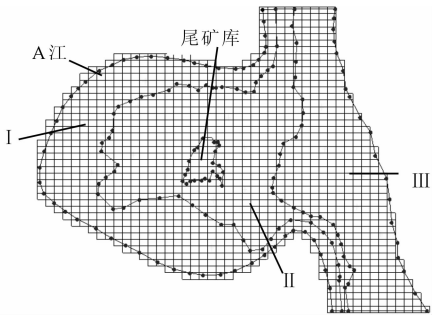


图 1 研究区平面及差分剖分网格图

3.2 模型概化

根据研究区水文地质条件,地下水流可概化为单层均质各向异性潜水平面二维流。将河流设为定水头边界,水头为 48 m,研究区东侧以地表水分水岭为界,设为隔水边界,模拟区的南北两侧以流线为边界,亦设为隔水边界,整个模拟区地表设为降雨入渗边界。考虑到研究区的水平尺度远大于垂直尺度,并且库区底部建有人工黏土垫层,污染物运移模型同样概化为平面二维稳定流模型,不做垂向浓度模拟^[8]。以整个尾矿库作为一个核素迁移的面源,以迁移能力强,半衰期长的放射性核素铀(U)作为模拟对象,应力期设为 120 d。以废水中铀浓度的平均值 ρ_0 (0.705 mg/L)作为初始入渗浓度。

3.3 随机模型的建立及运行

本次研究主要针对含水层渗透系数的空间变异性对地下水溶质运移的影响,其它水文地质参数、降水补给和边界条件等仍作为确定性参数输入。

利用研究区实测水头对水流模型进行参数校正后,最终得到分区I、II、III的渗透系数分别为 40、5.6、4.39 m/d,以此作为随机变量渗透系数的均值(表 1)。

表 1 渗透系数标准差为 0.2 时的随机参数 m/d

分区	均值	最小值	最大值	渗透系数标准差
I	40	32	48	8
II	5.6	4.48	6.72	1.12
III	4.39	3.512	5.268	0.878

渗透系数的上下限分别取均值 $\times(1\pm\text{标准差})$ 。由于渗透系数标准差的大小反映其空间变异性,下面分别研究渗透系数标准差为 0.2、0.3、0.5、0.7 四种不同情况下,研究区地下水中铀迁移变化规律。设定随机抽样次数 300 次,得到随机生成的 300 组渗透系数,在此基础上,运行水流模型及溶质运移模型,运行

结束后可获得与各组参数对应的 300 组水流模型解和溶质运移模型解,最后对以上所有实现的结果进行统计分析。

3.4 模拟结果与分析

不同渗透系数标准差条件下,根据利用蒙特卡罗法随机生成的渗透系数随机场,得到目标迁移物质铀在含水层中运移 120 d 的平均浓度分布(图 2)。为了便于对比,图 2 中还绘制出了均质条件下(标准差为 0)铀浓度的分布状况。由图 2 可看出,随着渗透系数

标准差的增大,即空间变异性的增大,铀平均浓度分布的大致形状不会改变,但浓度的峰值减小。由于各曲线间的浓度差相同,由图 2(a)~图 2(e)可知,随着渗透系数空间变异性的增大,铀的浓度梯度不断减小,表明铀在尾矿库周边的扩散范围不断扩大。

图 3 为不同渗透系数标准差条件下,铀在含水层中运移 120 d 浓度的标准差变化情况。将图 2 与图 3 进行比较可知,随着渗透系数标准差的增大,铀浓度标准差等值线图变得越来越不规则。

