

地下水与地表水交互作用下的污染物迁移模拟研究

张孟佼 樊天楨 李大伟

河南省地质局地质灾害防治中心

DOI: 10.32629/jpm.v7i2.8716

[摘要] 随着工业化和城市化的快速发展，地下水与地表水的污染问题日益突出，两者之间的交互作用使得污染物迁移过程更加复杂。地下水与地表水之间存在频繁的水量和水质交换，这种交互作用会显著影响污染物的迁移路径、迁移速度和空间分布。因此，开展地下水与地表水交互作用下的污染物迁移模拟研究，对于揭示污染物的迁移规律、评估污染风险以及制定有效的治理策略具有重要意义。本文在系统分析地下水与地表水交互作用原理的基础上，总结了污染物在交互带中的迁移规律，为数值模拟方法及工程应用研究提供思路。

[关键词] 地下水；地表水；交互作用；污染物迁移；水文地质

[中图分类号] X131

[文献标识码] A

Simulation study on pollutant migration under the interaction between groundwater and surface water

Zhang Mengjiao Fan Tianzhen Li Dawei

Geological Hazard Prevention and Control Center, Henan Provincial Geological Bureau

[Abstract] With the rapid development of industrialization and urbanization, the pollution issues of groundwater and surface water have become increasingly prominent. The interaction between the two makes the migration process of pollutants more complex. There is frequent exchange of water quantity and quality between groundwater and surface water, and this interaction significantly affects the migration path, migration speed, and spatial distribution of pollutants. Therefore, conducting research on the simulation of pollutant migration under the interaction between groundwater and surface water is of great significance for revealing the migration patterns of pollutants, assessing pollution risks, and formulating effective control strategies. Based on a systematic analysis of the principles of interaction between groundwater and surface water, this paper summarizes the migration patterns of pollutants in the interaction zone, providing ideas for numerical simulation methods and engineering application research.

[Key words] groundwater; surface water; interaction; pollutant migration; hydrogeology

引言

地下水和地表水是水资源系统的重要组成部分，两者之间存在广泛而复杂的水力联系。随着工业活动、农业生产和城市生活的不断发展，大量污染物进入水体环境，导致地下水和地表水受到不同程度的污染。由于地下水与地表水之间存在强烈的交互作用，污染物可以在两者之间相互迁移，使得污染范围不断扩大，治理难度显著增加。然而，当前针对污染物在交互带中的迁移规律和模拟方法的研究仍不够系统，特别是在复杂水文地质条件下，污染物迁移过程的耦合模拟仍面临诸多挑

战。因此，开展地下水与地表水交互作用下的污染物迁移模拟研究具有重要的理论价值和现实意义。

1 地下水与地表水交互作用原理

地下水与地表水的交互作用是指两者之间在水力、化学和生物等方面的相互影响和相互转化过程。其核心是水量和水质的交换，主要通过以下几种方式实现。一是水力交互作用。水力交互作用是地下水与地表水最基本的交互方式，主要表现为补给和排泄关系。当地表水位高于地下水位时，地表水向地下水补给；当地下水位高于地表水位时，地下水向地表水排泄。

这种补给—排泄关系受到地形、含水层性质、降水入渗、河流流量等因素的影响。在河流沿岸，地下水与地表水的水力联系尤为密切，形成了明显的交互带，其宽度和深度取决于含水层的渗透性和河流的水文特征。二是化学交互作用。化学交互作用主要包括溶质交换、吸附—解吸、氧化—还原反应、沉淀—溶解等过程。当地表水与地下水相互补给时，水中的溶质也随之交换，导致水质发生变化。例如，地表水进入地下水后，其携带的悬浮物和有机物会在含水层中发生吸附和降解，从而改变地下水的化学组成；地下水排入地表水时，也会将溶解的矿物质和污染物带入地表水体，影响地表水的水质。三是生物交互作用。生物交互作用主要涉及微生物对污染物的降解、转化和吸收过程。在交互带中，由于水分充足、营养物质丰富，微生物活动频繁，能够促进有机污染物的降解。例如，河流底部的生物膜可以降解部分有机物，减少污染物向地下水的迁移。四是物理交互作用。物理交互作用包括弥散、扩散、混合等过程。在交互带中，由于水流速度和方向的变化，污染物会发生弥散和扩散，使得污染范围不断扩大。此外，地表水与地下水的温度差异也会影响污染物的迁移速度和分布。

