

污染场地渗透系数非均质性表征研究

张梦琳^{a,b}, 程莉蓉^{a,b}, 丁爱中^a, 孙雪^{a,b}

(北京师范大学 a. 水科学研究院; b. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要: 介绍了分区赋值、克里格和序贯高斯随机模拟3种表征渗透系数非均质性方法的原理,对比了不同方法对结果的影响。以某污染场地为例,综合考虑地层、数据采集方法和非均质性表征方法设计了5种方案,研究不同方案对地下水溶质运移模型的影响,探讨了不同表征方法的优缺点及差异性。研究结果表明:序贯高斯模拟法所得的空间分布结果,能反映出存在于局部区域边缘的渗透系数的突变,克服了另外两种方法的局限性。分层序贯高斯随机模拟法能够体现出较为连续的渗透带的分布范围及场地内部渗透性发生变化的位置,较其他几个方案的结果准确性较高。应用分层赋值法能够最大程度地表征污染羽的范围;应用分层随机模拟法能够较为全面地描述出污染羽分布的浓度变化差异。在进行污染场地溶质迁移模拟时,应综合考虑地层岩性、数据采集方法和非均质性的表征方法来描述渗透系数的空间分布。

关键词: 渗透系数; 非均质性; 污染场地; 溶质运移

中图分类号: TV139.14; X53

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)04-0233-08

Heterogeneity characterization of hydraulic conductivity at contaminated site

ZHANG Menglin^{a,b}, CHENG Lirong^{a,b}, DING Aizhong^a, SUN Xue^{a,b}

(a. College of Water Sciences; b. Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The principle of three heterogeneity characterization methods for hydraulic conductivity, i. e., zoning, Kriging and stochastic modeling were introduced. The paper compared the influence of different methods on results. Taking a contaminated site as an example, the paper comprehensively considered geological formation, data acquiring method and heterogeneity characterization method to design five scenarios. It studied the effects of different scenarios on the groundwater solute transport model, and discussed the advantages and disadvantages of different characterization methods. The results showed that the spatial distribution by Sequential Gaussian Simulation (SGSIM) can reflect the abrupt changes along some boundaries which other methods cannot do. The characterization of hydraulic conductivity using SGSIM provides a better representation of continuous change of conductivity in space than that by the other method. The zoning method gives the largest simulated plume, while the spatial variation of plume is better characterized with SGSIM. The result indicated that stratification, data acquiring method and heterogeneity characterization method should all be taken into consideration to describe the space distribution of permeability coefficient.

Key words: hydraulic conductivity; heterogeneity; contaminated site; contaminant transport

1 研究背景

污染场地评估与修复是现阶段环保行业关注的重点^[1],而查明场地水文地质条件,合理地概化场

地地下水水文地质条件,是研究调查评估场地污染的基础,也是预测污染物迁移路径、制定有效的场地修复措施的关键。地下水主要赋存于岩石的孔隙、裂隙及溶隙中,其含水层介质空间结构复杂,往往在

收稿日期:2016-02-25; 修回日期:2016-05-25

基金项目:中央预算单位科研自主基金项目(310400085)

作者简介:张梦琳(1991-),女,山西运城人,在读硕士研究生,主要研究方向为地下水数值模拟。

分布上呈现出不连续、非均质等特性,因此,描述含水层性质的水文地质参数也在空间上呈现出空间非均质性^[2-3],比如渗透系数、孔隙度等参数。

由于地层环境存在高度非均质性,导致场地渗透系数分布的非理想化,给场地水文地质研究带来了一系列问题^[4]。Feyen 等^[5]曾指出,由于渗透系数在很小的研究区域内可以变化几个数量级,较其他具有非均质性属性的参数而言,渗透系数对污染物运移的影响较大,因此,渗透系数的恰当表征是正确模拟含水层污染物运移的重要前提之一。

在污染场地进行调查和评价中,渗透系数的表征对预测污染物的迁移和制定修复措施非常重要。在实际场地调查中,有多种获取渗透系数的方法,各种方法的操作性、代表性、可靠性和成本不同,对渗透系数获取方法适用性和代表性的分析,将有助于在场地调查中合理地设计取样和试验方案。但受经费和技术等各种因素限制,只能获取少量的实测数据,而无法充分了解整个区域的参数分布^[6]。寻求一种尽可能利用有限的实测资料对未知位置的含水层参数进行合理估值的方法,是目前大区域地下水流模拟中的关键问题^[7],也是预测污染场地迁移路径的关键问题。渗透系数空间表征方法的不同将会影响到场地整体渗透性能的估计与预测;不同测定方法和表征方法的组合应用,也将影响到对场地污染物的运移路径及浓度大小的预测。

