

Modeling and application of groundwater pollution migration and diffusion of refined oil products in pollution control

Gaimin Li

Henan First Geological Survey Institute Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450001, China

Abstract

The development of groundwater pollution migration and diffusion models for refined oil products provides crucial tools for predicting pollutant migration pathways, diffusion ranges, and concentration changes in groundwater systems, effectively supporting pollution monitoring and control. By integrating source characteristics, hydrogeological parameters, and pollutant physicochemical properties, the model simulates how factors such as groundwater flow velocity, permeability, adsorption, and biodegradation influence pollution dispersion processes. This provides data-driven support for rational monitoring site deployment and precise remediation plan formulation. Through IoT-based real-time monitoring and big data technology to refine input data, combined with AI and advanced numerical methods to enhance multiphase flow and biodegradation modeling, along with field experiments to calibrate the model for improved prediction accuracy. Continuous optimization of the migration-diffusion model will offer more scientific and efficient technical support for refined oil product groundwater pollution remediation, facilitating refined environmental management and sustainable development.

Keywords

refined oil; groundwater pollution; migration and diffusion; model construction; pollution control; application

成品油地下水污染迁移扩散模型构建及其在污染控制中的应用

李改民

河南省第一地质勘查院有限公司, 中国 · 河南 郑州 450001

摘 要

成品油地下水污染迁移扩散模型的构建为预测污染物在地下水中的迁移路径、扩散范围和浓度变化提供了重要手段,能够有效支持污染监测和控制。通过结合污染源特征、水文地质参数及污染物的物理化学性质,模拟了地下水流速、渗透性、吸附和生物降解等因素对污染扩散过程的影响,为监测点的合理布设和修复方案的精准制定提供了数据支持。通过物联网实时监测和大数据技术完善模型输入数据,结合人工智能与先进数值方法改进多相流和生物降解建模,并通过现场实验校准模型以提高预测精度。迁移扩散模型的持续优化将为成品油地下水污染治理提供更加科学、高效的技术支持,助力环境管理的精细化与可持续发展。

关键词

成品油; 地下水污染; 迁移扩散; 模型构建; 污染控制; 应用

1 引言

成品油地下水污染迁移扩散模型的构建及其在污染控制中的应用是环境科学中的重要研究领域。成品油污染多因储罐渗漏、管道破裂等引起,伴随工业化进程加速,这类污染事件频发,对水质、生态系统及人类健康构成威胁。成品油含有多种烃类和致癌物,其迁移扩散过程复杂,需借助模型预测其在地下水中的行为,提供有效的污染控制依据。

模型的构建需考虑污染物的物理化学特性,如溶解性、

吸附性、生物降解性,以及地下水系统的流速、渗透性和地质结构等因素。模型核心是使用数学和计算手段模拟污染物的迁移路径和扩散范围,分析污染源特征(种类、浓度、泄漏量等)并确定地下水的水文地质条件,如流速、含水层孔隙率等作为输入参数。

2 成品油地下水污染概述

2.1 成品油污染来源分析

成品油地下水污染迁移扩散模型构建及其在污染控制中的应用,关键在于深入理解成品油污染来源及其在地下水中的行为特征。成品油污染地下水的来源多种多样,主要包括加油站储罐渗漏、油管破裂、工业场地泄漏、交通事故油

【作者简介】李改民(1993-),男,中国河南太康人,硕士,助理工程师,从事生态环境保护与治理工程研究。

品泄漏等。

为了有效预测成品油在地下水中的迁移扩散行为,污染迁移扩散模型的构建显得尤为重要。成品油污染的迁移扩散过程受到多个因素的影响,其中最重要的是污染物的物理化学特性、地下水水文地质条件以及污染源的输入特征。成品油的组成复杂,包括溶解性成分和非水相液体(NAPL)。

2.2 成品油污染对地下水环境的影响

成品油污染对地下水的影响首先体现在化学成分的变化上。成品油的泄漏会使地下水中增加大量有机污染物,特别是苯、甲苯等低分子量挥发性有机物,以及更为持久的多环芳烃类化合物。这些污染物具有较高的溶解性和迁移性,能够在含水层中长距离移动,导致污染范围扩大,难以控制。地下水的化学性质也会因污染物的进入而发生显著变化,比如溶解氧浓度降低、化学需氧量(COD)和生化需氧量(BOD)升高,反映出水体中氧化分解有机物的需求增加。成品油污染会导致地下水缺氧环境,抑制微生物的生存和繁殖,影响水体自净能力,进一步加剧水质恶化。

成品油污染对地下水生态系统的影响也不容忽视。由于地下水生态系统依赖微生物、植物根系等参与的物质循环来维持平衡,成品油污染破坏了这一平衡。烃类污染物不仅会毒害微生物,削弱其降解有机物的能力,还会通过食物链积累,危害更高营养层次的生物。生态系统一旦受到影响,其恢复周期较长,污染控制的难度和治理成本也会随之增加^[3]。