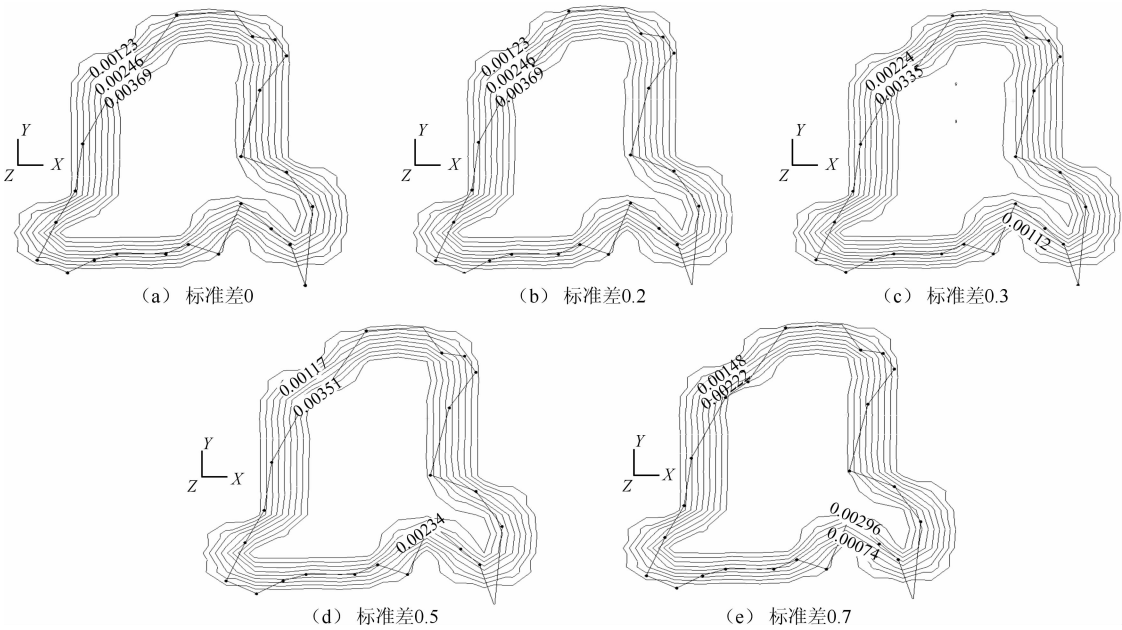


图 2 不同渗透系数标准差条件下尾矿库周围铀在第 120 d 时浓度均值等值线图

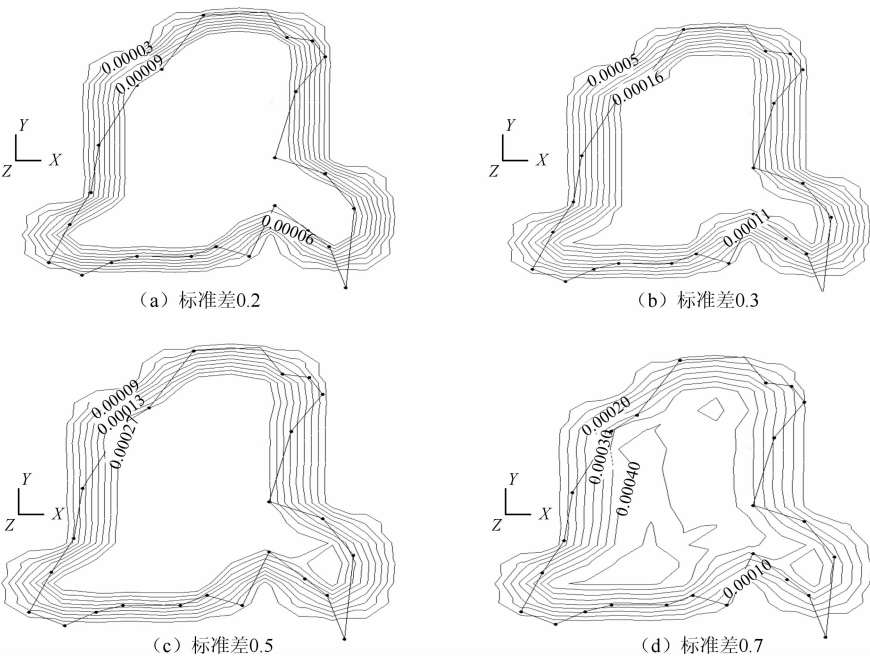


图 3 不同渗透系数标准差条件下尾矿库周围铀在第 120 d 时浓度标准差等值线图

在同一浓度标准差等值线图中,铀浓度由中心往外围沿着浓度均值等值线减小的方向,各节点处的浓度标准差基本上也逐渐减小。而对于不同渗透系数标准差的各种情况,由图3(a)~图3(d)可知,当渗透系数的空间变异性增大到一定程度,铀浓度标准差并不表现为从中心向外围单调减少的趋势,而是出现了反复的情况。由图3(c)和3(d)可看出,随着渗透系数空间变异性的增加,污染物的质心位置发生了偏移,污染物质心不再在迁移面源的中心,此变化集中体现出渗透系数的空间变异性对地下水溶质运移的影响。