地质统计学是由法国马特隆教授创立的一种研究分布于空间中并显示出一定结构性和随机性的自然现象的一种数学地质方法^[8],其一经创立,就成为研究地质参数空间变异性的有力工具^[9]。在地下水环境系统领域,主要应用于地层参数和含水层参数的描述中,许多学者^[10-13]将地质统计法应用于渗透系数的空间描述表征,模拟了渗透系数空间变化对地下水流和溶质运移的影响。

本文旨在对具体污染场地的渗透系数非均质性进行表征,对比不同表征方法所得的渗透系数场的空间结构关系与差异,对比同一场地不同渗透系数场确定的溶质迁移模型的模拟结果的差异性以及对模型的影响程度,分析在场地的尺度下如何选择合理的水文地质参数表征方法对概念模型进行概化,为以后相似水文地质条件的场地研究提供一定的理论依据。

2 渗透系数非均质性表征方法

传统的渗透系数测定方法,都有其相应的适用

范围与局限性,其试验结构原理的不同导致表征的尺度不同,与渗透系数的非均质性程度有着密不可分的联系。关于渗透系数获取方法的文献很多,本文不再赘述。

2.1 分层分区赋值

地下水数值模拟中的分层分区赋值,是指根据场地地层岩性分布,针对同一岩性的地层区域,赋予统一的渗透系数值。分区赋值是场地实际研究中常见的表征方法,通过前期场地水文地质勘察,根据地层岩性及赋水性,确定场区内部地层的分布,选取同一渗透系数,将场区内部部分区域进行一定程度的均质性概化。这种分区赋值在实际场地研究中,常用于简化场地内部渗透性分布,在宏观预测评价场地内部环境变化时较为常见^[14-15]。

2.2 空间插值法

空间插值法指针对不同要素在空间的分布,根据其内在关系,利用一定的数学方程关系,推求其在研究区域空间内的未知分布值。现阶段,随着地统计学在地质领域的发展,克里格插值法在渗透系数分布表征中的应用逐渐广泛^[16-17]。本文拟定选取空间插值中的普通克里格插值为例,研究其在场地渗透系数空间表征中的应用。

该法的本质是以变差函数为基础,对区域化变量进行线性最优无偏估计的方法。假设目标变量是平稳的整体,通过计算待估点邻域内已知点对待估点的权重,来获取待估点的数据值,其计算式为:

$$Z^*(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

式中: $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为各已知点在位置点估值中所占权重; $Z(x_i)$ 为区域化变量在 x_i 点处的函数值。

通过求出无偏最优估计的权重值,建立克里格方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_j - x_0) \\ (j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\gamma(x_i - x_j)$ 为距离在这两点之间的变差函数值。

通过联立 $n + 1$ 个方程组,可以解出相应的权重值,计算各个待估点数值。

2.3 随机模拟

随机模拟可分为非条件模拟与条件模拟两种。非条件模拟是指结果与原数据的变差函数相同的模拟,当在非条件模拟的基础上要求观测点数据不变

时,此时的随机模拟即为条件模拟。条件模拟的结果相对于非条件模拟更具代表性,因此本研究中拟采用条件模拟。

条件模拟的方法简化如下:

$$Z_{CS}(\vec{X}) = Z_S(\vec{X}) + \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i) - Z_S(x_i)] \quad (3)$$

式中: $Z_{CS}(\vec{X})$ 和 $Z_S(\vec{X})$ 分别为模拟点的条件模拟值与非条件模拟值; $Z(x_i)$ 和 $Z_S(x_i)$ 分别为测量点 x_i 处实测值和非条件模拟值; λ_i 为权重系数。

序贯高斯模拟是在序贯模拟思想的基础上,引入高斯分布假设,即认为区域化变量的累积条件分布函数均服从高斯分布,利用克里格插值法对网格化后的研究区域各点的均值和方差进行求解,并以此为根据抽取网格值作为条件数据进行序贯计算^[18-19]。该方法要求模拟变量服从高斯标准正态分布,应用此法时应先对数据进行相应转换,使其满足标准高斯正态分布,然后再进行统计模拟,再将结果值逆向转换得到区域化变量的空间分布。

2.4 不同方法的差异性

对渗透系数采用不同空间表征方法,其结果存在一定的差异性。分区赋值法根据实际场地情况选取一定区域范围进行赋值,实质上是局部区域地层渗透性均质化的过程,这种方法侧重于宏观上对场地渗透性的表达与描述,往往忽略了场地内部的渗透性能的变化。普通克里格插值比分区赋值法能够表征出场地内部渗透系数的变化,提供一种无偏的最优估计值,但因其存在光滑效应,往往优化甚至掩盖了地层岩性交界处渗透系数的突变性,适用于空间变异性较小的区域。随机模拟法在克里格插值的基础上,能够克服平滑效应,且能较为真实的模拟场地内部的地质条件,但其原理相对复杂,空间分布结果变异性较大,将结果应用于场地实际水文地质模拟中存在一定的难度。

