

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.23.004

引文格式: 刘亚辉, 尹茂生, 郭跃华, 刘钰彬, 唐彪, 肖凯. 2025. 城市管网渗漏地下水污染数值模拟研究: 以深圳市某河间地块为例[J]. 华东地质, 46(1): 104-113. (LIU Y H, YIN M S, GUO Y H, LIU Y B, TANG B, XIAO K. 2025. Numerical simulation of groundwater pollution caused by leakage of urban pipe network: a case study on an interfluvium in Shenzhen City[J]. East China Geology, 46(1): 104-113.)

城市管网渗漏地下水污染数值模拟研究: 以深圳市某河间地块为例

刘亚辉¹, 尹茂生², 郭跃华³, 刘钰彬⁴, 唐彪³, 肖凯⁵

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 宁波东方理工大学, 浙江宁波 315200;
3. 中交一航局生态工程有限公司, 广东深圳 518106; 4. 深圳市龙华排水有限公司, 广东深圳 518110;
5. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003)

摘要: 针对现阶段城市地下管网渗漏导致的地下水污染问题, 文章选取深圳市光明区某河间地块作为研究区域, 并进行了详细的地下水环境背景调查。基于调查结果, 利用数值模拟软件(Groundwater Modeling System, GMS)建立了研究场地的水文地质模型和三维溶质运移数值模型, 研究了复杂环境下市政排水设施的渗漏情况及污染物的迁移过程。结果表明: 研究区地下水背景水质存在污染风险, 主要污染指标包括硝酸盐、氯化物、亚硝酸盐、总大肠菌群和锰离子等, 其中, 硝酸盐浓度达 25 mg/L; 管网渗漏区域的污染物迁移方向受地形影响, 总体由东北向西南流动, 迁移速率约为 0.5 m/d。参数的敏感性分析表明: 含水层渗透系数越大, 地下水流动和污染物迁移扩散的程度越显著, 污染羽扩散范围也越大。该研究成果为城市管网渗漏导致的地下水污染的防治提供了科学依据, 有助于推动该区域及类似环境中管网渗漏问题的科学解决和管理实践。

关键词: 管网渗漏; 地下水污染; 数值模拟; 深圳市光明区; 河间地块

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2025)01-104-10

水资源是人类生存不可或缺的重要资源, 也是维持环境生态系统健康的基础(Qu et al., 2020; 官娇娇等, 2024)。地下水是水资源的重要组成部分, 是地球上最大的液态淡水资源库。地下供水管网是现代城市建设不可或缺的基础设施, 对城市化发展和人民生活起着至关重要的作用。然而, 随着城市供水管网规模的不断扩大以及服役时间的增加, 大型供水管网渗漏问题已成为城市更新和可持续发展急需解决的难题之一。城市管网渗漏指的是城市供水、排水、污水处理等管网系统中出现的漏水和渗漏现象, 导致污水渗透至地下,

而造成地下水污染(Du et al., 2018; Peche et al., 2019; 王圃等, 2006)。在我国城市化进程不断加快的时代背景下, 城市管网渗漏问题不仅关系到饮用水安全和人民群众身体健康, 还涉及国家经济和国民健康等重要领域。城市管网渗漏情况的出现, 不仅会导致水资源严重浪费, 还会造成土壤的流失和污染。若不及时治理, 会引发地下水的水质下降、地面塌陷等(Li et al., 2022)问题, 严重影响人民的用水安全乃至生命安全(梅世嘉等, 2024; 张清周, 2013)。因此, 有必要对城市管网渗漏导致的地下水污染风险进行系统评估。

* 收稿日期: 2024-03-11 修订日期: 2024-09-13 责任编辑: 袁静

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“生物扰动对红树林湿地地下水循环及溶解无机碳排放的影响(编号: 42177046)”和企业委托技术开发横向课题“市政排水设施渗漏数值模拟研究(编号: STKJZX072022005)”联合资助。

第一作者简介: 刘亚辉, 2001年生, 男, 硕士研究生, 主要从事地下水数值模拟研究工作。Email: 17863913805@163.com。

通信作者简介: 肖凯, 1990年生, 男, 研究员, 博士, 主要从事地表水-地下水交互过程及生态环境效应研究工作。

Email: kxiao@yic.ac.cn。

目前,国内外对供水管网渗漏的研究主要从两个方面入手:硬件方面(如渗漏检测设备的更新、漏损检测技术的改进等)和软件方面(如渗漏模型的建立等)(邱云龙,2006;于斌,2012)。在供水管网渗漏控制的研究中,水力模型的应用越来越广泛(刘小帅和廖振良,2021)。国外方面,Pudar等在1992年提出了最早的基于模型的技术,将渗漏检测作为一个最小二乘参数估计问题来处理(Pudar和Liggett,1992)。Nasirian等于2013年采用遗传算法,并用SSEM方法(逐步筛选与淘汰方法)辅助对供水管网实测值进行校核,对管网进行漏损定位分析(Nasirian et al.,2013)。国内方面,王培永(2013)结合遗传算法和LSSVM(最小二乘支持向量机)对供水管网的安全运行时间进行了预测;匡亚平(2023)通过节点流量连续性方程和降压计算方程建立了供水管网水力模型,并利用建立好的水力模型完成了渗漏检测。总体来看,通过高精度数值模拟评估和地下水污染预测,可以有效识别管网渗漏的高风险区域,并为管网渗漏事件的应急处置提供技术支撑(Zhou et al.,2023;谢翔,2018)。

