

# Research Progress on the Recharge Clogging Prediction Model of Underground Water Heat Pump

Chunyu Zang, Han Kang\*, Jun Pan, Yaling Wang, Chunyi Qin, Xiaoyun Xin, Haotian Yang, Boyuan Zheng

Shenyang Jianzhu University, Shenyang Liaoning  
Email: \*274468604@qq.com, zcy\_1509@163.com

Received: Apr. 8<sup>th</sup>, 2017; accepted: Apr. 25<sup>th</sup>, 2017; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

Physical and chemical and biological clogging mechanisms were discoursed in the article. The application of the three types of clogging prediction models was introduced. Particle migration-deposition model for physical clogging prediction was used to predict the occurrence and development of the clogging. The relationship between flow velocity and sediment concentration of suspended particles was explained by concentration model and adsorption-analytic model. In chemical clogging prediction aspect, the development process of suspended solids and the clogging time were predicted by the suspended matter surface clogging model. The relationship between plugging kinetics and chemical reaction rate and porosity was explained by the model of homogeneous microfissure media. Taylor model, Seki model and Clement model were used to explain the relationship between biofilm thickness and permeability in biological clogging prediction aspect. Research on the establishment of an effective underground water heat pump model was of great significance to the clogging of the underground water pump.

## Keywords

Underground Water Heat Pump, Clogging Mechanism, Recharging Clogging, Clogging Model, Clogging Prediction

# 地下水源热泵回灌堵塞预测模型的研究进展

藏春月, 亢涵\*, 潘俊, 王娅伶, 秦春怡, 忻晓贇, 杨昊天, 郑博元

沈阳建筑大学, 辽宁 沈阳  
Email: \*274468604@qq.com, zcy\_1509@163.com

收稿日期: 2017年4月8日; 录用日期: 2017年4月25日; 发布日期: 2017年4月30日

\*通讯作者。

## 摘要

本文简要论述了物理堵塞、化学堵塞以及生物堵塞的堵塞机理,介绍了三种堵塞类型的堵塞预测模型的应用现状。物理堵塞预测使用了颗粒运移-沉积模型预测了堵塞的发生发展过程;用了浓度模型和吸附-解析模型说明了流速与悬浮颗粒沉积量的关系。化学堵塞预测通过建立悬浮物表面堵塞模型,预测了悬浮物的发展过程及完全堵塞的时间;用了均质微裂隙介质堵塞模型,说明了堵塞动力学与化学反应速率和孔隙率的关系。生物堵塞预测运用了Taylor模型、Seki模型和Clement模型,以上三种模型说明了生物膜厚度与渗透率的关系。研究建立有效的地下水源热泵回灌堵塞模型,对地下水源热泵回灌堵塞问题具有重大意义。

## 关键词

地下水源热泵, 堵塞机理, 回灌堵塞, 堵塞模型, 堵塞预测

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

地下水源热泵系统由于具有节能环保的特点,所以被广泛应用于室内供暖与制冷,其热源来自于地下水,热泵机组通过对地下水的抽灌吸收热量对建筑物供暖,取热后再通过回灌井回到地下[1]。地下水源热泵技术可以利用有效的能源来降低资源的消耗速度,从而降低高位能的耗散速度。同时地下水源热泵也可以利用高位能作为驱动,将低位热源输送到高位用户供热[2]。但地下水源热泵在回灌过程中会产生堵塞,抽出的水不能100%回灌进入含水层,进而影响了地下水的回灌效率,同时可能导致地下水水量降低、水体污染、地面沉降及地下热平衡被破坏等问题。

因此,掌握地下水源热泵不同类型堵塞的发生发展过程并进行预测,对预防和解决地下水源热泵回灌问题有重要作用。本文从物理、化学、生物三个方面介绍了地下水源热泵回灌堵塞的预测模型,通过预测模型的运用,可以更有效的预测堵塞的发生过程以及造成堵塞的原因。并对地下水源热泵回灌堵塞预测模型今后的发展做出展望。