国际上的渗透系数空间表征软件有 GSLIB、GeoR、GCOSIM3D、SADA、GeoPACK 等软件,用以分析参数的空间分布特性和参数空间分布的模拟。本文选用由斯坦福大学研究开发的地统计软件 SGeMS 软件中的克里格插值及随机模拟功能对渗透系数进行空间表征。该软件集成多种地质统计算法,提供了大量的地质统计工具,操作界面简单易行,支持 Python 脚本语言以嵌套的方式创建简单的宏来完成应用程序及图形界面的建立。本研究中,先应用 SGeMS 软件对渗透试验测定的渗透系数分

别采用不同方法进行渗透系数空间分布表征;其次,综合考虑岩层分布及数值空间分布变异特点两种因素,结合不同表征方法,设定了5种不同的空间表征方案,对比分析各方案的可行性。

3 应用

3.1 研究区概况

研究区为北方某污染场地,地势平坦开阔,研究深度范围内为第四系松散沉积层,岩性包括黏质砂土、砂质黏土、黏土,细、中、粗砂等,各岩性岩层交错相间组成多层结构,垂向上大致可以分为6个岩性层,但各岩层内存在有显著非均质性,且厚度不同。(图1和图2分别为研究场地地层的立体空间分布与三维空间立体揭示图)。

3.2 数据空间分布

本次研究数据来源于对该污染场地进行的场地调查,在对该污染场地进行的调查中,采集了大量的原状和扰动土壤样品,通过渗透试验(179组)和粒径分析试验(73组)获得了各个采样点的渗透系数,在多个调查点还进行了不同层位的微水试验(14组)和渗水试验(12组),获取了相应的渗透系数。各个数据点的空间位置分布见图3,并用不同的颜色区分其所在的层位。可以看到,渗透试验的数据最多,并且在六个岩性层均有分布;粒径分析试验的数据略少,在某些层位缺少数据,特别是缺少第五层,即含水层的数据;微水试验的数据集中在含水层之上的粉质黏土层;而渗水试验的数据集中在浅部的包气带层。

3.3 不同概化方法空间概化结果对比

为了说明不同理论方法的特点和对比不同方法对结果的影响,采用上述3种理论方法对同一组数据进行表征。在已有数据中,通过渗透试验获得的渗透系数数据量最多,在各个地层均有分布,故被用于以下的分析中。

3.3.1 分区赋值 本次研究通过渗透试验获得的不同点上的渗透系数共有179个,对同一地层内各点的渗透系数计算平均值,场地渗透系数分区赋值结果见图4。

结果显示,各个地层渗透性的相对变化与实际勘察情况比较吻合,但是在第1层及第5层存在比较大的误差,第1层结果偏大而第5层结果偏小。进一步的分析表明,第一层的数据量少,影响到了地层渗透性能的表征,同时,当应用渗透试验测定含水层渗透系数时,由于粗颗粒的部分难以取到原状样