随着计算机模拟技术的提升,地下水流和污染物数值模拟已经被广泛应用于地下水污染模拟预测和地下水污染防治工程中。GMS、FEFLOW和Visual MODFLOW等都是专业的地下水数值模拟软件(鲍新华等,2022;高月香等,2018;饶磊等,2018;邹浔等,2020;朱春芳等,2023),其中GMS的功能模块非常强大,能够较好地计算2D、3D地下水动力场和污染物浓度场,并呈现污染源的影响范围及其捕获区,在离散形式、网格剖分以及建模方法上具有一定优势,是被广泛应用的可视化地下水三维数值模拟软件(Ameur et al.,2021;段毅等,2023;蒋昊楠,2022;姜忠峰等,2022;刘建国等,2018;刘小帅等,2021;宋旌鸣和黄勇,2023;谭文清等,2008)。例如,宋雷震(2022)通过GMS的溶质运移模型预测了某市区域市政管网外渗泄露的情况;彭传路等(2019)利用GMS预测了固废渣场底部淋溶液的渗漏对地下水环境和周围环境敏感点的影响。

近年来,深圳市光明区的城市管网得到了逐步完善,尤其在排水和污水处理方面取得了显著进展。作为“海绵城市”示范区,光明区通过采

取透水铺装和雨水花园等措施,有效提升了雨水管理能力,显著减少了内涝现象。同时,智能化管理系统的应用增强了管网监控能力,提升了运营效率。然而,快速的城市扩展带来了老旧管网升级和应对极端天气的主要挑战,管网渗漏的风险也日益突出。为此,本文选择深圳市光明区某河间地块作为研究区,采用GMS软件的MODFLOW和MT3DMS模块,模拟研究区的地下水流场和污染物时空分布特征,系统研究在真实复杂环境下市政排水设施的渗漏和污染物迁移过程。

1 研究区概况

研究区位于深圳市西北部的光明区,属于茅洲河流域上游地区(图1)。该流域地处北回归线以南,为亚热带季风气候,夏季长,冬季不明显,气候温和,光照充足,雨量充沛。流域内多年平均气温为22℃,1月最低气温13℃,7月最高气温28℃。多年平均降雨量为1738mm,多年平均湿度为79%,平均气压为1010.8mbar,平均蒸发量为1345.7mm。

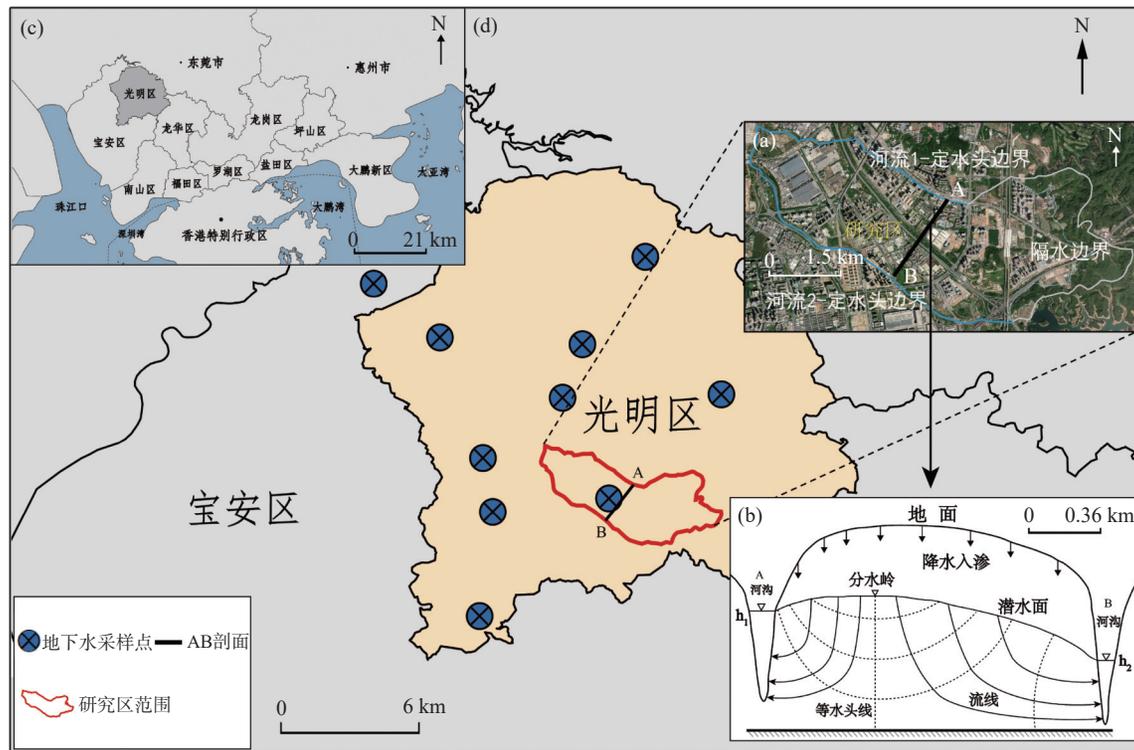
根据已有的钻孔信息,在钻探揭露范围内,将研究区场地岩土层划分为第四系人工填土层(Q_4^{ml})、全新统冲积层(Q_4^{al})、残积层(Q^e)和全风化花岗岩。其中,第四系松散沉积物厚度为10~20m,地下水埋深约3m。区内地下水类型主要为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水,大气降水和季节性河水入渗是地下水的主要补给来源。

研究区包括工业园区、居民区和商业区,主要污水管网的污染物源头涵盖区域内的工业废水和生活污水。这些污染物可分为酸碱性物质、耗氧物质、有机物、金属、病原体和热污染等类型。

2 地下水环境背景调查

本次研究于2023年4月开展了深圳市光明区地下水水质背景调查与分析,按照空间均匀分布原则和地下水井分布情况,采集了11个地下水样品,其中2个样品是在研究区同一地下水井中的不同深度采集的(图1)。