## 2. 地下水源热泵回灌堵塞的研究现状

### 2.1. 物理堵塞的研究现状

物理堵塞为地下水回灌过程中最为普遍的堵塞类型。物理堵塞主要有悬浮物堵塞、气体堵塞和压密堵塞三种类型[3]。其中悬浮物堵塞为物理堵塞中最常见的类型。悬浮物的主要来源为:(1)回灌水中含有细小的固体颗粒[4];(2)由于水动力的作用,含水层内部产生固体颗粒[5]。目前对大颗粒悬浮物(粒径 > 30  $\mu\text{m}$ )堵塞机理的研究已逐渐成熟,但在中间颗粒(粒径在 1~30  $\mu\text{m}$  之间)和胶体颗粒(粒径 < 1  $\mu\text{m}$ )方面还比较薄弱[6]。

气体堵塞是物理堵塞中一种重要的堵塞方式。产生气体的原因为回灌时回灌水中携带一定量的氧气、二氧化碳等气体,当气体随水注入地下后,由于温度和压力等条件的改变,部分气体溢出。此外,地下水中的生化作用,如硝化、反硝化作用会产生氮气和氮氧化物气体,同时微生物的代谢活动也会产生气

体, 从而造成气体堵塞, 使回灌效率降低[3] [7]。

压密堵塞一般是由于入渗水位过高压缩土壤颗粒引起的孔隙体积下降。根据相关研究发现不同回灌水位对回灌效率的影响不同, 在初始入渗阶段, 回灌水位越高, 入渗量越大, 但长期进行高水位回灌会造成土层压密堵塞, 使回灌量降低[8] [9]。

## 2.2. 化学堵塞的研究现状

化学堵塞的机理十分复杂, 涉及的影响因素也较多。从广义上讲, 化学堵塞是由于水中化学成分与其接触的土壤-岩石之间发生水文地球化学反应, 导致含水层堵塞, 回灌效率降低[10]。其主要影响因素为回灌水与地下水的化学组成、含水层矿物成分以及影响矿物溶解与沉淀的物理条件, 如温度、压力等[11] [12]。

有研究表明, 回灌井的化学堵塞主要是因为氧化作用产生的沉淀物存在多孔介质内, 从而产生堵塞, 这类沉淀主要为铁沉淀[3] [10] [13] [15]。回灌水中铁离子浓度越高, 发生堵塞的时间越快, 回灌堵塞现象越严重, 其中锰离子也会产生化学堵塞沉淀, 但高铁地区比高锰地区更易发生回灌堵塞现象[10]。根据相关研究表明, 铁和锰造成的化学堵塞受溶解氧、温度、抽灌比和当地地质条件等的影响[13]。

由于不同地区的地下水水质成分不同, 而且地下水与回灌水的水质成分也十分复杂, 所以发生的化学反应过程也相对变得复杂, 室内实验只能针对某地区水中的离子进行研究, 因此在化学堵塞方面还需要不断的进行研究。

## 2.3. 生物堵塞的研究现状

生物堵塞也是一种重要的回灌堵塞方式, 但生物堵塞的发生速度比物理堵塞慢, 一般是在回灌几天甚至是十几天才会发生生物堵塞。普遍认为生物堵塞是微生物新陈代谢后形成的生物膜堵塞、生物粘粒膨胀及聚沉堵塞。在适宜的条件下, 回灌水水中的微生物会迅速生长, 其代谢产物和生物体会在多孔介质表面堆积, 从而降低多孔介质的孔隙度, 使回灌水量减少[10]。根据相关研究分析得知, 在天然情况下微生物主要分布在地下 0 - 60 cm 深度, 并且随着深度的加深, 微生物的含量减少, 所以由于微生物生长而产生的生物堵塞情况也会随着深度的加深而有所减缓[14]。

微生物导致生物堵塞的四种作用机理为: (1)在多孔介质中细胞的累积效应; (2)细菌胞外聚合物, 主要为多糖类物质的累积; (3)由生物活动而产生的气体的滞留效应, 如二氧化碳(呼吸作用); (4)微生物生成沉淀的累积效应[15]。另外地下的温度、PH 值、Eh 值等外界条件都会对生物堵塞造成影响[16]。引起生物堵塞现象的原因除了微生物的生长外, 微生物产生的胞外聚合物、代谢产生的气体以及微生物氧化还原作用产生的沉淀都会造成微生物都堵塞[17]。