品,已有的数据均为本层内渗透性低的黏性土样,造成结果渗透性偏小。因此,使用本方法时,各地层要

有足够的均匀分布的数据;在层内渗透性显著不均匀时,数据应充分涵盖不同部分。

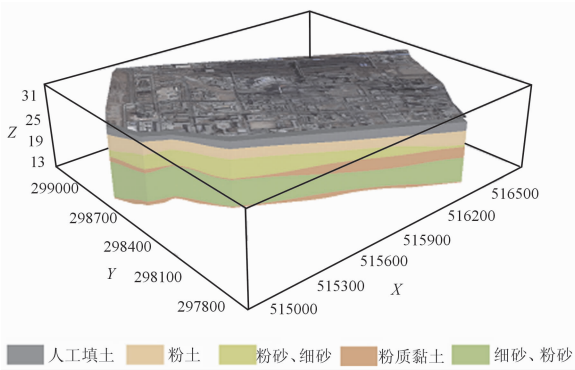


图1 场地地层立体空间分布示意图

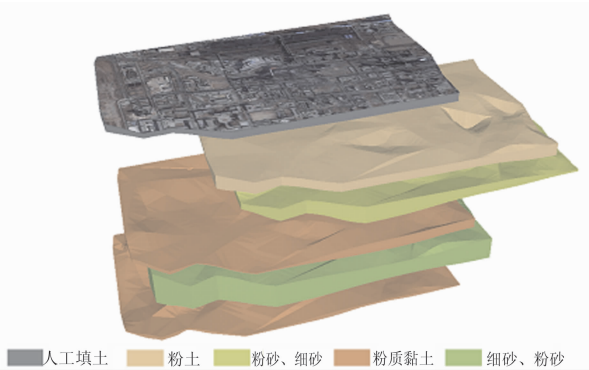


图2 地层三维空间立体揭示图

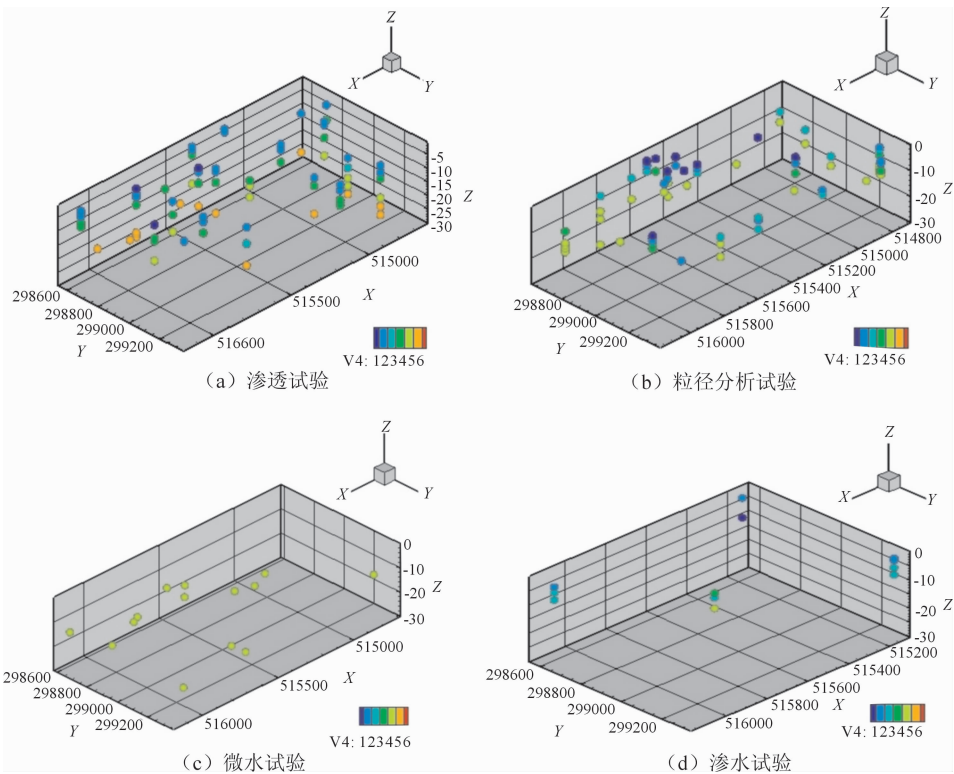


图3 各方法测定数据空间分布图

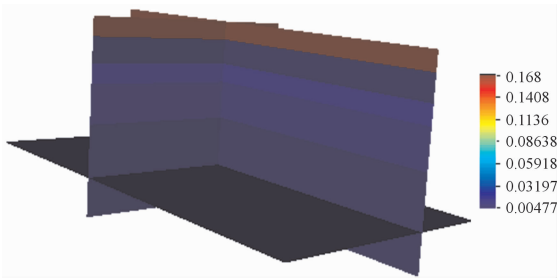


图4 渗透试验结果分层赋值空间表征图

3.3.2 普通克里格插值 普通克里格插值先对原始

数据进行对数转换分析、剔除特异值后满足正态分布后,共 74 组数据,图 5 给出了利用该方法得到的渗透系数的空间分布以及剖面图。插值结果显示,渗透系数在场地空间范围内存在多个渗透性不同的分布带,渗透系数在不同方向上具有一定的变异特点,在垂向上显示出了较为明显的分带性;存在近似椭圆的“牛眼”现象,牛眼中心渗透值较高,并向四周扩散,形成光晕;模型内部出现的分带性较为显著,但是并没有独立的渗透带能够贯穿其所在的整个层区,都出现了一定范围的分布晕,表现出了一定的断裂性;不同渗透带之间过渡自然,没有表现出突变性。因此,若研

究中单一使用渗透试验测定的数据进行空间表征,其结果存在较大的误差及局限性。

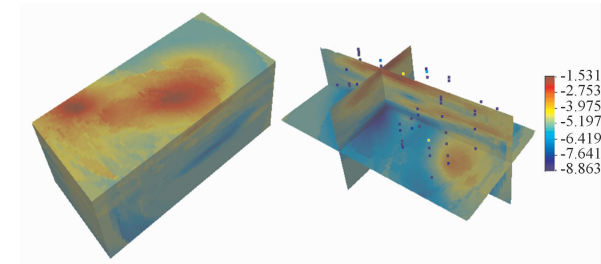


图5 普通克里格插值法模拟渗透系数对数空间分布场及剖面图

3.3.3 序贯高斯模拟 序贯高斯模拟可提供相同出现概率的不同结果,本次实现数(realization)设置为4。为了便于对比方法间结果的差异性,其他参数的选择保持不变,插值方法选择普通克里格插值。图6给出了利用该方法得到的渗透系数的空间分布以及剖面图。模拟结果表明,区别于普通克里格插值的光滑效应,该模拟结果呈现了不同渗透带的交叉分布;模拟结果中生成的渗透带形状不规则,容易出现类似神经元的结果,中心渗透性大,而边缘渗透性下降,但无论是内部还是边缘,其几何形状多变无规律,部分边缘呈现神经网状向外侧伸展;不同渗透带之间过渡性较差,基本不存在明显的“牛眼”现象及“分布晕”的现象。