利用哈希便携水质多参仪(Hach HQ40d)现场测定pH、温度、溶解氧含量、盐度和总溶解性固



(a). 研究区卫星图像; (b). 研究区 AB 河间地块剖面图; (c). 光明区相对位置图; (d). 野外采样点分布图

图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographical location of the study area

体(Total Dissolved Solids, TDS)等指标,采用滤膜培养法检测研究区的大肠杆菌浓度,用离子色谱仪(Dionex ICS1100)检测氯离子和硫酸根离子浓度。分取过滤后的水样约 50 mL,并用 60% 硝酸酸化至 $\text{pH} < 2$,用于电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7700x ICP-MS)测定重金属元素。利用流动注射分析仪(LACHAT QuikChem8500S2)测量水体中的营养盐。

根据《GB/T 14848—2017 地下水质量标准》,地下水质量分为 5 类。研究区地下水主要以 IV 类水为主,其化学组分中的硝酸盐、氯化物、亚硝酸盐和总大肠菌群等含量较高。按照农业和工业用水质量要求,并考虑一定程度的人体健康风险,IV 类水适用于农业和部分工业用水,经适当处理后也可用于生活饮用水。

研究区地下水环境参数统计结果如图 2 所示。由图可知,地下水具有多方面的水化学特征。其中, pH 平均值约为 6.2,表明地下水处于弱酸性环境中;硝酸盐含量较高,平均值约为 15.8 mg/L,显示可能存在氮源污染。11 个监测点的地下水在溶解性总固体、氯化物和硝酸盐的浓度方面存在较

大差异,表明水质在空间上具有显著的异质性。在重金属离子方面,铁、砷、镉、铬、镍、钴、钼、钒和铀浓度较低,仅为 0~0.1 mg/L。然而,锰离子的平均浓度最高,达到 1.87 mg/L,区域最高浓度可达 3.3 mg/L,可能对地下水水质产生一定的影响。此外,地下水中的总大肠杆菌浓度平均值高达 17 972 CFU (菌群数量)/100 mL,表明可能受到了潜在的粪便污染,这一问题需要引起重视。

根据这些检测结果,研究区的地下水很可能受到了一定程度的生活污水或垃圾渗滤液的污染,管网渗漏是潜在的主要污染途径之一。

3 地下水流与溶质运移耦合数值模型

3.1 水文地质概念模型

研究区位于两条天然河流之间,因此将这两条河流边界设置为定水头边界(图 1(a))。东南方向为山地丘陵区域,通过地形地貌识别并确定了地下水分水岭位置,在模型中设置为隔水边界。本研究模拟的地下水为浅层地下水,垂直方向上没有明显且稳定的阻水层,各砂层之间具有良好

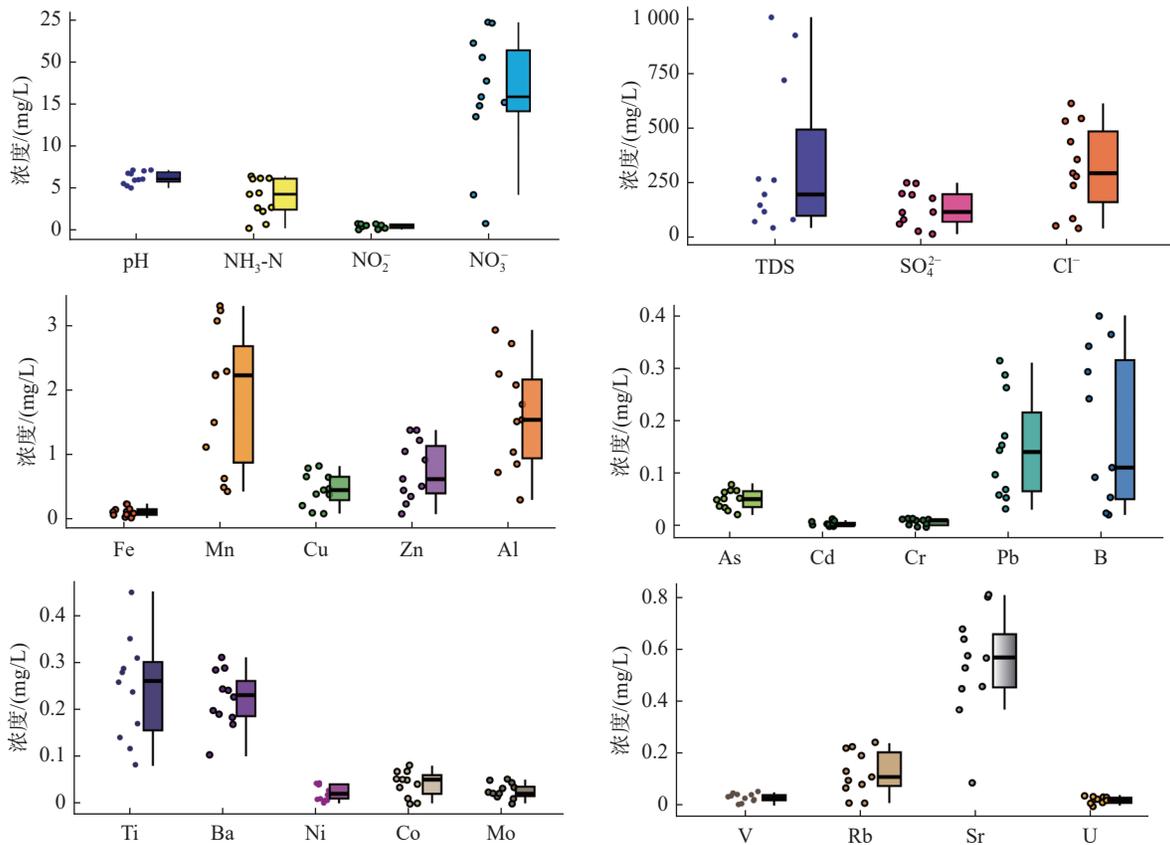


图2 研究区地下水环境参数统计散点图和箱式图

Fig. 2 Statistical scatter and box plots of groundwater environmental parameters in the study area

