

王诏楷, 束龙仓, 刘佩贵, 等. 地下水人工回灌颗粒沉积特征试验: 基于回灌水温度与颗粒电荷影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 502-511. WANG Z K, SHU L C, LIU P G, et al. Experiments on the particle deposition characteristics of artificial groundwater recharge: Based on influence of recharge water temperature and particle charge[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 502-511. (in Chinese)

地下水人工回灌颗粒沉积特征试验

——基于回灌水温度与颗粒电荷影响

王诏楷^{1,2}, 束龙仓³, 刘佩贵⁴, 董宁澎⁵, 顾娜⁶, 张世杰¹

(1. 安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 合肥 230088; 2. 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233000; 3. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 4. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009; 5. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 6. 安徽省水文局, 合肥 230022)

摘要: 分析地下水人工回灌过程中颗粒的沉积特征以及影响沉积的多种因素, 搭建地下水回灌物理试验系统和颗粒沉积过程 CT 扫描检测系统, 在此基础上构建与地下水回灌试验系统内砂柱对应的数值模型, 用于分析回灌水温度、回灌颗粒电荷和回灌水头对颗粒沉积的影响权重, 从而将回灌水温度和回灌颗粒电荷与回灌水头纳入同一评价体系中。结果表明: 对于地下水人工回灌过程中颗粒沉积来说, 回灌水头影响最大, 回灌水温度的影响不可忽视, 在地下水源热泵等水温变化幅度较大的工程场景中, 回灌水温度的影响超过了回灌水头, 回灌颗粒电荷的影响较小。研究成果拓宽了对地下水回灌颗粒堵塞和颗粒沉积影响因素的认知, 有利于在地下水回灌工程的设计和运行过程中合理规避颗粒堵塞的影响。

关键词: 颗粒沉积; 人工回灌; 数值模拟; 沉积特征; 影响因素

中图分类号: P641.25 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdk.2024.0052

地下水人工回灌是调节水资源时空分布不均和控制及修复地下水超采的工程手段^[1], 也是解决区域地下水短缺的有效工程措施^[2], 同时还是地下水源热泵等工程运行的必要措施^[3]。地下水回灌工程实践中的堵塞问题严重制约了地下水回灌技术的广泛应用^[4], 以颗粒堵塞为主要形式的物理堵塞是地下水回灌工程中堵塞的主要发生形式^[5]。全球 50% 以上的国家地下水回灌工程发生过颗粒堵塞^[6]。国内外学者通过不同类型的试验对颗粒堵塞进行了大量研究。室内物理试验是主要研究手段之一, 即采用不同形式不同尺寸的砂柱和砂槽进行各种条件下的回灌试验^[7], 获得其中不同位置水头压力变化, 结合达西定律计算不同位置渗透系数的变化情况, 继而获得堵塞的发展过程^[8]。不同试验研究采用的回灌颗粒和多孔介质材质不同^[9], 但堵塞发

生发展的计算方法一致^[10-11]。目前人们关注的焦点之一是回灌颗粒含量和粒径对回灌堵塞发展的影响, 包括两者在何种试验条件下起主导作用以及两者的影响权重等问题^[12-13]。近年来, 地下水回灌的数值模拟方法^[14]以及地下水回灌工程的选点^[15]也逐渐受到重视。介质内部孔隙中的颗粒沉积过程, 控制着介质整体的颗粒堵塞现象, 但是对于两种过程间的内在联系、相互转化以及跨尺度耦合问题, 现阶段的研究有限^[16]。

地下水回灌工程实践中所用的回灌水来源复杂, 包括雨水、再生水以及河道水等, 回灌水头的颗粒粒径受到多种因素影响^[17], 粒径分布范围非常广泛^[18], 常见的地下水回灌水源中的颗粒粒径分布大多分散, 覆盖了从直径几纳米的胶体颗粒到直径几百微米的悬浮颗粒范围^[19]。不同学者^[20-22]对多孔介质孔

收稿日期: 2023-11-30 修回日期: 2024-04-10 网络出版时间: 2024-05-21

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240517.1620.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200500); 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院自主研发项目(KY202208); 安徽省自然科学基金资助项目(2308085US04; 2208085US21)

作者简介: 王诏楷(1994—), 男, 安徽颍上人, 博士, 工程师, 主要从事地下水科学及水生态研究。E-mail: wangzk94@126.com

隙尺度内的颗粒沉积过程构建了概念模型,并提出了深部循环理论、概率理论、颗粒捕获理论等描述颗粒堵塞的方法。应用CT扫描成像等不对介质产生扰动或破坏的无损检测技术可以定量获取介质孔隙空间结构的变化过程^[23]。Ahmed等^[24]通过脉冲注入颗粒并统计颗粒回收率的方式分析介质孔隙结构对回灌颗粒沉积的影响;Ahfir等^[25]通过两种不同的介质研究了多孔介质内部结构对悬浮颗粒迁移和沉积的影响,认为内部结构影响悬浮颗粒和多孔介质的碰撞速率及其被捕获的效率,土柱的尺寸对悬浮颗粒的沉积速率和弥散性有重要影响。已有研究对于回灌水的离子强度、pH值以及水温对颗粒堵塞发生发展过程的影响涉及较少^[26]。当前使用的物理试验装置系统也多聚焦于颗粒沉积所引起的颗粒堵塞现象,未涉及颗粒在介质内部孔隙中的沉积现象^[27]。

本文开展的地下水回灌颗粒堵塞物理试验使用石英砂和玻璃珠两种介质进行对照试验,所用的回灌颗粒是通过实验室 μm 级筛分设备制得的粒径分布范围 $0.9\sim 2.7\ \mu\text{m}$ 的颗粒,符合大多数研究者^[28-29]总结出的胶体颗粒到悬浮颗粒过渡范围。使用计算机断层成像(computed tomography, CT)来构建能够描述多孔介质内部孔隙中颗粒沉积过程的数值

