

地下水人工回灌数值模拟研究综述

刘瑾 沙金霞

河北工程大学地球科学与工程学院 河北 邯郸 056038

摘要: 地下水人工回灌数值模拟研究是以地下水资源恢复与保护为目标,通过对这一领域研究状况的总结,论述模拟技术理论基础,关键技术与应用案例。理论基础部分包括地下水流动基本方程,数值模拟方法以及边界与初始条件设置等。关键技术包括模型的建立和验证,参数的反演和优化,多物理场耦合模拟和模型的不确定性分析。应用案例涵盖城市地下水人工回灌、农业灌溉区及矿山地下水人工回灌。研究表明:数值模拟对地下水资源管理评价效果显著,但是仍然面临着模型参数的不确定性,多物理场耦合的复杂性和模型验证的局限性。得出结论:今后的研究需要优化参数估计方法、开发多物理场耦合技术、强化模型验证与不确定性分析。

关键词: 地下水人工回灌;数值模拟;多物理场耦合;模型不确定性分析

引言

近年来,由于计算机技术的迅速发展及数值方法的改进,地下水人工回灌数值模拟的研究有了明显的发展。研究人员在对数值模拟理论基础进行深入探究的同时,也对仿真过程中一些关键技术问题开展了大量的研究工作,例如模型的构建和验证等、对参数进行反演和优化,进行多物理场耦合模拟,对模型进行不确定性分析。这些研究结果既丰富了地下水人工回灌数值模拟理论体系,又为工程实际应用提供科学依据与技术支撑。文章旨在总结地下水人工回灌数值模拟研究状况,对理论基础与关键技术进行梳理,对今后发展趋势进行探讨。通过对相关研究结果进行深入剖析,旨在为地下水资源合理开发利用与保护,推动地下水资源可持续利用提供新思路与新途径。

1 地下水人工回灌数值模拟的理论基础

1.1 地下水流动的基本方程

地下水流动这一自然环境下复杂水文过程的数值模拟精度高度取决于基本物理原理是否被深刻认识。描述地下水流动过程的基本方程有达西定律与连续性方程等,它们是建立数值模拟模型理论基石。达西定律(Darcy's Law),作为地下水渗流领域的核心理论,阐述了地下水通过多孔介质的流速与水力梯度之间的线性关系,这一关系式为 $q = -KI$,其中 q 代表渗流速度, K 为渗透系数, I 为水力梯度。连续性方程(Continuity Equation),则是质量守恒原理在地下水流动中的具体应用,它描述了地下水系统中水量的补给、储存和排泄之间的动态平衡,确保了模拟过程中水量变化的一致性^[1]。这些基本方程的准确应用,是确保数值模拟结果可靠性的前提。

1.2 数值模拟方法

地下水人工回灌数值模拟中,各种数值方法广泛用于地下水流动基本方程求解。其中,有限差分法(Finite Difference Method,FDM)、有限元法(Finite Element Method,FEM)和有限体积法(Finite Volume Method,FVM)是最为常见的方法。有限差分法是通过将连续的空间和时间域分解为多个网格点,然后用差分方程来近似地代替微分方程来进行求解的。有限元法则是把求解区域分割成一系列相互连通的小单元,并通过构造各单元近似解以导出全区的求解结果。有限体积法则主要关注于控制体积的积分平衡,以确保质量、动量等物理量的守恒。这几种方法各有优缺点,在选用时需要结合具体问题特点,计算资源限制和模拟精度要求等因素来进行考虑。

1.3 边界条件和初始条件的设定

地下水人工回灌数值模拟中,边界条件及初始条件设置是否合理对模拟结果精度起着关键作用。边界条件描述了模拟区域与外部环境的交互方式,包括水力边界(例如,流量边界,水位边界等)和水质边界(如浓度边界)。水力边界可与地下水进出模拟区的速度或水位高度有关,水质边界可与溶质浓度和其他参数有关^[2]。初始条件描述的是模拟初始阶段地下水系统的状况,涵盖了水位、流速以及溶质浓度的分布情况。精确地设置这些条件可以保证仿真结果更接近实际情况并增强仿真的实用性与可信度。以滹沱河地下水超采区人工回灌模拟为例,边界条件与初始条件的合理设置对精确预测水岩作用过程具有重要意义。