的水力联系,因此被概括为单一浅水含水层。含水层的水文地质参数主要基于收集的钻孔信息和深圳市水文地质图所划分的岩性信息进行初步确定,初步给定的各参数值如表 1 所示。地下水主要接受大气降水和河水入渗补给,排泄方式包括潜水蒸发和向河流排泄。研究区位于降水充足的亚热带区域,城市的水资源开采以地表水为主,几

乎不存在地下水抽采。

由于城市地区普遍实现了集中供水,地下水观测井较少,导致缺乏地下水水位观测数据。此外,本研究旨在探究城市管网渗漏对地下水污染的演变规律和影响因素,研究结果并不局限于特定研究区。因此,本研究采用经验值作为模型参数,不再进行模型参数矫正。

表1 三维模型不同地层参数赋值情况

Table 1 The assignment of parameters for different strata in the three-dimensional model

| 地层 | 水平渗透系数/($m \cdot d^{-1}$) | 水平各向异性 | 垂向各向异性 | 给水度 | 释水系数 | 纵向弥散系数 | 孔隙度 |
|------|-----------------------------|--------|--------|----------|-------|--------|-------|
| 素填土 | 8.64 | 1 | 1 | 0.000 01 | 0.19 | 0.5 | 0.19 |
| 冲洪积层 | 6.912 | 1 | 3 | 0.000 01 | 0.17 | 0.5 | 0.17 |
| 强风化层 | 4.32 | 1 | 1 | 0.000 01 | 0.2 | 0.5 | 0.2 |
| 基岩 | 0.004 64 | 1 | 1 | 0.000 01 | 0.001 | 0.5 | 0.001 |

3.2 数值模型

结合研究区的实际状况,利用 GMS 软件的 MODFLOW 和 MT3DMS 模块对模拟预测因子进行模拟分析。假设地下水流模拟的数值模型为非

均质、各向同性、空间三维结构和非稳定地下水流系统,并且溶质运移主要是通过对流和水动力弥散作用实现的,从而建立水流模型和溶质运移模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \varepsilon \quad x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ \mu \frac{\partial h}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} - \frac{\partial h}{\partial z} (K_z + p) + p \quad x, y, z \in \Gamma_0, t \geq 0 \\ h(x, y, z, t)|_{t=0} = h_0 \quad x, y, z \in \Omega, \Gamma_0, t \geq 0 \\ h(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = h_1 \quad x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: Ω 为深层承压含水层渗流区域; h 为地下水系统的水位标高, m; Γ_0 为浅水含水层渗流区域; Γ_1 为已知水位边界; K_x 、 K_y 为含水介质的水平渗透系数, m/d; K_z 为含水介质垂向渗透系数, m/d; ε

为含水层的源汇项, 1/d; h_0 为系统的初始水位分布, m; S_s 为自由面以下含水层储水率, 1/m; μ 为浅水含水层在潜水面上的重力给水度; p 为潜水面的蒸发和降水入渗强度, m/d; h_1 为已知边界水位值, m。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - V_i \left(\frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + \frac{C_w q_w}{n} \quad x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ C(x, y, z, t)|_{t=0} = C_0 \quad x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ C(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = C_1 \quad x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: Ω 为污染物迁移区域; C 为溶质浓度, mg/L; D_{ij} 为水动力弥散系数张量, m^2/d ; V_i 为地下水渗流速度, m/d; n 为含水层孔隙度; C_w 为源汇项浓度, mg/L; q_w 为源或项的单位流量, m^3/d ; x_i 为空间坐标, m; C_0 为溶质初始浓度分布, mg/L; C_1 为区域边界上的溶质浓度分布状况, mg/L; Γ_1 为已知的浓度边界。

为了求解水流模型和污染物迁移模型, 需要对研究区进行矩形网格剖分。网格剖分需要综合考虑模型的计算速度、模拟精细程度和数值模型的收敛性。本次将研究区在水平方向上剖分为约 $25 \text{ m} \times 6.5 \text{ m}$ 的矩形网格; 在垂直方向上分为 4 层, 最上层网格顶板为地面高程, 基于深圳市 12.5 m 分辨率的 DEM 数据, 底板统一设置为海平面。每层网格高度根据地层和地形变化自动调整, 自上而下分别为素填土、冲洪积层、强风化层和基岩。各层厚度根据钻孔资料、地貌学和沉积学分析结果来确定。总体而言, 丘陵区域以基岩为主, 冲洪积层和强风化层在丘陵区域较薄, 而在河流下游地区较厚。数值模型的网格剖分详细信息如图 3 所示。

参考《GB/T 31962—2015 污水排入城镇下水道水质标准》, 根据区域地下水环境背景调查结果, 确定硝酸盐、亚硝酸盐、总大肠菌群和锰离子等为研究区的主要污染源。模型中选择了以硝酸盐污染物为代表的管网渗漏, 设定污染物浓度为

1 g/L。管网渗漏的发生概率受多种因素影响, 包括管网材质、使用年限和地层稳定性等。选取了 4 个位于不同空间位置的潜在渗漏点作为污染源, 并模拟了污染物在地下水中的迁移路径。具体污染源的位置见图 4。

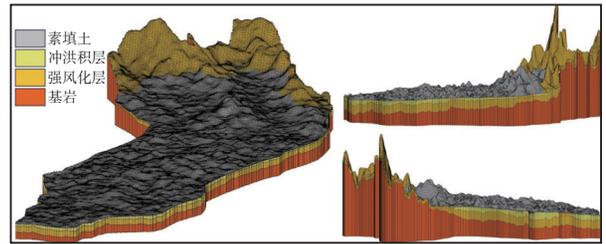


图3 研究区三维地表-地下水-污染物迁移数值模型空间剖分图

Fig. 3 Spatial discretization diagram of the 3d surface-subsurface-contaminant migration numerical model in the study area