4 结 语

(1)参数随机模拟的最终结果依赖于对参数初始值的估计,而利用有限的观测资料给出随机变量的统计特征,使随机模型能准确的刻画含水层本身内在的随机特性具有一定的难度。因此,参数随机模型仍具有一定的不确定性。

(2)渗透系数的空间变异性对地下水溶质运移结果有较大的影响,这种影响可以通过污染物浓度均值等值线图和浓度标准差等值线图反应出来。在其它条件都相同的情况下,随着渗透系数标准差的增

大,污染物运移的范围扩大,污染物浓度标准差等值线图变得越来越不规则,污染物质心位置偏离面源中心。

参考文献:

- [1] 王开丽,黄冠华. 强变异渗透系数对地下水和溶质迁移影响的研究[J]. 水动力学研究与进展,2010, 25(4):542 - 550.
- [2] Freeze R A. A stochastic conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in non-uniform homogeneous media [J]. Water Resources Research,1975,11(5):725 - 741.
- [3] 阎婷婷,吴剑锋. 渗透系数的空间变异性对污染物运移的影响研究[J]. 水科学进展,2006,17(1):29 - 36.
- [4] 刘 猛,束龙仓,刘 波. 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.
- [5] 李 森,陈家军,叶慧海,等. 随机方法在地下水水分及溶质运移中的研究进展[J]. 水资源研究,2005,26(4):22 - 25.
- [6] Warren J E, Price H S. Flow in heterogeneous porous media[J]. SPE Journal, 1961,9:153 - 169.
- [7] 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.
- [8] 谭文清,孙 春,胡婧敏,等. GMS 在地下水污染质运移数值模拟预测中的应用[J]. 东北水利水电,2008(5):54 - 55.

(上接第57页)

12%和7%~28%。②掺不同品种纤维对混凝土的强度指标有显著影响,掺网状纤维混凝土的抗拉强度增幅高于掺单丝纤维混凝土。③纤维的掺量对混凝土的力学性能有显著影响,随着纤维掺量的增加,混凝土抗拉强度和抗折强度亦随之增加。纤维掺量在0~0.9 kg/m³时,强度增加的幅度较大。纤维掺量超过1.2 kg/m³时,强度呈下降趋势。

4 结 语

(1)聚合物纤维混凝土的抗裂性能、抗渗性能、变形性能和力学性能等比普通混凝土显著提高,纤维掺量在0.5~1.5 kg/m³时,聚合物纤维混凝土比普通混凝土抗裂性能提高65%~86%、抗渗性能提高11%~64%、极限拉伸值提高17%~45%、弹性模量降低4%~5%、抗拉强度提高13%~38%、抗折强度提高5%~12%、抗压强度提高7%~28%。

(2)聚合物纤维混凝土配合比与普通混凝土配合比基本相同,无需改变配合比参数,但掺入聚合物纤维后混凝土流动性和坍落度降低,应保持水胶比

不变,通过掺用减水剂或适当增加用水量来调整坍落度。聚合物纤维适宜掺量为每立方混凝土掺0.9~1.2 kg。掺网状纤维混凝土性能指标优于掺单丝纤维混凝土,但网状纤维依赖进口,价格昂贵,国产单丝纤维价格仅为进口网状纤维的1/2~1/3,掺国产单丝纤维混凝土性价比优于掺网状纤维混凝土。

(3)聚合物纤维混凝土可用于水利水电工程中有防裂、防渗要求的板式结构如大坝防渗面板、溢流堰面、厂房和船闸底板、渠道防渗衬砌等。

参考文献:

- [1] 戴建国,黄承逵. 网状聚丙烯纤维混凝土的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,1999(4):35 - 38.
- [2] 朱 江. 聚丙烯纤维混凝土在路面工程中的应用研究[J]. 混凝土,2000(9):8 - 10.
- [3] 四川省纤维检验局. 微纤维检验报告[R]. 2001.
- [4] 广西水利科学研究所. 达开水库灌区西总干渠防渗混凝土配合比设计试验报告[R]. 1999.
- [5] 企业标准 Q/20182318 - 5.1 - 1999[S]. 奥德聚合物微纤维,四川产品质量检验技术开发研究所,1999.