2.3 成品油污染迁移扩散的基本原理

成品油污染在地下水中的迁移扩散是一个复杂的过程,受到多种物理化学因素的影响,其基本原理主要涉及对流、扩散、吸附、生物降解等多个机制的综合作用。当成品油进入地下水系统后,其迁移和扩散行为首先受到含水层水流的影响,对流与地下水流动方向一致,带动溶解在水中的污染物沿水流扩散;分子扩散则是由于污染物浓度梯度而自然产生的扩散现象,两者共同决定污染物的基本迁移路径和范围^[4]。

在成品油的主要成分中,有些是水溶性较高的有机物质,如苯、甲苯等,这些物质易于随水流迁移扩散,而一些非水相液体(NAPL),如重质烃类,由于溶解性较低,主要以自由相存在。这类自由相成分密度较大,不易随水流快速迁移,而是受到重力和浮力的双重影响。构建迁移扩散模型时,这类非水相液体的重力与浮力分离效应必须被充分考虑,以确保模型的预测准确性^[5]。

3 成品油污染迁移扩散模型理论基础

3.1 地下水流动与污染物迁移理论

地下水流动的基本理论遵循达西定律,提出了地下水流速与水力梯度成正比的关系,即多孔介质中,水流速由水力梯度和介质的渗透系数决定。含水层的渗透性、孔隙率、土壤颗粒的分布等因素直接影响地下水的流速和流向,而这些因素也是污染物迁移的动力源。当含水层渗透性较高、孔

隙率较大时,水流速度加快,成品油污染物的迁移速度也会相应增加;反之,在低渗透性的介质中,污染物的迁移过程可能受到显著延迟。对流机制表明污染物会随地下水的流动而迁移,而扩散机制则描述了污染物在浓度梯度作用下自发地从高浓度区向低浓度区扩散。对流和扩散的共同作用决定了污染物的迁移路径、速度和扩散范围,这对模型的准确性起着至关重要的作用^[6]。

3.2 迁移扩散模型的基本概念

在迁移扩散模型中,污染物的迁移是指在地下水流动的推动下,污染物随水流向特定方向移动的过程。对流过程在模型中至关重要,对流效应表明污染物迁移方向通常与地下水流向一致,速度受水力梯度和地下水流速影响。迁移速度在不同类型的含水层中有所不同,尤其在高渗透性、流速快的含水层中,污染物的迁移速度也随之加快。

迁移扩散模型中,对流和扩散的耦合是污染物迁移行为描述的核心。污染物迁移扩散的基本方程一般为对流-扩散方程(Advection-Dispersion Equation, ADE),该方程的对流项用于描述污染物随水流迁移的分量,而扩散项则用于刻画污染物在浓度梯度作用下的分散效应。方程中的扩散系数和迁移速率是模型计算的关键参数,通过这些参数,模型能够反映污染物在不同水文地质条件下的扩散规律和迁移速度^[9]。

3.3 现有模型分析与比较

对流-扩散模型是最基础的模型,结合对流和分子扩散机制描述污染物随水流迁移和扩散的过程,适用于地下水中溶解性污染物的模拟。其优点在于理论简单,能适应大部分水流场景,但在处理成品油中非水相液体(NAPL)成分的重力和浮力效应时有所局限,难以精准模拟复杂的成品油成分。

多相流模型则专为处理非水相污染物设计,能够模拟成品油在地下水中多相共存的现象,考虑了重力和浮力对自由相污染物的影响。数值模拟模型基于对迁移扩散区域的离散化处理,使用网格划分模拟复杂水流和地质条件下的污染物分布路径。它特别适合不均质含水层或复杂边界条件场景,精度高,但计算量大,适用于对精度要求高、地质条件复杂的污染场地。

4 成品油污染迁移扩散模型的构建

4.1 模型构建的思路与方法

模型构建从污染源表征入手,确定泄漏源类型、污染物浓度、泄漏量及持续时间等初始条件。当成品油含有非水相液体时,还需引入多相流模型,以描述NAPL在地下水中的浮力与重力效应。

4.2 模型参数的选择与设定

污染源参数为模型的基础,包括污染物初始浓度、泄漏量和泄漏时间等。这些参数定义了污染物的初始分布,对

模型的整体迁移过程有决定性影响,通常通过污染事故记录或现场调查获得,用作模型的初始条件。

4.3 模型的数学表达与方程

成品油污染迁移打散模型的数学表达与方程是描述污染物在地下水中迁移和扩散行为的核心其构建需要结合地下水动力学和污染物的物理化学特性。模型的主要数学基础是对流扩散方程,通过该方程描述成品油污染物在地下水中随水流迁移和在浓度梯度作用下自然扩散的过程。对流-扩散方程的基本形式为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla \cdot (vC) + \nabla \cdot (D\nabla C) + R$$