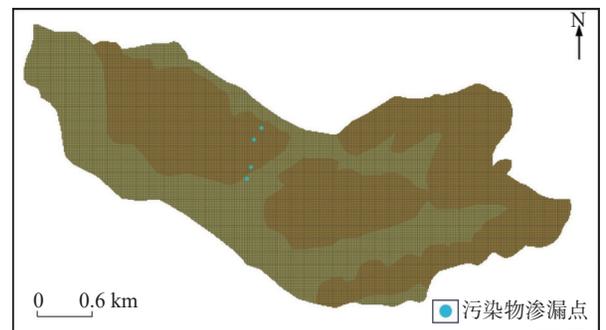


图4 研究区污染物模拟泄漏点位置

Fig. 4 Simulated contaminant leakage points in the study area

在实际的管网渗漏情况中,一旦污染物进入地下含水层,地下水污染可能持续数年甚至数十年。为了模拟这种长期影响,本研究将污染物迁移模型的模拟期设置为约 30 年(10 000 天),并均匀划分为 50 个应力期(每个应力期为 200 天)。在模型计算过程中,为了提高计算结果的精度和稳定性,数值模型的时间步长会根据模型收敛程度动态调整,以确保获得最为精确的数值计算结果。

4 模型计算结果

4.1 地下水水位分布

图 5 展示了研究区浅层地下水水位空间分布的模拟结果。研究表明,研究区地下水水位主要受地表地形的影响,整体呈现东南高、西北低的趋势。水位分布图中的空白区域表明含水层处于非饱和状态。由图 5 还可以观察到,在丘陵区域,地下水水位的变化较为显著,而在河流中游地形较为平坦的区域,地下水水位的变化较小。图 6 展示了地下水流速和流向的空间分布及局部放大图。研究表明,地下水流整体上呈现由东南向西北流动的趋势,这与研究区两侧河流的流向基本一致。此外,由于地面高程存在差异,北侧河流的高程普遍高于南侧河流,这导致地下水更多地向南侧河流方向汇集,迁移速度约为 0.5 m/d。

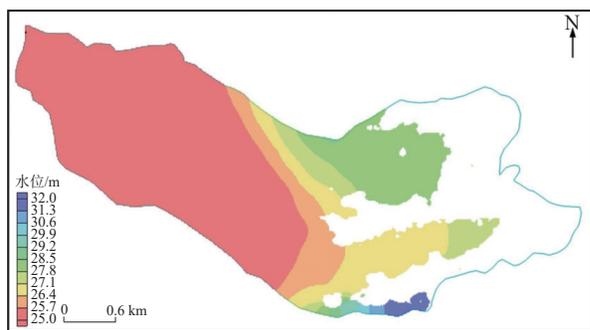


图 5 研究区浅层地下水水位分布

Fig. 5 Distribution of different shallow groundwater levels in the study area

4.2 管网渗漏后地下水污染趋势预测

图 7 展示了研究区内污染物渗漏点发生渗漏后,浅水含水层中污染羽的空间分布状态。从图中可以观察到,污染羽的迁移方向与地下水的流

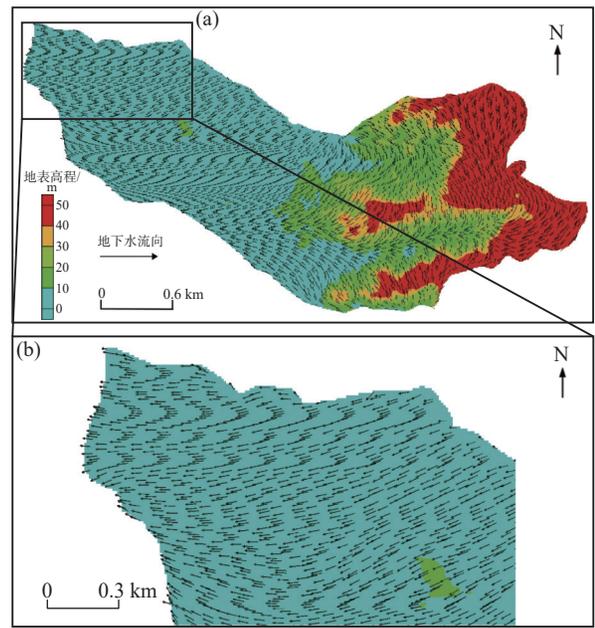


图 6 研究区地下水流向(a)及局部放大图(b)

Fig. 6 Groundwater flow direction (a) and detailed zoom-in (b) of the study area

动方向大致相同,即自东北向西南方向迁移扩散,这揭示了地下水流动在污染物传播中具有主导作用。对比分析显示,该区 4 个污染物泄漏点中,最下侧的污染物渗漏点产生的污染羽扩散最为广泛,最大扩散距离可达 1 km,这是因为该污染物渗漏点所在区域的渗透系数最大。随着渗透系数的增大,地下水流动和污染物的扩散效率显著提高,导致污染羽的范围扩展更广,从而可能对环境造成更为严重的污染影响。

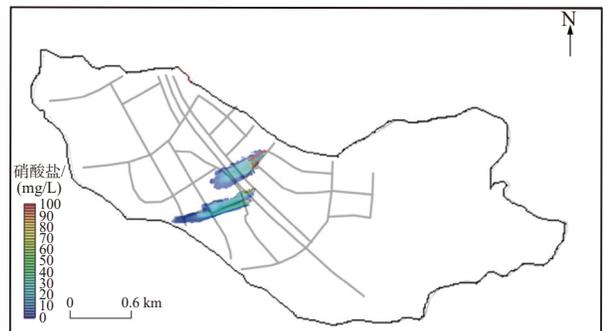


图 7 研究区管网渗漏后污染羽和路网分布

Fig. 7 Distribution of contamination plumes following network leakage and road network in the study area

