

# 水文地质参数不确定性对地下水流模拟的影响研究

方 晓 鲁 震

山东省地矿工程勘察院（山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队） 山东济南 250014

**摘 要：**地下水流模拟在众多领域如水资源管理、环境科学等有着至关重要的作用。水文地质参数作为地下水流模拟的关键要素，其不确定性会对模拟结果产生多方面的影响。从整体来看，水文地质参数的不确定性主要源于几个方面。一方面是地质结构的复杂性，不同的地层结构、岩石类型等都会导致参数的变化。另一方面是测量技术的局限性，现有的测量方法可能无法精确获取某些参数的真实值。在未来的研究中，随着技术的不断发展，有望进一步降低水文地质参数的不确定性，从而提高地下水流模拟的精度。这将为水资源的可持续利用、环境保护等众多领域提供更有力的支持。

**关键词：**水文地质；不确定性；地下水流模拟

## 引言

地下水作为水资源的重要组成部分，在维持生态平衡、满足人类生产生活用水需求等方面发挥着不可替代的作用。随着对地下水资源开发利用程度的不断提高，准确模拟地下水流过程变得愈发关键。随着人类活动的加剧，如大规模的地下工程建设、地下水的过度开采等，地下水流系统的自然状态被改变，这进一步增加了水文地质参数的不确定性。这种不确定性如果不加以深入研究和合理处理，将会使地下水流模拟结果的可靠性大打折扣，从而影响到基于模拟结果的决策的科学性与合理性。

## 一、参数不确定性分类

### 1. 固有不确定性

固有不确定性是水文地质参数不确定性中的一个重要类型。它源于地质介质本身的复杂特性。地质体在形成过程中经历了漫长的地质作用，其结构、成分等方面存在天然的变异性。例如，不同地区的土壤或岩石，其孔隙度的分布就具有固有不确定性。在一些沉积岩地区，由于沉积环境的差异，即使是同一岩层内，孔隙度的变化范围也可能很大。从微观角度看，矿物颗粒的大小、形状和排列方式都会影响孔隙度的大小，而这些因素在天然状态下是随机变化的。

渗透率也是具有固有不确定性的水文地质参数。它反映了地质介质允许流体通过的能力。在岩溶地区，溶洞和裂隙的发育是高度不规则的。有的地方溶洞相互连通，形成了良好的导水通道，而在相邻区域可能溶洞发育较少，裂隙成为主要的导水通道。这种空间上的巨大

差异导致渗透率的固有不确定性。这种不确定性对于地下水流模拟的影响是显著的。在进行地下水流数值模拟时，如果不能准确考虑渗透率的固有不确定性，模拟结果可能与实际情况偏差很大。例如，当模拟一个大型岩溶泉域的地下水流时，若将渗透率简单地视为均匀分布，会导致对泉流量的预测不准确，进而影响水资源的合理开发与管理。

### 2. 认知不确定性

认知不确定性主要是由于人类对水文地质系统的认识有限而产生的。科学研究在不断发展，但目前对许多复杂的水文地质过程的理解仍然不够全面。以弥散系数为例，弥散是地下水中溶质运移过程中的重要现象。然而，目前的理论和模型对于弥散系数的确定仍然存在很大的不确定性。这是因为弥散系数受到多种因素的影响，包括水流速度、孔隙结构、溶质的物理化学性质等，而这些因素之间的相互作用非常复杂。

在实际应用中，对于一些新的地质环境或者复杂的水文地质条件，现有的认知水平可能无法准确地确定相关的水文地质参数。比如在深部地层中，由于缺乏足够的勘探和研究，对于深部岩石的渗透性、孔隙度等参数的认识就存在很大的不确定性。这种认知不确定性会影响地下水流模拟的准确性。如果在模拟过程中使用不准确的参数，可能会导致对地下水流场的错误描述，进而影响到对地下水污染扩散、地下水资源储量评估等方面的判断。

### 3. 数据获取限制

数据获取限制是造成水文地质参数不确定性的另一

个关键因素。水文地质数据的获取往往需要耗费大量的人力、物力和时间。例如，要准确获取一个大面积区域的孔隙度分布数据，需要进行大量的钻孔取样和实验室分析。然而，在实际操作中，由于成本和时间的限制，不可能进行无限密集的钻孔。这就导致了数据的稀疏性。