模型,并结合物理试验数据进行基于 μm 级精度的多物理场景下的数值模拟,以研究不同因素对地下水回灌颗粒沉积发生发展产生的影响。

1 物理试验与扫描成像

根据地下水回灌颗粒堵塞发生的典型空间区域,设置地下水回灌物理试验系统(图1)^[30],试验主体是内径 $9\ \text{cm}$ 、外径 $10\ \text{cm}$ 的有机玻璃柱,内部填充 $50\ \text{cm}$ 高的介质。使用平均粒径相同且粒径分布相近的石英砂和玻璃珠(图2)作为介质分别填充柱体,进行回灌颗粒堵塞对照试验。在介质上表面覆盖直径 $5\ \text{mm}$ 的玻璃珠以模拟工程实际中地表的砾石层,同时也对上部回灌来水进行整流,使回灌水流均匀通过介质。柱体侧边每隔 $10\ \text{cm}$ 设置一个测压孔外接压力变送器,在高于砂柱上表面 $10\ \text{cm}$ 处设置出水口以维持定水头,最上部连接回灌装置,并在物理试验系统内配备颗粒搅拌池。试验时测量并记录砂柱不同空间位置处的水头变化情况和出流流量,根据达西定律计算获得砂柱不同深度处的渗透系数变化情况,以分析砂柱内部颗粒堵塞的发生发展情况^[30],通过多组物理试验结果,可知颗粒回灌 $127\ \text{h}$ 时石英砂介质和玻璃珠介质砂柱的渗透系数均达到相对最小值,即堵塞发展的典型时间节点。

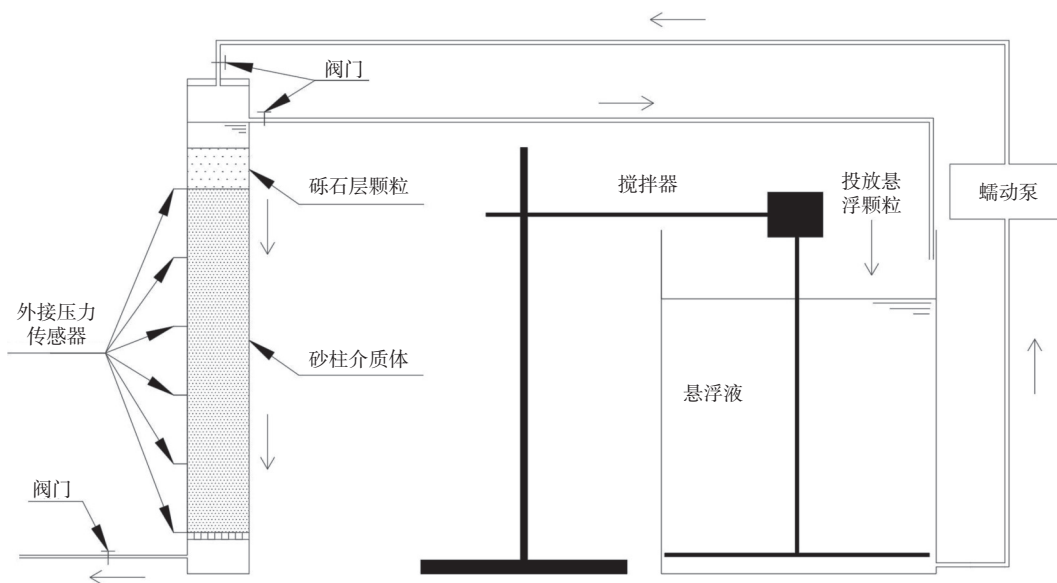


图1 回灌试验系统

Fig. 1 Groundwater recharge experimental system

重复回灌试验,在回灌开始前和堵塞发展的典型时间节点,通过有机玻璃柱体连接至回灌系统的阀门将柱体整体拆出并放入CT扫描装置中进行无损检测成像,试验检测全过程中均对柱体进行缓慢

平移,避免了对其内部介质产生扰动。最终获取了分辨率为 $100\ \mu\text{m}$ 切片图像,经过滤波降噪和二值化分割后获得 $5\ 000$ 张厚度 $100\ \mu\text{m}$ 的切片成像,全部叠加后即包含内部孔隙分布情况的三维成像

(图 3)。通过 Thermo Scientific Amira-Avizo 平台获取切片成像和三维成像的孔隙内表面积 S_a 。为了避免分辨率导致的 Avizo 平台将相邻边界不清晰孔隙识别为一个孔隙,调用 Avizo 平台的 Separate Objects 模块并参照 CT 扫描原图来设置模块中的

Marker Extent 值,以还原砂柱介质内部孔隙的真实空间情况。Marker Extent 值越大,阈值越低,越少的孔隙被识别为边界相交孔隙并分割;Marker Extent 值越小,阈值越高,越多的孔隙被识别为边界相交孔隙并分割。

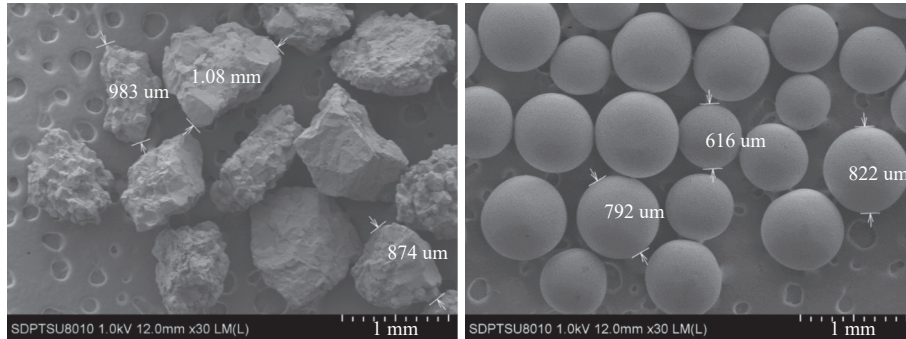


图 2 石英砂介质(左)与玻璃珠介质(右)扫描电镜图

Fig. 2 SEM images of quartz sand media (left) and glass bead media (right)