为了研究长时间序列下管网渗漏对浅水含水层的影响,本文模拟了管网渗漏导致的地下水污染演变过程(图 8)。模拟结果表明,随着时间的

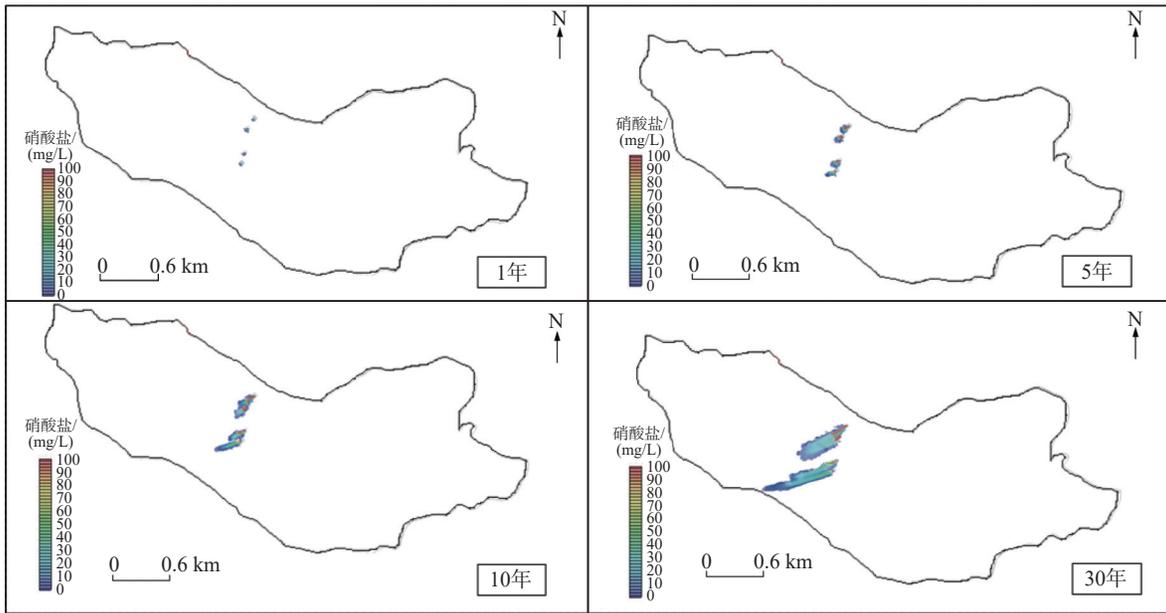


图8 研究区管网泄露导致的污染羽随时间变化图

Fig. 8 Temporal evolution of contamination plumes due to network leakage in the study area

推移,在地下水流的作用下,污染物在含水层中的扩散程度逐渐增加,导致污染羽的面积持续扩展。这一结果直观地揭示了管网渗漏对地下水环境的不良影响,并为污染的时空演变提供了关键的定量信息。污染物的迁移速度和方向反映了水流的动态变化,而地下水流动路径的变化则揭示了渗漏源周围和远离源区地下水响应的不同特征。深入分析污染羽的扩散程度,包括面积和体积等参数,有助于全面评估污染的程度。需要强调的是,随着污染羽面积的不断扩大,周围土壤和地下水受到的污染影响逐渐增加。因此,有必要及时检查城市污水管网的渗漏情况,尽早发现渗漏地点并进行科学处置。

5 结论

(1)研究区地下水水质总体较差,主要污染指标包括硝酸盐、氯化物、亚硝酸盐、总大肠菌群和锰离子等。

(2)三维数值模型模拟结果表明,研究区内地下水流主要受地形特征的影响,整体上由东北方向流向西南,并主导了污染物的迁移方向。含水层渗透系数越大,越有利于地下水的流动和污染物的迁移扩散,从而导致污染羽的扩散范围更广。若不及时治理管网渗漏污染,随着时间的推移,污

染物将逐渐扩散,导致更大范围的地下水污染,并增加防治的难度。

(3)为了避免城市管网渗漏导致的地下水污染,应制定并实施严格的管理制度,采取有效的防渗、防漏和防污措施,并定期检测管道,从而降低污染事故发生的概率。此外,需建立严格的地下水监测制度,及时预警并采取措施应对异常情况,以降低地下水污染风险,减轻泄漏造成的环境破坏。通过这些措施,可以有效地保护地下水资源,确保环境的可持续发展。

References

- AMEUR M, AOUITI S, HAMZAOUI-AZAZA F, BEN CHEIKHA L, GUEDDARI M. 2021. Vulnerability assessment, transport modeling and simulation of nitrate in groundwater using SI method and modflow-MT3DMS software: case of Sminja aquifer, Tunisia[J]. *Environmental Earth Sciences*, 80(6): 220.
- BAO X H, YU H B, JI L. 2022. Division of two-level protection area of Changchun Qijia groundwater source based on GMS[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 52(3): 955-966 (in Chinese with English abstract).
- DU J Y, YANG H X, SHEN Z C, GUO X D. 2018. Development of an inline vertical cross-flow turbine for hydropower harvesting in urban water supply pipes[J]. *Renewable*