2 地下水与地表水交互作用下的污染物迁移规律

一是迁移路径复杂。由于地下水与地表水之间存在频繁的补给和排泄关系，污染物可以在两者之间来回迁移，形成复杂的迁移路径。例如，污染物进入河流后，可通过渗透进入地下水，再在地下水中迁移一段距离后重新排入河流，从而扩大污染范围。二是迁移速度加快。在交互带中，由于水力梯度大、渗透性强，水流速度较快，使得污染物迁移速度显著提高。特别是在强透水含水层中，污染物可能在短时间内迁移较长距离。三是混合作用明显。地表水与地下水的混合会导致污染物浓度发生变化。当地表水补给地下水时，污染物被稀释；当地下水排泄到地表水时，污染物浓度可能升高。混合作用的强弱取决于两者的水量比例和溶质浓度差异。四是吸附—解吸影响显著。在交互带中，含水层介质对污染物的吸附—解吸过程会改变污染物的迁移速度。例如，有机污染物容易被土壤颗粒吸附，从而降低其迁移速度；而在某些条件下，吸附的污染物可能解吸，重新进入水体，造成二次污染。五是生物降解作用增强。交互带中微生物活动活跃，能够促进有机污染物的降解，降低污染程度。但在缺氧条件下，某些污染物可能转化为更有毒的物质，增加环境风险。六是污染范围扩大。由于地下水与地表水的交互作用，污染物不仅在地下水中扩散，还会进入地表水，从而扩大污染范围。特别是在河流沿岸，污染物可以沿河流纵向和横向扩散，形成大面积污染带。

3 地下水与地表水交互作用下的污染物迁移模拟分析

3.1 模型构建思路

地下水与地表水交互作用下的污染物迁移模拟通常遵循“概念模型—数学模型—数值模型—验证与应用”的技术路线。首先，通过收集研究区的水文地质资料、水质监测数据、地形地貌数据和污染源信息，构建研究区的概念模型，明确含水层结构、河流边界条件、补给排泄关系以及污染物的来源和

性质。其次，基于质量守恒定律和达西定律，建立地下水流动方程和溶质运移方程，并通过耦合条件将地表水与地下水联系起来。最后，利用数值方法将控制方程离散化，通过专业软件进行求解，并利用现场监测数据对模型进行验证，确保模型的可靠性。在构建耦合模型时，需要重点考虑以下几个方面：一是地表水与地下水的水量交换，通常通过河流渗漏项或交换通量实现；二是溶质交换过程，包括对流、弥散、吸附、降解等；三是交互带的特殊性质，如渗透性变化、生物膜作用、化学反应强度等；四是污染源的时空分布，包括点源、非点源、瞬时源和连续源等。通过合理处理这些问题，可以提高模型的精度和适用性。