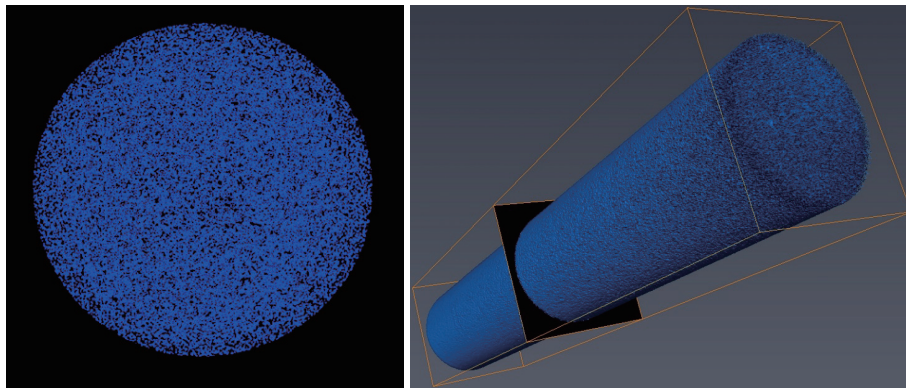


图 3 砂柱 CT 扫描平面成像(左)与三维成像(右)

Fig. 3 Sand column CT scan plane imaging (left) and three-dimensional imaging (right)

2 解析模型

通过物理试验结果^[30]的计算可知两种介质砂柱内部渗流场的雷诺数 Re 在地下水回灌试验全过程中均小于 0.2, 试验过程中的介质内部水流流场的黏滞力远大于惯性力, 将介质内部孔隙中的微观孔隙水流场设定为忽略惯性力的斯托克斯流:

$$\nabla p = \nu \nabla^2 u \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: u 为流体某一质点处的速度矢量, m/s; p 为流体某一质点处的压力矢量, N; ν 是水体运动黏滞系数; ∇ 是 Hamilton 微分算子。基于斯托克斯方程以表征介质内部孔隙中的各空间位置处的水流流速的数学方程为

$$\nabla \{ \nu [\nabla u + (\nabla u)^T] - pL \} + F = 0 \quad (4)$$

$$\nabla p u = 0 \quad (5)$$

式(4)和(5)中: L 是研究所取的水体空间步长, m; u 是该空间步长 L 内的水流矢量速度, m/s; F 是空间步长 L 内的水流受到的外力总和所得矢量作用力, N。通过上述方程即可描述介质内部孔隙中的水流流场, 包括流速和水流各空间质点上的相互作用力。通过下述数学方程来计算砂柱内部孔隙中的颗粒所受到的孔隙水流拖曳力:

$$F_D = \frac{18 \nu m_p}{\rho_p d_p^2} (u - u_p) \quad (6)$$

式中: F_D 是颗粒受到的水流拖曳力, N; m_p 是颗粒的质量, g; ρ_p 是颗粒材质的密度, g/m^3 ; d_p 是颗粒的直径, m; u_p 是某一颗粒的矢量速度, m/s; u 是与该颗粒产生相互作用的空间范围内水体的矢量流速, m/s。将颗粒所受水流拖曳力和其他作用力一起代入牛

顿第二定律获得数值模拟全时间过程的颗粒加速度,即可描述颗粒随水流在砂柱内部孔隙中的运动过程:

$$F_t = m_p \frac{du_p}{dt} \quad (7)$$

式中: F_t 是颗粒在某一时间步长中所受到的总矢量作用力。包括水流拖曳力、重力、水体浮力以及电场力等。通过式(7)计算颗粒在数值模拟全过程中每一个时间步长对应的矢量加速度,根据所有颗粒与每个时间步长对应的加速度,即可实现对地下水回灌全过程中颗粒运动的描述。颗粒所受电场作用力通过库仑定律(Coulomb's law)进行计算,所用库仑定律的微分公式为

$$\nabla D_E = \rho_v \quad (8)$$

$$D_E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (9)$$

式中: D_E 是电位移矢量, C/m^2 ; ρ_v 是电荷密度, C/m ; ε_0 是真空介电常数,经科学家测定 $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} C^2/(N \cdot m^2)$; ε_r 是水体的介电常数,其值与温度相关; E 是电场强度, N/C 。

通过联立求解上述数学物理方程,可获取饱和多孔介质内部的颗粒随回灌时间的运动距离,进而通过设置距砂柱上表面每 $100 \mu m$ 深度介质的颗粒沉积概率来模拟颗粒沉积的发展过程。使用物理试验和 CT 扫描获取的数据对数值模型进行校正验证,包括使用物理试验的回灌水颗粒含量进行场景设置,以及使用 CT 扫描获取的回灌试验前后介质孔隙度变化情况来验证数值模型中颗粒沉积概率的设置。

3 数值模拟与颗粒沉积特征解析

3.1 数值模型

回灌水头作为影响地下水回灌颗粒沉积的主要因素,通过与回灌水温度以及回灌颗粒电荷对比分析,将热力学因素(回灌水温度)和电化学因素(回灌颗粒电荷)引入与工程因素回灌水头相同的影响体系中。通过设置于砂柱上表面(覆盖层下表面)的压力传感器读数,将回灌水头的下限值取为物理试验的实测水头 31.549 Pa ,并将其 2 倍值 63.098 Pa 和 3 倍值 94.647 Pa 分别作为中间值和上限值。

对于回灌水温度,以物理试验全过程中的水体平均温度 $19.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为中间值,选取具有较大变化幅度的 $4.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $34.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 分别作为回灌水温度的下限值和上限值。这样取值一方面是考虑到在地下水回灌工程实践中可能出现的回灌水温度分布范围,

另一方面是考虑到目前地下水源热泵的广泛应用,在工程实际中存在着极端高水温和极端低水温和回灌水源。将本研究中的水温取值范围扩大可以为地下水源热泵工程实践中的地下水回灌颗粒堵塞现象提供理论解释。