- Energy*, 127: 386-397.
- DUAN Y, LI D C, ZHOU S K. 2023. Application of GMS in study of thallium pollutant transport in groundwater of a typical chemical industry park[J]. *Journal of University of South China (Science and Technology)*, 37(4): 9-17 (in Chinese with English abstract).
- GAO Y X, SHEN H, ZHANG Y M, WANG L M, PENG F Q, XU X T. 2018. Groundwater pollution risk prediction research and effect evaluation of golf course based on FEFLOW[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 49(11): 144-150 (in Chinese with English abstract).
- GUAN J J, ZHENG Y J, CAO X H. 2024. The problems faced by groundwater resources in China and countermeasures suggestion[J]. *East China Geology*, 45(3): 255-263 (in Chinese with English abstract).
- JIANG H N. 2022. Research and application of well chamber leakage treatment measures for underground water supply and drainage network[J]. *Hongshui River*, 41(5): 117-120 (in Chinese with English abstract).
- JIANG Z F, LIU Y W, CUI B F, WU L. 2022. Simulation study on risk characteristics of regional groundwater pollutant transport[J]. *Computer Simulation*, 39(10): 289-293 (in Chinese with English abstract).
- KUANG Y P. 2023. Leakage analysis and leakage detection technology of water supply pipeline network[J]. *Water Technology*, 17(1): 11-14 (in Chinese with English abstract).
- LI J, ZHENG W J, LU C G. 2022. An accurate leakage localization method for water supply network based on deep learning network[J]. *Water Resources Management*, 36(7): 2309-2325.
- LIU X S, LIAO Z L. 2021. Research progress on leakage detection and location technologies of urban water supply networks[J]. *Energy Environmental Protection*, 35(5): 16-22 (in Chinese with English abstract).
- LIU J G, XU G Z, MA X J, LEI J M, WU H. 2018. Study on comparative application of different simulation software in groundwater environmental impact[J]. *Environmental Science & Technology*, 41(S1): 359-362 (in Chinese with English abstract).
- MEI S J, JIANG Y H, YANG H, ZHOU Q P, CHEN Z, JIA Z Y, JIN Y, ZHANG H, ZHANG B. 2024. Deformation and seepage characteristics of the bank collapse site based on WFBG technology—a case study of Zhinan Village, Yangzhong[J]. *East China Geology*, 45(2): 228-239 (in Chinese with English abstract).
- NASIRIAN A, MAGHREBI M F, YAZDANI S. 2013. Leakage detection in water distribution network based on a new heuristic genetic algorithm model[J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 5(3): 294-303.
- PECHE A, GRAF T, FUCHS L, NEUWEILER I. 2019. Physically based modeling of stormwater pipe leakage in an urban catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 573: 778-793.
- PENG C L, CHEN Z, DOU Z, SHI J H, JI S S. 2019. Simulation of groundwater pollution from solid waste dump in a karst region[J]. *Coal Geology of China*, 31(9): 80-86 (in Chinese with English abstract).
- PUDAR R S, LIGGETT J A. 1992. Leaks in pipe networks[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(7): 1031-1046.
- QIU Y L. 2006. The research and application water distribution pipeline leakage prediction[D]. Chongqing: Chongqing University (in Chinese with English abstract).
- QU S, LV J J, LIU J X. 2020. Visualization analysis for global water resources based on digital earth[J]. *Journal of Coastal Research*, 105(S1): 47-50.
- RAO L, WEI X P, LIU X. 2018. Numerical simulation of groundwater pollutants transport in an industrial park of Chongqing based on visual modflow[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 35(5): 72-78 (in Chinese with English abstract).
- SONG L Z. 2022. Research on digital simulation of leakage prediction of urban sewage pipe network[J]. *Journal of Chengdu Technological University*, 25(4): 36-41 (in Chinese with English abstract).
- SONG J M, HUANG Y. 2023. Simulation of the transport of sewage pollutants on a domestic waste landfill site[J]. *Journal of Gansu Sciences*, 35(1): 74-79 (in Chinese with English abstract).
- TAN W Q, SUN Q, HU J M, MA L, ZHAO Y N. 2008. Application of GMS in simulation of pollutants migration for groundwater[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast*, 26(5): 54-55,59 (in Chinese with English abstract).
- WANG P Y. 2013. Study on leakage analyses and control solutions of urban water distribution network[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology (in Chinese with English abstract).
- WANG P, QIU Y L, XIA Q Q, SHEN B. 2006. Combined model applied in water distribution pipeline leakage prediction[J]. *China Water & Wastewater*, 22(17): 67-69 (in Chinese with English abstract).
- XIE X. 2018. Study on key technologies of hydraulic model driven online leak monitoring in urban water distribution networks[D]. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese with English abstract).