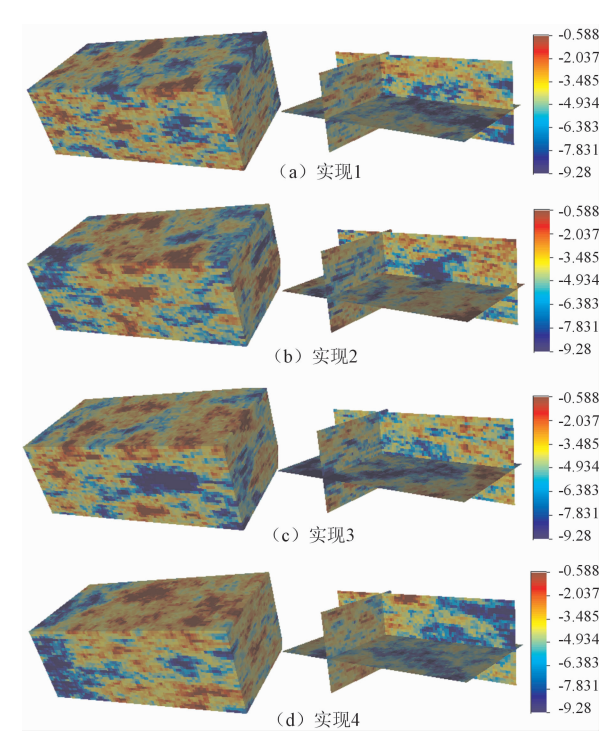


图6 序贯高斯条件模拟渗透系数对数空间分布图及剖面图

总的来说,分区赋值显示了渗透系数在垂向上

的变化,但无法表征同一层区内部渗透性的变化;普通克里格插值虽然细化了渗透系数在空间的分布,但应用时以服从正态分布为前提,有一定的限制性,并且插值结果平滑,掩盖了场地内部可能存在的小尺度渗透性突变带;序贯高斯模拟法则在前者的基础上给出了等概率发生的4种分布结果,每种结果均给出了不同的分布特征,并且其模拟的结果能够表征局部范围内渗透系数的变化。

3.4 综合考虑不同因素的表征方案

实际污染场地研究中,场地非均质性的准确表征往往需要综合考虑地层、渗透系数获取方法及概化方法。基于此,设计了5种不同的表征方案(见表1)。

表1 渗透系数空间表征方案

概化因素	方案	表征方法	数据来源
岩层分布	方案1	分区赋值	分层取值
	方案2	普通克里格	组合数值
数值变异性	方案3	随机模拟	组合数值
	方案4	普通克里格	分层取值
综合考虑	方案5	随机模拟	分层取值

方案1 主要侧重表征岩层之间渗透性的差异,在数据的选取上,整合4种试验在6个地层的数据,以不同方法获取的各个岩层的渗透系数均值作为此地层的渗透系数值,将其表征为分层均质的岩层。方案2 综合4种试验的所有数据,剔除极个别特异值,并经过对数转换后,数据分布近似于正态分布,其分布频率呈现小高峰,这来源于微水试验测定的渗透系数值,剔除这些数据会导致原始数据值在含水层分布的缺失,增加插值结果的误差,因此方案2的实施具有一定的局限性。方案3 为保证数据在场区内分布的完整性,综合所有试验数据并进行对数转换,利用转换后的数据进行模拟。方案4 为表征含水层渗透性的空间分布情况,采取分层空间表征的方法,将场地第5层单独考虑,其他渗透性相近的岩层组合,分两组进行空间表征。实际表征中,第5层数据无论是原始数据还是转换后的数据,都无法服从正态分布,因此方案4在本次研究中可行性不高。方案5 方法和方案4基本相同,不同点在于将普通克里格插值法更换为序贯高斯模拟法。

图7给出了根据方案1、2、3、5 概化的渗透系数在场区的剖面空间分布图。由图7a可知,方案1表征结果分布较为规则,由上到下呈现层间过渡性,在

第 1 层与第 2 层之间过渡不明显,二者数值相差不多,在第 3 层时渗透系数有增大的现象,至第 4 层减小,因此出现了第 3 层较上下两层较大的现象,但仍处于同一个数量级;在第 5 层时,渗透系数出现突变,地层由弱透水层转变为高渗透带,渗透性增大,层间变异明显;第 6 层为弱透水层,渗透系数较小,其数值与包气带地层较为接近。因此,将地层概化为一定程度的均质地层,能够清晰显示各层渗透性的变异程度,但是忽略了层内渗透性的变化。方案 2(图 7b)表明,场区局部出现高渗透带,但范围不大,呈现“牛眼”现象并小范围形成光晕。