物理试验过程中用去离子水多次淘洗介质颗粒,将回灌颗粒所带电荷设置为 0,并作为数值模拟的中间值。地下水人工回灌所用水源包括雨洪水和河道水等多种来源,在引水回灌的过程中经过多个不同静电场,将回灌颗粒电荷的上下限值设定为绝对值较小的数据 $+2 e$ 和 $-2 e$,以接近地下水回灌工程实际。

对每个数值模拟场景统计颗粒沉积数量并计算颗粒沉积比例,对比分析不同场景下的颗粒沉积情况。数值模拟场景以及对应的石英砂介质和玻璃珠介质颗粒沉积比例见表 1。

对表 1 中的数据进行分析计算,在 SPSS 中使用逐步回归算法对 3 个影响因素进行敏感性分析,得出回灌水头对 2 种介质颗粒沉积的影响权重值为 0.144 3 ,回灌水温度的影响权重值为 0.648 8 ,回灌颗粒电荷的权重值为 0.206 9 。

在回灌水温度极端的情况下,其对地下水回灌颗粒堵塞的影响较大,这表明在地下水源热泵等涉及极端回灌水温度的工程实践中需要将回灌水温度纳入地下水回灌堵塞的重点范畴,同时未涉及极端回灌水温度的普通工程中也不能忽略水温对于颗粒堵塞发生发展的影响。回灌颗粒电荷对地下水人工回灌过程中的颗粒沉积影响程度较低,在考虑颗粒堵塞时可选择性忽略。

回灌水头作为对照组用来分析回灌水温度和回灌颗粒电荷与其相对地下水回灌颗粒堵塞和颗粒沉积的影响程度,取值范围较小。为方便对比选取物理试验回灌水头的 2 倍值和 3 倍值分别作为中间值和上限值,在本研究的结果中影响权重较低。但在地下水人工回灌工程实践中,回灌水头等工程因素仍然对颗粒堵塞影响最大,回灌水温度仅在地下水源热泵等涉及极端水温回灌水的工程场景中影响权重最高。

3.2 定回灌水头特征解析

将表 1 中场景 1 至 9 的数值模拟结果单独提取出来作图(图 4),以分析在回灌水头 31.549 Pa 情况下的回灌水温度和回灌颗粒电荷对颗粒沉积产生的影响。

表 1 数值模拟场景与颗粒沉积比例

Tab. 1 Table of numerical simulation scenes and particle deposition ratio

| 数值模拟场景 | 回灌水头/Pa | 回灌水温度/℃ | 回灌颗粒电荷/e | 石英砂介质体颗粒沉积比例/% | 玻璃珠介质体颗粒沉积比例/% |
|--------|----------|---------|----------|----------------|----------------|
| 1 | 31.549 1 | 4.0 | -2 | 28.255 5 | 26.175 3 |
| 2 | 31.549 1 | 4.0 | 0 | 27.970 1 | 30.336 7 |
| 3 | 31.549 1 | 4.0 | +2 | 28.683 5 | 37.719 4 |
| 4 | 31.549 1 | 19.1 | -2 | 18.551 5 | 6.443 2 |
| 5 | 31.549 1 | 19.1 | 0 | 18.835 8 | 11.812 5 |
| 6 | 31.549 1 | 19.1 | +2 | 18.961 0 | 20.671 9 |
| 7 | 31.549 1 | 34.2 | -2 | 18.123 5 | 5.772 0 |
| 8 | 31.549 1 | 34.2 | 0 | 18.408 9 | 10.738 7 |
| 9 | 31.549 1 | 34.2 | +2 | 17.980 8 | 20.537 6 |
| 10 | 63.098 2 | 4.0 | -2 | 31.537 7 | 29.262 7 |
| 11 | 63.098 2 | 4.0 | 0 | 30.681 5 | 32.887 0 |
| 12 | 63.098 2 | 4.0 | +2 | 31.966 9 | 39.867 1 |
| 13 | 63.098 2 | 19.1 | -2 | 19.265 1 | 6.845 8 |
| 14 | 63.098 2 | 19.1 | 0 | 18.971 6 | 11.409 7 |
| 15 | 63.098 2 | 19.1 | +2 | 19.407 8 | 21.342 9 |
| 16 | 63.098 2 | 34.2 | -2 | 19.550 5 | 6.174 8 |
| 17 | 63.098 2 | 34.2 | 0 | 18.694 3 | 10.470 1 |
| 18 | 63.098 2 | 34.2 | +2 | 18.266 2 | 19.598 0 |
| 19 | 94.647 3 | 4.0 | -2 | 32.536 6 | 7.114 2 |
| 20 | 94.647 3 | 4.0 | 0 | 31.965 8 | 12.617 8 |
| 21 | 94.647 3 | 4.0 | +2 | 32.679 3 | 20.806 0 |
| 22 | 94.647 3 | 19.1 | -2 | 18.979 7 | 6.577 4 |
| 23 | 94.647 3 | 19.1 | 0 | 19.836 0 | 11.946 8 |
| 24 | 94.647 3 | 19.1 | +2 | 18.998 6 | 21.074 5 |
| 25 | 94.647 3 | 34.2 | -2 | 17.695 4 | 6.040 5 |
| 26 | 94.647 3 | 34.2 | 0 | 18.391 5 | 11.007 2 |
| 27 | 94.647 3 | 34.2 | +2 | 18.836 9 | 20.134 8 |

图 4(a)显示:回灌水头在数值模拟全过程中保持下限值的情况下,石英砂介质的颗粒沉积受到回灌水温度的影响更大;随着水温的升高,颗粒沉积比例下降,水温从 4.0 ℃ 到 19.1 ℃ 颗粒沉积比例出现了巨大降幅。可行的理论解释是随着温度的升高,水体的密度和运动黏度下降,导致在同样的回灌水头条件下,介质内部孔隙中的水流流速更高,颗粒受到的水流拖曳力更大,容易随水流运动到介质研究区域的边界而非沉积在孔隙壁上。水温从 19.1 ℃ 变化到 34.2 ℃,水体的密度和运动黏度随温度升高而降低的变化幅度放缓,颗粒所受水流拖曳力对于颗粒运动速度提高没有水温升高的影响大,数值模拟所用的研究区域大小有限,颗粒在更大水