- YU B. 2012. Leakage control of urban water supply pipe network[J]. Urban Construction Theory Research (Electronic Edition), (35): 1-6 (in Chinese).
- ZHANG Q Z. 2013. Research on leakage detection via hydraulic model calibration in water distribution systems[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology (in Chinese with English abstract).
- ZHOU J, SONG B, YU L, XIE W Y, LU X H, JIANG D D, KONG L Y, DENG S P, SONG M. 2023. Numerical research on migration law of typical chlorinated organic matter in shallow groundwater of Yangtze delta region[J]. *Water*, 15(7): 1381.
- ZHU C F, GONG J S, TAO X H, TAN M J, ZHOU K E, WANG H S, LI L, YE Y H. 2023. Comparison of the hydrochemical characteristics of shallow groundwater in the Huaihe River Basin during a ten-year period and its significance to environmental change[J]. *East China Geology*, 44(3): 282-291 (in Chinese with English abstract).
- ZOU X, ZHANG H F, LI Y P. 2020. Analysis of the environmental impact of groundwater in Huangchuan economic development zone based on visual MODFLOW[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 41(6): 89-96 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 鲍新华, 于瀚博, 计量. 2022. 基于 GMS 的长春齐家地下水源地二级保护区划分[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 52(3): 955-966.
- 段毅, 李东春, 周书葵. 2023. GMS 在某典型化工工业园区地下水铊污染物运移研究中的应用[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 37(4): 9-17.
- 高月香, 沈欢, 张毅敏, 汪龙眠, 彭福全, 许雪婷. 2018. 基于 FEFLOW 的高尔夫球场地下水污染风险预测研究与效果评估[J]. *水利水电技术*, 49(11): 144-150.
- 官娇娇, 郑跃军, 曹祥会. 2024. 我国地下水资源面临的问题及对策思考[J]. *华东地质*, 45(3): 255-263.
- 蒋昊楠. 2022. 给排水地下管网井室渗漏处理措施的研究及应用[J]. *红水河*, 41(5): 117-120.
- 姜忠峰, 刘艳伟, 崔弼峰, 吴丽. 2022. 区域地下水污染物运移风险特征仿真研究[J]. *计算机仿真*, 39(10): 289-293.
- 匡亚平. 2023. 供水管网渗漏分析与漏失检测技术[J]. *供水技术*, 17(1): 11-14.
- 刘小帅, 廖振良. 2021. 城镇供水管网漏损检测及定位技术研究进展[J]. *能源环境保护*, 35(5): 16-22.
- 刘建国, 许光照, 马学礼, 雷佳明, 伍欢. 2018. 不同模拟软件在地下水环评中的应用对比研究[J]. *环境科学与技术*, 41(S1): 359-362.
- 梅世嘉, 姜月华, 杨海, 周权平, 陈孜, 贾正阳, 金阳, 张博. 2024. 基于 WFBG 技术的崩岸场地变形和渗流特征研究——以扬中指南村为例[J]. *华东地质*, 45(2): 228-239.
- 彭传路, 陈舟, 窦智, 施佳会, 计顺顺. 2019. 某岩溶区固废渣场地下水污染模拟[J]. *中国煤炭地质*, 31(9): 80-86.
- 邱云龙. 2006. 给水管网漏损预测的研究与应用[D]. 重庆: 重庆大学.
- 饶磊, 魏兴萍, 刘迅. 2018. 基于 Visual Modflow 的重庆某工业园区地下水污染物运移模拟[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 35(5): 72-78.
- 宋雷震. 2022. 针对城市污水管网渗漏预测的数字模拟研究[J]. *成都工业学院学报*, 25(4): 36-41.
- 宋旌鸣, 黄勇. 2023. 某生活垃圾填埋场地下水污染物运移模拟[J]. *甘肃科学学报*, 35(1): 74-79.
- 谭文清, 孙春, 胡婧敏, 马力, 赵彦宁. 2008. GMS 在地下水污染质运移数值模拟预测中的应用[J]. *东北水利水电*, 26(5): 54-55, 59.
- 王培永. 2013. 城市给水管网漏损分析及控制措施的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学.
- 王圃, 邱云龙, 夏清泉, 沈波. 2006. 组合模型在给水管网漏损预测中的应用[J]. *中国给水排水*, 22(17): 67-69.
- 谢翔. 2018. 水力模型驱动的城市供水管网漏损在线监测关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学.
- 于斌. 2012. 城市供水管网漏损控制[J]. *城市建设理论研究(电子版)*, (35): 1-6.
- 张清周. 2013. 基于模型校核的给水管网漏失定位研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
- 朱春芳, 龚建师, 陶小虎, 檀梦皎, 周锴镔, 王赫生, 李亮, 叶永红. 2023. 淮河流域浅层地下水水化学特征 10 年对比分析及其环境变迁意义[J]. *华东地质*, 44(3): 282-291.
- 邹浔, 张海丰, 李跃鹏. 2020. 基于 Visual MODFLOW 的潢川经济开发区地下水环境影响分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 41(6): 89-96.

Numerical simulation of groundwater pollution caused by leakage of urban pipe network: a case study on an interfluvium in Shenzhen City

LIU Yahui¹, YIN Maosheng², GUO Yuehua³, LIU Yubin⁴, TANG Biao³, XIAO Kai⁵

(1. College of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Ningbo Eastern University of Technology, Ningbo 315200, Zhejiang, China; 3. CCCC-FHEC Ecological Engineering Co. Ltd., Shenzhen 518106, Guangdong, China; 4. Shenzhen Longhua Drainage Co., Ltd., Shenzhen 518110, Guangdong, China; 5. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China)

Abstract: Regarding the underground water pollution resulting from the leakage of urban underground pipe networks, this study selected a specific interfluvium in Guangming District, Shenzhen City as the research area and conducted a detailed background investigation of the groundwater environment. Based on the investigation results, we established a hydrogeological conceptual model and a three-dimensional solute transport numerical model by employing the numerical simulation software (Groundwater Modeling System, GMS) to systematically explore the leakage effects of municipal drainage facilities on migration process of groundwater pollutants. The results demonstrated that there existed a pollution risk of groundwater quality in the study area, which was mainly indicated by nitrate, chloride, nitrite, total coliform bacteria and manganese ions, etc. Among them, the nitrate concentration was as high as 25 mg/L. The migration direction of pollutants in the leakage area of the pipe network was influenced by topographic characteristics and generally flows from the northeast to the southwest, with a migration rate of approximately 0.5 m/d. Additionally, the sensitivity analysis of aquifer parameters indicated that the larger the permeability coefficient of the sediment, the more prominent the degree of groundwater flow and pollutant migration and diffusion, and the broader the diffusion range of the pollution plume. The research findings offer a scientific basis for the prevention and control of groundwater pollution caused by urban pipe network leakage and contribute to facilitating the scientific solution and management practice of pipe network leakage issues in this area and similar environments.

Key words: pipe network leakage; groundwater pollution; numerical simulation; Guangming District, Shenzhen; interfluvium