另外，数据测量的误差也会增加不确定性。在测量地下水位时，测量仪器的精度、测量环境等因素都会影响测量结果的准确性。即使是先进的水位自动监测仪器，也可能存在一定的误差。而且，对于一些特殊的地质环境，如高山峡谷地区或者海洋岛屿地区，获取数据的难度更大。在这些地区，地形复杂、交通不便等因素使得水文地质数据的获取更为困难，从而导致数据的不完整性和不确定性。这种数据获取限制对地下水流模拟的影响不可忽视，不准确的数据可能使模拟结果偏离实际情况，影响相关决策的制定。

## 二、水文地质参数不确定性对地下水流模拟的影响分析

### 1. 渗透系数不确定性的影响

渗透系数是水文地质参数中的关键因素。渗透系数的不确定性会对地下水流模拟产生多方面的显著影响。从数值模拟的角度来看，渗透系数的不准确会导致水流速度计算的偏差。例如，在一个典型的地下水流域模拟中，如果渗透系数被高估，那么模拟出的地下水流速可能会比实际流速快。这是因为渗透系数与水流速度之间存在着直接的数学关系，渗透系数越大，在相同的水力梯度下，水流速度就会越快。这种流速的偏差会进一步影响到地下水的补给和排泄关系的模拟。如果流速过快，可能会导致模拟中地下水的排泄量被高估，补给量被低估，从而影响整个地下水流域系统的水量平衡计算。

在空间分布上，渗透系数的不确定性也会带来问题。由于地质结构的复杂性，渗透系数在不同的区域可能存在很大的差异。如果不能准确地确定渗透系数的空间分布，那么在模拟地下水流时，就可能会出现水流路径的偏差。例如，在一个存在多层不同渗透系数地层的区域，若渗透系数的空间分布被错误估计，可能会导致模拟出的地下水流在不同地层之间的交换关系出现错误，原本应该在某一地层中流动的水可能会被错误地模拟到另一地层中，这对研究地下水的运移规律和与周围介质的相互作用关系有着严重的干扰。

### 2. 给水度不确定性的影响

给水度也是影响地下水流模拟的重要水文地质参数。

给水度的不确定性会影响到地下水位的模拟结果。在实际情况下，给水度与土壤的孔隙结构、颗粒组成等因素密切相关。当给水度存在不确定性时，模拟出的地下水位波动情况可能与实际情况大相径庭。如果在模拟中给水度取值不准确，那么模拟出的地下水位在干旱季节和湿润季节的变化情况就会出现偏差。在干旱季节，由于给水度的不准确，可能会导致模拟出的地下水位下降速度比实际速度快或者慢，从而影响对该地区地下水可利用量的评估。

给水度的不确定性还会影响到地下水与地表水之间的相互作用关系的模拟。在一些河流与地下水联系紧密的区域，给水度的变化会改变地下水对河流的补给量或者河流对地下水的补给量。如果给水度被低估，可能会导致模拟出的地下水对河流的补给量不足，从而影响对整个区域水资源循环的正确认识。

### 3. 弥散系数不确定性的影响

弥散系数在描述地下水中溶质运移过程中起着关键作用。其不确定性对地下水流模拟中溶质运移的模拟影响巨大。当弥散系数存在不确定性时，溶质的扩散范围和扩散速度的模拟就会出现误差。在一个受到污染的地下水区域模拟中，如果弥散系数被高估，那么模拟出的污染物扩散范围会比实际范围大，扩散速度也会比实际速度快。这会导致对污染区域的评估不准确，可能会使得采取的污染治理措施过度或者不足。

弥散系数的不确定性还会影响到不同溶质之间的相互作用关系的模拟。在一些复杂的地下水化学环境中，多种溶质同时存在并且相互影响。如果弥散系数不准确，可能会错误地模拟出溶质之间的化学反应和物理混合过程，从而影响对地下水水质变化规律的研究。例如，在一个存在多种重金属离子和有机物的地下水区域，弥散系数的不确定性可能会导致对这些物质相互作用后形成的新物质的运移和分布模拟出现错误，进而影响到地下水环境质量的准确评估。

## 三、水文地质参数不确定性对地下水流模拟的影响优化措施

### 1. 改进测量技术

在应对水文地质参数不确定性对地下水流模拟的影响时，改进测量技术是至关重要的一步。传统的测量技术往往存在一定的局限性，导致获取的参数不够精确，从而影响模拟结果的可靠性。例如，在渗透系数的测量方面，过去常用的单孔抽水试验可能会受到局部地层不均匀性的干扰，难以全面反映区域内的水力特性。此外，