流拖曳力的作用下有了更高的加速度,区域内部能够提供颗粒加速的距离有限。孔隙的空间展布情况也是决定数值模拟过程中颗粒与孔隙壁发生碰撞的重要因素,水流速度的提高没有改变研究区域中孔隙的空间展布,所以回灌水温度从中间值变化为上限值的过程中颗粒的沉积比例没有明显下降。

图 4(b)显示,回灌水头在数值模拟过程中保持下限值时,玻璃珠介质的颗粒沉积同时受到回灌水温度和回灌颗粒电荷的影响,回灌水温度造成的影响程度相对较高。玻璃珠介质的颗粒沉积情况与石英砂介质相似,玻璃珠介质的颗粒沉积比例随回灌颗粒电荷从下限值变为上限值出现了明显的上升。回灌颗粒电荷为下限值-2 e 时,颗粒受到的电

场力指向孔隙中轴线,不利于颗粒沉积;回灌颗粒电荷为中间值 0 时,颗粒不受到电场力的作用;而回灌颗粒电荷为上限值 $2e$ 时,颗粒受到的电场力指向孔隙壁,有利于颗粒沉积。颗粒沉积比例随着回灌颗粒电荷从下限值到上限值的变化逐渐提高。玻璃珠介质的颗粒沉积比例随回灌颗粒电荷增大而提高的比例更大,可行的理论解释是石英砂介质

内部的孔隙相比玻璃珠介质更加曲折多变,试验过程中颗粒与孔隙壁的碰撞更多,受到的电场力影响相对较小。玻璃珠介质内部的孔隙较为规则,孔隙壁也较为光滑,颗粒与孔隙壁产生的碰撞较少,颗粒与玻璃珠介质内部孔隙壁的碰撞受到的电场力影响相对较大。

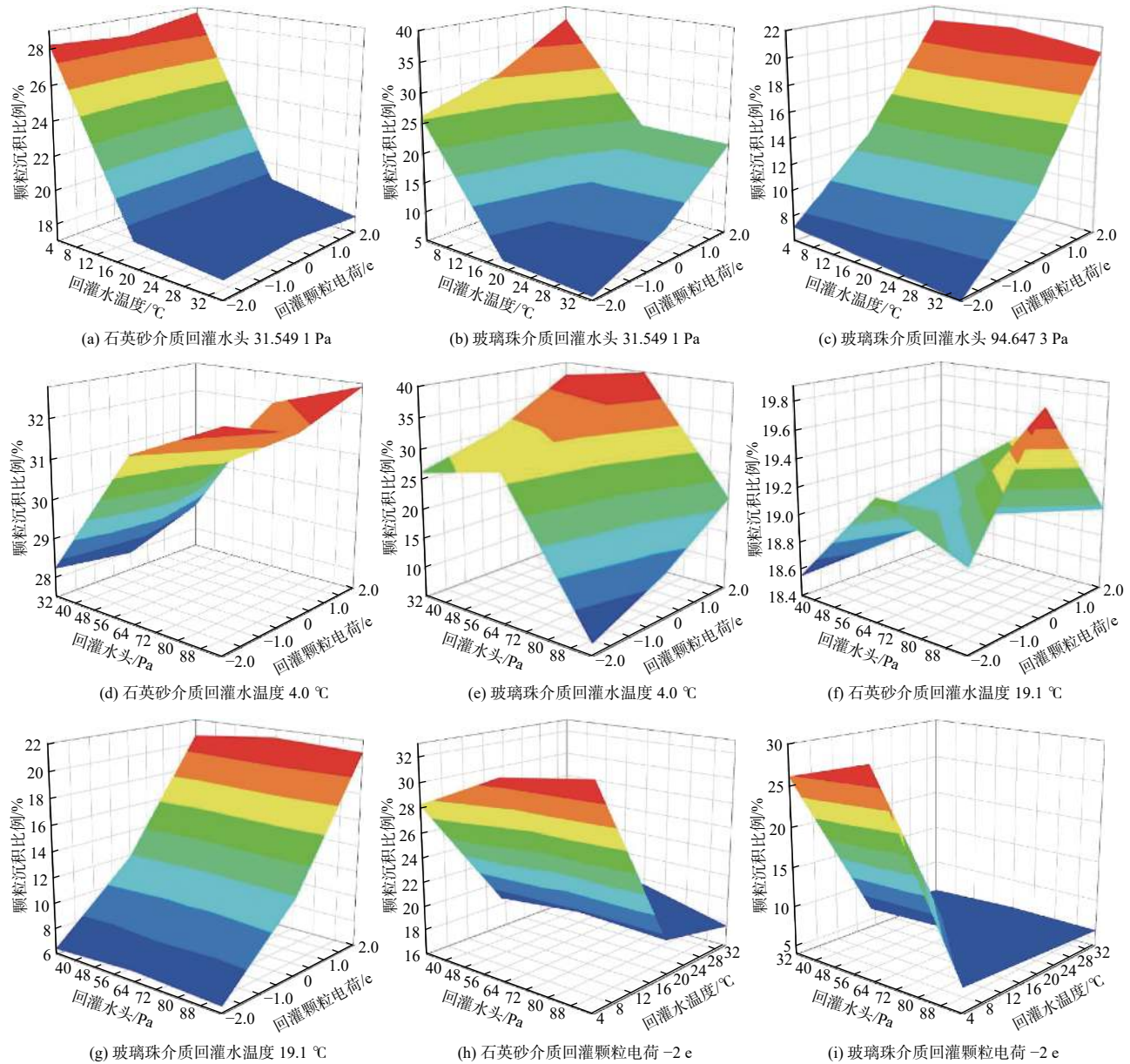


图 4 不同因素影响下的颗粒沉积比例

Fig. 4 Particle deposition ratio affected by different factors

在回灌水头 63.098 2 Pa 条件下的 2 种介质砂柱和在回灌水头 94.647 3 Pa 下石英砂介质砂柱的颗粒沉积比例变化趋势与图 4(b) 相同。将表 1 中数值模拟场景 19 至 27 在回灌水头 94.647 3 Pa 下的玻璃珠介质砂柱数值模拟结果单独提取出来作图,