## 3. 地下水源热泵模型的研究现状

### 3.1. 物理堵塞模型的研究现状

目前, 地下水水源热泵回灌堵塞的模型一般是针对某一具体的堵塞类型进行研究。根据国内外学者的研究, 按照初步评估和深层研究两方面, 将模型分为经验模型和理论模型进行讨论。经验模型是建立在水压、过滤速度等其他相关参数物理量随回灌时间变化的基础之上, 其适用于特定的水质情况并对回灌条件有很强的依赖性, 如回灌水水质、气候条件、地下水水质等[18]。较经验模型而言, 理论模型更复杂, 能反应堵塞机理, 并且理论模型有更广泛的使用条件。从目前的研究来看, 此类模型一般都是基于浮颗粒在多孔介质中的迁移-沉积过程来描述地下水回灌堵塞的发展。

单蓓蓓[18]通过室内模拟实验, 研究了在水头确定的回灌条件下悬浮颗粒对含水层堵塞的影响, 并根

据悬浮颗粒在多孔介质中的吸附-脱附动力学现象,同时耦合了介质孔隙度、渗透系数和悬浮物颗粒之间的函数关系,建立了如下(1)的颗粒运移-沉积数学模型来预测物理堵塞的发生发展过程。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(nC + C_s) + \frac{\partial}{\partial x}(C \cdot v_x) = 0 & 0 \leq x \leq L, t > 0 \\ \frac{\partial C_s}{\partial t} = \alpha \cdot C - \beta C_s & t > 0 \\ C|_{r=0} = 0.0 & 0 \leq x \leq L \\ C|_{r=0} = 0.0 & 0 \leq x \leq L \\ C|_{x=0} = C_0 & t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $C$  为流体中悬浮物浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_s$  为单位体积多孔介质中的沉积悬浮颗粒量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v_x$  为深度为  $x$  的垂向渗流速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $K_x$  为深度  $x$  处含水介质的垂向渗透系数,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为悬浮颗粒在介质中的吸附、解吸函数( $\text{s}^{-1}$ ),  $v$  为流速( $\text{m}/\text{s}$ )

通过 COMSOL Multi-physics 软件对模型求解,结果表明,该模型的计算结果与试验结果有良好的拟合效果,可以预测物理堵塞的发生及发展过程,同时该模型的敏感度分析结果也反映了悬浮颗粒浓度在回灌过程中是造成物理堵塞的主要因素[18]。

赵军[19]等以孔隙直径不变的单一孔隙和不可压缩的悬浮颗粒以及固体颗粒密度的不变性为模型的基本假设,并根据质量守恒定律和连续性方程建立如下(2)的浓度模型。

$$VC_s - \left\{ VC_s + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( VC_s - D_s A n \frac{\partial C_s}{\partial x} \right) \Delta x \right] \right\} = A \Delta x n \frac{\partial C_s}{\partial t} \quad (2)$$

式中:  $\Delta x$  为模型取长;  $A$  为单位面积;  $n$  为起始孔隙率;  $V$  为流体流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $C_s$  为颗粒浓度;  $D_s$  为分散系数( $\text{m}^2/\text{s}$ )。

根据实际情况,确定悬浮颗粒运移和沉积的半径范围,与边界条件如式(3)结合,得出浓度模型最终的解为(4)

$$\begin{cases} C_s(r, t) = 0 \\ C_s(\infty, t) = 0 \\ C_s(r_w, t) = C_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$C_s(r, t) = C_0 \exp \left[ \alpha(r - r_w) + \sqrt{\frac{\beta}{D_s}}(r - r_w) + 2\beta t \right] \quad (4)$$

式中:  $r_w$  为井的半径;  $r_s$  为施工区域半径。

结果表明,在不同的流速下,悬浮颗粒的运移和沉积浓度不同,且流速越大对应的峰值越大,反之亦然。

Bedrikoversky[20]等通过在交替流速下的实验,并依据实验中悬浮颗粒在多孔介质中的吸附-解析过程建立了如下(5)的数学模型,用以研究悬浮颗粒的最大沉积量与流速间的关系。

$$\begin{cases} J(t_D) = \frac{\Delta p(t_D) U(0)}{U(t_D) \Delta p(0)} \\ J(t_D) = 1 + \beta \phi c^0 \int_0^1 S(x_D, t_D) dx_D \\ \int_0^1 S(x_D, t_D) dx_D = (1 + S_{cr1}) + \left( (t_D - t_{D1}) - \frac{1}{\lambda} \right) (1 - \exp(-\lambda)) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $C$  为颗粒浓度,  $L^{-3}$ ;  $\beta$  为地层损害系数;  $\lambda$  为过滤系数;  $\phi$  为孔隙度;  $t_D$  为时间(T);  $\Delta p$  为压力差;  $J$  为阻抗;  $D$  为流速(L/T);  $S$  为残留颗粒浓度,  $L^{-3}$ 。