传统的取样方法如钻孔采样和实验室测试虽然能够提供一定数据支持，但其空间代表性不足，容易忽略地层的空间连续性和非均质性。

新的测量技术如交叉孔试验、三维地球物理探测技术等能够提供更全面、准确的地层信息，弥补传统手段的缺陷。交叉孔试验通过在不同钻孔中进行抽水和观测，可以更精确地确定不同地层之间的水力联系和渗透系数的空间分布，有助于揭示地下水流动的真实路径和速度。三维地球物理探测技术则利用地震波、电磁感应等原理，构建地下地质结构的三维模型，从而为水文地质参数的确定提供更丰富的依据，尤其适用于复杂地质条件下的参数识别。

与此同时，遥感技术和井下成像技术的发展也为水文地质参数的测量提供了新途径。遥感可用于大尺度上分析含水层的空间展布特征，而井下摄像技术则可直观获取岩层裂隙发育情况，辅助评估渗透性能。这些先进技术的应用有助于降低因测量不准确而带来的参数不确定性，进而提高地下水流模拟的精度与可信度。

## 2. 增加样本数量与分布优化

增加样本数量并且优化样本分布对于优化地下水流模拟有着积极意义。样本数量过少会导致对整个研究区域的水文地质特征代表性不足。例如，在一个大面积的地下水流域研究中，如果仅在少数几个点进行取样和测试，所得到的水文地质参数可能无法反映整个流域的真实情况。通过增加样本数量，可以更全面地涵盖不同地质单元、不同地形地貌区域的参数特征。优化样本分布也不容忽视。将样本点合理地分布在不同的地貌单元、不同的地下水流向区域以及可能存在特殊地质构造的地方，可以更准确地捕捉到水文地质参数的空间变异性。例如，在山区与平原过渡地带，地下水流速、渗透系数等参数可能会发生较大的变化，在这些关键区域增加样本点，有助于更好地模拟地下水流的动态变化。

## 3. 采用多模型对比与集成

采用多模型对比与集成是优化地下水流模拟的有效手段。不同的模型在处理水文地质参数不确定性方面可能具有不同的优势和劣势。例如，基于物理机制的数值模型能够较好地反映地下水流的基本物理过程，但对于一些复杂的地质结构和边界条件可能存在模拟偏差；而数据驱动模型则可以利用大量的实测数据进行训练，对数据中的规律进行挖掘，但可能缺乏对物理过程的深入理解。通过对比多种不同类型的模型，可以发现不同模型在模拟结果上的差异，从而分析出参数不确定性在

不同模型中的表现形式。进一步地，采用模型集成的方法，将不同模型的优点结合起来。

## 4. 引入不确定性分析方法

引入不确定性分析方法有助于更好地应对水文地质参数不确定性对地下水流模拟的影响。常见的不确定性分析方法包括蒙特卡洛模拟、贝叶斯分析等。蒙特卡洛模拟通过随机抽样的方式，根据已知的参数概率分布生成大量的参数组合，然后分别进行地下水流模拟。通过分析这些模拟结果的统计特征，如均值、方差、概率分布等，可以得到地下水流模拟结果在不同参数不确定性下的变化范围。贝叶斯分析则将先验知识与实测数据相结合，不断更新对水文地质参数的认识。例如，在有一定的先验地质资料和少量新的实测数据时，贝叶斯分析可以根据先验概率分布和新数据的似然函数，计算出后验概率分布，从而更合理地确定水文地质参数的取值范围，提高地下水流模拟的可靠性。

## 结束语

在对水文地质参数不确定性对地下水流模拟影响的全面研究之后，得出了一系列具有重要意义结论。水文地质参数的不确定性贯穿于整个地下水流模拟过程，从参数的初始确定到模型的最终运行与结果分析，其影响无处不在。随着社会的发展，对地下水资源的需求和对地下水环境的保护要求也在不断提高。这就要求在未来的研究中，不仅要关注水文地质参数不确定性对地下水流模拟的影响，还要将这种影响与实际的社会经济需求和环境管理目标相结合。

## 参考文献

- [1] 杨元, 曹光明, 张焱秋. 水文地质结构对地下水流数值模拟的影响[J]. 地下水, 2023, 45(1): 47-49.
- [2] 李哲, 王力娜. 不同水文地质条件对城市地下水资源污染的影响研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(6): 120-124.
- [3] 王国梁, 梁修雨. 考虑河床渗透性影响的基流退水过程解析模型[J]. 地质科技通报, 2023, 42(4): 201-209.
- [4] 焦赳赳, 万军伟, 王旭升, 等. 陈崇希教授在水文地质领域的学术研究贡献[J]. 地质科技通报, 2023, 42(4): 1-14.
- [5] 李盼盼, 张磊, 杨远航, 等. 雅店煤矿地下水流数值模拟及涌水量预测[J]. 能源与环保, 2025, 47(1): 21-27.