见图 4(c)。

由图 4(c) 可以看出,颗粒沉积比例随回灌水温度的升高只出现非常小的下降,可行的理论解释是在回灌水头保持上限值的情况下,介质内部孔隙中的水流流速很高,水体密度和动力黏度降低而提高

的水流流速值相比较高的水流流速所占比例很小,颗粒沉积比例随幅度很小的水流流速提高下降的幅度也小。石英砂介质未出现类似的变化情况,可归结为石英砂介质内部的孔隙空间展布相比玻璃珠介质更复杂多变,颗粒沉积对于水流流速的变化更敏感。

3.3 定回灌水温度特征解析

将表 1 中数值模拟场景 1、2、3、10、11、12、19、20、21 的数值模拟结果单独提取出来作图 [图 4(d) 和图 4(e)], 以分析回灌水温度 4.0 °C 下回灌水头和回灌颗粒电荷对颗粒沉积产生的影响。

图 4(d) 中颗粒沉积比例随回灌水头从下限值升高到上限值的过程为先大幅度升高后小幅度升高,可行的理论解释是回灌水头的升高在使研究区域内部水流流速提升的同时增大了孔隙水流的混乱度。水流流速提升会使颗粒随水流更快运动到研究区域边界,降低颗粒与孔隙壁的碰撞次数,进而降低总体的颗粒沉积比例。水流混乱度增加会提高颗粒在孔隙内部的运动混乱度,提高颗粒与孔隙壁的碰撞次数,进而提高总体的颗粒沉积比例。在回灌水头从 31.549 1 Pa 提高至 63.098 2 Pa 的过程中,水流混乱度的提高幅度大于水流流速,表现为颗粒沉积比例大幅提高;在回灌水头从 63.098 2 Pa 提高到 94.647 3 Pa 的过程中,水流流速的提高幅度更大,抵消了水流混乱度提高的部分影响,表现为颗粒沉积比例小幅提高。此处回灌颗粒电荷的变化未对颗粒沉积造成明显影响。

图 4(e) 中的颗粒沉积比例随回灌水头从下限值提高到上限值的过程出现了先微小提高再显著下降的变化趋势,可行的理论解释是玻璃珠介质内部的孔隙形状和结构相比较石英砂介质更为规则平整,回灌水头的提高造成的孔隙内部水流混乱度升高幅度较小。在回灌水头从 31.549 1 Pa 提高至 63.098 2 Pa 的过程中,水流混乱度的提高幅度略大于水流流速,表现为颗粒沉积比例微小提高;而在回灌水头从 63.098 2 Pa 提高到 94.647 3 Pa 的过程中,水流流速的提高幅度大于水流混乱度,表现为颗粒沉积比例大幅下降。玻璃珠介质内部的孔隙比石英砂介质更规则,孔隙壁也较光滑,颗粒与玻璃珠介质内部孔隙壁的碰撞受到的电场力影响更为显著,所以随着回灌颗粒电荷从下限值的 -2 e (不利沉积) 到中间值的 0 (无影响) 再到上限值的 2 e (有利沉积),颗粒沉积比例均出现了一定程度的提高。

将表 1 中数值模拟场景 4、5、6、13、14、15、22、23、24 的数值模拟结果单独提取出来作图 [图 4(f) 和图 4(g)], 以分析回灌水温度为 19.1 °C 的情况下回灌水头和回灌颗粒电荷对颗粒沉积产生的影响。

图 4(f) 中的颗粒沉积比例随回灌水头的增大出现先增大后减小的变化趋势,可用水流流速和水流混乱度的此消彼长进行理论解释,颗粒沉积比例随回灌颗粒电荷从下限值到上限值的过程出现了先增大后减小的变化趋势,推断为颗粒所受电场力的矢量方向与水流拖曳力的矢量方向出现了空间上的特殊交叠,使得有利沉积和不利沉积条件下的颗粒沉积比例均较低,没有电场力影响下的颗粒沉积比例较高。

图 4(g) 中的颗粒沉积比例随回灌水头的提高未出现变化,可行的理论解释是随着回灌水头的提高,水流流速和水流混乱度对颗粒沉积造成的影响程度相当。随着回灌颗粒电荷从下限值变动到上限值,颗粒沉积比例明显提高,理论解释同图 4(f)。回灌水温度为 34.2 °C 时 2 种介质砂柱颗粒沉积变化过程均与 19.1 °C 场景相同。

3.4 定回灌颗粒电荷特征解析

将表 1 中数值模拟场景 1、4、7、10、13、16、19、22、25 的数值模拟结果单独提取出来作图 [图 4(h) 与图 4(i)], 以分析回灌颗粒电荷在 -2 e 情况下的回灌水头和回灌水温度对颗粒沉积产生的影响。回灌颗粒电荷在 0 和 2 e 情况下的颗粒沉积发生发展过程相似。

图 4(h) 与图 4(i) 中的颗粒沉积比例变化趋势相似,随回灌水头提高的变化趋势可以用水流流速和水流混乱度对颗粒沉积影响的此消彼长来进行理论解释。颗粒沉积比例随着回灌水温度从下限值 4 °C 提高到中间值 19.1 °C,出现了大幅度下降。随着回灌水温度从中间值 19.1 °C 提高到上限值 34.2 °C,颗粒沉积比例下降幅度极小。理论解释是温度升高导致水体密度和运动黏度下降,颗粒受到的水流拖曳力增大,更不容易沉积。回灌水温度从 19.1 °C 变化到 34.2 °C 的过程中,水体的密度和运动黏度随温度的变化幅度放缓,所受水流拖曳力提高较小,同时因为研究区域尺寸较小,颗粒的速度增加有限,所以颗粒沉积比例的降低幅度极小。