另外边界条件与初始条件设置通常需要将现场观测数据与地质勘查资料相结合才能保证其合理准确。与此同时,伴随着模拟技术的发展,更多高级方法用于边界

条件与初始条件优化设置,例如参数反演技术等、数据同化技术等等,这几种方法的提出使数值模拟更加准确实用。

2 地下水人工回灌数值模拟的关键技术

2.1 模型的建立与验证

在地下水人工回灌数值模拟中,模型的构建是核心依据,它的科学合理性直接影响着模拟结果是否准确可靠。下面详细描述了建立该模型的途径和程序。

一是资料收集和分析是构建模型的基石。研究人员需要对研究区水文地质资料进行充分搜集,其中包括地质构造,含水层分布,渗透系数和给水度,并在此基础上掌握地下水水位和水质动态变化资料。另外,需要对研究区气候条件和土地利用类型有一定的认识,以便为下文建模打下基础。

二是数学模型和数值方法选择是关键。针对研究区水文地质条件及回灌特点选取了适宜数学模型。在常见的地下水流动的偏微分方程模型中,面对复杂的地质构造,可能还需要考虑溶质迁移模型等因素^[3]。从数值方法上看,有限差分法,有限元法以及边界元法各有优缺点,需要依据模型的复杂度以及计算的需要加以选取。

三是进行概念模型的构建。根据搜集到的数据及所选数学模型对实际水文地质系统进行了概念模型抽象。明确地下水的流动范围、边界条件(例如,定水头边界,隔水边界)、初始状态以及回灌方式(例如,点源回灌和面源回灌)。干旱和半干旱地区应充分考虑蒸发作用的地下水流动效应并融入概念模型中。

四是划分网格和参数赋值。研究区域被分割成多个网格单元,其尺寸与形状需要依据计算精度与效率合理设置。对每一个网格单元分别赋予其对应的水文地质参数例如渗透系数和孔隙度。

五是对模型进行了验证和优化。运用历史拟合方法并结合现有地下水观测资料对该模型进行标定。通过对模型参数进行不断地调整,使得模拟结果尽量符合实测数据,从而提高了模型精度及适用性。如果模拟结果同实测数据相差很大,则需要重新考察模型的假设及参数设置并优化模型。

2.2 参数的反演与优化

精确求取地下水流动与传输参数,是地下水数值模拟中的一个关键性难题。渗透系数是岩土体容许水流动能力的反映,储水系数是含水层贮存与排泄地下水能力的反映,给水度与潜水含水层重力作用下可自由释出水有关。这些参数对于模拟地下水位的动态变化和地下水流速的分布具有决定性的意义。

但由于水文地质条件的复杂性和不确定性的存在,这些参数很难被直接测到。比如地下介质具有非均质性、各向异性等特点,这就造成了在相同地区不同地点其参数会有明显差别;同时地下水流动状态及边界条件随时都在发生变化,这进一步加大了参数测量难度。

为了解决这一难题,参数反演技术被提出。这项技术利用了多种优化方法,例如遗传算法和粒子群优化算法,并结合真实的观测数据来估算模型的参数。遗传算法模仿生物进化的过程,经过选择、交叉与变异的运算,不断地寻找最优参数组合;受到鸟群觅食行为的启示,粒子群算法通过群体内个体间的信息交流来寻求最佳解决方案^[4]。

参数反演过程在提高模拟精度的同时也揭示了参数间内在联系。如分析反演过程中不同参数的变化趋势就可以知道其对地下水流动影响的大小和相互制约关系。对地下水资源进行科学地管理,为制定更加合理的开采方案及保护措施提供重要基础。另外,在机器学习技术不断发展的今天,参数优化方法也在不断地更新和改进。机器学习算法能够对大规模和高维度数据进行处理,在复杂数据模式下抽取有用信息并对参数估计结果进行进一步优化。

2.3 多物理场耦合模拟

地下水人工回灌时常常伴有水-热-盐多物理场耦合。这些物理场相互作用,使地下水系统行为变得更为复杂多样。因此多物理场耦合模拟技术已成为地下水数值模拟研究的一个重要方向。该技术将多种物理场数学模型整合在一起,同步模拟地下水流动,热量传输及溶质运移。比如回灌时,水温变化可能导致地下水密度改变,从而影响地下水流动路径。同时溶质运移可能受水流速度与温度综合作用。利用多物理场耦合模拟可对上述复杂过程进行较全面的描述,从而对地下水资源保护与修复进行较为准确的预测与评价。