3.2 常用模型介绍

目前，国内外常用的地下水—地表水耦合模型主要包括 MODFLOW—MT3DMS、MIKESHE、SWAT—MODFLOW、FEFLOW、HydroGeoSphere 等。这些模型在结构、功能和适用范围上各有特点，可根据研究区的实际情况进行选择。MODFLOW—MT3DMS 是目前应用最广泛的地下水流动与溶质运移耦合模型。MODFLOW 采用有限差分法求解地下水流动方程，MT3DMS 用于模拟溶质的对流、弥散和化学反应过程。两者通过河流模块、渗漏模块等实现地表水与地下水的耦合。该模型结构简单、稳定性好，适用于大多数平原区和河谷区的污染物迁移模拟。MIKESHE 是一个集成的分布式水文模型，能够模拟地表水、地下水、土壤水和植被之间的相互作用。该模型采用有限元法，空间分辨率高，可模拟复杂地形和水文过程。MIKESHE 适用于大尺度流域的水资源评价和污染物迁移模拟，尤其适用于具有复杂地表水文过程的区域。SWAT—MODFLOW 将流域尺度的地表水模型 SWAT 与地下水模型 MODFLOW 耦合，可实现对农业非点源污染的模拟。SWAT 负责模拟地表径流、土壤侵蚀和农业污染物流失，MODFLOW 负责模拟地下水流动和溶质运移，两者通过交换通量实现耦合。该模型适用于农业流域的面源污染评估。FEFLOW 是基于有限元法的地下水模型，能够模拟复杂的水文地质结构和溶质运移过程。该模型支持非均质、各向异性介质，可模拟密度流、化学反应和多相流，适用于高精度的污染场地风险评估。HydroGeoSphere 是一个三维集成水文模型，能够模拟地表水、地下水、土壤水和 vadose 区的水流和溶质运移过程。该模型适用于复杂水文系统的耦合模拟，尤其适用于具有强交互作用的河流—含水层系统。

3.3 模型参数确定

模型参数的准确性直接影响模拟结果的可靠性，因此需要通过野外调查、室内实验和文献调研等多种手段确定。水文地质参数包括渗透系数、给水度、贮水系数、含水层厚度等。这些参数通常通过抽水试验、渗水试验、钻孔资料和地质剖面获得。对于复杂含水层，可采用反演方法结合监测数据进行参数率定。水力参数包括地表水位、地下水位、河流流量、降水入渗率等。这些参数通过长期监测数据获得，也可通过水文模型模拟得到。溶质运移参数包括弥散系数、吸附系数、降解系数、分配系数等。弥散系数通常通过室内柱实验或现场示踪试验确定；吸附系数可通过批量吸附实验获得；降解系数则根据污染

物类型和环境条件确定，可参考相关文献或通过室内降解实验获得。交互带参数包括渗透系数、厚度、生物降解速率等。由于交互带具有高度异质性，参数确定较为困难，通常需要通过现场监测和数值反演相结合的方法进行估算。

3.4 模型应用场景分析

建立河流-地下水交互带中有机污染物的迁移路径模型，模型结构如图1，通过关注有机污染物在含水层与地表水体之间的跨介质迁移过程，分析含水层渗透性、河流流量变化、地下水位波动以及污染物自身理化性质对迁移过程的影响。模型可模拟不同水文条件下地下水与地表水的交互强度变化，以及由此引起的污染物迁移方向、速度和分布特征的改变。例如，在河流流量增大或地下水位抬升的情况下，模型能够反映水力梯度变化对污染物向河流排放或向含水层扩散的影响趋势；在含水层渗透性较高的区域，模型可体现污染物迁移速度加快、污染范围扩大的一般规律；而在渗透性较低的区域，模型则能表现出污染物迁移受限、易在局部富集的特征。此外，模型还可用于评估污染物吸附、降解等参数变化对浓度分布的影响，为分析污染物在交互带中的滞留、衰减及跨介质传输机制提供量化依据。