4 结论

在回灌水温度变化幅度较大的情况下,对石英

砂介质和玻璃珠介质内颗粒沉积影响权重最高的因素是回灌水温度,次之是回灌水头,回灌颗粒电荷是影响权重最低的因素。在地下水源热泵等涉及极端回灌水温度的工程场景中,需要将回灌水温度作为影响回灌堵塞的重要因素进行考虑。在其他工程中也不能忽略水温对于颗粒堵塞的影响。

地下水源热泵等地下水回灌工程实践中回灌水的水温对于回灌颗粒堵塞发生发展的影响程度较高,甚至高于本研究中所设置的回灌水头,回灌水体的pH值和离子强度等电化学因素作为地下水回灌化学堵塞的主要影响因素,对作为回灌物理堵塞类型之一的颗粒堵塞影响程度极低。

物理试验、CT扫描以及数值模拟的结果中出现了多处复杂多变的数据波动,这是由于地下水回灌过程中介质内部的流场和颗粒运动过程均极为复杂多变,流场和颗粒运动的复杂性使得颗粒在孔隙中的受力情况具有高度繁杂的变化趋势。

参考文献:

- [1] YI L L, JIAO W T, CHEN X N, et al. An overview of reclaimed water reuse in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(10): 1585-1593. DOI: 10.1016/s1001-0742(10)60627-4.
- [2] ERNST M, JEKEL M. Advanced treatment combination for groundwater recharge of municipal wastewater by nanofiltration and ozonation[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 40(4-5): 277-284. DOI: 10.1016/s0273-1223(99)00509-0.
- [3] SMAJIL H, LEONHARD O, THOMAS H. Integration of groundwater heat pumps into energy system optimization models[J]. *Energy*, 2022, 238(A): 121607. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121607.
- [4] DOWNWARD S, TAYLOR R. An assessment of Spain's programa AGUA and its implications for sustainable water management in the province of Almeria, southeast Spain[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 82(2): 277-289. DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.12.015.
- [5] NGUYEN H T, KIM Y, CHOI J W, et al. Soil microbial communities-mediated bioattenuation in simulated aquifer storage and recovery (ASR) condition: Long-term study[J]. *Environmental Research*, 2021, 197: 111069. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111069.
- [6] 常雅雯, 管清花, 陈学群, 等. 人工回灌对地下水环境影响研究综述[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(S2): 182-189. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.1058.21.338.
- [7] 黄星, 路莹, 刘肖, 等. 地下水抬升对人工回灌中悬浮物堵塞的影响[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017(47): 1818. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.201706204.
- [8] 冶雪艳, 杜新强, 张赫轩, 等. 回灌过程中离子强度和水流流速对胶体粒子在多孔介质中堵塞的影响[J]. *化工学报*, 2017, 68(12): 4793-4801. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170570.
- [9] 蒋思晨, 白冰. 悬浮颗粒形状对其在多孔介质中迁移和沉积特性的影响[J]. *岩土力学*, 2018, 39(6): 2043-2051. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2211.
- [10] HÖLTING B, COLDEWEY W G. *Hydrogeology* [M]. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment, 2019.
- [11] STEGGALL-MURPHY C, SIMACEK P, ADVANI S G, et al. A model for particle deposition during impregnation of fibrous porous media[J]. *Journal of Porous Media*, 2011, 14(5): 383-394. DOI: 10.1615/jpormedia.v14.i5.20.
- [12] ZHAO K, SHANG J. Effect of coupled physical and chemical heterogeneity on the transport of pristine and aged pyrogenic carbon colloids in unsaturated porous media[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 918: 170542. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170542.
- [13] WANG Y, WILLIAMS K C, JONES M G, et al. CFD Simulation of gas-solid flow in dense phase bypass pneumatic conveying using the Euler-Euler model[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, 26-28: 1190-1194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.26-28.1190.
- [14] 周妍, 白国营, 赵洪岩, 等. 分布式地表水-地下水耦合数值模型研究进展[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(3): 435-446. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0044.
- [15] 范芷若, 王煜莹, 欧阳卫, 等. 石川河河谷区地下水人工补给潜力与补给方式[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(3): 491-500. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0049.
- [16] 林学钰, 王焰新, 葛社民, 等. *中国学科发展战略: 地下水科学* [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [17] RIVER M, RICHARDSON C J. *Suspended sedi-*