研究发现, 当流速由小突然增加到大时, 被吸附的悬浮颗粒会立即释放, 从而使多孔介质渗透性增加; 当流速由大突然减小时, 悬浮颗粒的沉积和多孔介质的渗透性则变化缓慢; 连续不断的进行加速、减速过程可使介质渗透性恢复到初始状态。

### 3.2. 化学堵塞模型的研究现状

由于化学堵塞的机理复杂, 影响因素众多, 并且演化过程也十分复杂, 所以对于化学堵塞模型的研究还有待深入开发。

王子佳[3]利用通过室内实验在化学沉淀生成条件下得到的堵塞层渗透系数随时间变化的公式与等效渗透系数模型(6)相结合, 得到了在化学沉淀作用下悬浮物表面堵塞模型的表达式(7)。

$$K_{CLi} = \begin{cases} K_{Con} + K_i (1 - L_i / L_{CT})^5 & L_i \leq L_{CT} \\ K_{Con} & L_i > L_{CT} \end{cases} \quad (6)$$

$$K_i = 2.436n^3 (d_{17})^2 / (1-n)^2$$

式中:  $K_{CLi}$  为  $t$  时刻堵塞层的渗透系数, m/d;  $K_{Con}$  为形成连续堵塞层时渗透系数, m/d;  $L_{CT}$  为完全堵塞时堵塞层的临界厚度, cm;  $K_i$  为堵塞层初始渗透系数, m/d;  $n$  为孔隙度无量纲;  $d_{17}$  为累积百分含量为 17% 对应的颗粒粒径, mm;  $L_i$  为  $i$  时刻表层悬浮物累积厚度, cm。

$$K_{vi} = \left( \frac{Q_{i-1} \cdot c \cdot t_i}{\rho \cdot A} + \sum_{j=2}^{m+1} M_j \right) / \left( \frac{Q_{i-1} \cdot c \cdot t_i}{\rho \cdot A \cdot K_{con} \cdot \exp(\omega \cdot L_i)} + \sum_{j=2}^{m+1} \frac{M_j}{K_j} \right) \quad (7)$$

式中:  $K_{con}$  为表面堵塞层稳定渗透系数, m/d;  $\omega$  为堵塞层衰减常数, 无量纲;  $K_j$ : 砂柱第  $j$  层渗透系数, m/d;  $M_j$ : 第  $j$  层厚度, cm;  $t_i$  为  $i-1$  到  $i$  时刻时间间隔, h;  $c$  为悬浮物浓度, g/L;  $A$  为过水断面面积,  $m^2$ ;  $\rho$  为悬浮物密度, g/L。

该模型较好的模拟了有化学沉淀干扰下的悬浮物堵塞过程, 在已知回灌水水质特征、入渗介质特征以及悬浮物粒径和含量的情况下, 可以预测回灌过程中悬浮物的发展过程和发生完全堵塞的时间。