方案 3(图 7c)表明,场区在 z 剖面上属于高渗透带,平面上存在部分高渗透区,垂向上,在一定程

度上能够表征地层渗透性的变化;但模拟结果显示的高渗透带往往只存在局部地区,没有形成连续地层,存在一定的差异,垂向地层分界不明显,但相对更接近实际地层渗透系数的分布。图 7d 显示,方案 5 综合除微水试验外的其他三种试验数据并进行序贯高斯模拟后,场地空间内渗透系数值较接近实际,存在局部高渗透带,且其分布范围较小,形状不规则。而第 5 层局部出现较大范围的低渗透带,将周围高渗透带区域切割成不规则形状的不连续地带;在垂向上存在明显的大范围高渗透带,但仍存在一些突变的低渗透带。该方案能够表征出整个地层内部存在的渗透性的突变地带,且场地渗透带呈现大部分的连续,基本没有层面缺失的现象。

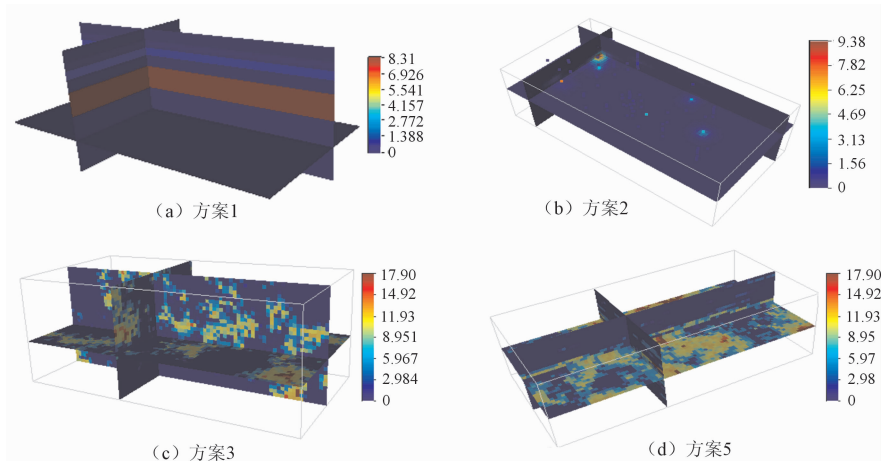


图 7 渗透系数剖面空间分布场图

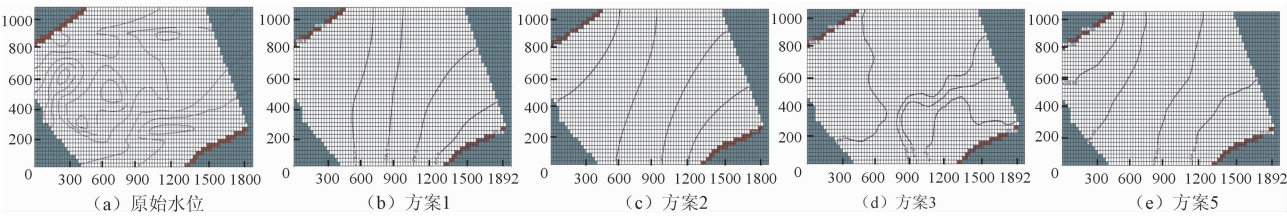


图 8 不同方案地下水水位等值线图

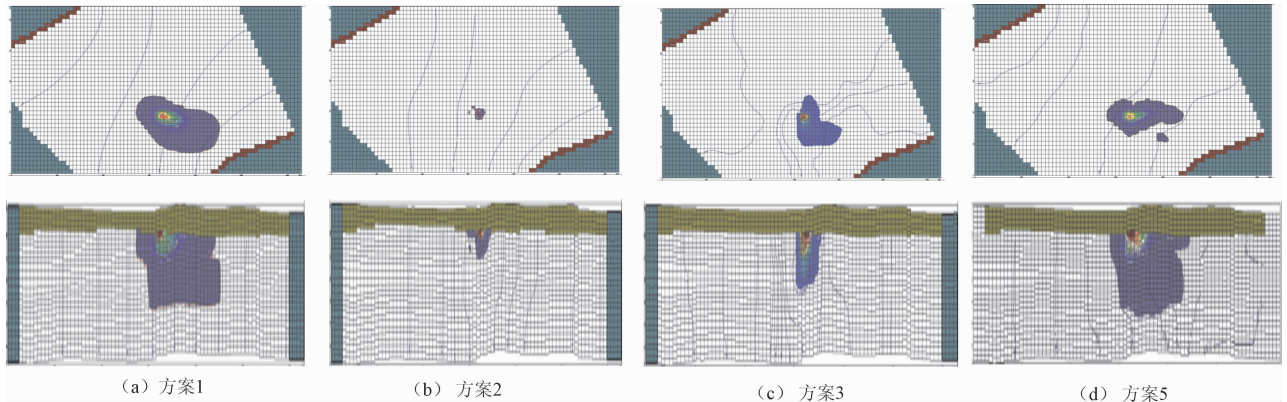


图 9 不同方案污染羽 50 年后模拟结果

总的来讲,与实际地层相比,方案1中能够在宏观上表征地层垂向上的变化,但各层内部地层变异特点无法体现;方案2中,层间垂向的渗透性并不明显,对应实际地层的位置并不存在大范围的高渗透区,与实际地层存在差异性,能够在一定程度上表征小范围渗透性的变异;方案3的结果同原始数据分布特征基本相同,且能够表征出层内的不规则的突变性,但由于其随机程度较高,在垂向上地层的分界不明显;方案4由于分层时第5层数据量不够,无法满足正态分布的要求,所以此方案无法实施;方案5中,其分布区域较为连续,能够表征渗透系数在垂向上的变化趋势,突出了第5大地层的高渗透性。

3.5 不同表征方案下的溶质运移结果

3.5.1 水流模型模拟结果 图8给出了研究场地内原始的以及依据方案1、2、3、5得到的渗透系数所对应的地下水水位等值线图。

由图8a可以看出,原始地下水等水位线呈不规则分布,场区地下水整体流向大致为由西北流向东南;50年后(图8b~8e)等水位线分布较为规则,即使水位线分布发生变化,但场区整体流向同初始流向基本一致,水位由西北向东南呈现递减的趋势。其中只有方案3的等值线出现了较密集的“山峰状”的分布,且与初始水位在场区的分布形态相似;其余三种方案的等水位线分布较为接近,基本为光滑曲线。