其中, C 为污染物浓度, t 为时间, v 为地下水流速向量, D 为污染物的扩散-弥散系数张量,表示对污染物浓度产生影响的其他作用项,包括吸附和生物降解等。

在对流项 $-\nabla \cdot (vC)$ 中, 污染物随水流迁移的速度受地下水流速影响, 流速 v 的确定尤为重要, 它通常通过达西定律获得, 并与水力梯度、渗透性等水文地质条件相关。对流项反映了污染物随水流动的方向和速度, 使模型能够描述污染物在地下水流动主导下的迁移路径。扩散项 $\nabla \cdot (D\nabla C)$ 则代表了污染物在浓度梯度作用下的分散。扩散-弥散系数 D 取决于污染物的分子扩散率、介质孔隙率和弥散系数, 通常通过实验测定或参数估算来获得。该项确保了污染物在浓度较高区域向浓度较低区域的自然扩散, 并考虑了地下水中孔隙流动产生的宏观弥散效应。除了对流和扩散, 成品油污染物的吸附和生物降解也需通过数学表达进行量化。在吸附过程中, 污染物浓度受含水层介质的吸附作用影响, 常用线性或非线性等温吸附方程描述这种关系。

5 迁移扩散模型在污染控制中的应用

5.1 模型在污染预测中的应用

迁移扩散模型在成品油地下水污染预测中发挥关键作用, 通过模拟污染物的迁移路径、扩散范围和浓度变化趋势, 为污染控制提供科学依据。模型首先利用污染源特征、地下水流动参数及污染物的物理化学属性构建初始条件, 再基于这些条件进行数值模拟, 预测污染物在地下水中的扩散行为。这种预测能够帮助评估污染的扩散范围、关键区域的到达时间及浓度变化趋势, 从而支持污染控制决策的制定。

模型通过空间扩散和时间浓度演变分析, 帮助识别高风险区域, 例如饮用水源或生态敏感区, 并揭示污染物在不同深度和距离下的浓度分布。时间演变预测则提供污染物浓度的动态变化, 特别是在长期条件下的自然衰减或扩散范围。

5.2 模型在污染监测中的应用

迁移扩散模型可以在监测点布设上发挥指导作用。通过模拟污染物在地下水中的扩散路径和可能的高浓度区域,

模型能够帮助选择最佳监测点位置, 确保监测点能够覆盖污染扩散的关键区域, 如潜在的饮用水源、生态敏感区域等。这种布设方式大幅提升监测覆盖的科学性, 避免了盲目设点和资源浪费, 使监测方案更具针对性。对于多相流污染物或复杂地下水流场, 模型更能帮助确定污染物的漂浮层或沉积区域, 为监测提供更具代表性的布点参考。

迁移扩散模型能预测污染物在地下水中的浓度变化趋势, 支持动态监测。这种动态预测可用于设计监测频率和时间间隔, 避免过密或过稀的监测安排。在模型预测的高浓度时段加强监测频率, 而在浓度变化较小的时段适当降低频率, 从而实现高效的污染监测管理。

5.3 模型在污染修复中的应用

在修复过程中, 模型还可用于动态监测和评估修复效果。修复过程中, 通过模型实时更新污染物的扩散范围和浓度变化, 能跟踪修复进展。在生物修复和化学修复中, 模型可帮助预测修复剂的分布效果, 指导修复剂注入量和注入位置的调整。这种反馈机制提升了修复效率, 确保资源的合理使用和修复措施的有效性。

模型在修复方案的选择和优化上也发挥着关键作用。常用的修复技术包括抽水截流、生物修复、化学氧化修复等, 模型通过模拟不同技术的效果, 为技术选择提供量化支持。

6 结论

通过迁移扩散模型的模拟, 能够精确预测成品油污染物在地下水中的迁移路径、扩散范围和浓度变化, 为污染控制提供科学依据, 使得监测点布设、治理方案优化和应急响应更加精准。未来研究可以从将模型与修复技术评估相结合, 通过现场实验验证并建立预测-验证-优化的闭环系统, 使模型在实际环境治理中更具实用价值, 推动成品油地下水污染防治向科学化、精细化发展。

参考文献

- [1] 朱爱国.成品油库泄漏风险管控分析[J].清洗世界,2023,39(02):178-180.
- [2] 段玲.成品油库泄漏风险管控与事故处罚[J].石化技术,2022,29(06):219-221.
- [3] 王同成,赵艳艳,贺苏宁.输油管道环境影响评价地下水补偿应急处理措施——以某成品油管道为例[J].科技创新与生产力,2017(12):89-90+94.
- [4] 刘红波,高秀宝.成品油地下水封石洞储备油库吸纳分析[J].中国石油石化,2017(09):107-108.
- [5] 郑尚.榆次西窑水源地脆弱性分析及污染预测模拟[J].长江科学院院报,2017,34(07):19-23.
- [6] 侯军.输油管道地下水灌注控制技术方案研究[D].中国石油大学(北京),2016.