Magnico[21]运用 Lagrangian 的方法, 通过质量守恒方程与化学反应速率和动力学相结合, 建立了有关反应均质微裂隙介质堵塞过程的方程(8)。

$$\begin{cases} U(x,t) = -\frac{K(x,t)}{\eta} \frac{\partial}{\partial x} P(x,t) \\ \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} + U(x,t) \frac{\partial}{\partial x} C(x,t) = R(x,t) \\ \frac{\partial}{\partial t} C_{(R)}[t, C_0] = \frac{1}{S_{(R)}^m(t, S_0)} \frac{[C_{eq}^n - C_{(R)}^n[t, C_0]]}{\tau_c} = R_{(R)}[t, C_0] \\ \frac{\partial}{\partial t} Pr_{(R)}[t, C_0] = -\frac{1}{n} (C_0 - C_{eq}) \frac{17}{\rho} R_{(R)}[t, C_0] \frac{S_{(R)}[t, C_0]}{S_0} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $U(x,t)$  为欧拉速度 L/T;  $K(x,t)$  为局部渗透率  $L^2$ ;  $P(x,t)$  为当地大气压  $M/T^2/L^3$ ;  $C(x,t)$  为溶质浓度  $mol/L^3$ ;  $R(x,t)$  为水相和固相之间的化学通量;  $R_{(R)}[t, C_0]$  为水相和固相之间的搅拌的反应器中的化学通量,  $mol/L^3/T$ ;  $C_{(R)}[t, C_0]$  为搅拌的反应器中的溶质浓度,  $mol/L^3$ ;  $S_{(R)}[t, S_0]$  为搅拌反应器横截

面,  $L^2$ ;  $\text{Pr}_{(R)}[t, C_0]$  为搅拌反应器沉淀浓度,  $\text{mol/L}^3$ ;  $C_{eq}$  为溶质的平衡浓度,  $\text{mol/L}^3$ ;  $n$  为动力学级数;  $\tau_c$  为特性动力学时间, T;  $S_0$  为微裂缝截面积,  $L^2$ ;  $\rho$  为沉淀密度,  $\text{M/L}^3$ ;  $\eta$  为流体的动力粘度,  $\text{M/L/T}$ 。

通过该方程的模拟分析可知, 流速增加和介质表面积减少, 可以控制介质的堵塞情况, 化学和水力不平衡对均质微裂隙介质的堵塞有一定影响, 且该介质的堵塞动力学与化学反应速率和孔隙率有关。

### 3.3. 生物堵塞模型的研究现状

Taylor[17]等假定多孔介质表面上的微生物是以生物膜的形式存在的, 生物膜厚度相等且向同性生长, 从而推导出生物膜厚度与渗透率关系的模型, 即 Taylor 模型:

$$k_b = \frac{kn_b\beta^2 L_f^2}{8} \left(\frac{L_f}{R}\right)^{2\lambda} \cdot \left[ I_3\left(\frac{R}{L_f} - 1, \lambda\right) - I_3\left(\frac{r_{0b}}{L_f}, \lambda\right) \right]^2 \quad (9)$$

$$\text{其中: } \beta = \lambda n_0 \left[ 1 - \left(\frac{r_0}{R}\right)^\lambda \right]^{-1}$$

$$I_3(u, \lambda) = \int_0^u \frac{x^3}{(1+x)^{3-\lambda}} dx$$

式中:  $k_b$  为生物膜影响下的渗透率;  $k$  为无量纲常数;  $n_0$ 、 $n_b$  分别为生物膜形成前多孔介质孔隙率和在生物膜影响下的多孔介质孔隙率;  $L_f$  为生物膜厚度;  $r$ 、 $R$  分别为孔隙的最小和最大半径;  $r_{0b}$  为在生物膜影响下孔隙的最小半径;  $\lambda$  为孔隙大小分布指数。

杨靖, 叶淑君[22]等利用此模型, 并通过石英砂箱进行室内渗流实验, 研究混合菌群在营养物质充足的情况下微生物的生长情况和生物膜对多孔介质渗透性的影响, 结果表明, 颗粒表面生物量大的区域比生物量小的区域的渗透率较初始值减少的多, 多孔介质渗透性受微生物生长和生物膜的影响, 即生物量越大, 多孔介质渗透率越低, 且微生物在颗粒表面上的分布是不均匀, 不连续的。

Seki 模型[23]是 Seki 基于多孔介质微观孔隙理论分析而建立的土壤生物堵塞模型, 该模型认为土壤颗粒表面的微生物以菌落形式存在, 该模型为:

$$\frac{K_b}{K_0} = \left\{ 1 - \left[ \left( \frac{\partial \cdot e}{1-e} + 1 \right)^{1/3} - 1 \right] \left[ \left( \frac{\tau}{1-e} \right)^{1/3} - 1 \right] \right\}^3 \quad (10)$$

式中:  $K_b$ 、 $K_0$  为介质某时刻、初始时刻渗透速率;  $e$  为介质孔隙比;  $\tau$  为介质颗粒形状因子;  $\alpha$  为单位体积孔隙中堵塞物体积所占比例。