- ment mineralogy and the nature of suspended sediment particles in stormflow of the southern piedmont of the USA[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(7): 5665-5678. DOI: [10.1029/2018wr024613](https://doi.org/10.1029/2018wr024613).
- [18] ALEM A, ELKAWAFI A, AHFIR N D, et al. Filtration of kaolinite particles in a saturated porous medium: Hydrodynamic effects[J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(3): 573-586. DOI: [10.1007/s10040-012-0948-x](https://doi.org/10.1007/s10040-012-0948-x).
- [19] GIULIA G, EINA V I, MARKS B. Linking micro grainsize polydispersity to macro porosity[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 187: 75-84. DOI: [10.1016/j.ijsolstr.2018.11.032](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.11.032).
- [20] MIRABOLGHASEMI M, PRODANOVIĆ M, DICARLO D, et al. Prediction of empirical properties using direct pore-scale simulation of straining through 3D microtomography images of porous media[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 768-778. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2015.08.016](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.016).
- [21] XIONG X F, YANG Z B, HU R, et al. Predicting colloid transport and deposition in an array of collectors[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 659: 130762. DOI: [10.1016/j.colsurfa.2022.130762](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130762).
- [22] JOHNSON W P, RASMUSON A, PAZMIÑO E, et al. Why variant colloid transport behaviors emerge among identical individuals in porous media when colloid-surface repulsion exists[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 52(13): 7230-7239. DOI: [10.1021/acs.est.8b00811.s003](https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00811.s003).
- [23] HELLIWELL J R, MILLER A J, WHALLEY W R, et al. Quantifying the impact of microbes on soil structural development and behaviour in wet soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 74: 138-147. DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.03.009](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.009).
- [24] Ahmed Benamar, Nasre-Dine Ahfir, Huaqing Wang, et al. Particle transport in a saturated porous medium: Pore structure effects[J]. *Comptes rendus-Géoscience*, 2007, 339(10): 674-681.
- [25] AHFIR N D, BENAMAR A, ALEM A, et al. Influence of internal structure and medium length on transport and deposition of suspended particles: A laboratory study[J]. *Transport in Porous Media*, 2009, 76(2): 289-307. DOI: [10.1007/s11242-008-9247-3](https://doi.org/10.1007/s11242-008-9247-3).
- [26] SASIDHARAN S, TORKZABAN S, BRADFORD S A, et al. Coupled effects of hydrodynamic and solution chemistry on long-term nanoparticle transport and deposition in saturated porous media[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014, 457: 169-179. DOI: [10.1016/j.colsurfa.2014.05.075](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.05.075).
- [27] BARTH T, REICHE M, BANOWSKI M, et al. Experimental investigation of multilayer particle deposition and resuspension between periodic steps in turbulent flows[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2013, 64: 111-124. DOI: [10.1016/j.jaerosci.2013.04.011](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.04.011).
- [28] AMELI A A. Controls on subsurface transport of sorbing contaminant[J]. *Hydrology Research*, 2016, 48(5): 1226-1239. DOI: [10.2166/nh.2016.170](https://doi.org/10.2166/nh.2016.170).
- [29] SIRIWARDENE N R, DELETIC A, FLETCHER T D. Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study[J]. *Water Research*, 2007, 41(7): 1433-1440. DOI: [10.1016/j.watres.2006.12.040](https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.12.040).
- [30] 王诏楷, 束龙仓, 刘波, 等. 孔隙结构对地下水回灌颗粒堵塞影响的试验研究[J]. *水利学报*, 2021, 52(4): 498-506. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20200636](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20200636).

Experiments on the particle deposition characteristics of artificial groundwater recharge: Based on influence of recharge water temperature and particle charge

WANG Zhaokai^{1,2}, SHU Longcang³, LIU Peigui⁴, DONG Ningpeng⁵, GU Na⁶, ZHANG Shijie¹

(1. Anhui and Ministry of Water Resources Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Hefei 230088, China; 2. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Bengbu 233000, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 5. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 6. Anhui Province Hydrology Bureau, Hefei 230022, China)

Abstract: Artificial recharge of groundwater is a technology that injects excess surface water, rain flood or reclaimed water into the ground through surface infiltration or artificial recharge wells, so as to effectively recharge

groundwater and raise the groundwater level. The physical clogging dominated by particle clogging is the main factor restricting the large-scale popularization and application of groundwater artificial recharge project. The particle deposition process in the pores of the media controls the particle clogging phenomenon of the whole media. At present, the research on the internal relationship, mutual transformation and cross-scale coupling between the two processes is limited. The movement and deposition of particles in the pores of the media are the microscopic mechanism of particle clogging. The important factor affecting the movement state of particles in the pores of the media is the pore water flow field. The recharge head is the decisive factor to determine the flow velocity and flow field distribution. The temperature will change the dynamic viscosity and density of the water, which will affect the flow field, change the fluid drag force on the particles and affect the particle deposition. The pH and ionic strength of recharge water affect the particle deposition by affecting the charge of the particles in the water.

A physical experimental system of particle clogging in one-dimensional sand column groundwater recharge with fixed head was built, and two media were used for comparative experiments. Combined with physical experiments and Computed Tomography, a numerical model that can describe the particle deposition process in the pores of porous media is constructed, and the numerical model is corrected and verified by physical experiment data and CT scan results. The recharge temperature is selected as the thermodynamic factor, the recharge particle charge is selected as the electrochemical factor, and the recharge head is selected as the engineering factor, and the three are included in one groundwater recharge particle clogging evaluation system. The numerical simulation of multi-physical scenarios with μm -level accuracy was carried out to research the effects of hydraulic factors, thermodynamic factors, and electrochemical factors on the deposition of groundwater recharge particles. According to the combination of the upper limit, the lower limit and the intermediate value of each influencing factor, multiple physical scenarios are set up.

The influence weight value of the recharge head on the particle deposition of the two media is 0.144 3, the influence weight value of the recharge temperature is 0.648 8, and the weight value of the recharge particle charge is 0.206 9. There are many data fluctuations in the numerical simulation process, which indicates that the internal flow field and particle motion process of the media are extremely complex and changeable, and a theoretical explanation is proposed. The recharge head is used as a control group to analyze the influence of thermodynamic factors and electrochemical factors on particle clogging and particle deposition in groundwater recharge compared with conventional engineering factors. The range of values is small. In the practice of groundwater artificial recharge engineering, the engineering factors such as recharge head and particle concentration of recharge water still have the greatest impact on particle clogging. The recharge temperature has the highest weight only in engineering scenarios involving extreme water temperature recharge such as groundwater source heat pump.

In the case of large variation of recharge temperature, the highest weight factor affecting particle deposition in quartz sand media and glass bead media is recharge temperature, followed by recharge head, and recharge particle charge is the factor with the lowest weight. In the engineering scenarios involving extreme recharge temperature such as ground source heat pump, it is necessary to consider the recharge temperature as an important factor affecting the groundwater recharge clogging. At the same time, the influence of water temperature on the occurrence and development of particle clogging can not be ignored in ordinary projects that do not involve extreme recharge temperature. The influence of electrochemical factors on particle deposition and particle clogging in the process of artificial recharge of groundwater is low. When considering the physical clogging of groundwater recharge such as particle clogging, the electrochemical factors such as ionic strength and pH of recharge water can be selectively ignored.

Key words: particle deposition; groundwater artificial recharge; numerical simulation; depositional characteristics; influence factor