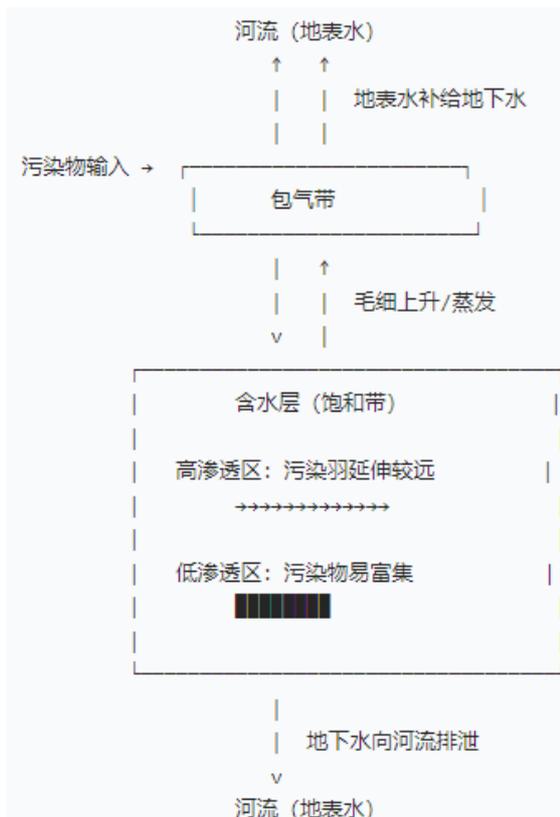


图1 河流-地下水交互带中有机污染物的迁移路径与模型模拟结构

3.5 模型不确定性分析

由于水文地质条件的复杂性和参数的不确定性，污染物迁移模拟结果不可避免地存在误差。因此，需要进行不确定性分析，评估模型结果的可靠性。不确定性来源主要包括参数不确定性、模型结构不确定性、输入数据不确定性和边界条件不确

定性等。参数不确定性是最主要的来源，由于含水层具有高度异质性，参数难以准确获取。模型结构不确定性来源于对真实水文系统的简化，例如忽略某些化学反应或生物过程。输入数据不确定性包括监测数据误差、污染源强度误差等。边界条件不确定性包括河流流量变化、降水波动等。常用的不确定性分析方法包括蒙特卡洛模拟、拉丁超立方抽样、敏感性分析等。通过敏感性分析可以识别对模拟结果影响最大的参数，为后续监测和参数优化提供方向。通过蒙特卡洛模拟可以获得污染物浓度的概率分布，评估污染风险的不确定性。

3.6 模拟结果的工程应用

污染物迁移模拟结果具有重要的工程应用价值，可用于污染风险评估、污染源识别、治理方案制定和修复效果评估等方面。在污染风险评估中，模拟结果可以用于确定污染物的影响范围、最大迁移距离和浓度分布，识别高风险区域，为土地利用规划和水源保护提供依据。在污染源识别中，通过对比不同污染源位置和强度下的模拟结果，可以反推污染物的来源和泄漏历史，为责任认定和污染治理提供支持。在治理方案制定中，模拟结果可以用于评估不同治理措施的效果，例如抽水处理、原位化学氧化、生物修复等，通过情景模拟选择最优方案。在修复效果评估中，可利用模拟模型预测修复过程中污染物浓度的变化，评估修复时间和成本，为修复工程的实施提供指导。

4 结束语

地下水与地表水交互作用下的污染物迁移是一个复杂的过程，涉及水力、化学、生物等多个方面。本文通过分析交互作用的基本原理，总结污染物在交互带中的迁移规律，就常用数值模拟软件分析构建耦合模型及工程应用提供思路。未来的研究应进一步加强多学科融合，综合运用水文地质学、环境科学、数值模拟等理论和方法，提高模型的精度和适用性，为水资源保护和污染治理提供更加科学、可靠的技术支撑，促进水资源的可持续利用。

[参考文献]

- [1]苏耀明, 吴效俭, 张凯, 等. 福建省光泽地区地表水与地下水中硅氧烷类污染物迁移关联分析[J]. 科技通报, 2023, 39(08): 107-115.
- [2]王佳琪, 马瑞, 孙自永. 地表水与地下水相互作用带中氮素污染物的反应迁移机理及模型研究进展[J]. 地质科技情报, 2019, 38(04): 270-280.
- [3]罗育池, 靳孟贵, 汪永红, 等. 地表水与地下水污染物总量联合控制应用研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(10): 66-68+71.
- [4]顾礼明, 张晟, 金玉, 等. 浅层地下水与地表水污染物交换关系研究——以常州市老城区为例[J]. 环境科技, 2012, 25(02): 4-8.
- [5]郎赞超, 刘丛强, Satake H., 等. 贵阳地表水—地下水的硫和氯同位素组成特征及其污染物示踪意义[J]. 地球科学进展, 2008, (02): 151-159.