路莹、杜新强[24]等人基于微生物生长模型与多孔介质渗透理论, 并运用 Seki 模型, 对地下水回灌过程中入渗途径上微生物堵塞情况进行预测, 结果显示, 随着入渗深度的增加, 微生物堵塞情况降低, 即生物堵塞主要发生在近地表层。

在实际情况下, 微生物的生长形式较为复杂, 一般更接近生物膜和菌落的混合情况。在应用 Taylor 和 Seki 模型时, 生物膜的厚度和菌落的厚度分别是这两种模型的重要参数, 但这两种数据都较难获得。所以模型应用起来较难。而 Clement 模型[25]不需要考虑生物膜和菌落的厚度, 只需要通过微生物量体积来预测多孔介质的堵塞情况, 该模型为:

$$\frac{K_b}{K_0} = \left( 1 - \frac{n_f}{n_0} \right)^{9/16} \quad (11)$$

式中： $K_b$ 为多孔介质在微生物影响下的渗透系数； $K_0$ 为多孔介质初始渗透系数； $n_f$ 为多孔介质表面微生物所占的体积比； $n_0$ 为多孔介质初始孔隙率。

江林[26]为了探究微生物对可渗透反应渗透性能的影响，将 Clement 模型与微生物 PRB 堵塞耦合模型合并，在实验前期(微生物生长对数期)采用 Clement 模型，实验中后期(微生物生长稳定期和衰亡期)采用微生物 PRB 堵塞耦合模型，并将计算的模拟值与室内柱体实验测得的实际值进行比较，发现此种模型的结合能更好的模拟生物堵塞的规律。

目前，Taylor 模型、Seki 模型和 Clement 模型是生物堵塞预测方面应用最为广泛的模型，这三种模型分别通过生物膜厚度、菌落厚度和微生物体积来预测堵塞情况，但不够全面，使模型预测存在偏差，还需要进一步开发和研究。

## 4. 结语

### 4.1. 解决方法

地下水源热泵回灌堵塞主要为物理堵塞、化学堵塞和生物堵塞，因此可从该三方面考虑解决地下水回灌堵塞问题，进而可提高地下水源热泵回灌的效率，从而可改善有地下水源热泵造成的水体污染、地面下降等问题。物理堵塞主要为悬浮物堵塞，因此可以通过控制回灌井中的悬浮颗粒含量来降低回灌堵塞情况[1]；化学堵塞主要为水中离子与矿物质反应而生成化学沉淀，可通过调节水的 PH 值、控制水温与水体中溶解氧的含量进行来降低堵塞情况；生物堵塞是由于水中生物繁殖过快而形成生物膜，造成介质孔隙堵塞，可通过去除水中有机质或进行预消毒杀死微生物来预防生物堵塞[1]。

### 4.2. 展望

目前，国内外学者对地下水源热泵回灌堵塞模型的研究主要为单因素模型，忽略了在回灌过程中其他因素对堵塞的影响。在以后的研究中可考虑多因素条件，建立多因素堵塞预测模型对预防和解决地下水源热泵回灌堵塞问题具有重要意义。

前文所述，地下水源热泵回灌堵塞预测模型普遍为单个模型，部分模型久未改进，预测地下水源热泵回灌堵塞情况时会存在偏差。针对以上问题，可考虑目前较新较热门的数学模型，比如：灰色预测模型、系统动力学模型等，联合应用增加预测模型的准确度。增加和研发新型堵塞预测模型将成为预测和改善地下水源热泵回灌堵塞问题的重要方向。