3.5.2 溶质运移模拟结果 污染物在场地的运移转化过程复杂,不仅有对流、弥散,而且可能有固体颗粒吸附于离子交换、化学反应、微生物降解等化学和生物化学作用,在不同的环境下这些作用的方向和强度又有很大不同,在本次研究中,由于数据的限制且模拟目的在于对比方案的真实效果,因此只考虑了对流和弥散作用。为探讨渗透系数非均质性对溶质迁移的影响,模型中除渗透系数按各方案赋值外,其他参数值为均质性统一值。不同方案下污染羽在50年后的模拟结果见图9。

由图9可知,不同方案所得结果存在极大的差异性。从污染羽扩散范围来看,方案1中(图9a)污染羽范围最大,方案2(图9b)范围最小,方案5(图9d)中垂向迁移最大距离为16 m,污染羽到达场地第6层底部;从污染羽中心浓度来看,最大值出现在方案3(图9c)中,约为460 mg/L;最小值出现在方案2(图9b)中,约为5 mg/L。这种浓度的差异与渗透系数的分布密切相关。

总的来说,方案1表征的污染羽分布均匀,各个

方向污染范围最大,渗透系数为均值,相较于其他方案,各层内部各点渗透性能相同,污染羽主要扩散方向为水流方向,且渗透系数相较其他方案中偏高,因此污染羽范围达到最大;方案2中渗透系数值普遍偏小,污染物运移慢,污染羽范围及浓度较其他方案小;方案3中水流模型的结果与其他方案有着明显的不同,其等水位线出现了明显的弯曲形态,更接近于初始水头,但由于试验数据的缺失,无法进行水位拟合,存在一定的不确定性;方案5结果同方案1相近,但其污染羽呈不规则形态,边缘呈锯齿状,能够表征局部范围内污染羽的浓度变异。

4 结 论

(1)利用地统计学中的序贯高斯模拟法来确定渗透系数的空间分布,能够同时提供等概率的多种模型结果,可以结合模型的结果同实际地层的分布进行选择,能刻画出存在于局部区域边缘的渗透系数的突变,克服了另外两种方法的局限性。

(2)5种不同表征方案的对比研究表明:使用分层序贯高斯随机模拟法确定的方案,能够刻画出较为连续的渗透带的分布范围及场地内部渗透性发生变化的位置,较其他几个方案刻画地层的准确性较高。

(3)场地污染模拟结果表明:应用分层赋值法能够最大程度地表征污染羽的范围,降低污染羽范围预测的风险;应用分层随机模拟法能够描述渗透系数在局部空间的变化,并且能够较为全面地表征出污染羽分布的浓度变化差异。

(4)在场地调查和修复的不同阶段,可以根据已有的数据类型和调查程度采用不同的方法来表征渗透性的空间分布。

(5)在进行污染场地溶质迁移模拟时,应综合考虑地层岩性、数据采集方法和非均质性的表征方法来描述渗透系数的空间分布。

参考文献:

- [1] 刘婷.我国建立污染场地环境评估制度的可行性及政策设计[D].北京:清华大学,2011.
- [2] 施小清,吴吉春,吴剑锋,等.多个相关随机参数的空间变异性对溶质运移的影响[J].水科学进展,2012,23(4):509-515.
- [3] 王开丽,黄冠华.二维强非均质含水层中渗透系数空间变异对污染物迁移的影响[J].水利学报,2010,41(4):437-445.
- [4] Feyen L, Ribeiro P J, De Smedt F, et al. Stochastic delin-

- ation of capture zones: classical versus Bayesian approach [J]. *Journal of hydrology*, 2003, 281(4): 313–324.
- [5] 施小清, 姜蓓蓓, 卞锦宇, 等. 以地质统计方法推估上海第三承压含水层渗透系数的分布[J]. *工程勘察*, 2009(1): 36–41.
- [6] 陈鲁, 龚方方. 含水层渗透结构的三维地质建模概述[J]. *水科学与工程技术*, 2012(3): 71–73.
- [7] 王雅春, 王璐. 地质统计学反演在杏北西斜坡区储层预测中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(5): 2554–2560.
- [8] 梁婕. 基于不确定理论的地下水溶质运移及污染风险研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [9] Indelman P, Lessoff S C, Dagan G. Analytical solution to transport in three-dimensional heterogeneous well capture zones[J]. *Journal of contaminant hydrology*, 2006, 87(1): 1–21.
- [10] Kübert M, Finkel M. Contaminant mass discharge estimation in groundwater based on multi-level point measurements: A numerical evaluation of expected errors[J]. *Journal of contaminant hydrology*, 2006, 84(1): 55–80.
- [11] Delhomme J P. Kriging in the hydrosociences[J]. *Advances in water resources*, 1978, 1(5): 251–266.
- [12] Severino G, Cvetkovic V, Coppola A. Spatial moments for colloid-enhanced radionuclide transport in heterogeneous aquifers[J]. *Advances in water resources*, 2007, 30(1): 101–112.
- [13] 刘春学, 倪春中, 燕永锋, 等. 利用地质统计学方法模拟岩石裂隙网络的三维空间分布——以云南个旧高松矿田为例[J]. *地球学报*, 2013, 34(3): 347–353.
- [14] 吴晓艳, 熊正为, 彭小勇, 等. 参数随机模拟在地下水溶质运移数值模拟中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(6): 58–61.
- [15] 岳松梅, 杨蕴, 吴剑锋, 等. 基于不同地质统计方法的渗透系数场对污染物运移的影响[J]. *地下水*, 2014, 36(4): 10–14.
- [16] 胡斌, 程丽蓉, 丁爱中, 等. 指示点法在地下水数值反演模型中的应用[J]. *工程勘察*, 2015(2): 39–45+51.
- [17] 赵彦锋, 孙志英, 陈杰. Kriging 插值和序贯高斯条件模拟算法的对比分析[J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(6): 767–776.
- [18] 李晓晖, 袁峰, 贾蔡, 等. 基于地统计学插值方法的局部奇异性指数计算比较研究[J]. *地理科学*, 2012, 32(2): 136–142.

(上接第 232 页)

- [4] 张岁岐, 周小平, 慕自新, 等. 不同灌溉制度对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 1–6.
- [5] 刘庚山, 郭安红, 任三学, 等. 夏玉米苗期有限水分胁迫拔节期复水的补偿效应[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(3): 24–29.
- [6] 杨国航, 刘鹏, 赵久然. 限制灌水对玉米品种叶片、根系等的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(20): 306–310.
- [7] Zhang Buchong, Li Fengmin, Huang Gaobao, et al. Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 79(1): 28–42.
- [8] Zhang Buchong, Huang Gaobao, Li Fengmin. Effects of limited single irrigation on yield of winter wheat and spring maize relay intercropping[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(4): 529–537.
- [9] 杨国虎, 李建生, 罗湘宁, 等. 干旱条件下玉米叶面积变化及地上干物质积累与分配的研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(5): 27–32.
- [10] 袁玉清, 赵致, 施关正. 干旱胁迫对玉米杂交组合叶片数和叶面积及生物产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(25): 10763–10765.
- [11] 李兴, 史海斌, 程满金, 等. 集雨补灌对玉米生长及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 34–38.
- [12] 马兰忠, 程满金, 冯婷, 等. 玉米集雨补灌灌溉制度试验研究[J]. *四川水利*, 2004(Z1): 31–36.
- [13] 张健, 池宝亮, 黄学芳, 等. 春玉米不同灌溉定额条件下抗旱指数的运用研究[J]. *玉米科学*, 2007, 15(5): 104–107+110.
- [14] 潘菊梅, 李辛村, 李涛, 等. 灌溉对粮饲兼用玉米根系分布及产量影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(11): 200–203.