2.4 模型的不确定性分析

对模型进行不确定度分析对于评价模拟结果的可靠性具有重要意义。受水文地质条件复杂、参数不确定等因素影响,地下水数值模拟结果常常会出现不同程度的误差。所以,分析模型的不确定性并确定关键参数及不确定性来源对提高模拟结果准确性与可靠性至关重要。敏感性分析在不确定性分析中被广泛使用,通过计算模型输出与输入参数之间的敏感性来揭示哪一个参数对于模拟结果影响最显著。除此之外,诸如蒙特卡洛模拟和拉丁超立方抽样这样的不确定性量化手段,也适用于评定模型输出中的不确定性界限。这些方法能给决策者提

供更全面的资料,有助于决策者更深入地了解模拟结果中存在的因素,进而制定出更科学决策^[5]。

3 地下水人工回灌数值模拟的应用案例

3.1 城市地下水人工回灌

城市中,由于人口不断增加,工业化进程不断加快,地下水资源受到空前的压力。过度开采使地下水位不断降低,继而造成地面沉降和其他一系列的环境问题。城市地下水人工回灌数值模拟通过建立精细地下水流动模型可以精确地评价城市化进程对于地下水资源所产生的特定影响。如模拟可预测地下水位在不同回灌方案中的回升和回灌水质可能对地下水系统产生的影响。该仿真不仅有利于制定科学、合理的回灌策略,而且对城市规划、水资源管理等方面具有重要借鉴意义。

3.2 农业灌溉区地下水人工回灌

农业灌溉是消耗地下水的一种主要方式。干旱半干旱地区农业灌溉过分依赖地下水资源问题尤其严重。利用数值模拟技术可对农业灌溉区地下水人工回灌方案进行优化,达到水资源合理分配与高效利用。模拟时需要综合考虑灌溉水源水质,灌溉强度及地下水补给与排泄过程。对这些参数进行调节,可模拟不同灌溉策略对地下水位影响趋势,以寻求最优灌溉方案。另外,数值模拟也有助于评价灌溉活动对于地下水系统水质变化的影响程度,从而为农业水资源可持续经营提供科学依据。对农业灌溉区人工补给地下水进行数值模拟时,参数反演和优化技术非常重要,可以提高模拟精度和更加真实反映真实情况。

3.3 矿山地下水人工回灌

矿山开采活动常常给地下水系统带来严重的影响,例如水位的降低和水质的恶化。人工回灌技术是为保护与修复矿山水资源而广泛采用的技术。矿山地下水人工回灌数值模拟可评价不同回灌方案下地下水系统恢复效果。在进行模拟时需要考虑矿山开采给地下水系统带来的一些特定影响,例如开采引起地层塌陷和水文地质条件变化。通过构造含有上述要素的数值模型可对回灌

后地下水位回升,水质改善幅度和地下水流场调节过程进行预测。该仿真不仅有利于制定矿山水资源保护与恢复的有效策略,而且对矿山可持续发展具有重要的支撑作用。矿山地下水人工回灌数值模拟中多物理场耦合模拟技术有其独特的优点,能更加完整地刻画地下水系统水流等复杂过程、热传导与溶质运移等问题,提高了仿真的精度与可靠性。

结论

地下水人工回灌数值模拟是地下水资源管理中的一种重要手段,在理论与实践层面上都取得了令人瞩目的进展。利用多物理场耦合模拟可以更加完整地描述地下水流动,热量传输以及溶质运移等复杂过程,从而为回灌工程的实施提供精准预测和科学决策支持。但模型参数的不确定性,多物理场耦合的复杂性和模型验证的局限性仍然需要引起重视。未来的研究方向应该聚焦于优化参数的估计方法,进一步推进多物理场的耦合技术,并加强模型的验证和不确定性分析,以提升模拟的精度和可靠性。

参考文献

- [1] 杜川,陈素云,李厚恩.数值模拟在污染地下水抽出-处理-回灌修复技术中的应用[J].环境保护科学,2023(4):113-120.
- [2] 腾格尔.地下水人工回灌研究中数值模拟技术的应用进展[J].科技视界,2022(9):27-29.
- [3] 宋丹青,刘晓丽,王思志,等.煤矿地下水库人工坝体抗震性能数值模拟研究[J].水利规划与设计,2022(11):71-76.
- [4] 耿新新,张凤娥,朱谱成,等.滹沱河地下水超采区人工回灌的水岩相互作用模拟[J].重庆大学学报,2022(2):81-93.
- [5] 张紫瑶,王继玲,周维博,等.不同回灌补源模式下石川河富平地下水数值模拟[J].水资源与水工程学报,2022(2):54-60.