## 参考文献 (References)

- [1] 倪龙, 封家平, 马最良. 地下水源热泵的研究现状与进展[J]. 建筑热能通风空调, 2004, 23(2): 26-31.
- [2] 惠一峰. 地下水源热泵系统水源侧故障预测诊断研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [3] 王子佳. 城市雨洪水地下回灌过程中悬浮物堵塞规律的实验研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [4] McDowell, B.L.M., Hunt, J.R. and Sitar, N. (1986) Particle Transport through Porous Media. *Water Resources Research*, **22**, 1901-1921. <https://doi.org/10.1029/WR022i013p01901>
- [5] Pavelic, P., Dillon, P.J. and Barry, K.E. (1998) Well Clogging Effects Determined from Mass Balances and Hydraulic Response at a Storm Water ASR Site. *Third International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*, Amsterdam, 21-25 September 1998, 61-66.
- [6] Vigneswaran, S. and Suazo, R.B. (1987) A Detailed Investigation of Physical and Biological Clogging during Artificial Recharge. *Water, Air, and Soil Pollution*, **35**, 119-140. <https://doi.org/10.1007/BF00183848>
- [7] 刘雪玲, 朱佳玲. 新近系砂岩地热回灌堵塞问题的探讨[J]. 水文地质工程地质, 2009(5): 138-141.
- [8] Pavelic, P., Mucha, M., Dillon, P., et al. (2005) Laboratory Column Study on the Effect of Ponding Depth on Infiltration Rate during SAT. *5th International Symposium, Aquifer Recharge*, Berlin, 11-16 June 2005, 6.

- [9] Pavelic, P., Mucha, M., Dillon, P.J., *et al.* (2011) Laboratory Assessment of Factors Affecting Soil Clogging of Soil Aquifer Treatment Systems. *Water Research*, **45**, 3153-3163. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.027>
- [10] 康然然. 沈阳城区水源热泵回灌堵塞机理及防治研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
- [11] 杜新强, 冶雪艳, 路莹, 等. 地下水人工回灌堵塞问题研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(8): 973-980.
- [12] Pavelic, P., Vanderzalm, J., Dillon, P.J., *et al.* (2007) Assessment of the Potential for Well Clogging Associated with Salt Water Interception and Deep Injection at Chowilla, SA. Final Report to Department of Water, land, Biodiversity and Conservation.
- [13] 汤亚伯, 李君加. 回灌井中铁、锰的暂时性寓集机理初探[J]. 上海环境科学, 1986(3): 34-36.
- [14] 李晓. 天然河床渗滤取水技术研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- [15] Baveye, P., Vandeevivre, P., Hoyle, B.L., *et al.* (1998) Environmental Impact and Mechanisms of the Biological Clogging of Saturated Soils in Acquirer Materials. *Critical Reviews in Environment Science & Technology*, **23**, 123-191. <https://doi.org/10.1080/10643389891254197>
- [16] 路莹. 北京平谷地区雨洪水地下回灌堵塞机理分析与模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [17] Taylor, S.W., Milly, P.C.D. and Jaffe, P.R. (1990) Biofilm Growth and the Related Changes in the Physical-Properties of a Porous-Medium.2.Permeability. *Water Resource Research*, **26**, 2162-2169.
- [18] 单蓓蓓. 含水层物理堵塞的回灌实验与数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [19] 赵军, 张呈远, 刘泉声. 水源热泵回灌井悬浮颗粒运移和沉积物理特性试验模型研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2014, 33(2): 257-263.
- [20] Bedrikovetsky, P., Zeinijahromi, A., Siqueira, F.D., *et al.* (2012) Particle Detachment under Velocity Alternation during Suspension Transport in Porous Media. *Transport in Porous Media*, 91, 173-197. <https://doi.org/10.1007/s11242-011-9839-1>
- [21] Magnico, P. (2000) Impact of Dynamic Processes on the Coupling between Fluid Transport and Precipitate Deposition. *Chemical Engineering Science*, **55**, 4323-4338. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00047-6)
- [22] 杨靖, 叶淑君, 吴吉春. 生物膜对饱和多孔介质渗透性影响的实验和模型研究[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1364-1371.
- [23] Seki, K. and Miyazaki, T. (2001) A Mathematical Model for Biological Clogging of Uniform Porous Media. *Water Resources Research*, **37**, 2995-2999. <https://doi.org/10.1029/2001WR000395>
- [24] 路莹, 杜新强, 范伟, 等. 地下水人工回灌过程中微生物堵塞的预测[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(1): 77-80.
- [25] Clement, T. Hooker, B. and Skeen, R. (1996) Macroscopic Models for Predicting Changes in Saturated Porous Media Properties Caused by Microbial Growth. *Groundwater*, **34**, 934-942. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1996.tb02088.x>
- [26] 江林. 可渗透反应墙渗透性能变化分析与数值模拟及防治措施的研究[D]: [硕士学位论文]. 芜湖: 安徽工程大学, 2015.



**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[aep@hanspub.org](mailto:aep@hanspub.org)